

Tesis doctoral

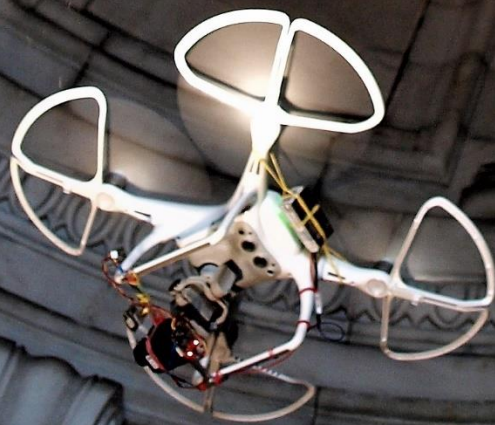
# EVALUACIÓN NO DESTRUCTIVA APLICADA A LA CONSERVACIÓN DEL PATRIMONIO ARQUITECTÓNICO EN LOS ESTADOS UNIDOS DE AMÉRICA

Autora: Berta A. de Miguel Alcalá

Directores: Dra. Camilla Mileto y Dr. Fernando Vegas López-Manzanares

Nueva York-Valencia, abril 2017

Escuela Técnica Superior de Arquitectura, Universitat Politècnica de València  
Programa de Doctorado en Arquitectura, Edificación, Urbanística y Paisaje



UNIVERSITAT  
POLITÈCNICA  
DE VALÈNCIA



# EVALUACIÓN NO DESTRUCTIVA APLICADA A LA CONSERVACIÓN DEL PATRIMONIO ARQUITECTÓNICO EN LOS ESTADOS UNIDOS DE AMÉRICA

Tesis doctoral

Autora:

Berta A. de Miguel Alcalá

Directores:

Dra. Camilla Mileto

Dr. Fernando Vegas López-Manzanares

Escuela Técnica Superior de Arquitectura, Universitat Politècnica de València  
Programa de Doctorado en Arquitectura, Edificación, Urbanística y Paisaje



UNIVERSITAT  
POLITÈCNICA  
DE VALÈNCIA

Nueva York-Valencia, abril 2017



Citación sugerida: de Miguel Alcalá, Berta A. (2017). *Evaluación no destructiva aplicada a la conservación del patrimonio arquitectónico en los Estados Unidos de América* (Tesis doctoral). Universidad Politécnica de Valencia, Nueva York-Valencia.

Imagen de portada: Evaluación con video y termografía del monumento S&S, Manhattan, New York (2016). (Créditos: Berta A. de Miguel Alcalá)



*A todos aquellos que tuvieron que escuchar “lo siento, hoy no puedo”*

*Durante un periodo de diecisiete años el Woolworth Building ha estado mirando por encima del hombro a todos los rascacielos neoyorquinos. [...] se hacía uno transportar a su observatorio, y desde allí, por la módica suma de cincuenta centavos, podía hacerse la ilusión de que dominaba por completo la gran ciudad.*

*Nadie se atrevía con el Woolworth Building, cuya dictadura duró, como digo, diecisiete años, y el formidable armatoste empezaba ya a adquirir en el tiempo una importancia que sólo le correspondía en el espacio, y a presumir, como si dijéramos, de pirámide de Egipto, esto es, de cosa definitiva y eterna; pero lo que no ocurrió ni una vez en diecisiete años, ha ocurrido tres veces en poco más de uno. Primero fue el Manhattan Company Building, que con sus 71 pisos, se elevó sobre el Woolworth. Luego el Chrysler llegó a los 77, y ahora acaba de inaugurarse el Empire, con 85, sin contar los dos subterráneos ni los dieciséis de la torre. Y he aquí cómo, de la noche a la mañana, ha sido puesto en ridículo el matón. No ya cincuenta centavos. Ni diez, que es el precio máximo a que vende sus mercancías la Compañía Woolworth -los Woolworth Stores equivalen aquí a nuestras tiendas de todo a sesenta y cinco-, daría hoy nadie por visitarlo. En cambio, el Empire ha hecho cien mil dólares el domingo siguiente a su inauguración vendiendo a un dólar los billetes para subir a su observatorio. [...] Con unas tijeras de acero cromoníquel, que es el metal de que está revestido el edificio, una niña de doce años, cortó la cinta ...*

Julio Camba (1932). “La ciudad automática”



## AGRADECIMIENTOS

*Agradezco la ayuda recibida durante esta investigación por parte del personal del archivo The Guastavino Fireproof Construction Company/George Collins architectural records and drawings en la biblioteca Avery de la Universidad de Columbia, especialmente a Janet Parks, durante la investigación desde el año 2012 hasta el 2016; al personal de la biblioteca Stephen A. Schwarzman Building de la New York Public Library en Nueva York durante mis visitas en los años 2011 y 2012; al personal de la Four Borough Preservation Alliance Corporation en Queens por su dedicación y ayuda; a Jan Anderson por su ejemplo y por su inestimable trabajo y dedicación en Restore; a Vicente Galvañ por afrontar el reto de localizar a Guastavino y lanzarme el guante; a todos esos expertos por su inspiración, consejo y ejemplo: Sarah Cole, Myun Song, Mike Schuller, Evan Kopelson, Kristen Olson, Kelly Streeter...; a todos los futuros colaboradores de la herramienta [www.guastavinomap.org](http://www.guastavinomap.org) porque sólo entre todos completaremos el catálogo del legado de Guastavino.*

*Gracias a mi familia, por su apoyo e infinitos “ánimo”. Gracias a mi madre, Juanjo, Clara y Emi por cruzarse el Atlántico para regalarme tiempo en este proyecto. Gracias a mi padre por ayudarme con sus poderes mágicos.*

*Inmensas y especiales gracias a varias personas sin las cuales este proyecto no existiría: a Vertical Access, en especial a Kent Diebolt, por creer en mí y apoyarme incondicionalmente; a GBG, especialmente a Alex Bell, por su confianza, sus conocimientos y generosidad; a Gabriel Pardo por TODO, SIEMPRE.*

*Finalmente, agradezco con admiración la labor de mis tutores, Camilla Mileto y Fernando Vegas, por ser fuente inagotable de inspiración, por su apoyo entusiasta, sus horas de trabajo leyendo y releendo los capítulos, sus fuerzas, consejos, sugerencias, notas... Por lo mucho que he aprendido en este proceso, que se ha convertido en una etapa de mi vida.*

*Gracias*

*Thank you*





## RESUMEN

La presente tesis doctoral recoge un trabajo de investigación teórico-práctico que analiza las técnicas y métodos de reconocimiento y evaluación no destructivos (END) más utilizados en el campo de la conservación del patrimonio arquitectónico en Estados Unidos. La investigación abarca el estudio del funcionamiento y aplicaciones de las diferentes técnicas y métodos, con el fin de compararlos para reconocer sus posibilidades y limitaciones, individualmente y en conjunto.

La mayor parte del patrimonio arquitectónico estadounidense comparte dos características: fue construido después de 1850 y fue construido en altura. Pese a la especulación inmobiliaria y a que los movimientos pro-conservación son relativamente jóvenes y débiles, existe todavía un vasto patrimonio arquitectónico, especialmente en las grandes ciudades como Chicago o Nueva York. Ese patrimonio envejece y requiere de procesos de conservación, adaptación y restauración, que constituyen un importante mercado. Los estudios previos para determinar el estado real del elemento arquitectónico, son el primer capítulo de dichos procesos. La evaluación no destructiva se incluye dentro de los estudios previos y constituye una parte significativa y habitualmente imprescindible. Existen otros dos casos en los que el mercado demanda evaluación no destructiva aplicada al patrimonio arquitectónico: conocer el estado real del edificio en la compraventa de inmuebles y confirmar la efectividad de las intervenciones de restauración.

Dentro de las tipologías constructivas estadounidenses, la investigación se focaliza en la técnica constructiva de la bóveda tabicada de Guastavino, concretamente en la detección de pérdida de adherencia entre capas de ladrillo. Rafael Guastavino Moreno fue un arquitecto español que emigró a Estados Unidos junto a su hijo Rafael Guastavino Expósito en 1881 e importó y patentó la bóveda tabicada. La compañía que fundaron, participó en la construcción de espacios abovedados en más de 1.000 edificios en Estados Unidos, muchos de los cuales constituyen una parte del patrimonio arquitectónico estadounidense actual.

La tesis consta de un primer bloque teórico, en el que se analizan las diferentes técnicas de END ejemplificándolas con aplicaciones reales. Un segundo bloque incluye cinco casos de estudio *in situ* en los que se muestran combinaciones de técnicas. El tercer bloque consiste en la aplicación experimental de END a una



bóveda tabicada de Guastavino construida en laboratorio, con el fin de determinar la capacidad de diferentes métodos, para detectar la pérdida de adherencia entre capas de ladrillo.

En definitiva, objetivo principal de esta tesis es contestar dos cuestiones: ¿qué método de END es más apropiado para qué casos en el patrimonio arquitectónico estadounidense? Y, ¿es posible detectar mediante los métodos de END utilizados en Estados Unidos, la pérdida de adherencia entre hojas de ladrillo en bóvedas tabicadas con acceso únicamente por el trasdós de las bóvedas?

**Palabras clave:** Evaluación no destructiva, geo-radar, impacto-eco, termografía, fotogrametría digital, ondas electromagnéticas, ondas acústicas, ultrasonidos, TPAS, endoscopía, Guastavino, conservación.

## ABSTRACT

This thesis investigation, approached from theoretical and practical perspectives, analyzes the most common nondestructive methods and techniques (NDE) applied in the field of architectural preservation in the United States of America. The research covers the study of the performance and common applications of the different nondestructive techniques, to compare them and recognize their possibilities and limitations, both individually and in combination with others.

Most of the north American architectural heritage shares two characteristics: it was built after 1850 and it was built in height. Despite real estate speculation and the fact that preservationist movements are relatively young and weak, there is still a vast standing architectural heritage, especially in large cities such as Chicago or New York. This aging architectural heritage requires conservation, adaptation and restoration processes, which constitute an important market. Condition assessment surveys of the architectural element are the first step in those processes. Nondestructive evaluation is an important, when not essential, part of those condition assessment campaigns. There are two other cases in which the US market demands nondestructive evaluation applied to architectural heritage: gathering information about the existing building for real estate investors and confirming the effectiveness of restoration interventions (quality control).

The practical research focuses on the Guastavino vault, a construction technique common in the United States; more precisely, it focuses on the detection of delamination in between layers of brick. Rafael Guastavino Moreno was a Spanish architect that emigrated to America with his son, Rafael Guastavino Expósito, in 1881. They imported and patented the timber vault; the company that they founded built tiled-vaulted spaces in more than 1,000 buildings in the United States, most of which are part of the current north American architectural heritage.

In this thesis, the first block analyzes different techniques and includes examples of real applications. A second block covers five *in situ* case studies showing combinations of different techniques. The third block consists of an experimental application of NDE to a Guastavino vault built in a laboratory; the objective of this

research path and the basis of this pilot study was to evaluate the capabilities of different NDE methods to detect delamination between layers of brick in timber vaults.

The ultimate goal of this research is to answer two questions: Which of the most common NDE methods used in the United States is most appropriate for which cases, in the field of preservation? And, is it possible to detect delamination between brick layers in Guastavino vaults with access exclusively from above?

**Key words:** Non-destructive evaluation, GPR, impact-echo, thermography, digital photogrammetry, electromagnetic waves, acoustic waves, ultrasonics, endoscopy, TPAS, Guastavino, preservation.



## RESUM

La present tesi doctoral recull un treball de recerca teoricopràctic que analitza les tècniques i mètodes de reconeixement i avaluació no destructiva (END) més utilitzats en el camp de la conservació del patrimoni arquitectònic a Estats Units. La investigació comprèn l'estudi del funcionament i aplicacions de les diferents tècniques, per tal de comparar-los i reconèixer les seves possibilitats i limitacions, individualment i en conjunt.

La major part del patrimoni arquitectònic nord-americà comparteix dues característiques: va ser construït després de 1850 i va ser construït en alçada. Malgrat l'especulació immobiliària i el fet que els moviments pro-conservació són relativament joves i febles, hi ha encara un vast patrimoni arquitectònic, especialment a les grans ciutats com Chicago o Nova York. Aquest patrimoni envelleix i requereix de processos de conservació, adaptació i restauració, que constitueixen un important mercat. Els estudis previs es realitzen abans de un projecte de restauració per a determinar l'estat real de l'element arquitectònic. Les tècniques d'avaluació no destructiva s'inclouen dins dels estudis previs i constitueix una part significativa i habitualment imprescindible. Hi ha altres dos casos en els que el mercat demanda avaluació no destructiva aplicada al patrimoni arquitectònic: per una banda, conèixer l'estat real de l'edifici en la compravenda d'immobles, i per l'altra banda, confirmar l'efectivitat de les intervencions de restauració.

Dins de les tipologies constructives nord-americanes, aquesta investigació es focalitza en la tècnica constructiva de la volta de Guastavino o volta catalana, i concretament en la detecció de pèrdua d'adherència entre les capes de rajoles, una lesió comú en aquestes voltes. Rafael Guastavino Moreno va ser un arquitecte espanyol que va emigrar als Estats Units al costat del seu fill Rafael Guastavino Expósito en 1881, important la tècnica mediterrània de la volta catalana. Van fundar una companyia que va participar en la construcció d'espais de volta en més de 1.000 edificis als Estats Units, molts dels quals constitueixen una part del patrimoni arquitectònic nord-americà actual.

La tesi consta d'un primer bloc teòric, en el qual s'analitzen les diferents tècniques d'avaluació no destructiva exemplificant-les amb aplicacions reals. Un segon bloc inclou cinc casos d'estudi in situ en els quals es mostren combinacions d'aquestes

tècniques. El tercer bloc consisteix en l'aplicació experimental de END a una volta de Guastavino construïda en laboratori, amb la finalitat de determinar la capacitat de diferents mètodes per detectar la pèrdua d'adherència entre capes de rajoles.

En definitiva, l'objectiu principal d'aquesta tesi és contestar dues qüestions: ¿Quin mètode de END és més apropiat per a quins casos en el patrimoni arquitectònic nord-americà? I, ¿Es possible detectar mitjançant els mètodes de END, la pèrdua d'adherència entre capes de rajoles en voltes de Guastavino amb accés únicament per l'extradós?

**Paraules clau:** Avaluació no destructiva, geo-radar, impacte-eco, termografia, fotogrametria digital, ones electromagnètiques, ones acústiques, ultrasons, TPAS, endoscòpia, Guastavino, conservació del patrimoni.

# CONTENIDOS

---

<b>1.</b>	<b>INTRODUCCIÓN</b>	<b>17</b>
1.1.	Justificación	19
1.2.	Objetivos y alcance	21
1.3.	Metodología	23
1.4.	Contexto – Estado del arte	34
1.4.1.	Evaluación no destructiva en Estados Unidos	35
1.4.2.	Patrimonio arquitectónico en Estados Unidos	40
1.4.2.1.	Tipologías, materiales y sistemas constructivos.	41
1.4.2.2.	El patrimonio arquitectónico de Rafael Guastavino Moreno y Rafael Guastavino Expósito en los Estados Unidos: La técnica constructiva de la bóveda tabicada de Guastavino	66
1.4.2.3.	Criterios legales del patrimonio arquitectónico estadounidense	83
<b>2.</b>	<b>TÉCNICAS Y MÉTODOS DE RECONOCIMIENTO Y EVALUACIÓN NO DESTRUCTIVA</b>	<b>87</b>
2.1.	Introducción	87
2.2.	Fases previas a la inspección <i>in situ</i> . Planificación de la evaluación.	89
2.3.	Métodos instrumentados de inspección visual. Técnicas visuales de análisis y documentación.	92
2.3.1.	Introducción	92
2.3.2.	Endoscopía y otros sistemas ópticos	94
2.3.2.1.	Introducción	94
2.3.2.2.	Antecedentes históricos	95
2.3.2.3.	Funcionamiento e Instrumentación	96
2.3.2.4.	Otros Sistemas	99
2.3.2.5.	Representación de resultados	100
2.3.2.6.	Aplicaciones en patrimonio construido	101
2.3.2.7.	Ventajas y limitaciones	101
2.3.3.	Nuevas técnicas de fotogrametría	103
2.3.3.1.	Introducción	103
2.3.3.2.	Antecedentes históricos	105



2.3.3.3.	Funcionamiento	116
2.3.3.4.	Representación de resultados	123
2.3.3.5.	Instrumentación	123
2.3.3.6.	Aplicaciones en patrimonio construido	124
2.3.3.7.	Ventajas y limitaciones	126
2.3.4.	Tablet PC Annotation System -TPAS-	128
2.3.4.1.	Introducción	128
2.3.4.2.	Antecedentes históricos	129
2.3.4.3.	Funcionamiento	134
2.3.4.4.	Representación de resultados	143
2.3.4.5.	Instrumentación	146
2.3.4.6.	Aplicaciones en patrimonio construido	146
2.3.4.7.	Ventajas y limitaciones	147
2.4.	Métodos basados en la propagación de ondas electromagnéticas	149
2.4.1.	Termografía infrarroja (IRT)	158
2.4.1.1.	Introducción	158
2.4.1.2.	Antecedentes históricos	159
2.4.1.3.	Funcionamiento	160
2.4.1.4.	Representación de resultados	167
2.4.1.5.	Instrumentación	168
2.4.1.6.	Aplicaciones	172
2.4.1.7.	Ventajas y limitaciones de la técnica de IRT	180
2.4.2.	Geo-radar (Ground Penetrating Radar -GPR-)	182
2.4.2.1.	Introducción	182
2.4.2.2.	Antecedentes históricos	183
2.4.2.3.	Funcionamiento	187
2.4.2.4.	Equipos, instrumentación	190
2.4.2.5.	Representación de resultados	196
2.4.2.6.	Aplicaciones	208
2.4.2.7.	Ventajas y limitaciones de la técnica del GPR	218
2.4.2.8.	GPR versus rayos X	219
2.5.	Métodos basados en la propagación de ondas acústicas	222
2.5.1.	Impacto-Eco (Impact-echo, IE)	234
2.5.1.1.	Introducción	234
2.5.1.2.	Antecedentes históricos	235
2.5.1.3.	Funcionamiento	237
2.5.1.4.	Representación de resultados	239
2.5.1.5.	Instrumentación	242
2.5.1.6.	Aplicaciones en patrimonio construido	243
2.5.1.7.	Ventajas y limitaciones de la técnica del IE	250

2.5.2.	Ultrasonidos (Ultrasonic Pulse Velocity-UPV-)	251
2.5.2.1.	Introducción	251
2.5.2.2.	Antecedentes históricos	252
2.5.2.3.	Funcionamiento	254
2.5.2.4.	Representación de resultados	261
2.5.2.5.	Instrumentación	263
2.5.2.6.	Aplicaciones en patrimonio construido	272
2.5.2.7.	Ventajas y limitaciones de la técnica del UPV	278
2.6.	Métodos facilitadores de END	281
2.6.1.	Vehículos aéreos no tripulados (Unmanned Aerial Vehicles -UAV-)	282
2.6.1.1.	Introducción y contexto	282
2.6.1.2.	Tipos de UAVs	288
2.6.1.3.	Instrumentación	291
2.6.1.4.	Aplicaciones en patrimonio construido	293
2.6.1.5.	Ventajas y limitaciones del uso de UAS	298
2.6.2.	Acceso con sistemas industriales de cuerdas (Industrial Rope Access -IRA-)	300
2.6.2.1.	Introducción	300
2.6.2.2.	Funcionamiento	302
2.6.2.3.	END que puede ejecutarse con IRA	306
2.6.2.4.	Ventajas y limitaciones de IRA para END	307
<b>3.</b>	<b>CASOS DE ESTUDIO</b>	<b>310</b>
3.1.	Caso de Estudio: Edificio de la confederación	310
	Localización	310
	Descripción del edificio y antecedentes	310
	Objetivos de la evaluación	311
	Investigación <i>in situ</i>	311
	Calibración	312
	Procesado de la señal	313
	Resultados	315
3.2.	Caso de Estudio: Grants Tomb	317
	Localización	317
	Descripción del edificio y antecedentes	317
	Objetivos de la evaluación	318
	Investigación <i>in situ</i>	318
	Resultados	320
3.3.	Caso de Estudio: Cúpula de Guastavino en Brooklyn	322
	Localización	322
	Descripción del edificio y antecedentes	322

Objetivos de la evaluación	322
Investigación <i>in situ</i>	322
Resultados	323
3.4. Caso de Estudio: Edificio WFB	330
Localización	330
Descripción del edificio y antecedentes	330
Objetivos de la evaluación	331
Investigación <i>in situ</i>	332
Resultados	332
3.5. Caso de Estudio: Monumento S&S	339
Localización	339
Descripción del edificio y antecedentes	339
Objetivos de la evaluación	341
Investigación <i>in situ</i>	341
Resultados	344
<b>4. APLICACIÓN EXPERIMENTAL DE END A UNA BÓVEDA DE GUASTAVINO</b>	<b>350</b>
<hr/>	
4.1. Introducción	350
4.2. Geo-radar ( <i>Ground Penetrating Radar -GPR-</i> )	357
4.2.1. Objetivos	357
4.2.2. Metodología	357
4.2.3. Equipo	362
4.2.4. Resultados	363
4.2.5. Reflexiones	376
4.3. Termografía infrarroja ( <i>Infrared Thermography -IRT-</i> )	378
4.3.1. Objetivos	378
4.3.2. Metodología	378
4.3.3. Equipo	383
4.3.4. Resultados	386
4.3.5. Reflexiones	405
4.4. Impacto-eco ( <i>Impact-Echo -IE-</i> )	409
4.4.1. Objetivos	409
4.4.2. Metodología	409
4.4.3. Equipo	416
4.4.4. Resultados	417
4.4.5. Reflexiones	434
4.5. Ultrasonidos ( <i>Ultrasound Pulse Velocity -UPV-</i> )	437
4.5.1. Objetivos	437
4.5.2. Metodología	437

4.5.3.	Equipo _____	443
4.5.4.	Resultados _____	444
4.5.5.	Reflexiones _____	448
<b>5.</b>	<b>CONCLUSIONES Y FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN</b>	<b>450</b>
5.1.	Versión en castellano _____	450
5.2.	Versión en inglés _____	468
<b>6.</b>	<b>ABREVIACIONES Y ACRÓNIMOS</b>	<b>484</b>
<b>7.</b>	<b>GLOSARIO Y TABLAS DE CONVERSIÓN</b>	<b>487</b>
7.1.	Glosario _____	487
7.2.	Tablas de conversión de unidades _____	490
<b>8.</b>	<b>REFERENCIAS</b>	<b>492</b>
<b>9.</b>	<b>APÉNDICE</b>	(MATERIAL AUDIOVISUAL EN SOPORTE DIGITAL)



# 1. INTRODUCCIÓN

---

Esta tesis comenzó con el interés de estudiar las técnicas no destructivas actualmente más utilizadas en el campo de la conservación del patrimonio arquitectónico en Estados Unidos, sus aplicaciones y su funcionamiento con el fin de compararlas para reconocer las posibilidades, potenciales usos y limitaciones de cada una de ellas por separado y en conjunto.

Tras un estudio pormenorizado del funcionamiento de las técnicas más importantes y de su aplicación, la investigación se focaliza en una técnica constructiva en concreto, la bóveda tabicada o bóveda de Guastavino. A tal efecto se desarrolló una herramienta digital interactiva para localizar bóvedas de este tipo y se construyó en Nueva York una pequeña bóveda a la que se le aplicaron diferentes metodologías de evaluación no destructiva.

El objetivo de esta tesis es proveer de información útil para la aplicación efectiva de métodos de evaluación no destructiva al patrimonio arquitectónico de los Estados Unidos y especialmente a la técnica constructiva de la bóveda tabicada. Las dos preguntas que responden esta tesis son: ¿qué método de END es más apropiado para qué casos en el patrimonio arquitectónico estadounidense? Y, ¿es posible detectar mediante los métodos de END utilizados en Estados Unidos, la pérdida de adherencia entre hojas de ladrillo en bóvedas tabicadas con acceso únicamente por el trasdós de las bóvedas?

La tesis comienza con una introducción la END y al campo del patrimonio arquitectónico estadounidense; el capítulo incluye una introducción a la historia de las bóvedas de Guastavino en los Estados Unidos. El capítulo 2 estudia cada uno de los métodos de evaluación no destructivos más utilizados en Estados Unidos. El capítulo comienza con una reflexión sobre las diferentes formas de clasificar los métodos y la importancia de la planificación de la evaluación. En esta tesis, una primera clasificación divide los métodos en “Métodos instrumentados de inspección visual”, “Métodos basados en la propagación de ondas

electromagnéticas” y “Métodos basados en la propagación de ondas acústicas”. Este capítulo se cierra con el apartado “Métodos facilitadores de NDE”. Cada uno de los subcapítulos sigue un índice similar que incluye: “Introducción”, “Antecedentes históricos”, “Funcionamiento”, “Equipos, instrumentación”, “Aplicaciones”, “Representación de resultados” y “Ventajas y limitaciones”. El objetivo de este capítulo es ofrecer un análisis en profundidad de los principios de funcionamiento de cada uno de los métodos, cuáles son las propiedades físicas y mecánicas que afectan su aplicación, la representación gráfica de los resultados, sus aplicaciones, etc. El tercer capítulo recoge casos de estudio en los que se aplican diferentes técnicas de END. El capítulo 4 incluye la investigación de la “Aplicación experimental de END a una bóveda tabicada” que comprende la investigación de laboratorio de la aplicación, desde el trasdós, de diferentes métodos de END a una bóveda tabicada con el fin de averiguar si algún método es válido para detectar la falta de adherencia entre los ladrillos que componen sus hojas. En el quinto capítulo se recogen las conclusiones. Los capítulos “Abreviaciones y acrónimos”, “Glosario y tablas de conversión” y “Referencias” cierran la tesis. Un apéndice incluye material audiovisual en soporte digital.

## 1.1. JUSTIFICACIÓN

Los estudios previos son esenciales para el óptimo desarrollo del proceso de conservación y restauración. La evaluación no destructiva (END) y la evaluación semidestructiva (ESD) son, o deberían ser, en la mayor parte de los casos, el grueso de los estudios previos junto con el estudio histórico del edificio. Hay ciertas empresas y profesionales en el país, conocedores de las END, que las incluyen como una herramienta más en su maletín de recursos, pero hay otro sector que, por desconocimiento y escepticismo utilizan la evaluación destructiva.

En la práctica, las técnicas de END no se aplican de forma aislada si no que se complementan unas a las otras (Bosiljkov & Zarnic, 2008). Sin embargo, aunque existe bibliografía específica sobre END aplicados al patrimonio arquitectónico construido, la mayor parte de ella se centra en una única técnica o en la comparación de dos o tres técnicas específicas para resolver una misma problemática. No se abarca la END en su conjunto sino en diferentes sectores de aplicación, por diferentes motivos, siendo los principales:

- La investigación la desarrollan dos agentes: algunas empresas privadas que se dedican a este sector o universidades. En el caso de las empresas que se dedican a aplicar END en patrimonio, normalmente no sólo se dedican a patrimonio, ya que la mayor parte de sus encargos vienen de la ingeniería civil y la obra de nueva planta. Es por esto, que las técnicas en las que se especializan son las que mayor aplicación tienen en su línea de negocio y no necesariamente las más apropiadas para el patrimonio construido. Del mismo modo, los técnicos que la aplican no necesariamente tienen formación relacionada con el patrimonio arquitectónico sino con la ingeniería civil, estructural o de materiales.
- La investigación que realizan las universidades no suele estar conectada con la aplicación real, limitándose a enfoques teóricos con experimentación en laboratorio y, en muchas ocasiones, llevada a cabo por estudiantes que se especializan en una técnica o problemática y no dotan a la investigación de perspectiva general de aplicación de diferentes técnicas de END, con lo que la comparativa es limitada o inexistente. Además, existen pocas

universidades que incluyan la restauración en sus currículos de arquitectura e ingeniería.

Si bien en Estados Unidos hay ciertas técnicas de END que se aplican con frecuencia en presencia de determinados materiales y sistemas constructivos, hay otros que no han sido lo suficientemente estudiados por diferentes motivos. El caso de la técnica constructiva de la bóveda tabicada es el más flagrante, debido a la enorme presencia de esta técnica constructiva, especialmente en la costa este del país.

En esta tesis se exponen las técnicas de END más utilizadas en el campo del patrimonio arquitectónico estadounidense. Para ello se explica su funcionamiento y utilización a tenor de los materiales a analizar y los resultados que se pretenden conseguir. También se incluyen ejemplos y casos de estudio, así como la investigación en laboratorio de la aplicación de las técnicas de END geo-radar, ultrasonidos, impacto-eco, termografía infrarroja y percusión a una bóveda tabicada con el fin de determinar su utilidad para identificar la pérdida de adherencia entre hojas de ladrillo.

## 1.2. OBJETIVOS Y ALCANCE

Esta tesis estudia el funcionamiento y aplicaciones de los métodos de reconocimiento y evaluación no destructivos más utilizados en la conservación y restauración del patrimonio arquitectónico estadounidense, focalizando la investigación en la técnica constructiva de la bóveda tabicada; la finalidad es proveer de información útil para la aplicación efectiva de dichos métodos respondiendo a dos cuestiones:

1. ¿Qué método de END es más apropiado para qué casos aplicado al patrimonio arquitectónico estadounidense?
2. ¿Es posible detectar mediante los métodos de END más utilizados en Estados Unidos, la pérdida de adherencia entre hojas de ladrillo en bóvedas tabicadas con acceso únicamente por el trasdós de las bóvedas?

Los métodos estudiados en profundidad son: métodos instrumentados de inspección visual: endoscopía, *seesnake*, cámara de chimenea, nuevas técnicas de fotogrametría digital, *Tablet PC Annotation System*; métodos basados en la propagación de ondas electromagnéticas: termografía infrarroja y geo-radar; métodos basados en la propagación de ondas acústicas: impacto-eco y ultrasonidos; métodos facilitadores de END: aeronaves no tripuladas y acceso por medio de sistemas industriales de cuerdas.

En el apartado “2. Técnicas y métodos de reconocimiento y evaluación no destructiva” se han incluido casos reales de aplicación que ejemplifican la investigación teórica de la tesis; además, en el apartado “3. Casos de Estudio” se incluyen casos completos, es decir, se exponen aplicaciones de las diferentes técnicas aplicadas y la interacción entre ellas, ya que las diferentes técnicas de END se aplican en complementación entre sí, dependiendo del caso concreto.

Los métodos aplicados en laboratorio a una bóveda de Guastavino, con el fin de determinar si alguno de ellos era apto para detectar pérdida de adherencia entre hojas de ladrillo, fueron: termografía infrarroja, ultrasonidos, geo-radar, percusión acústica e impacto-eco.

Debido a la magnitud de técnicas y procedimientos que podrían catalogarse dentro del título “Evaluación no destructiva aplicada al patrimonio arquitectónico en Estados Unidos”, únicamente se incluyen en esta investigación las más utilizadas en su aplicación al patrimonio arquitectónico estadounidense. Determinar cuáles son las más utilizadas es una cuestión subjetiva, ya que no existen registros por los que guiarse. Para determinar qué técnicas incluir, han primado dos criterios de selección: aquellas técnicas en las que existe un consenso entre los profesionales consultados durante la presente investigación -Apartado 1.4. Metodología- y la experiencia profesional de la autora.

Es discutible si técnicas como el escáner laser o el *Geographic Information System* (GIS), entre otras, deberían o no estar incluidas. La utilización del escáner laser en el campo de la restauración arquitectónica no está extendida en Estados Unidos; uno de los motivos es que no se podrán realizar escaneados en edificios en altura, como por ejemplo el 20 Exchange Place, con 60 plantas, encajado entre otros de igual o mayor altura, hasta que la tecnología del escáner láser evolucione en combinación con los sistemas aéreos no tripulados (y la legislación que les atañe), para poder hacer la toma de datos. En el caso de GIS, es un sistema muy utilizado en otros campos, pero residual en su aplicación al patrimonio arquitectónico; a principios del siglo XXI despuntó como una posibilidad en la toma de datos en las inspecciones de los edificios. Sin embargo, en la actualidad, el sistema Tablet PC Annotation System ha evolucionado hasta ser indiscutiblemente el más utilizado.

Con el fin de limitar más el contenido, la aplicación en laboratorio se focaliza en un tipo de fábrica en concreto, la bóveda de Guastavino.

La tesis pertenece al campo de la restauración del patrimonio arquitectónico, como doctrina dentro de las ciencias de la arquitectura y la ingeniería; otras disciplinas que abarca, en menor extensión, son la tecnología y la física.



## 1.3. METODOLOGÍA

La presente investigación de END aplicada al campo del patrimonio arquitectónico estadounidense comienza en el año 2012, desde dos ángulos: la teórica, basada en la consulta de fuentes directas e indirectas existentes (bibliografía, informes profesionales, documentos gráficos, audiovisuales, entrevistas a profesionales, etc.) y la práctica *in situ*, posible gracias a mi ocupación laboral en la empresa Vertical Access, especializada en evaluación de edificios existentes.

Avanzada la investigación teórico-práctica, dio comienzo la aplicación experimental sin precedentes de END aplicada a una bóveda tabicada de Guastavino; a principios del año 2016 construí una bóveda tabicada en el laboratorio de GB Geotechnics en NYC, con el fin de someterla a diferentes tests de END. El objetivo era averiguar si alguno de los métodos más utilizados actualmente en el campo de la restauración arquitectónica en Estados Unidos, es apto para detectar una de las lesiones más comunes en las bóvedas de Guastavino, la pérdida de adherencia entre hojas de rasillas.

La Figura 1.3-1 corresponde a la representación conceptual de las interrelaciones entre los diferentes estadios y fases que han sucedido durante la investigación y la redacción de la presente tesis.

## METODOLOGÍA

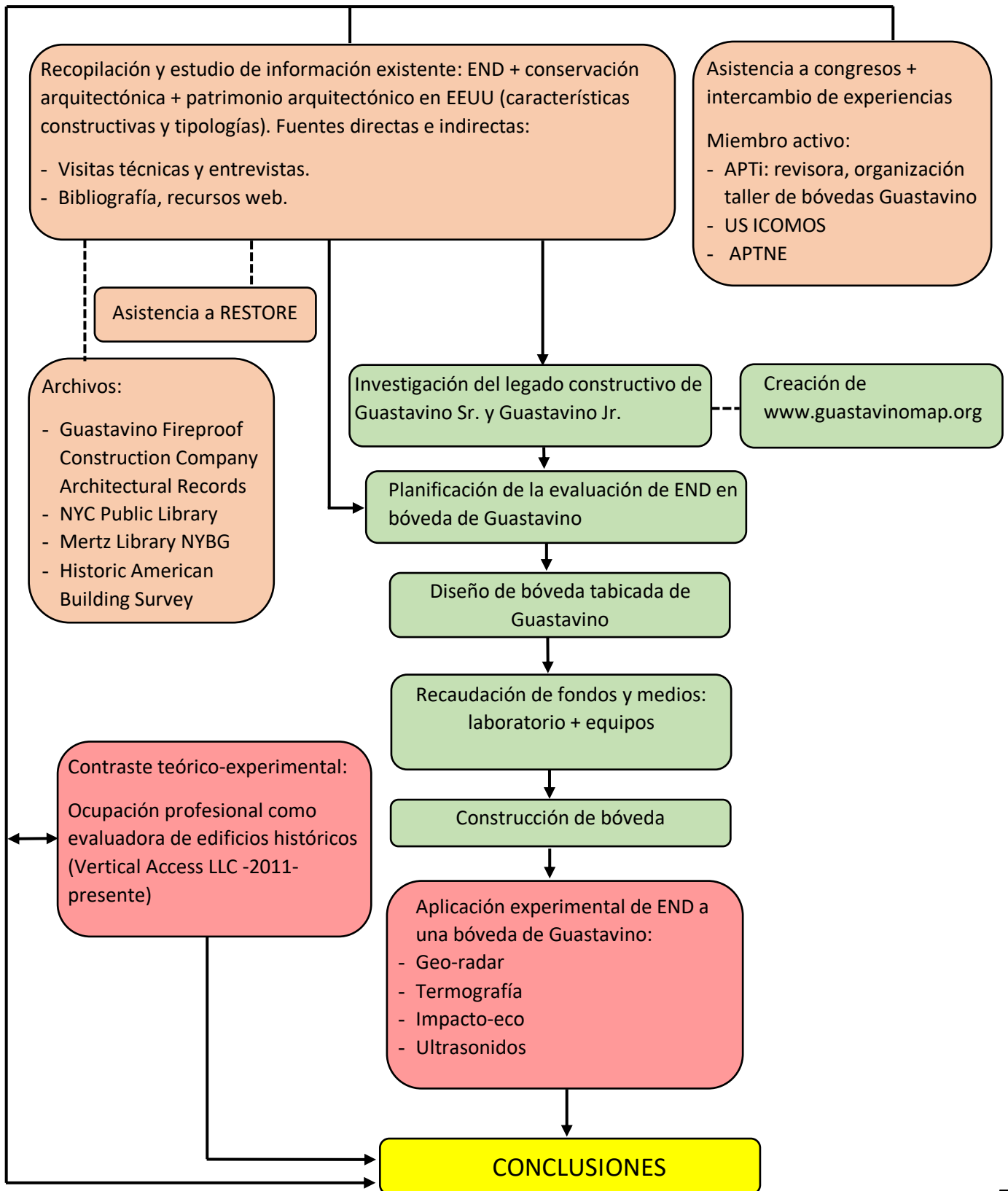


Figura 1.3-1 Representación esquemática de las diferentes fases.

Durante la investigación y redacción de la presente tesis, las diferentes fases se han solapado en el tiempo. Se ha seguido el proceso detallado a continuación:

- En primer lugar, se revisó del estado actual del conocimiento estudiando diferentes fuentes directas e indirectas, libros, resultados de estudios de otros investigadores, procedimientos de congresos, artículos científicos, etc. para identificar tres aspectos principales: cuáles son las técnicas más utilizadas en conservación del patrimonio construido, qué aspectos son los más interesantes concernientes a la temática en estudio y, por último, qué métodos no utilizados en este campo podrían ser aptos. Una vez identificadas qué técnicas son las más utilizadas y con mayor potencial en el campo de la conservación arquitectónica, se han abarcado cada una de ellas desde el origen, comprendiendo su evolución en el tiempo, su estado presente y, finalmente, una aproximación al pronóstico de su futuro inmediato. La consulta a fuentes bibliográficas ha sucedido a lo largo de todo el proyecto.
- Al mismo tiempo se consideró necesario estudiar las características del patrimonio arquitectónico estadounidense por dos motivos; en primer lugar, mi conocimiento del patrimonio arquitectónico estadounidense se limitaba a conocimientos generales adquiridos desde Europa y, en segundo lugar, era necesario profundizar en su conocimiento para comprender las necesidades de este patrimonio arquitectónico con respecto a la END. Además de numerosas visitas en primera persona a través de mi puesto como *Metropolitan New York Branch Manager* de la empresa Vertical Access, LLC, pasé a formar parte de la *Association for Preservation Technology International (APTi)*, de su *Northeaster chapter (APTNE)* y de la *International Council on Monuments and Sites USA (ICOMOS US)*. Pertenecer a estas asociaciones garantizó el acceso a los mayores expertos tanto en arquitectura patrimonial estadounidense, como a otros profesionales del campo de los



Figura 1.3-2 Dos imágenes del taller de bóvedas de Guastavino que Kent Diebolt y Berta de Miguel organizaron en el encuentro internacional de APTi, 2013, Nueva York.

MEND en el país. Mi participación activa en estas organizaciones incluye la posición de revisora de libros para la revista *APT Bulletin* o la organización de un taller de bóvedas de Guastavino en 2013 (Figura 1.3-2) (APTI, 2013). A continuación, se incluye un listado de los principales eventos relacionados con el campo de END y/o los Guastavino, a los que la doctoranda ha asistido durante la investigación:

- *Conference on Architectural Ceramics* organizado por el *International Institute for Conservation of Historic and Artistic Works (IIC)* en el MIT (*Massachusetts Institute of Technology*) Cambridge, Massachusetts.
  - *17th Annual US/ICOMOS International Symposium* en Filadelfia, Pensilvania.
  - Encuentro anual internacional 2013 de la *Association for Preservation Technology (APTI)*, *Conserving the Metropolis*, Nueva York.
  - *Annual Meeting and Symposium 2013 - Historic Concrete Restoration* organizado por la *Association for Preservation Technology Northeast Chapter (APTNE)* en Stamford, Connecticut.
  - *Annual Meeting and Symposium 2014 - Adaptive Reuse of Historic Structures* organizado por la *Association for Preservation Technology Northeast Chapter (APTNE)* en Boston, MA
  - Encuentro anual internacional 2014 de la *Association for Preservation Technology (APTI)*, *Métissage*, Québec, Canada.
  - *Annual Meeting and Symposium 2015 - Innovative Adaptive Reuse of Historic Structures-* organizado por la *Association for Preservation Technology Northeast Chapter (APTNE)* en Nueva York, NY.
  - *2015 Spring Convention, High Rise Repairs* organizado por el *International Repair Concrete Institute (IRCI)*, en Nueva York.
  - *2014 - 9th Conference on Structural Analysis* organizado por *International Conference Structural Analysis of Monuments and Historical Constructions (SAHC)* en México DF
  - *Annual Meeting and Symposium 2016 - Water and Its Impact on Historic Sites and Structures-* organizado por la *Association for Preservation Technology Northeast Chapter (APTNE)* en Newport, Rhode Island.
  - *Chapter meeting 2016 Evening at the Guggenheim*, organizado por la *Association for Preservation Technology Northeast Chapter (APTNE)* en New York, NY.
  - Encuentro anual internacional 2016 de la *Association for Preservation Technology (APTI)*, *Preserving heritage with tomorrow's technologies*, Nueva York.
- Con el mismo objetivo de profundizar en el conocimiento del patrimonio arquitectónico estadounidense y su evaluación no destructiva, realicé el prestigioso curso de formación continua de dos semestres de la instrucción RESTORE: Curso en Restauración de Fábricas (*Course on Masonry*

*Conservation*). Este curso cubre un amplio espectro de aspectos técnicos relacionados con los materiales y los procesos utilizados para la restauración de estructuras de fábrica en Estados Unidos. RESTORE trata la restauración arquitectónica desde la perspectiva de la ciencia de los materiales, incluyendo en su currículo, entre otros, los siguientes temas:

- Análisis de problemas y causas del deterioro de fábricas de albañilería estadounidenses.
  - Análisis *in situ* y en laboratorio. Evaluación no destructiva.
  - Problemas especiales en la conservación relacionados con el diseño y los detalles constructivos.
  - Formulación de compuestos y morteros para reparaciones y rejuntados.
  - Materiales de sustitución en albañilería.
- A partir del estado actual de la END en el patrimonio arquitectónico estadounidense se establecieron las directrices generales que conformarían la tesis, recogidas en 2015 el artículo de la revista científica *Loggia* artículo (de Miguel Alcalá & Pardo Redondo, 2015).



Figura 1.3-3 Berta de Miguel desarrollando su actividad profesional en la empresa Vertical Access durante la investigación del Municipal Building en Manhattan (*The Wall Street Journal* (Lucadamo, K.), 2014)(A. Grunwald)

- Trabajar en una de las empresas que aplican END a nivel nacional facilitó enormemente la aplicación de las diferentes técnicas *in situ* durante todo el proyecto de tesis<sup>1</sup>.

Vertical Access es una empresa especializada en la investigación del estado del patrimonio construido y trabaja en todo el territorio estadounidense (Vertical Access, 2003-2015). Formada por ingenieros, arquitectos, especialistas en historia de la arquitectura y especialistas en restauración, asesora a sus clientes, a través de proyectos de investigación, sobre el estado real del edificio. Dichos proyectos constan de tres fases; una fase previa de recopilación de datos y preparación, una segunda fase de evaluación *in situ*

<sup>1</sup> Se puede encontrar más información de la actividad laboral de la doctoranda en los siguientes enlaces:  
<http://www.nbcnews.com/news/latino/spanish-architect-climbing-high-literally-n186911>  
<http://www.voanews.com/a/2422712.html>  
<https://www.wsj.com/articles/on-the-ropes-seeing-new-york-city-up-close-1405992220>



y una tercera fase de redacción de proyecto. Uno de los campos más desarrollados por VA es la utilización de métodos de evaluación no destructiva para diagnosticar el estado de edificios y estructuras existentes. Para la toma de datos *in situ*, VA utiliza el sistema *Tablet PC Annotation System* (TPAS), el sistema digital de documentación de condiciones existentes más utilizado en el país (TPAS, 2016). Además, aplica otras técnicas de evaluación no destructiva (END) como son termografía, georadar, técnicas acústicas como ultrasonidos y percusión, boroscopios, drones, fotogrametría, etc. Esta actividad profesional posibilita trabajar con expertos en END, algunos de los cuales se citan en el siguiente punto. La aplicación de END *in situ* ha sido aplicada por la doctoranda en diversos edificios, entre los que destacan:

- General Grant National Memorial, en Nueva York.
  - Wyoming State Capitol, en Cheyenne.
  - Bóvedas de Guastavino en el Manhattan Municipal Building, en Nueva York.
  - Robert C. Weaver Federal Building, en Washington DC
  - La catedral de Saint John de Divine, en Nueva York.
  - El banco de la Reserva Federal, en Nueva York.
  - El Woolworth building, en Nueva York.
  - Lincoln Memorial, en Washington.
  - El 1964–1965 World's Fair New York State Pavilion, en Nueva York.
  - El letrero vintage en Essex House, Nueva York.
  - El edificio Empire State, Nueva York.
  - El invernadero Enid Haupt del New York Botanical Garden, en el Bronx, Manhattan.
  - La iglesia presbiteriana de Fifth Avenue Presbyterian Church, Manhattan, Nueva York.
  - La iglesia de Saint Thomas, Manhattan, Nueva York.
  - El edificio del Municipal Building, Manhattan, Nueva York.
  - La iglesia de la Intercession, Manhattan, Nueva York.
  - El museo de Historia Natural, Manhattan, Nueva York.
  - El edificio Livingston 75, Brooklyn, Nueva York.
  - La estación CRRNJ Terminal, New Jersey.
  - 740 Park Avenue, Manhattan, Nueva York.
  - 20 Exchange Place, Manhattan, Nueva York.
  - 63 Wall Street, Manhattan, Nueva York.
- A lo largo del proyecto de tesis se realizaron entrevistas a expertos en cada uno de los campos; sirvan como ejemplo las conversaciones con Donald Friedman (Old Structures Engineering), Kent Diebolt (Vertical Access), Chas Bransby-Zachary (Echem Consultants), Michael Schuller (Atkinson-

Noland & Associates), Gabriel Pardo (Old Structures Engineering), Alex Bell (GB Geotechnics USA), Evan Kopelson (Vertical Access), Kelly Streeter (Vertical Access), Kristen Olson (Cornell University), Sarah Cole (GB Geotechnics USA), Javier Ortega (Atkinson-Noland & Associates), Robert Silman (Silman Engineering) y Myun Song (GB Geotechnics USA).

- De todas las tipologías constructivas utilizadas en el patrimonio arquitectónico estadounidense hay una poco estudiada, especialmente en el campo de la END: la bóveda tabicada o de Guastavino. Rafael Guastavino Moreno patentó la técnica de la bóveda tabicada en USA en 1885 (de Miguel Alcalá, Pardo Redondo, & Diebolt, 2014), por lo que todas las bóvedas construidas con esta técnica fueron construidas por su compañía hasta su cierre en 1962. Durante esta época la Guastavino Company construyó más de 1.000 edificios en Estados Unidos (Ochsendorf, 2013). Se sabe que la cantidad de bóvedas de Guastavino es muy elevada, pero desconoce la cantidad total debido a la inexistencia de un listado completo. Por este motivo, se realizó una investigación paralela estudiando el legado de Guastavino; durante dicha investigación se tomaron miles de fotografías y se estudiaron los contenidos del archivo *Guastavino Fireproof Construction Company architectural records, 1866-1985* localizado en la biblioteca de arquitectura Avery, en la Universidad de Columbia, en Nueva York. En 2014, la doctoranda comenzó a trabajar en una herramienta digital interactiva con dos objetivos: ordenar y hacer accesible la ingente cantidad de información recabada durante la investigación en marcha y posibilitar la participación de cualquier persona que quiera aportar información sobre edificios existentes relacionados con los Guastavino. Para ello, hubo que obtener la financiación necesaria para asumir los costes de mantener el sitio web y el técnico informático que lo construyese con la información previamente recabada. Dicho proyecto se denomina: [www.guastavinomap.org](http://www.guastavinomap.org). Con motivo de la investigación realizada sobre el legado de los Guastavinos en Estados Unidos, la doctoranda participó como experta en el documental *El Arquitecto de Nueva York*<sup>2</sup> (Vizcarra, 2015).
- Una lesión común de la técnica constructiva de las bóvedas de Guastavino consiste en la pérdida de adherencia entre las hojas de ladrillo, lo cual puede

---

<sup>2</sup> Puede ser visto en su totalidad en el enlace:

<http://www.rtve.es/alcarta/videos/imprescindibles/imprescindibles-arquitecto-nueva-york-rafael-guastavino/3571098/>

eventualmente hacerse patente con el desprendimiento de una o varias de las rasillas de la primera capa del intradós. El único método de evaluación no destructiva, utilizado hasta el momento para detectar esta lesión en territorio estadounidense, que se tuviera constancia, consistía en el test acústico de percusión con martillo (Streeter & Diebolt, 2012). Este test tiene dos limitaciones importantes: se requiere acceso por el intradós de la bóveda y el resultado es subjetivo y depende de la experiencia y criterio del inspector. Dos casos particulares, el estudio de una bóveda en la iglesia de Saint Thomas y las bóvedas de la catedral de *Saint John the Divine*, ambos desarrollados por la doctoranda, fueron el punto de partida de una investigación cuyo fin es estudiar la viabilidad de otras técnicas de END que permitan evaluar la adherencia de la primera capa del intradós sin necesidad de contacto desde el intradós. Así pues, última etapa de la investigación consistió en la ejecución y testeo de una bóveda

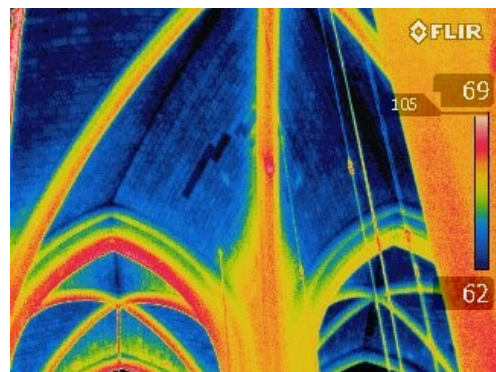


Figura 1.3-4 La investigación con END de dos bóvedas de Guastavino fueron el punto de partida de la investigación de END aplicada a bóvedas de Guastavino: La superior corresponde a Saint Thomas church y la inferior a Saint John the Divine, ambas en Manhattan (K. Diebolt, B. de Miguel).

tabicada en la que se insertaron diferentes faltas simulando pérdida de adherencia entre las hojas de ladrillo para aplicarle END, con el fin de comprobar si alguna de las técnicas sería apropiada para detectar la pérdida de adherencia entre las hojas. Se ensayó en dos fases (dos y tres hojas de ladrillo) con termografía activa y pasiva, ultrasonidos, geo-radar, impacto-eco y test acústico de percusión. De nuevo, hubo que obtener la financiación necesaria para hacer frente al coste de los materiales y localizar un espacio apropiado para su ejecución y testeo en Manhattan, así como conseguir los equipos necesarios.



- La investigación en la facultad de arquitectura en Columbia University (GSAPP), en concreto en la biblioteca Avery, permitió estudiar los contenidos del archivo *Guastavino Fireproof Construction Company architectural records, 1866-1985*. Consultar los planos originales de la compañía permitió estudiar esta tipología constructiva. Otros archivos que se han utilizado son de la *New York Public Library* en el edificio Stephen A. Schwarzman, la *Mertz Library NYBG* o el archivo de Historic American Building Survey (HABS) (Library of Congress, 2016).
- La última fase comprende la redacción de las conclusiones de todo el proceso teórico-práctico.

	2012	2013	2014	2015	2016	2017
Compilación de bibliografía relacionada						
Fase de investigación de bibliografía relacionada						
Investigación in situ del legado de los Guastavino						
Construcción de <a href="http://www.guastavinomap.org">www.guastavinomap.org</a>						
Asistencia a eventos relacionados						
Asistencia a RESTORE						
Práctica <i>in situ</i>						
Colaboración con empresas relacionadas						
Diseño y recaudación fondos bóveda Guastavino						
Construcción bóveda Guastavino						
END en bóveda de Guastavino						
Contrato con Vertical Access						
Redacción de tesis						

Figura 1.3-5 Cronograma de la investigación y del desarrollo de la presente tesis

Hay ciertos aspectos concernientes al desarrollo de esta tesis que se incluyen en este apartado:

- En Estados Unidos es muy común, en la mayoría de los proyectos, firmar un *Non disclosure agreement*, por el que las partes se comprometen a no difundir información sobre el proyecto relacionándola con el nombre del edificio. Por este motivo, en algunos de los casos se omite la dirección o/y el nombre del edificio.
- El marcado componente tecnológico de algunas técnicas en combinación con el rápido avance en técnicas como la fotogrametría o los UAV son los motivos por los que algunos de los apartados de esta tesis pueden desfasados en cuestión de meses. De todas formas, si bien es cierto que surgen continuamente modelos de instrumentación con mayores capacidades, el concepto permanece invariable.

- Esta tesis no incluye el estudio de herramientas tradicionales de evaluación no destructiva como los medidores de humedad, los detectores de metales, los sistemas de monitoreo, etc. por dos motivos principales: la simplicidad de su aplicación no justifica su catalogación como método o técnica; además, la necesidad de centrar la investigación en las técnicas y métodos más utilizados obliga a limitar y catalogar el contenido obviando dichas herramientas.
- Nomenclatura: En inglés, los términos *Nondestructive Testing* (NDT) y *Nondestructive Evaluation* (NDE) se utilizan generalmente como sinónimos. Sin embargo, puede establecerse la diferencia de que NDT normalmente se refiere al proceso de ejecutar el test mientras que NDE suele referirse al proceso completo de planificar y ejecutar los tests y analizar los resultados en conjunto y normalmente se asocia a dichos métodos que posibilitan la interpretación cualitativa de los resultados (Cecire, 2002). En castellano NDT se traduce como tests no destructivos y pueden utilizarse diferentes términos para referirse a NDE, entre los que destacan: análisis no destructivo, técnicas de evaluación no destructivas, métodos de evaluación no destructivos, técnicas o métodos no destructivos de reconocimiento y evaluación no destructiva. Para esta tesis se ha utilizado principalmente el acrónimo de evaluación no destructiva, END, sin diferenciar entre los discutibles matices entre cada uno de los términos.
- Para referirse a las diferentes formas de arquitectura con valor histórico, en esta tesis se utilizan los términos “patrimonio construido”, “patrimonio arquitectónico”, “patrimonio histórico arquitectónico” y “estructuras y/o edificios históricas/os” indistintamente, obviando los matices entre los diferentes términos. Del mismo modo, se utiliza “conservación” en relación al patrimonio arquitectónico, para englobar los procesos relativos al diagnóstico, mantenimiento y restauración del patrimonio arquitectónico. En lengua inglesa esta definición de conservación corresponde al término *preservation*.
- La práctica totalidad de las fuentes de información utilizadas en la presente investigación utilizan el idioma inglés; en casos concretos como, por ejemplo, nombres de procedimientos científicos, o terminología técnica, la traducción al castellano puede dar lugar a expresiones o formas sujetas a la interpretación de la autora con diferentes matices semánticos a la fuente

original. Por este motivo, y para facilitar la búsqueda a futuros investigadores, se incluye entre paréntesis la nomenclatura original en inglés de los términos que se han considerado necesarios. También se incluyen tablas de documentos estadounidenses que utilizan puntos para separar los decimales y comas para indicar los miles; se han respetado por tratarse de tablas originales.

- A pesar de que se van incluyendo ejemplos de aplicación para cada una de las técnicas, se consideró apropiado incluir un capítulo de “Casos de Estudio” para ejemplificar el concepto de que las diferentes técnicas de END se aplican en combinación con otras; estos casos de estudio exponen esa interacción entre técnicas que, de haber sido incluidas como ejemplos aislados de aplicación, perderían parte de la importancia de su aplicación combinada.
- Los mecanismos de funcionamiento y los fundamentos físicos y tecnológicos de algunas técnicas de END son complejos y su conocimiento se aleja de la utilidad en el campo de la conservación y restauración del patrimonio arquitectónico. Por ese motivo, esta tesis no profundiza en la tecnología y los fundamentos físicos de los diferentes dispositivos/técnicas sino en las posibles aplicaciones al patrimonio construido.
- Las imágenes incluidas en esta tesis han sido realizadas por la autora a no ser que se indique lo contrario a pie de foto.

## 1.4. CONTEXTO – ESTADO DEL ARTE

El patrimonio arquitectónico estadounidense presenta unas características que lo hacen único, como se expone en el apartado “Patrimonio arquitectónico estadounidense” (página 40). En primer lugar, la mayor parte de los edificios históricos son posteriores a 1850 (Figura 1.4-11). Además, desde aproximadamente la construcción del *Home Insurance Building*<sup>3</sup> en Chicago en 1885, ingenieros, arquitectos y propietarios comenzaron una carrera por construir en altura, motivados por el reto de ingeniería y por el poco espacio disponible en ciudades como Manhattan, que generó una especulación urbanística sin precedentes (Friedman, 1995).

Los materiales con los que se construyó este patrimonio arquitectónico son principalmente madera, piedra, hierro/acero, ladrillos, terracota, mortero y hormigón. Dichos materiales, en combinación con determinados sistemas constructivos, no son duraderos en el tiempo a no ser de estar sometidos a un mantenimiento riguroso. Sirva como ejemplo el puente de Brooklyn, que se encuentra en perpetuo estado de restauración. En respuesta a esa arquitectura en proceso de deterioro, la utilización de técnicas de evaluación no destructiva es cada vez más común como herramienta de *monitoreo*, método de investigación y control de calidad. La adaptación de técnicas existentes de evaluación no destructiva de otras industrias al campo de la restauración arquitectónica representa una oportunidad, al aumentar las opciones e información disponible a los profesionales evaluando estructuras históricas.

En Estados Unidos, debido al elevado coste de la mano de obra (American Industries Group, 2016), es común que sea más económico sustituir un edificio que restaurarlo, por lo que la decisión de conservarlo está basada en el significado histórico o en la legislación que le ataña. La evaluación no destructiva permite aumentar la información posible sobre el edificio ahorrando costes a largo plazo en operaciones de mantenimiento y restauración.

---

<sup>3</sup> Considerado uno de los primeros rascacielos.

## 1.4.1. EVALUACIÓN NO DESTRUCTIVA EN ESTADOS UNIDOS

---

*Nondestructive testing (NDT) is the process of inspecting, testing, or evaluating materials, components or assemblies for discontinuities, or differences in characteristics without destroying the serviceability of the part or system. In other words, when the inspection or test is completed the part can still be used.*

---

(American Society of Nondestructive Testing (ASTN), 2016)

El uso de las técnicas de reconocimiento y evaluación no destructivas aplicadas a la conservación y restauración del patrimonio es una práctica habitual en los Estados Unidos. Las técnicas de END se emplean en las restauraciones y operaciones de mantenimiento de arquitecturas tan diferentes como los edificios históricos de la era colonial o los rascacielos del siglo XX.

La mayoría del patrimonio arquitectónico estadounidense, que ha sido construido durante los últimos 170 años, debe mantenerse funcional y adaptarse a los cambios de uso y a los nuevos códigos. Para verificar su estado, se hace indispensable la utilización de técnicas de reconocimiento y evaluación. Hasta los años 80 del siglo XX gran parte de estas investigaciones se solían realizar extrayendo probetas que eran ensayadas en laboratorio o bien con procedimientos empíricos in situ. A finales del siglo XX comenzó a utilizarse la END que, aplicada a la conservación del patrimonio arquitectónico, son un amplio grupo de técnicas y métodos utilizados para evaluar las propiedades de un material, elemento estructural o sistema arquitectónico, de manera que no altere de forma permanente sus propiedades físicas, químicas, mecánicas o dimensionales (Schuller & Superenant, 1994). En la actualidad las técnicas de reconocimiento y END se utilizan para localizar de elementos estructurales clave, detectar anomalías o defectos en el material y determinar la calidad del mismo.

Una de las posibles clasificaciones de las diferentes técnicas de reconocimiento en estructuras existentes es (Bosiljkov & Zarnic, 2008):

- Ensayos no destructivos: permiten determinar características ocultas, huecos internos, estado de los materiales y otras características que de otra

forma solo podrían detectarse con métodos destructivos. En la mayor parte de los casos solo ofrecen resultados de tipo cualitativo (Lombillo, Villegas, & Al., 2007). La aplicación puede ser frustrante debido a dos motivos principales: la heterogeneidad de los materiales en el campo de la restauración arquitectónica hace complicada la protocolización de los ensayos y la mayor parte de estas técnicas provienen de otros campos de investigación y precisan ser calibradas y redefinidas (Binda, 2008).

- Ensayos ligeramente destructivos: implican una alteración menor del elemento a analizar (retirado parcial de juntas o ladrillos, etc.) Proporcionan información con la que averiguar con aproximación las características mecánicas del material tales como la resistencia a compresión o a cortante. Son necesarios para la evaluación del comportamiento estructural del edificio. El gato plano es un ejemplo de ensayo ligeramente destructivo.
- Ensayos destructivos: implican una alteración de las propiedades físicas, químicas, mecánicas o dimensionales del elemento a analizar. Permiten averiguar las características mecánicas, físicas y químicas del material. El retirado de una muestra para ensayar en laboratorio es un ejemplo de ensayo destructivo.

El alto grado de especialización en EEUU implica grandes equipos multidisciplinares en los proyectos de restauración cuyos miembros deben estar informados del estado del edificio. Además, el elevado coste de ejecución de las obras de restauración (American Industries Group, 2016) implica la conveniencia de saber con exactitud el estado del edificio antes de comenzar la intervención. La partida económica para estudios previos es normalmente un apartado del proyecto e implica el uso de END. La práctica demuestra que mantener un edificio regularmente pospone o elimina la necesidad de una gran intervención de restauración y, además, resulta más

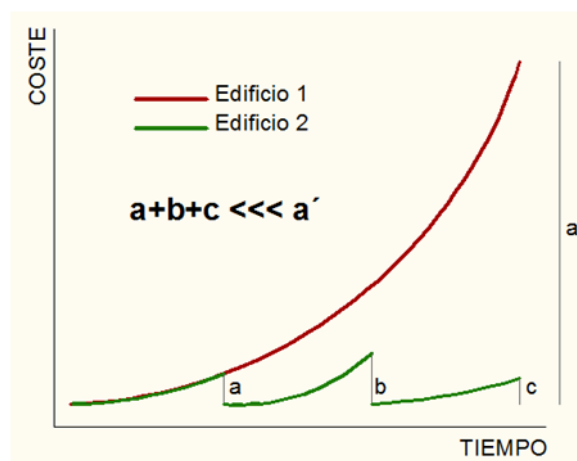


Figura 1.4-1 Curva del decaimiento. El coste de mantener con regularidad es menor que el coste de restaurar por falta de mantenimiento. La curva roja representa un edificio que no se ha mantenido con regularidad. En el momento de su restauración, el coste de la intervención,  $a'$  es mucho más elevado que la suma de los sucesivos costes en el tiempo que hubieran supuesto su mantenimiento regular,  $a+b+c$ .

económico en el tiempo. Este es uno de los motivos por los que muchos edificios tienen un programa de mantenimiento y conservación que requiere inspecciones periódicas, posponiendo así una eventual restauración (Figura 1.4-1). Ese mantenimiento periódico implica evaluaciones periódicas que, a su vez, utilizan métodos de END.

Los objetivos que persigue una investigación con técnicas de END en patrimonio arquitectónico pueden agruparse en dos categorías: control de calidad de la nueva intervención, y evaluación de los elementos existentes/*monitoreo* (Schuller & Superenant, 1994). El control de calidad asegura que la ejecución que se ha realizado cumple con las características diseñadas; por ejemplo, radiografías para verificar las soldaduras en un elemento metálico. La evaluación de elementos existentes/*monitoreo* con END pronostica el comportamiento del elemento en estudio, pudiendo localizar elementos clave y anomalías. En todos los casos, la utilización de métodos de reconocimiento y END no sólo es respetuosa con el edificio, además ahorra millones de dólares en intervenciones.

Un caso muy común de encargo de evaluación es el de un inversor que quiere conocer el estado del edificio como una información valiosa más en su mesa de negociación. Además de las operaciones de mantenimiento y restauración, que normalmente se inician con una evaluación exhaustiva del estado del edificio, existen regulaciones locales que obligan a evaluar el estado de las fachadas periódicamente por motivos de seguridad pública. Es el caso de la *Local Law 11 (FISP)* en la ciudad de Nueva York, con cientos de edificios históricos mayores de 6 alturas (NYC Landmarks Preservation Commission, 2016); desgraciadamente, la combinación de antigüedad y elementos arquitectónicos a gran altura han provocado accidentes mortales. El día de su graduación, 16 de mayo de 1979, la estudiante de Columbia University, Grace Gold, murió al ser golpeada en la cabeza por un trozo de terracota que cayó de un edificio frente a la universidad<sup>4</sup> (Gray, 2014). Esta tragedia desencadenó la entrada en vigor de la *Local Law 10* en febrero de 1980, que desde entonces requiere que un ingeniero o arquitecto emita un informe al Departamento de Edificios tras la inspección de su fachada para todos edificios mayores de seis alturas cada cinco años. Boston, Chicago, Columbus, Detroit, Milwaukee, Philadelphia, Pittsburgh y St. Louis también tienen leyes locales similares (Duffy, 2015).

---

<sup>4</sup> 601 West 115<sup>th</sup> Street, New York, NY.

Determinar la veracidad de la documentación gráfica disponible antes de una intervención es otra fuente de encargo de investigaciones que incluyen métodos de evaluación no destructiva. Normalmente los planos no están disponibles y aun en el caso de existir, se desconoce si el edificio se construyó conforme a los planos; existe una categoría de planos denominados *as built*, y son los planos que el constructor proporciona con el diseño ejecutado en la realidad. Lamentablemente, en pocas ocasiones existen dichos planos o están disponibles. Este es uno de los motivos por los que se utiliza END, para determinar la localización de elementos estructurales clave.

La utilización de técnicas de reconocimiento y evaluación en muchos casos implica la necesidad de acometer ensayos destructivos o semidestructivos; la utilización de métodos de END permite al arquitecto o ingeniero decidir qué localizaciones son más apropiadas para la evaluación destructiva gracias a la información previa obtenida con END con respecto a las zonas en peor estado, o en presencia o no de armado, etc. en lugar de elegir las aleatoriamente. Esta práctica minimiza la evaluación destructiva y maximiza la utilidad de la misma.

Así pues, de lo anteriormente expuesto se extrae que los métodos de reconocimiento y END tienen aplicación en todas las fases del proceso de conservación del patrimonio arquitectónico estadounidense: Información, diagnóstico, análisis y comprobación. Además, las diferentes técnicas no se utilizan aisladas sino en combinación con otras y su interpretación requiere de un equipo multidisciplinar formado y experimentado.

En Estados Unidos, la American Society for Testing and Materials (ASTM) recoge los estándares relativos a la industria en general para asegurar prácticas consensuadas que mejoren el sector. La evaluación no destructiva es una de las industrias incluidas en los estándares de la ASTM (American Society for Testing and Materials, 2017), sin embargo, la aplicación concreta de evaluación no destructiva en restauración arquitectónica no existe como tal<sup>5</sup>. Es por eso, que la mayor parte de los test, métodos y técnicas de evaluación no destructiva han de ser adaptados por el usuario para su aplicación en patrimonio construido. Otra fuente de estándares que ayudan a la aplicación de END es la American Society

---

<sup>5</sup> Listado de estándares: <https://www.astm.org/Standards/nondestructive-testing-standards.html>



for Nondestructive Testing (The American Society for Nondestructive Testing, 2016), que ha de ser utilizada con las mismas cautelas que los de la ASTM<sup>6</sup>.

---

<sup>6</sup> Listado de técnicas: <https://www.asnt.org/MinorSiteSections/AboutASNT/Intro-to-NDT.aspx>

## 1.4.2. PATRIMONIO ARQUITECTÓNICO EN ESTADOS UNIDOS

---

*Historic preservation has gained statutory acceptance at the national level through the National Historic Preservation Act of 1966 and through numerous state and local ordinances. During the time since the initial impetus for historic preservation, the accepted definitions of historic significance have been modified and reinterpreted as research has uncovered wider meanings and broader significance to the building activities of the past. For instance, although the term "historic bridge" may once have evoked images of covered timber bridges from the nineteenth century, or perhaps monumental structures such as the Brooklyn Bridge or the Golden Gate Bridge, research by historians, historic preservationists, and engineers has uncovered the significance of a much wider array of more ordinary projects, such as metal truss bridges (DeLoney, 1993). The research has identified the place of such structures in the history of transportation, industry, and technology.*

---

(Boothby and Rosson, 1998)

El objetivo final de la evaluación no destructiva es responder a preguntas sobre determinadas características de un edificio. Para comprender un edificio, éste debe ser examinado en relación a su contexto; edad, lugar, influencias coetáneas y no coetáneas, códigos que estaban obligados a cumplir, estilo y alteraciones posteriores son factores del contexto que proporcionan información fundamental. Sirva como ejemplo el uso del hierro; a mediados del siglo XIX se utilizaban vigas de hierro forjado en combinación con columnas de hierro colado ya que éste último era considerado el material más resistente frente a compresión directa y el hierro forjado era ideal para responder a flexión. Sin embargo, este sistema dejó de utilizarse por dos motivos principales, la ductilidad ha resultado ser un factor importante y el desarrollo de estructuras de acero demanda columnas que resistan compresión y flexión. Esta evolución ha sucedido debido a los avances en los análisis estructurales teóricos y al desarrollo industrial de la metalurgia. Si el ingeniero/arquitecto que dirige la investigación del edificio es conocedor de la evolución histórica de este material con respecto a la estructura, será capaz de conocer qué tipo de hierro utiliza dicha estructura dependiendo de la fecha de construcción y su función. Es lo que Friedman denomina conjeturas fundadas (*educated guess*) (Friedman, 2000). Todas las investigaciones deberían comenzar

con la asunción de que existía un motivo para todo lo que se hizo con el edificio en el pasado. Los motivos arquitectónicos suelen responder a las teorías de diseño que imperaban en la época. Los motivos de ingeniería son los mismos que imperan en la actualidad: diseño eficiente, economía, logística y legislación.

### 1.4.2.1. TIPOLOGÍAS, MATERIALES Y SISTEMAS CONSTRUCTIVOS.

---

El patrimonio arquitectónico estadounidense existente previo a 1850 es escaso en comparación con el existente posterior a 1850. Algunos de los contados ejemplos de patrimonio de la era precolombina fueron construidos por los Anasazi en lo que hoy se denomina la región de *Four Corners* (Utah, el noreste de Arizona, el noroeste de Nuevo México y el suroeste de Colorado), los Tiwa y los Chacoan (ambos en Nuevo México) (Figura 1.4-2). Otras estructuras de los pueblos nativos de Estados Unidos son las *longhouses*, los *wigman*, los *tipis* y los *hogans*.

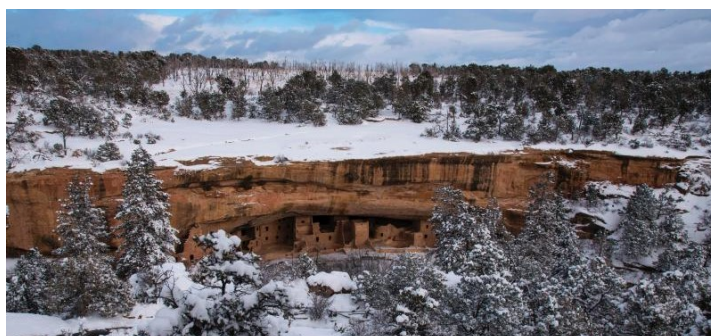


Figura 1.4-2 El Cliff Palace, construido por los Anasazi entre 1190 EC y 1260 EC en el parque nacional de Mesa Verde es el mayor ejemplo de arquitectura en acantilado en Norteamérica. (National Park Service, 2016)

Cuando los europeos se asentaron en Norteamérica trajeron con ellos los estilos y técnicas constructivas de sus respectivos países, adaptándolas en función de los recursos existentes y el clima, dando lugar a lo que se denominó la arquitectura colonial; los materiales más utilizados en este estilo fueron la madera, el ladrillo y la piedra para construir fuertes, residencias, misiones e iglesias. Las mayores influencias correspondieron a la arquitectura española (Cragoe, 2008) (Figura 1.4-3) y la arquitectura inglesa (Baker, 1994).



Figura 1.4-3 Misión Española de San José en San Antonio, Texas.

En 1776 los miembros del congreso declaran la independencia de trece colonias y, tras una dura guerra, el tratado de Paris reconoce en 1783 una nueva república,

los Estados Unidos de América. La recién fundada nación construía nuevos edificios para satisfacer actividades públicas y comerciales, en paralelo con la expansión territorial hacia el oeste. Aunque existía una evidente ruptura política con Gran Bretaña, las influencias británicas en arquitectura, especialmente las georgianas, siguieron formando parte del estilo de las nuevas construcciones. También incluían referencias a Roma y Grecia mediante elementos que simbolizaban la democracia.

Sin embargo, los americanos reafirmaban su independencia en política, cultura y economía mediante una nueva arquitectura civil para uso gubernamental, religioso y educativo (Embury II, 1917). El estilo federal es el primer estilo propio de los Estados Unidos tras su fundación, mayormente utilizado en la costa este entre 1780 y 1830. Este estilo, también descrito como una redefinición del estilo georgiano, incluye elementos neoclásicos, grandes ventanas simétricas, color blanco en paredes y techos con una decoración



*Figura 1.4-4 77 Bedford Street. Uno de los pocos ejemplos de arquitectura federal residencial existentes en Manhattan, construido en 1799. Ha sufrido numerosas reformas.*

escasa y racional. En arquitectura residencial se materializa en casas de planta cuadrada o rectangular, de no más de dos alturas, de ladrillo, con cubiertas de poca inclinación y puertas elaboradas a menudo con porche de entrada (Figura 1.4-4). Thomas Jefferson (1743-1826), además de ser el tercer presidente de los Estados Unidos (1801-1809), fue un experto en arquitectura que contribuyó a la emancipación de la disciplina de Estados Unidos, expresando su visión del arte al servicio de la democracia. Era, además, un admirador de la arquitectura de Palladio. Participó en el desarrollo del estilo federal combinando sus conocimientos sobre la arquitectura de Palladio y la arquitectura neoclásica europea con la democracia americana. Ejemplos de esta arquitectura de la que Jefferson formó parte son la Universidad de Virginia, el capitolio del estado de Virginia y los edificios de su plantación Monticello en Charlottesville, Virginia. La arquitectura desarrollada por Jefferson recibe el nombre de *Jeffersonian*, considerada un estilo propio dentro del estilo federal (Giordano, 2012).



En 1862 la instauración de la ley *Homestead Act* modificó los asentamientos en las zonas rurales generando un tipo de arquitectura vernácula rural. La ley dio la posibilidad a millones de ciudadanos de tener su propia tierra a cambio de cultivarla durante al menos cinco años y construirse una vivienda en la propiedad, lo que, a su vez, desplazó a los pueblos nativos y su arquitectura. Se generó un patrón de granjas aisladas construidas con materiales locales como tepes (*rustic sod*), piedra semicareada, cantos rodados y mortero (*mortared cobble*), adobe y troncos.



Figura 1.4-5 Tres ejemplos de arquitectura vernácula posterior tras el Homestead Act. La fotografía de la izquierda muestra una casa de tepes anterior a 1900 (Smithsonian National Museum of American History). En la fotografía central, de 1890, se observa una casa de troncos de madera (Minnesota Historical Society). La fotografía de la derecha corresponde a la casa Larkin en California, de 1835; construida de adobe, se cree que fue la primera casa de dos pisos del estado de California (Jsweida).

A partir de 1840 se generaliza el uso del estilo neogótico, que se emplearía hasta principios del siglo XX, incluso en rascacielos como el Woolworth building. Las familias pudientes de la costa este comenzaron a encargarse mansiones en este estilo, radicalmente distinto al neoclásico. También se construyeron edificios religiosos como la catedral de Saint Patrick, 1879 (Figura 1.4-6), la iglesia de Saint Thomas de 1914 y la iglesia de la Trinity, de 1846, en Nueva York.

Tras la guerra civil americana (1861-1865) y hasta principios del siglo XX, emergieron varios estilos que se denominan de manera genérica, estilo victoriano, debido a la relación con movimientos similares en el imperio británico durante el reinado de la reina



Figura 1.4-6 Catedral de San Patricio, en Manhattan (1879).

Victoria (1819-1901). Algunos de los arquitectos más influyentes del momento fueron Richard Morris Hunt, Henry Hobson Richardson y Frank Furness. Un estilo peculiar de este periodo es el denominado Stick Style, definido por el uso de madera tanto en estructura como en cerramientos, fachadas planas acentuadas con cerchas de madera en el frontón y decoración consistente en planchas planas superpuestas.



Figura 1.4-7 Estilo Stick. A la izquierda, Chicamacomico Life-Saving Station, de 1874, situada en Rodanthe, NC (Elisabeth Burlington) . A la derecha, la residencia de John N. Grisworld en Newport, Rhode Island, construida en 1862 por Richard Morris Hunt (Studyblue).

Otros estilos dentro del estilo victoriano en la costa oeste son el *Italianete*, *Stick-Eastlake* y *Queen Anne*, todos ellos con gran protagonismo de la madera. En la costa este el estilo *Queen Anne* evolucionó al estilo *Shingle*, caracterizado por una estética rústica más relajada. La casa de Fiske Stoughton en Cambridge, MA, el casino de Newport de Charles Follen McKim o la residencia de Isaac Bell House de la firma McKim, Mead & White, son algunos de los ejemplos más representativos (Figura 1.4-9).



Figura 1.4-8 Estilo Shingle, fruto de la evolución en la costa este del estilo Queen Anne de la costa oeste. La residencia de Isaac Bell House, diseñada por la firma de arquitectos McKim, Mead and White y construida en 1883 en Newport, RI. En aquella época, Newport era el lugar de veraneo de las familias más ricas del país (Daniel Case).



En la segunda mitad del siglo XIX y principios del siglo XX se encargaron residencias en estilo neo-renacentista, siendo la piedra y el ladrillo los principales materiales de estos edificios. El ejemplar más emblemático corresponde a la residencia Biltmore Estate en Asheville, NC, encargada por el millonario George Washington Vanderbilt II en 1889 y diseñada por Richard Morris Hunt en estilo *Chateausque*, dentro del estilo neo-renacentista (Figura 1.4-8).

Sin embargo, debido a dos principales motivos, existen pocos ejemplares de los edificios anteriores a 1850 que no hayan sido demolidos o hayan desaparecido fruto del tiempo. El primer motivo es la especulación inmobiliaria que ha caracterizado el desarrollo de los principales núcleos arquitectónicos del país. Uno de los ejemplos más radicales es el del barrio del distrito financiero en Manhattan.

El segundo motivo por el que existen pocos ejemplos de arquitectura anterior a 1850 es que la mayor parte de la arquitectura histórica estadounidense se construyó con técnicas constructivas y materiales percederos que requieren de un mantenimiento exhaustivo para asegurar su estabilidad, como se explica con mayor detalle más adelante en este capítulo.



Figura 1.4-9 Biltmore Estate en Asheville, NC, diseñada por Richard Morris Hunt en estilo *Chateausque* neo-renacentista. Concluida en 1895, es la residencia privada de mayor superficie del país, con 250 habitaciones (JcPollock).

La Figura 1.4-10 y la Figura 1.4-11 demuestran esta realidad, a través de la representación cromática del año de construcción. La Figura 1.4-10 corresponde al plano de Manhattan y la Figura 1.4-11 al de Brooklyn. El barrio de Brooklyn en la ciudad de Nueva York constituye un ejemplo representativo del resto de núcleos

urbanos del país. En ambos planos, puede observarse el escasísimo número de edificios existentes anteriores a 1850.



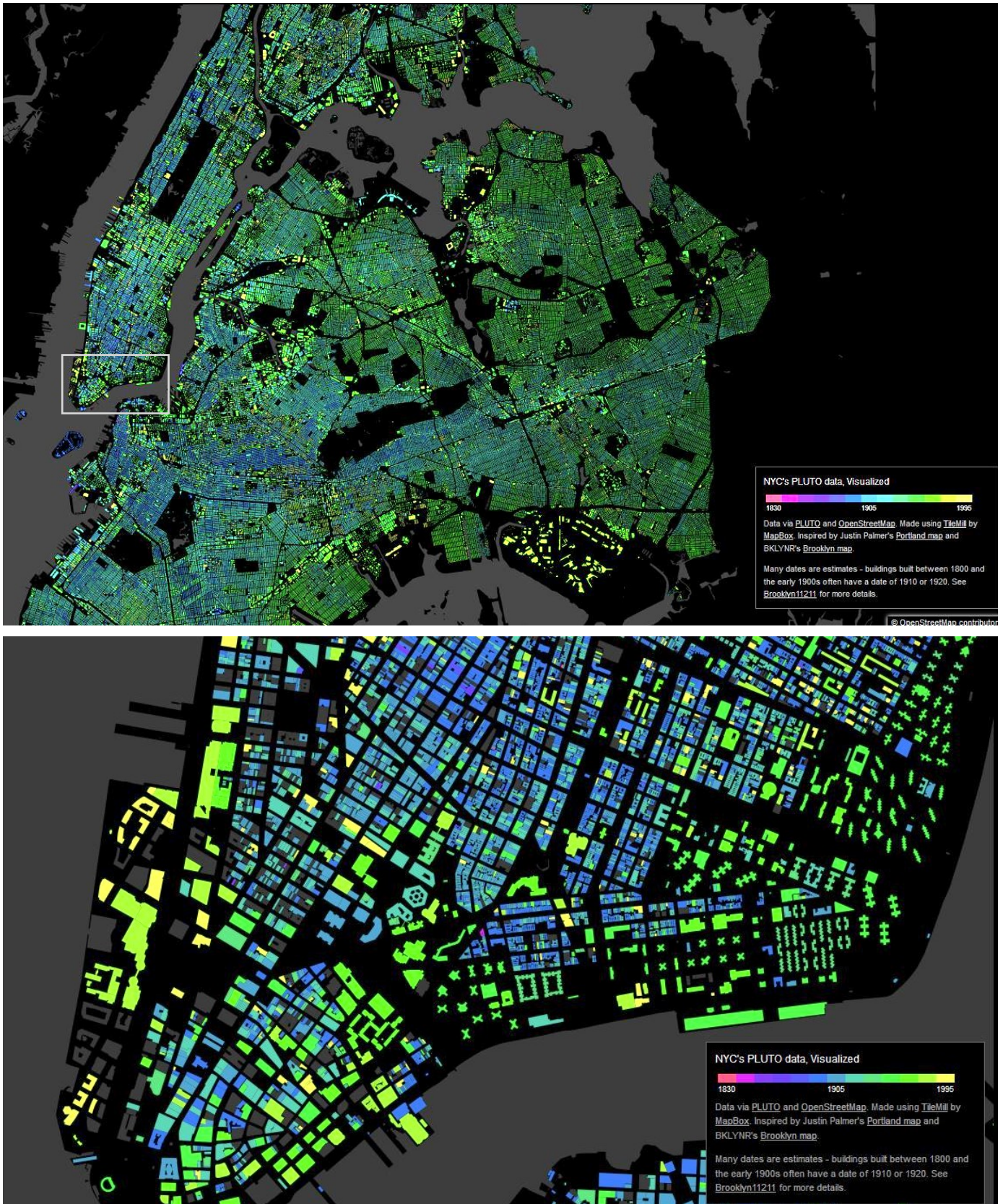


Figura 1.4-10 La figura superior corresponde al mapa cromático por año de construcción de la mayor parte de la ciudad de Nueva York. La imagen inferior es la ampliación de la zona del Financial District, la zona más antigua de la ciudad, correspondiente al asentamiento holandés del siglo XVII. En Ambas imágenes es notable la poca presencia de los colores fucsia y morados, que son los que representan edificios anteriores a 1850. (Liu, B.;, 2016)



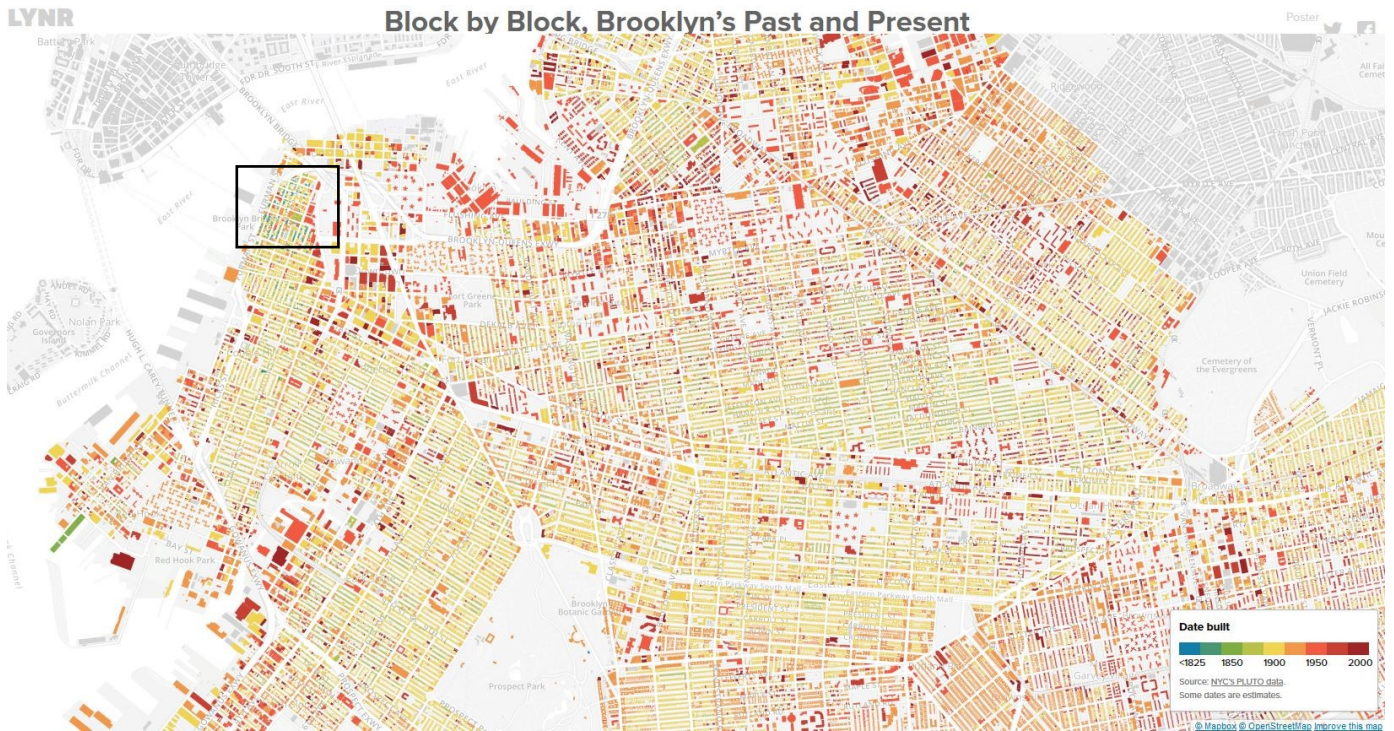
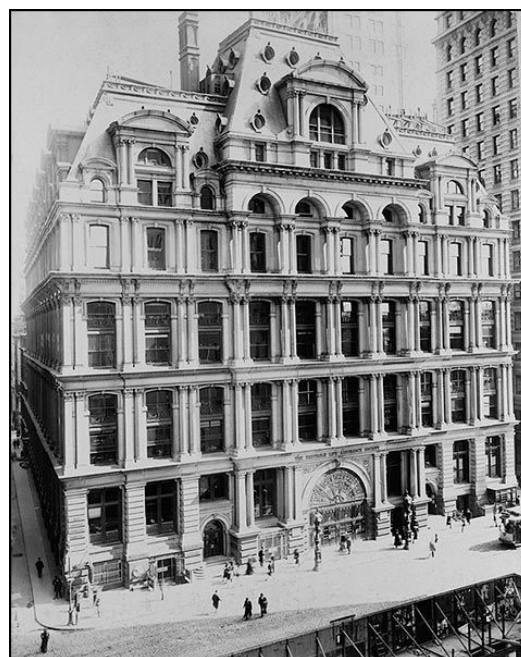


Figura 1.4-11 Ambos mapas representan por colores el año de construcción de los edificios del barrio de Brooklyn (ciudad autónoma hasta 1898), en Nueva York. La imagen superior incluye todo el barrio mientras que en la inferior se observa la zona de Brooklyn Heights, la que presenta mayor número de edificios anteriores a 1850. En ambos casos destaca el escaso número de ejemplares anteriores a 1850 (Rhiel & Pope-Sussman, 2014)



En 1853 Elisha Otis inventó el primer ascensor con sistema de seguridad frente a rotura del cable suspensor. Esta fue una de las aportaciones a la historia que posibilitó la construcción en altura. En 1870 se construyó en Nueva York el primer edificio comercial en incorporar ascensor, el Equitable Life Assurance Building<sup>7</sup>, de seis plantas. Durante las siguientes décadas los rascacielos norteamericanos fusionarían elementos decorativos conservadores con innovación tecnológica (Goldberger, 1985)

A finales del siglo XIX los rascacielos encontraron un nuevo reto que impedía mayores alturas: las paredes de carga alcanzaban un límite de alrededor de veinte plantas, como fue el caso del Monadnock Building en Chicago, diseñado por Burnham & Root. El ingeniero William LeBaron Jenney dio solución a este problema introduciendo la estructura metálica, por primera vez en el edificio de diez plantas Home Insurance Building, en 1885. Habitualmente, no sin controversia, se considera este edificio el primer rascacielos (de Miguel Alcalá & Pardo Redondo, 2015). Su estructura se componía en su mayor parte por una combinación de hierro colado y hierro forjado. La utilización de cerramientos ligeros en lugar de pesados muros, redujo el peso del edificio alrededor de dos tercios.



*Figura 1.4-12 Equitable Life Assurance Building, diseñado por A.D. Gilman, E.H. Kendall y G.B. Post, construido en 1870, fue el primer edificio comercial en tener ascensor (1889, Library of Congress)*



*Figura 1.4-13 Home Insurance Building, construido en Chicago en 1885, es considerado el primer rascacielos de estructura metálica (Library of Congress)*

<sup>7</sup> 120 Broadway, New York.

Debido a que los cerramientos dejaron de tener función estructural, éstos podían tener mayor superficie de cristal, lo que se convirtió en una característica de alguno de estos primeros rascacielos, como puede apreciarse en la Figura 1.4-14, correspondiente al Reliance Building de Chicago, construido en 1890 y diseñado por John Root, E.C. Shankland y Charles B. Atwood.

El primer gran arquitecto moderno norteamericano fue Louis H. Sullivan (1856-1924) (Kaufman, 1969); dos ejemplos, aun existentes, de su arquitectura son el Prudential Building en Buffalo, NY (1896) y el Bayard-Condict Building en Manhattan, NY (1899). Su discípulo más conocido fue el arquitecto Frank Lloyd Wright (1867-1959).

El estilo Beaux-Arts influenció la arquitectura de los Estados Unidos desde el periodo de 1880 a 1920 (Klein & Fogle, 1986)

Entre 1890 y 1930, propiciado entre otros motivos por el invento del automóvil (Hoffman & Puchalski, 2004), surgió el desarrollo de los suburbios alrededor de las ciudades, lo cual propició el surgimiento de una nueva tipología, la American Foursquare (Figura 1.4-15): vivienda unifamiliar de estilo plano, con volúmenes en forma de cubo de dos alturas y porche, generalmente con elementos decorativos simples de carpintería, de los estilos *Prairie School* y *Craftsman*. A estos estilos, en el marco de esta época, también se les denomina *Transitional Period*. En 1944 el gobierno federal dictó el decreto *G.I. Bill of Rights*, mediante el cual respaldaba los créditos hipotecarios, con el fin de favorecer el acceso a más ciudadanos de una vivienda propia. Medidas similares hicieron más asequibles los automóviles. Estos motivos, unidos a la preferencia de la clase media de casas individuales, asentaron



Figura 1.4-14 El edificio Reliance Building, en Chicago, de 1890, es un ejemplo de esos primeros rascacielos de estructura metálica cuyas características estructurales permitieron la apertura de grandes ventanas (Chicago Architecture Foundation).



definitivamente los suburbios como el paisaje residencial estadounidense, caracterizado por la monotonía arquitectónica de sucesión interminable de unifamiliares.

A lo largo del siglo XX se utilizaron muchos sub-estilos dentro del estilo genérico denominado *Revivalism: Mediterranean Revival, Gothic Revival, Spanish Colonial Revival, American Colonial, Dutch Colonial Revival, Pueblo Revival, Mayan Revival, Egyptian Revival, Moorish Revival, etc.*

El Woolworth building, diseñado por el arquitecto Cass Gilbert en 1913, es un ejemplo de estilo neogótico (*Gothic revival*) que influyó en la arquitectura posterior por diferentes motivos. En primer lugar, pasó a ser el edificio más alto del mundo hasta 1930, con 233 metros. El arquitecto lo concibió y definió como una catedral del comercio. El volumen del edificio, que se extendía en altura, limitó significativamente la cantidad de luz que llegaba al resto del barrio, lo cual generó una alerta pública que desembocó en la implementación de lo que se denominó la *New York City setback law*. En líneas generales, la ley

**\$1,995<sup>00</sup> and Our FREE BUILDING PLANS**

**WILL BUILD, PAINT AND COMPLETE, READY FOR OCCUPANCY, THIS MODERN NINE-ROOM \$3,000.00 HOUSE**

HOW TO GET ANY OF OUR PLANS FREE FULLY EXPLAINED ON PAGE 2.

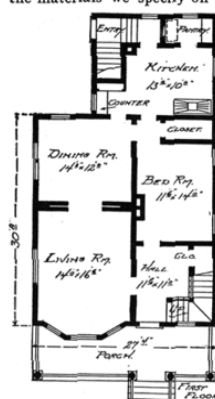


**MODERN HOME No. 52**

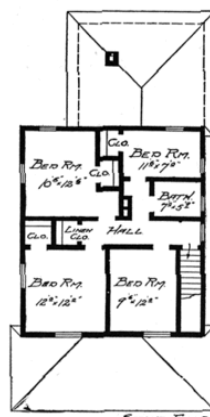
Concrete Block Construction. On the opposite page we illustrate a few of the materials we specify on this our \$1,995.00 house.

**OUR \$1,995.00 HOUSE**

illustrated above, consists of nine good sized rooms and bathroom, as shown in these floor plans



- FIRST FLOOR.**  
 Kitchen - - - - - 13 feet by 10 feet  
 Pantry - - - - -  
 Dining Room - - - - - 14 feet by 12 feet  
 Living Room - - - - - 14 feet by 12 feet 6 inches  
 Reception Hall - - - - - 11 feet 6 inches by 11 feet  
 Bedroom - - - - - 11 feet 6 inches by 14 feet  
**SECOND FLOOR.**  
 Bedroom - - - - - 12 feet by 12 feet  
 Bedroom - - - - - 9 feet 6 inches by 12 feet  
 Bedroom 10 feet 6 inches by 12 feet 6 inches  
 Bedroom - - - - - 11 feet 6 inches by 7 feet  
 Bathroom - - - - - 7 feet by 5 feet 9 inches  
 Linen closet and hall. Bedrooms have closets.



**The Arrangement of Our Houses** is such that they can be well heated with very little expense. Our \$1,995.00 house is but one of the many frame or concrete houses for which we are able to furnish our free building plans and specifications. No matter what price house you may want to build, remember we can save you from 25 to 50 per cent.

**DO NOT ATTEMPT BUILDING WITHOUT PLANS,** don't pay an architect \$100.00 or \$150.00 for plans which in no way compare in accuracy or detail with the plans we will furnish you free of charge on condition that you send us a small portion of your mill work order. If you were to attempt to build a house similar to the house illustrated above, it would cost you from \$500.00 to \$1,000.00 more. See how you can get the plans for this house free on page 2.

Sears, Roebuck & Co., Chicago, Ill. -40- BOOK OF MODERN HOMES

Figura 1.4-15 Modelo 52. Catálogo comercial de una casa Foursquare, una tipología surgida como motivo de la expansión de los núcleos urbanos a los suburbios entre 1890 y 1930 (Sears Homes, 1908-1914)

dictaba que los edificios podían construirse a cualquier altura siempre y cuando el área de cada torre se redujese a un cuarto del área total de la base (Figura 1.4-16).



*Figura 1.4-16 De izquierda a derecha el Woolworth Building (1913, 241 m), 40 Wall Street, ahora Trump building (1930, 283 m), el Chrysler building (1930, 318 m), y el Empire State (1931, 381 m). Son los cuatro edificios más altos del mundo en el periodo entre guerras, todos en la ciudad de Nueva York (B. de Miguel, B. de Miguel, D. Shankbone, D. Shankbone).*

Tras un empacho de ornamentación, a principios del siglo XX comenzaron a aparecer ejemplos de arquitectura interesada en la simplificación de formas, arquitectura moderna. Los arquitectos Rudolf M Schindler (1887-1953) y Richard Neutra (1892-1970) son ejemplos tempranos de esta tendencia.

Los arquitectos europeos que emigraron a Estados Unidos antes y durante la II Guerra Mundial, desarrollaron lo que se dio en llamar estilo internacional, localizado dentro de las líneas del estilo moderno. Ludwig Mies van der Rohe (1886-1969), Walter Gropius (1883-1969) son arquitectos conocidos de este periodo.

## ESTRUCTURAS Y MATERIALES DE LOS EDIFICIOS HISTÓRICOS

Cuando se va a acometer un proyecto de END en un edificio, además de conocer su historia, estilo y tipología, es fundamental entender su sistema constructivo y estructural, ya que dicho conocimiento puede contestar a algunas de las preguntas que la investigación de END pretende responder. Obviando la arquitectura anterior a 1850 por el escaso número de ejemplares existentes, Friedman y Pardo clasifican las estructuras históricas en tres grandes grupos en función de su diseño (Friedman & Pardo, 2017):

- No calculadas: basadas en las reglas tradicionales y empíricas de la época.
- Obsoletas: se diseñaron siguiendo un análisis racional acorde a los códigos de la época; la estructura no cumple los códigos actuales.
- Arcaicas: diseñada con un análisis racional acorde a la normativa de la época, sigue cumpliendo con los códigos actuales, sin embargo, los materiales y/o sistemas constructivos están desfasados y en desuso.

El conocimiento de la tipología estructural de un edificio es crítico, ya que determina la posibilidad de cambios y puede dar información a posibles lesiones, aun cuando la estructura no está vista. Atendiendo a la tipología estructural, Friedman clasifica la estructura de los edificios históricos en (Friedman, 2000) (Friedman & Pardo, 2017):

- Edificios de muros de carga. Con muros de fábrica de albañilería que reducen su espesor en altura. En esta tipología algunos muros soportaban los forjados (de viguetas de madera) mientras que otros únicamente su propio peso. Su diseño estaba basado en los códigos de la época, que a su vez recogían tanto conceptos empíricos como tradición constructiva (Fryer, 1887). Esta tipología dejó de utilizarse a gran escala a principios del siglo XX. Muchos de estos muros se construían con una cara vista, más elaborada y costosa y una hoja o cara oculta más simple. En edificios más antiguos estos muros podían ser de ladrillo romano<sup>8</sup>, ladrillo prensado<sup>9</sup>, terracota, o piedra, con la cara no vista de ladrillo común. En edificios más modernos, se encuentran ejemplos de paneles de hormigón prefabricado, así como caras ocultas de bloques de hormigón en lugar de ladrillo. Los muros de

---

<sup>8</sup> Ladrillo de mayor formato, normalmente 3-5/8" x 1-5/8" x 11-5/8".

<sup>9</sup> Moldeado bajo presión hasta la forma deseada.

carga con cámara de aire se introdujeron alrededor de 1900 pero no comenzaron a popularizarse hasta después de la II Guerra Mundial (Friedman, 2000). Los forjados más comunes asociados a la tipología estructural de muros de carga son los de viguetas de madera; de formas simples y repetitivas, no requieren de gran especialización y su diseño está basado en experiencia y tradición. Las viguetas de madera suelen ser de dos o tres pulgadas de espesor (5 - 7,6 cm) y de ocho a catorce pulgadas de altura (20,3 – 35,5 cm); la separación a ejes más común es de 16 pulgadas (40,6 cm), aunque puede variar de 12 a 24 pulgadas (30,4 – 61 cm). Normalmente la conexión entre las vigas y el muro consiste en embeber la cabeza de éstas en cajeados en el muro, aunque en los edificios más antiguos, es común encontrar un cargadero de madera paralelo al muro, que se sustituiría, a partir del siglo XX por ángulos de acero atornillados al muro. En la mayor parte de los casos, las viguetas de madera soportan tableros de madera (madera contrachapada a partir de 1940), cuya función es conformar la base del pavimento de la planta superior. En baños y cocinas es común encontrar que los tableros de madera sirven de encofrado perdido a una capa de mortero u hormigón. Antes de 1900 los encuentros entre viguetas de madera solían resolverse a caja y espiga (*mortise and tenon*). A finales del siglo XIX, esta conexión se sustituyó con una brida de hierro (*bridle iron*), consistente en una banda metálica que rodeaba una de las viguetas y se prolongaba hasta apoyar en la otra, aunque esta solución eliminaba la merma de sección de los elementos de madera debido al cajeo, introducía un nuevo factor de torsión (Figura 1.4-19).

Otro tipo de forjados asociados con muros de carga son los de bóvedas de albañilería (entre las que se incluyen las de Guastavino), aunque la mayor complejidad de ejecución de éstos los limitó a arquitectura monumental. Los daños que afectan a este tipo de sistema estructural están normalmente asociados a movimientos notorios de la cimentación o fallo de los muros portantes. Al contrario que las estructuras más modernas de acero, que se pueden ver afectadas por movimientos leves de los cimientos, las estructuras de albañilería soportan pequeños movimientos redistribuyendo las cargas; el fallo de las conexiones entre elementos que hace a estas estructuras no resistentes a flexión, permite asumir pequeños movimientos sin provocar daños mayores.



Un tercer tipo de forjados históricamente asociados a muros de carga son los forjados de viguetas ligeras de acero, separadas de dos a cuatro pies (122 cm) y dispuestas de manera similar a las de madera, y que suelen soportar una fina losa de hormigón vertida *in situ* o prefabricada. Este tipo de forjados solían encontrarse en pequeños edificios comerciales o industriales de dos alturas y en algunas viviendas, a partir de 1895.

A partir de 1840 se encuentran estructuras que combinan muros de carga con vigas de hierro forjado, si bien esta tipología no llegó a solventar los problemas inherentes a su construcción. Por ejemplo, para que las vigas apoyen correctamente en el muro, éstas deben estar empotradas, al menos, ocho pulgadas (20,3 cm), es decir dos hojas de ladrillo. Al mismo tiempo, para que la cabeza de estas vigas quede protegida de la intemperie, es necesario que se encuentren al menos a cuatro pulgadas (10,2 cm) de la superficie exterior del muro, lo que conlleva a espesores del muro superiores a lo habitual. Por otra parte, no era posible combinar las cualidades positivas de ambos sistemas durante la construcción, ya que los muros de carga son sencillos de construir, pero requieren tiempo, al contrario que las estructuras de hierro, más rápidas pero sofisticadas.

En estructuras de muros de carga posteriores a 1850, si el edificio es más ancho que una crujía, existen columnas intermedias que pueden ser de albañilería o de hierro. Si además existieran columnas perimetrales, éstas se conectan con los muros de carga a través de pilastras de albañilería o estas mismas pilastras están embebidas en los muros de carga.

El sistema de muros de carga confeccionados con bloques de hormigón y forjados de paneles prefabricados de hormigón se desarrolló en la segunda mitad del siglo XX y se utilizó ampliamente en aquellos proyectos en los que se priorizó coste y durabilidad. Se utilizó en edificios residenciales, comerciales e industriales menores de diez alturas en los que no se requerían grandes espacios abiertos. Se construían los muros, se colocaban los tableros prefabricados sobre éstos, y se vertía hormigón (armado) en las juntas para unir todas las piezas. El armado era fundamental para proveer estabilidad lateral; en evaluaciones de este tipo de edificios es importante conocer dónde ese armado debería existir para corroborar la estabilidad de la estructura. Dado que las normas sísmicas se han endurecido, es común

que se determine que es necesario reforzar la estabilidad lateral por no cumplirse los requerimientos actuales.

- Edificios de estructura de madera de gran sección: se componen de pilares portantes de gran dimensión, vigas y viguetas de madera y arriostramientos que conectan los elementos horizontales y verticales proporcionando estabilidad lateral y permitiendo que los cerramientos no sean de muros de carga. No se encuentran muchos ejemplares de esta tipología posteriores a 1850, excepto en graneros, molinos y algún edificio industrial (Friedman, 2000) (Figura 1.4-18. Uno de los motivos por los que no se descartó por completo el sistema fue por su buena resistencia frente al fuego, ya que grandes secciones de madera presentan buen comportamiento ante el fuego (American Institute of Timber Construction, 2003). El fallo de estas estructuras, y por tanto el primer elemento a estudiar en evaluaciones de END, suele darse en las conexiones, normalmente de caja y espiga o con vástagos de madera o metálicos; ninguna de estos ensamblajes resiste bien a torsión ni concentración de esfuerzo. Este tipo de estructura se sustituyó por el desarrollo de la tipología de montantes de madera o *wood-stud*: *balloon frame* y su inmediata evolución, el *platform frame*.
- Edificios de montantes de madera o *wood-stud*. Pueden considerarse la evolución de la tipología



Figura 1.4-18 Hangar en Moffett (CA), construida en 1933, es una de las estructuras históricas más significativas de Silicon Valley y una de las mayores estructuras de madera del mundo. Diseñada por K. Arnstein y W. Watson en madera debido a la escasez de acero en el periodo entre guerras (K. Diebolt).

industrial (Friedman, 2000) (Figura 1.4-18. Uno de los motivos por los que no se descartó por completo el sistema fue por su buena resistencia frente al fuego, ya que grandes secciones de madera presentan buen comportamiento ante el fuego (American Institute of Timber Construction, 2003). El fallo de estas estructuras, y por tanto el primer elemento a estudiar en evaluaciones de END, suele darse en las conexiones,

normalmente de caja y espiga o con vástagos de madera o metálicos; ninguna de estos ensamblajes resiste bien a torsión ni concentración de esfuerzo. Este tipo de estructura se sustituyó por el desarrollo de la tipología de montantes de madera o *wood-stud*: *balloon frame* y su inmediata evolución, el *platform frame*.



Figura 1.4-17 Edificios de montantes de madera, la tipología más utilizada en viviendas en Norteamérica. La imagen corresponde a una fotografía aérea de Levittown NY de 1957, construida únicamente para blancos, la mayor parte de ellos veteranos de la II Guerra Mundial. Toda la ciudad se construyó al mismo tiempo, con una sucesión de casas idénticas. Este fue el primer ejemplo de este modelo de ciudad, que se convirtió en el modelo a nivel nacional (1957, M. Leibowitz para el New York Times).

anterior con cuatro modificaciones principales: los pilares de gran sección son sustituidos por montantes repetitivos de pequeña sección, las vigas se sustituyen con viguetas repetitivas, incluyen arriostramientos entre montantes y los encuentros se materializan con puntas y colgadores de vigueta de acero (Figura 1.4-19). Estos elementos permitieron la industrialización del proceso constructivo. Existen dos categorías principales dentro de esta tipología estructural, el *balloon frame*, cuyos montantes alcanzan los dos pisos de altura y los *platform frame*, cuyos montantes tienen la altura de una planta, sobre la que se dispone el forjado que sirve de plataforma para erigir la siguiente. Las cimentaciones pueden ser de piedra, ladrillo, bloques de hormigón o de hormigón vertido. Las lesiones más comunes se derivan de fallos durante la construcción o posteriores reparaciones, mala gestión de la condensación, humedad por capilaridad y deterioro de los materiales constructivos en el tiempo. Las viviendas unifamiliares son con diferencia el tipo de edificio que más ha utilizado y utiliza esta tipología estructural en Norteamérica. Existen ciudades construidas en una misma promoción con todas sus casas idénticas (Figura 1.4-17).

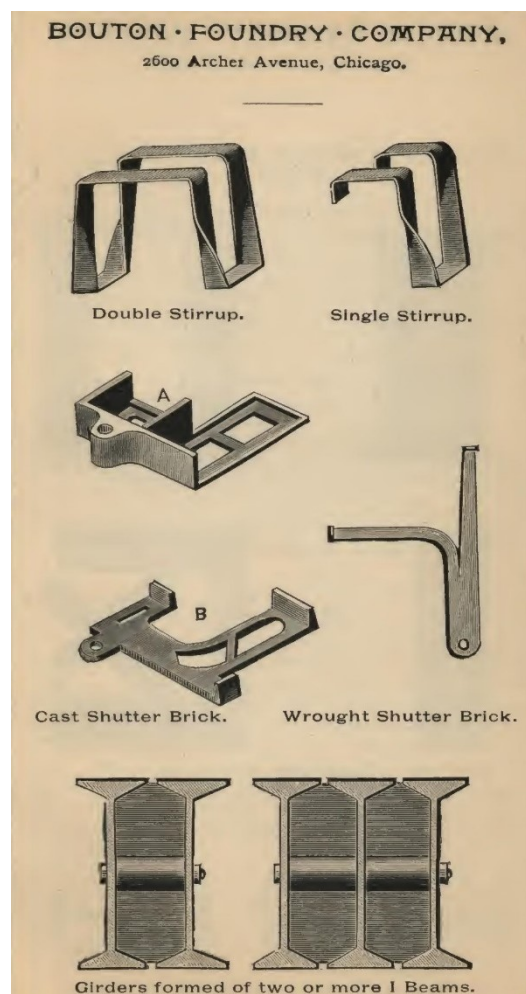


Figura 1.4-19 Catálogo comercial de Bouton Foundry Company de principios de siglo XX. En la parte superior se muestran dos modelos de colgadores de viguetas de madera (G. Pardo).

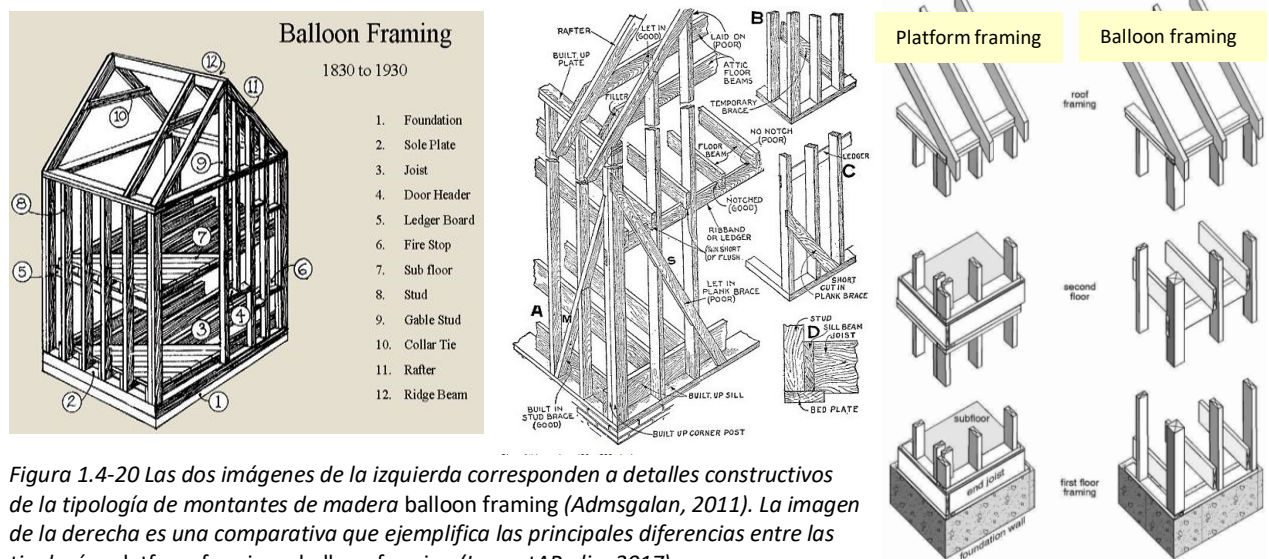


Figura 1.4-20 Las dos imágenes de la izquierda corresponden a detalles constructivos de la tipología de montantes de madera balloon framing (Admsgalan, 2011). La imagen de la derecha es una comparativa que ejemplifica las principales diferencias entre las tipologías platform framing y balloon framing (InspectAPedia, 2017).

- Estructuras de montantes metálicos (*Steel-stud buildings*). Se trata de un sistema estructural muy similar al de montantes de madera, en el que los montantes de madera son sustituidos por montantes metálicos (normalmente acero galvanizado) de pequeña sección (comúnmente denominados *C-joists*). Los edificios en los que se utilizó esta tipología estructural se asemejan en configuración y capacidad portante a los de montantes de madera, siendo destacables dos diferencias principales: dado que montantes y viguetas son de canales de acero de espesor menor a 1/8 de pulgada, los encuentros deben reforzarse con rigidizadores para evitar que se deformen los miembros; la conexión entre miembros puede hacerse atornillándolos directamente en las alas o el alma de la C. Una de las ventajas de este sistema es que es compatible con forjados de chapa y hormigón vertido, proporcionando forjados más estables con mejor comportamiento frente al fuego. Esta tipología se utiliza principalmente en viviendas unifamiliares cuando el precio de la madera es alto, el coste por miembro es similar en ambos materiales, pero la ejecución con montantes metálicos es más eficiente, por tanto, más económica.
- Edificios con fachadas de fundición (*cast-iron*). Presentan elementos de función o hierro colado en fachada tales como columnas, vigas y dinteles, lo cual posibilitaba mayor luz natural en el interior, mayor rapidez de



ejecución y mejor comportamiento ante el fuego que otros sistemas coetáneos. Estas estructuras rondaban los seis pisos de altura. Se utilizaron mayormente entre 1850 y 1870.

- Edificios de estructura metálica. La utilización de acero estructural en columnas, arriostramiento lateral y vigas apareció por primera vez en los Estados Unidos en la década de 1880, cuando Edgar Thomson Steel Works comenzó a comercializarlo en la costa este, alcanzando su madurez en torno a 1910 (Friedman, 2000). Rápidamente ganó popularidad al ser un material cada vez más asequible, ofrecía la posibilidad de trabajar con variedad de formas, rapidez de ejecución y alta resistencia. El origen y principal objetivo de estas estructuras era satisfacer la demanda de altura del mercado entre 1880 y 1900, por lo que son la tipología estructural utilizada en los rascacielos históricos; entre 1910 y 1950 la práctica totalidad de edificios de mediana y gran altura en los Estados Unidos se construyeron con esta tipología constructiva. Fruto de la evolución de conocimientos basados en la tradición, el análisis de soluciones frente a fuerzas horizontales de viento y a efectos de los momentos secundarios han ido evolucionando en el tiempo:
  - Estructuras de jaula (*cage construction*): se utilizaron en edificios mayores a seis alturas y se caracterizaban por el uso de estructura metálica en el interior y muros autoportantes de albañilería en su exterior, exentos de carga de los forjados. Los muros exteriores actuaban como estabilizadores de la estructura frente a cargas horizontales. En 1904, debido al colapso de 59W 46st, se dejó de utilizar esta tipología estructural.
  - Estructuras híbridas: no existe un patrón que describa esta tipología debido a la heterogeneidad de soluciones a las que llegaron diferentes arquitectos e ingenieros. Friedman y Pardo (Friedman & Pardo, 2017) ejemplifican esta tipología con el Tower Building (1889) de Nueva York, cuya estructura consistía en estructura metálica de columnas de función y vigas de hierro forjado en las seis plantas inferiores y estructuras de muros de carga en las seis plantas superiores. Para compensar su esbeltez (ratio altura-anchura 6:1) se arriestró instalando una única cercha Warren en toda su altura. El objetivo de situar los muros de carga en los pisos superiores era estabilizar la estructura contra el vuelco por viento.

- Estructuras de acero. Todos los elementos de la estructura principal eran de acero laminado. Hasta la aparición de los tornillos de alta resistencia en 1960, las conexiones se resolvían con roblones (American Institute of Steel Construction, 1987). En este tipo de estructuras se utilizaron tres métodos para contrarrestar las cargas horizontales: conexiones rígidas, diagonales o muros de hormigón. Las fachadas, al no tener función estructural, ofrecían innumerables posibilidades de diseño, pudiendo ser ancladas a las vigas perimetrales en cada planta.

Una de las características de la tipología de estructura metálica, es que los cerramientos se apoyan en los forjados, lo que provoca que estos cerramientos se vean afectados por movimientos estructurales que se manifiestan a través de grietas, abombamientos, etc.

Tres tipos de forjados han sido los más utilizados en combinación con esta tipología constructiva: forjado ligero con viguetas, albañilería y hormigón. La primera categoría no resultó una buena combinación porque son forjados que vibran con facilidad, son ruidosos y transmiten los olores. La solución más común que se encuentra de este tipo de forjados, habitualmente en edificios comerciales de una o dos alturas, consiste en viguetas metálicas perforadas que soportan una fina capa de hormigón. Los forjados de albañilería se utilizaron en los inicios de la estructura metálica, hasta 1920, porque el hormigón aún no se había popularizado en el país; se encuentran diferentes tipos, tales como los revoltones de ladrillo, las bóvedas tabicadas y las bovedillas de terracota (Figura 1.4-22 y Figura 1.4-21). Todos estos tipos de forjados dejaron de

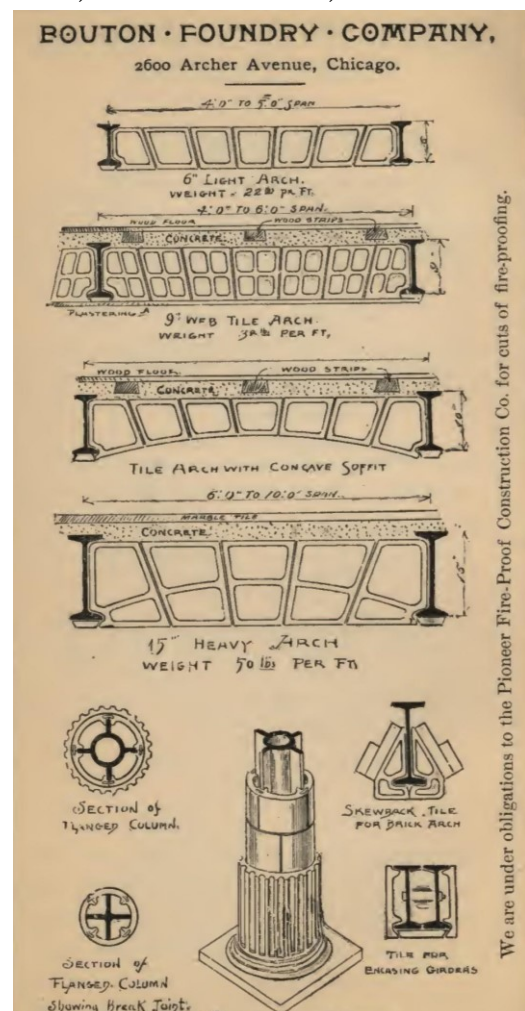


Figura 1.4-21 Catálogo comercial de Bouton Foundry Company de principios del siglo XX, en la que se muestran algunas de las posibles opciones de viga metálica y bovedilla cerámica, utilizadas hasta aproximadamente 1920 (G. Pardo).

utilizarse en favor de los forjados de hormigón, que a su vez también han evolucionado en el tiempo; hasta 1950 las losas de hormigón eran vertidas sobre encofrado. Existe un tipo específico, el hormigón con escoria armado con mallazo (*cinder-concrete draped-mesh*), utilizado masivamente de 1910 a 1940, que puede encontrarse en miles de edificios; la característica principal es que utiliza escoria de carbón en lugar de grava, y son tan resistentes como las losas de hormigón armado, con el inconveniente de que son extremadamente vulnerables a la humedad por su elevada porosidad, la presencia de sulfuro que ataca el acero en presencia de humedad y el elevado ratio superficie/volumen del mallazo, que lo hace más vulnerable a la corrosión. Por este motivo, este tipo de forjados deben ser inspeccionados cuidadosamente en búsqueda de signos de humedad.



Figura 1.4-22 Diferentes tipos de forjados, de izquierda a derecha: bóveda tabicada (1899), bovedilla cerámica entre viguetas de acero y forjado de viguetas de acero con recubrimiento cerámico de protección contra el fuego (1913).

Los forjados de viguetas de hormigón (*concrete joist*) y los forjados encasetonados (*waffle-slab floors*) no se utilizaron en combinación con estructuras de acero porque éstos suelen tener más espesor que las vigas de la estructura metálica. Sin embargo, hay un tipo de forjado de vigas de hormigón vertidas *in situ*, utilizado entre 1890 y 1940, el forjado de bovedillas y viguetas *in situ* (*tile-infilled joist*); las bovedillas, bloques de hormigón o cualquier otro elemento hueco de albañilería se colocaba en filas dejando un espacio entre ellas que era armado y posteriormente rellenado con hormigón vertido.

El tipo de forjado más común en combinación con estructura metálica a partir de 1950 es el de losa de hormigón sobre chapa ondulada como encofrado perdido.

- Edificios de estructura de hormigón armado. Al contrario que los edificios de estructura metálica, de los que se encuentran ejemplos estadounidenses que atestiguan la clara evolución tecnológica en el tiempo, la tecnología del hormigón armado para edificios comenzó a popularizarse en Estados Unidos

a principios del siglo XX, habiendo evolucionado principalmente en Europa (Friedman, 2000). Su utilización en Estados Unidos comenzó por las infraestructuras. El hormigón para uso residencial se publicitó en la segunda edición del libro *A Home for All* (Fowler, 1853), en el que se describían las ventajas del hormigón (*gravel wall*). La ciudad de Seguin<sup>10</sup>, en Texas es un ejemplo temprano de



Figura 1.4-23 La Sebastopol House en Seguin, Texas es, construida en 1856 en estilo neoclásico-griego es uno de los primeros ejemplos de hormigón de cal (limecrete). (Seguin Texas Government, 2016)

ciudad que contaba ya en 1850 con varios edificios de hormigón de cal (90 en 1900, de los cuales 20 todavía existen), aunque el material no era lo que hoy conocemos como hormigón armado, estaba compuesto de lo que llamaban “agua de cal” (*lime water*) y grava, sin armar (Gaudette & Slaton, 2007). Importantes ejemplos de hormigón de cal sin armar que siguieron a éste fueron los fuertes de Fred Steele y Laramie (WY), el hotel Ponce de León en St. Augustine (FL) y varios muros de contención comisionados por el gobierno federal a finales del siglo XIX en las costas del Atlántico, Pacífico y Golfo. Según Gaudette & Slaton (Gaudette & Slaton, 2007), el hormigón armado en Estados Unidos puede datarse en 1860, cuando S.T. Fowler obtuvo la patente para una pared de hormigón armado. En la década de

1870 Eilliam E. Ward construyó su propia vivienda en Port Chester (NY) utilizando hormigón armado con barras de hierro en todos los elementos estructurales. Sin embargo, siguió sin utilizarse hasta 1880, cuando Ernest L. Ransome introdujo modificaciones que hicieron el material más

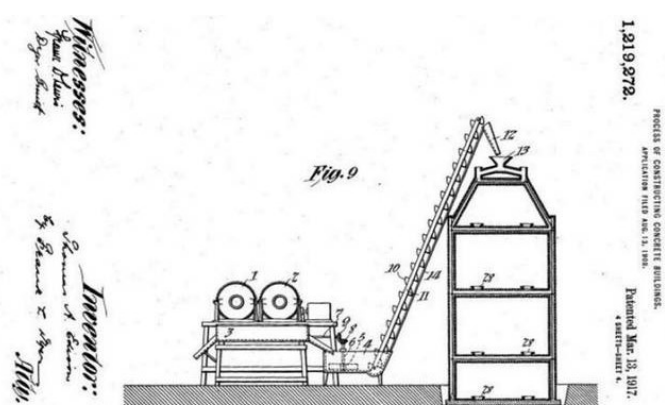


Figura 1.4-24 Patente US 1219272 de Thomas Edison en la que registra un sistema de hormigón armado vertido desde una única posición para construir todo un edificio. “Escaleras, particiones, techos decorados y otras decoraciones interiores” serian parte de la misma pieza gigante de hormigón. El sistema no prosperó, entre otros factores por el elevado precio del encofrado.

<sup>10</sup> Conocida con el seudónimo de *The Mother of Concrete Cities*, La madre de las ciudades de hormigón.



practicable, como la patente de 1884 de incorporar estrías en las barras con el fin de mejorar la adherencia entre la pasta y el hierro, o el horno rotativo. Este tipo de horno tenía mayor capacidad y quemaba más uniformemente, lo que permitió fabricar cemento de mejor calidad a menor precio.

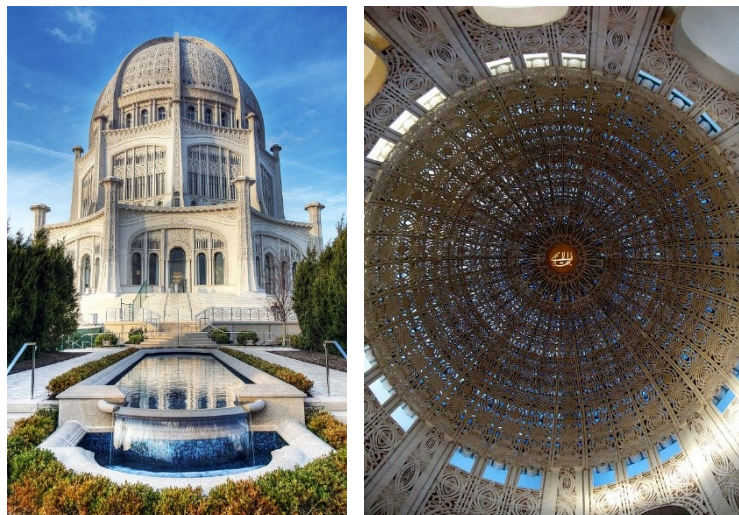


Figura 1.4-25 Templo de Bahá en Wilmette (IL), construido con hormigón armado entre 1912 y 1953; diseñado por L.J. Bourgeois y G.A. Fuller (P. Puppel, Creative Commons).

Estas mejoras propiciaron el uso a mayor escala del hormigón armado a partir de 1900. A principios del siglo XX, E. Ransome (MA), A. Kahn (MI), y R. Schmidt (IL) promovieron el uso del hormigón armado en lo que se denominó el *Factory Style*, que utilizaba hormigón visto con cerramientos con vidrio. El inventor Thomas Edison también fue un precursor del hormigón (Figura 1.4-24), incluso abrió una fábrica de hormigón y llegó a construir una promoción de viviendas de hormigón armado en Union Township (NJ) en 1908. A partir de 1920 el hormigón armado empezó a utilizarse en diseños tan influyentes como el templo de Bahá en Wilmette (IL), la Casa de la Cascada en 1934 de F.L. Wright en Bear Run (PA) o ya en 1959 el museo Guggenheim en Nueva York (NY) también de F.L. Wright.

Una de las principales ventajas que propició su uso fue la posibilidad de crear formas *in situ* fabricando encofrados. Sin embargo, si el encofrado era complejo, podía encarecer el coste total debido a la disminución de efectividad en tiempo en obra. Antes de 1950 la mayor parte del encofrado se construía con paneles de madera, aunque los encofrados metálicos ya se utilizaban desde la primera década del siglo XX. Las improntas del encofrado en el hormigón, así como las juntas de hormigonado, pueden orientar sobre la fecha de construcción de la estructura.

Las principales lesiones en hormigón armado, y por tanto el foco en investigaciones de END en este material, son oxidación de las armaduras, degradación del hormigón, fallos en la construcción y problemas

estructurales. Cuando el entorno alcalino del hormigón (PH superior a 10) es alterado y el acero expuesto a humedad, comienza el proceso de oxidación, produciendo abombamientos y desconchados fruto de la expansión del acero. Otra lesión común en hormigón histórico es pobre vibrado o consolidación, especialmente en las zonas altas debido a los métodos de apisonado disponibles a principios del siglo XX; esto provocaba oquedades que pueden reducir la protección del acero y reducir la resistencia. En casos anteriores a la I Guerra Mundial, el hormigón era vertido a pequeñas tongadas en los encofrados debido a las limitadas técnicas de vertido de la época, lo que provocaba juntas de hormigonado próximas, lo que puede suponer una fuente de lesiones debido a una mayor facilidad de penetración de agua en las juntas. A principios del siglo XX solía verterse una capa con mayor contenido de cemento en las caras exteriores y superiores de los muros a modo de barrera impermeable; a lo largo del tiempo, es común que dicha capa se desprenda del muro dejando un hormigón más pobre desprotegido (Gaudette & Slaton, 2007). Debido a la heterogeneidad inherente al hormigón histórico, la investigación con métodos de END puede ser muy compleja o imposible.

En función de los cerramientos exteriores, los edificios estadounidenses son:

- De madera: la mayor parte de los edificios con cerramientos de madera tienen también estructura de madera. Muchas restauraciones sustituyen el cerramiento original de madera con versiones más modernas de vinilo o aluminio (Figura 1.4-9).
- De albañilería: siendo la piedra y el ladrillo los materiales más comunes. Las lesiones suelen ser fácilmente detectables a simple vista debido a la degradación de la piedra, el ladrillo o el mortero (Figura 1.4-8). Este tipo de cerramientos se explica con más detalle en el apartado de muros de carga en este mismo capítulo.
- Mixtos: en grandes edificios, pueden encontrarse cerramientos de albañilería, modernos cerramientos de muro cortina, paneles prefabricados, etc. En esta tipología los complejos y variados sistemas de estanqueidad dependen de sellantes y conexiones entre múltiples piezas que pueden complicar la investigación de anomalías (Figura 1.4-16).

Los materiales utilizados para la impermeabilización de los techados inclinados de los edificios históricos estadounidense son: teja cerámica, láminas metálicas (cobre, plomo), madera (*wood singles*), pizarra o asfalto (Figura 1.4-26). La mayoría de las cubiertas planas se impermeabilizaban con papel impregnado de asfalto o membrana de caucho. Además del material de cerramiento del tejado, un elemento fundamental es la conexión entre el tejado y los diferentes elementos de cerramiento y se define en gran medida en función del material. Si las piezas visibles del tejado no están dañadas, la investigación relativa al tejado debería siempre comenzar por esos encuentros entre el tejado y el resto de elementos del edificio (*flashing*).

Hasta alrededor de 1910, fecha en la que el hormigón armado comienza a generalizarse en todo el país, las cimentaciones eran de pilotes de madera o de albañilería, pudiendo encontrarlas de granito vasto, piedra caliza, ripios, ladrillo, bloque de hormigón y hormigón vertido in situ (a partir de principios del siglo XX). Cuando comenzó a utilizarse el hormigón, era común utilizarlo sin armar, imitando a una cimentación de albañilería convencional. El elemento más débil de las cimentaciones de albañilería suele ser el mortero de las juntas.

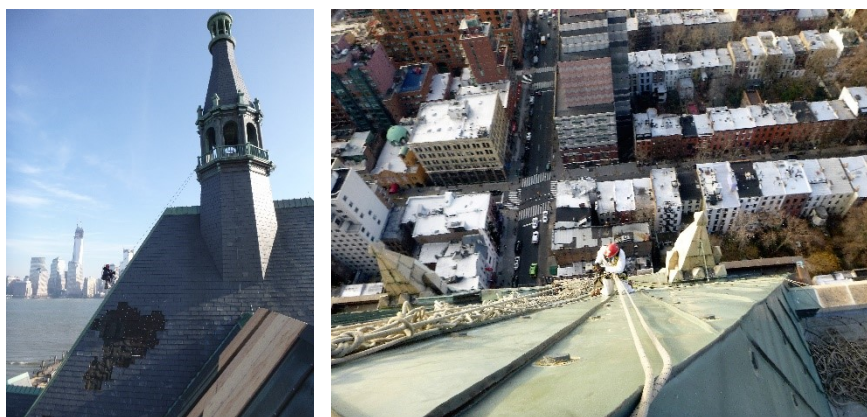


Figura 1.4-26 La fotografía de la izquierda corresponde a la inspección del tejado de pizarra de la CRR Terminal en Nueva Jersey tras el huracán Sandy. La fotografía de la derecha corresponde a la inspección de un tejado de lámina de cobre en un edificio residencial en Brooklyn, 75 Livingston Street.

## 1.4.2.2. EL PATRIMONIO ARQUITECTÓNICO DE RAFAEL GUASTAVINO MORENO Y RAFAEL GUASTAVINO EXPÓSITO EN LOS ESTADOS UNIDOS: LA TÉCNICA CONSTRUCTIVA DE LA BÓVEDA TABICADA DE GUASTAVINO

---

---

*From Guastavino to the moon. Span + Form + Fireproof – Mass – Cost – Time.  
More with less*

---

Norman Foster (Foster, 2014)

### INTRODUCCIÓN

Colón (Panamá), Quebec (Canada), La Habana (Cuba), Birmingham (Alabama, EEUU), Ottawa (Canada), Barcelona (España), San Luis de Potosí (México), Delhi (India), Nueva York (EEUU), Boston (EEUU)... hasta ciento seis ciudades repartidas en tres continentes<sup>11</sup> son ciudades en las que existen edificios con bóvedas tabicadas construidas por la compañía de Rafael Guastavino Moreno (Valencia, España, 1842 – Asheville, North Carolina 1908) y Rafael Guastavino Expósito (Barcelona, España, 1872 – Nueva York, Estados Unidos, 1950), la Guastavino Fireproof Construction Company (R. Guastavino Company a partir de 1897) (Mileto & Vegas, 2012).

El número total exacto de edificios en los que la Guastavino Co. intervino se desconoce, si bien se cree que oscila entre 1.100 y 1.300. Sólo en Estados Unidos, se estima que fueron más de 1.000. Por este motivo para esta tesis se desarrolló la primera herramienta funcional e interactiva diseñada para elaborar el catálogo más completo posible de la obra de Guastavino. Durante más de cinco años y 1.450 horas de investigación, se recopiló información relativa a la ubicación e historia de edificios en los que colaboró la Guastavino Co., a la vez que se visitaron y fotografiaron cientos de edificios.

---

<sup>11</sup> Según datos extraídos de la colección *The Guastavino Fireproof Construction Company/George Collins architectural records and drawings* en los archivos Avery de la Universidad de Columbia.

A lo largo de la historia muchas de estas bóvedas han sido demolidas durante las tareas de restauración por desconocimiento de la técnica constructiva. La lesión más habitual consiste en la caída de ladrillos de la capa decorativa como consecuencia de la pérdida de adherencia entre los ladrillos de la primera y segunda capa.

Durante esta tesis se ha desarrollado una investigación para determinar qué métodos de END podrían ser útiles para diagnosticar dicha lesión desde el trasdós. Dicha investigación se incluye en el capítulo 4.

## HISTORIA

Rafael Guastavino Moreno fue un maestro de obras y arquitecto valenciano. Su bisabuelo fue Juan José Nadal (1690-1763) un importante arquitecto que construyó más de una veintena de iglesias entre las que se encuentra la iglesia de San Jaime en Villareal, Castellón.

Rafael creció en Valencia, una ciudad caracterizada en aquel entonces, y todavía hoy, por su skyline repleto de cúpulas. Durante esos años, muchas de esas cúpulas estaban siendo demolidas debido principalmente a las consecuencias de la Desamortización de Mendizábal. Ese momento debió ser muy interesante para un futuro arquitecto como era Rafael Guastavino.

En 1859 Rafael se mudó a Barcelona para estudiar construcción y diseño. Durante los siguientes 20 años construyó diversas residencias y edificios industriales que servirían de inspiración para la generación de arquitectos modernistas como Gaudí y Domenech i Montaner. Las bóvedas, cúpulas y escaleras tabicadas estuvieron siempre presentes en sus primeros diseños. Magníficos ejemplos de esta etapa son la Fabrica Batlló (1869-1875) en Barcelona y El Teatre de la Massa (1881) en Vilassar de Dalt.

Guastavino Sr. emigró a Estados Unidos en 1881 coincidiendo con la Época Dorada de Estados Unidos, denominada así por la expansión y desarrollo de la nación americana. Consciente de ello, Guastavino Sr. tomó la decisión de abandonar España acompañado por su hijo Rafael Guastavino Expósito (1872-1950) de tan solo 8 años.



El Gran Fuego de Chicago de 1871 y la consecuente adopción de códigos y parcelación contra incendios, despertó un gran interés en la tecnología de la construcción resistente al fuego. Como consecuencia, Guastavino Sr., experto en sistemas de bóveda tabicada, comenzó una campaña para demostrar y convencer a arquitectos e ingenieros de las ventajas económicas y de protección ante el fuego de su sistema frente a la construcción metálica. En 1889, fundó la *Guastavino Fireproof Construction Company* (Figura 1.4-27). Su hijo, Guastavino Jr. También se unió a la compañía, que dirigió posteriormente desde 1908 hasta 1943.



Figura 1.4-27 Anuncio comercial de la *Guastavino Fireproof Construction Company* (Avery Library).

A lo largo de setenta años, la compañía trabajó en más de un millar de edificios en 11 países. Construyeron techos abovedados y cúpulas en más de trescientos edificios en la ciudad de Nueva York, entre los que se encuentran la entrada principal del *Carnegie Hall*, las bóvedas de estilo gótico de *St. John the Divine*, el hall de registro de *Ellis Island* y el *Oyster Bar* en la estación central de Nueva York (Huerta, 2001). La historia de la arquitectura en Nueva York no puede ser entendida sin el conocimiento del impacto que tuvo la *Guastavino Company* (Loren, 2009).

En 1885, Guastavino Sr. patentó un sistema constructivo basado en la técnica tradicional de la bóveda catalana, el cual poseía un excelente comportamiento ante el fuego. Partiendo de esta técnica vernácula pronto creó aplicaciones modernas adaptadas a las necesidades de una nación creciente que demandaba una construcción fiable frente al fuego. En esta línea Guastavino Sr. promocionó el sistema estructural de bóveda catalana como una solución resistente al fuego que permitía a los arquitectos diseñar con superficies curvas y decoradas; además era un sistema más económico y ligero que la construcción metálica. Guastavino Sr.

denominó a su sistema *Construcción Cohesiva* y lo diferenció de lo que denominó *Construcción Gravitativa (Gravity Construction)* ya que esta última requiere cimbras y encofrados para su construcción y es mucho más pesada. En 1892 publicó *Ensayo sobre la Teoría e Historia de la Construcción Cohesiva* (Guastavino Moreno R. , 1892), basado en una charla que impartió en el *Massachusetts Institute of Technology* (MIT).

Al patentar la técnica de la bóveda tabicada se convirtió en el dueño intelectual de la misma en un país con una economía en expansión de sesenta y cinco millones de habitantes<sup>12</sup> (United States Census Bureau, 2016). Durante los

siguientes treinta años los Guastavinos registraron hasta veinticuatro patentes. Estas incluían elementos de la construcción cohesiva como arcos, bóvedas, escaleras y ladrillos especiales. Rafael Guastavino Moreno no copió algo que ya existía en España, sino que adaptó una técnica tradicional, que conocía bien, a las necesidades de la nación norteamericana del momento. El conocimiento de Guastavino Sr. se basaba en la arquitectura antigua, pero con una visión moderna. Cada una de las patentes incluía alguna innovación, como el uso de acero, diversas técnicas de fabricación o propiedades acústicas específicas. Por ejemplo, en la patente No. 548.160 (Figura 1.4-28) Guastavino Sr. inventó un ladrillo o rasilla, que era fácil de transportar en bloques de cuatro y al romperlo en obra ofrecía una forma más favorable para transmitir cargas.

En 1900 varios arquitectos americanos votaron para elegir los diez edificios más hermosos de los Estados Unidos (*Brochure Series, VI, January 1900*). De los

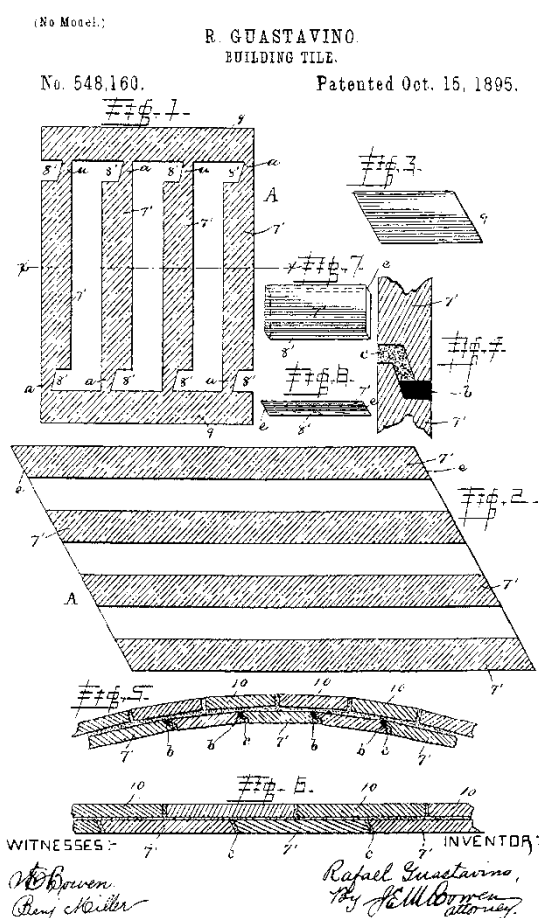


Figura 1.4-28 Guastavino Patent No. 548,160, Building Tile, 1895 (Avery Library).

<sup>12</sup> Según censo del año 1890.

edificios elegidos durante la estancia de Guastavino en EEUU en todos los casos menos en dos había intervenido la Guastavino Company. En 1967 la sección de Nueva York de la AIA (*American Institute of Architects*) hizo una selección de treinta y ocho edificios destacados de la isla de Manhattan en sus últimos 100 años. De los veintidós construidos durante la época de Guastavino más de la mitad están recogidos en el inventario de la compañía (Parks & Alan , 1996).

El legado de Guastavino representa un extraordinario ejemplo de cómo una técnica constructiva ancestral puede ser adaptada a los nuevos tiempos y pasar a convertirse en una técnica moderna e innovadora en el contexto de un desarrollo industrial. No solo eso, sino que además supuso un importante rol en la construcción de Estados Unidos (de Miguel Alcalá, Pardo Redondo, & Diebolt, 2014).

## LA TÉCNICA CONSTRUCTIVA DE LA BÓVEDA TABICADA DE GUASTAVINO

La técnica de la bóveda tabicada es un sistema constructivo que se ha utilizado en España durante los últimos seiscientos años. También conocido como bóveda catalana, extremeña o de ladrillo (Forteza Luna & López Bernal, 1998), este sistema se caracteriza por realizarse con una o más hojas de ladrillos de poco espesor colocados en posición plana. Los ladrillos suelen tener unas dimensiones aproximadas de 30x15x2,5 cm. Tradicionalmente la primera hoja de ladrillos era ejecutada con mortero de yeso, o cemento natural de fraguado rápido, y no necesitaba de cimbra o soporte auxiliar (Huerta, 2004). El Convento del Carmen (S. XV) y el Convento de Santo Domingo (S. XIV-XV), ambos en la ciudad de Valencia, son dos de los primeros ejemplos que se conocen. Sin embargo, el origen de la técnica constructiva es incierto. Se han encontrado técnicas similares desde la época romana donde los constructores utilizaban ladrillos colocados en forma plana para hacer de encofrados para las bóvedas de hormigón romano, como por ejemplo, las termas de Caracalla en Roma.

La construcción cohesiva requiere de tres materiales principales: yeso, ladrillos de poco espesor o rasillas, y mortero de cemento. Los ladrillos que se podían encontrar en Estados Unidos en la época de Guastavino eran demasiado gruesos y de un tamaño menor que el ladrillo ideal para este sistema. Además, Guastavino Sr. tuvo problemas para el suministro de ladrillos en sus proyectos (Ochsendorf, 2013). La calidad y cantidad de ladrillos que se requería para el objetivo de la compañía no



se podían encontrar fácilmente, por lo que tomó la decisión de abrir su propia fábrica de ladrillos en Woburn, Massachusetts a principios de 1890. La Guastavino Co. llegó a tener oficinas en once ciudades diferentes, y la fábrica de ladrillos llegó a fabricar hasta 900.000 ladrillos al año (Ochsendorf, 2010 ). El ladrillo estándar tenía unas dimensiones de 15 x 30 x 2,54 cm. aunque también fabricaban ladrillos en diferentes tamaños y formatos, dependiendo del proyecto y la posición del ladrillo en la bóveda (Guastavino Moreno R. , 1890).

En cuanto a los aglutinantes empleados por los Guastavino todavía se desconocen todas las características sobre el mortero utilizado en la hoja inferior. La calidad y el fácil acceso al cemento Portland es una de las razones por la que Guastavino Sr. eligió Estados Unidos. En términos generales utilizó mortero de yeso, o cemento natural de fraguado rápido, para la primera hoja, y mortero de cemento para las siguientes hojas. Posiblemente utilizó otro tercer tipo de mortero para la hoja visible y decorativa. Es sabido que utilizó cemento Portland para sus morteros, pero todavía quedan respuestas sin resolver en cuanto si utilizaba aditivos para los morteros, o si realizaba diferentes combinaciones de materiales para el mortero dependiendo del tamaño de la bóveda y la posición de la hoja, así como las diferentes dosificaciones utilizadas.

No existen suficientes fotografías o documentos para confirmar de una manera precisa y concisa el proceso de construcción de la técnica, si bien se pueden establecer teorías en base a la lógica constructiva. Algunas bóvedas fueron rematadas con una hoja en la parte inferior a modo de decoración realizada después de la bóveda estructural; mientras que en otras ocasiones la capa inferior servía como hoja estructural y como decoración al mismo tiempo (Vizcarra, 2015).

## EL LEGADO DE LOS GUASTAVINO

Existen diferentes inventarios de edificios, elaboradas por diferentes investigadores (Parks, 1999). Las cuatro listas que se han estudiado con más detalle para la elaboración de esta tesis han sido:

- El inventario manual del profesor George Collins (Springfield, MA, Estados Unidos, 1917 – Falmouth, MA, Estados Unidos, 1993) de la Universidad de Columbia (Figura 1.4-29). A principios de la década de los 60, el profesor encontró y rescató de la basura parte de los archivos de la recién clausurada *Guastavino*

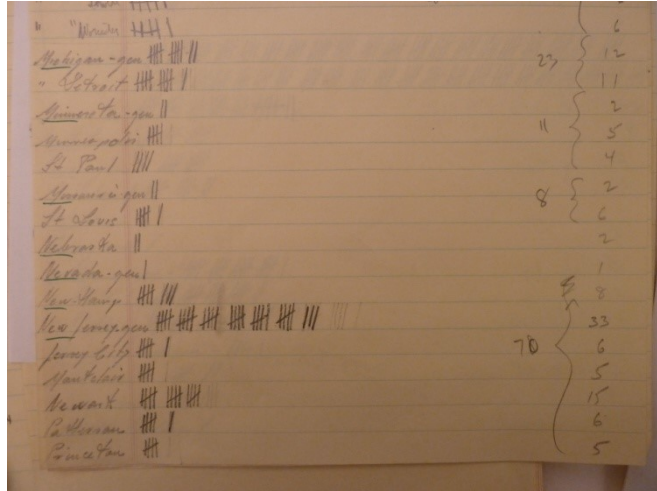


Figura 1.4-29 Ejemplo de una de las listas manuales del profesor G. Collins disponibles en la biblioteca Avery de Columbia University.

- Fireproof Construction Company*. En base a estos documentos, el profesor elaboró una importante lista de edificios, si bien la realidad ha demostrado que existen o existieron más de los que el profesor Collins pudo rescatar de aquel contenedor y que algunos de los edificios recogidos en los documentos no se llegaron a construir. El profesor elaboró diferentes clasificaciones que plasmó en documentos manuscritos, algunos de los cuales se adjuntan en el apéndice 9.1 de esta tesis. El profesor Collins clasificó 1.130 proyectos por localización, 1.330 proyectos por año de construcción y 1.144 proyectos por tipología. La investigación que realizó fue la primera que se tenga constancia y probablemente la más importante, si bien, el procesado de la misma se hace complicado por encontrarse en soporte papel.
- El Listado de la biblioteca Avery de la Universidad de Columbia en Nueva York: Se trata de un listado en formato Excel que incluye 976 edificios en el que se detalla información relativa al país, municipio, localización en el archivo, número de dibujos, nombre del proyecto, arquitecto/s, fechas de los dibujos y datos del archivo. En esta lista no se especifica si los edificios llegaron a construirse, y si lo hicieron, si siguen en pie o no. Tampoco especifica la tipología de edificios, entre otros aspectos. Este listado se incluye en el apéndice 9.1 de esta tesis.
- El listado realizado para el plano de la exposición *The Old World Builds New York: Guastavino Construction in Manhattan, 1886-1954* editado en el año 2000 por la Universidad de Columbia (Parks & Allan, 1996). Se trata de un documento en papel que se puede consultar presencialmente en la biblioteca Avery de la Universidad de Columbia que muestra un total de 233 edificios

distribuidos en la isla de Manhattan. En él se proporciona el nombre del proyecto, la localización, el año, los arquitecto/s y si ha sido demolido o no.

- La lista del libro *Guastavino Vaulting, the Art of Structural Tile* de John Ochsendorf publicado por Princeton Architectural Press en el 2010. La lista incluye 596 edificios no numerados en los que se detalla el nombre del edificio, la dirección, el arquitecto y el año de construcción. Este listado se hace a partir de obras que contienen bóvedas o cúpulas de belleza destacable, si bien no contempla aquellas en las que los Guastavino realizaron otros tipos de trabajo, por lo que está incompleto.

Los cuatro inventarios aportan información muy valiosa y se complementan entre sí, sin embargo, los formatos son poco accesibles y es complicado mantener un listado dinámico y activo donde ir introduciendo los nuevos edificios no contemplados en cada uno de dichos inventarios. Por ese motivo, para la presente tesis se generó la herramienta interactiva en forma de página web [www.guastavinomap.org](http://www.guastavinomap.org). El objetivo es poner a disposición universal una herramienta que permita elaborar una base de datos completa, accesible y dinámica que por su carácter digital se pueda adaptar al investigador o usuario que la necesite.

## INVESTIGACIÓN

Durante cinco años se han visitado y fotografiado cientos de edificios, realizado entrevistas y consultado documentos en diferentes archivos. Durante esas más de 1.200 horas de investigación se recopiló gran cantidad de información. Si bien existe mucha documentación, el procesado de la misma es esencial para poder transmitirla y hacerla asequible al resto de los investigadores. Llegados a este punto, existían diferentes métodos y clasificaciones posibles. Una clasificación lógica, por ejemplo, es la que ordena los edificios por año de ejecución, pero otras posibles son: por año de diseño, por orden alfabético de arquitecto, por tipología de edificación, por tipo de trabajo, por ciudad, por estado, por país... la lista es larga. Por este motivo se decide volcar la información en un soporte digital que genere una base de datos que permita filtrarla y ordenarla en función de las necesidades del investigador.

Además del estudio de los cuatro inventarios descritos en el apartado *Legado de Guastavino*, las fuentes de información utilizadas son innumerables, si bien las más destacables han sido:

- La colección *The Guastavino Fireproof Construction Company/George Collins architectural records and drawings* en los archivos Avery de la Universidad de Columbia. Se han estudiado los archivos en persona y el sitio web.
- Archivo histórico de la biblioteca *Stephen A. Schwarzman Building de la New York Public Library* en Nueva York.
- Archivo *The Historic American Buildings Survey (HABS)* de la Congress Library.
- Correspondencia con *Parks and Recreation*, con *Rego-Forest Preservation Council*, con *Four Borough Preservation Alliance Corporation*, con *Queens Preservation Council* y con *Central Queens Historical Association*, Universo García Lorenzo de Cubarte, entre otros.
- Visitas a cientos de edificios, con triple objetivo: corroborar su existencia y localizar el trabajo de Guastavino, documentar fotográficamente y estudiar los documentos de construcción que algunos edificios, principalmente de carácter religioso, cuentan en sus archivos propios (oficiales o no): *St. Thomas Church*, *St. John de Divine*, *St. Barbara Church*, *St. John's Cemetery*, el Museo de Historia Natural, *St. Gregory's Church*, *Greenwood Cemetery*... entre otros.
- Colaboraciones con investigadores como Gerard Torrats (New York Univesity), Jaume Soler (Arup, New York), Vicente Galvañ (Gilzanz, Murray Steficek, New York), Orestes del Castillo (Oficina del Historiador de la Habana), Gabriel Pardo (*Old Structures Engineering*), Fernando Vegas y Camilla Mileto (Universitat Politècnica de Valencia), John A. Ochsendorf (Massachusetts Institute of Technology), entre otros.
- Entrevistas con dueños y gestores de diferentes edificios y complejos.
- Bibliografía relacionada: véase la sección de bibliografía de la presente tesis.
- Recursos online: diferentes sitios web que han sido consultados en el proceso de investigación, si bien los más visitados son los nombrados en el apartado de Recursos de la sección *Descripción de la Herramienta* del presente capítulo.

## WWW.GUASTAVINOMAP.ORG

Con el objetivo de manejar efectivamente tal cantidad de información, se desarrolla GuastavinoMap<sup>13</sup>, un catálogo cartográfico interactivo con capacidad de filtrado geoespacial que permite filtrar la información a través de 7 diferentes variables.

Se trata de un mapamundi digital en el que se muestran los edificios existentes en la base de datos de ese momento, en los que los que Rafael Guastavino Moreno y la Guastavino Co. colaboraron. Cada punto que aparece en el mapa es un edificio, clicando sobre el cual se despliega una ficha con los datos sobre el edificio. La base de datos a partir de la cual se genera guastavinomap.org incluye los siguientes datos por cada edificio:

- Nombre del proyecto
- Dirección exacta: En muchas ocasiones la dirección del edificio registrada en los documentos del archivo no coincide con ninguna dirección actual, por lo que se inicia un proceso de arqueología urbanística con el fin de localizar la dirección actual.
- Coordenadas GPS: CartoDB, el software sobre el que se desarrolla el mapa interactivo, localiza los edificios por coordenadas GPS con una precisión de cuatro decimales en latitud y longitud.
- Año de construcción: en muchos casos el edificio se puede localizar cronológicamente en tres fechas: año en que se diseñan los planos (suele ser la fecha recogida en el archivo), año en que se comienza la construcción y año en el que se concluye. En esta base de datos se toma como fecha el año de inicio de construcción y, en caso de desconocerse, la fecha indicada en los documentos gráficos de la época.
- Tipo de edificio: Los edificios se clasifican como comercial, educativo, funerario, gubernamental, hospital, industrial, infraestructura, recreativo, religioso, residencial y estación de tren.

---

<sup>13</sup> [www.guastavinomap.org](http://www.guastavinomap.org) debe ser visualizada desde un ordenador, ya que no está adaptada todavía para dispositivos móviles.

- Arquitecto/s: se detallan los nombres de los arquitectos que formaron parte del equipo de diseño; hay casos en los que Rafael Guastavino Moreno es el arquitecto del proyecto como en el Teatre la Massa de 1880.

En la mayoría de los edificios los Guastavinos colaboran con otros arquitectos en calidad de constructor. Hay un tercer grupo de edificios en los que Guastavino participa en la reforma de espacios, como es el caso de *Bankers Trust Company Building en Wall Street* construido en 1912 por Trowbridge & Livingston, en el que la Guastavino Co. interviene en 1942 sin arquitecto registrado. En la base de datos se recoge únicamente la información relativa a la intervención de Guastavino. En la casilla Notas del investigador es donde se incluye este tipo de aclaración.

- Cuál fue el trabajo de Guastavino: se especifica si se construyó una bóveda, una escalera, etc.
- Demolido: sí/no.
- Disponible en la biblioteca de Avery: sí/no.
- Notas en Avery si las hubiere: Se ha determinado incluir esta información por la importancia que tienen estas notas desde el punto de vista del investigador.

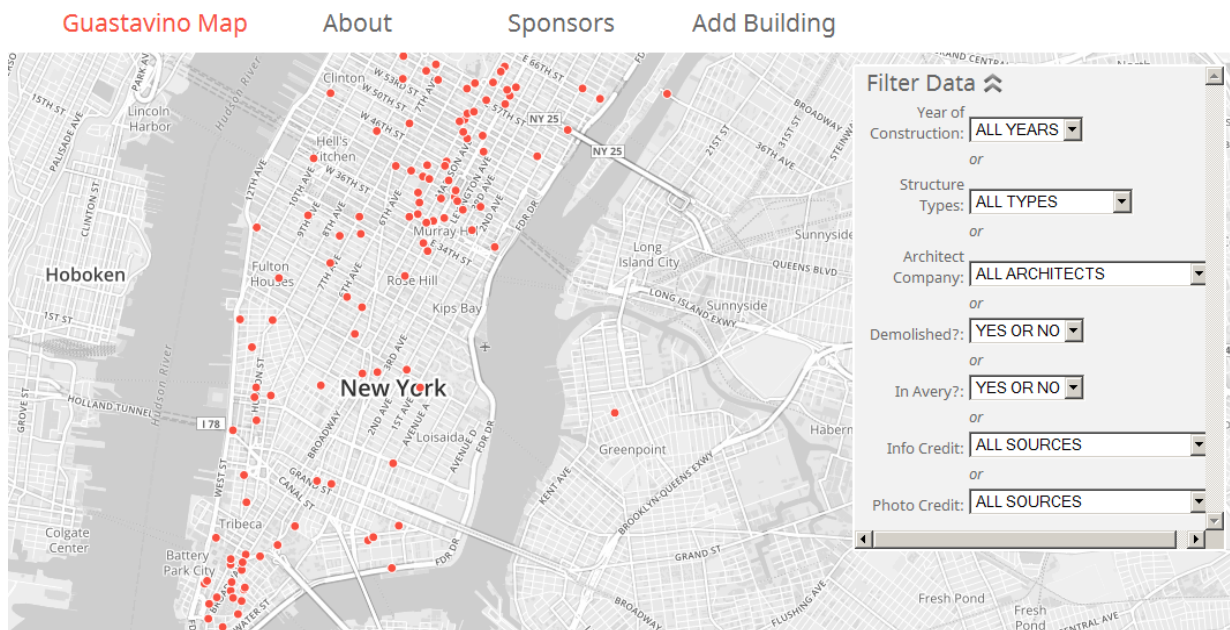


Figura 1.4-30 Aspecto general de [www.guastavinomap.org](http://www.guastavinomap.org)



- Notas del investigador si las hubiere: En esta casilla se incluyen todos los datos, enlaces, etc. que el investigador considere que aportan información necesaria.
- Edificio protegido: sí/no. En un gesto por reivindicar la figura de los Guastavino, se detalla esta información con objetivo último de proteger todo su legado.
- Se dispone de una fotografía del mismo: sí/no. Hay edificios de los que no se disponen documentos gráficos. Dado el carácter de herramienta interactiva se persigue que los usuarios vayan incluyéndolos.

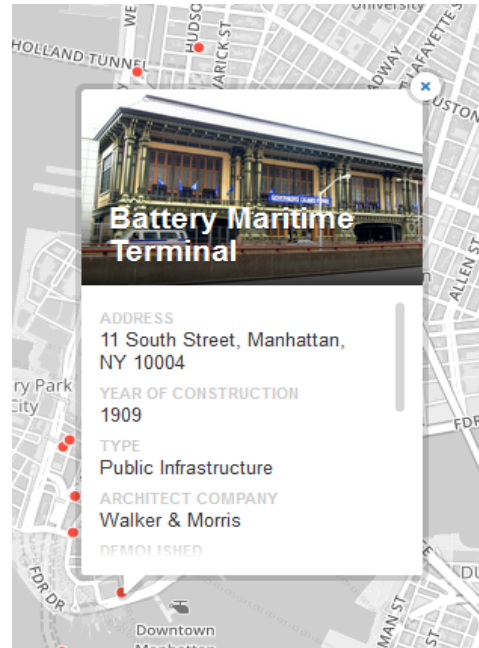


Figura 1.4-31 Ventana descriptiva con ficha de edificio; desplazando el cursor hacia abajo se

- Nombre del investigador que aportó la información: Desde el carácter de herramienta de investigación se considera elemental incluir la información del autor de la entrada y de la fotografía para que quien pueda estar interesado sepa con quién contactar con preguntas adicionales sobre el edificio en cuestión.
- Nombre del investigador que hizo la fotografía: Al igual que en el punto anterior, es posible localizar a la persona que incluyó el documento gráfico para solicitar más información o más fotografías.

En la parte superior derecha de la pantalla se visualiza en todo momento una ventana de filtrado que permite filtrar: año, tipología, arquitecto, estado actual, disponibilidad en Avery, autor de la información y autor de la fotografía. De este modo, si se quieren por ejemplo visualizar los edificios en los colaboró Guastavino con la firma McKim, Mead & White, basta con seleccionar dichos arquitectos para que aparezca en pantalla un mapamundi (con posibilidad de zoom a nivel de calle) con tantos puntos/edificios registrados de Guastavino + McKim, Mead & White.

Algunos de los planos o entradas que se encuentran en el archivo de la biblioteca de Avery, nunca se llegaron a construir; es posible que se tratase de ideas para mostrar a arquitectos o promotores, presupuestos o para presentar a concursos.



Esto implica que todos los edificios que están registrados en Avery no necesariamente existen o hayan existido en algún momento, ni que todos los edificios que existen estén recogidos en el archivo de la biblioteca Avery. Un ejemplo de ello son los proyectos en la ciudad de La Habana, Cuba, que aparece nombrada en dos entradas diferentes: el convento de Santa Catalina y le Cité des Arts. Tras investigar ambos casos, el convento de Santa Catalina<sup>14</sup> sí contiene bóvedas de Guastavino que siguen en pie, sin embargo, la Guastavino Co, no intervino en la construcción de la Cité des Arts. La carpeta del archivo contiene fotografías y artículos concernientes al edificio recopilados por Collins, por su interés y analogía entre las técnicas constructivas empleadas.

En la primera fase los recursos se centraron principalmente en la ciudad de Nueva York por contar con el mayor número de edificios (más de trescientos).

Guastavinomap.org alberga otras pestañas con información sobre la historia de la Guastavino Co. La cuarta pestaña abre un cuestionario para que cualquier investigador/usuario pueda añadir edificios a la base de datos para que se muestren en el mapa. Se ha establecido una red de contactos de expertos que informan de nuevos edificios para añadir al catálogo interactivo, que también incluye una sección de *Recursos* donde se encuentran los siguientes enlaces a sitios web su fácil localización:

- Enlace a gráficos extraídos de las listas del profesor Collins.
- Enlace a la colección *The Guastavino Fireproof Construction Company/George Collins* del archivo de la biblioteca Avery de la Universidad de Columbia en Nueva York. Este enlace dirige a todas las entradas que están registradas en la biblioteca relacionadas con los Guastavino: [Archivo biblioteca Avery](#).
- Enlace al cronograma que muestra las obras y principales acontecimientos en el tiempo clasificados por categorías en la vida de Rafael Guastavino Moreno y la Guastavino Co, incluido en el apéndice 9.1 de la presente tesis (se debe descargar el archivo para visualizarlo): [Cronograma](#)
- Sitio web *The Guastavino Project* del Instituto de Tecnología de Massachusetts (MIT). Durante los últimos años se ha desarrollado esta página web de gran utilidad bajo la dirección del profesor John A. Ochsendorf. En ella se puede

---

<sup>14</sup> Claustro del Convento de Santa Catalina en El Vedado, la Habana, Cuba. 1900. "Ingenieros contratistas Escude & Co. lorja [sic] del comercio [sic] Habana"

encontrar valiosa información sobre la Guastavino Co. en Boston, así como un mapa donde se muestran algunos de los edificios. Incluye un enlace que dirige al visitante a las [veintitrés patentes](#) que la tanto Rafael Guastavino Moreno como su hijo registraron. Incluye además enlaces a textos, bibliografía, conferencias, etc: [Guastavino.net](#)

## SOFTWARE

Tras un estudio exhaustivo análisis de las herramientas que ofrecía el mercado del software a finales del 2013, se decidió optar, por adaptarse mejor a las necesidades del proyecto, el siguiente conjunto de herramientas digitales:

Guastavinomap muestra un plano construido con la aplicación CartoDB. Esta solución es capaz de almacenar más de 1.600 edificios eficientemente. CartoDB es un potente motor de visualización con capacidad de geo-localización. Toda la información es almacenada en una base de datos digital. El software convierte los datos en información geo-espacial por medio de referencias a través de GPS. La página web tiene siete filtros que permiten personalizar la información de la base de datos a través de SQL, con el fin de proporcionar al usuario información adaptada. Las referencias (puntos rojos en el mapa) se visualizan a través de Mapbox, utilizando los datos de OpenStreetMap. El mapa base escogido es de tonalidad gris con el fin de destacar los proyectos a través de CartoCSS. Las ventanas informativas de cada edificio contienen enlaces a fotografías almacenadas en el mismo servidor anfitrión de la página web.

## PROCESO DE VALIDACIÓN

Ante la evidente necesidad de aunar esfuerzos, GuastavinoMap permite a cualquier persona desde cualquier lugar acceder online al catálogo y añadir un nuevo edificio encontrado. El investigador rellena un sencillo formulario online localizado en la cuarta pestaña de la página web. que recibe el director del proyecto. Los datos son corroborados y cargados en el software. Una vez registrado en el mapa, el autor recibe un email informativo.

El autor de la entrada pasa automáticamente a formar parte de la lista de colaboradores, publicada en el mismo sitio web. De esta manera, además conseguir que otros investigadores puedan contactar con el autor, se incentiva la participación del público, sin el cual un catálogo completo será inabarcable.

## DATOS Y ESTADÍSTICAS

A continuación, se muestran documentos gráfico-numéricos desarrollados para esta tesis a partir de los documentos del profesor Collins custodiados por la biblioteca Avery.

Se representan el número total de edificios registrados en el archivo clasificándolos en función de diferentes parámetros: año de construcción, localización y tipología. Como puede observarse, el número total de edificios no coincide en las diferentes clasificaciones. La dificultad de procesar tal cantidad de información no corroborada queda patente así, en las diferentes clasificaciones del profesor.

Una vez completada la base de datos que genere el mapa interactivo en [guastavinomap.org](http://guastavinomap.org), será posible reproducir estos mismos documentos gráficos con total precisión.

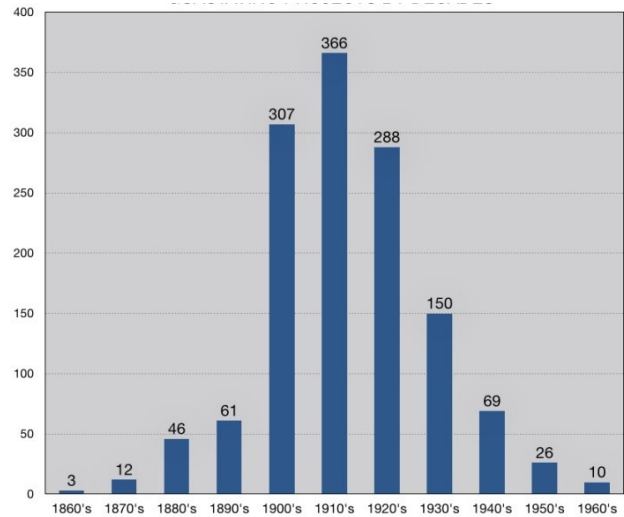


Figura 1.4-32 Gráfico que muestra los proyectos clasificados por años. Total de edificios 1.330.

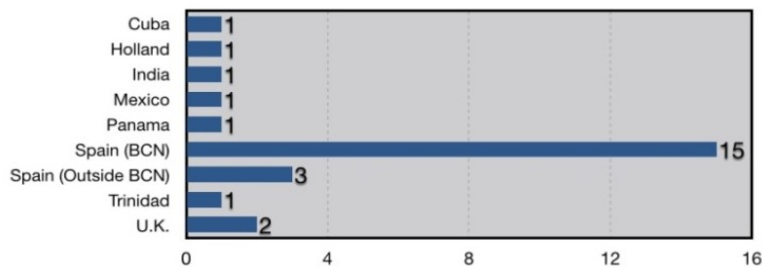


Figura 1.4-34 Gráfico que muestra los proyectos fuera de Norteamérica

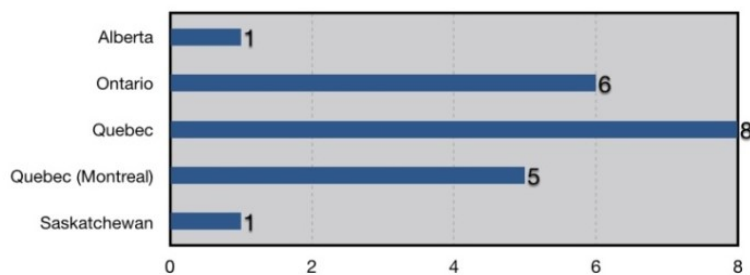


Figura 1.4-34 Gráfico que muestra los proyectos en Canadá.

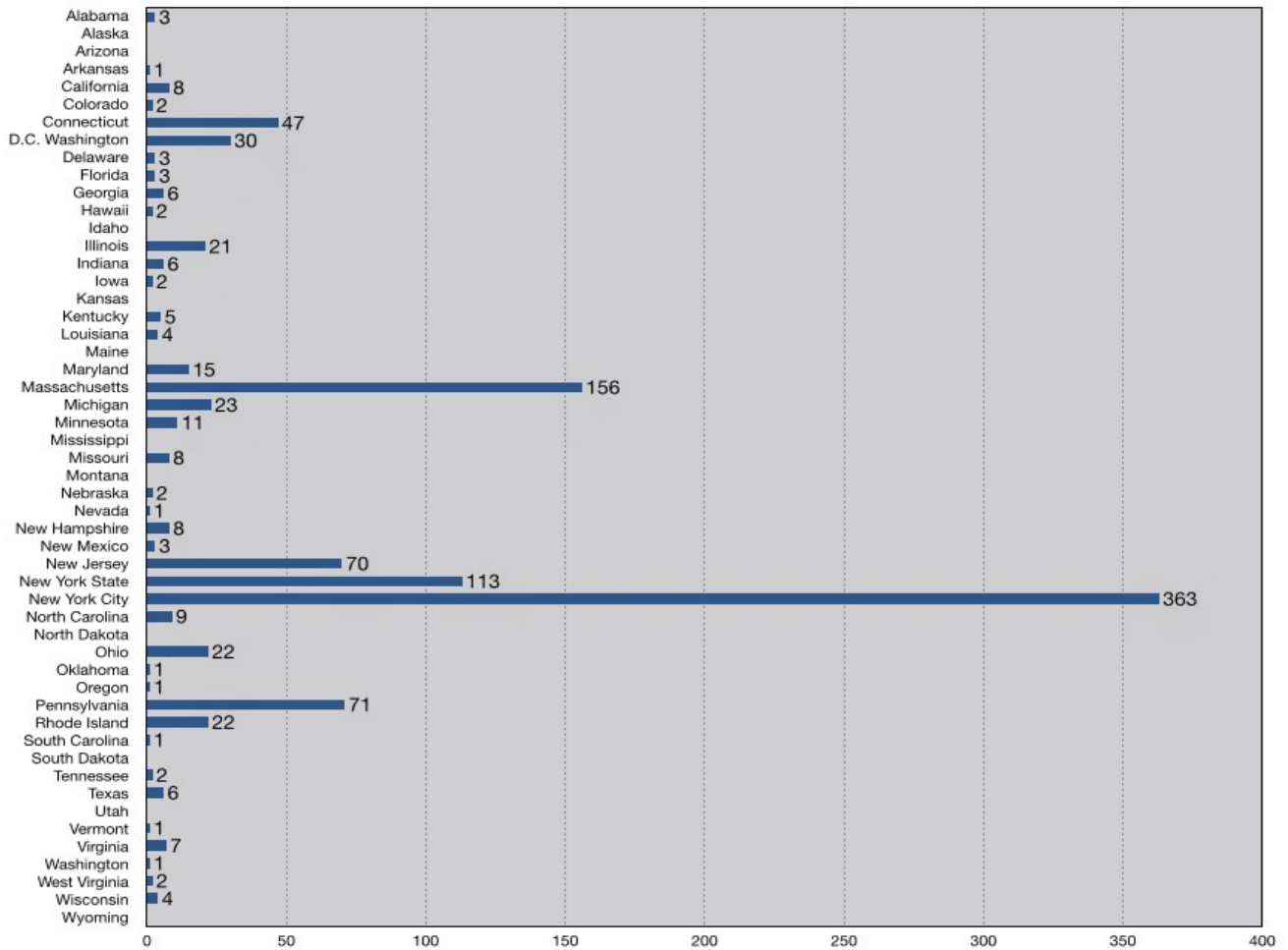


Figura 1.4-36 Gráfico que muestra los proyectos en Estados Unidos clasificados por estados. El número total de edificios incluyendo Canadá y resto del mundo es de 1.130.

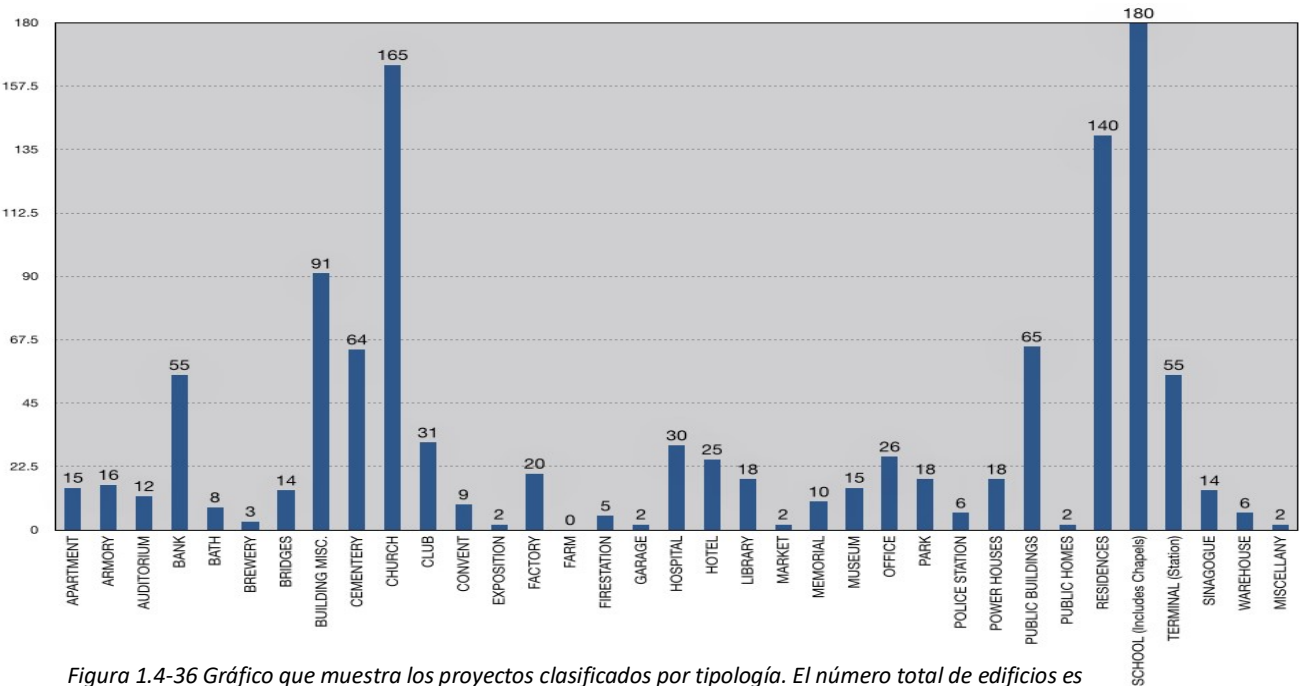


Figura 1.4-36 Gráfico que muestra los proyectos clasificados por tipología. El número total de edificios es 1.144.



## CATÁLOGO / BASE DE DATOS

En el apéndice 9.1.1 de la presente tesis se incluye el catálogo de edificios con el que genera la base de datos que el software [guastavinomap.org](http://guastavinomap.org) transforma en el mapa online. Se incluyen a continuación a modo de ejemplo las fotografías y datos básicos de algunos proyectos. El número de edificios aumenta regularmente, por lo que esta versión incluida en el apéndice 9.1.1 pudiera estar ya desactualizada.

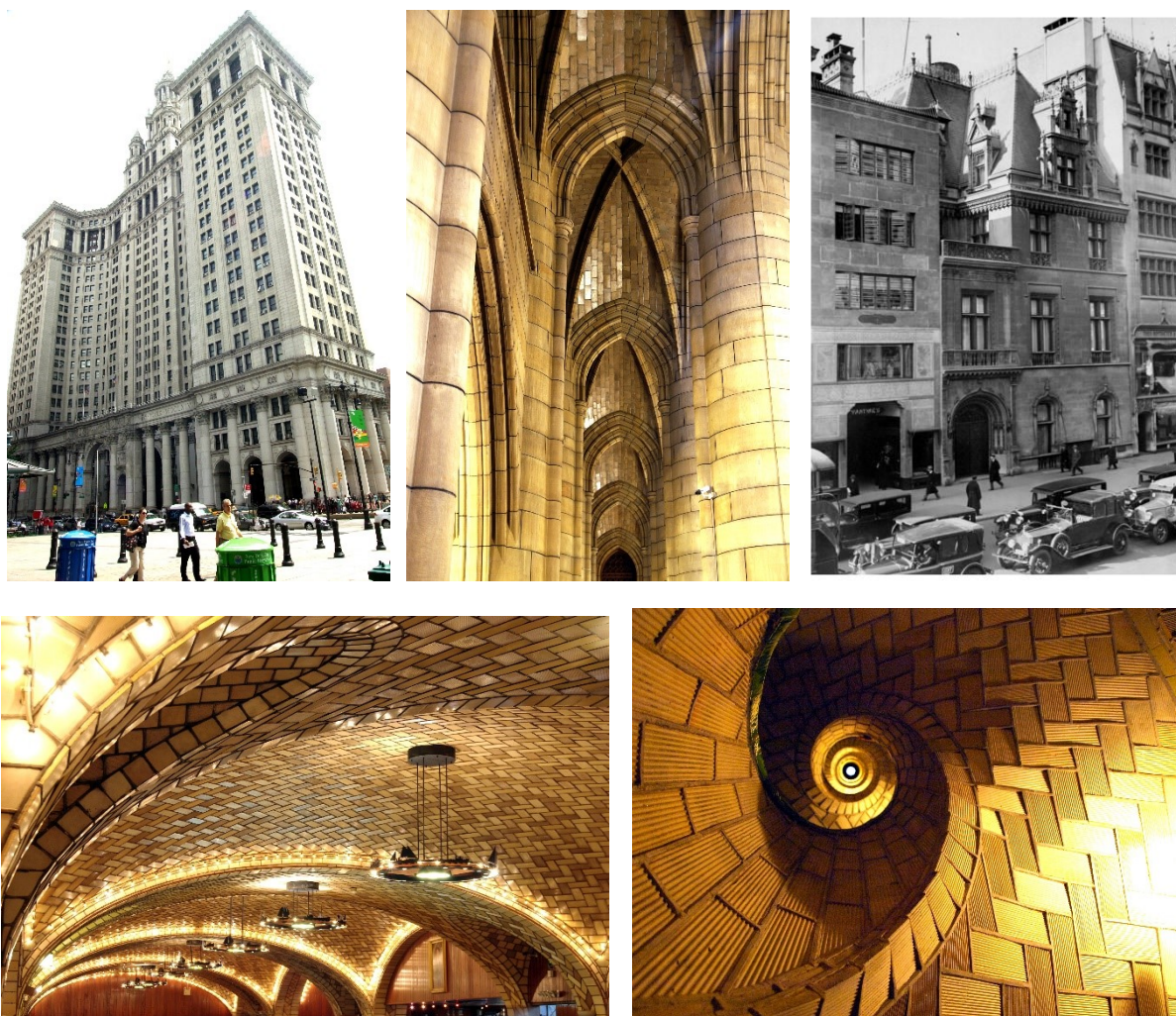


Figura 1.4-37 Cinco de los edificios incluidos en la base de datos en [www.guastavinomap.org](http://www.guastavinomap.org) en Manhattan. En orden descendente, de arriba abajo: Municipal Building (1914), diseñado por McKim, Mead & White; St. Thomas Church (1906), de Cram, Goodhue & Ferguson y Mayers, Murray & Philips (Vicente Galvañ); 666 Fifth Av,(1906), diseñado por McKim, Mead and White, demolido en 1927 (NYC Public Library); Grand Central Terminal (1912), diseñada por Warren & Wetmore and Reed & Stem; escalera en St. John the Divine (1899-1909), en la que Guastavino colaboró con la firma Heins & La Farge.



### 1.4.2.3. CRITERIOS LEGALES DEL PATRIMONIO ARQUITECTÓNICO ESTADOUNIDENSE

---

En Estados Unidos existe un registro con criterios para definir y clasificar “propiedades históricas”. Dichos criterios están disponibles en el documento *The Secretary of the Interior’s Standards and Guidelines for Archaeology and Historic Preservation in Federal Register* de 1983 y se clasifican en las siguientes categorías (Boothby & Rosson, 1998):

- Criterio A: Propiedades asociadas a eventos que contribuyeron significativamente en la historia.
- Criterio B: Propiedades asociadas a las vidas de personas significativas en el pasado.
- Criterio C: Propiedades que caracterizan un tipo, periodo o método constructivo, que representa el trabajo de un máster, que contiene gran valor artístico o que representa una entidad significativa y distintiva cuyos componentes pueden no tener distinción individual.
- Criterio D: Propiedades que han arrojado o pueden arrojar información importante sobre la historia o la prehistoria.

Estos criterios muestran que además de antigüedad, el edificio debe tener ciertas propiedades que le doten del calificativo “histórico”. Según *The Secretary of the Interior’s Standards and Guidelines for Archaeology and Historic Preservation in Federal Register*, estas propiedades ayudan a determinar el valor del edificio para la sociedad y, finalmente, la cantidad de dinero que puede ser utilizado para su restauración (Figura 1.4-38).

Es precisamente por este valor histórico que los propietarios deciden restaurar el edificio; el equipo profesional que lo lleve a cabo deberá tener en cuenta dichos valores en el proyecto de restauración y planificación del posterior mantenimiento. En todas estas fases los métodos de END toman un papel muy relevante.

En términos generales, un edificio histórico puede necesitar ser restaurado porque es estructuralmente deficiente, no cumple los códigos actuales, necesita una

reforma o está o va a estar sometido a diferentes cargas/uso que para las que fue diseñado.

Como ya se ha expuesto, debido al elevado coste de la construcción en el país, es muy común en el patrimonio estadounidense que sea más económicamente efectivo sustituir un edificio histórico que restaurarlo. Al presupuesto inicial hay que sumar los costes añadidos debidos a las incertidumbres intrínsecas a la restauración, problemas adicionales encontrados durante los trabajos de restauración, etc. que conllevan costes adicionales. Por estos motivos muchos edificios históricos tan arquitectónicamente valiosos como la Pennsylvania Station en Nueva York han sido demolidos y otros se han salvado gracias a la creciente conciencia ciudadana que desembocó en movimientos sociales que forzaron el nacimiento de instituciones como la *Landmarks Preservation Commission* de Nueva York y legislación como el *National Historic Preservation Act of 1966* (NHPA). La NHPA fue la primera ley nacional de este tipo; habían existido medidas anteriores para favorecer la preservación arquitectónica, pero ninguna tan influyente como la NHPA<sup>15</sup>. Sin embargo, en 1933

hubo una iniciativa dentro del National Park Service (NPS) tras la I Guerra Mundial que contribuyó a la documentación de los edificios históricos existentes: el Historic American Buildings Survey (HABS). Un joven arquitecto, Charles E. Peterson propuso un programa para emplear a todos los arquitectos, dibujantes y fotógrafos en paro tras la Gran Depresión; su misión fue la de documentar gráficamente el patrimonio estadounidense generando así una base de datos valiosa en permanente uso.



*Figura 1.4-38 Un ejemplo significativo son las torres del pabellón del estado de Nueva York en la exposición internacional en Flushing Meadows-Corona Park en Queens, Nueva York. Construidas en 1964 fueron diseñadas por Philip Johnson para ser un edificio temporal que sería desmantelado tras la exposición, lo cual nunca ocurrió. En pésimo estado de conservación en la actualidad, sería sustancialmente más económico demolerlas que restaurarlas. Sin embargo, ante los motivos expuestos en The Secretary of the Interior's Standards and Guidelines for Archaeology and Historic Preservation, se están buscando alternativas a su demolición.*

<sup>15</sup> La más importante fue la *Antiquities Act* de 1906.



Figura 1.4-39 Interior de Pennsylvania Station de Nueva York en 1962. La estación, diseñada en estilo Beaux-Arts por McKim, Mead and White, se inauguró en 1910. Pese a la larga lucha social, la estación fue demolida en 1965. Esta pérdida fue uno de los puntos de inflexión que desencadenó el marco legal necesario para salvaguardar el patrimonio estadounidense (National Park Service, 2016).

Tras la II Guerra Mundial surgió una corriente generalizada de búsqueda de la modernidad, que en arquitectura se tradujo en la tendencia a deshacerse de edificios obsoletos para dar paso a una arquitectura para una población exponencialmente creciente que acomodase la cultura del automóvil. Bloques enteros fueron demolidos. En 1965 el presidente L.B. Johnson creó un comité especial de restauración histórica para valorar la situación; el comité presentó un informe, *With Heritage So Rich* (Con un Patrimonio tan Rico), que era una llamada de auxilio. De los 12.000 monumentos que los HABS habían documentado en los Estados Unidos hasta la fecha, alrededor de la mitad habían sido destruidos o dañados sin restauración posible. El comité definió que la base de datos de las HABS parecía “*a death mask of America*” (la máscara muerta de América) y urgía al gobierno federal a tomar las riendas. Ese mismo año, 1966, el congreso aprobó el NHPA, la ley más exhaustiva que jamás se había aprobado en el país sobre restauración. La ley estableció instituciones permanentes y definió un proceso para velar por la conservación del patrimonio arquitectónico en los Estados Unidos (National Park Service, 2016).

Marilyn Phelan enumera las leyes nacionales que protegen el patrimonio estadounidense (Phelan, 1993): Antiquities Act de 1906, Historic Sites, Buildings

and Antiquities Act de 1935, National Trust for Historical Preservation de 1949, Reservoir Act de 1960, National Historic Preservation Act de 1966, National Environmental Policy Act de 1969, Archaeological and Historic Preservation Act de 1974, Archaeological Resources Protection Act de 1979, State Preservation Laws, Architectural Works Copyright Protection Act de 1990 y Commission for the Preservation of America's Heritage Abroad de 1985. A esta lista hay que añadir las leyes locales propias de cada ciudad (U.S. Department of the Interior, 2016).

Mientras que los movimientos de restauración han hecho oír su voz en los Estados Unidos desde 1970, la conciencia de restauración es más evidente y conservacionista en Europa, donde la investigación y la aplicación de evaluación no destructiva es más amplia que en Estados Unidos. Uno de los motivos es probablemente la existencia de muchos edificios históricos y culturalmente significantes que necesitan ser restaurados. Sin embargo, se hace necesario destacar que, en Estados Unidos, debido a su corta historia, se consideran “históricos” edificios que probablemente en Europa pasarían desapercibidos.

## 2. TÉCNICAS Y MÉTODOS DE RECONOCIMIENTO Y EVALUACIÓN NO DESTRUCTIVA

---

### 2.1. INTRODUCCIÓN

En este capítulo se incluye un estudio de cada una de las técnicas de END más utilizadas en Estados Unidos de acuerdo a los términos expuestos en el apartado “1.3. Objetivos y Alcance” de la presente tesis. De las innumerables posibles clasificaciones para este conjunto de técnicas, la clasificación por la que se ha optado divide las técnicas en cuatro grupos:

- 1) Métodos instrumentados de inspección visual y técnicas visuales de documentación: endoscopía, Seesnake, cámara de chimenea, nuevas técnicas de fotografía digital y Tablet PC Annotation System (TPAS).
- 2) Métodos basados en la propagación de ondas electromagnéticas: termografía infrarroja (IRT) y geo-radar (GPR).
- 3) Métodos basados en la propagación de ondas acústicas: impacto-eco (IE) y ultrasonidos (UPV).
- 4) Métodos facilitadores de END: vehículos aéreos no tripulados (UAV) y acceso por medio de sistemas industriales de cuerdas (IRA).

Otra posible clasificación de técnicas de END es la establecida por S. Monteagudo (Monteagudo V., 2010) que divide las técnicas en dos grupos:

- Fase previa de inspección: Técnicas de auscultación visual.
- Métodos instrumentales: Ensayos no destructivos.



Otra clasificación responde al tipo de energía utilizada: técnicas basadas en el estudio de ondas acústicas y técnicas basadas en el estudio de ondas electromagnéticas. O, dependiendo de si el método requiere contacto con el elemento en estudio: métodos de contacto y método de no contacto.

Se ha optado por la primera clasificación porque es la que mejor se adapta a los objetivos de la presente investigación, sin embargo, cualquiera de las otras clasificaciones habría sido válida.

## 2.2. FASES PREVIAS A LA INSPECCIÓN *IN SITU*. PLANIFICACIÓN DE LA EVALUACIÓN.

---

*Much time, effort, and expense can be wasted on in-place testing unless the objectives of the investigation are clearly defined. The objectives of the investigation affect the choice of test methods, the number and location of the tests, and the interpretation of the results.*

---

Michael P. Schuller (Schuller & Superenant, 1994)

Un proyecto de evaluación no destructiva aplicado a la conservación del patrimonio construido consta de cuatro fases principales. La primera fase corresponde a la recopilación de la información existente relativa al elemento arquitectónico a evaluar. La segunda fase de la evaluación es la planificación de la evaluación. Le siguen la fase de investigación *in situ* y el posterior análisis de resultados; las dos últimas fases se fusionan con frecuencia en aquellos casos en los que los resultados son instantáneos o el análisis debe realizarse *in situ* para continuar con la inspección, como por ejemplo en el marcado de elementos metálicos en un forjado en una inspección de GPR. En cualquier caso, una vez se dispongan de todos los resultados es conveniente analizarlos en su conjunto (Figura 2.2-1).

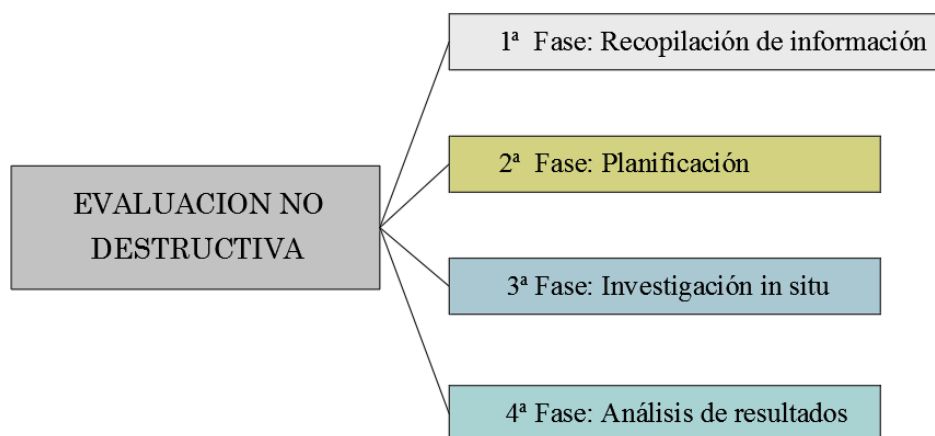


Figura 2.2-1 Gráfico de las cuatro fases de las que se compone un proyecto de evaluación no destructiva

Durante la fase de planificación se elabora el plan de evaluación. Para poder diseñar un plan de evaluación se deben conocer los objetivos de la evaluación. Es indispensable saber qué se busca y por qué, ya que de estos dos factores dependerá el tipo de ensayo a realizar, localización, metodología, número e interpretación de los resultados. Ingenieros y arquitectos son los que determinan los objetivos de la investigación; acceso, estética, asuntos legales, restricciones económicas, códigos vigentes, restricciones en tiempo, etc. son otros factores a considerar.

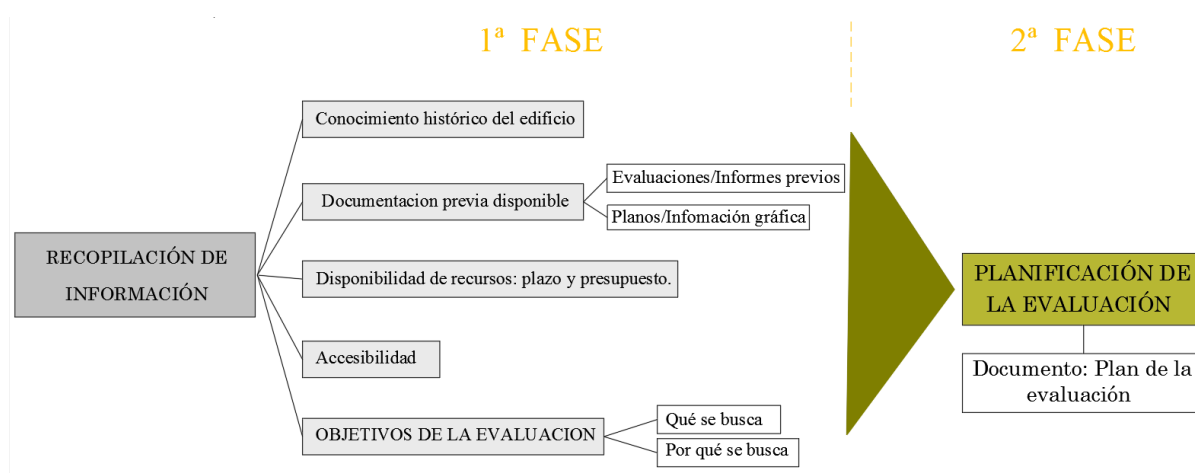


Figura 2.2-2 El gráfico muestra la información previa necesaria para proceder a la segunda fase de la evaluación no destructiva: La planificación.

Una buena planificación minimiza los costes de la investigación, el esfuerzo y el tiempo empleado para alcanzar unos resultados óptimos (Schuller & Superenant, 1994).

Es importante dotar al plan de investigación de la organicidad necesaria para que éste pueda irse adaptando a los resultados disponibles de manera que no sea un plan cerrado sino una hoja de ruta.

Para una exitosa fase de planificación es necesario haber completado previamente la fase de recopilación, es decir, es necesario que el profesional conozca los medios de los que dispone, así como el edificio. El estudio del edificio debe incluir la historia reciente y pasada, la tipología constructiva y los condicionantes contextuales que le atañen (Figura 2.2-2).

La planificación forma parte de la evaluación y es una fase importante que a menudo se infravalora. Una mala planificación puede conllevar a resultados no útiles y derroche de medios con la consiguiente frustración. A lo largo de los siguientes apartados se darán las claves para realizar una correcta planificación dependiendo de cada una de las técnicas. Por ejemplo, la técnica del GPR requiere

de un plano detallado de la malla de escaneos, la cual dependerá del objetivo, mientras que la investigación con termografía requiere detallar las horas del día y condicionantes atmosféricos, así como todos los detalles de su carácter activo o pasivo.

## 2.3. MÉTODOS INSTRUMENTADOS DE INSPECCIÓN VISUAL. TÉCNICAS VISUALES DE ANÁLISIS Y DOCUMENTACIÓN.

---

*Visual testing (VT) is the oldest and most common nondestructive testing (NDT) techniques. It is typically the first step in the examination process. Visual inspection is the process of examination and evaluation of systems and components by use of human sensory systems aided only by mechanical enhancements to sensory input such as magnifiers, dental picks, stethoscopes, and the like. The inspection process may be done using such behaviors as looking, listening, feeling, smelling, shaking, and twisting. It includes a cognitive component wherein observations are correlated with knowledge of structure and with descriptions and diagrams from service literature.*

---

F. W. Spencer (U.S. Department of Transportation Federal Administration, 1996)

### 2.3.1. INTRODUCCIÓN

El análisis visual es la forma más básica y más antigua de evaluación no destructiva. No hay unanimidad en cuanto a considerar el análisis visual (*visual testing* -VT-) en la paleta de métodos no destructivos, si bien la American Society for Nondestructive Testing (ASNT) y el U.S. Department of Transportation Federal Administration lo consideran uno de ellos (ASNT, 2016), (U.S. Department of Transportation Federal Administration, 1996).

El análisis visual, como su nombre indica, consiste en la observación meticulosa del elemento arquitectónico a evaluar. Este método no proporciona información en profundidad sin embargo es extremadamente útil en la planificación del programa de evaluación no destructiva. Una correcta inspección visual puede ayudar al ingeniero a decidir dónde realizar el test y cómo orientar el instrumento.

El estudio del método de VT se incluye en algunos de los currículos de programas en facultades de arquitectura, como es el caso del School of Architecture, Planning



& Preservation de la Universidad de Maryland, que ofrece una asignatura denominada ARCH 445 Visual Analysis of Architecture (University of Maryland, 2016).

La American Welding Society (AWS) (Matzkanin, 2006), cita tres requerimientos necesarios para proceder a la inspección visual: la visión del inspector, energía lumínica (dependerá del tipo de test) y que el área a inspeccionar no quede visualmente obstruida, en cuyo caso serán necesarios instrumentos adicionales. Además de éstos, en aplicaciones al patrimonio arquitectónico serían necesarios dos requerimientos adicionales: conocimiento del contexto (historia, intervenciones pasadas, etc.) y conocimiento técnico (tipología constructiva, objetivos de la evaluación, etc.).

Hay superficies del edificio que pueden no ser visibles con el ojo desnudo del evaluador; el avance tecnológico de aparatos ópticos ha desarrollado instrumentos que facilitan la observación de alguna de esas zonas. En este apartado se incluyen algunos de ellos, como el boroscopio, adaptado al campo de la conservación arquitectónica de otras industrias, o las cámaras de chimenea o tubería, desarrolladas para aplicaciones en arquitectura. Algunos de los otros instrumentos no incluidos son las lupas, los micrómetros, espejos, luces ultravioletas, etc.

## 2.3.2. ENDOSCOPIA Y OTROS SISTEMAS ÓPTICOS

---

*A borescope is an optical device consisting of a rigid or flexible tube with an eyepiece on one end, and a lens on the other end. A remote object is illuminated by a light source and an internal image formed by the objective lens is relayed to the eyepiece, which magnifies the internal image and presents it to the viewer's eye.*

---

Evan Kopelson (Vertical Access LLC, 2017)

### 2.3.2.1. INTRODUCCIÓN

---

La inspección visual es el método más básico de evaluación no destructiva y ha experimentado sustanciales avances tecnológicos durante los últimos 100 años. El problema inherente a la inspección visual son las limitaciones de accesibilidad a las áreas de inspección. Los boroscopios permiten la inspección interna sin la necesidad de retirar el material que lo cubre ahorrando tiempo y recursos económicos. La endoscopia consiste en la observación indirecta del interior del elemento a través de un aparato, el endoscopio. Si se aprovecha una perforación existente, se considera un método no destructivo, aunque si es necesario practicar un orificio, hay autores que lo consideran semidestructivo (Monteagudo V., 2010).

Fuera del ámbito de la conservación arquitectónica los boroscopios se emplean en diferentes aplicaciones médicas y de ingeniería industrial, para la inspección visual de aviones, turbinas de gas, turbinas de vapor, motores diésel y motores en la industria automovilística. Como casi todas las TND, también tienen un uso dentro de la industria bélica, donde se utilizan para la inspección de armas. Dentro del campo de la arquitectura se utilizan en la ingeniería forense.

## 2.3.2.2. ANTECEDENTES HISTÓRICOS

---

George S. Crampton (Rock Island (IL), 1874 - Rock Island (IL), 1962), fundador de la Lenox Instrument Company, fue pionero en el desarrollo del boroscopio para un gran número de aplicaciones. Crampton, a los diez años ya tenía un taller de inventos, y soñaba con ser ingeniero. Finalmente estudió medicina, pero se especializó en oftalmología. En 1912 comenzó a desarrollar instrumentos ópticos especiales hasta que irrumpió la I Guerra Mundial en la que sirvió en Francia. A su vuelta, continuó desarrollando aparatos ópticos y en 1920 recibió un encargo de la Westinghouse Company para fabricar un boroscopio con el que inspeccionar posibles fallos en el interior de una turbina.



Figura 2.3-1 Dr. George S. Crampton (1874-1962) (Lenoxist.com)

Durante la II Guerra Mundial el taller de Lenox se dedicó únicamente a la industria bélica. Los científicos que trabajaban en el proyecto Manhattan, en el desarrollo de una reacción en cadena que derivase en la primera bomba atómica, encargaron a Crampton un boroscopio capaz de inspeccionar los tubos cercanos a la cámara radioactiva. Crampton diseñó un boroscopio de aluminio de 1,37 pulgadas (3,47 cm) de diámetro y 33 pies (10 m) de longitud con un circuito de iluminación de 8V. Una cámara especial montada en el ocular del ojo fotografiaba imágenes. Lenox mejoró más tarde este modelo del proyecto Manhattan introduciendo lentes resistentes a la radiación y una articulación giratoria en la lente que permitiera al operador trabajar desde cualquier ángulo. Este modelo era capaz de flexionarse a través de los tubos del reactor.



Figura 2.3-2 Primer Boroscopio para inspecciones de rotor de turbina, 1921. (Lenox, 2016)

En la década de 1940, Lenox creó un boroscopio de 17 metros de longitud para la Bahrain Petroleum Company con el que inspeccionar los tubos de las refinerías de Bahrain Island en Arabia Saudí.

En 1954 Lenox prestó un boroscopio extensible a la National Geographic Society para inspeccionar los contenidos de la cripta de la pirámide de un faraón. Se pudieron observar los materiales del barco que había sido incluido en la cripta (Lenox, 2016), siendo esta la primera o una de las primeras aplicaciones en el campo del patrimonio arquitectónico.

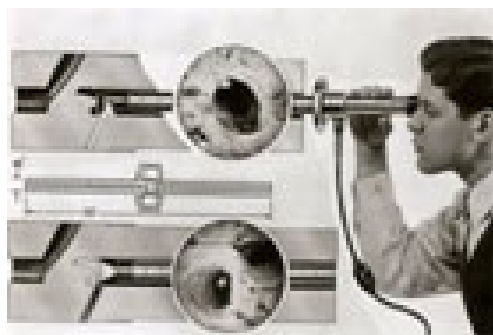


Figura 2.3-4 Boroscopio diseñado para la Mississippi River Fuel Company (Lenox)

A lo largo de la historia de los boroscopios, las diferentes casas comerciales (USA Borescope, Grainger, Machida, PCE Instruments, AIT, Olympus, etc.) han ido adaptando sus modelos a las necesidades de cada una de las industrias y campos de aplicación. Y algunos de esos modelos, pueden ser utilizados para inspección de patrimonio arquitectónico.



Figura 2.3-4. Boroscopio extensible Lenox, circa 1948 (Lenox)

### 2.3.2.3. FUNCIONAMIENTO E INSTRUMENTACIÓN

El boroscopio es un dispositivo óptico que consiste en un tubo rígido o flexible con un ocular en el extremo y un objetivo en el otro extremo, unidos entre sí mediante un sistema óptico. Dicho sistema, en la actualidad, se rodea de fibra óptica para la óptima iluminación del objeto a observar. La imagen del objeto iluminado se crea en el objetivo y se magnifica gracias al ocular. En aplicaciones en el campo de la conservación arquitectónica, es conveniente añadir una grabadora de video para analizar y recopilar el material video gráfico.

Existen tres tipos principales de endoscopios: los rígidos o boroscopios (*borescope*), los flexibles o flexoscopios, también llamados fibroscopios (*fiberscopes*) y los semirrígidos. Los boroscopios rígidos, constan de una lente visor en un extremo, y una lente objetivo en el otro, ambas unidas mediante un sistema óptico de lentes; los tipos de lentes pueden ser Harold Hopkins, doblete acromático (*achromatic doublets*) o índice-gradiente (*gradient index*). En la actualidad, los boroscopios flexibles y semirrígidos utilizan fibra óptica en lugar de juegos de espejos y lentes analógicas tradicionales para transmitir imágenes e iluminación. Los fibroscopios

están formados por un conjunto de fibras ópticas que dividen la imagen en píxeles. La principal ventaja de los fibroscopios es que tienen la capacidad de doblarse sin perder calidad en la imagen, lo que los hace apropiados en los casos que requieren adaptarse a curvas o quiebros para llegar al lugar que permita una perspectiva desde la que observar el área de interés; además, pueden alcanzar mayores longitudes que los rígidos. La imagen recabada por este tipo de boroscopios puede sufrir pixelación, y la calidad de la imagen depende del modelo, principalmente del número de fibras y su construcción. Los componentes y diseño de las articulaciones, el grado de articulación, el control sobre la luz en el extremo, el campo de visión y los ángulos de vista del objetivo son también importantes. El número de fibras es también crítico, a mayor número de fibras mayor calidad de la imagen. La cantidad mínima oscila en torno a los 10.000 píxeles mientras que los de mejor calidad rondan los 22.000.

La mayor parte de las aplicaciones en patrimonio construido requieren que el boroscopio disponga de iluminación incorporada, que normalmente es luz fría de una potencia entre 50-300 vatios.

El avance de la tecnología está permitiendo la salida al mercado de diferentes subgrupos: flexoscopios de luz ultravioleta, micro boroscopios, adaptadores que permiten realizar reparaciones simples, boroscopios no conductores, etc. Se pueden encontrar en un rango amplio de diámetros y tipos de luz, con infinidad de complementos. Actualmente estos aparatos permiten calcular distancias aproximadas, por efecto estetoscópico, gracias a la existencia de dos lentes.



*Figura 2.3-6 Video boroscopio de bajo coste de la marca Android para usar con teléfonos móviles (Catchnew).*



*Figura 2.3-6 Video-boroscopio modelo BR250 con sonda de 90 cm y diámetro de 0,9 cm (Extech, Flir).*



Una subcategoría corresponde al video-boroscopio, consistente en una microcámara de video en el extremo del boroscopio. El complejo sistema óptico es sustituido por una cámara y un cable, lo cual puede abaratar el conjunto y, en muchos modelos, mejorar la calidad de la imagen. Los video-boroscopios incluyen iluminación incorporada. Los avances tecnológicos han permitido la salida al mercado a precios muy asequibles de video-boroscopios, incluso modelos para ser utilizados con teléfonos móviles.

Los parámetros a tener en cuenta en la elección de un boroscopio son:

- Rígido o flexible. Los rígidos tienen mejor calidad de imagen en términos generales.
- Calidad de imagen necesaria. A mejor calidad mayor coste del aparato.
- Diámetro del orificio. El más pequeño es el MilliScope II™ Fiber Scope de la casa AIT<sup>1</sup> (Figura 2.3-7)
- Longitud del boroscopio. A mayor longitud, menor calidad de imagen, mayor dificultad de iluminación y mayor coste.

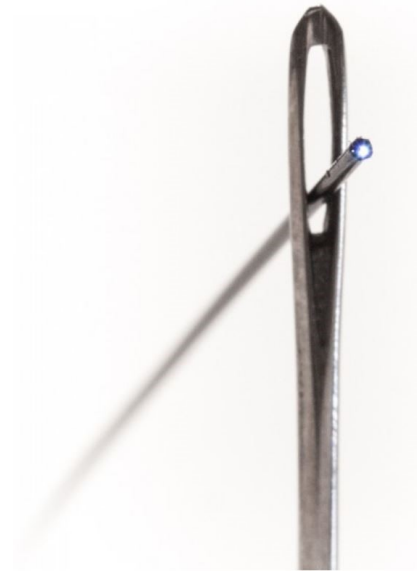


Figura 2.3-7 Boroscopio de 0,35 mm de diámetro, MilliScope II de la casa AIT (Advanced Inspection Technology).

Generalmente, para aplicaciones al campo de la conservación arquitectónica, lo más apropiado es un video-boroscopio flexible, aunque la mejor calidad se obtiene con boroscopios rígidos, a mayor diámetro y menor longitud, mayor calidad.

En general, la elección entre un tipo y otro de boroscopio estriba en la calidad de la imagen requerida y en si es necesario que el instrumento se flexione para acceder a la zona de interés.

<sup>1</sup> <http://aitproducts.com/bolescopes/fiberscopes/micro-fiberscope/fiber-scope-milliscopes.html>

Los boroscopios rígidos tienen la ventaja de que la imagen es de mayor calidad que en los flexoscopios, dentro de la misma gama. A su vez, mayor número de fibras, mayor número de píxeles en la imagen, lo que equivale a mayor calidad de imagen.

En cuanto a la fuente de alimentación, existen modelos con batería recargable y otros con cable y enchufe convencional, características a tener en cuenta dependiendo de la aplicación.

## 2.3.2.4. OTROS SISTEMAS

---

Existen otros dos instrumentos utilizados, derivados del concepto de boroscopio:

- Cámara de tubería (*pipe camera*): consiste en una microcámara de gran angular auto nivelada con luz incorporada (normalmente de leds de intensidad regulable) instalada en el extremo de un cable. Todo el conjunto está protegido por una camisa metálica o de plástico de alta resistencia impermeable. Su configuración permite introducirla en tuberías y bajantes para observar su interior y localizar anomalías. Pueden tener hasta 200 metros de longitud (MIDIT Inc., 2003-2016). Pueden trabajar en seco o sumergidas en agua. Para aplicaciones en patrimonio construido es aconsejable que dispongan además de un odómetro que permita saber la distancia exacta a la que se encuentra la anomalía cuando se visualiza en la pantalla.



Figura 2.3-8 Cámara de tubería Seesnake, investigando una bajante en la cathedral de Saint Patrick en Nueva York (Vertical Access)

- Cámara de chimenea (*shaft-cam*): se trata de un diseño de la empresa estadounidense Vertical Access. El concepto es similar al de una cámara de tubería, pero para espacios más amplios, como chimeneas o pozos y tiene unas dimensiones de 13 pulgadas (33 cm) de diámetro y 28 pulgadas (45 cm) de alto. Dispone de un sistema inteligente con giroscopio que posibilita que la orientación de la cámara en su descenso no varíe, permitiendo una visión con dirección constante a lo largo del conducto. También cuenta con odómetro e iluminación. Desciende por gravedad a diferencia de la cámara de tubería, que desciende por la fuerza aplicada al cable. Es por esto que su principal limitación es que sólo puede introducirse en dirección descendente. Se fabricó en 2014 y fue el modelo utilizado para inspeccionar los conductos de ventilación del Woolworth building en la ciudad de Nueva York.

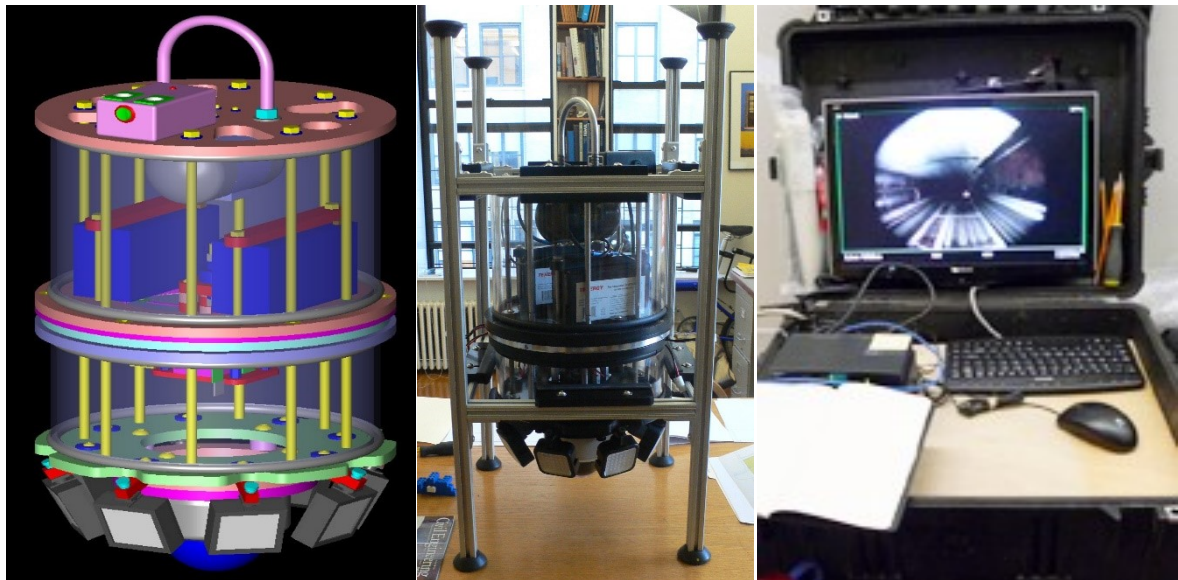


Figura 2.3-9. Cámara de chimenea. A la izquierda 3D del diseño. En el centro, fotografía del instrumento y a la derecha la imagen en pantalla en su descenso por uno de los conductos del Woolworth Building en Nueva York.

## 2.3.2.5. REPRESENTACIÓN DE RESULTADOS

---

Los resultados del test, si se han grabado, pueden darse en forma de fotografías o en forma de video. Si se conecta una pantalla al ocular es posible visualizar en tiempo real lo que “ve” el boroscopio/dispositivo óptico. Si el test se ha realizado sin registro de imágenes, los resultados deberán ser redactados/narrados por el técnico que ejecutó/visionó el test.

## 2.3.2.6. APLICACIONES EN PATRIMONIO CONSTRUIDO

---

Su utilidad abarca, entre otras, las siguientes funciones:

- Averiguar sistemas constructivos y estado de los materiales tras las capas visibles del edificio.
- Averiguar el espesor de elementos arquitectónicos.
- Comprobar visualmente el estado del material oculto.
- Observar el interior de la construcción.
- Detección de múltiples lesiones como fugas, roturas, existencia animal, etc.

## 2.3.2.7. VENTAJAS Y LIMITACIONES

---

### VENTAJAS

- En muchos casos no es necesario contacto con el elemento a investigar, lo que permite aplicar la técnica en todos los casos independientemente del estado de deterioro.
- Permite acceder a zonas que sería imposible visualizar sin retirar material.
- Actualmente hay cientos de modelos en el mercado que permiten encontrar el modelo apropiado y personalizarlo para cada aplicación. Los modelos actuales son ligeros, robustos y sencillos de operar.
- Si la calidad de imagen requerida no es alta, existen modelos en el mercado muy asequibles.

## LIMITACIONES

- En caso de no existir perforación, es necesario practicar una para introducir el boroscopio.
- Los boroscopios rígidos tienen la limitación de que el espacio al que acceder ha de estar en línea recta.
- Si el espacio al que se accede no es suficientemente amplio o el campo y/o el ángulo de visión no es suficiente, puede ser complicado interpretar la visualización.
- Un equipo de calidad profesional supone un desembolso que puede alcanzar los \$3.000<sup>2</sup>.

---

<sup>2</sup> <https://www.zoro.com/extech-video-borescope-57-in-39-in-shaft-hdv640/i/G3665846/>



## 2.3.3. NUEVAS TÉCNICAS DE FOTOGRAMETRÍA

---

*The art, science and technology of obtaining reliable information about physical objects and environment through the process of recording, measuring and interpreting photogrammetric images and patterns of recorded radiant electromagnetic energy and other phenomena.*

---

American Society of Photogrammetry and remote sensing (ASPRS)

### 2.3.3.1. INTRODUCCIÓN

---

La fotogrametría es la técnica que genera imágenes sobre las cuales poder obtener dimensiones del objeto fotografiado. La palabra fotogrametría deriva de las tres palabras griegas *photos*: luz, *gramma*: carta o dibujo, *metrein*: medir.

La base de la fotogrametría es la fotografía, por lo que los avances de la primera siempre han dependido del desarrollo de la segunda. La fotografía se utilizó desde poco después de su invención para documentar edificios (Mileto & Vegas Lopez-Manzanares, 2016). En 1849 John Ruskin (1819-1901) fotografió varios edificios de Venecia para completar la documentación gráfica compuesta de dibujos y planos que habitualmente realizaba (Quill, 2003). Dicha información es una gran fuente de información casi dos siglos después. En la misma época Viollet le Duc también utilizó la fotografía como herramienta con la que documentar Carcasonne antes de sus múltiples intervenciones (Mileto & Vegas Lopez-Manzanares, 2016). Del mismo modo, el Barón Eugene Haussmann encargó fotografiar París a Charles Marville con el fin de documentar su apariencia antes de las grandes transformaciones que sufriría de 1853 a 1870 (Zannier, 1991).

La fotogrametría tradicionalmente se divide en dos categorías básicas en función de la distancia con la que se tomen las fotografías: la tradicional o aérea, mayor a 300 m y la no tradicional o próxima, menor a 300 m (*close range photography* - CRP-) (Matthews, 2008). Los avances en softwares comerciales asequibles de modelado y dimensionado 3d (*three dimensional measuring and modeling* -

3DMM), cámaras de alta resolución, ordenadores portátiles de alto rendimiento y UAS son la causa de que dichas categorías se hayan solapado técnicamente en los últimos cinco años.

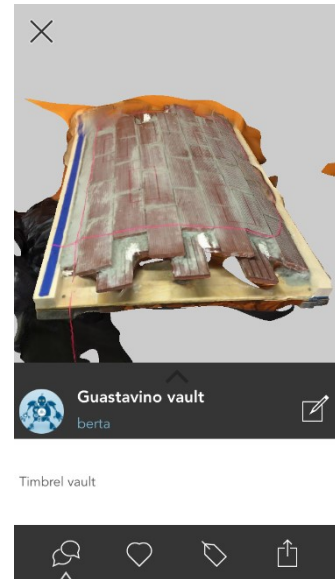
En Estados Unidos la fotogrametría se utiliza en campos como la geología y la ingeniería civil. Sin embargo, su uso en conservación arquitectónica ha sido hasta ahora marginal, debido principalmente a las características del patrimonio arquitectónico estadounidense, mucho del cual se encuentra a una altura que limita la toma de datos. Los avances en fotogrametría de softwares y aplicaciones que permiten el uso de cámaras convencionales y simplifican el proceso eliminando la calibración, etc. están facilitando un uso más generalizado de esta técnica.

En Estados Unidos, tradicionalmente la fotogrametría se asocia a fotografía aérea, planimetría y cartografía. Sin embargo, las técnicas de fotogrametría pueden aplicarse a cualquier fuente fotográfica bien provenga de una cámara de 35 mm o de un satélite. Siempre y cuando las imágenes se tomen con solape estereoscópico, se podrán obtener modelos 3D escalados sobre los que obtener dimensiones.

Programas de software como Pix4D, Agisoft PhotoScan, PhtoModeler, ReCap 360 y otros permiten generar modelos 3D de elementos arquitectónicos, incluso de un edificio completo a partir de fotografías. Aunque estos programas pueden ser caros (la licencia de Pix 4D cuesta \$8.700 para uso ilimitado), existen tarifas más flexibles mensuales o anuales que son mucho menos costosas que el desarrollo de escáner laser o de planos a pie de obra. Estos programas de fotogrametría pueden generar, no sólo planos escalados (con precisión de hasta 1 cm), sino también modelos tridimensionales que permiten a los equipos colaborar utilizando programas BIM como REVIT (Olson & Streeter, 2016).

La fotogrametría generada con fotografías tomadas con un UAV resuelve una de las principales limitaciones del escáner laser desde tierra: capturar las superficies en el exterior no visibles desde tierra; ahora ya existen escáneres láser de bajo peso que pueden ser instalados en UAVs, pero su coste es mucho más elevado que el de una cámara convencional. En un futuro próximo, es posible que la integración de BIM y Revit en el proceso de restauración de los edificios aprovechará la eficiencia visual de los datos e información espacial ofrecida por la fotogrametría en combinación con los UAVs.

Los programas informáticos funcionan todos con los mismos principios y procesan fotografías digitales o videos tomados con casi cualquier cámara. El ejemplo más sencillo, la aplicación de AutoDesk 123D Catch, permite generar un modelo 3D con varias fotos tomadas con un móvil (Figura 2.3-10). El principio en que se basan los programas consiste en unir puntos comunes de las diferentes imágenes. Calculando la localización de la cámara en cada disparo, el software localiza el punto en el espacio para crear una red tridimensional de puntos. La vegetación, el cielo o las nubes aparecen como ruido y pueden ser eliminados manualmente.



*Figura 2.3-10 Captura de pantalla de una bóveda tabicada con 123D Catch desde un móvil. La aplicación utilizó 52 fotografías para generar el modelo 3D.*

## 2.3.3.2. ANTECEDENTES HISTÓRICOS

A continuación, se exponen los hitos históricos más relevantes que contribuyeron al nacimiento y evolución de diferentes disciplinas que forman parte de la fotogrametría: fotografía, perspectiva, fotografía aérea, estereofotografía y fotografía digital. Dichos conceptos y su evolución están íntimamente relacionados en sus inicios, por ejemplo, al mismo tiempo que se conseguía la primera fotografía aérea se estudiaban los principios de perspectiva para poder extraer dimensiones de la misma.

A lo largo de la historia hubo varios descubrimientos relativos a la fotogrametría mucho tiempo antes de que fuesen tomadas las primeras fotografías. Ya en el 350 a.C. Aristóteles se refirió al proceso óptico de proyectar imágenes.

El filósofo chino Mo Ti y los matemáticos griegos Aristóteles y Euclides describieron la idea de una cámara estenopeica (del griego *στένω/steno* estrecho, *ὀπή/ope* abertura), que consiste en una caja estanca a la luz con un pequeño orificio

(estenopo) por donde entra la luz e impacta en un material fotosensible (O'Connor & Robertson, 2002). En 1038 Al Hazen of Basra explicó el funcionamiento de la cámara estenopeica. Posteriormente Al-Haitham (conocido como Alhazen) es considerado como el pionero de la óptica moderna. En 1267 Roger Bacon utiliza el mismo principio para estudiar los eclipses solares sin dañarse los ojos. En 1480 Leonardo da Vinci (1452-1519) escribió el siguiente texto: *La perspectiva no es nada más que ver un objeto detrás de una hoja de cristal, liso y transparente, en la superficie*

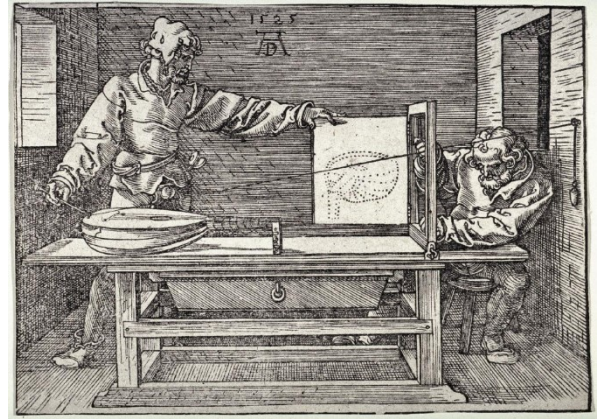


Figura 2.3-11 *Underweysung der Messung*. Nuremberg, 1525. Ilustración de Alberto Durero (1471-1528) en la que se observa un instrumento perspectivo que consta de pasador en la pared como punto de mira y punzón para marcar la silueta. Tratado de la medida con el compás y la regla de líneas, planos y todo tipo de cuerpos (College of Optical Sciences, Arizona).

*del cual todas las cosas pueden ser marcadas detrás del cristal. Todos los objetos transmiten su imagen al ojo por medio de líneas piramidales, y dichas pirámides son interseccionadas por dicho cristal. Cuanto más cercano al ojo se produzca la intersección, más pequeña será su representación* (Doyle, 1964). En 1492 Leonardo comenzó a trabajar con la perspectiva con su invento de la linterna mágica, aunque no existe evidencia de que construyese un modelo que funcionase, se especula que el invento puede ser anterior, de época griega (Gruner, 1977). En 1525 Albrecht Durer (1491-1528), haciendo uso de las leyes de la perspectiva, creó un instrumento que pudo ser usado para generar dibujos en perspectiva (Gruner, 1977).

En 1604 se acuña al nombre de “camera obscura” por Johannes Kepler (1571-1630) y en 1625 Girard Desargues (1591-1661) funda la geometría proyectiva.

En 1759 Johan Heinrich Lambert (1728-1777) desarrolla los principios matemáticos de una perspectiva para localizar el punto en el espacio desde el cual se ha realizado la imagen; escribió el proceso en el tratado “*Perspectiva Liber*” (Figura 2.3-12).



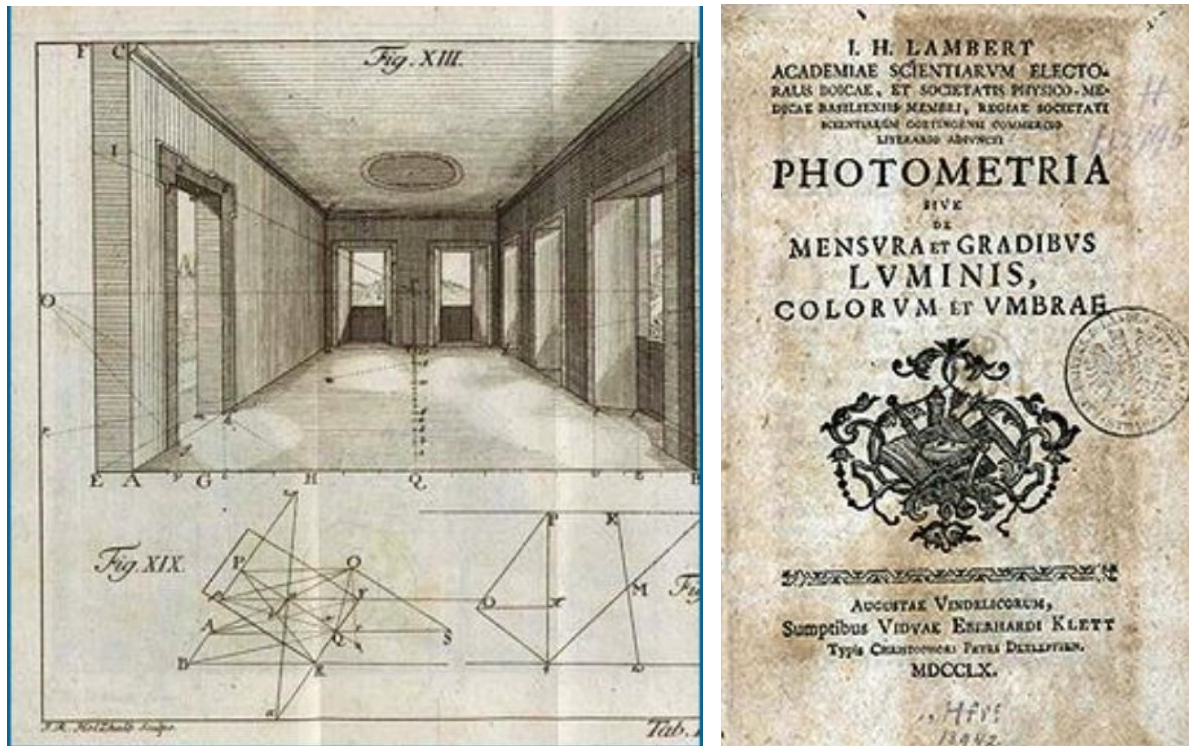


Figura 2.3-12 A la izquierda se muestra una imagen del tratado "Perspectiva Liber" de 1759 de Johan Heinrich Lambert (Figura XIII). La imagen de la derecha corresponde a la portada de otro libro del mismo autor, Photometria (S. Gregory).

La primera fotografía la consiguió Joseph Nicephore Niépce (1765-1833) en 1826 o 1827 y necesitó de 8 horas de exposición (Figura 2.3-13).



Figura 2.3-13 Negativo y positivo de la primera fotografía que se conserva. Muestra las vistas desde el estudio del autor, Joseph Nicephore Niépce, 1826.

En 1837, Jaques Mandé Daguerre (1787-1851) obtuvo la primera fotografía de mejor calidad utilizando un proceso denominado daguerrotipo. Y en 1855, Nadar (Gaspard Felix Tournachon, 1820-1910) utilizó un globo aerostático a 80 metros



de altura para tomar la primera fotografía aérea. En 1858 el ingeniero óptico italiano Paulo Ignazio Pietro Porro (1801-1875) desarrolló una cámara panorámica equipada con telescopio, compás y nivel. La imagen se registraba en un papel sensible a la luz insertado en un cilindro (predecesor del carrete fotográfico). En 1865 Porro diseñó el foto-goniómetro, un invento significativo para la fotogrametría porque permitía eliminar la distorsión de las lentes (principio de Porro-Koppe<sup>3</sup>).

La relación entre geometría descriptiva y fotogrametría fue desarrollada por primera vez en Alemania en 1833 por R. Sturms y G. Hauck (Doyle, 1964).

En 1849 el oficial francés Aimé Laussedat (1819-1907) fue la primera persona en utilizar fotografías terrestres para realizar mapas topográficos (Laussedat, 1891). También trató de utilizar el globo aerostático, pero desistió porque la cantidad de imágenes necesarias hacía poco viable el método en ese momento (Birdseye, 1940).

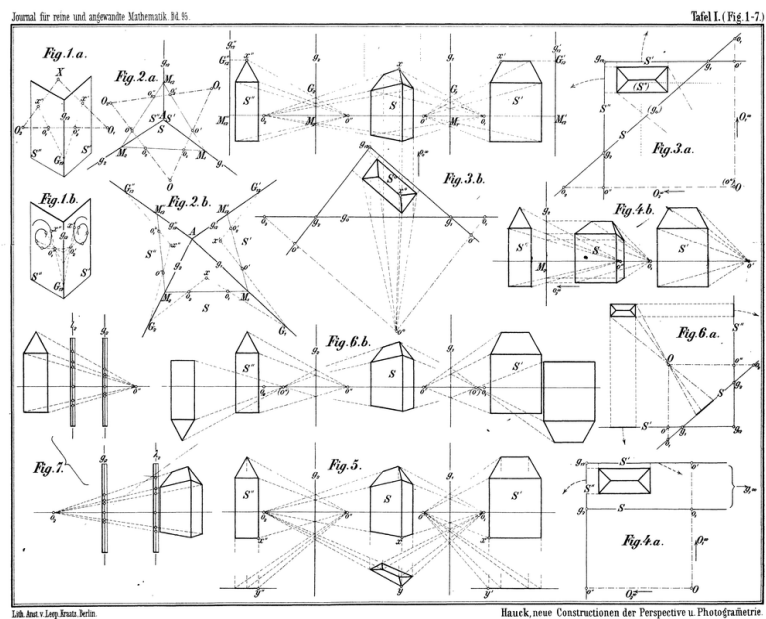


Figura 2.3-14 Estudios de perspectiva de Hauck, 1833 (Hauck, 1883).

El meteorólogo británico E.D. Archibald y el francés M. Arthur Batut fueron de los primeros en tomar fotografías desde una cometa entre 1882 y 1888 (Figura 2.3-15).

En Estados Unidos, James Fairman obtuvo en 1887 la patente de un “Aparato para fotografía aérea”<sup>4</sup>. La cámara se instalaba en una cometa o en un globo aerostático y se disparaba gracias a un mecanismo que incluía un reloj. Y en 1893 Cornele B. Adams recibe una patente del “Método de Fotogrametría”<sup>5</sup>; su método consistía en tomar dos fotos de un mismo punto desde posiciones diferentes por

<sup>3</sup> El concepto fue también desarrollado por Carl Koppe (1884-1910).

<sup>4</sup> Patente número 367.610.

<sup>5</sup> Patente número 510.758.

medio de un globo aerostático. También desarrolló métodos de triangulación lineal (Birdseye, 1940).

En los años sucesivos serían muchos los casos de fotografías tomadas desde cometas, incluyendo aplicaciones bélicas (French Army Kite Aerial Photography Unit. WWI, 1917); aunque siga practicándose hoy en día, ya no se aplica en el campo de la conservación del patrimonio construido (Kite Aerial Photography, 2010).



Figura 2.3-15 A la izquierda se observa una fotografía de 1888 de la cometa con la que M. Arthur Batut tomó algunas de las primeras fotos aéreas, incluida la fotografía de la derecha, de 1889, de la granja de Enlaure (Tarn, Francia).

En 1884 el ingeniero militar francés P. Moessard inventó el cilindrógrafo, una cámara panorámica que tenía un campo de visión de hasta 170° y registraba la imagen en un celuloide doblado en un semicírculo (Jones, 1912). Resultó de gran utilidad para documentar edificios.

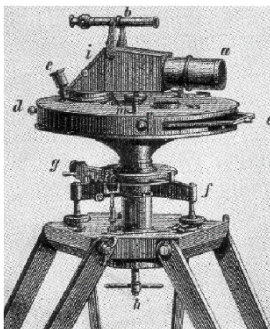


Figura 2.3-16 A la izquierda se observa el cilindrógrafo, cámara panorámica diseñada por Moessard y a la derecha a panorámica Neurdein de 1889, con un campo de visión de 150° (el edificio de la derecha es la ópera de Garnier).

La primera persona en utilizar el término “fotogrametría” es el alemán Dr. arquitecto Albrecht Meydenbauer (1834-1921) en 1893. Es considerado uno de los pioneros de la fotogrametría arquitectónica y de la conservación del patrimonio construido. En 1858 comenzó a utilizar fotografías para la documentación métrica y visual de los edificios. Insistía en que el patrimonio construido debía ser correctamente retratado para hacer posible su reconstrucción o estudio en caso de desastre. A tal efecto fundó el Königlich Preußische Meßbildanstalt, la primera institución fotogramétrica de la historia (Meyer, 1987). Para acometer dicha tarea, llegó a inventar su propia cámara en 1867 que, en combinación con métodos de topografía convencional para localizar las posiciones de las cámaras y los puntos de control, generaba mapas con una exactitud de 0,2 mm (Albertz, 2001).

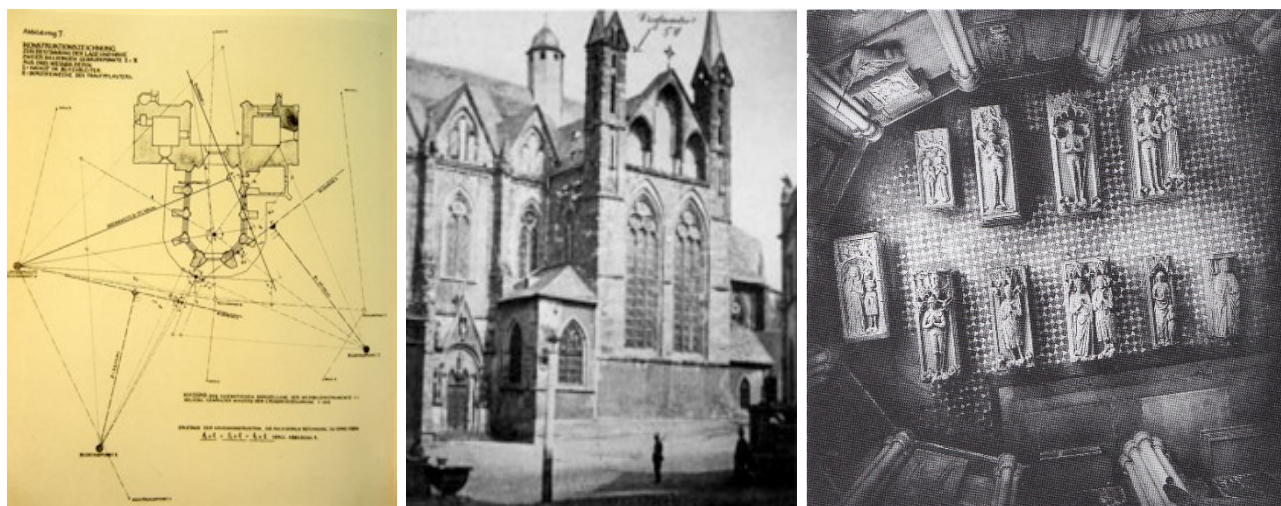


Figura 2.3-17 La imagen de la izquierda corresponde a un plano realizado por Maydenbauer para el levantamiento fotogramétrico de la catedral de Wetzlar (fotografía central) (Albertz, 2001). A la derecha se observa una fotografía de Meydenbauer de la iglesia de St. Elizabeth's en Marburg (Messbildanstalt).

En 1903, el boticario alemán amante de la fotografía, Julius G. Neubronner (1852-1932), inventó y patentó (en 1908) una cámara para ser instalada en el pecho de una paloma mensajera (Figura 2.3-27); Neubronner estaba muy vinculado al mundo de las palomas mensajeras porque las utilizaba para hacer llegar medicinas. El invento fue mejorado por el fabricante de relojes sueco Christian A. Michel por encargo del servicio de palomas mensajeras del ejército sueco. La CIA también introdujo mejoras relativas a las baterías de la cámara, pero los detalles aún están clasificados (Alyssa, 2012).



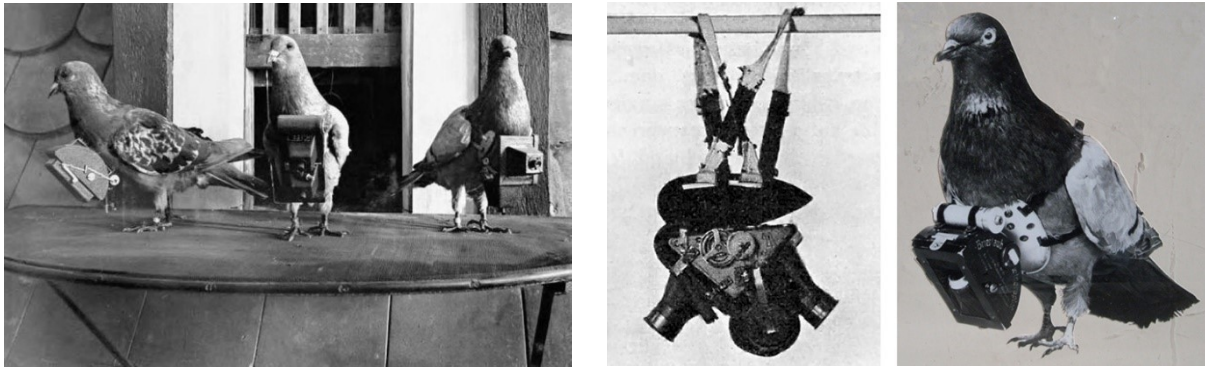


Figura 2.3-19 A la izquierda un trio de palomas con diferentes modelos de cámaras. La imagen del centro, de 1908, corresponde a la patente de Neubronner, una cámara con dos lentes, coraza y arnés. (Wikimedia Commons).

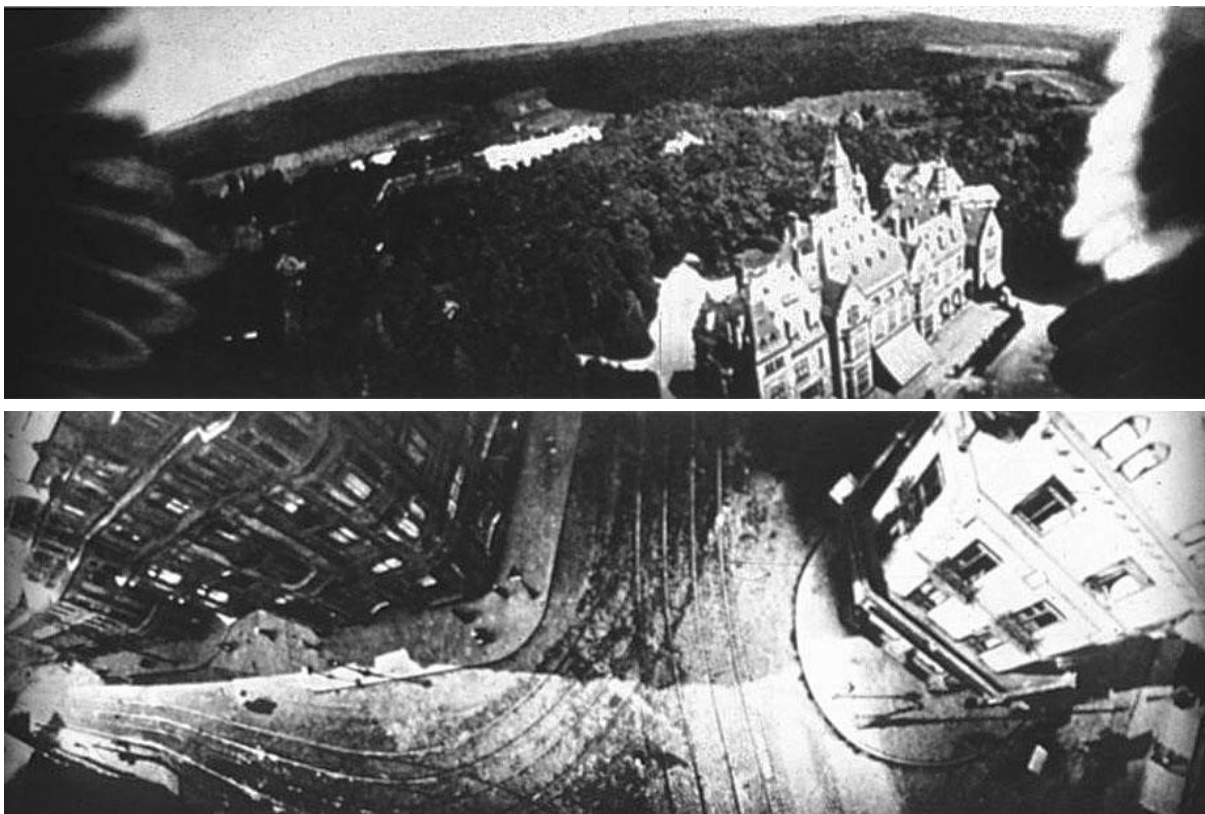


Figura 2.3-18 La imagen superior corresponde a una imagen aérea del Scholshotel Kronberg, realizada por una paloma portando una cámara de Neubronner en 1909, al igual que la imagen inferior de una calle de Frankfurt, Alemania (Wikimedia Commons).

En 1909 se toma la primera fotografía desde un avión, sobre Centocelli, Italia. Los autores de la misma son los hermanos Wright, inventores del avión en 1903. Poco después, el capitán Cesare Tardivo (1870-1953) es el primero en utilizar la fotografía aérea con fines cartográficos; creó un mosaico a escala 1:4.000 de Bengasi (Italia) que presentó con gran expectación en el *International Society of Photogrammetry* en Viena el 25 de septiembre de 1913 (Birdseye, 1940).

Al mismo tiempo que la tecnología avanzaba en el desarrollo de la fotogrametría y la cartografía, hubo otro concepto que surgió y evolucionó en paralelo, la estéreo-fotogrametría, que consiste en localizar las tres coordenadas de un punto utilizando medidas de dos o más fotografías tomadas desde diferentes puntos. El cartógrafo canadiense Edouard Deville (1849-1924) inventó en 1896 el primer instrumento de trazado estereoscópico denominado Stereo-Planigraph (Figura 2.3-20) (Gruner, Reinhard Hugerhoff, 1971).

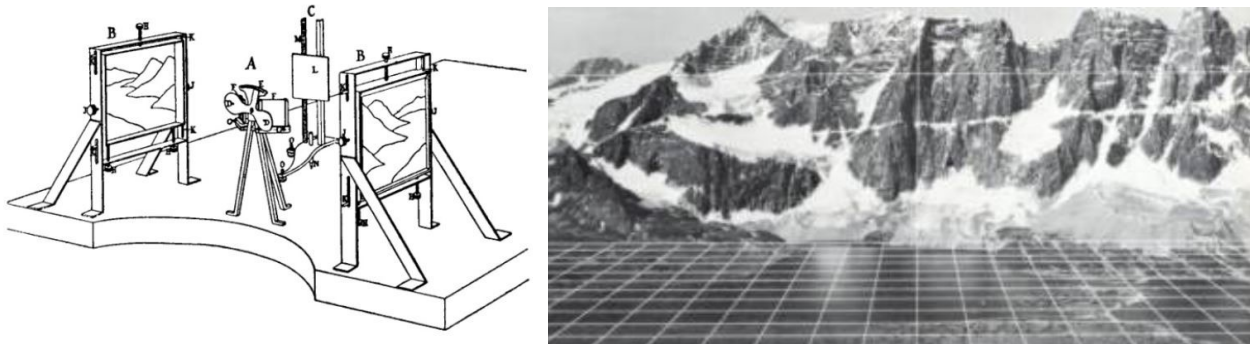
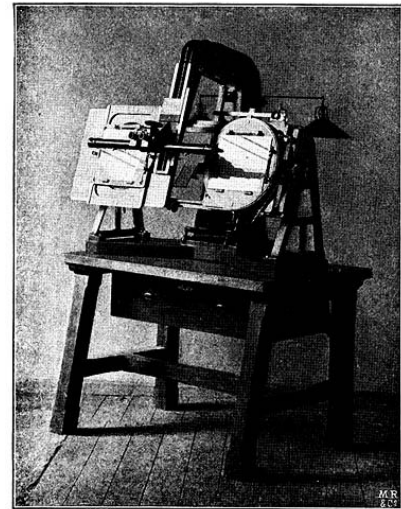
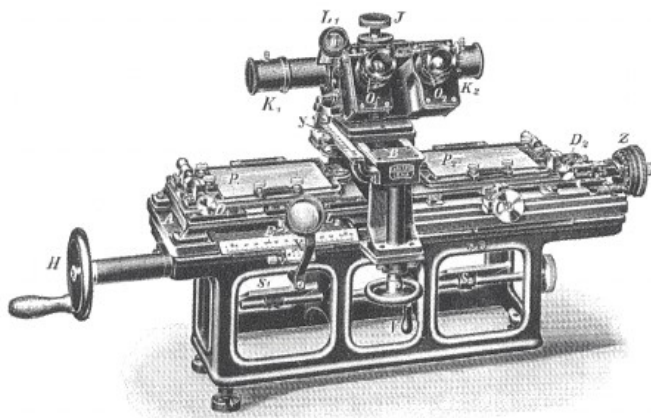


Figura 2.3-20 La imagen de la izquierda corresponde al Stereo-Planigraph de Deville, inventado en 1896. La imagen tridimensional de la derecha fue generada por Deville con este instrumento para cartografiar la parte canadiense de la cordillera Rocky Mountains (Center for Photogrammetric Training, 2008).

El austriaco Theodor Scheimpflug (1865-1911) desarrolló la teoría del doble proyector, que permitía la observación directa de las imágenes en proyección. Introdujo el concepto de triangulación radial e inventó el *Perspektograph*. A este mismo respecto el alemán German Sebastian Finsterwalder describió en 1899 los principios de la fotogrametría moderna, introdujo la utilización de haces redundantes para recrear la geometría y utilizó la teoría de los mínimos cuadrados para describir la relación entre los vectores de haces correspondientes (Doyle, 1964).

En 1901, el físico alemán Dr. Carl Pulfrich (1858-1929) diseñó el primer *stereocomparator* que utilizaba los tres ejes espaciales; se trata de un instrumento que realiza mediciones topográficas comparando fotografías estereoscópicas. Al mismo tiempo el sudafricano Dr. Henry George Fourcade (1865-1948) diseñó un invento muy similar, por lo que normalmente el instrumento se denomina *Pulfrich-Fourcade stereocomparator* (Figura 2.3-21).





*Figura 2.3-21 A la izquierda se observa el dibujo del stereocomparator de Pulfrich, diseño de 1901. La fotografía de la derecha corresponde a un stereocomparator Pulfrich-Fourcade de 1904. Las dos fotografías se colocan en sendas placas y se observan por medio de binoculares para visualizar una imagen 3D. El aparato permite al usuario realizar mediciones en los tres ejes, X, Y y Z (Max Planck Institute for the History of Science).*

El profesor, topógrafo y fotogrametrista Reinhard Hugerhoff (1882-1941) también contribuyó considerablemente al avance tecnológico creando, entre otros inventos, el primer trazador que incluía dos foto-goniómetros.

Otto von Gruber (1884-1942) desarrolló las ecuaciones fundamentales para la fotogrametría analítica, lo que facilitó enormemente el proceso de orientación y calibración, procedimiento cuyos principios siguen utilizándose en la actualidad (Doyle, 1964). Earl Church (1890-1956) también contribuyó a la teoría de la fotogrametría analítica hasta tal punto que se le considera uno de los padres de la fotogrametría (Queen, 1975).

En 1920 Sherman Fairchild (1896-1971) presentó una nueva cámara que colocó debajo del avión en lugar de en un costado, que era lo habitual. Para demostrar las capacidades de su nuevo sistema fotografió la isla de Manhattan (Figura 2.3-22).

Fairchild creó varias compañías que fueron pioneras no solo en el campo de la fotogrametría sino también en el de la aviación.



Figura 2.3-22 Mosaico aéreo de Manhattan creado por la Fairchild Aerial Camera Corporation en 1921 a partir de 100 fotografías tomadas a 1.000 pies (304 m) de altura (Library of Congress)

El americano Talbert Abrams (1896-1990) fue otro pionero de la aviación y la fotogrametría.

En 1947, Ralph O. Anderson desarrolló un método semiautomático para el control analítico de la fotogrametría que facilitaba la orientación de las fotografías (Doyle, 1964). Pero es la invención del ordenador entre 1941 y 1943 en Alemania (Zure) y Estados Unidos (Aitken) lo que modificaría significativamente el proceso fotogramétrico a partir de 1950 (Konecny, 1985). Diferentes científicos como Hellmut Heinrich Schmid, Paul Herget, G.H. Schut o Duane Brown contribuyeron al desarrollo de la técnica, así como Houssam Mahmoud Karara, quien fue el primero en alcanzar la precisión de 1:1.000.000 en un proyecto (Brown, 2005).

Las compañías que manufacturaban los instrumentos fotogramétricos han contribuido considerablemente al desarrollo de esta técnica. Los ejemplos más repetitivos son Zeiss, Kern y Wild (las dos últimas se fusionaron en 1990 a la casa Leica).

El desarrollo de la fotogrametría desde 1850 consta, según Konecny, de cuatro ciclos de aproximadamente 50 años. De 1850 a 1900 se desarrolló la fotografía plana. De 1900 a 1960 la fotogrametría fue analógica y desde entonces hasta principios del siglo XXI pasó a ser fotogrametría analítica. Desde principios de este siglo, surge la cuarta etapa, la fotografía digital, como continuación de las anteriores fases (Konecny, 1985).

Otros autores como Collier (Collier, 2002) dividen las etapas de la fotogrametría en función de la adquisición de datos. Así, una primera fase fue la comprendida antes de la I Guerra Mundial, y se caracterizó por una experimentación más individual, pero con considerable cooperación transnacional. La segunda fase coincidió con la I Guerra Mundial, dirigiendo todos los objetivos a satisfacer la industria bélica, sin cooperación transnacional. La tercera fase, comprendida entre

las dos guerras mundiales, estuvo definida por la invención del avión. Por último, la cuarta fase, abarcaría desde principios de la II Guerra Mundial hasta la actualidad.

Ya en la era de la fotografía digital, Gilbert Louis Hobrough (1918-2002) es considerado uno de los pioneros, habiendo recibido 47 patentes. Uki Helava también jugó un papel importante, primero como investigador en Bendix y posteriormente en Helava Associates. Esta compañía pasó a ser una subsidiaria de General Dynamics en 1986, empresa que desarrolló cámaras digitales fotogramétricas para la Defense Mapping Agency. Posteriormente, Helava Associates pasó a llamarse GDE Systems, ahora perteneciente a Leica Geosystems.

Durante la última década, los avances en fotografía digital y softwares fotogramétricos, combinado con la bajada de precios de los equipos, han posibilitado el uso de la fotogrametría en un abanico de aplicaciones (entre otros en conservación arquitectónica) y al mismo tiempo se ha reducido el coste del equipo y los tiempos de procesado, convirtiendo la técnica en altamente rentable. Es la fase que en esta tesis se denomina fotogrametría digital de última generación, en la que gracias a algoritmos SfM (*Structure for Motion*) y a los avances tecnológicos, el software informático se ocupa de casi todos los pasos que antes realizaba el usuario, salvo de tomar las fotografías, es decir, de la calibración de la cámara, la localización de las fotografías en el espacio, el solapado de las mismas, la rectificación, el escalado, etc. Otra gran diferencia es que el producto final es un modelo 3D del que se pueden extraer vistas 2D, secciones, etc. En la actualidad, las compañías relacionadas con la fotogrametría no proporcionan cámaras sino software; se trata de empresas que proporcionan el servicio, pero no el hardware. Las más utilizadas en Estados Unidos son Pix4D<sup>6</sup> y Agisoft<sup>7</sup> aunque surgen nuevas empresas continuamente y el panorama puede cambiar en cuestión de meses. Pix4D se fundó en Suiza en 2011 y se especializa en fotogrametría aérea mediante UAVs. Agisoft es una empresa rusa fundada en 2012 y su página hace más referencia a aplicaciones en patrimonio arquitectónico que Pix4D, pero ambas son válidas para aplicaciones en dicho campo. Una de las principales ventajas del primero sobre el segundo es que puede alquilarse por meses, por lo que las compañías pueden alquilar el software sólo cuando tienen proyectos de

---

<sup>6</sup> <https://pix4d.com/#>

<sup>7</sup> <http://www.agisoft.com/>

fotogrametría, lo cual facilita enormemente la implantación y uso de la técnica. Ambos softwares requieren formación para su uso, si bien no son softwares extremadamente complejos.

### 2.3.3.3. FUNCIONAMIENTO

El requerimiento básico en fotogrametría es que las fotografías se tomen con un solape estereoscópico, es decir, que mimeticen la perspectiva de la visión humana. La habilidad de los humanos de ver en tres dimensiones se debe a la disparidad horizontal, disparidad retiniana o disparidad binocular que se debe a la diferente posición de ambos ojos en la cabeza. La capacidad de integrar las dos imágenes que está viendo en una sola por medio del cerebro es la que permite disfrutar de la llamada visión estereoscópica; en fotogrametría series de “estéreo fotografías” solapadas alrededor del 60 % desde posiciones consecutivas.

Actualmente existen en el mercado aplicaciones como 123D Catch (gratuita), Agisoft Photoscan, insight3d (gratuito), openMVG (gratuito), Pix4Dmapper, Acute3D o PhotoModel3D que transforman las fotos tomadas por el usuario en modelos 3D de forma intuitiva y sencilla, incluso desde teléfonos móviles. El modelo 3D es después exportable a softwares gráficos como AutoCAD. El Pix4Dmapper está diseñado para trabajar con fotografías tomadas desde UAVs lo que posibilita, por ejemplo, la obtención del levantamiento 3D de un edificio de cuatro plantas y 200 m<sup>2</sup> de planta con la toma de aproximadamente 50 fotos en menos de cuatro horas (Boerman, 2011).

	Agisoft	Insight3D	Open MVG	Pix4D
Precio	Professional \$3499 Standard \$179	Gratuito	Gratuito	Versión gratuita: limita las funciones/1 mes: \$350/1 año: \$3500/Ilimitado: \$8700
Notas	1 mes prueba gratuito <a href="http://www.agisoft.com/">http://www.agisoft.com/</a>	Desarrollado por Lukas, únicamente pide feedback a cambio de utilizarlo. <a href="http://insight3d.sourceforge.net/">http://insight3d.sourceforge.net/</a>	No está completamente desarrollado <a href="http://imagine.enpc.fr/~moulonp/openMVG/">http://imagine.enpc.fr/~moulonp/openMVG/</a>	Especializado en drones. 1 mes de prueba gratuito. <a href="https://pix4d.com/products/">https://pix4d.com/products/</a>
	PhotoModel3D	AutoDesk ReCap 360	123D Catch	
Precio	Gratuito	\$65/mes, \$190/tres meses, \$500/año	Gratuito	
Notas	Desarrollado por Yuang-Fang en University of California <a href="http://rogue.cs.ucsb.edu/PhotoModel3D/webUpload.html">http://rogue.cs.ucsb.edu/PhotoModel3D/webUpload.html</a>	1 mes de prueba gratuito <a href="http://www.autodesk.com/products/recap">http://www.autodesk.com/products/recap</a>	Desarrollado por AutoDesk <a href="http://www.123dapp.com/catch">http://www.123dapp.com/catch</a>	

Tabla 1. Precio y comentarios de los softwares más utilizados en Estados Unidos a mayo del 2015.



En primer lugar, hay que tomar múltiples fotografías del elemento arquitectónico a modelar. A mayor número de fotografías, mayor precisión del modelo. Es importante que exista solape entre las instantáneas ya que el programa informático los identifica para generar una red tridimensional de puntos, que es la base del modelo. Se ha de tratar evitar las sombras ya que se verán en el modelo final y la variación de éstas puede dar errores. Además, la iluminación debe ser lo más homogénea posible. Se ha de tratar de capturar tantas perspectivas como sea posible siguiendo los mismos parámetros en cuanto a distancia, orientación de la cámara, parámetros de la cámara, etc.

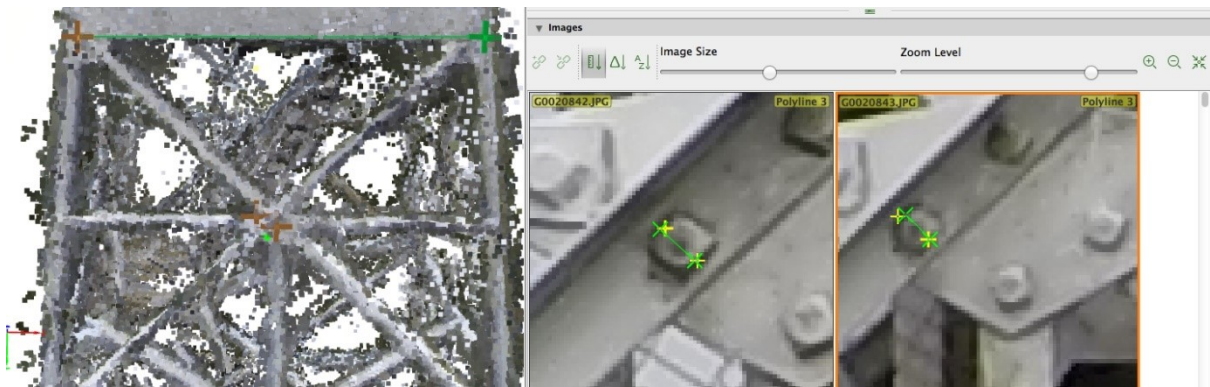


Figura 2.3-24 Con este sistema es posible en este caso realizar mediciones de hasta un cm de precisión.

Los softwares utilizan *Structure for Motion* (SfM) para calibrar simultáneamente el sistema óptico de la cámara, posición y orientación de cada foto y una nube de puntos formados por los puntos coincidentes del objeto captados en varias fotos.

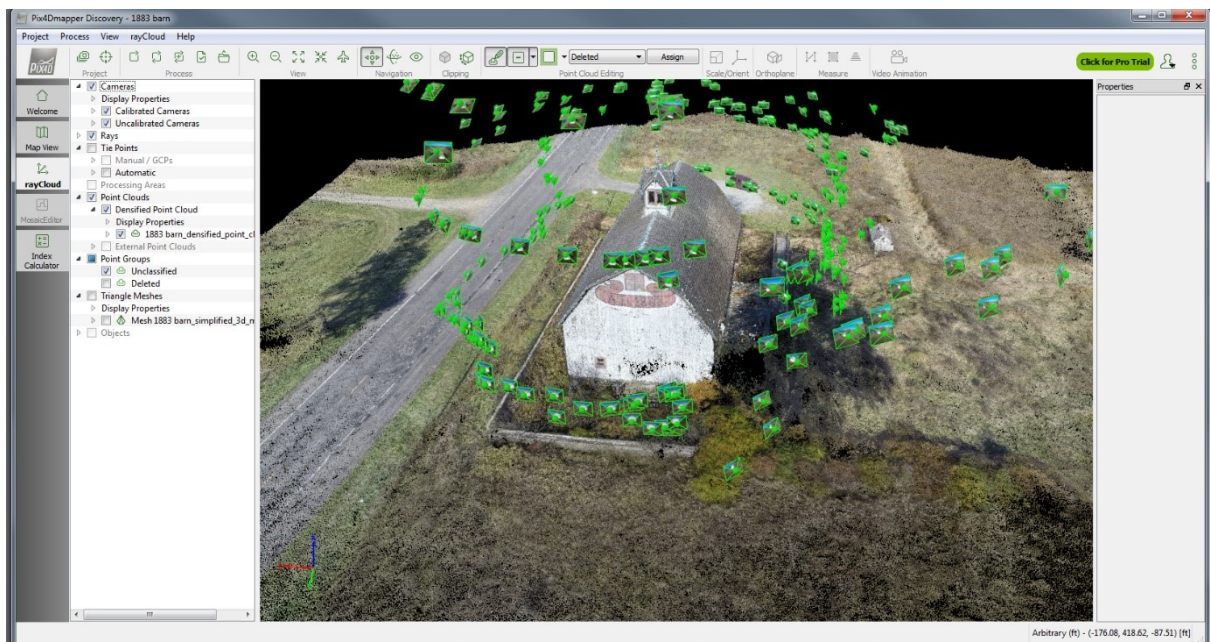


Figura 2.3-23 La imagen muestra una fotografía de la pantalla del software Pix4D que muestra la ubicación y la miniatura de las fotografías que se utilizaron para generar el modelo. Todo el proceso lo realiza de manera automática el software. Nube de puntos obtenida con 300 fotografías.



Posteriormente utilizan algoritmos de superficie stereo-multi-punto (*multi-viewpoint stereo* -MVS-) para crear una nube puntos densa o malla de puntos (normalmente definida por el usuario) que puede ser transformada a modelos 3D texturizados que pueden ser medidos con precisión de hasta 0,1 mm (Camp & et Al., 2013). La utilización de algoritmos SfM eliminan el proceso de calibración de la cámara siempre que existan puntos coincidentes en la red de diferentes fotografías tomadas desde diferentes posiciones y orientaciones con respecto al objeto. Es decir, en SfM la calibración de la cámara, su posición y los puntos coincidentes se resuelven simultáneamente.

El modelo es georreferenciado y automáticamente escalado utilizando coordenadas GPS insertadas en las fotos o insertadas de forma manual. Se pueden utilizar mediciones reales para escalar el modelo a falta de coordenadas GPS o para mejorar la precisión del modelo. También pueden incluirse en las fotografías barras o reglas calibradas en el caso de que el tamaño del elemento arquitectónico sea lo suficientemente pequeño como para utilizar esta opción. Una vez escalado, el modelo puede utilizarse para extraer las medidas deseadas y generar planos 2D.

Así pues, el software SfM toma la información recogida en el set de fotos para resolver tres cuestiones:

- Modelizar la geometría interior de la cámara (post-calibración), analizando cómo los rayos de luz viajan desde el objeto fotografiado a través del objetivo de la cámara hasta impactar en el sensor digital.
- Determinar la posición relativa y la orientación de la cámara en cada una de las fotografías (Figura 2.3-23).
- Generar una nube de puntos 3D localizando y haciendo coincidir puntos comunes en dos o más fotografías.

La resolución final del modelo 3D viene determinado por la resolución de las imágenes o GSD (*ground sample distance*). La resolución de las imágenes depende del tamaño del área real representada en cada pixel. La GSD queda determinada en función de la resolución del sensor de la cámara, la distancia focal de la lente y la distancia al objeto (Cultural Heritage Imaging, 2015).

Un elemento crucial para aplicar correctamente esta técnica es contar con una buena secuencia de fotografías, la cual puede ser obtenida siguiendo estas normas

básicas (algunas de estas reglas sólo pueden ser aplicadas si no se toma la secuencia desde un UAV):

- Elegir la distancia al objeto, focalizarlo y fijar dicho parámetro.
- Utilizar el objetivo sin zoom.
- Fijar la apertura de la cámara durante toda la secuencia (en objetivos de 35 mm conviene no utilizar una apertura menor de  $f/11$  con el fin de evitar difracción que desenfoque la imagen y por tanto disminuya la resolución).
- Utilizar el mínimo ISO posible. A mayor ISO, mayor ruido electrónico se genera en el sensor de la cámara lo cual dificulta la unión de puntos coincidentes en diferentes fotografías.
- Anular las funciones de estabilización de imagen y auto-rotado de imagen si la cámara las tiene.
- El programa utilizado de la cámara debe ser en modo prioridad de apertura (preferentemente  $f/5.6$ - $f/11$ ).
- Asegurarse de que la configuración de la cámara no cambia a lo largo de toda la secuencia.
- Para mantener un solapado constante de al menos 66% la cámara debe moverse el equivalente al 34% de su campo de visión entre fotografías.
- Intentar que cada punto esté cubierto, al menos, en tres fotografías.
- Tratar de mantener una distancia constante al objeto.

Debe añadirse que estas normas se arrastran de la técnica de fotogrametría previa a los softwares SfM de última generación que han revolucionado esta técnica. Si bien todos esos consejos facilitan el procesado de los datos para un óptimo modelo 3D, los softwares actuales pueden, gracias a los algoritmos SfM y MVS, realizar algunas de estas operaciones liberando al usuario de su ejecución.

Una de las limitaciones de esta técnica es que, si el elemento a capturar es repetitivo o sin aristas definidas, el software no puede distinguir entre puntos y no obtiene óptimos resultados. La manera de evitarlo es instalando referencias

que el software identifique para poder distinguir puntos de similar apariencia en relación a su posición con respecto al identificador.

En la Figura 2.3-25 se observa una tubería que tiene tres bocas con sus respectivas ruedas idénticas. Con el fin de ilustrar este concepto, se tomaron las mismas fotos con y sin referencias. Puede apreciarse cómo la falta de referencias y de aristas provoca vacíos en el modelo ya que el software no es capaz de discernir entre los diferentes puntos de esos vacíos; incluso en el caso en el que se colocan referencias en la tubería, sigue habiendo considerables faltantes en el modelo en el área de las ruedas porque éstas son idénticas y además carecen de aristas. La solución sería instalar referencias en cada una de esas ruedas. Compárese la calidad en la representación de los sillones del fondo.



Figura 2.3-25 La columna de la izquierda muestra, en la imagen superior, la fotografía de una tubería sin referencias. Se tomaron 73 fotografías de las cuales el software (Pix4D) utilizó 59 para generar el modelo mostrado en la imagen inferior. En la columna de la derecha la imagen superior corresponde a la fotografía de la misma tubería, pero con identificadores de diferentes colores. El proceso de toma de datos fue idéntico al caso de la izquierda. El software generó el modelo de inmediatamente inferior. Como puede observarse, el resultado es de mejor calidad debido a la existencia de identificadores.

El ejemplo de la Figura 2.3-27 muestra el modelo 3D de una estructura metálica; en este caso no existen superficies curvas, sin embargo, hay multitud de elementos similares o idénticos de manera que el software no es capaz de discernir entre ellos,

provocando números vacíos en el modelo final. Además, al ser una estructura abierta, el software no tiene información para rellenar el espacio entre miembros. En este caso las fotografías fueron tomadas con un UAV, y el acceso a la estructura no era posible por lo que la instalación de puntos de referencia no era una posibilidad. La solución en este caso es la inserción manual de puntos que el usuario selecciona en diferentes fotografías. El modelo final tiene mucho ruido y es de baja calidad, sin embargo, permite realizar mediciones con precisión de hasta un centímetro gracias a la visualización de las fotografías que aparecen al clicar sobre cualquiera de los puntos del modelo (son las fotografías a partir de las cuales el software ha generado ese punto en la nube de puntos del modelo).



Figura 2.3-26 Imagen de torre de vigilancia tomada desde un UAV para generar un modelo 3D con Pix4D.

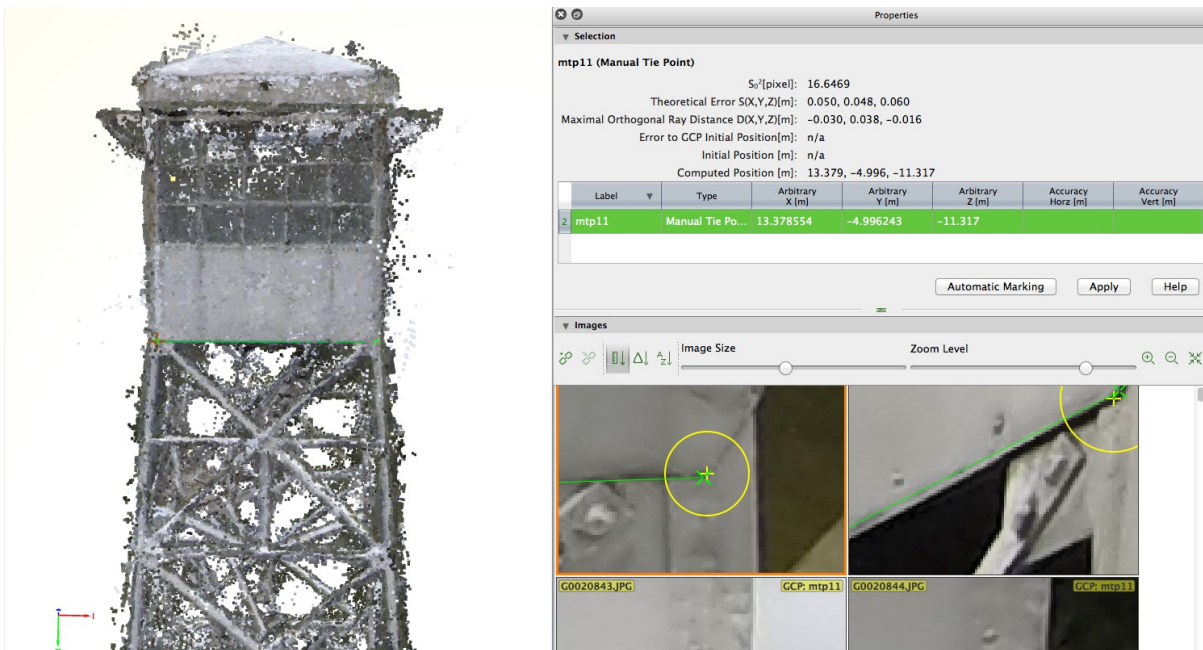


Figura 2.3-27 Imagen del modelo 3D generado a partir de 300 fotografías. Clicando sobre un punto del modelo se visualizan a la derecha las fotografías que el software ha utilizado para generar dicho punto 3D en el modelo. Esto permite afinar el modelo seleccionando manualmente el punto en diferentes fotografías y realizar mediciones.

La Figura 2.3-28 muestra cómo se ha simplificado el proceso de toma de datos en un proyecto de fotogrametría. La tabla la publicó el Bureau of Land Management National Operations Center en 2008 como guía para usuarios de fotogrametría convencional. Se han tachado todos los recursos que ya no son necesarios en la fotogrametría de última generación.



Aerial and Close-Range Photogrammetric Technology: Providing Resource Documentation, Interpretation, and Preservation	
<h3>Equipment Check List</h3> <p><input type="checkbox"/> People</p> <ul style="list-style-type: none"> <li><input type="checkbox"/> Person to take photographs</li> <li><input type="checkbox"/> Assistant to prep the site and keep track of work progress</li> <li><input type="checkbox"/> Docent to interact with public (may be needed at visited sites) and take photos of documentation process</li> </ul> <p><input type="checkbox"/> Camera and lens for CRP documentation</p> <p><input type="checkbox"/> Secondary camera for backup and to document CRP process</p> <p><input type="checkbox"/> Camera Accessories</p> <ul style="list-style-type: none"> <li><input type="checkbox"/> Battery charger or extra batteries</li> <li><input type="checkbox"/> Additional lenses equipped with protective bypass filters</li> <li><input type="checkbox"/> Painter's tape or other low- adhesive tape</li> <li><input type="checkbox"/> Spare memory cards</li> <li><input type="checkbox"/> Remote shutter release</li> <li><input type="checkbox"/> Lens cleaner or brush</li> <li><input type="checkbox"/> Padded camera case</li> </ul> <p><input type="checkbox"/> Laptop Computer <i>Opcional on site</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li><input type="checkbox"/> Card reader or appropriate cable for downloading images</li> <li><input type="checkbox"/> Image backup—either portable hard drive or blank DVDs</li> <li><input type="checkbox"/> Image software (preferably the software that came with the camera)</li> <li><input type="checkbox"/> Power cord</li> <li><input type="checkbox"/> DC adapter (if available)</li> <li><input type="checkbox"/> <i>Photogrammetry software</i></li> </ul> <p><input type="checkbox"/> Objects of known dimension <i>Si las fotografías están georreferenciadas.</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li><input type="checkbox"/> Commercial meter (or yard) sticks</li> <li><input type="checkbox"/> Calibrated target sticks of varying lengths</li> <li><input type="checkbox"/> Removable adhesive putty may be used for temporarily securing target sticks, although even this may not be appropriate for some delicate surfaces. <i>Sólo si el elemento es repetitivo o tiene superficies curvas.</i></li> </ul>	<p><input type="checkbox"/> Sturdy Tripod</p> <ul style="list-style-type: none"> <li><input type="checkbox"/> Boom or extension arm</li> <li><input type="checkbox"/> Quick release head</li> <li><input type="checkbox"/> Extra release plates</li> <li><input type="checkbox"/> Small screwdriver</li> <li><input type="checkbox"/> Leg weights for camera counterbalance to keep the tripod from tipping over</li> </ul> <p><input type="checkbox"/> When Establishing Location <i>If photographs are automatically georeferenced</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li><input type="checkbox"/> GPS unit</li> <li><input type="checkbox"/> Resource grade or RTK system (depending on desired product accuracy)</li> <li><input type="checkbox"/> Survey nails or rebar</li> <li><input type="checkbox"/> Sledge hammer, small chisel, and file</li> <li><input type="checkbox"/> CDs spray painted white</li> </ul> <p><input type="checkbox"/> Power Accessories</p> <ul style="list-style-type: none"> <li><input type="checkbox"/> Multiple-receptacle power strip</li> <li><input type="checkbox"/> DC power inverter for car use</li> </ul> <p><input type="checkbox"/> Miscellaneous Items</p> <ul style="list-style-type: none"> <li><input type="checkbox"/> Measuring tape</li> <li><input type="checkbox"/> Notebook and pencil</li> <li><input type="checkbox"/> Pocket calculator</li> <li><input type="checkbox"/> Small dry erase board or clipboard with identification sheet and markers</li> <li><input type="checkbox"/> Circular disks (such as clay poker chips) to mark features or image extents</li> <li><input type="checkbox"/> Step stool or ladder</li> <li><input type="checkbox"/> Small tarp for shade or wind protection</li> <li><input type="checkbox"/> Rope</li> <li><input type="checkbox"/> Duct tape</li> <li><input type="checkbox"/> Wisk and push brooms (when appropriate)</li> <li><input type="checkbox"/> Tree loppers or prunners (when appropriate)</li> <li><input type="checkbox"/> Pin flags or flagging tape</li> <li><input type="checkbox"/> General field necessities (water, snacks, sun screen, insect repellent, hat, other items)</li> </ul>

Figura 2.3-28 Tabla publicada por el Bureau of Land Management National Operations Center que recoge la lista de recursos necesarios para llevar a cabo un proyecto de fotogrametría antes de la irrupción de la fotogrametría de última generación. Se han tachado los recursos que no son necesarios en un proyecto de fotogrametría de última generación y añadido comentarios en rojo.



## 2.3.3.4. REPRESENTACIÓN DE RESULTADOS

---

Desde el surgimiento de la fotogrametría digital de última generación, la representación de resultados en modelos 3D a través de la técnica de fotogrametría es más eficiente, requiere menos trabajo y es más económica que otros tipos de toma de datos 3D *in situ*; el resultado tiene un nivel de detalle, precisión, calidad y precio que es difícil de alcanzar, si no imposible, con otras tecnologías (Matthews, 2008).

El modelo 3D puede ser transformado a otros formatos utilizables en otras plataformas de software; formatos como OBJ o DXF permiten importar el modelo a programas como Auto CAD o MicroStation. Las ortoimágenes con formato GeoTIFF, se rectifican para generar imágenes planas de alzados o secciones.

Otra forma de presentar el modelo es mediante un vuelo animado preestableciendo la ruta que la cámara digital debe recorrer (se incluye un ejemplo en el apéndice de esta tesis). La posibilidad de generar vuelos animados y 3D proporciona un modo sencillo para visualizar modelos 3D sin la necesidad de software especializado.

## 2.3.3.5. INSTRUMENTACIÓN

---

Para llevar a cabo esta técnica es necesaria una cámara de fotos digital y un ordenador con el software adecuado. Puede utilizarse cualquier cámara, pero obviamente, a mejor calidad de las fotografías, mejor calidad del modelo final (manteniéndose constante el resto de factores). Es de gran utilidad y altamente recomendable para aplicaciones en patrimonio arquitectónico, que la cámara tenga la posibilidad de georreferenciar las fotografías de forma automática. Si las fotografías están georreferenciadas, el modelo resultante tiene escala 1:1 por lo que puede utilizarse para hacer mediciones, planos, etc., sin necesidad de procesos intermedios. Es común encontrar modelos cuyas fotografías han sido tomadas desde un UAV con una GoPro, modelo que carece de georreferencias.

También es recomendable que la cámara tenga la calidad suficiente como para poder controlar y bloquear parámetros como la apertura, el flash, y el zoom. Además, es deseable evitar cámaras de gran angular que distorsionan la imagen, como los modelos GoPro. Sin embargo, debido a su ligereza y robustez muchos UAV's sólo admiten este tipo de cámaras. Los softwares especializados como Pix4D ya tienen esto en cuenta e incluyen estos modelos en sus listas de calibración.



*Figura 2.3-29 Fotografía tomada desde un UAV con una cámara GoPro para generar el modelo de la Figura 2.3-27 en la que puede apreciarse la deformación de la imagen debido al gran angular de este tipo de cámaras.*

Es muy común en aplicaciones al patrimonio construido tomar fotografías desde un UAV hasta el punto que ambos sistemas se fusionan en uno, siendo difícil encontrar proyectos de fotogrametría digital de última generación no habiendo hecho la toma de datos desde un UAV.

### 2.3.3.6. APLICACIONES EN PATRIMONIO CONSTRUIDO

---

- Documentación de las condiciones existentes del elemento arquitectónico a través de la generación de un modelo 3D texturizado. Para conservar la información es suficiente con almacenar la secuencia de fotos y el metadata asociado.
- Tomar mediciones directamente del modelo 3D.
- Generar planos a partir de secciones en el modelo 3D.
- Generar orto-fotografías que contengan la información fotográfica a escala y rectificadas de elemento arquitectónico.
- Generar vuelos y animaciones 3D del modelo, facilitando su visualización y la observación del elemento y sus lesiones.

- Posibilitar la observación de lesiones en su conjunto, que en un reconocimiento próximo pueden no percibirse, como por ejemplo desplomes, sistemas de grietas o grandes zonas de humedad.
- Posibilitar la detección de cambios a través de inspecciones cíclicas pre-programadas.

El ejemplo de la Figura 2.3-30 ilustra la utilización de esta técnica para la generación de moldes de terracota en los procesos de restauración desarrollados por la empresa Boston Valley Terracota.

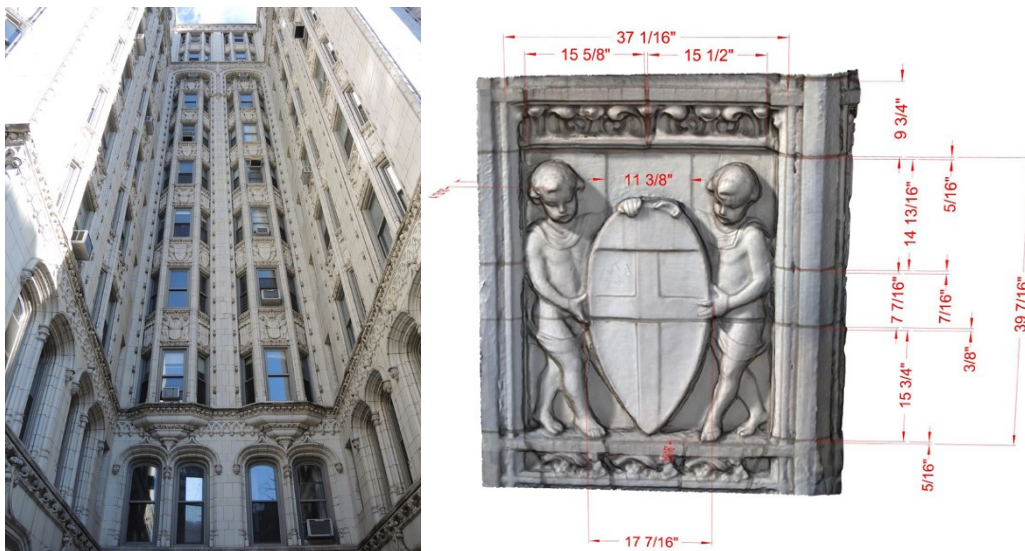


Figura 2.3-30 La imagen de la izquierda corresponde a la fachada de 36 Gramercy Park construida en 1910 y diseñada por el arquitecto James Reily Gordon. La fachada está adornada con terracota blanca fabricada a mano. Durante una restauración llevada a cabo en 2014, la empresa Boston Valley Terracota utilizó fotogrametría para poder medir con precisión las piezas originales para manufacturar sus respectivas réplicas (Boston Valley Terracota).

## 2.3.3.7. VENTAJAS Y LIMITACIONES

---

### VENTAJAS

- No requiere contacto con el elemento a investigar, lo que permite aplicar la técnica en todos los casos independientemente del estado de deterioro.
- Permite realizar modelos texturizados 3D, ortofotografías y planos por un coste muy inferior a los métodos utilizados hasta el momento.
- Existen softwares gratuitos como 123D Catch de AutoCAD o muy asequibles que permiten realizar modelos 3D sencillos con un ordenador o un teléfono móvil.
- Constituye una herramienta de documentación muy potente. Es posible documentar casi cualquier elemento arquitectónico con una gran precisión y calidad y generar un modelo 3D en pocas horas.
- Si la información se almacena en forma de fotografías tomadas y la metadata relacionada, se podrán utilizar esas mismas fotografías en el futuro, cuando los softwares estén todavía más avanzados, para lograr modelos 3D más precisos y de mayor calidad.
- La utilización de fotogrametría digital de última generación previa a una intervención, facilita información y por tanto una toma de decisiones mejor informada.

### LIMITACIONES

- Los softwares profesionales requieren un conocimiento especializado y un periodo de formación previo.
- Si la pieza arquitectónica a representar consta de elementos repetitivos o curvas, el resultado puede ser muy confuso, para ello puede ser necesario añadir marcadores que el software identifique.

- Si bien existen softwares gratuitos como el 123D catch, los softwares profesionales tienen un coste elevado. Al precio del software hay que añadir el ordenador de post-procesado, la cámara y el UAV si, como es habitual, las fotografías se toman desde el aire. El precio de un equipo completo de calidad media puede rondar los \$10.000.
- Si elemento a representar consta de partes reflectantes como espejos o cristales de alta reflexión, la generación del modelo 3D puede no ser posible.



## 2.3.4. TABLET PC ANNOTATION SYSTEM -TPAS-

---

*Better Data. Better projects.*

---

TPAS LLC

### 2.3.4.1. INTRODUCCIÓN

---

Con el fin de entender el estado de un edificio, diagnosticar sus problemas y preparar los documentos para su mantenimiento, restauración y reparación, los diferentes profesionales implicados deben recopilar y analizar información de diferentes fuentes simultáneamente, incluyendo notas en papel, informes previos y documentos gráficos como planos y fotografías. La dificultad no sólo estriba en ese proceso, sino en transmitir esa información al resto del equipo profesional de manera efectiva para evitar que se pierda información y que se tengan que repetir procesos de análisis. Como se expone en el apartado “1.2.1 Evaluación no destructiva en Estados Unidos”, los equipos profesionales en el campo de la conservación y la restauración arquitectónica son multidisciplinares y están formados por numerosos profesionales, por lo que la forma en la que se comparte información, constituye un proceso de gestión a diseñar en cualquier proyecto de conservación arquitectónica.

Contar con una documentación precisa de las condiciones existentes en el edificio es el primer paso de un proyecto de conservación o/y restauración. Los tratamientos de cada lesión se decidirán en función de las condiciones existentes, por ello se le da mucha importancia a la documentación previa de las mismas, especialmente teniendo en cuenta el elevado número de profesionales que integran los equipos en Estados Unidos y que dicha información ha de ser fiable y accesible a todos ellos, así como a los propietarios de los edificios, compañías de seguros y constructoras. Fruto de esa realidad surgió en 2003 TPAS, desarrollado por una empresa especializada en investigación de edificios históricos, Vertical Access. Se

ha convertido en el programa más utilizado en el país y se ha ido desarrollando utilizando métodos cada vez más sofisticados de recopilación de datos *in situ*.

Es un sistema de documentación *in situ* que permite la recopilación de datos visuales y números en AutoCAD. Posteriormente, la documentación recopilada se distribuye en diferentes formatos: planos, fotografías y tablas de datos, pudiendo haber otros dependiendo del caso. Una de las mejores cualidades de este sistema es que los archivos referidos a cada lesión quedan relacionados con la misma a través de un hipervínculo en el mismo plano de AutoCAD.

TPAS aumenta la utilidad de los datos recopilados *in situ* gracias a la interconectividad entre la realidad, las notas, archivos asociados a lesiones (fotografías, videos, tests, etc.) y entre las representaciones visuales y numéricas de los datos. Además, el portal online TPAS permite el análisis interactivo de la información de forma colaborativa entre diferentes miembros del equipo de conservación.

Cientos de edificios ya guardan en sus archivos informes de inspecciones de su estado documentado a través de este sistema.

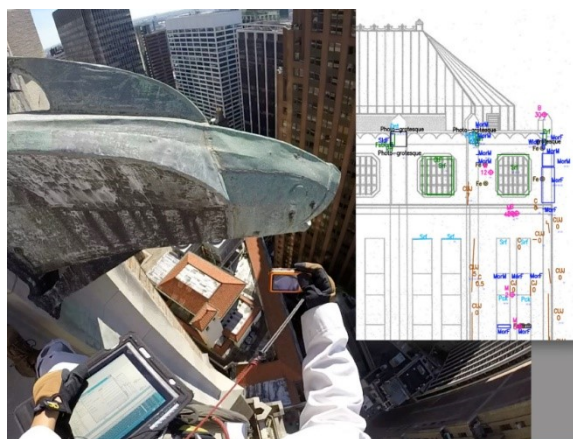


Figura 2.3-31 Sistema TPAS. El técnico inspecciona y documenta las condiciones existentes que quedan almacenadas automáticamente hipervinculadas con los archivos relacionados con dicha condición. Berta de Miguel en 63 Wall Street.

## 2.3.4.2. ANTECEDENTES HISTÓRICOS

---

En Estados Unidos el estudio del estado actual del elemento arquitectónico es un paso importante previo a la redacción de los documentos para su restauración y conservación. También es común encargar informes del estado actual en los procesos de compra venta de inmuebles. Tradicionalmente los arquitectos, ingenieros y conservadores anotaban *in situ* en soporte papel, de forma manual, las condiciones que observaban en sus inspecciones, así como su cantidad y grado. Utilizaban códigos para designar a las diferentes condiciones. Las fotografías que tomaban se localizaban en el plano a través de un repertorio de técnicas; había que

ordenarlas, renombrarlas, localizarlas en el plano y escoger la forma de presentarlas. Encontrar la localización en el plano de un edificio complejo cierta fotografía podía resultar tedioso y problemático. Las notas se superponían y llenaban los márgenes, dificultando o impidiendo el análisis e interpretación de los patrones de deterioro. La solución parcial a esta problemática concreta consistía en crear diferentes planos con diferentes grupos de condiciones, lo cual ralentizaba más el proceso de postproducción (Figura 2.3-32).

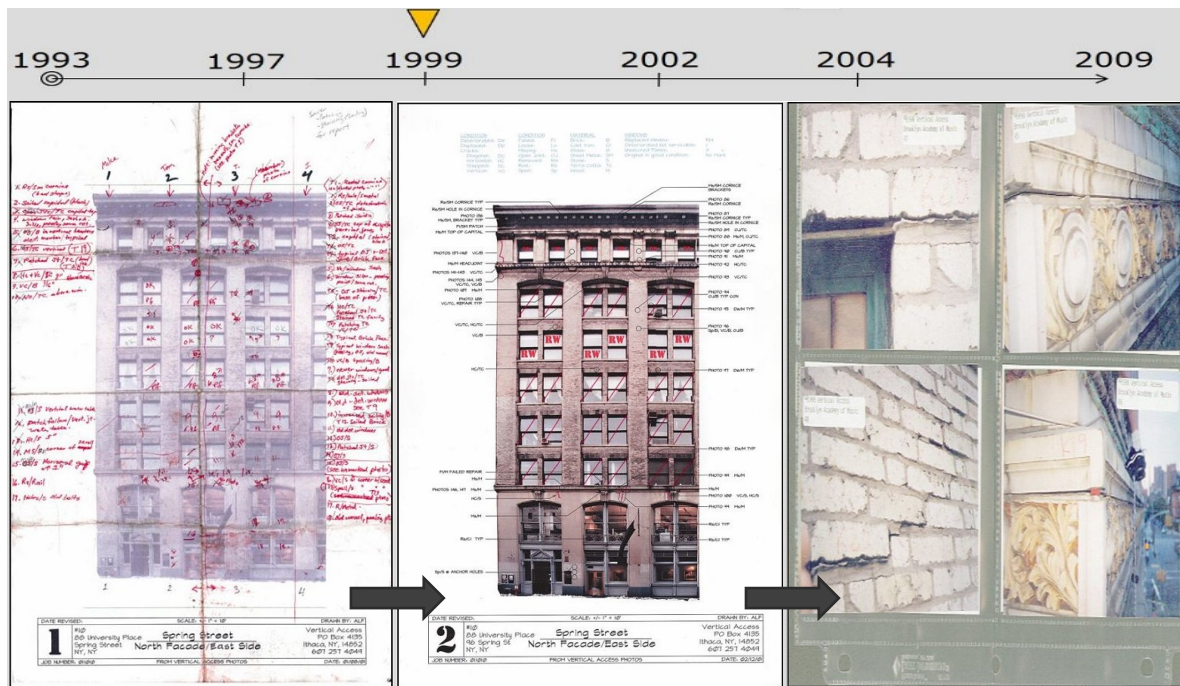


Figura 2.3-32 Tradicionalmente, la toma de datos de las condiciones existentes, se hacía de forma manual en soporte papel y el post-procesado se transcribían las notas al plano de presentación final y se establecía un método para designar y localizar las fotografías (TPAS).

Si además, la inspección se había llevado a cabo por diferentes técnicos, el proceso resultaba más complejo, ya que la heterogeneidad del documento final aumentaba, así como la complejidad en la interpretación de las notas; si las fotografías fueron tomadas secuencialmente, el conjunto final tras fusionar la información de cada técnico podía resultar aleatoria y desordenada. El tiempo de post-procesado de toda la información era alto y además era difícil no cometer errores de transcripción.

Este proceso resultaba costoso, derrochaba recursos humanos y retrasaba la entrega del informe fruto de la inspección. Para edificios pequeños puede resultar relativamente efectivo, sin embargo, en edificios grandes, este procedimiento resultaba inefectivo.

En el año 1996 la consultoría basada en el estado de Nueva York, Vertical Access (VA), dedicada a la inspección de edificios históricos, comenzó a dedicar recursos a la investigación de un sistema que hiciera más efectivo el proceso de recopilar, almacenar y compartir el estado de edificios existentes. El objetivo de su investigación era diseñar un sistema de anotación *in situ* que integrara el almacenamiento digital de los datos, ahorrando tiempo en la toma de datos y en el post-procesado de los mismos, y que hiciese la presentación e interpretación de la información más accesible y útil a los usuarios (Banta, Diebolt, & Gilbert, 2006). En esa época, los ordenadores portátiles con puntero (*pen-computing*) pertenecían a una tecnología relativamente nueva y había muy pocas opciones compatibles con el uso y el software potencialmente útil. Una opción que se barajó fue el Apple Newton, un dispositivo asistente digital personal (PDA), impecablemente diseñado pero adelantado a su época, ya que no disponía ni del hardware ni del software apropiado para esta aplicación (Figura 2.3-34).



Figura 2.3-34 Apple Newton pen, lanzado en 1993. Siendo el predecesor de los sistemas posteriores, carecía del software gráfico necesario para aplicaciones arquitectónicas efectivas (Apple).

En 1999 los investigadores de VA comenzaron a trabajar con el software PocketCAD, diseñado para ordenadores portátiles con puntero (*pen-based*) con sistema operativo Windows CE, que era plenamente compatible con archivos .dwg. Con este software instalado en el modelo Compaq iPAQ era posible utilizar herramientas básicas de AutoCAD como líneas, puntos, círculos, etc. para realizar anotaciones en planos vectoriales de AutoCAD. Los símbolos gráficos que utilizaban eran archivos pre-diseñados y reutilizables denominados BATs (*block attribute tags*). Una vez creado, el BAT puede ser insertado en diferentes localizaciones tantas veces como sean necesarias; éstos quedan insertados en el archivo .dwg para posterior manipulación o



Figura 2.3-33 Compaq iPAQ, el primer dispositivo portátil pen-based utilizado que permitía insertar anotación en archivos digitales de AutoCAD (iPAQ, HP).



extracción de datos a softwares de base de datos. Los BAT son más que simples notas ya que contienen información numérica y descriptiva asociada al símbolo; se trata de notas “inteligentes” con información para su posterior análisis.

Si bien este modelo supuso un gran adelanto, tenía importantes limitaciones: la pantalla del iPAQ era demasiado pequeña, el sistema operativo era lento y la acción de zoom, absolutamente necesaria para esta aplicación, ralentizaba todavía más el proceso; la batería duraba poco más de dos horas y había que hacer frente a un desembolso importante para hacerse con todo el equipo.

Paralelamente, los investigadores de VA<sup>8</sup> se aproximaron al sistema *Geographic Information System* (GIS) para averiguar si sería útil para esta aplicación. Softwares de GIS como ESRI tienen la capacidad de asociar un amplio espectro de datos gráficos y numéricos con diferentes objetos dentro de un plano o dibujo. Sin embargo, la gran deficiencia que supuso descartar GIS fue la dificultad de trasladar la información almacenada en GIS a un formato útil para arquitectos e ingenieros (por ejemplo, AutoCAD). Dicha decisión se tomó en 2006 ante la imposibilidad de convertir datos GIS a ficheros manejables por AutoCAD (Banta, Corbin, & Diebolt, 2004).

En el año 2003, ante el sorprendente avance de ordenadores portátiles *pen-based* y el lanzamiento de AutoCAD 2002, se reunieron las condiciones para desarrollar la primera versión de TPAS que posteriormente evolucionó hasta la versión actual.

Con el fin de mejorar la funcionalidad, entre 2003 y 2006, se añadieron varias herramientas personalizadas que se integraron a AutoCAD. Para ello se utilizó LISP, uno de los más primitivos lenguajes de programación; las principales incorporaciones fueron:



Figura 2.3-35 A la derecha, Mike Gilbert, uno de los investigadores desarrolladores de TPAS, con uno de los primeros dispositivos TPAS *pen-based*. La confluencia de la tecnología, la investigación y el lanzamiento de AutoCAD 2002, posibilitaron la aparición de TPAS (TPAS).

<sup>8</sup> Kent Diebolt, Mike Gilbert, Kelly Streeter Derek Streeter y Keith Luscinsky.



1. Cálculo automático de la longitud o área de la condición e inserción del valor en el campo de “medición” del bloque asociado.
2. Cálculo de la longitud de las polilíneas e inserción de la medida en el campo correspondiente del bloque asociado.
3. Hipervinculado de las fotografías digitales asociadas a BATs, situándolas automáticamente en el plano y renombrado de las mismas.

De 2008 a 2014 se fueron añadiendo mejoras menores a esa base establecida en 2006, que mejoraban el sistema, pero que no supusieron un cambio de la técnica. La mayor parte de ellas se engloban en dos categorías: adición de BATs que ampliaron la biblioteca de condiciones y mejora tecnológica de los equipos, que se plasmó en un aumento de la eficiencia *in situ* y en una mejor visibilidad de la pantalla.

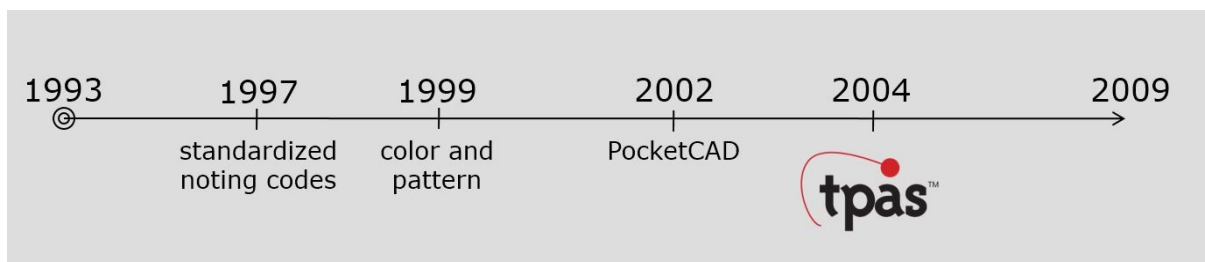


Figura 2.3-36 Evolución de la toma de datos, almacenamiento y transmisión en patrimonio construido según Kelly Streeter, una de las desarrolladoras de TPAS (Streeter, *Restore Course: Non-destructive Evaluation*. TPAS., 2013).

En 2014 se incorporó una prestación que supone una variación importante en la presentación de la información y en su versatilidad: el TPAS Portal. Se trata de una aplicación que almacena y procesa los datos en servidores en la nube y que permite el uso y análisis interactivo en formatos numéricos y visuales desde cualquier ordenador, portátil, tableta o Smartphone con conexión a internet. Este sistema facilita compartir los datos entre diferentes miembros del equipo sin tener que descargar ningún archivo, ahorrando tiempo y espacio digital. Si bien la aplicación hace uso de una base de AutoCAD, el usuario no necesita disponer del software ni saber utilizarlo, ya que la aplicación es sencilla e intuitiva. La aplicación permite filtrar diferentes variables proporcionando al usuario de un alto grado de personalización, pudiendo crear tablas de datos y planos selectivos. Además de disponer de la información del estado del edificio, cada una de las condiciones puede visualizarse a través de las fotografías vinculadas; esto, a su vez, facilita procesos como el de comprobar la evolución de las lesiones a lo largo del tiempo de una manera sencilla y efectiva (Streeter, 2014).

### 2.3.4.3. FUNCIONAMIENTO

---

TPAS facilita el registro digital de los datos de inspección *in situ* utilizando como plataforma AutoCAD, permitiendo la visualización y análisis de patrones de lesiones, agilizando la generación de informes y de documentos de mediciones y diseño. Los usuarios pueden utilizar la librería de condiciones estándar incluida en el software o personalizar los campos de captura de información.

La secuencia de uso es la siguiente:

1. En primer lugar, se ha de generar el plano base sobre el que se anotarán las condiciones existentes. Este paso se realiza en la oficina antes de comenzar el trabajo de campo. Dicho plano base, siempre en formato .dwg puede ser un plano tradicional de AutoCAD o un plano proveniente de un escáner laser o puede generarse a partir de la inserción en el plano de AutoCAD de una ortofotografía, un escáner de un plano existente en soporte papel en .pdf, .jpg o cualquier otro formato de fotografía reconocido por AutoCAD. Una vez se dispone de la representación gráfica del edificio, se inserta una cuadrícula de coordenadas haciéndola coincidir con el origen 0,0,0 del plano de AutoCAD.
2. Si el proyecto requiere de bloques de condiciones especiales no registrados en la biblioteca base de TPAS, se han de preparar antes del trabajo de campo, lo cual se lleva a cabo con procesos de programación sencilla en LISP.
3. Una vez se está en disposición del plano base instalado en la tableta digital con la biblioteca necesaria, puede comenzarse la toma de datos *in situ*. Para ello, cuando el técnico observa una condición que desea documentar, localiza en el plano su ubicación y busca en la biblioteca la lesión/condición (en forma de bloque/BAT en el centro de diseño de AutoCAD). A continuación, arrastra dicho bloque a la localización en el plano y automáticamente se abre una primera ventana.
4. En la primera ventana el usuario debe elegir el tipo concreto de condición y la prioridad de la misma (Pr 1 se asigna a condiciones urgentes o peligrosas, como un ornamento a punto de caer, Pr2 se asigna a condiciones que suponen un deterioro del edificio si no se solucionan, como una grieta; Pr3 corresponde a condiciones que no suponen un deterioro, como una zona

pintada). Una vez elegidos esos dos campos se cierra dicha ventana y se abre la ventana de edición de atributos; los atributos dependerán del tipo de condición. En todos los casos, dicha ventana muestra campos para rellenar con diferente tipo de información de la lesión/condición en concreto. Existe además un campo que permite tomar notas libres.

5. En cualquier momento mientras la ventana de edición de atributos está activa, pueden tomarse fotografías, videos o cualquier otro archivo que desee asociarse a dicha nota (archivos NDE de GPR, de UPV, etc.)
6. El software automáticamente asigna una capa específica a cada tipo de condición lo que facilita la visualización e interpretación de los patrones de deterioro, especialmente en aquellos casos en los que miles de notas se superponen (activando o desactivando capas en AutoCAD). En cualquier momento, durante o finalizada, la inspección se puede acceder a los atributos de cada condición con un doble clic sobre el símbolo de la condición (Figura 2.3-37).



Figura 2.3-37 Proceso de registro de condiciones/lesiones en TPAS.

La plataforma base de software es una combinación de AutoCAD y AutoLISP, que a través de una tableta permite introducir datos gráficos y numéricos. Con este sistema, las condiciones existentes son documentadas gráficamente en un plano digital utilizando bloques pre-definidos de librerías virtuales de lesiones en función del material.

Del mismo modo, TPAS permite la conexión a otros dispositivos como cámaras de fotos o vídeo, u otros instrumentos de investigación no destructiva como geo-radares o endoscopios, entre otros. Cada fotografía, video o archivo que el técnico toma, se enlaza automáticamente in situ a través de un hipervínculo a su localización exacta en el plano y pasa a nombrarse en función de sus coordenadas en el plano y la condición que identifica (Figura 2.3-38).



*Figura 2.3-38 Esta fotografía corresponde a uno de los asteriscos azules de la Figura 2.3-37; el nombre que recibe automáticamente en el momento de su captura es: 266-17 Stone\_SoilStain Atmospheric-1, que corresponde a las coordenadas x e y, la condición, y el número de archivo y la lesión.*

La librería de condiciones es uno de los elementos clave de TPAS y está organizada por materiales: metal estructural, ladrillo, hormigón, cristal, membrana, yeso, lámina metálica, pizarra, piedra, estuco, terracota y madera. Dentro de cada material, la librería incluye práctica totalidad de posibles condiciones que puede presentar dicho material; en la actualidad, la librería estándar cuenta con un total de 328 condiciones o lesiones. El motivo por el que no se denominan únicamente lesiones es porque algunas de ellas no responden a la definición de lesión sino a la de estado existente, como por ejemplo “Revestido” para una zona de muro de piedra. Una de las ventajas de utilizar una librería común es que, aunque varias personas diferentes estén trabajando en el análisis de un mismo edificio, todos ellos documentarán su estado actual y lesiones siguiendo la misma convención. La librería actual (Junio 2016) completa de TPAS se encuentra recogida en el anexo de esta tesis. La tabla incluida a continuación corresponde al esquema de condiciones de la librería estándar básica de TPAS.

	CONDITION	OPTIONS CONDITION	CODE CONDITION	UNIT	DRAWING	NEEDED DATA	SEVERITY	
CONCRETE	Concrete_Coating	Coating Sound	Ct	Square feet	rectang/pline	Or rectand/pline or square feet	NA/PR3/PR2/PR1	
		Coating Failed	CtF	Square feet	rectang/pline	Or rectand/pline or square feet	NA/PR3/PR2/PR1	
	Concrete_Crack	Single Unit	C	Lineal feet	pline	Or pline or feet + Crack width in 1/16" increments	NA/PR3/PR2/PR1	
		System joints	CJ	Lineal feet	pline	Or pline or feet + Crack width in 1/16" increments	NA/PR3/PR2/PR1	
		System units	CU	Lineal feet	pline	Or pline or feet + Crack width in 1/16" increments	NA/PR3/PR2/PR1	
		System units and joints	CUJ	Lineal feet	pline	Or pline or feet + Crack width in 1/16" increments	NA/PR3/PR2/PR1	
		Repair sound	CRpr	Lineal feet	pline	Or pline or feet + Crack width in 1/16" increments	NA/PR3/PR2/PR1	
		Repair failed	CRprF	Lineal feet	pline	Or pline or feet + Crack width in 1/16" increments	NA/PR3/PR2/PR1	
	Concrete_Displacement	Repair Removed	CRprR	Lineal feet	pline	Or pline or feet + Crack width in 1/16" increments	NA/PR3/PR2/PR1	
		Crazing	Crz	Square feet	rectang/pline	Or rectand/pline or square feet	NA/PR3/PR2/PR1	
		Horizontal	Hor	Sq Ft; except Cast Stone, n# ut	rectang/pline	Or rectand/pline or square feet + Depth in 1/8" increments	NA/PR3/PR2/PR1	
		Vertical	Vrt	Sq Ft; except Cast Stone, n# ut	rectang/pline	Or rectand/pline or square feet + Depth in 1/8" increments	NA/PR3/PR2/PR1	
		Horizontal and Vertical	HV	Sq Ft; except Cast Stone, n# ut	rectang/pline	Or rectand/pline or square feet + Depth in 1/8" increments	NA/PR3/PR2/PR1	
	Concrete_Ferrous_Element	Ferrous Element	Fe	-	-	-	NA/PR3/PR2/PR1	
		Concrete_Joints	Mortar Caulked	MorClk	Lineal feet	pline	Or pline or lineal feet	NA/PR3/PR2/PR1
	Mortar Caulked Failed		MorClkF	Lineal feet	pline	Or pline or lineal feet	NA/PR3/PR2/PR1	
	Mortar Failed		MorF	Percent	-	Percent	NA/PR3/PR2/PR1	
	Mortar Missing		MorM	Lineal feet	pline	Or pline or lineal feet	NA/PR3/PR2/PR1	
	Mortar Removed		MorR	Lineal feet	pline	Or pline or lineal feet	NA/PR3/PR2/PR1	
	Sealant Failed		SlntF	Lineal feet	pline	Or pline or lineal feet	NA/PR3/PR2/PR1	
	Concrete_Lintel	Surface rust	Srf	-	-	-	NA/PR3/PR2/PR1	
		Pack rust	Pck	-	-	-	NA/PR3/PR2/PR1	
	Concrete_Note	Misc condition	Joint	-	-	Type note text	NA/PR3/PR2/PR1	
		Joint condition	Return	-	-	-	NA/PR3/PR2/PR1	
		Condition at return	Photo	-	-	-	NA/PR3/PR2/PR1	
		Misc photo	-	-	-	-	NA/PR3/PR2/PR1	
	Concrete_Repair	Patch Sound	P	Square inches	-	Square inches	NA/PR3/PR2/PR1	
		Patch Failed	PF	Square inches	-	Square inches	NA/PR3/PR2/PR1	
		Patch Removed	PR	Square inches	-	Square inches	NA/PR3/PR2/PR1	
	Concrete_SoilStain	Replacement	Rpl	Square feet	rectang/pline	Or rectand or square feet	NA/PR3/PR2/PR1	
		Atmospheric	Atm	Square feet	rectang/pline	Or rectand/pline or square feet	NA/PR3/PR2/PR1	
		Biological	Bio	Square feet	rectang/pline	Or rectand/pline or square feet	NA/PR3/PR2/PR1	
		Bituminous	Bit	Square feet	rectang/pline	Or rectand/pline or square feet	NA/PR3/PR2/PR1	
		Black Crusts	Blck	Square feet	rectang/pline	Or rectand/pline or square feet	NA/PR3/PR2/PR1	
		Cooper	Cpr	Square feet	rectang/pline	Or rectand/pline or square feet	NA/PR3/PR2/PR1	
		Efflorescence	Eff	Square feet	rectang/pline	Or rectand/pline or square feet	NA/PR3/PR2/PR1	
		Guano	Gua	Square feet	rectang/pline	Or rectand/pline or square feet	NA/PR3/PR2/PR1	
		Leached Salts	Lch	Square feet	rectang/pline	Or rectand/pline or square feet	NA/PR3/PR2/PR1	
		Paint	Pnt	Square feet	rectang/pline	Or rectand/pline or square feet	NA/PR3/PR2/PR1	
		Concrete_Spall	Rust	Rst	Square feet	rectang/pline	Or rectand/pline or square feet	NA/PR3/PR2/PR1
			Bonded	B	Square inches	-	Square inches	NA/PR3/PR2/PR1
	Incipient		I	Square inches	-	Square inches	NA/PR3/PR2/PR1	
	Missing		M	Square inches	-	Square inches	NA/PR3/PR2/PR1	
	Missing + Steel		MS	Square inches	-	Square inches	NA/PR3/PR2/PR1	
	Removed		R	Square inches	-	Square inches	NA/PR3/PR2/PR1	
Removed + Steel	RS		Square inches	-	Square inches	NA/PR3/PR2/PR1		
Hazardous	Haz		Square inches	-	Square inches	NA/PR3/PR2/PR1		
Concrete_SurfLoss	Chipped	Chp	Square feet	rectang/pline	Or rectand/pline or square feet + Depth in 1/8" increments	NA/PR3/PR2/PR1		
	Erosion	Er	Square feet	rectang/pline	Or rectand/pline or square feet + Depth in 1/8" increments	NA/PR3/PR2/PR1		
	Exfoliation	Exf	Square feet	rectang/pline	Or rectand/pline or square feet + Depth in 1/8" increments	NA/PR3/PR2/PR1		
	Friable	Fri	Square feet	rectang/pline	Or rectand/pline or square feet + Depth in 1/8" increments	NA/PR3/PR2/PR1		
	Concrete_Unsecured	Hazardous	Haz	Square feet	rectang/pline	Or rectand/pline or square feet	NA/PR3/PR2/PR1	
Hollow		H	Square feet	rectang/pline	Or rectand/pline or square feet	NA/PR3/PR2/PR1		
Loose		L	Square feet	rectang/pline	Or rectand/pline or square feet	NA/PR3/PR2/PR1		
Missing		M	Square feet	rectang/pline	Or rectand/pline or square feet	NA/PR3/PR2/PR1		
Removed		R	Square feet	rectang/pline	Or rectand/pline or square feet	NA/PR3/PR2/PR1		
GLASS		Glass_Bulge	Bulging planes	Blg	-	-	-	NA/PR3/PR2/PR1
	Cracked pane		C	-	-	-	NA/PR3/PR2/PR1	
	Glass_Crack	Note	Return	-	-	Type note text	NA/PR3/PR2/PR1	
		Photo	Photo	-	-	-	NA/PR3/PR2/PR1	
		Glass_Perimeter	Putty failed	PtyF	Lineal feet	pline	Or pline or lineal feet	NA/PR3/PR2/PR1
	Sealant failed		SlntF	Lineal feet	pline	Or pline or lineal feet	NA/PR3/PR2/PR1	
	Glass_SoilStain	Bituminous	Bit	-	-	-	NA/PR3/PR2/PR1	
		Cementitious	Cem	-	-	-	NA/PR3/PR2/PR1	
		Paint	Pnt	-	-	-	NA/PR3/PR2/PR1	
	Glass_Unsecured	Hazardous	Haz	-	-	-	NA/PR3/PR2/PR1	
Loose		L	-	-	-	NA/PR3/PR2/PR1		
Missing		M	-	-	-	NA/PR3/PR2/PR1		
Removed		R	-	-	-	NA/PR3/PR2/PR1		
PLASTER	Plaster_Coating	Coating sound	Ct	Square feet	rectang/pline	Or rectand/pline or square feet	NA/PR3/PR2/PR1	
		Coating failed	CtF	Square feet	rectang/pline	Or rectand/pline or square feet	NA/PR3/PR2/PR1	
	Plaster_Crack	Crack	C	Length in feet	pline	Or pline or feet + Crack width in 1/16" increments	NA/PR3/PR2/PR1	
		Repair sound	CRpr	Length in feet	pline	Or pline or feet + Crack width in 1/16" increments	NA/PR3/PR2/PR1	
		Repair failed	CRprF	Length in feet	pline	Or pline or feet + Crack width in 1/16" increments	NA/PR3/PR2/PR1	
		Repair removed	CRprR	Length in feet	pline	Or pline or feet + Crack width in 1/16" increments	NA/PR3/PR2/PR1	
	Plaster_Damaged	Lath Failed	LthF	Square feet	rectang/pline	Or rectand/pline or square feet	NA/PR3/PR2/PR1	
		Water Damage	WDmg	Square feet	rectang/pline	Or rectand/pline or square feet	NA/PR3/PR2/PR1	
	Plaster_Note	Misc condition	Joint	-	-	Type note text	NA/PR3/PR2/PR1	
		Joint condition	Return	-	-	-	NA/PR3/PR2/PR1	
		Condition return	Photo	-	-	-	NA/PR3/PR2/PR1	
		Misc photo	-	-	-	-	NA/PR3/PR2/PR1	
	Plaster_Repair	Patch Sound	P	Square inches	-	Square inches	NA/PR3/PR2/PR1	
		Patch Failed	PF	Square inches	-	Square inches	NA/PR3/PR2/PR1	
		Patch Removed	PR	Square inches	-	Square inches	NA/PR3/PR2/PR1	
	Plaster_SoilStain	Replacement	Rpl	Square feet	rectang/pline	Or rectand/pline or square feet	NA/PR3/PR2/PR1	
		Water Stain	WStn	Square feet	rectang/pline	Or rectand/pline or square feet	NA/PR3/PR2/PR1	
	Plaster_Unsecured	Hazardous	Haz	Square feet	rectang/pline	Or rectand/pline or square feet	NA/PR3/PR2/PR1	
Hollow		H	Square feet	rectang/pline	Or rectand/pline or square feet	NA/PR3/PR2/PR1		
Loose		L	Square feet	rectang/pline	Or rectand/pline or square feet	NA/PR3/PR2/PR1		
Missing		M	Square feet	rectang/pline	Or rectand/pline or square feet	NA/PR3/PR2/PR1		

Figura 2.3-39 Esquema de condiciones en la biblioteca estándar básica de TPAS. 1 de 5.



	CONDITION	OPTIONS CONDITION	CODE CONDITION	UNIT	DRAWING	NEEDED DATA	SEVERITY	
ARQUITECTURAL METAL	ArchMetal_Coating	Coating sound	Ct	Square feet	rectang/pline	Or rectang/pline or square feet	NA/PR3/PR2/PR1	
		Coating failed	CtF	Square feet	rectang/pline	Or rectang/pline or square feet	NA/PR3/PR2/PR1	
	ArchMetal_Connection	Fastener Failed	FstF	Count	-	Units	NA/PR3/PR2/PR1	
		Flange Failed	FIF	Inches	-	Inches	NA/PR3/PR2/PR1	
	ArchMetal_Corrosion	Weld Failed	WidF	Inches	-	Inches	NA/PR3/PR2/PR1	
		Surface	Srf	Square Inches	rectang/pline	Or rectang/pline or square inches	NA/PR3/PR2/PR1	
		Pitted	Pit	Square Inches	rectang/pline	Or rectang/pline or square inches	NA/PR3/PR2/PR1	
	ArchMetal_Crack	Perforated	Prf	Square Inches	rectang/pline	Or rectang/pline or square inches	NA/PR3/PR2/PR1	
		Fastener rusted	FstRst	Count	-	Units	NA/PR3/PR2/PR1	
		Crack	C	Lineal feet	pline	Or pline or feet + Crack width in 1/16" increments	NA/PR3/PR2/PR1	
	ArchMetal_Damaged	Repair sound	CRpr	Lineal feet	pline	Or pline or feet + Crack width in 1/16" increments	NA/PR3/PR2/PR1	
		Repair failed	CRprF	Lineal feet	pline	Or pline or feet + Crack width in 1/16" increments	NA/PR3/PR2/PR1	
		Bent	Bnt	Square feet	rectang/pline	Or rectang/pline or square feet	NA/PR3/PR2/PR1	
	ArchMetal_Note	Dented	Dnt	Square feet	rectang/pline	Or rectang/pline or square feet	NA/PR3/PR2/PR1	
		Misc condition	-	-	-	Type note text	NA/PR3/PR2/PR1	
		Joint condition	Joint	-	-	-	NA/PR3/PR2/PR1	
	ArchMetal_SealantFailed	Condition at return	Return	-	-	-	NA/PR3/PR2/PR1	
		Misc photo	Photo	-	-	-	NA/PR3/PR2/PR1	
		Sealant failed	SlntF	Lineal feet	pline	Or pline or feet + Crack width in 1/16" increments	NA/PR3/PR2/PR1	
	ArchMetal_SoilStain	Bituminous	Bit	Square feet	rectang/pline	Or rectang/pline or square feet	NA/PR3/PR2/PR1	
		Cementitious	Cem	Square feet	rectang/pline	Or rectang/pline or square feet	NA/PR3/PR2/PR1	
		Copper	Cpr	Square feet	rectang/pline	Or rectang/pline or square feet	NA/PR3/PR2/PR1	
	ArchMetal_Unsecured	Guano	Gua	Square feet	rectang/pline	Or rectang/pline or square feet	NA/PR3/PR2/PR1	
		Paint	Pnt	Square feet	rectang/pline	Or rectang/pline or square feet	NA/PR3/PR2/PR1	
		Rust	Rst	Square feet	rectang/pline	Or rectang/pline or square feet	NA/PR3/PR2/PR1	
		Hazardous	Haz	Square feet	rectang/pline	Or rectang/pline or square feet	NA/PR3/PR2/PR1	
		Hollow	H	Square feet	rectang/pline	Or rectang/pline or square feet	NA/PR3/PR2/PR1	
		Loose	L	Square feet	rectang/pline	Or rectang/pline or square feet	NA/PR3/PR2/PR1	
		Missing	M	Square feet	rectang/pline	Or rectang/pline or square feet	NA/PR3/PR2/PR1	
		Removed	R	Square feet	rectang/pline	Or rectang/pline or square feet	NA/PR3/PR2/PR1	
		Picture link	-	-	-	-	Picture	NA/PR3/PR2/PR1
		BRICK	Brick_Coating	Coating Sound	Ct	Square feet	rectang/pline	Or rectang/pline or square feet
	Coating Failed			CtF	Square feet	rectang/pline	Or rectang/pline or square feet	NA/PR3/PR2/PR1
	Brick_Crack		Single unit	C	Lineal feet	pline	Or pline or feet + Crack width in 1/16" increments	NA/PR3/PR2/PR1
			System joints	CJ	Lineal feet	pline	Or pline or feet + Crack width in 1/16" increments	NA/PR3/PR2/PR1
System units			CU	Lineal feet	pline	Or pline or feet + Crack width in 1/16" increments	NA/PR3/PR2/PR1	
Brick_Displacement	System units and joints		CUJ	Lineal feet	pline	Or pline or feet + Crack width in 1/16" increments	NA/PR3/PR2/PR1	
	Repair sound		CRpr	Lineal feet	pline	Or pline or feet + Crack width in 1/16" increments	NA/PR3/PR2/PR1	
	Repair failed		CRprF	Lineal feet	pline	Or pline or feet + Crack width in 1/16" increments	NA/PR3/PR2/PR1	
Brick_Ferrous_Element	Repair removed		CRprR	Lineal feet	pline	Or pline or feet + Crack width in 1/16" increments	NA/PR3/PR2/PR1	
	Horizontal		Hor	Square feet	rectang/pline	Or rectang/pline or square feet + Depth in 1/8" increments	NA/PR3/PR2/PR1	
	Vertical		Vrt	Square feet	rectang/pline	Or rectang/pline or square feet + Depth in 1/8" increments	NA/PR3/PR2/PR1	
Brick_Joints	Horizontal and Vertical		HV	Square feet	rectang/pline	Or rectang/pline or square feet + Depth in 1/8" increments	NA/PR3/PR2/PR1	
	Ferrous Element		Fe	-	-	-	NA/PR3/PR2/PR1	
	Mortar Caulked		MorCk	Lineal feet	pline	Or pline or feet	NA/PR3/PR2/PR1	
Brick_Lintel	Mortar Caulked Failed		MorCkF	Lineal feet	pline	Or pline or feet	NA/PR3/PR2/PR1	
	Mortar Failed		MorF	Count	percent	Percent	NA/PR3/PR2/PR1	
	Mortar Missing		MorM	Lineal feet	pline	Or pline or feet	NA/PR3/PR2/PR1	
Brick_Note	Mortar Removed		MorR	Lineal feet	pline	Or pline or feet	NA/PR3/PR2/PR1	
	Sealant Failed		SlntF	Lineal feet	pline	Or pline or feet	NA/PR3/PR2/PR1	
	Surface rust		Srf	-	-	-	NA/PR3/PR2/PR1	
Brick_Repair	Pack rust		Pck	-	-	-	NA/PR3/PR2/PR1	
	Misc condition		-	-	-	Type note text	NA/PR3/PR2/PR1	
	Joint condition		Joint	-	-	-	NA/PR3/PR2/PR1	
Brick_Spall	Condition return		Return	-	-	-	NA/PR3/PR2/PR1	
	Misc photo		Photo	-	-	-	NA/PR3/PR2/PR1	
	Dutchman Sound		D	Square inches	-	Square inches	NA/PR3/PR2/PR1	
Brick_SurfLoss	Dutchman Failed		DF	Square inches	-	Square inches	NA/PR3/PR2/PR1	
	Dutchman Removed		DR	Square inches	-	Square inches	NA/PR3/PR2/PR1	
	Patch Sound		P	Square inches	-	Square inches	NA/PR3/PR2/PR1	
Brick_Unsecured	Patch Failed		PF	Square inches	-	Square inches	NA/PR3/PR2/PR1	
	Patch Removed		PR	Square inches	-	Square inches	NA/PR3/PR2/PR1	
	Replacement		Rpl	Square feet	rectang/pline	Or rectang/pline or square feet	NA/PR3/PR2/PR1	
Brick_SoilStain	Atmospheric		Atm	Square feet	rectang/pline	Or rectang/pline or square feet	NA/PR3/PR2/PR1	
	Biological		Bio	Square feet	rectang/pline	Or rectang/pline or square feet	NA/PR3/PR2/PR1	
	Bituminous		Bit	Square feet	rectang/pline	Or rectang/pline or square feet	NA/PR3/PR2/PR1	
Brick_Spall	Black Crusts	Bkck	Square feet	rectang/pline	Or rectang/pline or square feet	NA/PR3/PR2/PR1		
	Cementitious	Cem	Square feet	rectang/pline	Or rectang/pline or square feet	NA/PR3/PR2/PR1		
	Cooper	Cpr	Square feet	rectang/pline	Or rectang/pline or square feet	NA/PR3/PR2/PR1		
Brick_Unsecured	Efflorescence	Eff	Square feet	rectang/pline	Or rectang/pline or square feet	NA/PR3/PR2/PR1		
	Guano	Gua	Square feet	rectang/pline	Or rectang/pline or square feet	NA/PR3/PR2/PR1		
	Leached Salts	Lch	Square feet	rectang/pline	Or rectang/pline or square feet	NA/PR3/PR2/PR1		
Brick_Spall	Paint	Pnt	Square feet	rectang/pline	Or rectang/pline or square feet	NA/PR3/PR2/PR1		
	Rust	Rst	Square feet	rectang/pline	Or rectang/pline or square feet	NA/PR3/PR2/PR1		
	Bonded	B	Square inches	-	Square inches	NA/PR3/PR2/PR1		
Brick_Spall	Incipient	I	Square inches	-	Square inches	NA/PR3/PR2/PR1		
	Missing	M	Square inches	-	Square inches	NA/PR3/PR2/PR1		
	Missing+Steel	MS	Square inches	-	Square inches	NA/PR3/PR2/PR1		
Brick_Spall	Removed	R	Square inches	-	Square inches	NA/PR3/PR2/PR1		
	Removed+Steel	RS	Square inches	-	Square inches	NA/PR3/PR2/PR1		
	Hazardous	Haz	Square inches	-	Square inches	NA/PR3/PR2/PR1		
Brick_Spall	Chipped	Chp	Square feet	rectang/pline	Or rectang/pline or square feet + Depth in 1/8" increments	NA/PR3/PR2/PR1		
	Eroded	Erd	Square feet	rectang/pline	Or rectang/pline or square feet + Depth in 1/8" increments	NA/PR3/PR2/PR1		
	Face spalled	Fce	Square feet	rectang/pline	Or rectang/pline or square feet + Depth in 1/8" increments	NA/PR3/PR2/PR1		
Brick_Unsecured	Friable	Fri	Square feet	rectang/pline	Or rectang/pline or square feet + Depth in 1/8" increments	NA/PR3/PR2/PR1		
	Hazardous	Haz	Square feet	rectang/pline	Or rectang/pline or square feet	NA/PR3/PR2/PR1		
	Hollow	H	Square feet	rectang/pline	Or rectang/pline or square feet	NA/PR3/PR2/PR1		
Brick_Unsecured	Loose	L	Square feet	rectang/pline	Or rectang/pline or square feet	NA/PR3/PR2/PR1		
	Missing	M	Square feet	rectang/pline	Or rectang/pline or square feet	NA/PR3/PR2/PR1		
	Removed	R	Square feet	rectang/pline	Or rectang/pline or square feet	NA/PR3/PR2/PR1		

Figura 2.3-40 Esquema de condiciones en la biblioteca estándar básica de TPAS. 2 de 5.

	CONDITION	OPTIONS CONDITION	CODE CONDITION	UNIT	DRAWING	NEEDED DATA	SEVERITY
SHEET METAL		Removed	R	Square feet	rectang/pline	Or rectand/pline or square feet	NA/PR3/PR2/PR1
	SheetMetal_Coating	Coating Sound	Ct	Square feet	rectang/pline	Or rectand/pline or square feet	NA/PR3/PR2/PR1
		Coating Failed	CtF	Square feet	rectang/pline	Or rectand/pline or square feet	NA/PR3/PR2/PR1
	SheetMetal_Corrosion	Surface	Srf	Square feet	rectang/pline	Or rectand/pline or square feet	NA/PR3/PR2/PR1
		Pitted	Pit	Square feet	rectang/pline	Or rectand/pline or square feet	NA/PR3/PR2/PR1
		Perforated	Prf	Square feet	rectang/pline	Or rectand/pline or square feet	NA/PR3/PR2/PR1
		Fastener rusted	FstRst	Count	-	Units	NA/PR3/PR2/PR1
	SheetMetal_Damaged	Dented	Dnt	Square feet	rectang/pline	Or rectand/pline or square feet	NA/PR3/PR2/PR1
		Punctured	Pnc	Inches (Diameter)	-	Inches	NA/PR3/PR2/PR1
		Torn	Trn	Feet	rectang/pline	Or rectand/pline or feet	NA/PR3/PR2/PR1
	SheetMetal_Note	Misc condition	-	-	-	Type note text	NA/PR3/PR2/PR1
		Joint condition	Joint	-	-	-	NA/PR3/PR2/PR1
		Condition at return	Return	-	-	-	NA/PR3/PR2/PR1
		Misc photo	Photo	-	-	-	NA/PR3/PR2/PR1
	SheetMetal_Repair	Patch Sound	P	square feet	rectang/pline	Or rectand/pline or square feet	NA/PR3/PR2/PR1
		Patch Failed	PF	square feet	rectang/pline	Or rectand/pline or square feet	NA/PR3/PR2/PR1
		Patch Removed	PR	square feet	rectang/pline	Or rectand/pline or square feet	NA/PR3/PR2/PR1
		Replacement	Rpl	square feet	rectang/pline	Or rectand/pline or square feet	NA/PR3/PR2/PR1
	SheetMetal_Seam	Fastener Failed	FstF	Count	-	Units	NA/PR3/PR2/PR1
		Folded Failed	FldF	Lineal feet	pline	Or pline or lineal feet	NA/PR3/PR2/PR1
	Sealant Failed	SintF	Lineal feet	pline	Or pline or lineal feet	NA/PR3/PR2/PR1	
	Solder Failed	SldF	Lineal feet	pline	Or pline or lineal feet	NA/PR3/PR2/PR1	
SheetMetal_SoilStain	Atmospheric	Atm	square feet	rectang/pline	Or rectand/pline or square feet	NA/PR3/PR2/PR1	
	Bituminous	Bit	square feet	rectang/pline	Or rectand/pline or square feet	NA/PR3/PR2/PR1	
	Cementitious	Cem	square feet	rectang/pline	Or rectand/pline or square feet	NA/PR3/PR2/PR1	
	Copper	Cpr	square feet	rectang/pline	Or rectand/pline or square feet	NA/PR3/PR2/PR1	
	Guano	Gua	square feet	rectang/pline	Or rectand/pline or square feet	NA/PR3/PR2/PR1	
	Paint	Pnt	square feet	rectang/pline	Or rectand/pline or square feet	NA/PR3/PR2/PR1	
	Rust	Rst	square feet	rectang/pline	Or rectand/pline or square feet	NA/PR3/PR2/PR1	
SheetMetal_Unsecured	Hazardous	Haz	square feet	rectang/pline	Or rectand/pline or square feet	NA/PR3/PR2/PR1	
	Loose	L	square feet	rectang/pline	Or rectand/pline or square feet	NA/PR3/PR2/PR1	
	Missing	M	square feet	rectang/pline	Or rectand/pline or square feet	NA/PR3/PR2/PR1	
	Removed	R	square feet	rectang/pline	Or rectand/pline or square feet	NA/PR3/PR2/PR1	
SLATE	Slate_Connection	Fastener failed	FstF	count	-	Units	NA/PR3/PR2/PR1
	Slate_Crack	Crack	C	-	-	-	NA/PR3/PR2/PR1
	Slate_Note	Misc condition	-	-	-	Type note text	NA/PR3/PR2/PR1
		Joint condition	Joint	-	-	-	NA/PR3/PR2/PR1
		Condition at return	Return	-	-	-	NA/PR3/PR2/PR1
		Misc photo	Photo	-	-	-	NA/PR3/PR2/PR1
	Slate_SoilStain	Biological	Bio	square feet	rectang/pline	Or rectand/pline or square feet	NA/PR3/PR2/PR1
		Bituminous	Bit	square feet	rectang/pline	Or rectand/pline or square feet	NA/PR3/PR2/PR1
		Cementitious	Cem	square feet	rectang/pline	Or rectand/pline or square feet	NA/PR3/PR2/PR1
		Guano	Gua	square feet	rectang/pline	Or rectand/pline or square feet	NA/PR3/PR2/PR1
		Paint	Pnt	square feet	rectang/pline	Or rectand/pline or square feet	NA/PR3/PR2/PR1
		Rust	Rst	square feet	rectang/pline	Or rectand/pline or square feet	NA/PR3/PR2/PR1
	Slate_Unsecured	Hazardous	Haz	count	-	Units	NA/PR3/PR2/PR1
		Loose	L	count	-	Units	NA/PR3/PR2/PR1
		Missing	M	count	-	Units	NA/PR3/PR2/PR1
	Removed	R	count	-	Units	NA/PR3/PR2/PR1	
STONE	Stone_Coating	Coating Sound	Ct	square feet	rectang/pline	Or rectand/pline or square feet	NA/PR3/PR2/PR1
		Coating Failed	CtF	square feet	rectang/pline	Or rectand/pline or square feet	NA/PR3/PR2/PR1
	Stone_Crack	Single unit	C	Length in feet	pline	Or pline or feet + Crack width in 1/16" increments	NA/PR3/PR2/PR1
		System joints	CJ	Length in feet	pline	Or pline or feet + Crack width in 1/16" increments	NA/PR3/PR2/PR1
		System units	CU	Length in feet	pline	Or pline or feet + Crack width in 1/16" increments	NA/PR3/PR2/PR1
		System units and joints	CUJ	Length in feet	pline	Or pline or feet + Crack width in 1/16" increments	NA/PR3/PR2/PR1
		Repair sound	CRpr	Length in feet	pline	Or pline or feet + Crack width in 1/16" increments	NA/PR3/PR2/PR1
		Repair failed	CRprF	Length in feet	pline	Or pline or feet + Crack width in 1/16" increments	NA/PR3/PR2/PR1
		Repair removed	CRprR	Length in feet	pline	Or pline or feet + Crack width in 1/16" increments	NA/PR3/PR2/PR1
	Stone_Displacement	Horizontal	Hor	Count	-	Displacement in 1/8" increments	NA/PR3/PR2/PR1
		Vertical	Vrt	Count	-	Displacement in 1/8" increments	NA/PR3/PR2/PR1
		Horizontal and Vertical	HV	Count	-	Displacement in 1/8" increments	NA/PR3/PR2/PR1
	Stone_Ferrous_Element	Ferrous Element	Fe	-	-	-	NA/PR3/PR2/PR1
	Stone_Joints	Mortar Caulked	MorClk	Lineal feet	pline	-	NA/PR3/PR2/PR1
		Mortar Caulked Failed	MorClkF	Lineal feet	pline	-	NA/PR3/PR2/PR1
		Mortar Failed	MorF	Percent	-	percent	NA/PR3/PR2/PR1
		Mortar Missing	MorM	Lineal feet	pline	-	NA/PR3/PR2/PR1
		Mortar Removed	MorR	Lineal feet	pline	-	NA/PR3/PR2/PR1
		Sealant Failed	SirtF	Lineal feet	pline	-	NA/PR3/PR2/PR1
	Stone_Lintel	Surface rust	Srf	-	-	-	NA/PR3/PR2/PR1
		Pack rust	Pck	-	-	-	NA/PR3/PR2/PR1
	Stone_Note	Misc condition	-	-	-	Type note text	NA/PR3/PR2/PR1
		Joint condition	Joint	-	-	-	NA/PR3/PR2/PR1
		Condition at return	Return	-	-	-	NA/PR3/PR2/PR1
		Misc photo	Photo	-	-	-	NA/PR3/PR2/PR1
	Stone_Repair	Dutchman Sound	D	Square inches	-	Square inches	NA/PR3/PR2/PR1
		Dutchman Failed	DF	Square inches	-	Square inches	NA/PR3/PR2/PR1
		Dutchman Removed	DR	Square inches	-	Square inches	NA/PR3/PR2/PR1
		Patch Sound	P	Square inches	-	Square inches	NA/PR3/PR2/PR1
		Patch Failed	PF	Square inches	-	Square inches	NA/PR3/PR2/PR1
		Patch Removed	PR	Square inches	-	Square inches	NA/PR3/PR2/PR1
		Replacement	Rpl	Square feet	rectang	Or rectand or square feet	NA/PR3/PR2/PR1
	Stone_SoilStain	Atmospheric	Atm	Square feet	rectang/pline	Or rectand/pline or square feet	NA/PR3/PR2/PR1
		Biological	Bio	Square feet	rectang/pline	Or rectand/pline or square feet	NA/PR3/PR2/PR1
		Bituminous	Bit	Square feet	rectang/pline	Or rectand/pline or square feet	NA/PR3/PR2/PR1
	Black Crusts	Blick	Square feet	rectang/pline	Or rectand/pline or square feet	NA/PR3/PR2/PR1	
	Cementitious	Cem	Square feet	rectang/pline	Or rectand/pline or square feet	NA/PR3/PR2/PR1	
	Copper	Cpr	Square feet	rectang/pline	Or rectand/pline or square feet	NA/PR3/PR2/PR1	
	Efflorescence	Eff	Square feet	rectang/pline	Or rectand/pline or square feet	NA/PR3/PR2/PR1	
	Guano	Gua	Square feet	rectang/pline	Or rectand/pline or square feet	NA/PR3/PR2/PR1	

Figura 2.3-41 Esquema de condiciones en la biblioteca estándar básica de TPAS. 3 de 5.

CONDITION	OPTIONS CONDITION	CODE CONDITION	UNIT	DRAWING	NEEDED DATA	SEVERITY	
Stone_Spall	Rust	Rst	Square feet	rectang/pline	Or rectand/pline or square feet	NA/PR3/PR2/PR1	
	Bonded	B	Square inches	-	Square inches	NA/PR3/PR2/PR1	
	Incipient	I	Square inches	-	Square inches	NA/PR3/PR2/PR1	
	Missing	M	Square inches	-	Square inches	NA/PR3/PR2/PR1	
	Missing + Steel	MS	Square inches	-	Square inches	NA/PR3/PR2/PR1	
	Removed	R	Square inches	-	Square inches	NA/PR3/PR2/PR1	
	Removed + Steel	RS	Square inches	-	Square inches	NA/PR3/PR2/PR1	
Stone_SurfLoss	Hazardous	Haz	Square inches	-	Square inches	NA/PR3/PR2/PR1	
	Chipped	Chp	Square feet	rectang/pline	Or rectand/pline or square feet + Depth in 1/8" increments	NA/PR3/PR2/PR1	
	Delamination	Dlm	Square feet	rectang/pline	Or rectand/pline or square feet + Depth in 1/8" increments	NA/PR3/PR2/PR1	
	Erosion	Er	Square feet	rectang/pline	Or rectand/pline or square feet + Depth in 1/8" increments	NA/PR3/PR2/PR1	
	Exfoliation	Exf	Square feet	rectang/pline	Or rectand/pline or square feet + Depth in 1/8" increments	NA/PR3/PR2/PR1	
Stone_Unsecured	Friable	Fri	Square feet	rectang/pline	Or rectand/pline or square feet + Depth in 1/8" increments	NA/PR3/PR2/PR1	
	Hazardous	Haz	Square feet	rectang/pline	Or rectand/pline or square feet	NA/PR3/PR2/PR1	
	Hollow	H	Square feet	rectang/pline	Or rectand/pline or square feet	NA/PR3/PR2/PR1	
	Loose	L	Square feet	rectang/pline	Or rectand/pline or square feet	NA/PR3/PR2/PR1	
	Missing	M	Square feet	rectang/pline	Or rectand/pline or square feet	NA/PR3/PR2/PR1	
Removed	R	Square feet	rectang/pline	Or rectand/pline or square feet	NA/PR3/PR2/PR1		
STUCCO	Stucco_Coating	Coating Sound	Ct	Square feet	rectang/pline	Or rectand/pline or square feet	NA/PR3/PR2/PR1
		Coating Failed	CtF	Square feet	rectang/pline	Or rectand/pline or square feet	NA/PR3/PR2/PR1
	Stucco_Crack	Crack	C	Length in feet	pline	Or pline or feet + Crack width in 1/16" increments	NA/PR3/PR2/PR1
		Crack repair sound	CRpr	Length in feet	pline	Or pline or feet + Crack width in 1/16" increments	NA/PR3/PR2/PR1
		Crack repair failed	CRprF	Length in feet	pline	Or pline or feet + Crack width in 1/16" increments	NA/PR3/PR2/PR1
		Crack repair removed	CRprR	Length in feet	pline	Or pline or feet + Crack width in 1/16" increments	NA/PR3/PR2/PR1
	Stucco_Ferrous_Element	Ferrous Element	Fe	-	-	-	NA/PR3/PR2/PR1
		Stucco_Joint	SlntF	Lineal feet	pline	Or pline or feet	NA/PR3/PR2/PR1
	Stucco_Note	Misc condition	-	-	-	Type note text	NA/PR3/PR2/PR1
		Joint condition	Joint	-	-	-	NA/PR3/PR2/PR1
		Condition at return	Return	-	-	-	NA/PR3/PR2/PR1
	Stucco_Repair	Misc photo	Photo	-	-	-	NA/PR3/PR2/PR1
Patch Sound		P	Square inches	-	Square inches	NA/PR3/PR2/PR1	
Patch Failed		PF	Square inches	-	Square inches	NA/PR3/PR2/PR1	
Stucco_SoilStain	Patch Removed	PR	Square inches	-	Square inches	NA/PR3/PR2/PR1	
	Replacement	Rpl	Square inches	rectang/pline	Or rectand/pline or square inches	NA/PR3/PR2/PR1	
	Atmospheric	Atm	Square feet	rectang/pline	Or rectand/pline or square feet	NA/PR3/PR2/PR1	
	Biological	Bio	Square feet	rectang/pline	Or rectand/pline or square feet	NA/PR3/PR2/PR1	
	Bituminous	Bit	Square feet	rectang/pline	Or rectand/pline or square feet	NA/PR3/PR2/PR1	
	Cooper	Cpr	Square feet	rectang/pline	Or rectand/pline or square feet	NA/PR3/PR2/PR1	
	Guano	Gua	Square feet	rectang/pline	Or rectand/pline or square feet	NA/PR3/PR2/PR1	
	Paint	Pnt	Square feet	rectang/pline	Or rectand/pline or square feet	NA/PR3/PR2/PR1	
	Rust	Rst	Square feet	rectang/pline	Or rectand/pline or square feet	NA/PR3/PR2/PR1	
	Stucco_Unsecured	Hazardous	Haz	Square feet	rectang/pline	Or rectand/pline or square feet	NA/PR3/PR2/PR1
Hollow		H	Square feet	rectang/pline	Or rectand/pline or square feet	NA/PR3/PR2/PR1	
Loose		L	Square feet	rectang/pline	Or rectand/pline or square feet	NA/PR3/PR2/PR1	
Missing		M	Square feet	rectang/pline	Or rectand/pline or square feet	NA/PR3/PR2/PR1	
Removed		R	Square feet	rectang/pline	Or rectand/pline or square feet	NA/PR3/PR2/PR1	
TERRACOTA	TerraCotta_Coating	Coating Sound	Ct	Square feet	rectang/pline	Or rectand/pline or square feet	NA/PR3/PR2/PR1
		Coating Failed	CtF	Square feet	rectang/pline	Or rectand/pline or square feet	NA/PR3/PR2/PR1
	TerraCotta_Crack	Single unit	C	Length in feet	pline	Or pline or feet + Crack width in 1/16" increments	NA/PR3/PR2/PR1
		System joints	CJ	Length in feet	pline	Or pline or feet + Crack width in 1/16" increments	NA/PR3/PR2/PR1
		System units	CU	Length in feet	pline	Or pline or feet + Crack width in 1/16" increments	NA/PR3/PR2/PR1
		System units and joints	CUJ	Length in feet	pline	Or pline or feet + Crack width in 1/16" increments	NA/PR3/PR2/PR1
		Repair sound	CRpr	Length in feet	pline	Or pline or feet + Crack width in 1/16" increments	NA/PR3/PR2/PR1
		Repair failed	CRprF	Length in feet	pline	Or pline or feet + Crack width in 1/16" increments	NA/PR3/PR2/PR1
	TerraCotta_Displacement	Repair removed	CRprR	Length in feet	pline	Or pline or feet + Crack width in 1/16" increments	NA/PR3/PR2/PR1
		Crazing	Crz	Square feet	rectang	Or rectand/pline or square feet/ Crack width in 1/16" in.	NA/PR3/PR2/PR1
		Horizontal	Hor	Count	-	Displacement in 1/8" increments	NA/PR3/PR2/PR1
		Vertical	Vrt	Count	-	Displacement in 1/8" increments	NA/PR3/PR2/PR1
TerraCotta_Ferrous_Element	Horizontal and Vertical	HV	Count	-	Displacement in 1/8" increments	NA/PR3/PR2/PR1	
	Ferrous Element	Fe	-	-	-	NA/PR3/PR2/PR1	
TerraCotta_Joints	Mortar Caulked	MorClk	Lineal feet	pline	Or pline or feet	NA/PR3/PR2/PR1	
	Mortar Caulked Failed	MorClkF	Lineal feet	pline	Or pline or feet	NA/PR3/PR2/PR1	
	Mortar Failed	MorF	Percent	-	Percent	NA/PR3/PR2/PR1	
	Mortar Missing	MorM	Lineal feet	pline	Or pline or feet	NA/PR3/PR2/PR1	
	Mortar Removed	MorR	Lineal feet	pline	Or pline or feet	NA/PR3/PR2/PR1	
	Sealant failed	SlntF	Lineal feet	pline	Or pline or feet	NA/PR3/PR2/PR1	
TerraCotta_Lintel	Surface rust	Srf	-	-	-	NA/PR3/PR2/PR1	
	Pack rust	Pck	-	-	-	NA/PR3/PR2/PR1	
TerraCotta_Note	Misc condition	-	-	-	Type note text	NA/PR3/PR2/PR1	
	Joint condition	Joint	-	-	-	NA/PR3/PR2/PR1	
	Condition at return	Return	-	-	-	NA/PR3/PR2/PR1	
	Misc photo	Photo	-	-	-	NA/PR3/PR2/PR1	
TerraCotta_Repair	Patch Sound	P	Square inches	-	Square inches	NA/PR3/PR2/PR1	
	Patch Failed	PF	Square inches	-	Square inches	NA/PR3/PR2/PR1	
	Patch Removed	PR	Square inches	-	Square inches	NA/PR3/PR2/PR1	
TerraCotta_SoilStain	Replacement	Rpl	Square feet	rectang/pline	Or rectand/pline or square feet	NA/PR3/PR2/PR1	
	Atmospheric	Atm	Square feet	rectang/pline	Or rectand/pline or square feet	NA/PR3/PR2/PR1	
	Biological	Bio	Square feet	rectang/pline	Or rectand/pline or square feet	NA/PR3/PR2/PR1	
	Bituminous	Bit	Square feet	rectang/pline	Or rectand/pline or square feet	NA/PR3/PR2/PR1	
	Cementitious	Cem	Square feet	rectang/pline	Or rectand/pline or square feet	NA/PR3/PR2/PR1	
	Copper	Cpr	Square feet	rectang/pline	Or rectand/pline or square feet	NA/PR3/PR2/PR1	
	Efflorescence	Eff	Square feet	rectang/pline	Or rectand/pline or square feet	NA/PR3/PR2/PR1	
	Guano	Gua	Square feet	rectang/pline	Or rectand/pline or square feet	NA/PR3/PR2/PR1	
	Leached Salts	Lch	Square feet	rectang/pline	Or rectand/pline or square feet	NA/PR3/PR2/PR1	
	Paint	Pnt	Square feet	rectang/pline	Or rectand/pline or square feet	NA/PR3/PR2/PR1	
TerraCotta_Spall	Rust	Rst	Square feet	rectang/pline	Or rectand/pline or square feet	NA/PR3/PR2/PR1	
	Bonded	B	Square inches	-	Square inches	NA/PR3/PR2/PR1	
	Incipient	I	Square inches	-	Square inches	NA/PR3/PR2/PR1	
	Missing	M	Square inches	-	Square inches	NA/PR3/PR2/PR1	
	Missing+Steel	MS	Square inches	-	Square inches	NA/PR3/PR2/PR1	

Figura 2.3-42 Esquema de condiciones en la biblioteca estándar básica de TPAS. 4 de 5.



CONDITION	OPTIONS CONDITION	CODE CONDITION	UNIT	DRAWING	NEEDED DATA	SEVERITY	
TerraCotta_SurfLoss	Hazardous	Haz	Square inches	-	Square inches	NA/PR3/PR2/PR1	
	Chipped	Chp	Square feet	rectang/pline	Or rectand/pline or square feet/ Depth in 1/8" increments	NA/PR3/PR2/PR1	
	Glaze loss	Glz	Square feet	rectang/pline	Or rectand/pline or square feet/ Depth in 1/8" increments	NA/PR3/PR2/PR1	
	TerraCotta_Unsecured	Hazardous	Haz	Square feet	rectang/pline	Or rectand/pline or square feet	NA/PR3/PR2/PR1
		Hollow	H	Square feet	rectang/pline	Or rectand/pline or square feet	NA/PR3/PR2/PR1
Loose		L	Square feet	rectang/pline	Or rectand/pline or square feet	NA/PR3/PR2/PR1	
TerraCotta_Unsecured	Missing	M	Square feet	rectang/pline	Or rectand/pline or square feet	NA/PR3/PR2/PR1	
	Removed	R	Square feet	rectang/pline	Or rectand/pline or square feet	NA/PR3/PR2/PR1	
Wood_BioGrowth	Fungus	Fng	Square feet	rectang/pline	Or rectand/pline or square feet	NA/PR3/PR2/PR1	
	Lower plants	PlntLo	Square feet	rectang/pline	Or rectand/pline or square feet	NA/PR3/PR2/PR1	
	Higher plants	PlntHi	Square feet	rectang/pline	Or rectand/pline or square feet	NA/PR3/PR2/PR1	
Wood_Coating	Coating Sound	Ct	Square feet	rectang/pline	Or rectand/pline or square feet	NA/PR3/PR2/PR1	
	Coating Failed	CtF	Square feet	rectang/pline	Or rectand/pline or square feet	NA/PR3/PR2/PR1	
Wood_Crack	Crack	C	Length in feet	pline	Or pline or feet / Crack width in 1/16" increments	NA/PR3/PR2/PR1	
	Checking	Chk	Length in feet	pline	Or pline or feet / Crack width in 1/16" increments	NA/PR3/PR2/PR1	
Wood_Damage_Infested	Insect	Ins	Square feet	rectang/pline	Or rectand/pline or square feet	NA/PR3/PR2/PR1	
	Mammal	Mam	Square feet	rectang/pline	Or rectand/pline or square feet	NA/PR3/PR2/PR1	
Wood_Deteriorated	Abraded	Abr	Square feet	rectang/pline	Or rectand/pline or square feet + Depth in 1/8" increments	NA/PR3/PR2/PR1	
	Weathered	Wthr	Square feet	rectang/pline	Or rectand/pline or square feet + Depth in 1/8" increments	NA/PR3/PR2/PR1	
	Rotten	Rot	Square feet	rectang/pline	Or rectand/pline or square feet + Depth in 1/8" increments	NA/PR3/PR2/PR1	
Wood_Joints	Sealant Failed	SIntF	Length in feet	pline	Or pline or feet	NA/PR3/PR2/PR1	
Wood_Note	Misc condition	-	-	-	Type note text	NA/PR3/PR2/PR1	
	Joint condition	Joint	-	-	-	NA/PR3/PR2/PR1	
	Condition at return	Return	-	-	-	NA/PR3/PR2/PR1	
	Misc photo	Photo	-	-	-	NA/PR3/PR2/PR1	
Wood_Repair	Dutchman Sound	D	Square inches	-	Square inches	NA/PR3/PR2/PR1	
	Dutchman Failed	DF	Square inches	-	Square inches	NA/PR3/PR2/PR1	
	Dutchman Removed	DR	Square inches	-	Square inches	NA/PR3/PR2/PR1	
	Patch Sound	P	Square inches	-	Square inches	NA/PR3/PR2/PR1	
	Patch Failed	PF	Square inches	-	Square inches	NA/PR3/PR2/PR1	
	Patch Removed	PR	Square inches	-	Square inches	NA/PR3/PR2/PR1	
	Replacement	Rpl	Square inches	rectang/pline	Or rectand/pline or Square inches	NA/PR3/PR2/PR1	
	Wood_SoilStain	Bituminous	Bit	Square feet	rectang/pline	Or rectand/pline or square feet	NA/PR3/PR2/PR1
Cementitious		Cem	Square feet	rectang/pline	Or rectand/pline or square feet	NA/PR3/PR2/PR1	
Guano		Gua	Square feet	rectang/pline	Or rectand/pline or square feet	NA/PR3/PR2/PR1	
Paint		Pnt	Square feet	rectang/pline	Or rectand/pline or square feet	NA/PR3/PR2/PR1	
Wood_Unsecured	Rust	Rst	Square feet	rectang/pline	Or rectand/pline or square feet	NA/PR3/PR2/PR1	
	Fastener failedHazardous	FstF	Count	-	Displacement in 1/8" increments	NA/PR3/PR2/PR1	
	Hollow	H	Square feet	rectang/pline	Or rectand/pline or square feet	NA/PR3/PR2/PR1	
	Loose	L	Square feet	rectang/pline	Or rectand/pline or square feet	NA/PR3/PR2/PR1	
	Missing	M	Square feet	rectang/pline	Or rectand/pline or square feet	NA/PR3/PR2/PR1	
Removed	R	Square feet	rectang/pline	Or rectand/pline or square feet	NA/PR3/PR2/PR1		

Figura 2.3-43 Esquema de condiciones en la biblioteca estándar básica de TPAS. 5 de 5.

Cada uno de las condiciones de la librería se materializa en un BAT, que es un bloque representado por un símbolo gráfico que identifica la localización de una lesión o condición en los planos de la investigación. TPAS establece cuatro tipos de símbolos: punto, polilíneas, cajas y etiquetas. Los puntos identifican la localización de una condición puntual, como por ejemplo un taco metálico embebido en un muro o un tirante suelto en un ornamento de chapa de cobre. Las polilíneas identifican generalmente fisuras y grietas. Las cajas marcan la situación de condiciones que afectan a áreas en lugar de localizaciones puntuales, como por ejemplo una zona de eflorescencias

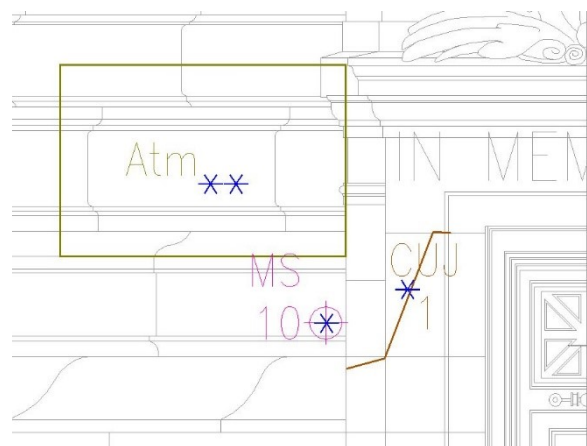


Figura 2.3-44 La caja indica área, el punto condición puntual (en este caso un faltante de piedra de 10 pulgadas cuadradas – 64 cm<sup>2</sup> –) y la polilínea indica grieta, en este caso por unidades y juntas, de 1/8 de espesor. Los asteriscos son archivos asociados a las notas.

o pintada de otro color. Las etiquetas son notas digitales, por ejemplo, la etiqueta “posterior” para expresar que la condición se sitúa en la parte posterior de un antepecho (Figura 2.3-44).

Una vez se arrastra el BAT a su localización, aparece una ventana emergente en la que el usuario debe elegir entre las diferentes posibilidades variables de dicha lesión/condición y la prioridad de la misma (Figura 2.3-37). Una vez escogidas las dos opciones, se cierra dicha ventana y aparece otra denominada “Editar Atributos” en la que el usuario debe rellenar campos variables. Si la condición se ha localizado por medio de polilíneas o cajas, la dimensión aparecerá automáticamente en el campo correspondiente. Dependiendo del tipo de lesión habrá que introducir la información de campos como “espesor” en grietas o “% de faltante” en fallo de juntas. TPAS sigue un ordenamiento jerárquico de cada BAT: material, tipo de condición, prioridad, severidad, cantidad, nombre de archivos vinculados y notas.

Los datos tomados con TPAS son exportables a otras aplicaciones como Excel, bases de datos o software de estimación de costes, entre otros a través de la herramienta de AutoCAD “Extracción de atributos”.

La representación gráfica y cuantitativa de las condiciones existentes en un edificio a través de TPAS permite el análisis efectivo de esos datos por un profesional experimentado, de una manera visual y directa, facilitando la interpretación y el diagnóstico de patrones de fallo y relaciones entre lesiones, además de poder controlar la evolución de las mismas en el tiempo. Además, los datos numéricos de los fallos localizados, tales como grosor y longitud de grietas son también documentados a través de los atributos de los bloques. El programa proporciona una mayor automatización del proceso calculando las cantidades asociadas a los bloques insertados.

La novedad más destacable de este método consiste en su portal online (TPAS Web Portal), una aplicación que utiliza la información situada en una nube digital, que permite el análisis interactivo en directo o en diferido de las condiciones existentes a través de datos numéricos y visuales. El portal sirve de soporte de información al que cualquier miembro del equipo puede acceder remotamente desde cualquier dispositivo con internet y compartir datos evitando el envío de archivos, duplicación de información, incluso necesidad de encuentros presenciales, etc. Además, no requiere disponer del software AutoCAD. Con esta función, por ejemplo, si un arquitecto quiere explicar a su cliente el estado de su edificio entra



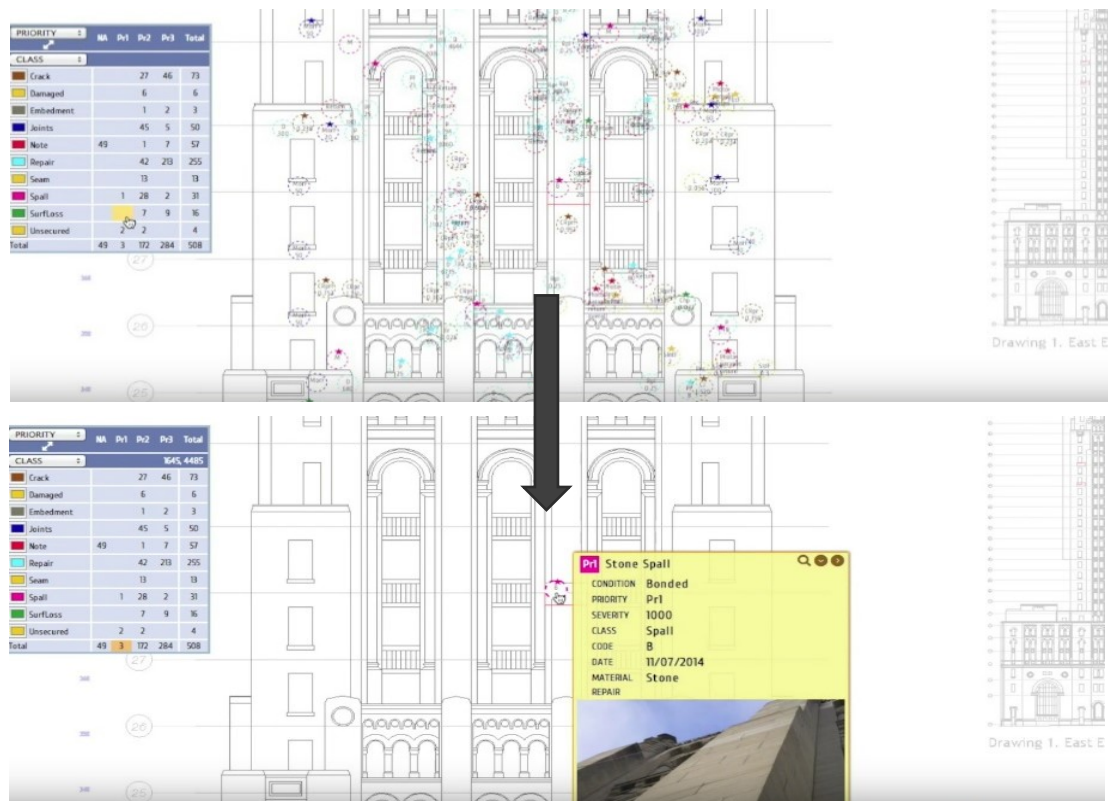


Figura 2.3-45 Captura de pantalla del TPAS Web portal, al que se puede acceder desde cualquier dispositivo con internet sin necesidad de tener instalado ningún programa gráfico. Al clicar sobre cualquier nota, se abre una ventana con sus atributos, incluidos documentos gráficos relacionados.

en una web donde se visualiza el plano del mismo que muestra las lesiones/el estado actual gráfica y cuantitativamente; clicando sobre las ellas se visualizan fotografías, vídeos, y otros resultados de END. Su uso es extremadamente sencillo e intuitivo y cuenta con un sistema de filtrado de variables que permiten personalizar la información requerida y generar informes a partir de ésta o extraer esos datos a otras aplicaciones.

Un informe TPAS posibilita la redacción del proyecto acorde a la realidad precisa del edificio, lo que implica la disminución drástica de desvíos económicos durante la ejecución.

## 2.3.4.4. REPRESENTACIÓN DE RESULTADOS

Existen tres formas de presentación de la información recopilada in situ:

1. En soporte digital. Una de las principales ventajas de utilizar un informe TPAS estriba en la posibilidad de observar las condiciones existentes del

edificio representadas en los planos o sobre ortofotografías, con la posibilidad de clicar sobre los hipervínculos con el fin de abrir los archivos aparejados a dichas lesiones. Existen otras ventajas que hacen más recomendable la utilización del informe digital sobre el de papel. Cada una de las lesiones tiene más información recopilada de la que se muestra en el

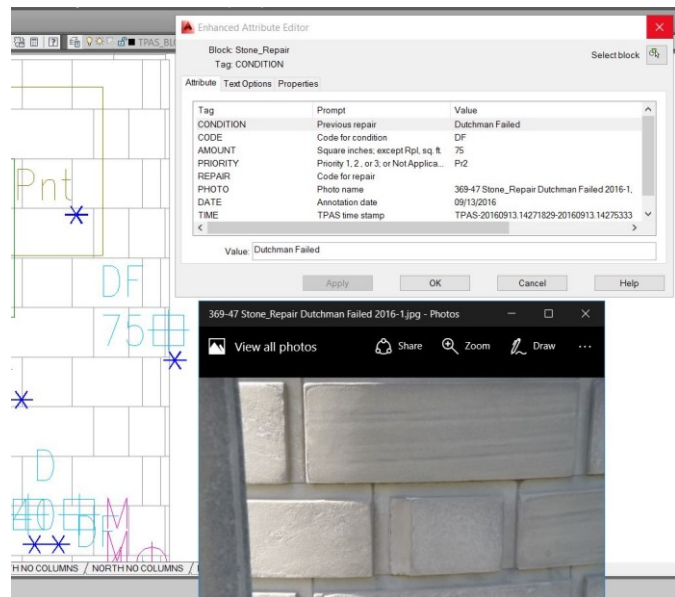


Figura 2.3-46 Captura de pantalla de informe en soporte digital. Con un click sobre el icono de la condición, se accede a la descripción de atributos y a la(s) imagen(es) de la misma.

plano; para visualizarla basta con hacer doble clic sobre la anotación para abrir una ventana que muestra dichos atributos (Figura 2.3-46). Además, es muy común que la densidad de anotaciones sea tal, que sea necesario apagar varias capas para analizar diferentes grupos de lesiones por separado (Figura 2.3-47). Otra ventaja es la posibilidad de extraer datos en formato Excel para disponer de mediciones totales o parciales de lesiones. Es por esto que la utilización del informe digital es el más recomendado.

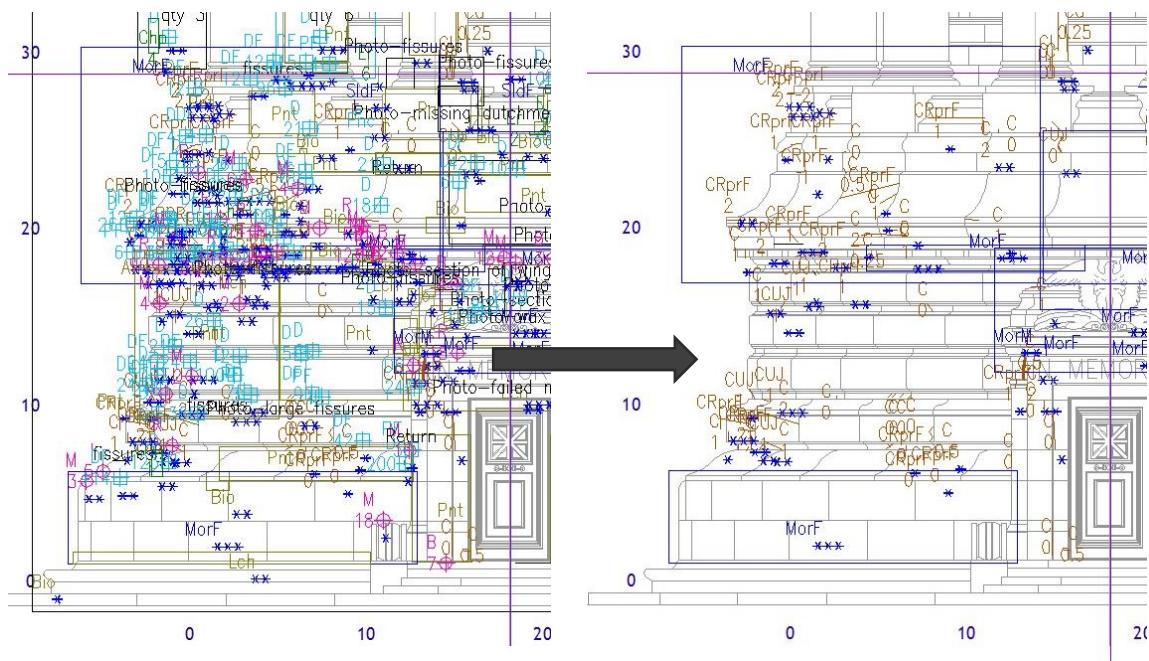


Figura 2.3-47 TPAS sitúa a cada grupo de condiciones en una capa independiente de forma que es posible dejar visibles sólo las capas que interesan para el análisis.

2. En soporte papel. Es la manera menos efectiva de utilizar los informes TPAS debido a la imposibilidad de abrir los hipervínculos y los bloques para visualizar otros datos de la lesión; tampoco es posible apagar capas para visualizar determinados conjuntos de lesiones.

Los informes TPAS preparados por VA se componen, tanto en soporte papel como en soporte digital, de:

- Un apartado de narrativa con las principales características del edificio, su estado y su historia en .pdf.
- Todas las fotografías hipervinculadas al plano de AutoCAD en formato .jpg.
- Plano de AutoCAD en formato .dwg
- Archivo en formato .xlsx de la extracción de datos de los bloques que componen las lesiones.
- Guía a TPAS en .pdf.

En el anexo de esta tesis se incluye un informe TPAS completo.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I
1	Block Name	Condition	X	Y	Code	Severity	Amount	Priority	Photo
23	SheetMetal_Seam	Solder Failed	210	76	SldF		0.1	Pr2	No
24	SheetMetal_Seam	Solder Failed	214	76	SldF		0.1	Pr2	No
25	SheetMetal_Seam	Solder Failed	214	76	SldF		1.0	Pr2	Yes
26	SheetMetal_Seam	Solder Failed	216	30	SldF		2.0	Pr2	Yes
27	SheetMetal_Seam	Solder Failed	220	30	SldF		2.0	Pr2	Yes
28	SheetMetal_Seam	Solder Failed	256	76	SldF		0.7	Pr2	Yes
29	SheetMetal_Seam	Solder Failed	263	86	SldF		typical	Pr2	Yes
30	SheetMetal_SoilStain	Atmospheric	195	86	Atm		17.4	Pr3	Yes
31	SheetMetal_SoilStain	Atmospheric	207	86	Atm		28.7	Pr3	Yes
32	SheetMetal_SoilStain	Atmospheric	208	77	Atm		31.2	Pr3	Yes
33	SheetMetal_SoilStain	Rust	192	89	Rst		5.0	Pr3	Yes
34	SheetMetal_Unsecured	Loose	194	76	L		8.5	Pr2	Yes
35	Stone_Crack	Repair failed	179	12	CRprF	1	1.4	Pr2	Yes
36	Stone_Crack	Repair failed	179	25	CRprF	2	15.0	Pr2	Yes
37	Stone_Crack	Repair failed	180	12	CRprF	2	0.3	Pr2	Yes
38	Stone_Crack	Repair failed	180	12	CRprF	1	0.8	Pr2	No
39	Stone_Crack	Repair failed	181	75	CRprF	1	2.0	Pr2	Yes

Figura 2.3-48 Ejemplo de extracción de datos de condiciones del Proyecto mostrado en la Figura 2.3-47.

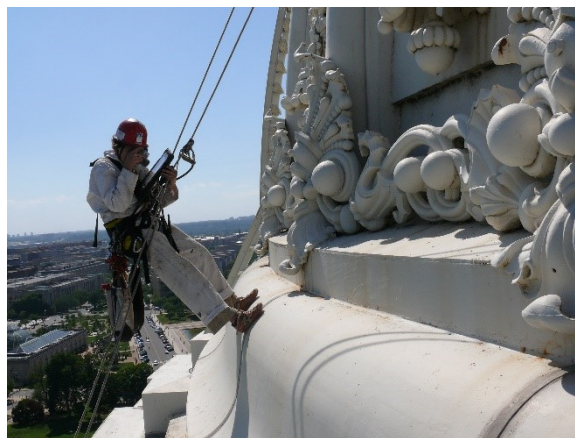
3. Online mediante TPAS Portal. Se trata de una opción similar a la presentación en soporte digital pero no requiere disponer de AutoCAD, lo cual puede facilitar su utilización a muchos usuarios. Sin embargo, los usuarios de AutoCAD gozan de menos libertad en este soporte dado que el portal no dispone de todas las capacidades de AutoCAD. La manera de

visualizar resultados utilizando el portal digital está explicado en el apartado 2.3.4.3.

## 2.3.4.5. INSTRUMENTACIÓN

---

El kit básico de TPAS se compone de una tableta digital robusta (para su uso en obra) con los softwares AutoCAD y TPAS. La tableta puede disponer de cámara integrada o no, en cuyo caso se necesitará una cámara de fotos digital. Si además de fotografías y videos, el proyecto incluye vincular otro tipo de archivos al plano, pueden ser necesarios otros dispositivos como termocámaras, kits de GPR, etc.



*Figura 2.3-49 Kelly Streeter, desarrolladora de TPAS, aplicando la tecnología TPAS en una inspección en el Capitolio en Washington. El equipo básico, mostrado en la imagen, se compone de una tableta digital robusta con TPAS y AutoCAD y una cámara de fotos (E. Kopelson).*

## 2.3.4.6. APLICACIONES EN PATRIMONIO CONSTRUIDO

---

- Documentación de condiciones existentes de un edificio de una manera ordenada, eficiente y funcional.
- Almacenado de la información gráfica y numérica, así como archivos asociados a cada condición concerniente al estado de un edificio. Posibilidad de compartir los datos con equipos multidisciplinares.
- Búsqueda y análisis de patrones de lesiones.
- Plataforma para el monitoreo de la evolución de lesiones en el tiempo.
- Herramienta de documentación y consulta de reparaciones e intervenciones.
- Base de datos del estado del edificio en el tiempo.



## 2.3.4.7. VENTAJAS Y LIMITACIONES

---

### VENTAJAS

- TPAS facilita y agiliza la toma de datos in situ.
- Aumenta la calidad y sofisticación de los datos registrados.
- Minimiza el tiempo de post-procesado de la información.
- La existencia de librerías predeterminadas facilita la estandarización de la nomenclatura y el registro de lesiones en el campo de la conservación del patrimonio arquitectónico<sup>9</sup>. Esto facilita la investigación por diferentes técnicos al asegurar la homogeneidad en cuanto a nomenclatura, valoración de grados de deterioro, etc.
- Elimina errores de transcripción e interpretación.
- TPAS produce informes más completos, versátiles, de mejor calidad que los métodos de documentación *in situ* tradicionales. Maximiza la utilidad del producto final.
- En un plano realizado con TPAS se pueden extraer los datos numéricos a formatos .xlsx agilizando el proceso de mediciones.
- Hipervinculado de los archivos relacionados con las lesiones (fotografías, videos, ficheros de END, etc.) in situ, eliminando el tedioso proceso de vincular dichos archivos en el post-procesado, lo cual a su vez elimina los errores de transcripción e interpretación.
- Como plano base pueden utilizarse ortofotografías o archivos .pdf insertándolos en AutoCAD como imágenes y escalándolas.
- No requiere contacto con el elemento a investigar, lo que permite aplicar la técnica en todos los casos independientemente del estado de deterioro.

---

<sup>9</sup> Un ejemplo de la estandarización de la nomenclatura de lesiones lo constituye el glosario de faltas y deficiencias en hormigón establecido por el American Concrete Institute (American Concrete Institute, 1994).



## LIMITACIONES

- Para trabajar con un proyecto de TPAS en toda su capacidad, es necesario disponer del software AutoCAD y TPAS.
- Es necesario disponer de conocimientos de AutoCAD al menos al nivel de usuario. Además, para su óptima utilización, se requiere de una formación mínima y un periodo de aprendizaje.
- El coste de todo el equipo incluyendo el software es elevado, en torno a \$7.000.
- Es necesario disponer de tabletas digitales robustas, ya que, en aplicaciones de campo, se dañan con facilidad. Otra opción es disponer de seguros que cubran el equipo frente a daños.
- La visibilidad de la pantalla en ambientes soleados o muy luminosos puede ser limitada dependiendo del modelo de la tableta, dificultando y ralentizando la toma de datos. Algunos de los últimos modelos de tabletas digitales dan mejores resultados frente a este inconveniente; la opción de aumentar el brillo al máximo del aparato acorta considerablemente la duración de la batería.
- La duración de la batería de la tableta digital sigue siendo un problema *in situ*, ya que normalmente dura alrededor de tres horas.
- A mayor calidad y precisión de los planos de base, mejor y más precisa serán los datos recopilados con TPAS para su posterior análisis. Esto implica que, si los planos no son precisos, el resultado final no será óptimo.

## 2.4. MÉTODOS BASADOS EN LA PROPAGACIÓN DE ONDAS ELECTROMAGNÉTICAS

### CARACTERÍSTICAS DE LAS ONDAS ELECTROMAGNÉTICAS

La radiación electromagnética (EMR) puede ser estudiada por su interacción con la materia y consta de componentes eléctricos y magnéticos. La EMR es afectada por las propiedades eléctricas y magnéticas de la materia con la que entra en contacto.

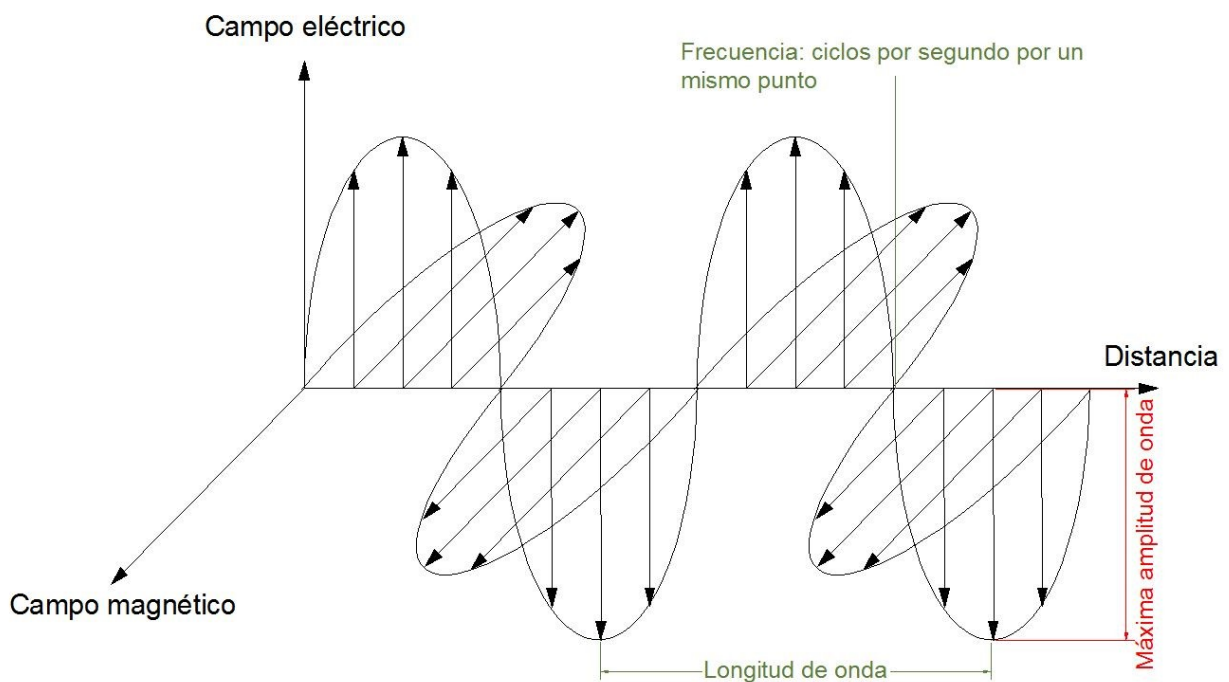


Figura 2.4-1 Representación de una onda electromagnética.

La Figura 2.4-1 es la representación de una onda electromagnética. Los campos eléctrico y electromagnético viajan siempre perpendiculares entre sí y a su vez perpendiculares a la dirección de propagación de la onda.

La longitud de onda ( $\lambda$ ) es la distancia de una cresta de la onda a la siguiente. El número de longitudes de onda que pasan por un determinado tiempo en un segundo se denomina frecuencia ( $f$ ); cada longitud de onda representa un ciclo

completo de la onda, por lo que la frecuencia se expresa en ciclos por segundo o Hertzios (Hz).

La amplitud de onda es la magnitud de la máxima perturbación que produce la onda en el medio que atraviesa. La polarización es la orientación de la onda, el plano por el cual viaja. En la EMR generada naturalmente, las ondas son de polarización aleatoria. Es posible utilizar filtros con el fin de seleccionar aquellas ondas con una orientación determinada. Sin embargo, las ondas provenientes de EMR generada artificialmente como la de los sistemas radar, se producen ondas con polarización vertical y horizontal con respecto a la superficie. Algunas sustancias, tales como el bióxido de magnesio tienen la capacidad de despolarizar las ondas electromagnéticas (Vallejo & et Al., 2001)

Los parámetros electromagnéticos que definen a un medio en relación con la onda electromagnética que les atraviesa son: conductividad, permitividad y permeabilidad magnética.

### CONDUCTIVIDAD

La conductividad eléctrica de un medio es la medida de la respuesta de sus cargas libres en presencia de un campo eléctrico externo, es decir, de la capacidad de un material para dejar circular la corriente eléctrica, y depende de la estructura atómica y molecular del material. La conductividad es la inversa de la resistividad (Ecuación 2.4-1); la magnitud de la conductividad es la proporcionalidad entre el campo eléctrico  $E$  y la densidad de corriente de conducción debido al movimiento de las cargas libres.

*Ecuación 2.4-1*

$$\sigma = 1/\rho$$

*Ecuación 2.4-2*

$$J = \sigma E$$

Siendo:

$\sigma$ , conductividad del material en  $(\Omega m)^{-1}$  o Siemens/m

$\rho$ , resistividad, en  $\Omega m$

$E$ , campo eléctrico externo aplicado

$J$ , densidad de corriente de conducción

En función de su conductividad, los materiales se clasifican como (Figura 2.4-2):

- Conductores, si su conductividad es superior a  $10^5$  S/m
- Aislantes, si su conductividad es inferior a  $10^{-8}$  S/m
- Semiconductores, si su conductividad está comprendida entre  $10^5$  y  $10^{-8}$  S/m

Para aplicaciones en materiales históricos, cabe destacar que el agua alojada en los poros constituye un factor que altera su conductividad. A iguales condiciones, a mayor contenido de agua, mayor será la conductividad del material.

	Material	Conductividad eléctrica ( $\sigma$ ) Valores medios a 20°C
CONDUCTORES	Plata*	$9,6 \times 10^7$
	Cobre	$6,3 \times 10^7$
	Oro	$4,55 \times 10^7$
	Aluminio	$3,78 \times 10^7$
	Hierro	$1,53 \times 10^7$
SEMICONDUCTORES	Agua marina	5
	Agua potable	0,005
	Carbono	$2,8 \times 10^4$
	Silicio	$1,6 \times 10^5$
AISLANTES	Vidrio	$10^{-12}$
	Mica	$10^{-13}$
	Cuarzo	$1,33 \times 10^{-18}$

\*Conductividad más alta en metales

Figura 2.4-2 Valores de conductividad (S/m) para algunos materiales

## PERMITIVIDAD Y CONSTANTE DIELECTRICA

La permitividad es una constante física de proporcionalidad entre la intensidad de un campo eléctrico externo aplicado ( $\vec{E}$ ) y el vector de desplazamiento eléctrico ( $\vec{D}$ ) (Pellicer Llopis, 2012). La permitividad expresa cómo un campo eléctrico afecta y es afectado por un medio; está determinada por la tendencia de un material a polarizarse ante la aplicación de un campo eléctrico y de esa manera anular parcialmente el campo eléctrico interno del material.

El campo de desplazamiento eléctrico  $\vec{D}$  equivale al campo eléctrico  $\vec{E}$  multiplicado por la permitividad eléctrica del medio  $\epsilon$  (Ecuación 2.4-3).

Ecuación 2.4-3

$$\vec{D} = \epsilon \vec{E}$$

Siendo:

D, campo de desplazamiento eléctrico, en culombios por metro cuadrado (C/m<sup>2</sup>) en el S.I.

$\epsilon$ , permitividad absoluta, en faradios por metro (F/m) en el S.I. Es un escalar si el medio es isótropo o un tensor de segundo orden en el resto de casos.

E, campo eléctrico, en voltios por metro (V/M) en el S.I.

La permitividad absoluta,  $\epsilon$ , es el producto entre la permitividad relativa del material,  $\epsilon_r$ , y la permitividad del vacío,  $\epsilon_0$  ( $8,854 \times 10^{-12}$  F/m) (Ecuación 2.4-4). La permitividad relativa de un material,  $\epsilon_r$  se denomina constante dieléctrica del medio.

Ecuación 2.4-4

$$\epsilon = \epsilon_0 \epsilon_r$$

Así pues, la constante dieléctrica es adimensional y expresa la capacidad de polarización de un material en presencia de un campo eléctrico. La mayor parte de los valores que se utilizan en el campo de la conservación arquitectónica oscilan entre 1, valor del aire y 81, valor del agua a 20 °C.

Para frecuencias entre MHz y GHz aplicados a la mayor parte de materiales del subsuelo y materiales de construcción, los fenómenos de desplazamiento (o polarización) dominan sobre los fenómenos de conductividad, motivo por el cual los medios suelen caracterizarse por la  $\epsilon_r$  a la frecuencia que corresponda (Abad, 2009).

MATERIAL	CONSTANTE DIELÉCTRICA $\epsilon_r$ (adimensional)
Aire	1.00059
Agua potable	80.5
Arcilla	5 - 40
Arena seca	3 - 5
Arena saturada	20 - 30
Granito	4 - 8
Hielo	3 - 4
PVC	30 - 40

Figura 2.4-3 Valores de la constante dieléctrica para algunos materiales.

## PERMEABILIDAD MAGNÉTICA

La permeabilidad magnética en física ( $\mu$ ), es la capacidad de una sustancia o medio para atraer y hacer pasar a través suyo campos magnéticos; relaciona la inducción magnética existente, B, y la intensidad de campo magnético, H, que aparece en dicho material (Ecuación 2.4-5).

Ecuación 2.4-5

$$\mu = \frac{B}{H}$$

Siendo,

$\mu$ , permeabilidad absoluta, en Henrios/m (H/m) o Weber/(Amperios . metro), (W/(Am))

H, intensidad de campo magnético o excitación, en Tesla (A/m) en el S.I.

B, inducción magnética o densidad de flujo magnético, en Tesla (T) o Weber/m<sup>2</sup> en el S.I.



La permeabilidad del vacío, o constante magnética,  $\mu_0$ , en unidades del S.I.:

$$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ NA}^{-2}$$

Para calcular la permeabilidad magnética relativa de un material,  $\mu_r$ , se utiliza la siguiente relación:

*Ecuación 2.4-6*

$$\mu = \mu_0 \mu_r$$

Atendiendo a su permeabilidad magnética relativa, los materiales se pueden clasificar en:

- Ferromagnéticos, su permeabilidad magnética relativa es superior a 1. Son materiales que atraen el campo magnético hacia su interior, es decir, se adhieren a los imanes. El hierro es un material ferromagnético.
- Paramagnéticos, o no magnéticos; su permeabilidad magnética relativa es aproximadamente 1, se comportan como el vacío, es decir, su relación frente a los campos magnéticos es poco apreciable. La mayoría de los materiales en la naturaleza y en el campo de la conservación del patrimonio arquitectónico pertenecen a esta categoría. La mica es un ejemplo de material paramagnético.
- Diamagnéticos, su permeabilidad magnética relativa es inferior a 1, repelen el campo magnético, obligado a éste a pasar por el exterior del material en una intensidad más débil que en los materiales ferromagnéticos. El cobre es un material diamagnético.

En la mayor parte de los materiales en los estudios de GPR (excepto los ferromagnéticos) la permeabilidad magnética es próxima a la unidad, es decir, no dependen de la frecuencia del campo magnético.

DIAMAGNETICAS	PARAMAGNETICAS	FERROMAGNETICAS
Cobre (Cu)	Platino (Pt)	Hierro puro (Fe)
Plata (Hg)	Aluminio (Al)	Hierro fundido (Fe)
Agua (H2O)	Aire	
Plomo (Pb)	Titanio (Ti)	
Estaño (Sn)		
Cinc (Zn)		

*Figura 2.4-4 Clasificación de algunos materiales en función de su permeabilidad magnética.*

## PROPAGACIÓN DE LAS ONDAS ELECTROMAGNÉTICAS

REFLEXIÓN Y REFRACCIÓN

Cuando una onda electromagnética que viaja por un material, alcanza una interfase con propiedades electromagnéticas diferentes, parte de la onda experimenta reflexión y otra parte experimenta refracción (Figura 2.4-5). Si la interfase es plana, el ángulo de reflexión y el de incidencia son iguales. La ley de Snell relaciona los ángulos de incidencia, reflexión y refracción con la velocidad de propagación de la onda en ambos medios.

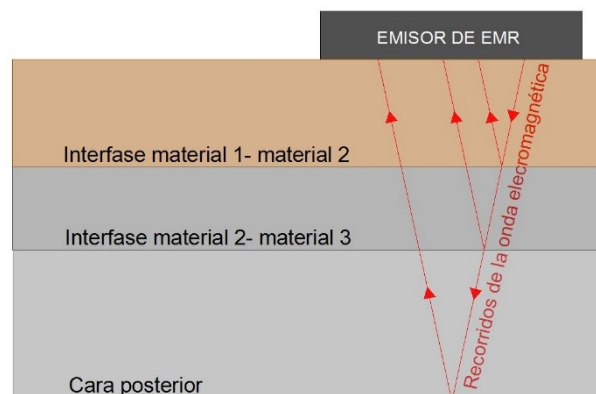


Figura 2.4-5 Recorrido de las ondas electromagnéticas. Reflexión y refracción.

En la mayoría de las investigaciones en el campo de la conservación arquitectónica con GPR, la incidencia de la onda respecto a la superficie puede considerarse normal y si además el material es no magnético, el coeficiente de reflexión se calcula utilizando la siguiente fórmula simplificada:

Ecuación 2.4-7

$$R = \frac{\sqrt{\epsilon_{r1}} - \sqrt{\epsilon_{r2}}}{\sqrt{\epsilon_{r1}} + \sqrt{\epsilon_{r2}}}$$

Siendo:

R, coeficiente de reflexión, es decir, energía reflejada respecto de la energía incidente. Adimensional.

$\epsilon_{r1}$ , constante dieléctrica del medio 1. Adimensional.

$\epsilon_{r2}$ , constante dieléctrica del medio 2. Adimensional.

La impedancia de un campo electromagnético es el cociente entre el campo eléctrico y el campo magnético. Por tanto, la impedancia del campo electromagnético incidente, coincide con la del campo magnético reflejado y con la del refractado. El porcentaje de energía reflejada depende del contraste existente

entre los parámetros electromagnéticos de los diferentes medios, es decir del contraste de impedancias.

De la ecuación Ecuación 2.4-7 se deduce que el coeficiente de reflexión, R, será mayor cuanto mayor sea la diferencia entre las constantes dieléctricas de los medios que forman la interfase, por consiguiente, menor será la energía que atravesará la interfase. Es decir, el porcentaje de energía reflejada depende del contraste existente entre los parámetros electromagnéticos de los diferentes medios (contraste de impedancias). Este principio implica que, a mayor valor de R, la técnica de GPR captaría con claridad esa interfase, sin embargo, debido a que gran parte de la onda es reflejada, la penetración de la técnica disminuye y será más complicado registrar interfases más profundas dado que el porcentaje de energía reflejada es menor. Es decir, el porcentaje de energía refractada es menor, lo que contribuye a que la amplitud de onda en posteriores reflexiones también sea menor.

#### VELOCIDAD DE PROPAGACIÓN DE LA ONDA ELECTROMAGNÉTICA

Los principales parámetros que influyen en la velocidad de propagación de la onda electromagnética son: la permeabilidad magnética del medio ( $\mu_r$ ), la constante dieléctrica del medio ( $\epsilon_r$ ), la conductividad del medio ( $\sigma$ ), y la frecuencia de emisión. Salvo la frecuencia de emisión, controlable y que depende del aparato empleado, los demás parámetros son intrínsecos al medio por el que la onda viaja.

La velocidad de propagación de una onda electromagnética a través de un medio no magnético de baja conductividad se calcula con la siguiente fórmula:

*Ecuación 2.4-8*

$$V = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \epsilon_r \mu_0}} = \frac{c}{\sqrt{C}}$$

Siendo:

c, la velocidad de una onda electromagnética en el vacío, 30 cm/ns.

$\epsilon_r$ , constante dieléctrica del medio. Adimensional.

$\epsilon_0$ , constante dieléctrica del vacío. Adimensional.

$\mu_0$ , permeabilidad del vacío,  $4\pi \cdot 10^{-7} \text{NA}^{-2}$

ATENUACIÓN DE LA ONDA ELECTROMAGNÉTICA

La atenuación de la onda electromagnética en función del medio por el que se propaga ha sido estudiada teóricamente por Carcione (Carcione, 1996), Zonghou y Tripp (Tripp & Zonghou, 1997) y a partir de simulaciones numéricas por Casper y Kung (Casper & Kung, 1996) y Xu y McMechan (McMechan & Xu, 1997).

El grado de atenuación de una onda electromagnética se define como el cociente entre las amplitudes de las oscilaciones de la onda en dos puntos separados por una distancia  $r$  (Ecuación 2.4-9).

*Ecuación 2.4-9*

$$\frac{\vec{E}_0}{\vec{E}(\vec{r})} = e^{a\vec{r}}$$

Si se toman logaritmos decimales, se obtiene un parámetro del grado de atenuación en decibelios que permite obtener el grado de decaimiento de la amplitud de la onda en su propagación por el medio.

Así pues, en su viaje a través del medio, la onda electromagnética pierde energía, disminuyendo de este modo la amplitud. Este factor determina la profundidad de estudio. La energía que capta la antenna receptora es menor que la energía emitida debido a: dispersión geométrica del frente de ondas, dispersión de la energía en elementos del tamaño de la longitud de onda, la absorción de energía y las pérdidas debidas a la reflexión y la refracción en cada interfase electromagnética que atraviese la onda.

El haz de ondas con GPR tiene forma cónica y sección elíptica. Si se considera el medio homogéneo y no absorbente y el dipolo emisor como puntual, la energía es inversamente proporcional al cuadrado de la distancia recorrida.

La absorción en la propagación de la onda se produce cuando parte de la energía electromagnética se convierte en calor (Reinolds, 1997). Este fenómeno está relacionado con la cantidad de agua que contiene el medio; a mayor contenido de agua, mayor es la atenuación de la onda, especialmente para frecuencias altas. La atenuación como resultado de la absorción de energía por el medio es consecuencia de las características electromagnéticas del medio. A su vez, el factor de pérdidas (P) depende de las características electromagnéticas del medio (permitividad dieléctrica  $\epsilon$ , conductividad  $\sigma$  y permeabilidad magnética  $\mu$ ) y de la pulsación de la onda emitida ( $\omega$ ). El factor de pérdidas (P) se define como el cociente entre la

conductividad y el producto de la pulsación por la permitividad dieléctrica del medio (Ecuación 2.4-10).

Ecuación 2.4-10

$$P = \frac{\sigma}{W\varepsilon}$$

Siendo:

P, el factor pérdidas en Siemens/(Hertzio x Faradio), S/HF .

$\sigma$ , conductividad del material en  $(\Omega\text{m})^{-1}$  o Siemens/m

W, pulsación de la onda =  $2\pi f$ , en Hertzios (Hz)

$\varepsilon$ , permitividad del medio en Faradios por metro (F/m)

El fenómeno de dispersión de energía o *scattering* se produce cuando la energía electromagnética incide en objetos cuya dimensión es menor a la longitud de la onda incidente, resultando en una disminución de la amplitud de onda y generación de ruido. En la aplicación al patrimonio arquitectónico, este efecto es más evidente a mayores frecuencias (longitudes de onda alrededor de 1 cm). Un ejemplo es el ruido que aparece en los radargrama en estudios de ciertos hormigones.



## 2.4.1. TERMOGRAFÍA INFRARROJA (IRT)

---

*La termografía infrarroja es una técnica instrumental que convierte una determinada distribución espacial de radiación térmica, esto es, una señal en la banda infrarroja del espectro electromagnético, invisible para el ojo humano, en señales eléctricas computerizables (“píxeles”), generando una imagen visible.*

---

Cusidó, Devant y Riba (Cusidó, Devant, & Riba, 1996)

### 2.4.1.1. INTRODUCCIÓN

---

Todos los objetos absorben y emiten energía con determinada longitud de onda. Cualquier objeto cuya temperatura sea superior al cero absoluto<sup>10</sup> emite radiación infrarroja que es directamente proporcional a su temperatura (Vanzetti, 1972). La energía térmica emitida por materiales con temperaturas superiores a 238° F es visible, motivo por el que el sol parece amarillo. Por debajo de esa temperatura, la longitud de onda de la energía térmica es invisible para el ojo humano y solo puede ser percibido como calor. La termografía infrarroja consiste en medir la longitud de onda de las ondas electromagnéticas del espectro de los infrarrojos para generar un mapa de temperaturas (Hum-Hartley, 1978)

Para generar la imagen, intervienen dos parámetros: temperatura y emisividad. Con el fin de realizar medidas cuantitativas de uno de esos parámetros es necesario conocer previamente el valor del otro.

La técnica de la termografía infrarroja (*IRT*) ofrece información sobre la temperatura de las capas superficiales del material en estudio.

---

<sup>10</sup> El cero absoluto equivale a -459,67° Fahrenheit = -272,778° Celsius = 0° Kelvin

## 2.4.1.2. ANTECEDENTES HISTÓRICOS

Sir Frederick William Herschel descubrió el espectro infrarrojo en 1800 (de 0,7 a 1000 micras de longitud de onda). Utilizando un prisma y varios termómetros, descubrió que las temperaturas de los diferentes colores de luz transmitidos a través del prisma están proporcionalmente relacionadas. Además, descubrió que el aumento proporcional de temperatura desde el violeta al rojo continuaba más allá del espectro visible.

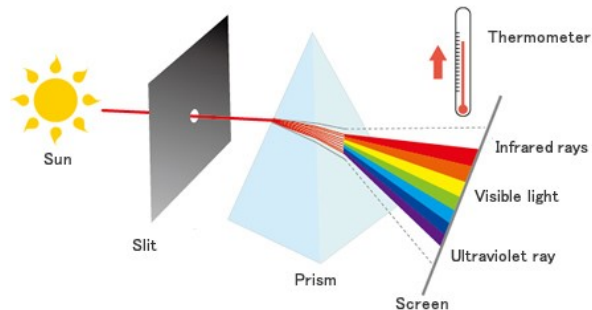


Figura 2.4-6 Representación gráfica del experimento de Herschel con el que descubrió la relación proporcional entre los colores y sus temperaturas y que ésta aumentaba más allá del espectro visible. (Public Domain for Pictures, 2015).

En 1881, Abney y Festing fotografiaron el espectro de absorción de 52 componentes (Abney & Festing, 1881).

Las primeras experiencias tecnológicas con imágenes infrarrojas fueron desarrolladas por el ejército estadounidense en la primera mitad del siglo XX con el objetivo de obtener visión nocturna (Kaplan, 2007, p. 6).

Entre 1940 y 1960 se realizaron escáneres infrarrojos de corta longitud de onda, entre 1 y 3 micras. En 1963, AGA Thermovision presenta un desarrollador de imágenes térmicas instantáneo que pesaba 30 kilos. El aparato requería de sistemas externos de enfriamiento. FLIR introdujo otro tipo de escáner térmico en los 1960s que se amarraba al fuselaje de un avión y podía crear mapas de infrarrojos. En 1989 Mitsubishi presentó su primera cámara térmica, IRFPA.

La IRT ha sido aplicada a la conservación del patrimonio arquitectónico desde finales de 1970 (Kaplan, 2007, p. 6); una de las primeras aplicaciones a la conservación del patrimonio arquitectónico ocurrió en 1977 de la mano de Brice Miller, quien demostró la idoneidad de la técnica para detectar oquedades en paneles de madera pintados. Basándose en el principio de que el coeficiente térmico del aire es menor que el de la madera y la pintura, Miller pudo localizar las oquedades y aproximar su profundidad (Miller, 1977). Ya en la siguiente

década, la tecnología infrarroja era capaz de detectar cambios en la radiación de hasta 0,18 F (Holt & Eckrose, 1989).

En la década de los 1990 se desarrollaron los primeros programas informáticos para procesar datos registrados por sensores térmicos. Y hacia mediados de esa misma década salieron al mercado cámaras infrarrojas de longitudes de onda entre 8 y 14 micras más ligeras, pues ya no requerían de sistemas externos de enfriamiento. Esas cámaras utilizaban detectores microbolométricos y ferroeléctricos no refrigerados para producir imágenes térmicas en tiempo real sin la necesidad de sistemas de escaneo.

La mayor parte de la investigación la han llevado a cabo firmas comerciales privadas como FLIR, Fluke o MUSIS.

En los últimos años la tecnología es más precisa, asequible y manejable; su sensibilidad ha aumentado drásticamente y es una de las TND más utilizada aplicadas a la conservación del patrimonio arquitectónico en los Estados Unidos (Rosina & Spodek, 2003).

### 2.4.1.3. FUNCIONAMIENTO

---

El calor, definido por Herbert Kaplan (Kaplan, 2007), es energía en transición. Cuando la energía térmica es aplicada a un objeto, fluirá de la zona de más caliente a la más fría hasta que el objeto alcance el equilibrio termal. Hay tres mecanismos de transmisión de energía. La conducción es la transferencia de energía en un medio estable, como un sólido, un gas o un líquido, que ocurre debido a la vibración de átomos que transfieren energía de molécula a molécula desde zonas más calientes a zonas más frías. La transmisión por convección se produce en medios fluidos, líquidos o gases. Es el transporte del calor por el medio en movimiento, y necesita que exista un medio material. El tercer medio de transmisión, la radiación, es el más importante para IRT y ocurre debido a la emisión y absorción electromagnética de la energía térmica y puede darse en el vacío. La radiación ocurre en la porción infrarroja del espectro electromagnético.

La energía radiada viaja en forma de energía electromagnética hasta la superficie del objeto, donde es o bien reflejada de o emitida desde la superficie a un objeto más frío. La energía absorbida será transmitida desde la superficie al resto del

cuerpo, asumiendo que la superficie está más caliente que el cuerpo y asumiendo que la ganancia de calor es mayor que el enfriamiento por convención de la superficie. Las características de la superficie del objeto son las que definirán la interacción del calor emitido y la superficie. La diferencia en la velocidad de transmisión en el material, crea diferentes patrones termales en la superficie, que indican la presencia de discontinuidades en el material (huecos y grietas) o cambios en la conductividad térmica del material (causados por cambios de densidad o humedad).

La IRT analiza la radiación electromagnética en el espectro infrarrojo emitida por el propio objeto sometido a estudio. Todos los cuerpos emiten radiación electromagnética en función a la temperatura a la que se encuentren, y se denomina radiación térmica. La radiación total se calcula a través de la ley de Stefan-Boltzmann<sup>11</sup> (Ecuación 2.4-11)

*Ecuación 2.4-11*

$$R_t = \varepsilon\sigma T^4 (Wm^{-2})$$

Siendo:

$\sigma$ , la constante de Stefan-Boltzmann ( $5,67 \cdot 10^{-5} Wm^{-2}K^{-4}$ ) permite a la temperatura (K) convertirse a unidades de intensidad ( $W/m^2$ ), que es la energía por unidad de área.

$\varepsilon$ , la emisividad del material, adimensional.

$Wm^{-2}$ , unidad de flujo, Vatio por metro cuadrado.

K, unidad de temperatura en Kelvin.

Emisividad se define como la propiedad que especifica cuanta radiación infrarroja emite un objeto, comparado con la radiación de un objeto teórico a la misma temperatura llamado “cuerpo negro”. La emisividad de los materiales se mide por medio de una escala relativa de 0-1. Un espejo es el perfecto reflectante, tendría una emisividad cercana a 0 mientras que el cuerpo negro es el perfecto emisor, con una emisividad de 1. La emisividad es importante para registrar medidas de temperatura, pero no afecta a la imagen producida. La emisividad,  $\varepsilon$ , es el cociente

---

<sup>11</sup> El físico esloveno Josef Stefan formuló la constante en 1879, y más tarde fue derivada en 1884 por el físico austriaco Ludwig Boltzmann.

entre la radiación emitida por el cuerpo en cuestión con la que emitiría un cuerpo negro<sup>12</sup> a igual temperatura (Ecuación 2.4-12).

Ecuación 2.4-12

$$\varepsilon = \frac{\text{(radiación emitida)}}{\text{(radiación emitida de ser un cuerpo negro)}}$$

La emisividad depende de la longitud de onda de la radiación y de la temperatura.

La radiación emitida no es constante para todas las longitudes de onda, su distribución espectral cumple la ley de Planck (Cusidó, Devant, & Riba, 1996). Cuando se cumple que la emisividad es constante para cualquier longitud de onda, se denomina cuerpo gris. En ingeniería, es común utilizar la “suposición del cuerpo gris”, que considera a todos los cuerpos grises. Un ejemplo de cuerpo gris real es la pizarra.

Hay otros factores que influyen en la medida de radiación térmica emitida por un cuerpo además de la emisividad. La radiación que llega a la termocámara está compuesta por la radiación propiamente emitida por el cuerpo en estudio y la radiación reflejada proveniente de otros cuerpos o de fuentes luminosas externas. La temperatura aparente reflejada es una compensación de la radiación de los alrededores reflejada en el objeto en estudio. Este principio no cambia el termograma, si bien puede generar lecturas erróneas de temperatura si no se tiene en cuenta.

Es conveniente reducir al máximo todas las radiaciones parasitas, ya que pueden dar lugar a mediciones de temperatura superiores falsas. Por ejemplo, el corte de cantera y la colocación en obra pueden causar variaciones en la emisividad. Un ejemplo extremo es el de la Figura 2.4-7, el termograma resultante de aplicar IRT a un cristal.

Otro factor que influye es el ángulo de incidencia de la observación (Gaussorgues, 1989) ya que la emisividad de un material varía en función de la dirección de la

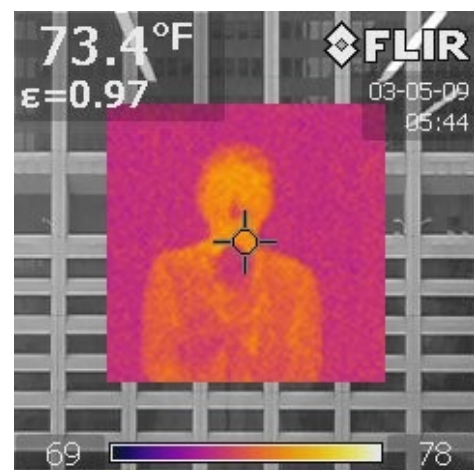


Figura 2.4-7 Fotografía térmica tomada a un cristal de una ventana. En la imagen se ve reflejado en el cristal el técnico que dispara la cámara térmica.

<sup>12</sup> Cuerpo negro es aquel que absorbe toda la radiación incidente y es capaz de emitir todas las longitudes de onda del espectro electromagnético a una temperatura específica (Yanan 1987).. Por tanto, para cuerpos negros,  $\varepsilon = 1$



misma, llegando a ser nula en ángulo rasante. Las superficies pueden ser especulares o lambertianas. En las superficies especulares, como por ejemplo el vidrio pulido, la reflectividad es cercana a cero en todos los ángulos excepto en el normal, mientras que en las superficies lambertianas, la radiación es reflejada en todos los ángulos por igual; un ejemplo de superficie lambertiana es una superficie lisa pintada con pintura mate blanca. La mayor parte de las superficies que se encuentran en el campo de la conservación y restauración arquitectónica, reúnen propiedades especulares y lambertianas combinadas. Tan solo para los cuerpos negros y grises la emisividad es la misma sea cual sea el ángulo de observación.

En tercer lugar, la atmosfera también influye en el registro de termogramas, pues es el medio a través del cual se transmite la radiación térmica e influye absorbiendo o dispersando parte de ella. Existen lo que se denominan ventanas de transmisión, intervalos de longitudes de onda en los que la influencia de la atmosfera es mínima o nula, y que habitualmente coinciden con temperaturas ambiente (Cusidó, Devant, & Riba, 1996).

El espectro infrarrojo tiene un rango de longitud de onda aproximado total entre 0,7 y 1000 micras (infrarrojo cercano, medio y lejano) (Figura 2.4-8)

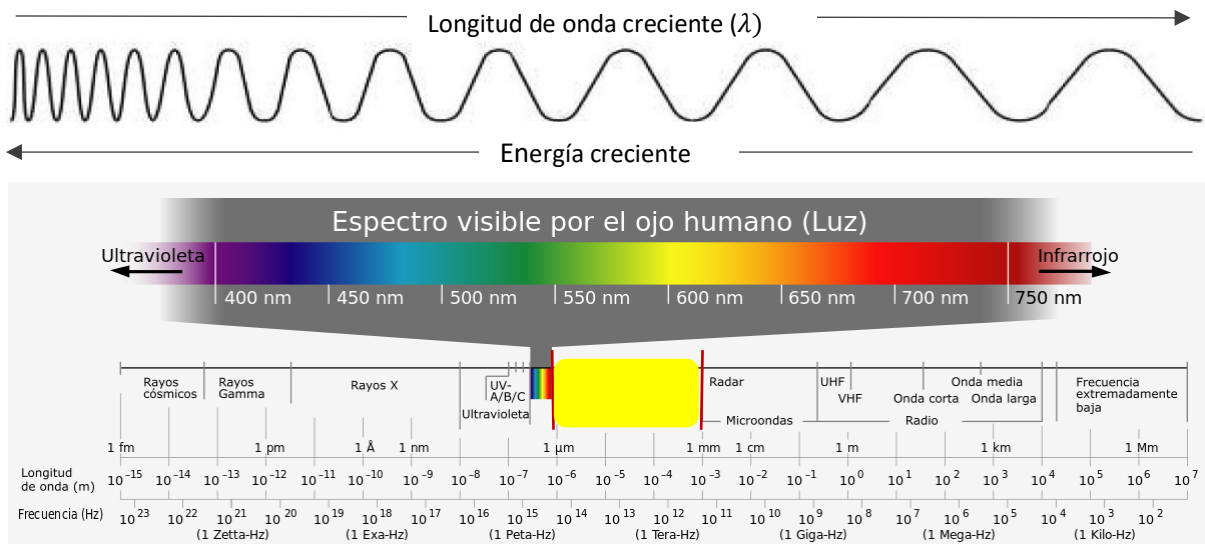


Figura 2.4-8 Espectro electromagnético. En amarillo, sección del espectro correspondiente a la radiación infrarroja. Gráfico adaptado de GNU FD.

La longitud de onda de la radiación emitida puede ser medida y monitoreada con cámaras térmicas. Todos los cuerpos emiten energía continuamente en forma de ondas electromagnéticas; la intensidad de dicha radiación está relacionada con las

propiedades térmicas del cuerpo y su temperatura superficial. La toma de esa radiación produce una imagen cualitativa de la temperatura del cuerpo investigado. La variación en el proceso de calentar o enfriar los materiales es el mecanismo clave para revelar anomalías, siendo la emisividad y la temperatura reflejada dos parámetros esenciales para distinguir diferentes materiales.

Suponiendo un valor uniforme de emisividad en una superficie, las diferencias en temperatura superficial pueden ser una indicación de ciertas anomalías detrás de la superficie que pueden afectar la transmisión termal o la retención de calor. Las cámaras térmicas se pueden ajustar para calibrar la emisividad de un determinado material. Como parte de cualquier investigación, es necesario registrar las condiciones climáticas ambientales (temperatura y humedad relativa) durante las inspecciones termográficas.

La cámara registra la energía térmica en la superficie del objeto que es la suma de la energía emitida  $W_e$ , la energía transmitida  $W_t$  y la energía reflejada  $W_r$  (Figura 2.4-1)

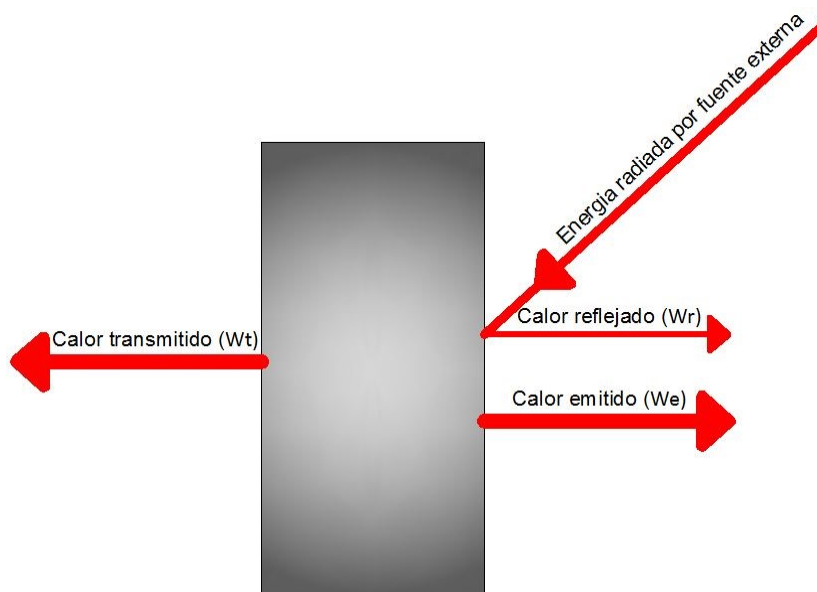


Figura 2.4-9 Diagrama esquemático de los tipos de energía emitidos por un cuerpo.  
 $\% W_e + \% W_r + \% W_t = 100\%$

Ese registro lo lleva a cabo mediante un radiómetro o sensor térmico (Kaplan, 2007, p. 13). Por este motivo es necesario saber distinguir entre los diferentes tipos de energía, qué tipo es más conveniente evaluar en cada inspección y que fuentes termales no son de interés.

En el estándar E1933- 97 <sup>13</sup> se puede encontrar una lista de las emisividades estandarizadas para algunos materiales. Otra fuente para encontrar valores de emisividad para materiales históricos, como yesos, mármoles y piedras porosas es la investigación que llevaron a cabo Avdelidis y Moropoulou (Avdelidis & Moropoulou, 2003).

Las mediciones de cuerpos grises, como la madera, requieren una corrección de emisividad que en las cámaras actuales ocurre dentro de la cámara a través de una conversión en el software. El calor transmitido por radiación es afectado por una serie de factores. Una superficie rugosa, por ejemplo, disparará la radiación IR y absorberá energía termal. La madera absorbe gran parte de la energía radiante y tiene una emisividad de 0,9 mientras que los metales pulidos, reflejan la mayor parte de energía y tienen una emisividad mucho más baja (Figura 2.4-10).

MATERIAL	EMISIVIDAD
Papel de aluminio	0.04
Acero colado	0.44
Acero oxidado	0.79
Acero pulido	0.38
Acero pulido	0.07
Aluminio	0.09
Arena (genérica)	0.76
Asfalto	0.88
Cemento	0.54
Cobre oxidado	0.87
Cobre pulido	0.04
Cristal	0.95
Enfoscado de cemento	0.87
Enfoscado de yeso rugoso	0.91
Hierro fundido	0.94
Hormigón no pulido	0.91
Ladrillo	0.9
Madera de pino	0.95
Mármol pulido	0.89
Piedra arenisca	0.59
Piedra caliza	0.92
Pintura mate	0.96
Pinturas al oleo, todos los colores	0.92
Plomo	0.06
Plomo oxidado	0.43
Porcelana vidriada	0.92
Rasilla cerámica	0.97
Yeso no pulido	0.89

Figura 2.4-10 Valor aproximado de las emisividades de materiales habituales en la conservación del patrimonio arquitectónico a una temperatura de 300 K (26,85° C). Tabla adaptada de (Engineering Tool Box, 2016)

## TERMOGRAFÍA ACTIVA Y PASIVA

La IRT puede llevarse a cabo de forma pasiva o activa. La termografía pasiva hace uso de la temperatura ambiental y sus variaciones en el objeto en estudio a lo largo del día, dependiendo de la radiación solar, la orientación, viento, humedad relativa, etc. Los especialistas recomiendan registrar los termogramas al atardecer o al amanecer, ya que es cuando se dan las mayores variaciones térmicas y por tanto se registran mayores contrastes (Harrimen, 2014). La mayor desventaja de esta opción es que los factores medioambientales son incontrolables.

La termografía pasiva es conveniente para estudiar paredes, sótanos, cubiertas planas y en general grandes superficies en poco tiempo. El sol puede aportar hasta 1.000 W/m<sup>2</sup> (Castele , 2013, pág. 25). Por ejemplo, en tres horas de exposición solar

<sup>13</sup> Standard Test Methods for Measuring and Compensating for Emissivity Using Infrared Imaging Radiometers.

sobre un pavimento corriente de hormigón, la temperatura aumenta en tres grados Fahrenheit ( $0,6^{\circ}\text{C}$ ) (Holt & Eckrose, 1989, p. 111).

La termografía activa consiste en aplicar una fuente de calor externa y aprovechar ese calor para estudiar su transmisión en los materiales. Es habitual utilizar una lámpara halógena. La mayor ventaja de este sistema es la posibilidad de control de la mayor parte del factor térmico y la posibilidad de ajustar dicho factor al test (Rosina & Spodek, 2003). Es habitual que los materiales de edificios históricos tengan propiedades térmicas muy similares, lo cual dificulta su estudio con la técnica IRT. En esos casos, un aporte adicional de calor en un tiempo específico puede ser un gran facilitador para detectar anomalías. En termografía activa, al descartar los efectos del viento, el sol, hora del día, etc. si se ejecuta correctamente, la fuente artificial de calor puede crear una distribución uniforme del calor sobre toda la superficie contrariamente a la radiación solar, que calentará ciertas áreas en función de la hora del día, la orientación, el clima, la región, etc. (Grinzato, Vavilov, & Kauppinen, 1998).

El mayor inconveniente es el tamaño del área a testear, ya que puede ser complicado calentar superficies grandes. En investigaciones de elementos estructurales con termografía activa únicamente por una cara del elemento, la técnica es efectiva hasta una profundidad máxima de 10 cm (Di Donato, 2009)

A su vez, ambos métodos, activo y pasivo pueden llevarse a cabo por la misma cara del elemento a testear o por la cara contraria. La elección vendrá determinada por cada caso específico.

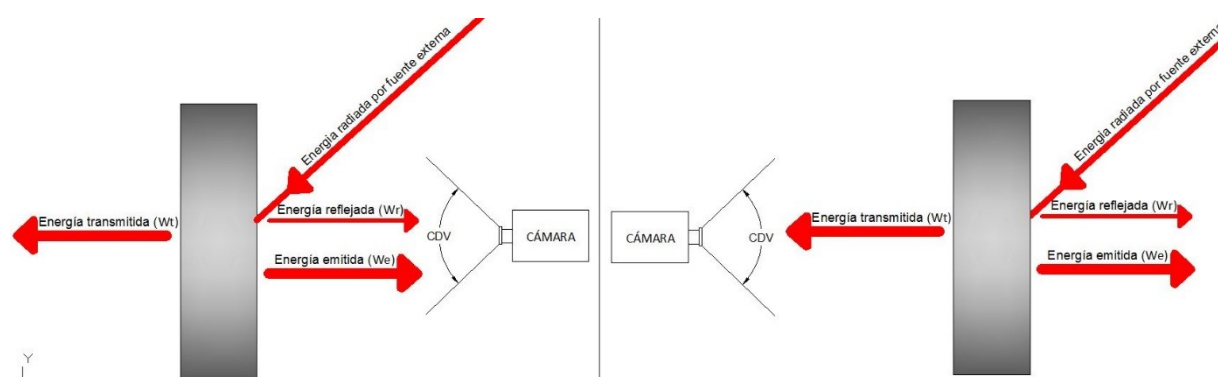


Figura 2.4-11 Los dos diferentes métodos de toma de fotografías térmicas. A la izquierda, se toma la foto por el lado opuesto a la emisión del calor (puede ser activo o pasivo). A la izquierda, el termograma se registra por el mismo lado en el que se encuentra la fuente de calor (activo o pasivo).

## 2.4.1.4. REPRESENTACIÓN DE RESULTADOS

Así pues, la IRT mide la temperatura a la que una superficie irradia calor, una forma de energía que no puede ser detectada por el ojo humano debido a que su longitud de onda es demasiado larga. El dispositivo de registro, la cámara térmica, procesa la temperatura en un gráfico bi-dimensional denominado termograma, que es una imagen que representa la temperatura a través de una escala de colores para visualizar la relación entre las temperaturas de las diferentes áreas del objeto. Un termograma es un mapa de temperaturas superficiales. Los termogramas proporcionan información de forma cualitativa relativa de las temperaturas de diferentes superficies y cuantitativa, dando la medición exacta de la temperatura de un determinado punto en la superficie. Los sensores térmicos localizados en el interior de las cámaras térmicas convierten la energía térmica en una señal eléctrica que corresponde a una temperatura calibrada.



Figura 2.4-13 Diferentes escalas cromáticas de representación en el modelo FLIR640: grey, rainbow y iron.

Las cámaras ofrecen diferentes escalas cromáticas para la representación térmica. La de la Figura 2.4-12 es la escala que Flir denomina Rainbow.

Cuando se registra un termograma es importante acercarse al objeto en estudio lo máximo posible para evitar ruido en la imagen y que el registro de temperatura sea lo más preciso posible.

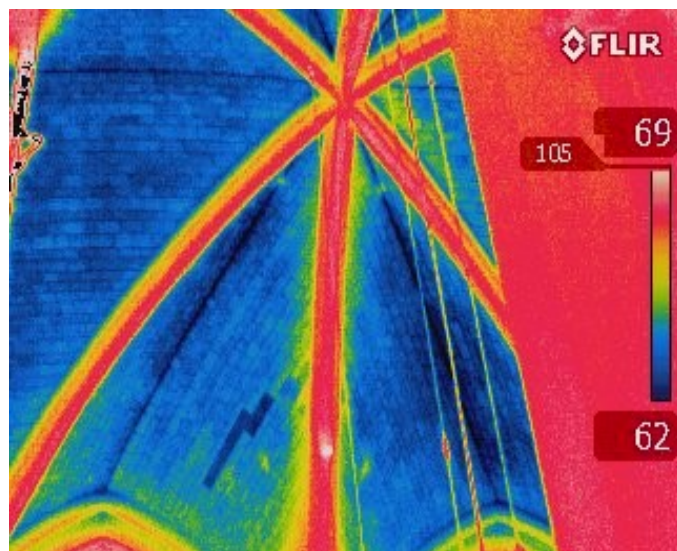


Figura 2.4-12 Termograma de las bóvedas de la nave central de la catedral St. John the Divine en la ciudad de Nueva York.



## 2.4.1.5. INSTRUMENTACIÓN

---

La energía radiante puede utilizarse para medir la temperatura superficial por medio de una cámara térmica, que es una extensión de un termómetro de radiación debido a cómo una cámara térmica transforma y representa la información de la temperatura superficial midiendo la energía térmica radiada por la superficie. Las cámaras infrarrojas tienen un detector que tiene la capacidad de transformar la energía infrarroja radiante en señales eléctricas que son convertidas en medidas de temperatura. Enfocando el objeto, el detector tiene puntos radiómetros que tienen la capacidad de leer las temperaturas superficiales de esos puntos con gran precisión (Kaplan, 2007, p. 15). Un termograma combina muchas medidas de radiación térmica en una sola imagen a través de un código de colores. Las variaciones en la temperatura de la superficie se convierten en el mecanismo para detectar alteraciones.

Las cámaras térmicas actuales, utilizan una colección de detectores infrarrojos para mapear térmicamente la superficie de los objetos. Esta colección de receptores, situados en el objetivo (*focal plane arrays*) en las cámaras térmicas actuales, tienen tecnología muy similar a la de las cámaras digitales, solo que los píxeles son medidas de temperatura en lugar de puntos de color. La capacidad termal de estas cámaras se define en función de la resolución y la sensibilidad del detector. Las especificaciones más importantes del aparato elegido en una investigación son: la resolución, el campo de visión y sensibilidad termal. A mayor valor de estos parámetros, mayor será la calidad del termograma.

Hay dos grandes productores de cámaras térmicas en USA, Fluke y Flir; ambas participan en la investigación y el desarrollo de la tecnología IRT. Los modelos actuales tienen mayor resolución, menor coste y son totalmente portables para diagnosticar elementos fuera del laboratorio.

Los últimos modelos de Fluke tienen una resolución de 1.024 x 768<sup>14</sup> y tiene la posibilidad de intercambiar lentes para poder adaptar la cámara a la distancia del elemento a diagnosticar. Además, dispone de una plataforma de trabajo online, el sistema de conexión de herramientas de test más grande del mundo, que permite compartir online en tiempo real las inspecciones de manera que agiliza las

---

<sup>14</sup> Equivalentes a 3,1 millones de píxeles con su sistema SuperResolution

decisiones y la colaboración entre los diferentes miembros del equipo. Otra herramienta a destacar es el LaserSharp; si el termograma está desenfocado, puede haber errores de temperatura de hasta 20F (Fluke, 2016). El sistema LaserSharp consiste en un medidor laser instalado en el objetivo que calcula y muestra la distancia al objeto enfocado de manera que puede ajustarse. Tiene la posibilidad de tomar un set de diferentes fotos enfocando automáticamente cada uno de los objetos en la imagen con el sistema MultiSharp Focus. Además, las cámaras están diseñadas para su uso en obra, pueden ser operadas con una mano, soportan caídas de hasta dos metros y su constitución es sólida. En aplicaciones a conservación del patrimonio arquitectónico tanto las IR Expert Series IR como las Professional Series IR son buenas opciones. Su uso es muy intuitivo.

Industrial, commercial and building use			
Products	Expert Series IR Cameras TiX1000, TiX660, TiX640, TiX560, TiX520, TiX500	Professional Series IR Cameras Ti450, Ti400, Ti300	Performance Series IR Cameras TiS75, TiS65/60, TiS55/50, TiS45/40, TiS20, TiS10
Description	Premium image quality with the highest resolution (up to 1024x768) and best thermal sensitivity	Quality images for advanced inspection and troubleshooting	Easy to use, standard performance with good image quality for everyday use
Applications	The most detailed and challenging inspections/targets <ul style="list-style-type: none"> <li>Industrial maintenance</li> <li>Generation/transmission</li> <li>Oil and gas predictive maintenance</li> <li>Research and development (electrical, mechanical, biology/sciences, microelectronics)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Industrial maintenance</li> <li>Heavy commercial facility maintenance</li> <li>Oil and gas maintenance</li> <li>Veterinary</li> <li>Reliability inspections</li> <li>Heavy building diagnostics <ul style="list-style-type: none"> <li>- Building envelope</li> <li>- Construction defects</li> </ul> </li> <li>Electrical, water, gas utilities</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Electrical inspections</li> <li>HVAC/R inspections</li> <li>Mechanical</li> <li>Residential home inspections</li> <li>Light commercial maintenance</li> <li>Building diagnostics <ul style="list-style-type: none"> <li>- Building envelope</li> <li>- Commercial/industrial facilities</li> </ul> </li> </ul>
Perfect for	Engineers, R&D professionals and advanced thermographers who require premium image quality and an unsurpassed level of detail in every infrared image.	Professional in-house, contract and service thermographers who need quality images and advanced features and specifications for use in multiple applications.	Technicians and contractors who need quality images and feature rich affordability for quick scans and/or intermittent inspections.
Fluke innovations	<ul style="list-style-type: none"> <li>1024 x 768 Resolution</li> <li>SuperResolution mode</li> <li>A full 180° articulating lens</li> <li>Largest 5.7 inch tablet like screen</li> <li>MultiSharp® Focus</li> <li>LaserSharp® Auto Focus</li> <li>Built-in laser distance meter</li> <li>Create and email reports directly from the jobsite with the Fluke Connect® app*</li> <li>IR-Fusion® AutoBlend, Picture-in-Picture</li> <li>SmartView® Software</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>SuperResolution mode</li> <li>MultiSharp® Focus</li> <li>LaserSharp® Auto Focus</li> <li>Built-in laser distance meter</li> <li>Create and email reports directly from the jobsite with the Fluke Connect® app</li> <li>IR-Fusion® AutoBlend, Picture-in-Picture</li> <li>SmartView® Software</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Wireless connectivity with the Fluke Connect® app</li> <li>IR-Fusion® AutoBlend, Picture-in-Picture</li> <li>SmartView® Software</li> </ul>

Figura 2.4-14 Tabla resumen de las tres series de cámaras térmicas ofrecidas por Fluke. Las más apropiadas para inspección de patrimonio arquitectónico con las Expert y las Professional.

La marca Flir es la más vendida en el país. La policía, el personal de seguridad y las tropas americanas utilizan dispositivos Flir. En su catálogo actual pueden encontrarse más de dieciocho modelos; la elección del tipo de cámara dependerá, además del presupuesto, de la asiduidad con la que se utilice, cuál sea el objetivo de la inspección, los ángulos de inspección, el tamaño del elemento, las temperaturas, la distancias, etc.

Existen desde modelos muy económicos con capacidades limitadas a cámaras muy completas con objetivos intercambiables y un sinnúmero de accesorios entre los cuales cabe destacar el MeterLink, un dispositivo que puede medir voltajes, pérdidas eléctricas y grado de humedad y enviar esos datos vía inalámbrica a cámaras Flir de manera que los termogramas incluyan datos cuantificados en la anomalía

eléctrica o por humedad. Otra herramienta ofrecida por Flir es la tecnología MSX, que funciona con algoritmos patentados por Flir, gracias a la cual los termogramas incluyen como trasfondo fotografías digitales, siendo mucho más sencilla la interpretabilidad y localización del termograma. Antes de este avance Flir disponía de un Picture in Picture pero no existía correlación exacta entre la imagen digital y la térmica, además no había superposición. Los modelos más apropiados para aplicación a conservación arquitectónica son la E40, E50 y E60 como opciones más asequibles y la T420, T430, T440 para mayores resoluciones (Figura 2.4-15) (Figura 2.4-16).



Specifications	Performance			High-Performance			
	E40/E40bx	E50/E50bx	E60/E60bx	T420/T420bx	T440/T440bx	T620/T620bx	T640/T640bx
Model	E40/E40bx	E50/E50bx	E60/E60bx	T420/T420bx	T440/T440bx	T620/T620bx	T640/T640bx
Accuracy	±2% or 2°C			±2% or 2°C			
IR Pixel Resolution	19,200 (160 x 120)	43,200 (240 x 180)	76,800 (320 x 240)	76,800 (320 x 240)		307,200 (640 x 480)	
Thermal Sensitivity	<math>-0.07^{\circ}\text{C} / <math>-0.045^{\circ}\text{C}</math>			<math>-0.045^{\circ}\text{C}</math>		<math>-0.04^{\circ}\text{C}</math>	
Temperature Range	<math>-4^{\circ}\text{F}</math> to <math>1,202^{\circ}\text{F}</math> (<math>-20^{\circ}\text{C}</math> to <math>650^{\circ}\text{C}</math>) bx: <math>-4^{\circ}\text{F}</math> to <math>248^{\circ}\text{F}</math> (<math>-20^{\circ}\text{C}</math> to <math>120^{\circ}\text{C}</math>)			<math>-4^{\circ}\text{F}</math> to <math>2,192^{\circ}\text{F}</math> (<math>-20^{\circ}\text{C}</math> to <math>1,200^{\circ}\text{C}</math>) Optional: to <math>2,192^{\circ}\text{F}</math> (<math>1,200^{\circ}\text{C}</math>) bx: <math>-4^{\circ}\text{F}</math> to <math>662^{\circ}\text{F}</math> (<math>-20^{\circ}\text{C}</math> to <math>350^{\circ}\text{C}</math>)		<math>-4^{\circ}\text{F}</math> to <math>2,192^{\circ}\text{F}</math> (<math>-20^{\circ}\text{C}</math> to <math>1,200^{\circ}\text{C}</math>) Optional: to <math>3,632^{\circ}\text{F}</math> (<math>2,000^{\circ}\text{C}</math>) bx: <math>-4^{\circ}\text{F}</math> to <math>1,202^{\circ}\text{F}</math> (<math>-20^{\circ}\text{C}</math> to <math>650^{\circ}\text{C}</math>)	
Display Size/Format	3.5"/Landscape			3.5"/Landscape		4.3"/Landscape (Widescreen)	
Auto Orientation	•	•	•	—	—	—	—
MSX® Thermal Image Enhancement	•	•	•	•	•	•	•
Viewfinder	—	—	—	—	—	—	•
Measurement Modes	5 modes: 3 Spots; 3 Area Boxes (Min/Max); Color Alarm – blue below or red above set Temp.; Auto hot/cold spot; Delta T			6 modes: 5 Spotmeters, 5 Area Boxes, Isotherm, Auto hot/cold spot, Delta T and 1 live line profile		6 modes: 10 Spots, 5 Area Boxes/Circles, Isotherm, Auto hot/cold spot, Delta T and 1 live line profile	
Spot mode	3 moveable			5 moveable		10 moveable	
Frame Rate	60Hz			60 Hz		30 Hz	
Field of View	25° x 19°			25° x 19°		25° x 19°	
Optional Lenses	2: 15° Telephoto; 45° Wide Angle			6: 6°, 15° Tele; 45° Wide; 90°; Close up: 100, 50 µm		6: 7° & 15° Tele; 45° Wide; Close-up: 80, 100, 50µm	
Focus	Manual			Manual & Automatic			
Continuous Auto Focus	—	—	—	—	—	—	•
Min. Focus Distance	1.31 ft (0.4 m)			1.31 ft (0.4 m)		0.82 ft (0.25 m)	
Radiometric JPEG via USB	•	•	•	•	•	•	•
Radiometric JPEG to SD Card	•	•	•	•	•	•	•
MPEG4 to SD (non-radiometric IR)	•	•	•	•	•	•	•
Thermal color palettes	7: Arctic, White hot, Black hot, Iron, Lava, Rainbow, and Rainbow High Contrast			6: Arctic, Gray, Iron, Lava, Rainbow, and Rainbow High Contrast			
FUR Tools for PC and Mac	•	•	•	•	•	•	•
Battery Operating Time	>4hrs			>4hrs		>2.5 hrs	
Built-in Digital Camera	3.1 MP			3.1 MP		5 MP	
Built-in Illuminator LED	•	•	•	•	•	•	•
Touchscreen	•	•	•	•	•	•	•
Digital Zoom	2x	4x		4x	8x	4x	8x
Insulation Alarm	bx	bx	bx	bx	bx	bx	bx
Humidity Alarm	bx	bx	bx	bx	bx	bx	bx
MeterLink® connectivity	•	•	•	•	•	•	•
Laser Pointer + Laser Locator (on IR image)	•	•	•	•	•	•	•
Compass	—	—	—	•	•	•	•
GPS	—	—	—	•	•	•	•
IR Window Correction	•	•	•	•	•	•	•
Delta T	•	•	•	•	•	•	•
Picture in Picture	Fixed PIP	Scaleable PIP		Scaleable & Moveable			
Thermal/Visual Fusion	—	—	—	•	•	•	•
Onscreen Sketching	—	—	—	•	•	•	•
Sketch on IR/Visual Image	—	—	—	—	—	—	•
Voice/Text Annotation	•	•	•	•	•	•	•
FUR Tools Mobile Wi-Fi app	•	•	•	•	•	•	•
Streaming Video via Wi-Fi app	•	•	•	•	•	•	•
Remote Control via Wi-Fi app	—	—	—	•	•	•	•
Drop (2 meter/6.6 feet)	•	•	•	—	—	—	—
Weight (including battery)	1.94 lbs (0.88 kg)			1.94 lbs (0.88 kg)		2.87 lbs (1.3 kg)	

Figura 2.4-15 Características de las dos series de modelos apropiados para inspección de patrimonio arquitectónico (Flir).

Todas las cámaras generan termogramas que pueden ser manipulados a posteriori con apropiados programas informáticos que se adquieren con las cámaras.

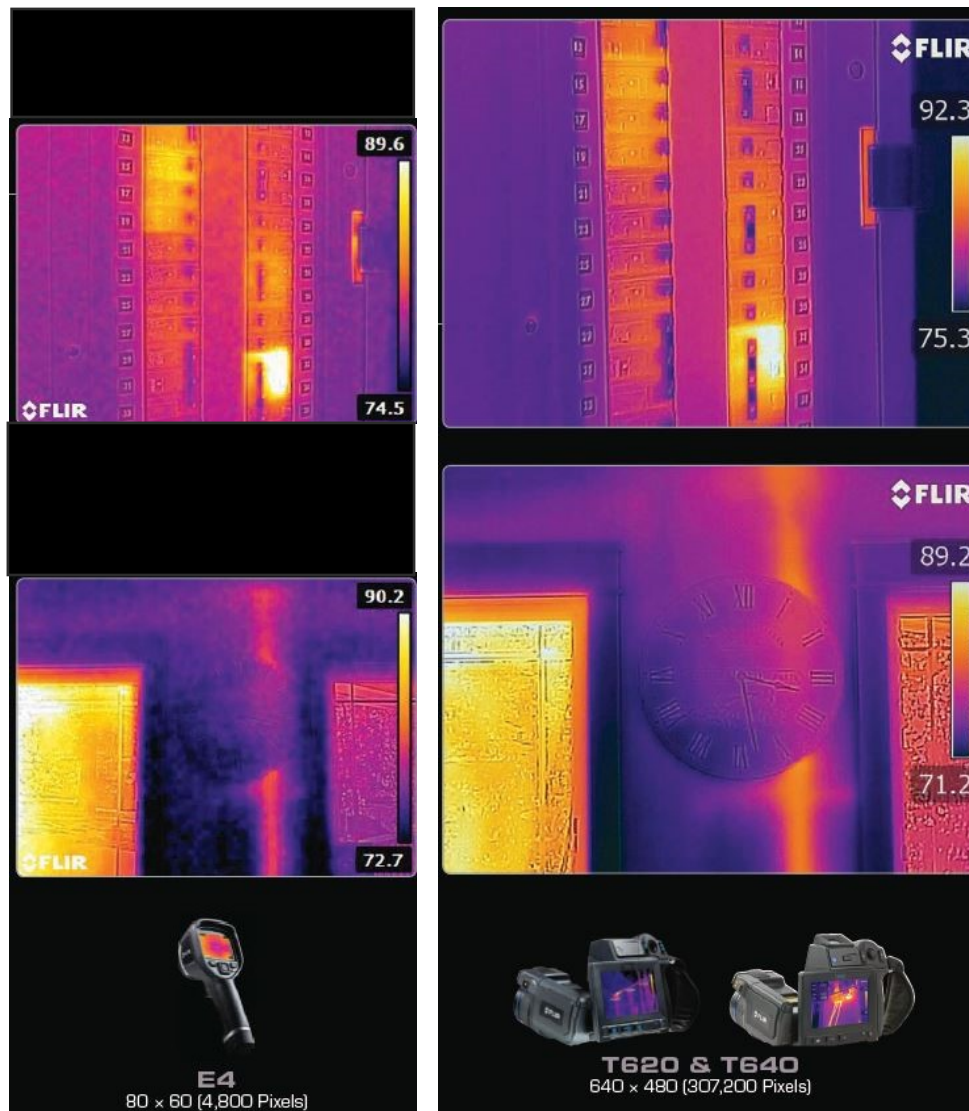


Figura 2.4-16 Comparación de termogramas. En la columna de la izquierda se muestran los termogramas registrados con el modelo más sencillo de Flir, la E4. A la derecha, se muestran el mismo termograma registrado con el modelo más completo, la cámara Flir T620.

Uno de los mayores inconvenientes de las cámaras actuales, y por tanto uno de los campos de investigación de las casas comerciales, es el limitado campo de visión que ofrecen. Las casas comerciales ya están avanzando mejoras a ese respecto en futuros modelos.



## 2.4.1.6. APLICACIONES

---

La respuesta en el tiempo a estímulos térmicos proporciona información sobre la composición de la estructura y la presencia de anomalías tales como discontinuidades, humedades, etc.

Una de las aplicaciones más comunes de esta técnica en patrimonio arquitectónico es la detección de desplazaciones o desuniones entre materiales, es decir, pérdida de adherencia de las capas superficiales. Cuando una superficie se calienta con una fuente de calor activa, la temperatura de la superficie aumentará repentinamente. La velocidad a la que el frente de calor se disipa dentro del material depende de sus propiedades térmicas, relacionadas con la densidad, la capacidad calorífica, la conductividad térmica y la unión de las partículas del material. Un defecto bajo la superficie crea una barrera en el proceso de difusión del calor y la temperatura en esa zona decrecerá más lentamente que en el área circundante. La superficie que cubre el defecto aparecerá como un punto caliente en el termograma durante más tiempo que el resto de la superficie vecina. En los metales, el calor se disipa rápidamente mientras que en la madera ese tiempo es comparablemente mayor. La detección de anomalías puede llevar varios segundos o minutos tras el impacto de calor, dependiendo del material y la profundidad del defecto. Si la fuente de calor está en la otra cara del elemento en estudio, las anomalías aparecerán como puntos fríos por el mismo principio. En ambos casos los defectos pueden ser detectados como puntos calientes o fríos (Figura 2.4-11) (Meinlschmidt, 2005). En caso de utilizar termografía pasiva, el principio es el mismo pero los resultados se darán más lentamente y, dependiendo del caso, serán más moderados que utilizando termografía activa. Holt y Eckrose también estudiaron esta aplicación de IRT; concluyeron cómo, dado el mismo aporte de energía solar, la zona desplazada o mal adherida, al ser más fina que el área circundante, se enfriará y calentará antes que el material adyacente (Holt & Eckrose, 1989). El motivo es que el coeficiente térmico del aire es diferente al coeficiente térmico del material (piedra, ladrillo, mortero, tierra).

La IRT puede resultar muy eficaz para leer estratigrafía muraria. Teóricamente, las diferentes capas estratigráficas producen diferentes patrones térmicos dependiendo de su composición, estado, a veces color, y estratigrafía. Cada material tendrá emisividades diferentes que serán observables con una cámara térmica. Daniel Castele llevó a cabo una extensa investigación en 2013 de las



pinturas murales en una pared de tapial en el parque nacional de Mesa Verde en Colorado. Demostró que era posible distinguir entre diferentes tipos de acabados superficiales con IRT estudiando los diferentes patrones termales de los materiales y cómo éstos absorben e irradian energía calorífica (Castele , 2013, pág. 55).

Michael Shoriak llevó a cabo una investigación en la que aplicó termografía activa a estructuras de madera de los indios nativos americanos (Shoriak, 2012). El National Park Service es responsable de la documentación y preservación de estas estructuras de madera de los indios de las tribus Navajo y Havasupari. Los representantes de estas tribus han solicitado explícitamente que dichas estructuras no sean sometidas a ninguna reparación física ni intervención de estabilización y que permanezcan intactas, debido al carácter sagrado de esos *hogan*<sup>15</sup> (Figura 2.4-17).

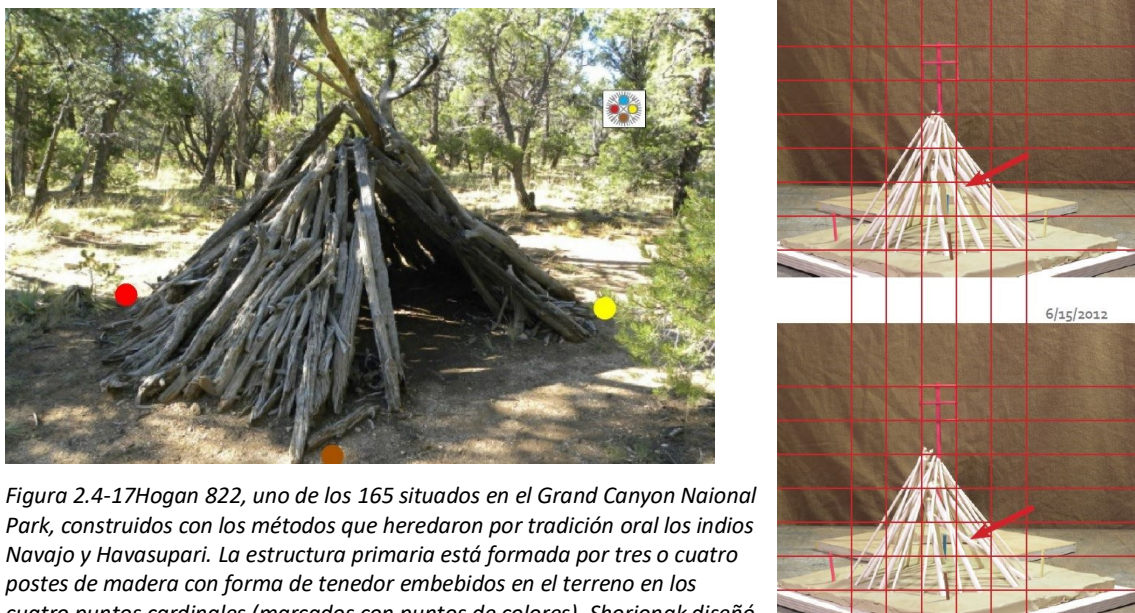


Figura 2.4-17Hogan 822, uno de los 165 situados en el Grand Canyon Naional Park, construidos con los métodos que heredaron por tradición oral los indios Navajo y Havasupari. La estructura primaria está formada por tres o cuatro postes de madera con forma de tenedor embebidos en el terreno en los cuatro puntos cardinales (marcados con puntos de colores). Shorionak diseñó un sistema de monitoreo con combinación de fotos reticuladas (derecha) y IRT. Grafico adaptado de (Shoriak, 2012)

165<sup>16</sup> de esas estructuras han sido identificadas por el National Park Service, que necesitaba desarrollar un sistema de documentación y monitoreo cíclico de estas estructuras, que fuera asequible y respetase los requerimientos de la cultura

<sup>15</sup> *Hogan*, del Navajo *hooghan* [ho:yan] es la vivienda sagrada de la religión Diné, tradicional del pueblo Navajo.

<sup>16</sup> Construidas entre 1890 y 1955, según los objetos encontrados a su alrededor. Se desconoce el número total de estructuras. Cada año aproximadamente dos de estas estructuras se pierden por colapso colapso (Brennan & Hough, 2008).

indígena. Es en este contexto en el que Shoriak propuso, tras una exhaustiva investigación, un doble sistema de fotografías rectificadas y termografía. Otro de los condicionantes a tener en cuenta es que el sistema tiene que poder ser llevado a cabo por diferentes técnicos sin que ello suponga variación del resultado para hacer posible el reconocimiento de cambios entre ciclos.

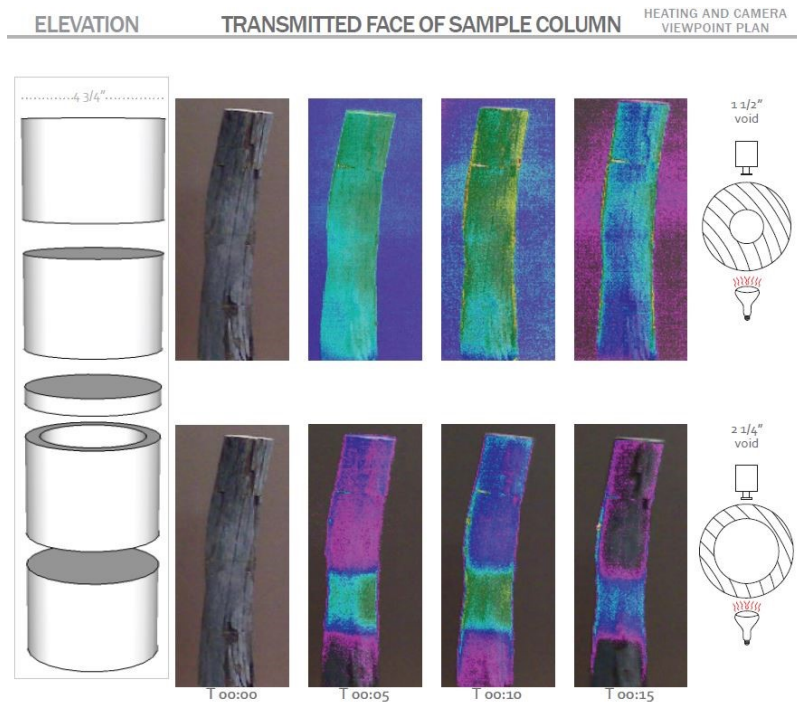


Figura 2.4-18 Shoriak llevó a cabo una investigación de IRT activa estudiando los diferentes patrones de calentamiento y enfriamiento para diferentes lesiones en los mástiles de la estructura primaria de los hogan (Shoriak, 2012, p. 93)

La IRT también puede ser

útil para detectar actividad de termitas. Así lo demostró Mark Gilberg en 2003, quien evaluó la actividad de los insectos en la iglesia de St. Alphonsus en New Orleans. El estudio les permitió, además de localizar a través de los termogramas las zonas de actividad subterránea, identificar las zonas en las que instalar cebos (Gilberg, Riegel, & Leonard, 2003).

Como en la mayoría de las aplicaciones de NDE, no se puede asegurar el éxito de la aplicación para todos los casos ya que son muchos factores los que influyen y cada caso requiere un estudio específico. En la foto de la Figura 2.4-19, se muestra una aplicación de IRT en patrimonio arquitectónico. El proyecto consistía en hacer un mapeado de la cúpula; no existiendo ninguna referencia entre el trasdós y el intradós, calentando un casetón desde el trasdós y haciendo uso de una cámara térmica desde el interior, los técnicos pudieron proceder con el numerado de casetones por ambas caras para proceder a la inspección.

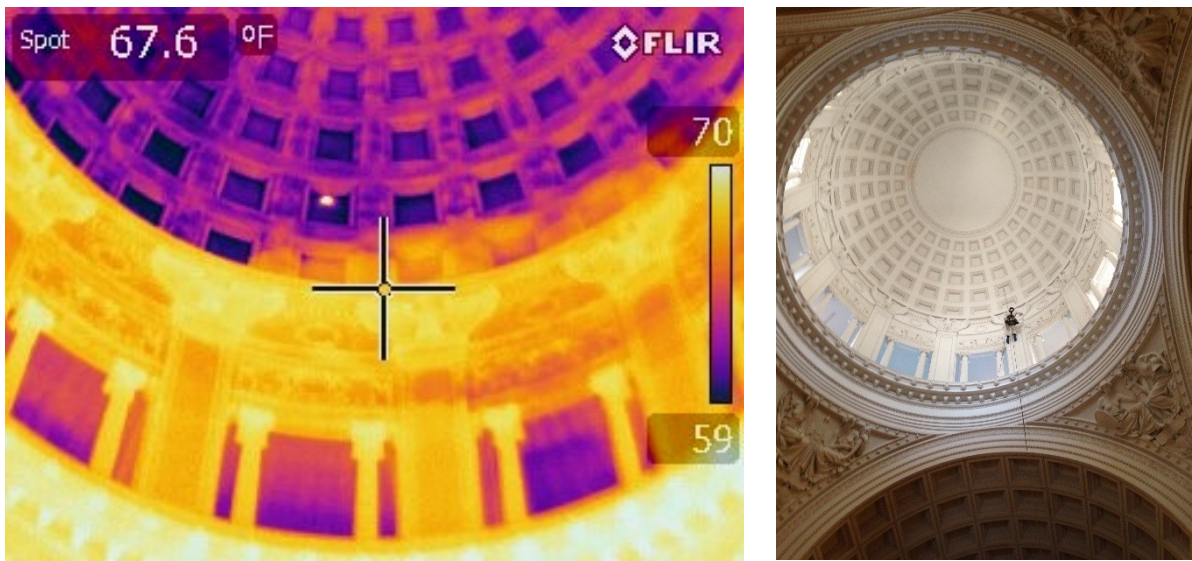


Figura 2.4-19 Cúpula de General Grant en la ciudad de Nueva York. Utilizando IRT los técnicos pudieron identificar y numerar los casetones para proceder a su inspección.

Los profesionales también utilizan la IRT para evaluar humedades. Los termogramas muestran las zonas húmedas más frías que las secas. Esto se debe a los fundamentos del proceso de evaporación. La evaporación depende, entre otros factores, de las condiciones ambientales de los alrededores del material en estudio. La temperatura ambiente, debe ser mayor que la del líquido atrapado en el material con el fin de romper la unión entre moléculas que permite al agua mantener su forma líquida (Figura 2.4-20). La cantidad de energía requerida para elevar la temperatura en un grado es denominada capacidad calorífica. El agua tiene una capacidad calorífica de 1 (cal/gramo C) o 4.186 J/(kg

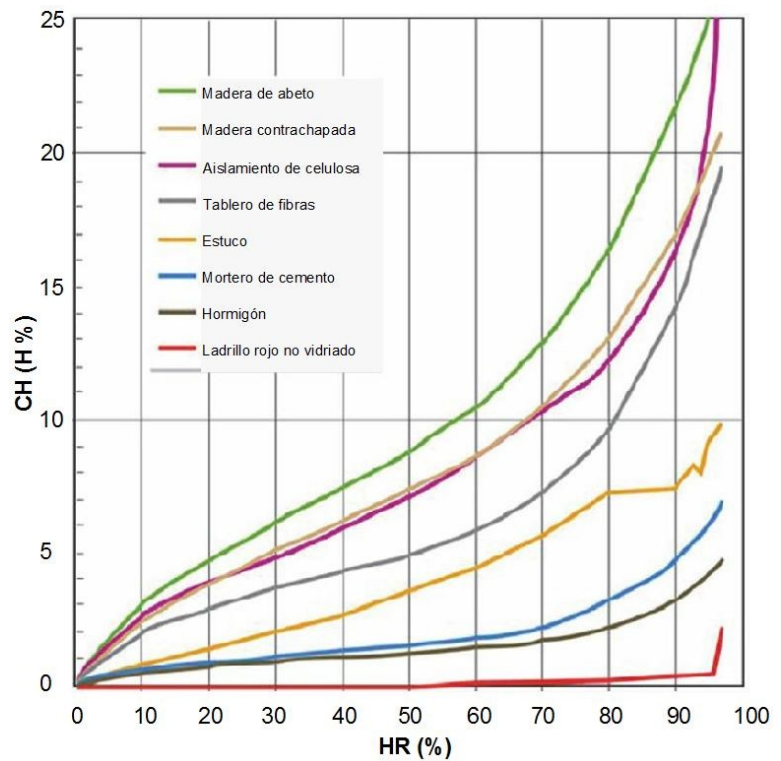


Figura 2.4-20 Relación entre el contenido de humedad (eje Y) y la humedad de diferentes materiales. Para cada valor de humedad, la curva indica el correspondiente contenido de agua (Moisture sorption isotherm)



C). Cuando la energía es la suficiente, se rompe la atracción polar entre moléculas de agua y la humedad se evapora en moléculas gaseosas (Straube, 2006). Es decir, en general, la evaporación ocurre si la temperatura exterior del material supera a la temperatura de la humedad del material y si la humedad relativa exterior al material es menor que la humedad dentro del material. Conforme se lleva a cabo el proceso de evaporación, cada gramo de agua absorbe 2.500 J de energía, lo que provoca un descenso de la temperatura en esa zona, lo cual es detectado por los sensores de la cámara térmica (Castele , 2013, pág. 26). En el caso de que el material tenga sales solubles, éstas aumentan el punto de ebullición del agua y por tanto la capacidad calorífica. Este fenómeno resulta en una menor tasa de evaporación (Harris, 2001, p. 387).

Sarah Cole llevó a cabo una investigación en 2013 en la UPenn University en Philadelphia en la que demostró que, combinando los conocimientos de los fundamentos de evaporación, temperatura y humedad relativa, la IRT podía cuantificar el contenido de humedad en ladrillo poroso sin necesidad de utilizar un medidor de humedad (Cole, 2014). Para ello, utilizó una cámara Fluke Ti32 y la calibró para tomar imágenes con las que cuantificar el contenido de humedad basándose en temperaturas medidas previamente en laboratorio.

En la práctica, es posible detectar la diferencia de temperatura en piedra entre zonas lavadas y no lavadas debido a que las zonas lavadas transpiran mejor, es decir, el índice de evaporación es mayor. Si la piedra presenta costras, éstas impiden la absorción del agua de lluvia y cuando la humedad ya está dentro, suponen un obstáculo para la evaporación. El estudio de los diferentes patrones térmicos puede informar sobre la presencia de costras, o de superficies pétreas más erosionadas. No es posible establecer una norma general ya que las variaciones y el signo de estas dependerán de cada caso concreto. El comportamiento diferente puede ser atribuido a diferentes motivos, como la exposición a radiación solar, existencia de brisas o vientos, del tipo de piedra, esto es, porosidad, humedad intersticial, existencia de patinas o costras, etc. Se puede afirmar que, para una situación determinada particular, la IRT permite distinguir zonas de propiedades emisivas diferentes. Con ayuda de otros análisis se puede determinar su correlación con el grado de alteración.

La IRT también se utiliza en tests de estanqueidad de ventanas y paramentos para detectar la entrada de agua durante el test. En 2014 se llevó a cabo un test en uno de los edificios más altos de Manhattan, Nueva York. El test consistía en realizar

tests de estanqueidad a las ventanas y antepecho de la fachada este desde las plantas 84-86, ambas incluidas, siguiendo el procedimiento establecido en el estándar ASTM Standard E1105, que entre otros condicionantes estipula 5 galones por pie cuadrado por hora, a una presión de 24 psi. El interior de dicho edificio, dada su altura, se aprovecha para ubicar antenas de retransmisión de los principales canales de televisión y otras comunicaciones, motivo por el cual, era importante asegurar la estanqueidad de las ventanas, en primera instancia, y controlar la posible entrada de agua durante la investigación. Por este motivo, desde el interior, un técnico experto en termografía vigilaba con una termocámara Flir E-60 la posible entrada de agua al interior del edificio. Una vez detectaba presencia de agua, avisaba vía radio a los técnicos en el exterior para que detuviesen al instante el test. Dada la dificultad de instalar andamios de ningún tipo a esa altura, todos los trabajos exteriores (inspección, instalación del sistema de agua a presión, etc.) se realizaron con sistemas industriales de acceso con cuerdas. Las cámaras térmicas detectan la radiación infrarroja emitida, lo que permite conocer la temperatura aproximada en la superficie del material, que en este caso estaba influenciada por la humedad del material (al tener el agua mayor capacidad calorífica que el ladrillo y el yeso). Debido a esta propiedad, el agua tarda más en calentarse y enfriarse que los materiales que la rodean, por lo que si se aprovecha esa ventana temporal, es posible detectar la entrada de agua casi instantáneamente, sin necesidad de iluminación adicional. En las Figura 2.4-21, Figura 2.4-22 y Figura 2.4-23, las zonas que se detectaron con humedad durante el transcurso de los tests se marcan con círculos rojos (áreas anormalmente oscuras -por tanto, frías- en los termogramas).



*Figura 2.4-21 Vigilancia del test de estanqueidad desde el exterior mientras otro técnico observa desde el interior con una termocámara (K. Dalton).*



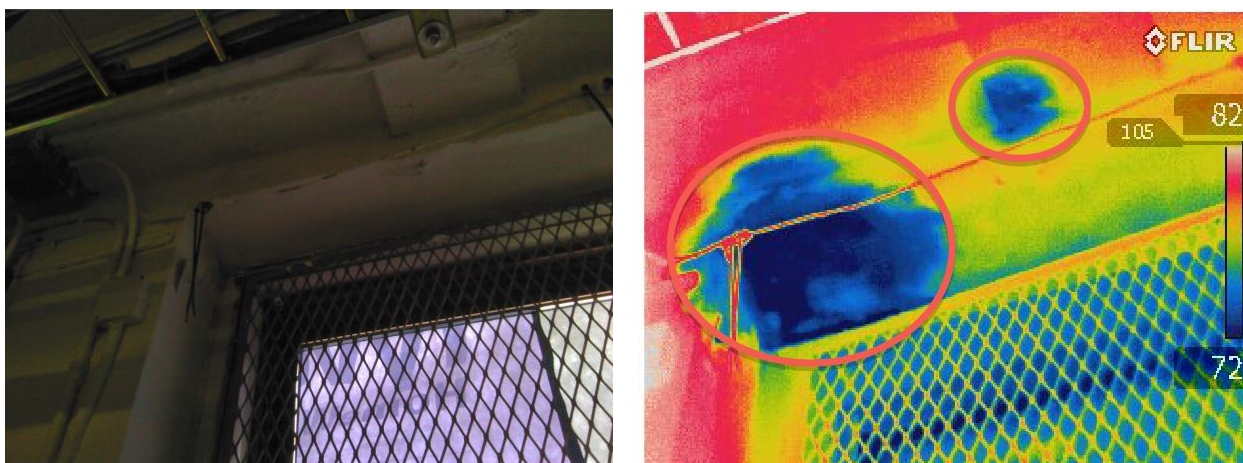


Figura 2.4-22 Fotografía y termograma de una filtración de agua durante la prueba de estanqueidad de una de las ventanas.

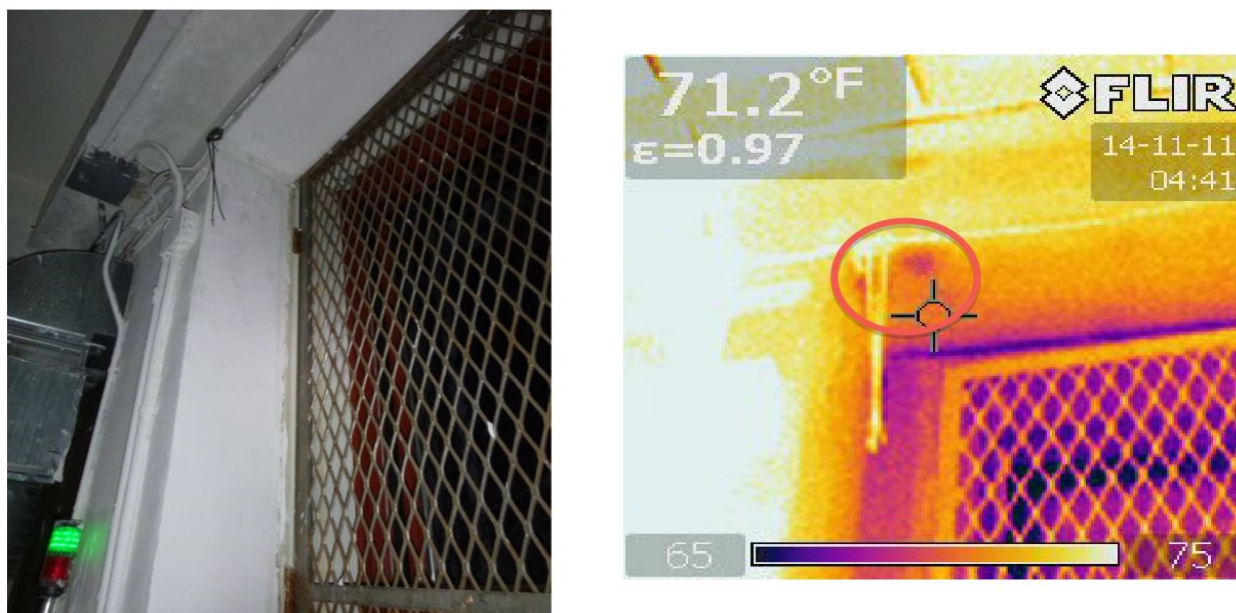


Figura 2.4-23 Fotografía y termograma de una filtración de agua durante la prueba de estanqueidad en el antepecho del piso 86, que aparece en el revestido de yeso de umbral de la ventana.

En edificios históricos que han sufrido restauraciones con materiales diferentes a los originales, es común que los termogramas revelen irregularidades térmicas resultantes de diferentes valores de emisividad, al igual que diferentes propiedades de los materiales en cuanto a retención de calor y conducción en la estructura, todo ello afectando a la energía termal emitida y por tanto al cálculo de la temperatura superficial. Esto facilita la identificación de materiales diferentes (Figura 2.4-12).

En madera, las investigaciones de Philip Steele, Frank Quin y Rubin Shmulsky en 1994 describieron las primeras aplicaciones para detección de nudos en madera para valorar la calidad (Franklin , Steele, & Shmulsky, 1994). Ese mismo año, el equipo de Murata publicó que después de ciclos de calor de 60 segundos, el material del nudo, más denso, estaba 1,8° F más frío que el resto de madera circundante (Sadoh & Murata, 1994). Steele y Quin calentaron pino amarillo a 250° durante 300 segundos. Las temperaturas medidas en el proceso de enfriamiento revelaron que los nudos estaban 8° F más calientes que la madera circundante.

El desarrollo de la tecnología permite aplicaciones combinadas de TEND como por ejemplo la generación de termogramas 3D que pueden tomarse desde el aire por medio de un vehículo aéreo no tripulado.

Tal y como ejemplifica la Figura 2.4-19, las aplicaciones de IRT son innumerables, si bien entre las más usadas en la conservación del patrimonio arquitectónico en USA, destacan:

- Detección de pérdida de adherencia superficial -delaminación) (Bosiljkov, 2010)
- Localización de oquedades superficiales (Bisegna, 2013).
- Localización de actividad de termitas.
- Diferenciación de fases constructivas o detección de reparaciones.
- Localización de aperturas tapiadas.
- Localización de canalizaciones.
- Mapeado de humedades y fenómenos de capilaridad.
- Análisis de irregularidades bajo morteros de acabado, estucos y frescos (Bodnar, 2012).
- Localización de materiales introducidos con motivo de restauraciones.
- Estudio de puentes térmicos.
- Localización de nidos o seres vivos dentro de paredes.
- Determinar existencia de materiales de diferente naturaleza.

- Evaluar daños estructurales tras terremotos.
- Evaluar la eficacia de tratamientos de consolidación.
- Es una herramienta versátil y útil en el diagnóstico y análisis preventivo (Paoletti, 2013).
- Estudio de fugas de aire.
- Diagnóstico de membranas impermeabilizantes en tejados.
- Determinar el contenido de humedad en elementos de ladrillo poroso.

## 2.4.1.7. VENTAJAS Y LIMITACIONES DE LA TÉCNICA DE IRT

---

### VENTAJAS

- No requiere contacto con el elemento a investigar, lo que permite aplicar la técnica en todos los casos independientemente del estado de deterioro.
- No requiere de iluminación para realizar el test.
- Proporciona resultados instantáneos in situ en tiempo real y sin necesidad de post-procesado.
- Es una técnica intuitiva, fácilmente interpretable, aunque es necesaria cierta especialización para aplicar la técnica y no cometer errores de interpretabilidad.
- Es versátil, rápida y en la mayoría de los casos los resultados son fiables e instantáneos.
- Es una técnica respetuosa con el medio ambiente y segura para las personas y el entorno.
- En su aplicación pasiva no requiere de fuente de calor externa.
- En su aplicación pasiva no se requiere alterar las condiciones ambientales durante la experimentación.

- Es la técnica ideal para el estudio de pérdidas energéticas. Así como una herramienta muy útil en el diagnóstico y mantenimiento preventivo.

## LIMITACIONES

- Puede dar lugar a lecturas erróneas si el técnico que ejecuta la toma de termogramas no tiene formación adecuada.
- Es una técnica limitada, y en muchos casos no se puede asegurar la obtención de resultados hasta haber realizado el test.
- En su aplicación pasiva, los tiempos de espera pueden ser largos.
- En su aplicación pasiva el test depende de las condiciones ambientales sin que el técnico pueda hacer nada para controlarlas.
- Se obtienen mejores resultados a la apropiada distancia, cerca del objeto, pero lo suficientemente lejos como para captar el conjunto para poder analizar por comparación. Dicha distancia no siempre es posible, por ejemplo, las bóvedas en la nave central de una iglesia suelen estar lejos para tomar lecturas desde el suelo y es complicado registrar termogramas que no estén demasiado próximos al trasdós.
- Puede ser costoso y complicado calentar grandes zonas para su aplicación activa.
- En muchos casos en conservación del patrimonio puede no ser posible su aplicación activa, que es más efectiva, en términos generales que su aplicación pasiva.

## 2.4.2. GEO-RADAR (GROUND PENETRATING RADAR -GPR-)

### 2.4.2.1. INTRODUCCIÓN

El geo-radar, también llamado radar de penetración terrestre o radar inferior, es un método geofísico que utiliza ondas electromagnéticas de corta duración (entre 1 ns y 10 ns) (Pellicer Llopis, 2012) en la frecuencia de las microondas (frecuencia ultra alta –UHF-/ frecuencia muy alta –VHF-) para obtener imágenes bajo la superficie de los materiales (Figura 2.4-24). Se trata de una de las técnicas no destructivas de detección más efectivas y utilizadas; la técnica se basa en el principio de reflexión de ondas electromagnéticas que se propagan en un medio, y que se definen teóricamente a partir de las ecuaciones básicas que Maxwell formuló en 1867, relacionando el campo eléctrico y magnético con sus fuentes (Diamanti & Redman, 2012). Partiendo de las ecuaciones de Maxwell y de la ecuación general de propagación de ondas, se pueden obtener las relaciones que rigen las características de la propagación de una onda electromagnética en función de las propiedades del medio por el que se propaga.

Existen aplicaciones de geo-radar en variedad de medios tales como piedra, tierra, hielo, agua, materiales cerámicos, morteros y hormigón. Esta técnica permite detectar elementos como superficies de objetos (interfases), cambios en las propiedades del material, oquedades y grietas. Puede operar a menores frecuencias que otras técnicas por lo que puede alcanzar profundidades mayores.

		Frecuencia	Longitud de onda	Aplicaciones
RADIACION IONIZANTE	Y	Rayos Gamma	300 EHz 1 pm	Esterilizar equipos médicos y alimentos.
	HX	Rayos X duros	30EHz 10 pm	
	SX	Rayos X blandos	3 EHz 100 pm	Medicina
	EUV	Ultravioleta extremo	300 PHz 1 nm	
ESPECTRO VISIBLE	NUV	Ultravioleta cercano	30 PHz 10 nm	En astronomía para detectar estrellas. Mandos a distancia en televisiones y otros aparatos.
	NIR	Infrarrojo cercano	3PHz 100 nm	
	MIR	Infrarrojo medio	300 THz 1 μm	
INFRARROJOS	FIR	Infrarrojo lejano/submilimétrico	3 THz 100 μm	Comunicaciones vía satélite, comunicaciones de transmisión de datos (UWB), radares basados en UWB. Hornos microondas.
	EHF	Frecuencia extrema alta	300 GHz 1 mm	
ONDAS DE RADIO	SHF	Frecuencia súper alta	30 GHz 1 cm	Televisión UHF, telefonía celular, comunicaciones militares. GPR.
	UHF	Frecuencia ultra alta	3 GHz 1 m	
	VHF	Frecuencia muy alta	300 MHz 1 m	Radio FM, televisión, radioaficionados, comunicaciones militares.
	HF	Alta frecuencia	30 MHz 10 m	
	MF	Frecuencia media	3 MHz 100 m	"Onda corta" Radiodifusión, comunicaciones militares, radioaficionados.
	LF	Baja frecuencia	300 KHz 1 Km	Radio difusión AM
	VLF	Muy baja frecuencia	30 KHz 10 Km	Navegación aeronáutica y marina
	ULF	Frecuencia ultra baja	3 KHz 100 Km	Comunicaciones militares
	SLF	Frecuencia súper baja	300 Hz 1 Mm	Equivalente a la frecuencia sonora normal en la voz humana.
	ELF	Frecuencia extrema baja	30 Hz 10 Mm	Ondas electromagnéticas de frecuencia equivalente a sonidos graves que percibe en oído humano.
			3 Hz 100 Mm	Equivalente a los sonidos más graves de percepción del oído humano.

Figura 2.4-24 Espectro electromagnético. Resaltadas en naranja las frecuencias utilizadas en GPR



## 2.4.2.2. ANTECEDENTES HISTÓRICOS

---

El 30 de abril 1904 Christian Hülsmeier obtuvo la primera patente mundial de tecnología de radar<sup>17</sup>. En 1910, Heinrich Löwy y Gottherf Leimbach obtuvieron la patente para aplicar esta tecnología para detectar objetos enterrados<sup>18</sup>. El sistema que inventaron utilizaba antenas de superficie y ondas continuas. El radar por pulsos lo introdujo el Dr. Hülsenbeck en 1926<sup>19</sup>. Dicha variación mejoró la resolución en profundidad y es la tecnología que se utiliza actualmente. En 1929 W. Stern llevó a cabo la primera investigación GPR midiendo la profundidad de un glaciar en Austria. Debido a la irrupción de la II Guerra Mundial, el desarrollo de las investigaciones quedaron paralizadas hasta pasada la guerra. Volvió a recuperarse su uso para aplicaciones militares, como por ejemplo inspeccionar áreas en la zona desmilitarizada entre Corea del Norte y Corea del Sur con el fin de localizar túneles.

En 1956, El Said utiliza la interfase de aire detectada por las ondas y las reflexiones del agua para crear una imagen de la profundidad del tablero de agua (ANNAN, 2002). La siguiente experiencia documentada de radiofrecuencia interactuando con materiales geológicos la protagonizó la United States Air Force (USAF), que reportó problemas con el altímetro cuando intentaba aterrizar la aeronave en la capa de hielo de Greenland (Waite & Schmidt, 1961), evento que desencadenó la era de investigación en sondeos atendiendo al eco de ondas en frecuencias de radio sobre hielo; algunos de los grupos de investigación que surgieron desde 1960 a 1965 son el Scott Polar Research Institute en Cambridge, (Baley et al.) y el Geophysical and Polar Research Center en la universidad de Wisconsin (Bentley y Walford), que estuvieron activos en regiones polares y glaciares. Durante la década de 1970, diferentes equipos científicos comenzaron a estudiar más aplicaciones de la tecnología GPR para visualizar el subsuelo. En 1973, Cook explora el uso en minas de carbón. En 1972, Holser et al. (Holser, Brown, & Roberts, 1972), en 1973 Thierbach (Thierbach, 1973) y en 1978 Unterberger, iniciaron evaluaciones en depósitos enterrados de sal.

Este periodo fue el comienzo de la misión lunar de ciencia del programa Apollo; diferentes experimentos se llevaron a cabo con el fin de evaluar el subsuelo lunar,

---

<sup>17</sup> Patente DE 165 546

<sup>18</sup> Patente DE 237 944

<sup>19</sup> Patente DE 489 434

que se creía tenía características eléctricas similares a las del hielo terrestre (Annan, 1973). Descubrimientos clave durante este periodo fueron la variación de los campos de ondas en la superficie terrestre dependiendo del tipo de antena y la modificación de la direccionalidad de las ondas de la antena (Figura 2.4-25).

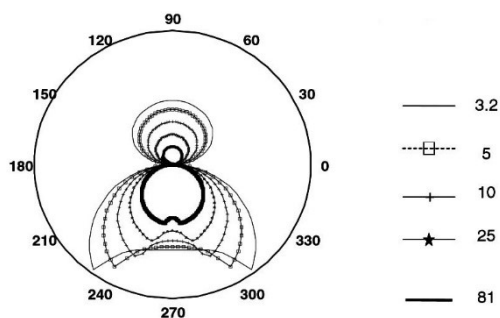


Figura 2.4-25 Variación del patrón de radiación de una antena en función de la constante dieléctrica del medio. Gráfico fruto de la investigación de Annan 1965-1970 (Annan, 1973).

Entre 1970 y 1975 hubo numerosos avances. El programa de exploración lunar del Apollo 17 incluía un sistema de evaluación similar al que propusiera El Said en 1956 (Ward, et al., 1973) y llevaba un radar similar al utilizado entonces en el hielo terrestre, y que tomó medidas del subsuelo lunar (Simmons, et al., 1973).

En 1974 Morey fundó la Geophysical Survey Systems Inc (Morey, 1974), que fabrica y vende sistemas de GPR desde entonces. En 1975 y 1987 Olhoeft (Olhoeft, 1975) y en 1976 Annan (Annan & Davis, 1976) and Davis divulgaron investigaciones que condujeron a un mejor conocimiento y comprensión del carácter eléctrico de materiales geológicos y de la relación entre la conductividad eléctrica y la polarización dieléctrica de estos materiales (Olhoeft, 1987).

La necesidad de utilizar radares con menores frecuencias fue reportada por Watts and England en 1976 (Watts & England, 1976). La primera vez que se tenga constancia documental que la técnica fue aplicada al campo de la arqueología fue en 1978 por Dolphin et al del Stanford Research Institute (Dolphin, 1978).

Después, empresas de infraestructuras y construcción comenzaron a utilizar la técnica para localizar conductos, cavidades y otros elementos bajo tierra. En la década de 1980 se comenzó a utilizar para detectar depósitos de agua y sal en el subsuelo. Se realizó un sustancioso trabajo de investigación en las minas de potasa al oeste de Canadá, lo cual llevó a una mejora cada vez mayor de las mediciones a través de esta técnica, llevados a cabo por el Geological Survey of Canada (Annan, Davis, & Gendzwill, 1988). Avances similares ocurrieron en minas de carbón (Coon, Fowler, & Schafers, 1981).

Hasta entonces, la marca Geophysical Survey Systems Inc. seguía siendo el mayor suministrador de tecnología radar; en la década de los 80 surgió la firma

Enscó/Xadar. Uno de los mayores retos a los que se enfrentaba la industria entonces, era la dificultad de utilizar esta tecnología en lugares remotos; los equipos eran voluminosos, pesados y consumían mucha energía. Otro reto entonces era conseguir digitalizar la información.

Durante la primera mitad de la década de 1980, surgió un interés exponencial por las potenciales posibilidades de la tecnología radar. Al mismo tiempo se comenzó a tomar conciencia de que algunos medios no eran aptos para su aplicación. Existía confusión cuando se detectaban errores, no sabiendo si atribuirlos al equipo o a la naturaleza de los materiales estudiados. Además, no existía ningún proyecto con dotación económica suficiente para favorecer significativamente el desarrollo de la tecnología. Las firmas OYO en Japón y Xadar en Canadá desarrollaron conjuntamente un equipo denominado “Geo-radar,” que obtuvo cierto éxito comercial en Europa. En 1981 se fundó la firma A-Cubed Inc., cuyos avances tecnológicos derivaron años más tarde en la serie de GPR pulseEKKO (Davis, Annan, Black, & Leggatt, 1985).

En paralelo a esta evolución, varios países buscaban soluciones para desechar residuos nucleares bajo roca sólida y con tal objetivo se funda la Swedish Geological Survey, para estudiar y desarrollar el radar de pozo (*borehole radar*) (Olsson, Falk, Forslund, & Sandberg, 1987). La aplicación para evaluación de carreteras y mapeado de instalaciones también tiene su origen en esta época, si bien la tecnología todavía no estaba preparada para proveer resultados óptimos (Ulriksen, 1982). Otras aplicaciones documentadas se llevaron a cabo en el terreno militar por el Southwest Research y el U.S. Army, concretamente sobre el radar de pozo para detectar túneles.

Una nueva aplicación que la U.S Environmental Protection Agency puso en práctica fue la utilizar la tecnología radar para estudiar suelos muy contaminados y proceder a elaborar planes para su limpieza (Benson, Glaccum, & Noel, 1984). En 1988 la firma Sensors & Software nace de A-Cubed Inc. y empieza a comercializar la línea de tecnología radar pulseEKKO.

Otras aplicaciones como la clasificación de terrenos para la agricultura (Doolittle & Asmussen, 1992) o adaptaciones para modelados sísmicos (Annan & Chua, 1992) aparecieron entre 1990 y 1992.

En la primera mitad de la década de 1990 la firma Geophysical Survey Systems Inc. gozaba de buen éxito comercial y fue comprada por OYO Corporation. Al

mismo tiempo, nació Mala Geoscience de un equipo que había formado parte de Swedish Geological Survey. ERA, en el Reino Unido, comenzó a tener más actividad investigando sobre nuevos usos, como detección de minas.

Al mismo tiempo, en el campo de la investigación se avanzó en varias líneas: adquisición múltiple de datos (Annan, Fisher, & Mc. Mechan, 1992), procesado digital de datos (Mc. Mechan, 1995) y simulación numérica 2D. También se avanzó exitosamente en la aplicación de la técnica en campos como la arqueología (Goodman, 1994), el medioambiente (Annan & Brewster, 1994), y la estratigrafía geológica (Jol H. , 1996).

En 1995 comenzaron a formalizarse encuentros bianuales mundiales de profesionales del GPR: *The International Conference on Ground Penetrating Radar (GPR)*. En esos encuentros se compartían avances, se discutían problemas y se documentaban las novedades en boletines que servirían de valiosa fuente de información.

Entre 1995 y 2000 todos los avances corresponden a la evolución informática. La modelación numérica de 3D comenzó a ser posible con grandes ordenadores (Lampe & Holliger, 2000), así como el manejo de gran cantidad de datos y la posibilidad de manipularlos rápidamente, lo que propicio la adquisición de datos en retícula para procesar proyectos completos (Grasmueck, 1996). Las firmas comerciales comenzaron a tener disponibles equipos más ligeros y eficaces, como la línea Noggin de Sensor & Software Inc.

Nuevos y más potentes grupos de investigación surgieron en diferentes universidades: ETH, liderado por Alan Green, el equipo de la Universidad de Texas, liderado por George McMechan o el equipo de TU-DELFT liderado por Jakob Fokkema son algunos de ellos. Una de líneas de investigación en esos momentos giraba en torno a la necesidad creciente por parte de la industria de disponer de toma de datos GPR con localización precisa (Greaves, Lesmes, Lee, & Toksoz, 1996).

Durante la última década, los avances más significativos han consistido en la optimización de equipos más manejables que consumen menos energía y en la mejora de algoritmos de procesado y pos-procesado, cuyo fin último es facilitar la interpretación de resultados de manera gráfica, detectando elementos concretos y representando los resultados en 3D.

Los sistemas GPR como los que se utilizan hoy en día se comenzaron a comercializar en torno a 1985. Actualmente existen numerosas empresas dedicadas tanto a la manufacturación de aparatos, como a la aplicación de servicios especializados en torno a la tecnología GPR en los Estados Unidos. Diferentes universidades continúan estudiando la tecnología y sus aplicaciones.

Para el futuro próximo, la tendencia de la investigación parece centrarse en cuatro principales líneas. La primera, seguir avanzando en aplicaciones informáticas que den resultados más fácilmente interpretables, que no requieran de personal especializado para su aplicación e interpretación. La segunda línea trabaja en la obtención de equipos cada vez más ligeros y más fáciles de manipular para aplicaciones específicas. El tercer campo en estudio tiene como objetivo desarrollar la técnica para alcanzar mayores profundidades de inspección y la cuarta línea, probablemente la más potente, es la evolución de softwares informáticos y de algoritmos que faciliten la representación de resultados y aumenten la nitidez y la resolución de las imágenes, tanto en 2D *deep slice* como en 3D.

### 2.4.2.3. FUNCIONAMIENTO

---

La técnica, basada en el estudio de las reflexiones de ondas electromagnéticas, utiliza ondas de frecuencias entre 10 MHz y 2,6 GHz aproximadamente, emitidos a través de un sólido por medio de una antena bipolar, que posteriormente se reciben en otra, normalmente ambas alojadas en la misma carcasa. Con dichos transductores (antenas) se va barriendo el elemento a testear. Las ondas reflejadas y el tiempo que tardan en hacerlo indican la distancia a la que se encuentra la superficie que las refleja. La velocidad de propagación depende de las características electromagnéticas del material atravesado; los impulsos se reflejan en las interfases de materiales con propiedades dieléctricas diferentes (Figura 2.4-27). La amplitud de la reflexión en la interfase depende de varios factores como las propiedades dieléctricas del material, la amplitud de la onda emitida y la absorción de la energía de la onda a través de material (Hugenschmidt & Loser, 2008).



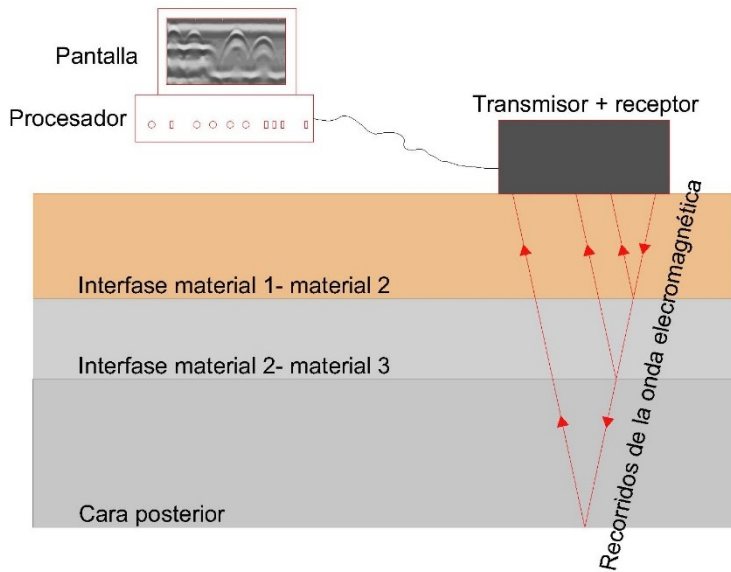


Figura 2.4-27 Esquema de funcionamiento del GPR. Las ondas electromagnéticas se reflejan en las diferentes interfases. La energía que emite la antena se refleja en cambios de los parámetros electromagnéticos del medio: conductividad, constante dieléctrica/permitividad relativa y permeabilidad magnética. Estos cambios se dan ante materiales diferentes, variación del contenido de agua o diferente grado de compactación del medio.

MATERIAL	CONSTANTE DIELÉCTRICA $\epsilon_r$
	(adimensional)
Aire	1.00059
Agua potable	80.5
Arcilla	5 - 40
Arena seca	3 - 5
Arena saturada	20 - 30
Granito	4 - 8
Hielo	3 - 4
PVC	30 - 40

Figura 2.4-27 Valores de la constante dieléctrica para diferentes materiales

La profundidad de penetración de la onda, y por tanto la capacidad de alcance de la técnica, depende de la frecuencia de la antena y de las propiedades electromagnéticas de los materiales en estudio (Rodríguez Abad, 2009).

La longitud de onda electromagnética es inversamente proporcional a la frecuencia; frecuencias mayores a 500 MHz presentan gran atenuación de energía por lo que penetran menos profundidad, pero tienen una resolución espacial de más calidad que las bajas frecuencias, que penetran más profundo, pero tienen menor poder resolutivo. La mayor penetración con óptimos resultados se obtiene en hielo, con alcances de miles de metros. Terrenos arenosos secos, así como rocas tales como granito, arenisca u hormigón, tienden a ser aislantes en lugar de conductores, llegando a profundidades de penetración de hasta 15 metros. En terrenos húmedos y/o arcillosos con alta conductividad, la penetración puede ser tan mínima como unos pocos centímetros ya que la onda se atenúa rápidamente (Rinaldi, 2002). Como norma general, por cada pie que el elemento está enterrado bajo tierra, el diámetro de éste debe incrementarse una pulgada para ser visto; por ejemplo, una tubería a 4 pies (1,22 m) de profundidad debe ser al menos de 4 pulgadas (10,16 cm) de diámetro para ser detectada con tecnología GPR. La utilización de antenas de alta frecuencia y por tanto de alta definición en el campo de la conservación arquitectónica es posible en la mayoría de los casos, dado que los elementos de interés están dentro de los alcances de este tipo de antenas

(Moropoulou & et Al., 2013). Un estudio de Castelles et al. (Caselles & et Al., 2010) demuestra que, en aplicaciones en patrimonio arquitectónico, la resolución horizontal es aproximadamente igual a la longitud de onda mientras que la resolución vertical puede llegar a 0,5 la longitud de onda.

La capacidad de penetración depende, además de las propiedades del medio, de la antena utilizada (Apartado 2.4.2.4 Equipos, instrumentación). La retícula de escaneos depende del tamaño del objetivo que se quiera identificar y la calidad de los resultados que se requiera. El espaciado puede variar desde uno a seis metros para inspecciones de terrenos y de tres a quince centímetros para estructuras arquitectónicas, aunque en casos especiales estos valores pueden variar.

La constante dieléctrica del medio ( $\epsilon_r$ ) se puede obtener utilizando una aproximación a la fórmula del retraso de la refracción (Di Capua & et Al., 2008), que relaciona la velocidad de la onda ( $v$ ), con la profundidad ( $x$ ), el tiempo del recorrido, y la velocidad en el vacío ( $c$ ):

*Ecuación 2.4-13*

$$\epsilon_r = \left(\frac{c}{v}\right)^2 = \left(\frac{ct}{2x}\right)^2$$

Para obtener la relación entre el tiempo de propagación y la profundidad alcanzada, es necesario saber la constante dieléctrica (también llamada permitividad relativa del medio) o la velocidad de propagación. Estas fórmulas, se explican en el apartado 2.4 “Características de las Ondas Electromagnéticas”

*Ecuación 2.4-14*

$$v = c/\sqrt{\epsilon_r}$$

*Ecuación 2.4-15*

$$h = \left(\frac{c}{2(\sqrt{\epsilon_r})}\right)\Delta t$$

Donde,

h, distancia al reflector

v, velocidad de propagación

c, velocidad de propagación en el vacío

$\epsilon_r$ , constante dieléctrica

$\Delta t$ , distancia de tiempo registrada entre la onda directa y la reflejada

## 2.4.2.4. EQUIPOS, INSTRUMENTACIÓN

Un equipo básico de GPR está compuesto de unidad central de control de la radiación, monitor, una o dos antenas, y un sistema de grabación de registros. Además, pueden añadirse al equipo básico algunos accesorios como teclados y GPS. En las aplicaciones para patrimonio arquitectónico se utilizan equipos ligeros que albergan todos los componentes en una misma carcasa. Existen diferentes tipos de equipos y antenas dependiendo de la aplicación.



Figura 2.4-2 Esquema básico de componentes de un equipo GPR. a. Modelo GSSI Structurescan Mini, que alberga todos los componentes en una misma carcasa de 15 x 17 x 22 cm b. Modelo GSSI Structurescan Standard, cuya pantalla de visualización se encuentra en una pantalla independiente del resto del equipo. c. Modelo Imx100 de Sensors and software. Con antenas, unidad de control y pantalla de visualización en diferentes carcasas, todas ellas montadas sobre un carro. d. Modelo GSSI Radar Scan 30, con todos sus componentes independientes. U: Unidad de control. A: Antena. P: Pantalla de visualización (B. de Miguel, B. de Miguel, Sensors and Software, GSSI)

## ANTENAS

La antena transmite el pulso electromagnético al medio y recibe la energía de la reflexión en forma de onda electromagnética. La manera habitual de caracterizar las antenas es atendiendo a su frecuencia de emisión. La longitud de onda ( $\lambda$ ) del pulso emitido depende de la frecuencia ( $f$ ) y de la velocidad de la onda en el medio ( $v$ ).

Ecuación 2.4-16

$$\lambda = \frac{v}{f}$$

Siendo:

$\lambda$  longitud de onda, en metros (m) en el S.I.

$v$ , velocidad de la onda, en metros por segundo (m/s) en el S.I.

$f$ , frecuencia, en hercios (Hz) en el S.I.

A mayor frecuencia, menor longitud de onda y por tanto menor profundidad de penetración. Así pues, la frecuencia de la antena determina tanto el alcance del método como su resolución (Figura 2.4-29)<sup>20</sup>.

FRECUENCIA	MÁXIMA PROFUNDIDAD DE PENETRACIÓN	APLICACIÓN	EJEMPLO DE MÍNIMO OBJETO VISIBLE
2600 MHz	hasta 0.4 m	Evaluación de hormigón, piedra, mortero. Detección de oquedades.	
2000 MHz	hasta 0.4 m	Evaluación de hormigón, piedra, mortero. Detección de oquedades.	Filamento del grosor de hilo de pescar.
1600 MHz	hasta 0.5 m	Evaluación de hormigón, piedra, mortero. Detección de oquedades.	
900 MHz	hasta 1 m	Evaluación de hormigón, piedra, mortero. Detección de oquedades.	Conducto de $\varnothing$ 0.5 cm a 3 m de profundidad. Malla de alambre, superficial.
400 MHz	hasta 4 m	Localización de instalaciones, ingeniería, detección de oquedades.	Tubería de $\varnothing$ 4 cm a 4 m de profundidad. Conducto de $\varnothing$ 0.5 cm a 1.8 m de profundidad
270 MHz	6 m	Geotecnia, ingeniería	
200 MHz	9 m	Geotecnia, ingeniería, medioambiente	Tubería de $\varnothing$ 90 cm a 9 m de profundidad. Tubería de $\varnothing$ 15 cm a 4 m de profundidad
100 MHz	15 m	Geotecnia, ingeniería, minería	Un túnel a 15 m de profundidad. Tubería de $\varnothing$ 60 cm a 6 m de profundidad
16-80 MHz	50 m	Geotecnia	
Air-Launched Horn:			
2.0 GHz	0.75 m	Espesor de firme y evaluación de calzadas	
1.0 GHz	0.9 m	Evaluación de tableros de calzadas y puentes.	

Figura 2.4-29 Tipos de antenas según frecuencia y principales aplicaciones. GSSI. \* Las profundidades de penetración pueden variar dependiendo de las condiciones del medio (GSSI, 2016).

<sup>20</sup> <http://www.geophysical.com/antennas>

Por ejemplo, en paredes de gran espesor y presencia de humedad se recomiendan frecuencias de 500 MHz mientras que para paredes poco espesas frecuencias en torno a 1 GHz suelen funcionar.

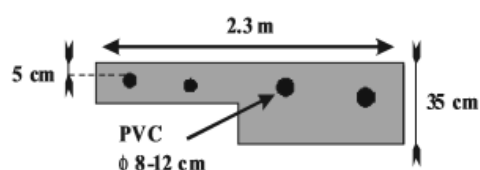
En función de las características del campo radiado las antenas se clasifican en:

- Isotrópicas o ideales: radian energía en todas las direcciones del espacio sin ninguna dirección privilegiada. El frente de ondas sería esférico si se tratase de un medio homogéneo y continuo.
- Direccionales: tienen una dirección privilegiada de radiación.

Conforme aumenta la permitividad dieléctrica de un medio, la direccionalidad de la antena aumenta también. Esto conlleva que la anchura del lóbulo de radiación sea menor, de manera que un mayor porcentaje de energía se propaga en la dirección deseada.

Las antenas también se pueden clasificar en:

- Sin apantallar o no blindadas (*unshielded*): no disponen de carcasa de protección que proteja al centro de emisión. Suelen darse en antenas con bajas frecuencias, por ello se utilizan en aplicaciones que requieran máxima penetración en profundidad. No se utilizan en aplicaciones para patrimonio arquitectónico.
- Apantalladas o blindadas (*shielded*): disponen de una carcasa protectora que impide la propagación de ondas residuales en otras direcciones diferentes a la intencionada. Se suelen utilizar en aplicaciones de alta resolución, presentan mayores frecuencias.



Esquema de un elemento de hormigón tuberías de PVC

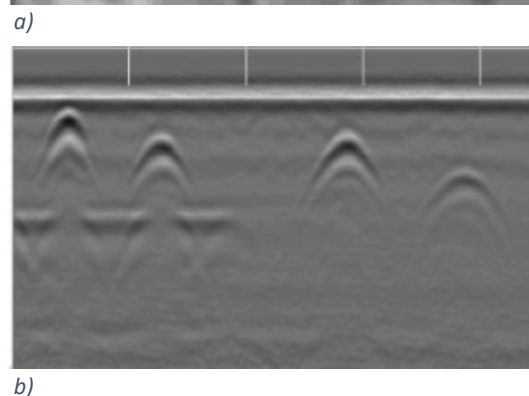
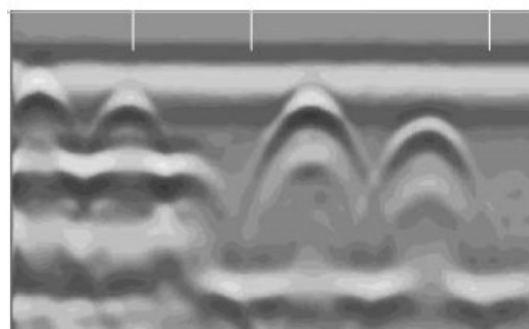


Figura 2.4-30 Ejemplo de frecuencia-resolución. Arriba el radargrama resultante con una antena de 90 MHz. Debajo, el radargrama del mismo elemento de hormigón, utilizando una antena de 1,5 GHz.



En este tipo se engloban los modelos utilizados en aplicaciones para el patrimonio arquitectónico.

- Tubulares (*borehole*): se utilizan en la prospección de perforaciones o pozos.

Existen otras clasificaciones de antenas GPR, entre otras la que diferencia las antenas en función de la disposición de emisor y receptor:

- Monoestáticas: únicamente disponen de una antena que hace la función de emisor y de receptor.
- Biestática: una antena es el emisor de ondas electrostáticas y otra independiente es el receptor.

## UNIDAD CENTRAL

La unidad central controla y coordina la(s) antena(s), accesorios, y almacenamiento y gestión de datos. La unidad consta del hardware y del software que lleva instalado, y dependen en gran medida de la casa comercial. El hardware dispone de una pantalla para visualizar tanto los parámetros del GPR como los datos que la unidad va registrando. Con el fin de situar la toma de datos, los GPR llevan instalados, o adaptados, odómetros o GPS.

En la actualidad, lo habitual es que los GPR utilizados en restauración tengan todos los componentes del GPR incluidos en una misma carcasa. El modelo de la Figura 2.4-31 es compacto y ligero (1,6 Kg) de manera que puede ser utilizado incluso en combinación con técnicas de acceso de sistemas industriales de cuerdas, lo cual hace la técnica más fácilmente utilizable en estructuras donde la necesidad de instalación de andamios haría inviable la técnica. Este modelo, StructureScan™ Mini de la casa GGIS, está especialmente diseñado para evaluaciones en hormigón, localiza armaduras, conductos, cables post-tensados, oquedades, grosores; es capaz de localizar elementos metálicos y no metálicos hasta a 20 pulgadas (50,8 cm). El software incorpora un sistema de auto detección de elementos de interés que calcula profundidad de los elementos. Este equipo es muy utilizado en conservación del patrimonio arquitectónico ya que además de hormigón es adaptable a piedra, tierra, mortero y ladrillo.

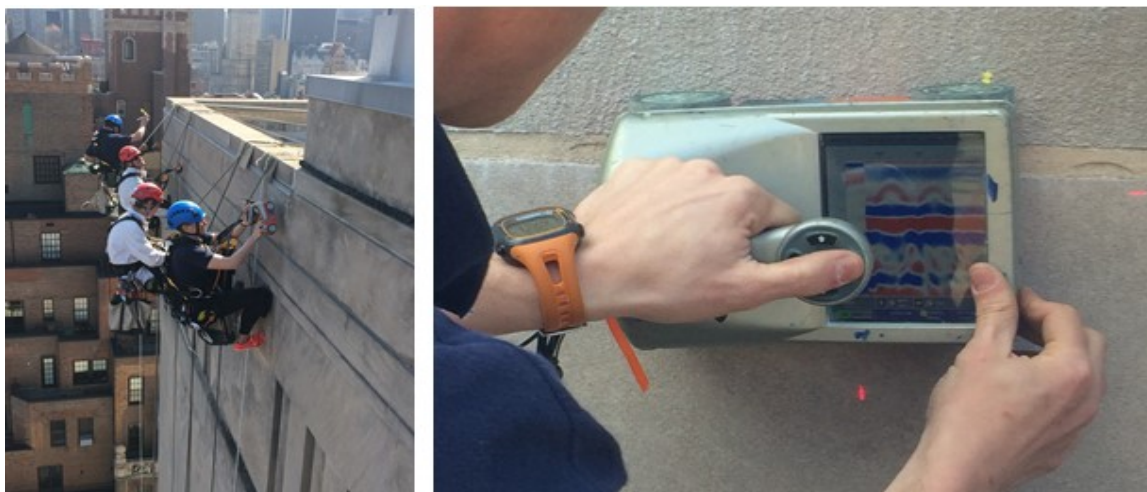


Figura 2.4-31 GPR Structure Scan™ Mini. En una misma carcasa se incluyen todos los componentes del equipo.

## REGISTROS DE GPR

Los parámetros de un registro son los datos que genera un registro, y la manera de exponerlos depende del modelo de software que se utilice. En general, todos ellos muestran el rango, la posición, los puntos por traza, la velocidad de transmisión y registro, la ganancia y los filtros aplicados o que se pueden aplicar. El rango, normalmente en ns, define la máxima coordenada vertical alcanzada en el radargrama, es decir su longitud en el tiempo. Las reflexiones alcanzadas en tiempos superiores al rango no se registran, por lo que se debe seleccionar de manera que los registros de las posibles anomalías queden incluidos. Para ajustar correctamente el rango es conveniente tener un conocimiento preliminar de la posible profundidad de estudio, así como de la velocidad aproximada de la onda por dicho medio.

La posición inicial de la señal es un parámetro por el que se elige el tiempo de inicio de la ventana temporal. El tiempo final es la suma del tiempo de inicio y el rango.

Los puntos por traza son el número de puntos utilizados para la representación de cada traza. Para una correcta representación, a mayor rango, más elevado tiene que ser el número de puntos por traza.

Los equipos actuales pueden emitir hasta 400 trazas por segundo y pueden tomar hasta 16.000 puntos por traza (modelo SIR 4000 de GSSI). Durante la realización del test, la velocidad de movimiento del aparato debe ser lo más constante posible. Los equipos de última generación permiten adquisición de datos a una velocidad de 120 Km/h (modelo SIR 30 de GSSI con antenas de 1 GHz y 2 GHz (Figura 2.4-33)).

System	
Antenna Support	Compatible with all GSSI antennas
Number of Channels	Records data from 1 single-frequency antenna or 1 dual-frequency antenna
Data Storage	32 GB
Display	Enhanced 10.4" LED display with internal high brightness, Active matrix 1024 x 768 resolution and 32-bit color
GPS	Data logged internally
Display Modes	Linescan, Linescan plus O-scope, Wiggle trace Full 3D, 256 color bins are used to represent the amplitude and polarity of the signal
Data Acquisition	
Data Format	RADAN® (.dzt)
Output Data Format	32-bit
Scan Interval	User-selectable, up to 400 scans/sec
Number of Samples per Scan	256, 512, 1024, 2048, 4096, 8192, 16384
Operating Modes	Continuous (time) or survey wheel (distance triggered) or point mode
Time Range	0-20,000 nanoseconds full scale, user-selectable Gain: manual adjustment from -42 to +126 dB Number of segments in gain curve is user-selectable from 1 to 8
Standard Real-Time Filters	Infinite Impulse Response (IIR) - Low and High Pass, vertical and horizontal Finite Impulse Response (FIR) - Low and High Pass, vertical and horizontal
Advanced Real-Time Filters	Migration, Surface Position Tracking, Signal Noise Floor Tracking, Adaptive Background Removal
Automatic System Setups	Storage of an unlimited number of system setup files for different survey conditions and/or antenna deployment configurations
Automatic Antenna Recognition	Automatic recognition of Smart Antennas to allow maximum compliant transmit rate

Figura 2.4-32 Especificaciones del GPR SIR 4000 de GSSI

Principales compañías que manufacturan tecnología GPR: 3D-Radar, GSSI, GEOTECH, IDS, MALA, RADRAR Systems, Radarteam, Sensors & Software, TRANSIENT Technologies, USRadar, UTSI Electronics.



Figura 2.4-33 Modelo SIR 30 de GSSI con antenas RadarScan-horn de 1 GHz y 2 GHz. Los rangos de profundidad son 0 -0,9 m y de 0 - 0,75 m respectivamente (GSSI).

## 2.4.2.5. REPRESENTACIÓN DE RESULTADOS

---

Los datos registrados son procesados por software especializado en el proceso denominado “procesamiento digital de señales” (DSP) con el fin de facilitar la interpretación. La interpretación de resultados es muy diferente según el objetivo de la investigación con GPR; por ejemplo, una investigación geológica que persiga averiguar las diferentes interfases que componen el subsuelo se basta de un solo perfil 2D para interpretar y comprender la estructura del subsuelo. Sin embargo, los perfiles habituales en arquitectura se caracterizan por discontinuidades y patrones de reflexiones complejas con fuertes variaciones de amplitud, que hacen que la interpretación 2D sea muy compleja, incluso imposible. En estos casos utilizar un sistema que recoja y procese GPR 3D es recomendable y más eficaz para interpretar y comprender estructuras complejas. La contraparte era el drástico descenso de la eficiencia en tiempo debido al tiempo que lleva recoger datos (Green & Lehmann, 1999). Hace más de una década que este proceso puede agilizarse gracias a los avances en sistemas de posicionamiento (Finzi, Francese, & Morelli, 2009). Una tecnología utilizada a este respecto es la del sistema de posicionamiento global (GPS), si bien se requiere de una aceptable cobertura del satélite para obtener resultados precisos. Como alternativa eficaz se utilizan sistemas de estaciones con auto traqueo (TTS) (Boniger & Tronicke, 2010).

La secuencia de onda registrada en función del tiempo se llama traza y contiene características electromagnéticas del medio que atraviesa. Sucesivas trazas contiguas, forman una pseudo-imagen que se denomina *B-scan* o radargrama, normalmente utilizando escala de grises o escala de color para generar la imagen. Como ya se ha explicado, la resolución espacial depende de las características de la onda emitida por el radar y de la investigación (frecuencias, número de escáneres sobre el objetivo y huella de la antena), las propiedades electromagnéticas del medio en estudio y la distancia de la antena al medio (a mayor distancia menor resolución (Caselles & et Al., 2010)). Para detectar un objeto, un mínimo de tres ondas debe impactar con el mismo (Ghasemi & Abrishamian, 2007).

Dependiendo de la aplicación y del aparato y software utilizado, los resultados pueden representarse de diferentes modos:

#### DIAGRAMA DE LA ONDA O TRAZA

La Figura 2.4-34 muestra la representación del registro de una onda, una traza; el eje vertical representa el tiempo, que en aplicaciones de conservación arquitectónica no suele superar los 30 ns. Posteriormente, los datos son procesados en su conjunto, para representarse a través de radargramas, perfiles, planimetrías que detallan profundidades específicas o modelos tridimensionales, más fácilmente interpretables. Si se toman múltiples lecturas en un mismo rastreo, puede obtenerse un modelo 3D o imagen topográfica. Una vez obtenida ésta, los datos pueden presentarse en imágenes tridimensionales o en secciones horizontales, denominadas *depth slices* o *time slices*. La elección de representación gráfica dependerá, entre otros factores, de la aplicación, el presupuesto y el equipo utilizado. Por ejemplo, en arqueología, la *time slice* es muy utilizada porque los patrones horizontales están directamente relacionados con la actividad vital humana.

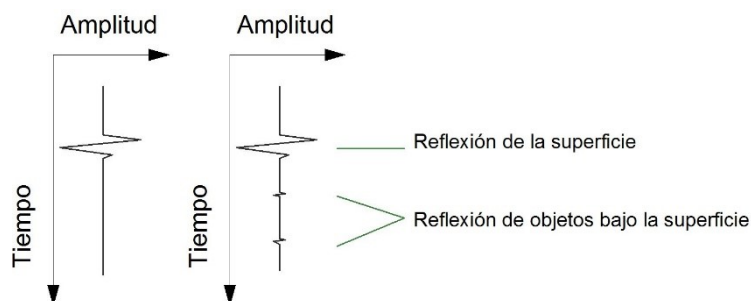


Figura 2.4-34 Traza de un GPR. En la izquierda representada la señal emitida. A la derecha, la señal registrada.

#### RADARGRAMA

Está formado por varias trazas de amplitud (Figura 2.4-35). El eje horizontal representa la distancia sobre la superficie del medio, y en el eje vertical se representa el tiempo doble de propagación de las ondas reflejadas en las interfases electromagnéticas. El número de trazas depende de la velocidad a la que se desplace la antena, la longitud del registro y el número de pulsos por segundo.



Cada una de las trazas es un registro de amplitudes y su conjunto permite el seguimiento de las amplitudes a lo largo del desplazamiento. Esos incrementos de amplitud se deben al aporte de energía de las reflexiones de la onda. Los radargramas, suelen representarse en escala de grises, si bien también se utilizan escalas de colores que permiten efectos

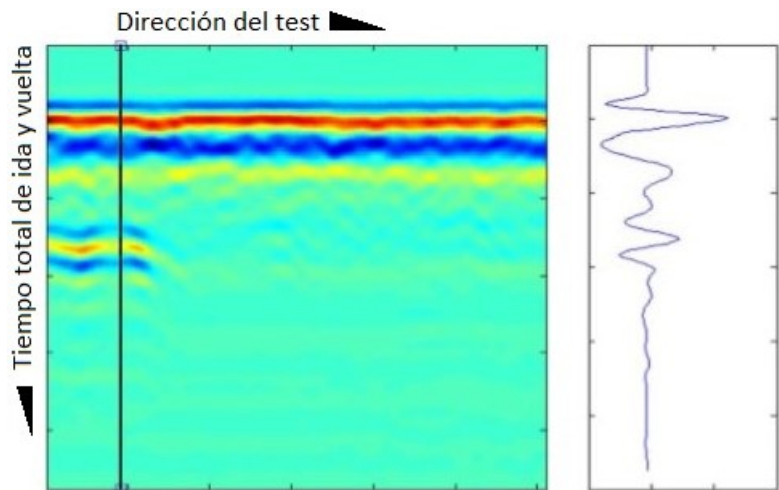


Figura 2.4-35 A la izquierda, radargrama de color; se asigna un color a cada rango de amplitudes. La línea negra vertical indica de dónde se obtiene la traza representada a la derecha.

visuales que clarifican los resultados, o resaltan aquello que interesa en el estudio en cuestión. Para ello, se selecciona una escala que relaciona colores con rangos de amplitudes. La escala puede ser lineal, exponencial, potencial o personalizada, dependiendo de las necesidades específicas del estudio (Figura 2.4-36).

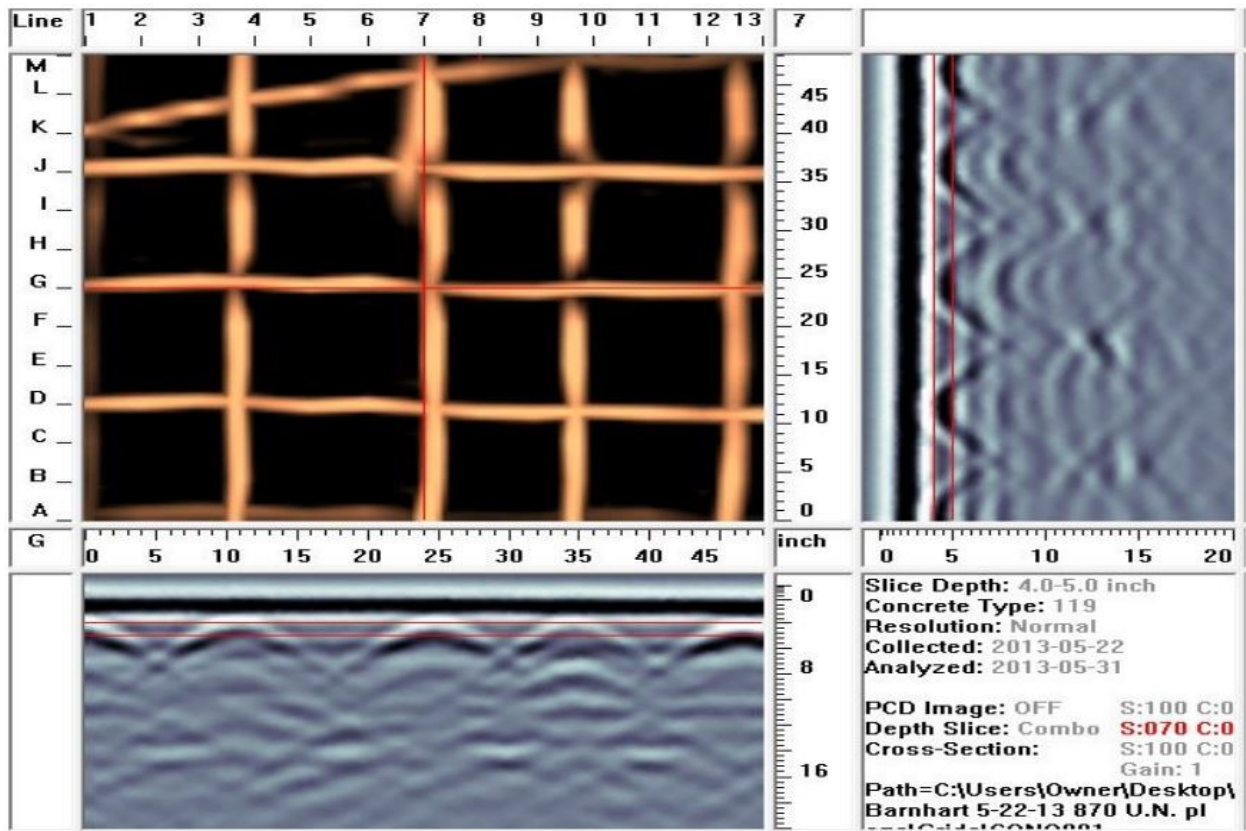


Figura 2.4-36 A la derecha y abajo se representan los radargramas correspondientes a una evaluación GPR realizada a un muro de hormigón. Las líneas rojas marcan la presencia de armado. La esquina superior izquierda corresponde a la representación 2D de los datos de ambos radargramas.

## TIME SLICE

Se trata de una forma de representación gráfica de la sección paralela a la superficie, denominada mapa, a determinada profundidad. Esta forma de representación es particularmente útil en campos como la arqueología. Se obtiene a partir de series de perfiles próximos (una medida habitual es un metro (Goodman & Nishimura, 1993)) y facilita la visualización de localización, forma, profundidad y tamaño de anomalías enterradas en el medio en estudio. En arqueología la profundidad se relaciona con el tiempo, motivo por el cual se denomina a esta forma de representación *time slice*. La técnica del GPR tiene como inconveniente que las reflexiones de elementos superficiales pueden enmascarar las reflexiones de elementos más profundos. Sin embargo, cuando los datos son seccionados en forma de *time slice*, es posible detectar los cambios de amplitud que generan las reflexiones más profundas y por tanto representarlas. Las imágenes de la izquierda en la Figura 2.4-37, fueron tomadas por el equipo estadounidense encabezado por Goodman. La primera, corresponde al yacimiento de Nutubaru en Japón con una antena de 300 MHz de 45 cm de apertura y 8 ns entre times slices; los mapas inferiores muestran diferentes estructuras que los mapas superiores. Especialmente destacable es una estructura en forma circular que aparece a los 24 ns. Se cree que se trata de un foso de 22 m de diámetro relacionado con un antiguo enterramiento.

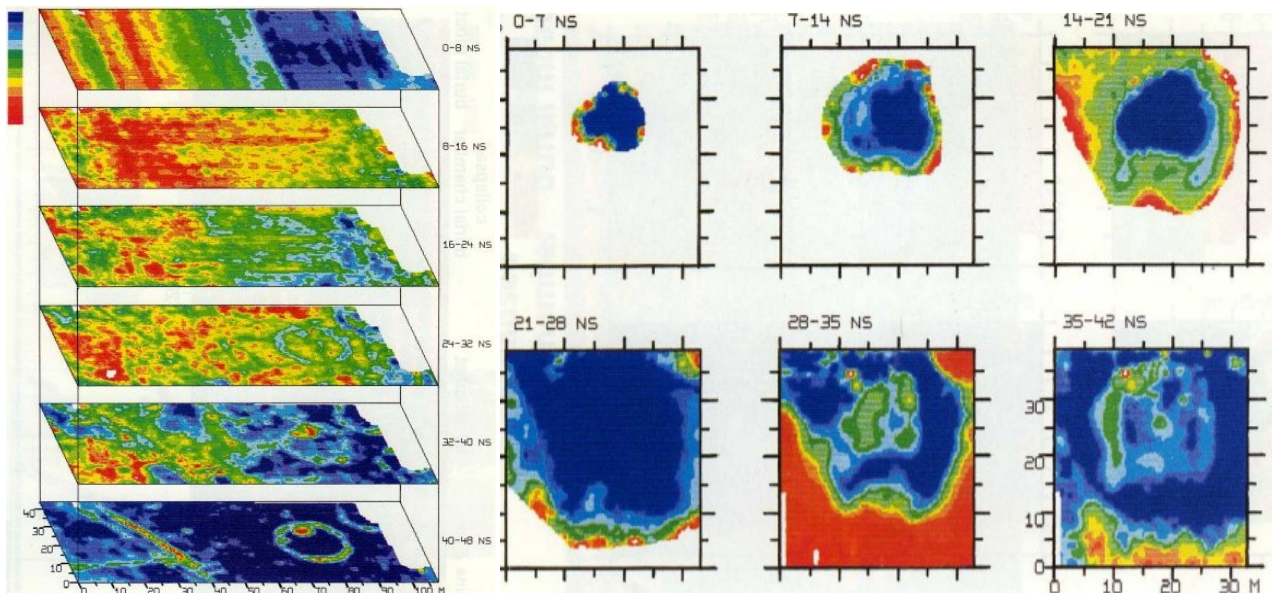


Figura 2.4-37 A la izquierda, time slices del enterramiento Nutubaru. La más profunda muestra una estructura circular de 22 m de diámetro probablemente correspondiente a un enterramiento. A la derecha, Time slices del montículo Spiro House 6 en Oklahoma (Goodman).

Las imágenes de la derecha de la Figura 2.4-37, son del equipo de Goodman y corresponden al yacimiento de Spiro House 6 en Oklahoma, con mapas cada 7 ns. Se trata de los montículos construidos más al oeste del periodo misisipiano (cultura misisipiana) en los Estados Unidos. En este caso, al desconocerse la velocidad exacta, los cálculos se hicieron suponiendo una velocidad constante de 5 cm/ns.

### REPRESENTACIÓN TRIDIMENSIONAL, 3D

En aquellos casos en los que el medio en estudio contiene elementos complejos o en alta densidad, como por ejemplo armados complejos en hormigón, es eficiente representar los resultados de la investigación con GPR en un modelo tridimensional. Diferentes autores han tratado estrategias de adquisición y procesado a partir de datos de alta resolución generados con GPR. Hugenschmidt and Mastrangelo (Hugenschmidt & Mastrangelo, 2007) utilizaron antenas únicas polarizadas para extraer datos y procesarlos para generar un pseudo 3-D. Langenberg et al. (Langenberg, Marklein, & Mayer, 2006) describen una teoría para generar modelos e imágenes a partir de ondas electromagnéticas y acústicas provenientes de técnicas de END en hormigón. Kohl et al. estudian la representación de la fusión de resultados provenientes de diferentes polarizaciones en GPR combinados con ultrasonidos. La adaptación del enfoque de la dispersión lineal inversa (*linear inverse scattering approach* - LISA) basado en una simplificación del modelo de la dispersión electromagnética, permite un procesado rápido, muy útil en representaciones instantáneas *in situ* (Hugenschmidt, Prisco, & Soldovieri, 2009), (Affinito, Alli, Catapano, del Moro, & Soldovieri, 2015). Utilizando este mismo método, Hugenschmidt et al. (Hugenschmidt, Kalogeropoulos, Prisco, & Soldovieri, 2010) generaron una representación 3D del interior de un muro de contención de hormigón con dos capas de armado; utilizaron datos (*3D multipolarization datasets*) generados por dos antenas con diferentes orientaciones (Figura 2.4-38). La utilización de técnicas basadas en el procesado de señales con LISA permite explotar de forma efectiva la diversidad de la polarización haciendo posible generar la imagen de ambas capas de armado. Para ello, se tomaron 512 trazas de 15 ns. por muestra y 400 trazas por metro. En la representación 3D generada a partir de aplicar LISA y fusionar datos de ambas capas de armado, se visualiza con éxito el interior del muro de contención. Para comparar resultados, el mismo estudio utiliza los datos para generar representaciones 2D (en forma de *time slice*) y una 3D sin aplicar LISA.

En los tres casos, la capa más profunda de armado se representa con menos calidad que la capa superficial. Los autores achacan dicha realidad a los límites de la toma de datos y no a la efectividad de los diferentes algoritmos de procesado.

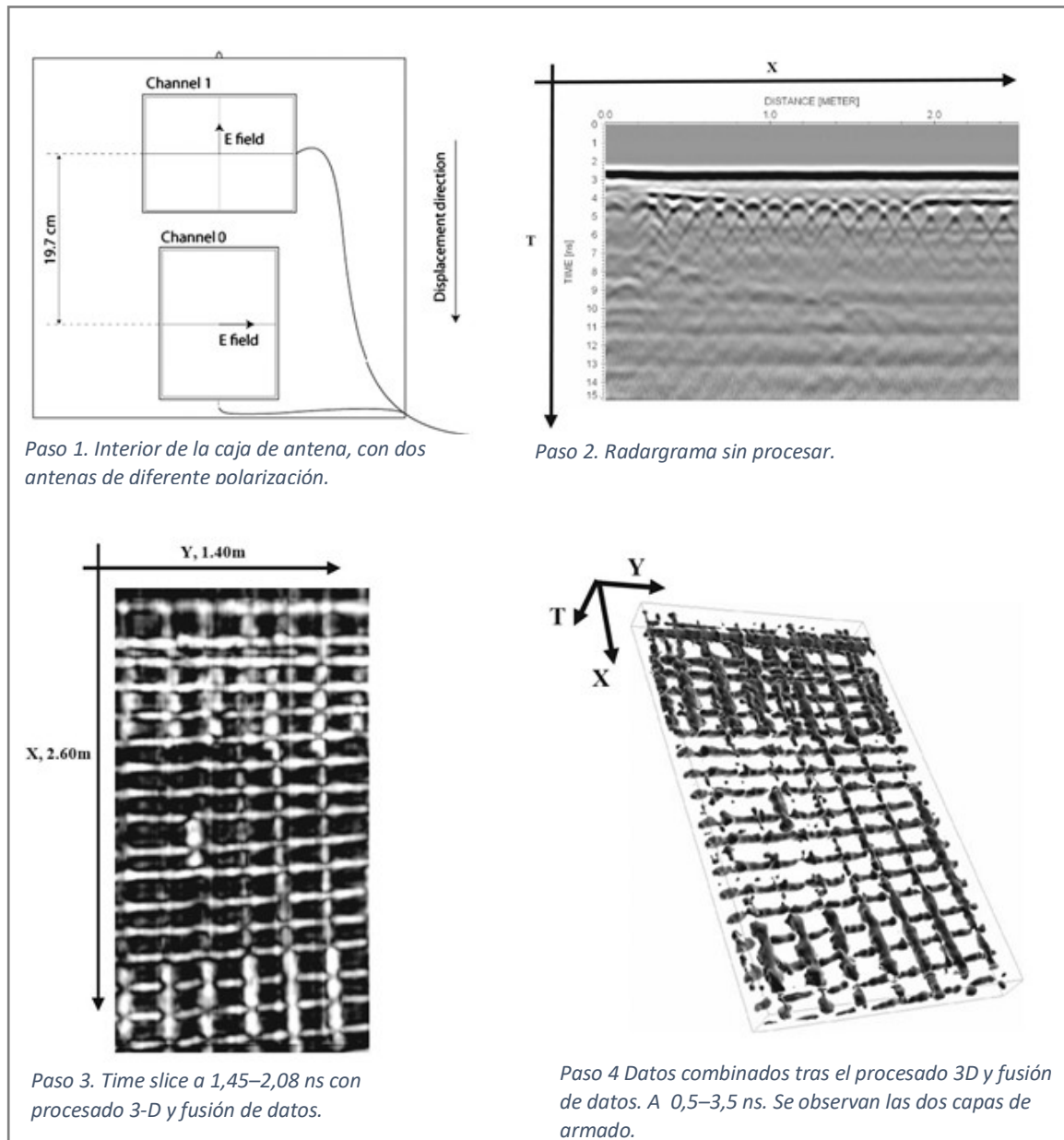


Figura 2.4-38 Diferentes tipos de representaciones presentadas por Hugenschmidt et al.



## MEJORAS EN EL RESULTADO GRÁFICO

Una de las desventajas del GPR es la aparición en los radargramas de contrastes no deseados que distorsionan la presencia de reflectores reales en el medio. Una vez la onda es registrada en la unidad central, existen diferentes métodos para mejorar la calidad del radargrama reduciendo el ruido, mejorando la nitidez e interpretabilidad; el objetivo es obtener imágenes nítidas, para localizar objetos gracias a la implementación de métodos automáticos (Liu & Shen, 1991). Bouzerdoum, Phung y Shao (Bouzerdoum, Shao, & Phung, 2013) proponen utilizar el método de *Sparse representation* (SR) para el análisis de la señal, su clasificación y su representación; demuestran resultados más efectivos que los métodos de *Discret Wavelet transform* y K-SVD.

Clariá et al. (Claria, Molina, & Rinaldi, 2008) proponen una secuencia de métodos de procesamiento de señales GPR que permite optimizar la relación señal-ruido de los radargramas, mejorando así las imágenes al eliminar reflexiones múltiples y superficiales: procesamiento primario de los radargramas que consiste en el realce de contraste para identificar de contrastes no deseados (reflexiones múltiples, ondas directas y reflectores superficiales), *background removal* (eliminación de la representación de las ondas directas) y migración de datos con algoritmo de Saft (mitigación de la distorsión de las ondas reflejadas).

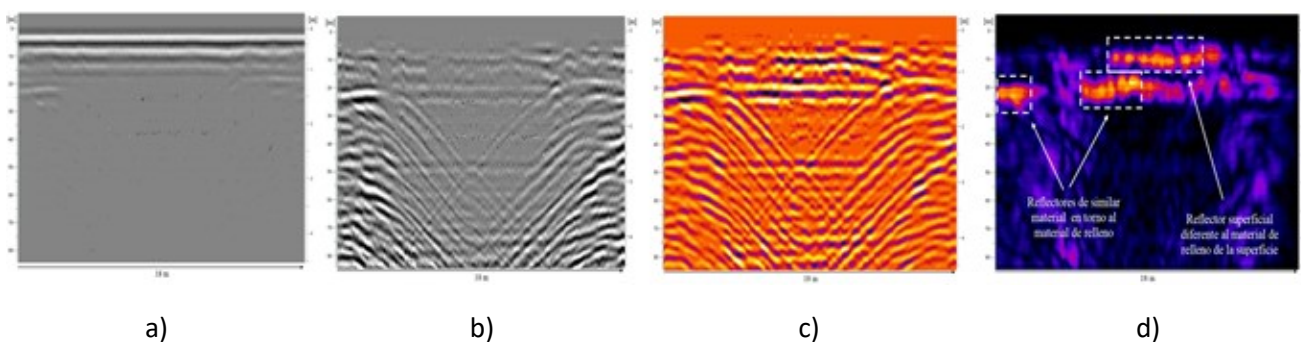


Figura 2.4-39 a) Radargrama original del subsuelo. b) Radargrama a aplicando el método Subtract Transmitted Pulse. c) Radargrama b aplicando la normalización. d) Imagen resultante de aplicar todas las etapas de procesamiento al radargrama a (Claria, Molina & Rinaldi).

Conviene considerar que, en la práctica, las antenas generan un lóbulo principal de radiación y varios lóbulos secundarios (a mayor frecuencia más lóbulos) que generan datos confusos coincidentes con reflectores superficiales (Daniels, 2004). Las antenas apantalladas reducen este efecto, pero no lo eliminan. Para mitigar este efecto es común aplicar una secuencia de etapas de procesamiento



consistentes en: aplicación de algoritmos de migración, aplicación de filtros para el aplanado de datos y eliminación de los efectos no deseados de aplanamiento.

Liu et al (Liu & et. Al., 2013) exponen que la interpretación tradicional de los datos GPR implica un alto consumo de recursos humanos y de tiempo; para reducir éstos, proponen un método de representación que implica el uso de un algoritmo automático de reconocimiento (*support vector machine*, SVM). El objetivo final es que el software reconozca automáticamente los vacíos en el material. Las múltiples reflexiones de la onda en las diferentes barras del armado generan una multitud de variaciones en la amplitud de la traza, que dificultan o imposibilitan la identificación de objetivos. Estudiando la periodicidad de las múltiples reflexiones en barras de acero, el método suprime esas reflexiones de manera que el resultado es más claro. El reconocimiento de patrones es una de las ramas más importantes de la inteligencia artificial; los objetivos pueden ser reconocidos por un programa informático automáticamente, en función de las características de las señales GPR (Cui, Wang, & Xiao, 2010). El SVM es un método de reconocimiento de patrones que ha sido aplicado con anterioridad a la técnica del GPR. Wu et al. (Wu, Tian, & Zhou, 2008) lo utilizaron para localizar oquedades bajo vías de tren en 2008 e identificar minas enterradas (Ling, Tian, & Wu, 2009) con una exactitud del 85%. Pasolli et al. (Pasolli, Melgani, & Donelli, 2009) aplicaron SVM para identificar la posición, tamaño y forma de objetos enterrados con técnica de GPR. El algoritmo que presentan Liu et al. para reconocer oquedades enterradas en estructuras de hormigón armado alcanza una exactitud del 95% (Figura 2.4-40).

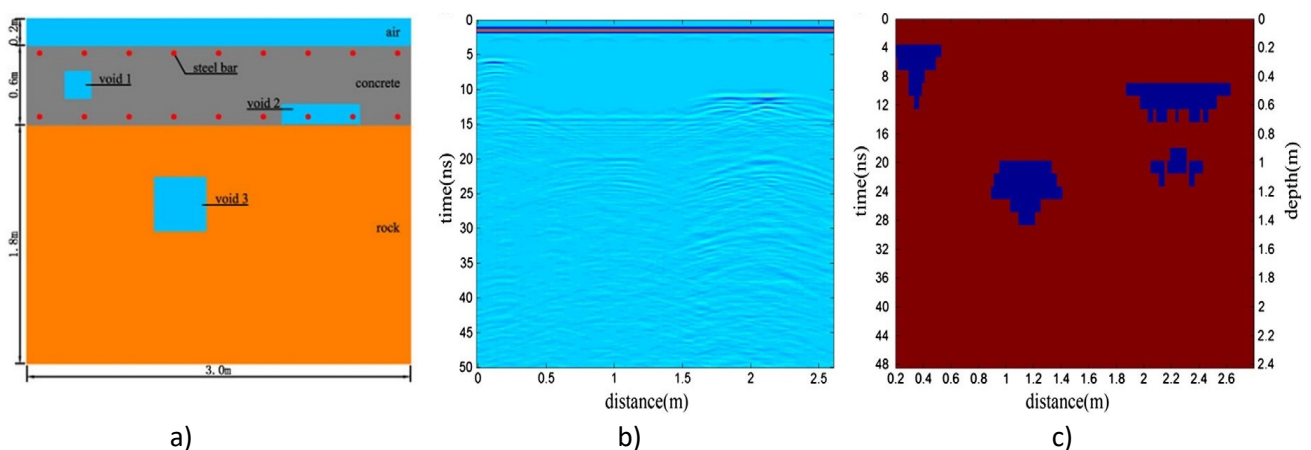


Figura 2.4-40 a) Modelo de simulación: armaduras cada 35 cm, dos capas de armado. b) Radargrama aplicando el método SUV. c) Resultado del reconocimiento automático (Liu).

Ayala-Cabrera et Al (Ayala-Cabrera, Herrera, Izquierdo, & Pérez-García, 2011) proponen un método específico para facilitar la localización de tuberías de plástico sin la necesidad de experiencia ni conocimientos por parte del usuario a través de tres fases: transformación de imágenes (basado en el parámetro amplitud, rehace la matriz de valores), aplicación de proceso multi-agente y localización. Normalmente la localización de tuberías de plástico con GPR es poco efectiva debido al bajo contraste en las permitividades del suelo y la tubería enterrada, lo que provoca valores débiles de amplitud de la onda de reflexión y se manifiestan en contornos no definidos en los radargramas. El método que proponen Ayala-Cabrera et al. facilita este proceso mejorando sustancialmente la visualización de los contrastes (Figura 2.4-40).

Pasolli et al. (Pasolli, Melgani, & Donelli, 2009) (Pasolli, Melgani, & Donelli, 2009) propusieron métodos heurísticos basados en logaritmos genéticos (GA).

## APLICACIONES DE PROCESADO

El software es un componente importante de la tecnología GPR. Las aplicaciones avanzadas requieren procesamiento y la habilidad de presentar los datos en variedad de formas. Las casas comerciales ofrecen softwares propios que buscan facilitar la lectura e interpretabilidad de las imágenes, así como resultados precisos y rápidos. Los softwares están especializados en función de la aplicación: elementos de hormigón, puentes, calzadas, subsuelo, radar de pozo, etc. Por ejemplo, GPR-Slice, basada en California, es un software de procesamiento de ondas muy completo, compatible con la mayoría de equipos comerciales, para una o varias antenas. Dispone de un módulo 3D que permite al usuario visualizar imágenes 3D en tiempo real. Tiene un apartado especialmente diseñado para hormigón, que detecta automáticamente capas de armado (Figura 2.4-41).

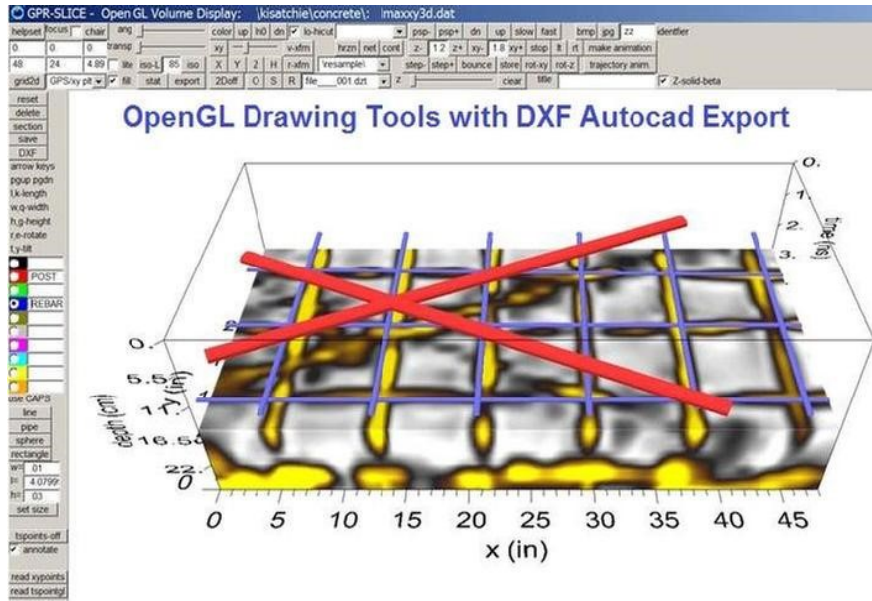


Figura 2.4-41 Pantalla genérica del software GPR-Slice en modo 3D.

GPRSIM, también basado en California, es un simulador 2D de radargramas. Fue el primer simulador comercial de GPR en 1990 y ha ido evolucionando hasta hoy en día. MALA 3D Vision, en Carolina del Sur, es un software para Windows para procesar y visualizar datos recogidos con equipos exclusivamente MALA. Se trata de un software intuitivo que genera vistas 3D a partir de perfiles y permite al usuario navegar para evaluar diferentes profundidades. Una cualidad a destacar es el paquete de herramientas de interpretación del que dispone, incluyendo transparencia y edición, que son muy útiles en la presentación de resultados (Figura 2.4-42).

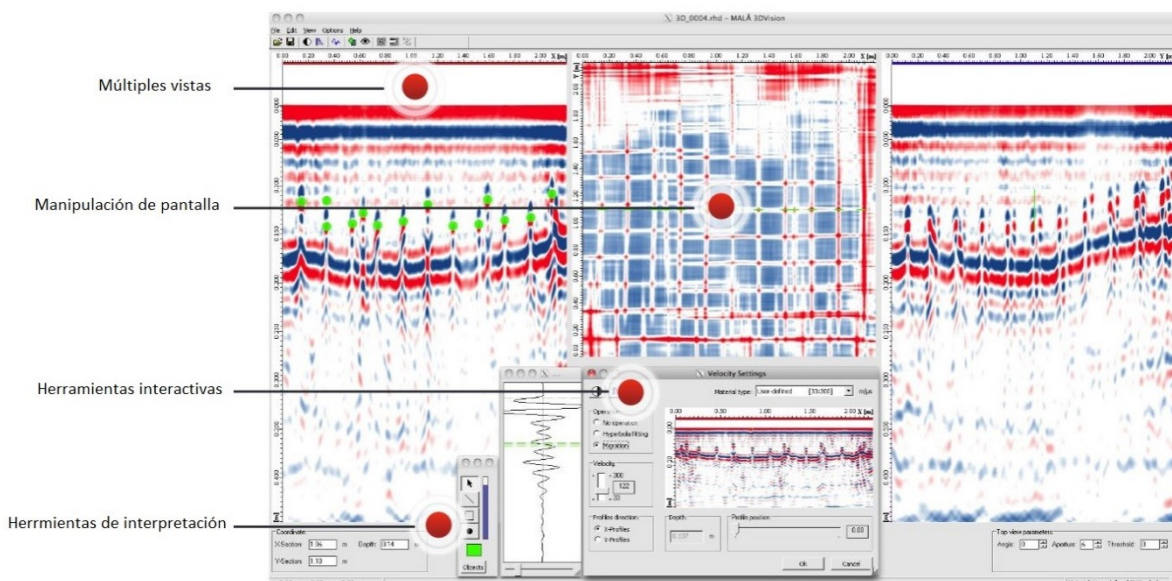


Figura 2.4-42 Vista de una pantalla genérica del software Mala 3DVision

RADAN es el software diseñado por GSSI (con sede en New Hampshire) para utilizar con sus equipos. Dispone de diferentes versiones, RoadScan para calzadas, pavimentos y firmes, BridgeScan para mapear deterioros en tableros de puentes y RADAN para StructureScan Mini, que es el más apropiado y utilizado para aplicaciones de patrimonio arquitectónico. Se trata de un software de procesado diseñado para procesar, ver y documentar datos 2D y 3D, basado en Windows. Dispone de herramientas de procesado y de visualización como filtros de ruido visual, migración de datos para una óptima focalización, un paquete de herramientas de dibujo, así como un apartado de realización de informes que facilita la exportación de datos e imágenes a otros programas como Excel y AutoCAD. Además, utiliza algoritmos para desarrollar mapeados semiautomáticos de armaduras y mapeados interactivos para localización de conductos (Figura 2.4-43).

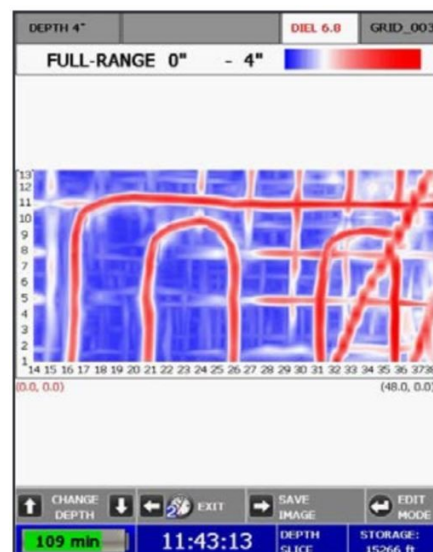


Figura 2.4-43 Imagen de la pantalla de una evaluación en un forjado con StructureScan Mini. En rojo se observan los conductos de un suelo radiante y armaduras.

Sensors & Software son un grupo de profesionales del GPR que desde Ontario (Canadá), diseñan un nutrido rango de paquetes de software para diferentes aplicaciones de GPR y desarrollan herramientas de análisis que se adaptan a esos paquetes. El EKKO-Project es la opción para usuarios que requieran una gestión integral del proyecto GPR; incluye una familia de módulos de análisis y softwares específicos para diferentes aplicaciones. En un único archivo, con formato .gpz, almacena toda la información del proyecto GPR: los datos GPR, GPS, topografía, fotos, notas, etc. Los módulos LineView y MapView facilitan la imagen de la retícula y la trayectoria del GPR; la información puede exportarse como hoja de datos (.csv), Google Earth (.kmz) y AutoCad (.dxf). Otros módulos útiles para aplicaciones al patrimonio arquitectónico son: el Interpretation Module (facilita herramientas para editar la imagen y posibilita la creación de plantillas), el SliceView Module (genera *deep slices* simplemente señalando el plano en el radargrama), el SliceView 3D Visualization (genera vistas 3D eportables en HDF y CSV), el Pavement Structure Report Module (proporciona información del pavimento y espesor de las diferentes capas), el Processing Module (dispone de



filtros y herramientas para un post-procesado avanzado), el ConquestView (genera deep slice y sección transversal a partir del plano que el usuario indica en el radargrama (Figura 2.4-44), el ConquestView 3D Visualization (genera imágenes 3D a partir de los datos generados en el módulo anterior).

Otros softwares que se utilizan en menor medida, en el campo de la conservación del patrimonio arquitectónico en Norteamérica son IRIS de Penetradar, 3D GPR software de Chemring y USRadar.

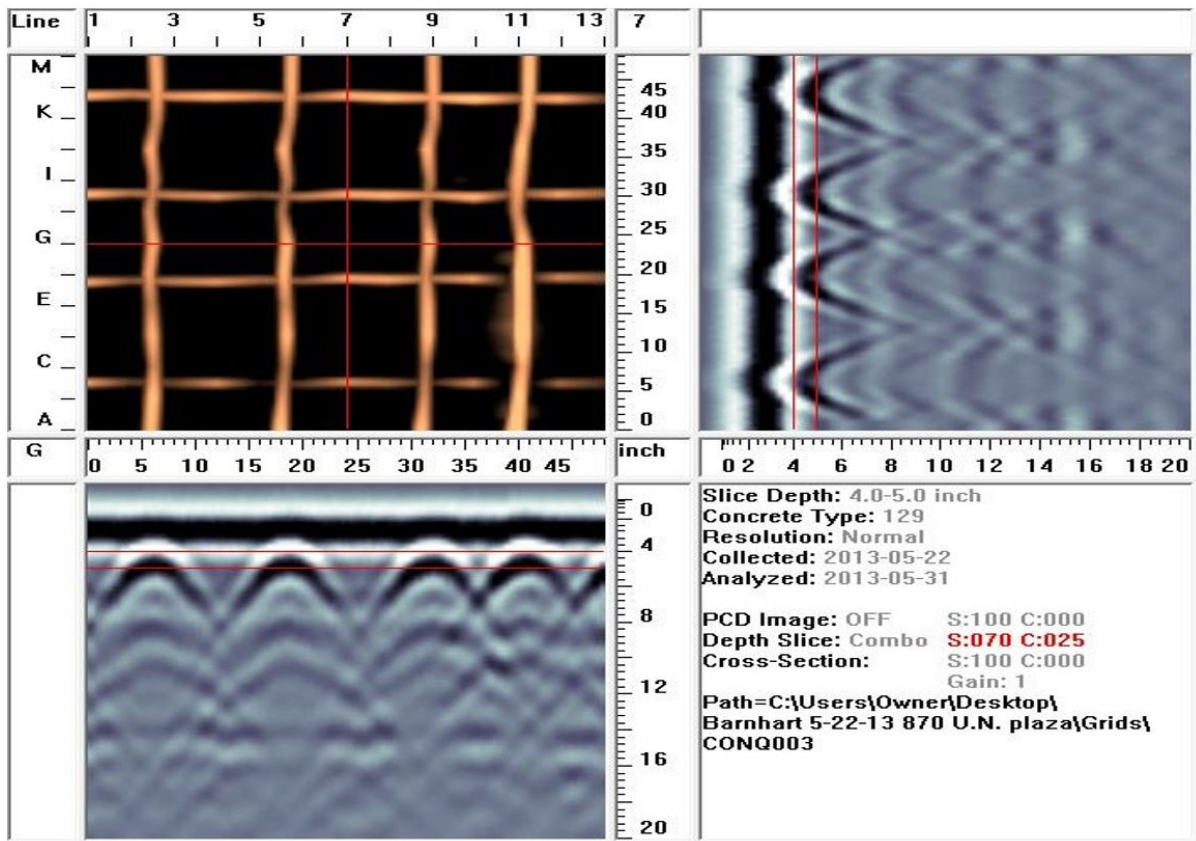


Figura 2.4-44 ConquestView de EKKO, Sensors & Software. El software facilita los radargramas y la deep slice que el usuario indica en la pantalla.

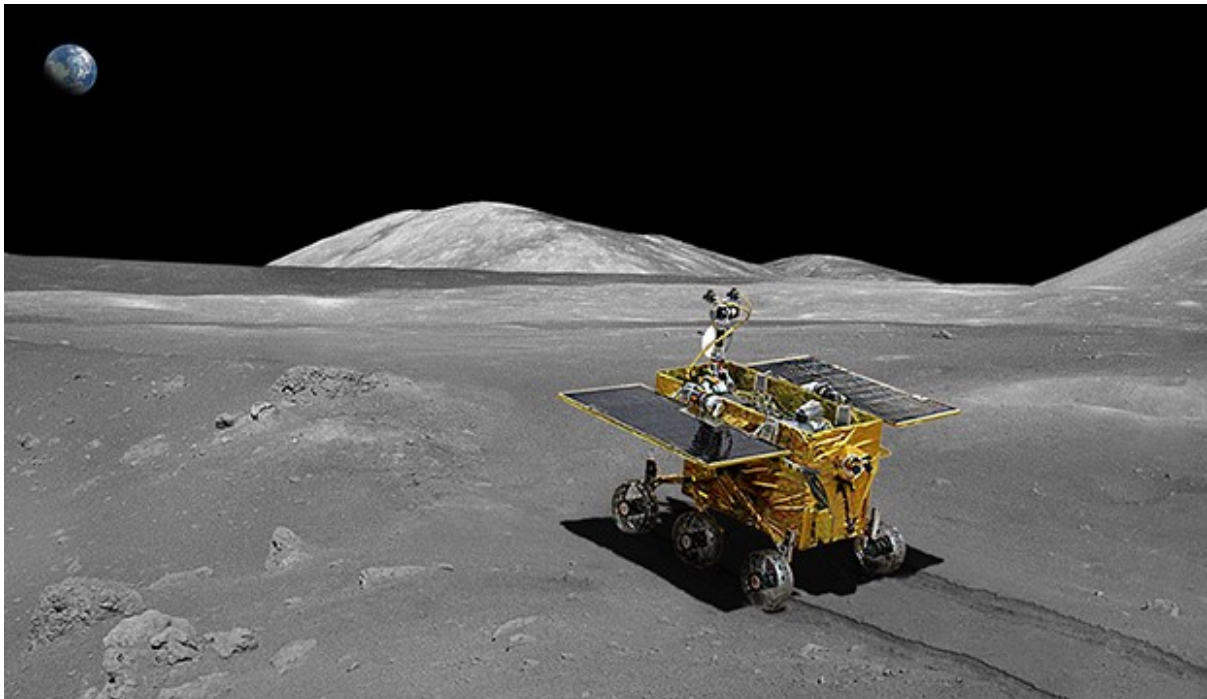


## 2.4.2.6. APLICACIONES

---

### APLICACIONES GENÉRICAS

Se trata de una técnica establecida que se utiliza en diversas aplicaciones en campos como la ingeniería o la geofísica, desde la investigación de depósitos glaciares a decenas de metros bajo la superficie, hasta la localización de armaduras de pocos milímetros embebidas en hormigón (Jol H. , 2008). En geología se utiliza para investigar el subsuelo, localizar roca, bolsas de agua, exploración mineral, evaluación de recursos (Francke, 2010), investigación de glaciares (Jol H. , 2008) y capas de hielo (Reynolds, 1996) y vacíos. Es posible localizar oro y diamantes. También se ha utilizado en dispositivos aeroespaciales; por ejemplo, el rastreador lunar chino Yutu lleva integrado en su parte inferior un GPR para investigar el subsuelo lunar (Figura 2.4-45).



*Figura 2.4-45 Rastreador lunar Yutu, equipado con sistema GPR (China National Space Administration).*

En arqueología (Skolnik, 2008) se utiliza para determinar estratigrafías y mapear estructuras y enterramientos (Conyers, 2004) (Goodman & Nishimura, 1993), (Grasmueck, 1996). La criminología también hace uso de esta técnica para

localizar restos humanos y evidencias bajo el suelo; incluso se utiliza como sensor de movimiento a través de la pared. En el campo militar sus usos incluyen la localización de minas (Yarovoy & Harry, 2009), artillería y túneles; se está trabajando en un proyecto denominado *Mineseeker Project* cuyo objetivo es detectar minas enterradas desde un zepelín, a través de ondas de banda ancha.

En ingeniería civil se utiliza para investigar las capas de materiales bajo carreteras y vías de tren. Agrónomos, forestales, geólogos e hidrólogos también hacen uso de esta TND. En el campo de la conservación del patrimonio arquitectónico el GPR tiene múltiples aplicaciones (siguiente apartado).

Existe un tipo especial de GPR diseñado para pozos, utilizado en minería. Así mismo, en Estados Unidos es muy común el uso de GPR montados en vehículos para inspección de calzadas, ya que facilitan inspecciones de amplias superficies en poco tiempo (Figura 2.4-33).

Este mismo mecanismo se utiliza en vehículos de guerra para detectar minas enterradas.

Otro uso adaptado de GPR es el PPR (*Pipe-penetrating radar*), una aplicación de la tecnología GPR específica para tuberías. Las ondas viajan por las paredes de los conductos para averiguar grosor, cavidades u otras discontinuidades tanto en la tubería como fuera de la misma.

## APLICACIONES EN CONSERVACIÓN DEL PATRIMONIO ARQUITECTÓNICO

El GPR es una técnica asentada y cada vez más utilizada en investigaciones y evaluaciones de edificios y estructuras históricas. Sin embargo, la falta de conocimiento respecto a las características estructurales del monumento (técnicas constructivas, fases en el tiempo, etc) y de los materiales empleados (materiales históricos, materiales introducidos con motivo de intervenciones, deterioro de los materiales, etc.) son el principal motivo por el que la interpretación de los resultados de la investigación GPR mostrados en un radargrama, puede ser una tarea compleja.

En el campo de la conservación arquitectónica, las antenas que se utilizan comprenden generalmente un rango de los 100 MHz a los 2,6 GHz. El software que se utiliza para procesar los datos es más importante si cabe que en otras

aplicaciones ya que en edificios históricos no suele disponerse de información estructural precisa y las características de los materiales como la constante dieléctrica son normalmente desconocidas o ampliamente variables. Cada material reacciona de un modo diferente frente a la radiación GPR, siendo la variación resultante única para una determinada frecuencia.

Diferentes aplicaciones comprenden:

- Localizar cables post-tensados, armaduras, conductos (metálicos, plásticos, hormigón), cables y subestructuras.
- Mapeo de armaduras.
- Localizar estructuras o cavidades enterradas en el subsuelo.
- Detectar inclusiones de elementos metálicos o de madera, entre otros.
- Determinar profundidades y espesores de elementos como muros, cimentaciones, losas, forjados, columnas embebidas.
- Estudio y caracterización de materiales de construcción.
- Inspección, diagnóstico y estudio de manifestaciones patológicas en elementos arquitectónicos. Identificación de daños en la estructura como grietas internas, exfoliaciones o disgregación y deterioro del material.
- Localizar áreas seguras para extraer probetas, practicar aperturas e instalar anclajes.
- Identificación de presencia y nivel de humedad.
- Comprobación del estado de elementos metálicos como anclajes.
- Comprobación de la efectividad de reparación por técnicas de inyección.
- Evaluación de tablero/calzada en puentes de hormigón armado.
- Detección de raíces de árboles (si existe suficiente contraste dieléctrico entre las raíces y el suelo) (Butnor, et al., 2003)
- Evaluación del contenido de humedad en el subsuelo (Hagrey, 2007)

Los medios en los que la técnica es aplicable son hormigón, piedra, suelos no conductores, tapial, adobe, hielo, morteros y ladrillo. En general, cuanto más homogéneo y seco sea el medio, mejores resultados se obtienen.

Los materiales que se detectan con éxito utilizando GPR en un medio son: metales, plástico, aire, madera, elementos cerámicos, morteros y variaciones en el estado del mismo material. La detección de dichos materiales queda supeditada a la calidad de la interfase entre materiales. Si las propiedades dieléctricas de los materiales son similares, es posible que el GPR no detecte la interfase y por tanto no quede recogida en el radargrama, resultando en una no identificación del elemento dentro del medio.

Las ondas electromagnéticas son sensibles a interfases con agua, mientras que las ondas acústicas lo son a interfaces con aire, por ello se muestran como dos métodos de inspección complementarios. Donde no es posible aplicar el radar (presencia de agua o medios conductores) los métodos acústicos pueden ser la única solución y viceversa, cuando la metodología acústica falla (gran presencia de huecos o grandes heterogeneidades) el radar puede resultar apropiado.

Existen casos de aplicaciones exitosas con madera como medio transmisor; aunque el bajo contraste de impedancia que existe entre la madera y el aire provoca que las reflexiones presenten amplitudes muy bajas y sin cambio de polaridad, lo que hace complicada la identificación exitosa de interfases. El tipo de madera, así como su grado de humedad, influyen en la aplicabilidad de este método. En maderas densas y secas se obtienen mejores resultados.

En el caso particular de la identificación de conductos, éstos pueden ser de muy variados materiales, entre otros factores. Dependiendo del tipo, se utilizará una técnica u otra. Metales y cables, determinados tipos de plástico y hormigón, son detectables con dispositivos modernos de GPR. El éxito depende tanto del medio como del elemento a detectar.

Las figuras Figura 2.4-46, Figura 2.4-47 y Figura 2.4-48 corresponden a una investigación con GPR llevada a cabo en el cementerio histórico de la Trinity Church en *downtown* Manhattan. El nivel de calle está situado alrededor de dos metros por debajo de la cota del cementerio. Alrededor del mismo existe un muro de contención al que se le querían aplicar anclajes en profundidad para asegurar su estabilidad. El motivo de la investigación era detectar la localización de tumbas para disponer los anclajes evitando los enterramientos y averiguar la geometría

del muro de contención. Se utilizó una combinación de antenas para localizar enterramientos de 400 y 270 MHz en una retícula de 3 pies (0,91 m) para la antena de 400 MHz y de 2 pies (0,60 m) para la de 270 MHz.

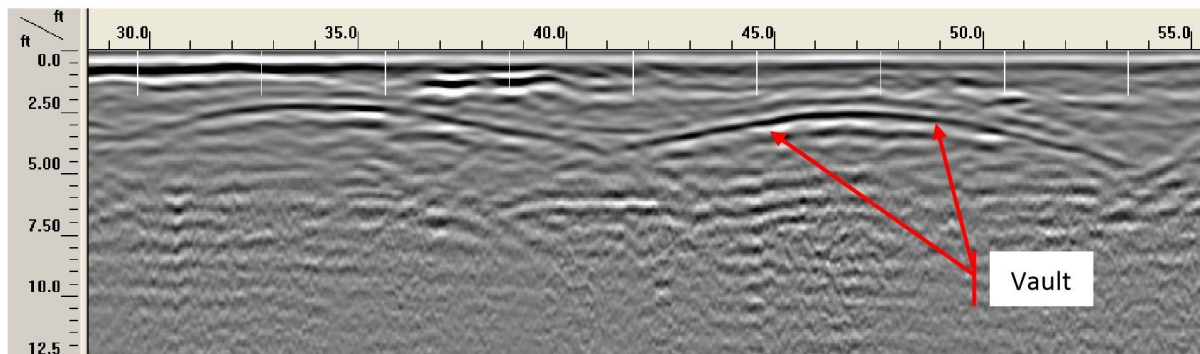


Figura 2.4-46 Radargrama obtenido con un equipo Geophysical Survey Systems Incorporated (GSSI) SIR-3000 con antena de 400 MHz, para localizar enterramientos en el cementerio de la Trinity Church, Manhattan. En el radargrama se marcan dos siluetas curvas, que posiblemente corresponden a sendas bóvedas. Para llevar a cabo la investigación se estableció una retícula; los escáneres se registraron paralelos y perpendiculares a la pared de contención que rodea el cementerio con una separación de tres pies (0,91 m).

Para el muro se realizaron escáneres verticales con la antena de 400 MHz. Para la calibración del equipo se utilizó una tubería metálica a una profundidad conocida y un tramo de pared con espesor conocido, respectivamente.

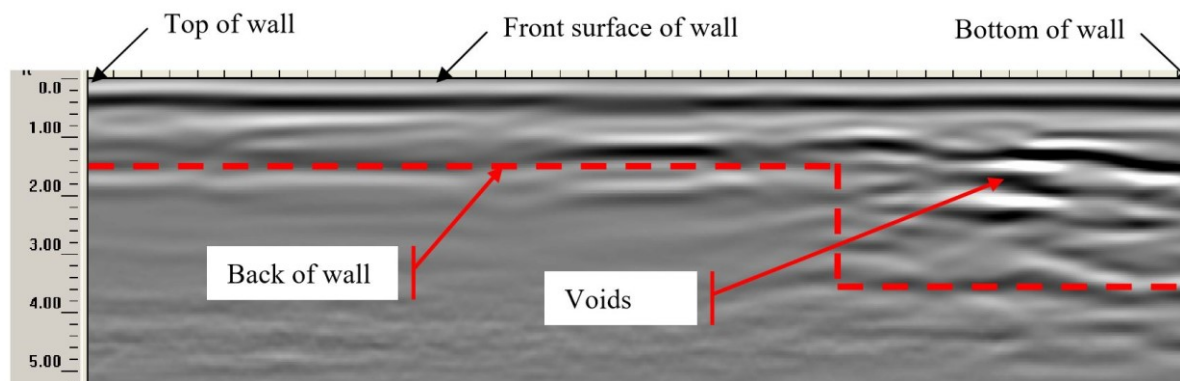


Figura 2.4-47 Radargrama obtenido con un equipo Geophysical Survey Systems Incorporated (GSSI) SIR-3000 con antena de 400 MHz, en una investigación para averiguar la forma del muro de retención alrededor del cementerio.



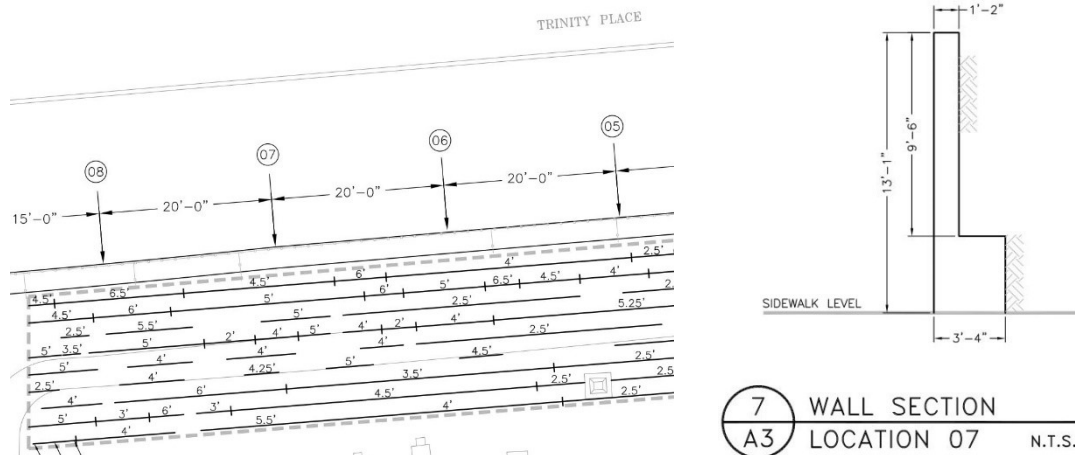


Figura 2.4-48 Parte de la representación de los resultados finales tras el análisis y el postprocesado de la información. En el plano de la izquierda se localizan los enterramientos y la profundidad de los mismos (los anclajes deberían instalarse pues por debajo de esa cota. La sección de la derecha corresponde al muro de retención.

Existe un caso muy concreto de aplicación de GPR en puentes. Dicha aplicación, dependiendo del caso en estudio, pertenece al campo de la conservación arquitectónica o al de la ingeniería civil. En algunos países de clima frío como Estados Unidos, es común la aplicación de cloruro de sodio (sal) para deshacer el hielo y la nieve sobre la calzada. En condiciones normales, el armado embebido en el hormigón se auto-protege gracias a la capa de óxido que genera sobre su superficie que lo pasiva y anula el proceso electroquímico de la corrosión. Esta capa de autoprotección se destruye debido a la carbonatación del hormigón o debido a la presencia de cloruros, provenientes de la sal vertida. Cuando esa capa de protección es destruida, si hay presencia de humedad y oxígeno, comienza el proceso de oxidación del armado. Existen dos consecuencias principales de la oxidación por cloruros. Los productos de la corrosión ocupan más volumen que el elemento sin oxidar, lo que genera grietas y desprendimientos. En segundo lugar, la oxidación provoca una pérdida de sección del elemento, lo cual merma su capacidad portante (Neville, 1995).

Hugenschmidt y Loser (Hugenschmidt & Loser, 2008) fueron pioneros con una investigación en laboratorio para demostrar que el GPR podía detectar cloruros y humedad en el hormigón, y que la amplitud de la reflexión en la superficie aumentaba en presencia de éstos, mientras que la amplitud de la reflexión en una interfase interna, disminuye (Figura 2.4-49).

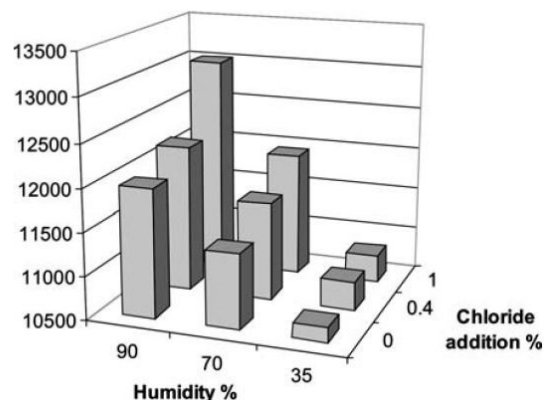


Figura 2.4-49 Amplitud de la onda en la reflexión en hormigón. Obsérvese que a mayor presencia de cloruros mayor es la amplitud de la onda reflejada, lo que demuestra la validez de esta técnica en el caso de detección de deterioro por cloruros (Hugenschmidt & Loser, 2008).

Cardimona et al. (Anderson, Cardimona, Wenzlick, & Willeford, 2000) relacionaron la degradación de la onda del radar, en pérdida de amplitud e incremento del tiempo, con el deterioro del hormigón. Sheff and Chen (Chen & Scheff, 2000) demostraron que no existía una correlación precisa en los resultados de técnica GPR y de arrastre de cadena. El método de arrastre de cadena (Figura 2.4-50), es el método tradicional de bajo coste muy utilizado para detectar delaminaciones internas en las calzadas y puentes; el procedimiento consiste en arrastrar una cadena sobre la superficie del puente. La detección de delaminaciones, llevada a cabo por el operario, consiste en escuchar los sonidos que emite el roce de la cadena con la calzada y corresponde con sonidos sordos o huecos. El estándar que lo define es ASTM D4580 / D4580M<sup>21</sup>.

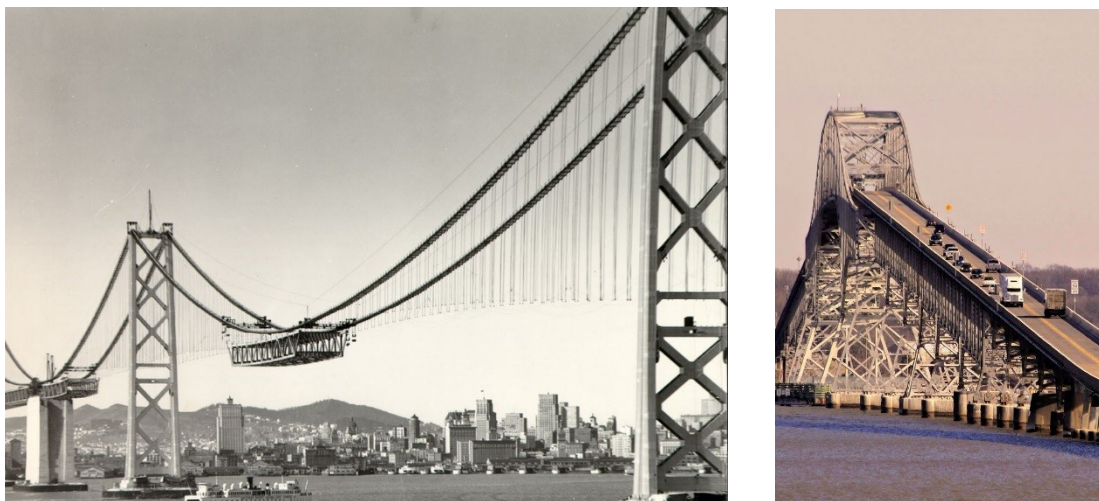


Figura 2.4-50 Método del arrastre de cadena para detectar delaminaciones (Rutgers University).

<sup>21</sup>ASTM D4580 / D4580M Standard Practice for Measuring Delaminations in Concrete Bridge Decks by Sounding.

Roberts (Roberts, 2002) comparó los resultados de investigaciones con GPR en varios puentes de New Hampshire con los resultados de probetas extraídas de esos puentes; los resultados fueron coincidentes. Barnes and Trottier (Barnes & Trottier, 2004) describieron nueve inspecciones de puentes con GPR y arrastre de cadena; concluyeron que el GPR era una técnica viable para estimar la presencia de hormigón deteriorado.

En la práctica, una de las mayores ventajas de esta aplicación del GPR es que no se requiere de cierre de carriles ya que la evaluación se realiza a velocidad de autopista con el equipo montado sobre un vehículo equipado. Otros métodos empleados para evaluar el firme bajo el asfalto en puentes son el arrastre de cadenas, sondeo de percusión con martillo, la técnica de impulso-respuesta y termografía infrarroja. Todas esas técnicas tienen potenciales y limitaciones, si bien, contrariamente al GPR, todas requieren el cierre de carriles durante la recopilación de datos. El GPR se ha convertido en la técnica de referencia para localizar delaminaciones internas, deterioro del tablero, corrosión y oquedades en puentes con o sin capas superpuestas de asfalto, en tableros de cemento Portland. La empresa estadounidense Resource International, Inc (RII) ha investigado con esta técnica puentes míticos como el viaducto de Santa Mónica (Santa Mónica, CA. 1939), el puente San Francisco-Oakland (San Francisco, Ca. 1936), el puente de Richmond-San Rafael (San Francisco, CA. 1963), el puente Vicente Thomas (Los Angeles, CA. 1956), el puente Harry Nice (Alexandria, MD. 1940) o el Brent Spence (Covington, KY.1963) (Figura 2.4-51).



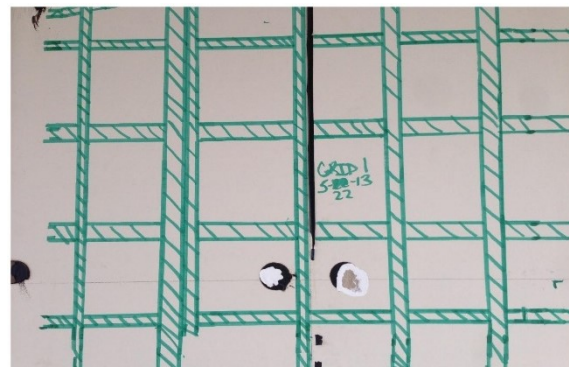
*Figura 2.4-51 A la izquierda, vista del puente San Francisco-Oakland Bay durante la construcción del tablero en 1933 (San Francisco History Center, San Francisco Public Library). La compañía RII inspeccionó en 2013 el estado del tablero con la técnica de GPR. A la derecha, a vista del Puente Gov. Henry Nice en 2010, también inspeccionado por RII con GPR (George Sled).*



La aplicación más común de GPR en el campo de la conservación arquitectónica corresponde a la detección de armaduras, así como localización y determinación de las dimensiones de las mismas. En 2014 se estaba llevando a cabo una restauración con cambio de uso en la planta 22 de un icónico edificio residencial de hormigón armado de 40 plantas, de 1966, en United Nations Plaza, en Manhattan (Figura 2.4-53). El proyecto recogía la demolición de un muro que se consideraba no estructural. Cuando el constructor se dispuso a demolerlo con métodos convencionales (maza) comunicó al resto del equipo que no era posible. Se encargó entonces una investigación de END con el fin de determinar la naturaleza del muro. Tras los resultados del GPR y la investigación de la documentación histórica, se descubrió que se trataba de un muro estructural de arrostamiento frente a cargas horizontales. La investigación de GPR también sirvió para corroborar los planos históricos. Se pasó entonces a analizar cómo trabajaba la estructura actual, en combinación con un análisis de la evolución de los códigos de la edificación. Los códigos actuales, al conocerse mejor los materiales y su comportamiento, son en general menos conservadores que a mediados del siglo XX, por lo que, tras el análisis de los factores anteriormente citados, se concluyó que el muro se podía eliminar con dos condiciones: dejar ambos



Figura 2.4-53 Edificio residencial de hormigón armado de 40 plantas de 1966 en United Nations Plaza, en Manhattan (M.A. Stecker).



Location 1, apartment 22 C

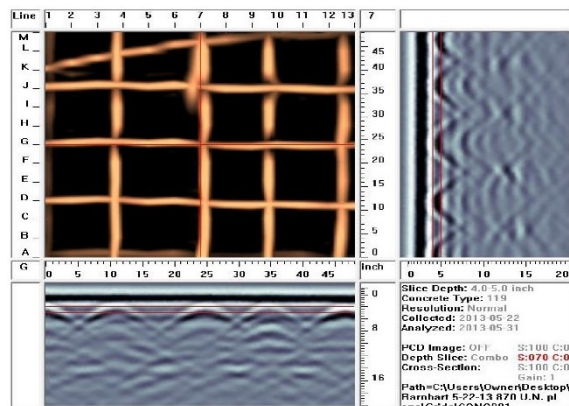


Figura 2.4-52 Parte del informe de GPR. Los técnicos utilizaron los escáner para "dibujar" el interior del muro en su superficie con el fin de facilitar la gestión del muro.

extremos a modo de columnas y añadir una viga para soportar los forjados que apoyaban en el muro. Para saber qué elementos necesitaban los extremos de muro convertidos a columna fue necesaria una detallada investigación de GPR, tras la cual se determinó la cantidad y distribución de refuerzos de varillas ancladas con epoxi que era necesario añadir para cerrar el armado de esos tramos de muro y convertirlos en columnas.



*Figura 2.4-54 Fase de demolición parcial, una vez analizada la función del muro y su necesidad. Obsérvese en la parte superior el refuerzo a modo de viga que se añadió para soportar los forjados superiores (G. Pardo).*

Una adaptación sencilla del GPR es el pacómetro (*cover meter*), un aparato que proporciona el espesor del recubrimiento en una estructura de hormigón armado. El funcionamiento es similar al de un GPR. El aparato genera ondas electromagnéticas que, al ser reflejadas en elementos metálicos, cambian el voltaje del campo electromagnético generado, lo cual es detectado y procesado por el aparato. Los detectores modernos generan diferentes campos magnéticos con el fin de detectar, además de la presencia de armaduras y el espesor del recubrimiento, una estimación muy aproximada del diámetro de las mismas. La calibración de las antenas y el procesado está diseñado para que el método no detecte hormigón, madera, plásticos, ladrillos, etc. (materiales no conductores). Es decir, los materiales conductores influyen el campo magnético y por tanto los resultados. La precisión oscila los 0,25 cm. Las ventajas de la utilización del pacómetro son la facilidad de aplicación (no requiere personal especializado), es barato, los resultados se obtienen *in situ* y que sólo se requiere acceso por una cara del elemento.



## ALGUNOS ESTÁNDARES ASTM PARA GPR

ASTM Designation D 6087-03 (2005): método de test GPR para evaluar tableros de Puente de hormigón cubiertos con asfalto.

Libro anual de estándares ASTM, 04.03, American Society Testing Materials, pp. 698–701. Describe la detección de áreas de delaminación basándose en las reflexiones de la base de la losa con GPR.

Compañías en Estados Unidos que aplican GPR: Encompass, Plus International Ground Solutions, CityScan Corp., Atkinson-Noland & Associates Inc., GB Geotechnics USA Inc., Master Locators, Global Services GPR,

### 2.4.2.7. VENTAJAS Y LIMITACIONES DE LA TÉCNICA DEL GPR

---

#### VENTAJAS

- En condiciones óptimas, puede detectar objetos pequeños a relativamente grandes distancias y ofrece la posibilidad de averiguar profundidades.
- Además, es una técnica segura para el ser humano, por lo que no se requiere de perímetro de seguridad como ocurre con la técnica de rayos X.
- La toma de datos es rápida.
- Los resultados se pueden ver en tiempo real con el adecuado software y equipo.
- Sólo se requiere de acceso por una cara del elemento.
- En la aplicación en investigaciones de puentes y calzadas, una de las mayores ventajas de esta aplicación es que no se requiere de cierre de carriles ya que la evaluación se realiza a velocidad de autopista con el equipo montado sobre un vehículo equipado. Es la única técnica NDE que no requiere el cierre de carriles durante la recopilación de datos.

## LIMITACIONES

- La principal desventaja es que, si las condiciones no son las ideales, los resultados son muy limitados. Por ejemplo, medios arcillosos, saturados de agua, o los contaminados con sal, suelen ser problemáticos debido a su alta conductividad, que provoca la disipación de la señal y lecturas erróneas.
- Las interpretaciones de resultados pueden ser subjetivas debido a que el resultado gráfico puede ser difícil de evaluar.
- La técnica no funciona óptimamente en medios heterogéneos, ya que las numerosas reflexiones originan excesivo ruido.
- La interpretación de resultados puede ser muy compleja por lo que requiere de personal cualificado con experiencia (Royer, Thomson, & Wang, 2009). Por ejemplo, un técnico puede localizar el armado en un muro de hormigón, pero será más complicado y a veces imposible calcular el diámetro. En los casos en los que hay solape de armaduras, la interpretación de resultados puede ser muy compleja.
- En inspecciones de grandes extensiones de terreno, puede ser necesario un alto consumo de energía.
- Para detectar los cambios en el material, el radar necesita estar en movimiento, lo que limita la inspección de ciertos elementos arquitectónicos.

### 2.4.2.8. GPR VERSUS RAYOS X

---

La técnica de Rayos X es una TND que utiliza radiación electromagnética, invisible para el ojo humano, de longitud de onda entre 10 a 0,01 nanómetros, y frecuencias entre 30 y 30.000 PHz ( $10^6$  más frecuencia que el GPR). Los actuales sistemas digitales permiten la obtención y visualización de la imagen radiográfica directamente en soporte digital sin necesidad de imprimirla.

Hasta el desarrollo de los softwares de GPR que permiten generar imágenes de mayor calidad y nitidez, existía en muchos proyectos de conservación, la disyuntiva de realizar un test de GPR o de rayos-X. En la actualidad, gracias a la mejora en la interpretabilidad que ofrecen los paquetes informáticos, la opción más

adecuada suele ser GPR por las razones que se exponen a continuación. El uso de esta técnica *in situ* es por tanto muy limitada, motivo por el que no se profundiza en su estudio en esta tesis. Sin embargo, sigue habiendo casos, en los que puede ser más apropiada el uso de Rayos X.

Las ondas necesarias para generar la imagen GPR son menos dañinas para el ser humano, que las utilizadas en rayos X. Los rayos X utilizan cobalto-60, un isótopo altamente radioactivo que implica riesgo por radiación. La emisión relativa de radiación en GPR es similar a la de un teléfono móvil, mientras que un test de rayos X de una losa de hormigón de 20 cm requiere de un perímetro de seguridad de 50 m. Se deben poner en marcha procedimientos especiales incluyendo el balizado y señalizado del área. Además, el personal debe utilizar equipo de protección especial para rayos X y realizar formación y certificación obligatoria para poder operar los aparatos y controlar el riesgo por radiación. Todas estas medidas de seguridad normalmente provocan el cierre temporal del área a testear con la consiguiente merma de productividad. Con el fin de minimizar el riesgo y el impacto, los test suelen realizarse durante la noche.

Otra ventaja importante del GPR es que sólo requiere acceso por una cara del elemento a evaluar, mientras que rayos X requiere de acceso por ambas caras. Ninguna de las dos técnicas obtiene óptimos resultados en nitidez y calidad de imagen cuando el elemento (de hormigón o similar densidad) es superior a 55 cm. El GPR puede alcanzar mayores profundidades, pero el resultado tendrá menos resolución, lo que habitualmente no suele satisfacer los requisitos en aplicaciones al patrimonio arquitectónico.

La mayor ventaja de rayos X frente a GPR es que la imagen resultante en rayos X tiene mayor resolución. El resultado gráfico en GPR puede ser difícil de evaluar, por lo que las interpretaciones pueden ser subjetivas. Este salto en la calidad del producto final es cada día menor gracias a los avances en los softwares de procesado y post-procesado de la técnica de GPR y normalmente la diferencia en resolución no es suficiente como para compensar las limitaciones de seguridad y eficiencia que implica la elección de rayos X.

Áreas con muchas o muy potentes señales electromagnéticas pueden interferir con las ondas del test, resultando en la no detección de determinados objetos o resultados incorrectos. Del mismo modo, elementos con complejas disposiciones

internas, como muros con armados densos y complejos, pueden ser muy complejos o imposibles de representar con la técnica de GPR.

Una última comparativa entre ambas tecnologías que es determinante en muchos casos es el coste. El GPR es cada vez más asequible gracias a los avances tecnológicos. Al coste del equipo y de los equipos de protección, hay que añadir la merma en productividad y efectividad logística que implica el perímetro de protección de rayos X, inexistente en GPR.

22

	Rayos X	GPR
Transmisión	Rayos Gamma (300 Ehz, 1pm)	Ondas de radio entre 3GHz y 300 MHz)
Riesgo por radiacion	Si	No
Perímetro de seguridad y evacuacion	Si	No
Necesidad de licencia	Si	No
Personas necesarias	Al menos tres	Una
Acceso a ambos lados	Si	No
Duracion para 20x20 cm	100 min. aproximadamete	5 min. aproximadamente
Resultados en tiempo real	No	Si
Grandes superficies	Test múltiples	Escaneres continuos
Máxima profundidad optimos resultados	50 cm	60 cm
Exactitud y resolucion de imagen	Mayor	Menor
Subjetividad en la evaluacion	Menor	Mayor
Resultados optimos superposicion elementos	Mejor	Peor o nulo

Figura 2.4-55 GPR versus rayos X. Tabla comparativa de ventajas e inconvenientes de ambas técnicas.

<sup>22</sup> EHz = Exahercio, 10<sup>18</sup> hercios. Pm = petámetro, 10<sup>15</sup> metros.

## 2.5. MÉTODOS BASADOS EN LA PROPAGACIÓN DE ONDAS ACÚSTICAS

Los métodos acústicos de evaluación son, junto con la evaluación visual, los métodos más antiguos y más utilizados como técnicas de evaluación no destructivas. Se basan en el estudio de la propagación y la reflexión de las ondas acústicas en el material. Un ejemplo bien conocido es el golpeo de la superficie (generalmente un martillo) para escuchar las variaciones en el sonido que produce, con el fin de detectar la presencia de oquedades ocultas, grietas u otros defectos.

Son particularmente útiles para medir espesores y localizar anomalías. Las técnicas acústicas más complejas se basan en el estudio de impulsos acústicos (*stress waves*), generados mediante percusión o mediante un dispositivo transmisor, en un punto de la estructura.

La materia está formada por moléculas cuya forma de distribución y fuerza de atracción depende del estado en que se encuentra dicha materia:

En estado sólido, las moléculas se encuentran fuertemente atraídas entre sí, distribuidas de forma regular y geométrica y en equilibrio. Las fuerzas de atracción son elásticas, de manera que si no se sobrepasa su límite de elasticidad las deformaciones que se producen no son permanentes.

En estado líquido, las moléculas ocupan posiciones al azar que varían en el tiempo. Las distancias intermoleculares son constantes dentro de un rango.

Por último, el estado gaseoso ocurre con motivo de la aplicación de calor a un líquido, las moléculas se aceleran y pasan a estado gaseoso. Las moléculas no están unidas entre sí, con lo que el material deja de tener forma definida y se expande hasta ocupar todo el volumen del recipiente que lo alberga.

En los materiales sólidos, al aplicar una perturbación, se produce una agitación de sus moléculas que se propagará en forma de onda. A través de la onda se propaga energía, no materia. Al tratarse de un material elástico, cumple con la ley de Hooke.



El sonido es una vibración transmitida en un medio, por ejemplo, el aire y que puede ser escuchado por un oído humano sano. Todas las vibraciones, incluido el sonido, tienen una frecuencia. El límite inferior de audibilidad humana es aproximadamente 16 Hz y el superior de 20 KHz (Figura 2.5-1); sin embargo, a partir de los 20 años de edad se va perdiendo sensibilidad auditiva especialmente en las altas frecuencias. En 2005, el inventor galés Howard Stapeleton creó el dispositivo Mosquito Security aprovechando este fenómeno. Diseñó un tono (de 14,4 KHz) imperceptible por la mayor parte de los humanos mayores de 25 años. Además, lo moduló de manera que fuese tremendamente molesto para quienes lo escuchaban. El objetivo era disuadir a adolescentes de merodear por determinadas zonas. El mismo fenómeno también ha sido aprovechado para desarrollar tonos “invisibles” para adultos, y que solo los menores de 20 años pueden escuchar en sus móviles, son los denominados Teen Buzz ringtones. Sirvan estos ejemplos para ilustrar que no toda la energía acústica es audible, como ocurre con la técnica no destructiva de los ultrasonidos.

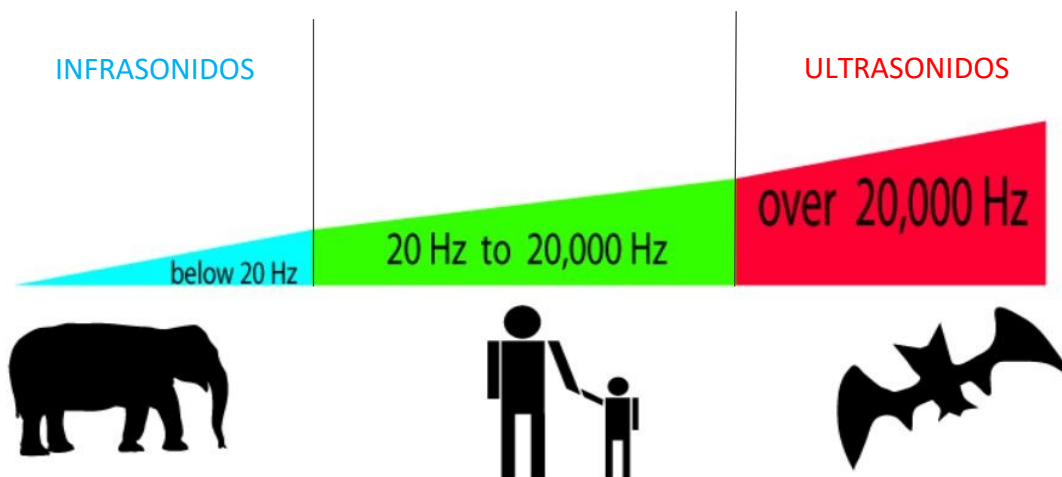


Figura 2.5-1 Las ondas de ultrasonidos tienen frecuencias mayores a los 20 KHz. Los seres humanos pueden percibir sonidos en un rango de 20 Hz a 20.000 Hz (Adaptada de Howequipmentworks.com)

Los rangos de frecuencias acústicas son:

- Subsónico (infrasonidos) 0-20 Hz
- Sónico (sonidos): 20 Hz – 20 KHz
- Ultrasónico (ultrasonidos): > 20 KHz

Los métodos basados en la transmisión del sonido consisten en el estudio de la respuesta de los materiales frente a estímulos acústicos, fruto de la generación de ondas acústicas a través de un transmisor de alta frecuencia, 25-200 MHz o por un golpe mecánico, de 4 a 25 KHz (impacto acústico) (Benítez Herreros, 2011).

Las frecuencias utilizadas para ensayos ultrasónicos oscilan entre 0,5 MHz a 15 MHz, según la norma UNE-EN12688-1 2010. Valores normales de frecuencia en función del material varían entre 0,5 a 25 MHz para hormigones, fábricas de ladrillo, piedra y maderas densas, siendo de alrededor de 15 MHz para metales (Lombillo, Villegas, & Al., 2007).

## PROPAGACIÓN DE LAS ONDAS ACÚSTICAS

Las técnicas basadas en la propagación de ondas acústicas se basan en el estudio de la vibración de las partículas en el interior de los materiales. Todos los materiales están compuestos por átomos, que pueden someterse a vibración; existen diferentes patrones de vibración atómica, si bien las técnicas acústicas estudian aquellos movimientos que suceden en armonía para provocar una onda mecánica. Cuando los materiales no son sometidos a fuerzas de compresión o tensión que superen el límite de elasticidad de dicho material, las partículas individuales realizan oscilaciones elásticas. De ese modo, cuando las partículas de un medio se desplazan de su posición de equilibrio, emergen fuerzas internas de restauración. Estas fuerzas elásticas de restauración entre partículas combinadas con la inercia de esas partículas, genera el movimiento oscilatorio del medio.

En sólidos, las ondas acústicas pueden propagarse de cuatro formas principales: ondas longitudinales (*longitudinal waves*), ondas transversales (*shear waves*), ondas de superficie (*surface waves*) y ondas Lamb (*plate waves*). Las longitudinales y las transversales son los dos tipos de onda estudiados en los tests acústicos aplicados a la conservación del patrimonio arquitectónico.

Ondas longitudinales: Las oscilaciones suceden en la dirección de propagación de la onda. Debido a que en estas ondas suceden fuerzas de compresión y expansión activas, también se denominan ondas de compresión o presión (*pressure or compression waves*) u ondas de densidad (*density waves*) debido a las fluctuaciones de densidad que la onda genera en el material. Este tipo de ondas pueden transmitirse en materiales en estado gaseoso, líquido y sólido (Figura 2.5-2).

Ondas transversales: Las partículas oscilan en dirección perpendicular a la dirección de propagación de la onda. Este tipo de ondas no se propagan en gases ni en líquidos. Este tipo de ondas son relativamente más débiles que las longitudinales, de hecho, generalmente se generan a partir de ondas longitudinales (Figura 2.5-2).

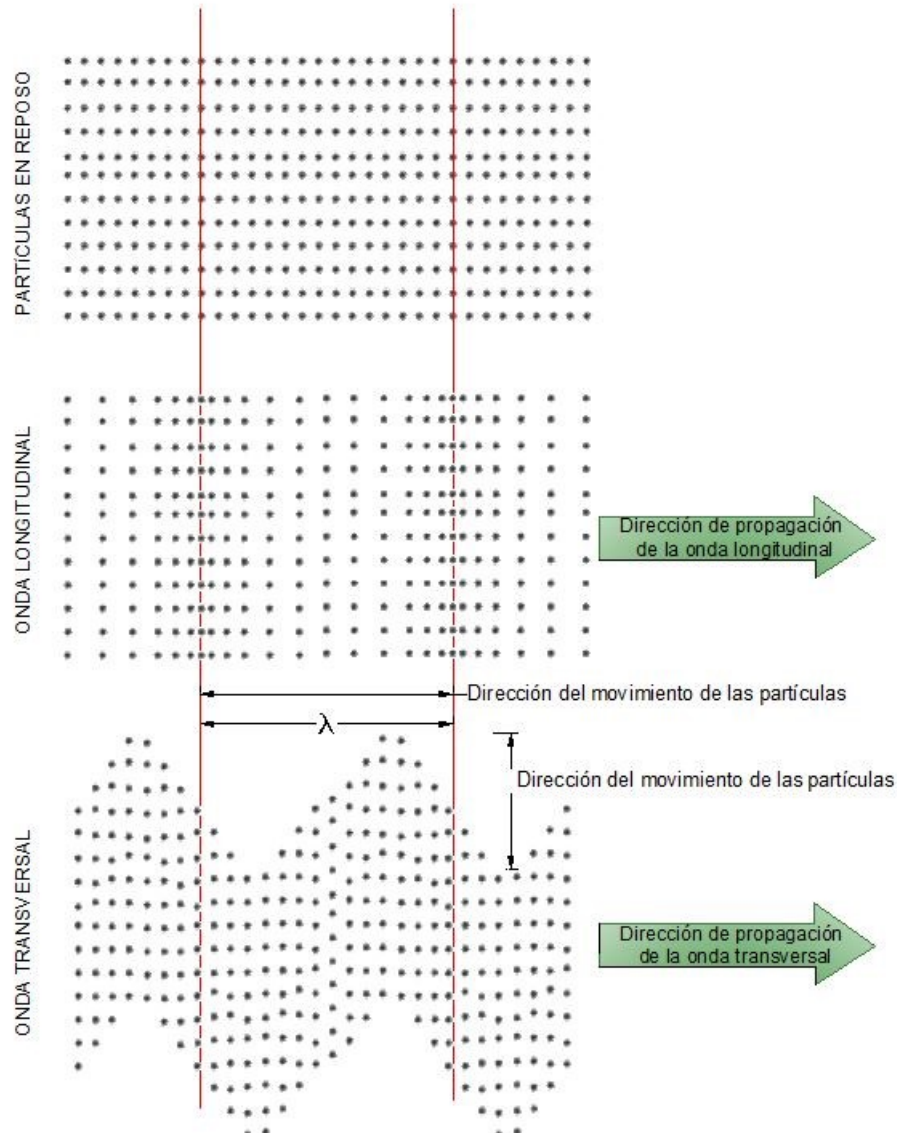


Figura 2.5-2 Representación esquemática del movimiento de partículas en un material afectado por una onda longitudinal y una onda transversal.

Ondas de superficie o Rayleigh: este tipo de ondas viajan por la superficie de materiales relativamente gruesos y penetran hasta una profundidad de una longitud de onda. Una onda de superficie es una combinación de ondas longitudinales y transversales que resultan en un movimiento elíptico tal y como se muestra en la Figura 2.5-3, siendo el eje mayor de la elipse el perpendicular a

la dirección de propagación de la onda. Estas ondas se generan cuando una onda longitudinal interseca con una superficie algo mayor que el segundo ángulo crítico<sup>23</sup> y viaja a una velocidad entre 0,87 y 0,95 la de la onda transversal (Garza Sáenz, 2012). Estas ondas son útiles porque son sensibles a defectos en la superficie y viajan por la superficie, lo que las hace apropiadas para la inspección de ciertas áreas superficiales.

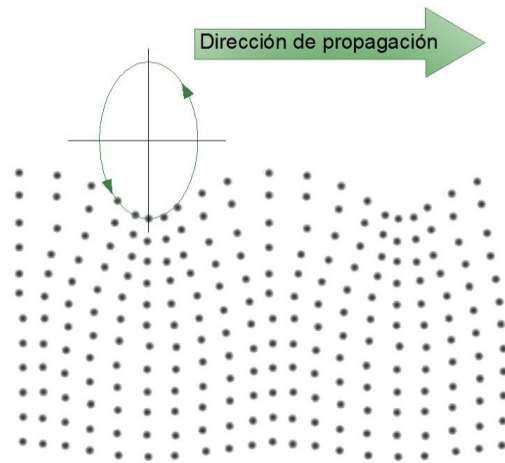


Figura 2.5-3 Representación esquemática del movimiento de las partículas de un material a ser afectado por una onda Rayleigh.

Ondas Lamb: son similares a las de superficie, pero sólo pueden transmitirse en materiales de poco espesor, es decir en materiales de espesor equivalente a una o varias longitudes de onda. Viajan paralelas a la superficie del material alcanzando el espesor total del mismo. Sus características dependen en gran medida de la frecuencia del test, así como por el espesor del material. Estas ondas se generan cuando una onda alcanza la superficie de un material, con un ángulo tal que la componente de la velocidad paralela a la propagación en la fuente es equivalente a la velocidad de la onda en el material en estudio. Estas ondas pueden viajar varios metros por materiales como acero, por lo que son muy útiles para testear elementos como pletinas, tuberías, etc. Las ondas Lamb pueden darse en varios modelos de vibración, siendo el simétrico y el asimétrico los dos más comunes.

TIPO DE ONDA	VIBRACIÓN DE PARTÍCULAS
Longitudinal	Paralelas a la propagación
Transversal	Perpendiculares a la propagación
De superficie (Rayleigh)	Órbita elíptica
Lamb	Perpendicular a la superficie

Figura 2.5-4 Tipo de vibración de las partículas en función del tipo de onda que les afecte.

<sup>23</sup> El segundo ángulo crítico se da cuando el ángulo de incidencia es tal, que la restante onda transversal dentro del elemento es refractada fuera del material. Con este ángulo, cuando la onda transversal refractada es de 90°, se genera una onda de superficie en la superficie del material.

## PROPIEDADES DE LAS ONDAS ACÚSTICAS

Las tres propiedades más importantes de ondas acústicas, propagándose por materiales sólidos isotrópicos son: longitud de onda, frecuencia y velocidad (Ecuación 2.5-1).

*Ecuación 2.5-1*

$$\lambda = \frac{V}{f}$$

Siendo:

$\lambda$ , longitud de onda en m.

$V$ , velocidad en m/s.

$f$ , frecuencia en Hz.

La longitud de una onda acústica (Figura 2.5-2) es la distancia de una cresta de la onda a la siguiente. El número de longitudes de onda que pasan por un determinado tiempo en un segundo se denomina frecuencia ( $f$ ); cada longitud de onda representa un ciclo completo de la onda, por lo que la frecuencia se expresa en ciclos por segundo o Hertzios (Hz).

La velocidad del sonido dentro de un material depende de las propiedades del material y es independiente de la amplitud de la onda acústica. La segunda ley de Newton dice que la fuerza aplicada a una partícula ( $f$ ) será equilibrada por la masa ( $m$ ) de la partícula y la aceleración ( $a$ ) de la partícula ( $F = m \cdot a$ ). La ley de Hooke dice que esta fuerza será equilibrada por una fuerza en dirección opuesta y dependerá de la cantidad de desplazamiento ( $x$ ) y la constante de resorte ( $k$ ). Por consiguiente, dado que la fuerza aplicada y la de equilibrio son iguales,  $m \cdot a = k \cdot x$ . Y, dado que la masa y la constante de resorte son constantes para un material determinado, la aceleración y el desplazamiento son las variables y son directamente proporcionales. Además, el tiempo que una partícula emplea en moverse y retornar a su posición de equilibrio es independiente de la fuerza aplicada. Así pues, para un material dado, el sonido siempre atraviesa a la misma velocidad independientemente de la fuerza que se le aplique, cuando otras variables, como la temperatura, permanecen constantes.



Así pues, la velocidad del sonido para un determinado medio es constante y una característica de dicho medio. Además, de la ecuación 1 se deduce que, a mayor frecuencia, menor longitud de onda. Por ejemplo, la velocidad de la una onda longitudinal en acero es de 5.850 m/s, lo que corresponde a una longitud de onda de 5,85 mm para una frecuencia de 1 MHz.

De lo anterior se deduce que el sonido viaja a diferente velocidad en diferentes materiales. La velocidad de propagación es constante en el material y depende del módulo de elasticidad a tracción (o módulo de Young) y de la densidad del material:

Ecuación 2.5-2

$$V = \sqrt{(C_{ij}/\rho)}$$

Siendo,

V, velocidad del sonido en metros por segundo (m/s)

$C_{ij}$ , módulo de elasticidad para una dirección determinada en newton por metro cuadrado (N/m<sup>2</sup>)

$\rho$ , densidad en Kg/ m<sup>3</sup>

Esta ecuación puede adquirir diferentes formas dependiendo de si la onda es longitudinal o transversal. Las ondas longitudinales viajan más rápidas que las ondas transversales (aproximadamente el doble de rápido) (USGS & NASA, 2012). Por tanto, la velocidad del sonido no depende de la amplitud ni de la frecuencia, sino del medio por el cual se propaga.

La Figura 2.5-5 (NDT Education Resource Center, 2001-2014) muestra algunos de los valores de velocidad longitudinal y velocidad transversal para diferentes materiales.

MATERIAL	V <sub>L</sub>	V <sub>T</sub>
Acero (1020)	5890	3240
Acero colado	4800	2400
Aluminio	6320	3130
Cobre	4660	2330
Granito	3900	N/A
Hormigón	3650	N/A
Ladrillo	3650	2560
Madera pino	3320	1307
Mármol	6150	N/A
Pizarra	4500	N/A
Tejido humano	1470	N/A
Titanio	6070	3310

Figura 2.5-5 Valores de la velocidad longitudinal y de la velocidad transversal para diferentes materiales comunes. Tabla adaptada (NDT Education Resource Center, 2001-2014)

## REFLEXIÓN Y REFRACCIÓN

Al incidir sobre una superficie de propiedades elásticas distintas al medio por el que se propagan, parte de la energía de la onda es reflejada por dicha superficie en una dirección del mismo ángulo que formaba la onda incidente con esa superficie. Este fenómeno se denomina reflexión ( $V_{L1}$  en Figura 2.5-6).

El resto de la onda que no sufre reflexión, penetra en el siguiente medio con la misma frecuencia, pero con una dirección distinta a la de la onda incidente. Es el fenómeno de refracción ( $V_{L1}$  y  $V_{L2}$  en Figura 2.5-6).

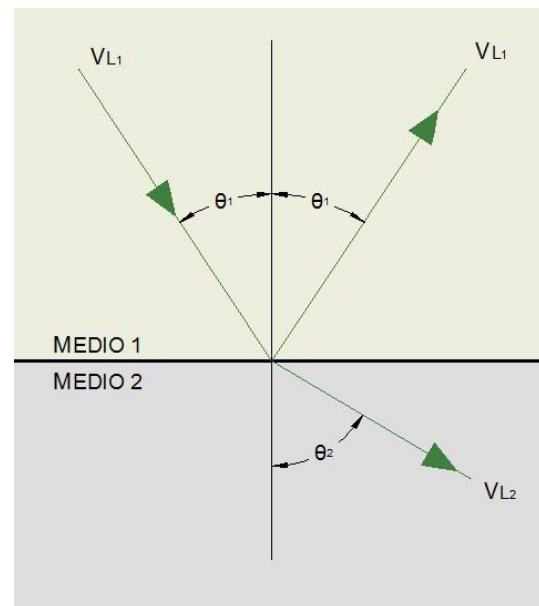


Figura 2.5-6 Representación del fenómeno de reflexión y del fenómeno de refracción para una onda acústica.

## ATENUACIÓN

La intensidad del sonido,  $I$ , es la cantidad de energía que transporta la onda acústica por unidad de área en una unidad de tiempo. Cuando el sonido viaja por un medio, su intensidad disminuye con la distancia. En un medio ideal, la amplitud de la onda se reduce debido a la expansión de la onda. Sin embargo, en los medios naturales, la amplitud se debilita además por los fenómenos de la absorción y la dispersión. La dispersión es la reflexión del sonido en otras direcciones diferentes a la original de propagación. La absorción es la conversión de la energía acústica a otras formas de energía; a mayor frecuencia mayor absorción. Los materiales con alta capacidad de absorción son los utilizados como amortiguadores acústicos. La combinación de la absorción y la dispersión se denomina atenuación. La atenuación, es generalmente proporcional al cuadrado de la frecuencia y depende además del material, de la frecuencia y del tipo de onda. El cambio de amplitud se expresa:

Ecuación 2.5-3

$$A = A_0 e^{-\alpha z}$$

Siendo:

$A_0$  Amplitud original sin atenuar en metros (m)

$\alpha$  Coeficiente de atenuación en neper<sup>24</sup> por segundo (Np/s)  
 $z$  distancia recorrida en metros (m)

La atenuación puede calcularse evaluando las múltiples reflexiones en la parte trasera del elemento. La variación de decibelios entre dos señales contiguas es medida y el valor resultante dividido por el intervalo de tiempo entre ellas. El resultado es el coeficiente de atenuación en decibelios por unidad de tiempo. Sabiendo la velocidad del sonido en dicho medio, puede ser convertido a decibelios por unidad de longitud.

## IMPEDANCIA ACÚSTICA

La impedancia acústica de un material ( $Z$ ) se define como la resistencia que opone el medio a la propagación de las ondas; es el producto de la densidad del material por la velocidad del sonido en dicho material. Por tanto, un material con baja impedancia acústica, implica que posee baja resistencia a las deformaciones elásticas producto de las ondas sonoras. El conocimiento de la impedancia acústica de un material es útil para determinar la transmisión acústica y reflexión en el límite entre dos materiales con diferente impedancia acústica. También resulta de utilidad para elegir el tipo de transductor ultrasónico, así como para conocer la absorción del sonido en un medio determinado.

*Ecuación 2.5-4*

$$Z = \rho V$$

Siendo,

$Z$ , impedancia acústica en kilogramos por metro cuadrado segundo ( $\text{Kg/m}^2\text{s}$  o  $\text{N s/m}^3$ )

$\rho$ , densidad kilogramos por metro cúbico ( $\text{Kg/m}^3$ )

$V$ , velocidad del sonido en el material en metros por segundo (m/s)

---

<sup>24</sup> El neper (Np) es un valor logarítmico adimensional que puede ser convertido a decibelios dividiendo por 0,1151.

MATERIAL	IMPEDANCIA ACUSTICA
Aluminio	40.6
Cobre	44.6
Corcho	0.12
Granito	26.8
Hierro	46.4
Hierro colado	33.2
Hormigón	8
Ladrillo	7.4
Madera de pino	1.57
Mármol	10.5
Plomo	24.6
Porcelana	13.5

Figura 2.5-7 Valores de impedancia para diferentes materiales en MRayls [MRayls = (Kg/(sxm<sup>2</sup>) x 106].  
Tabla adaptada (Ialand, 2010-2016)

Las ondas ultrasónicas se reflejan en las interfases con diferente impedancia acústica (Z) de los materiales. Cuanto mayor sea esta diferencia, mayor será el porcentaje de energía reflejada en la interfase. Cuando ambas impedancias son conocidas, se puede calcular la parte de energía reflejada (el coeficiente de reflexión, R):

Ecuación 2.5-5

$$R = \left( \frac{Z_1 - Z_2}{Z_2 + Z_1} \right)^2$$

Dado que la energía reflejada más la energía transmitida equivale a la energía total incidente, el coeficiente de transmisión se calcula a partir de la siguiente expresión:

Ecuación 2.5-6

$$T = 1 - R$$

Cuando una onda ultrasónica atraviesa con un ángulo oblicuo una interfase con materiales con diferentes índices de refracción, parte de la onda se refleja y parte se refracta. Esto se debe a que las velocidades del sonido en los dos materiales son diferentes. La Ley de Snell describe la relación entre los ángulos y las velocidades de las ondas:

Ecuación 2.5-7

$$\left( \frac{\text{sen}\theta_1}{V_{L_1}} \right) = \left( \frac{\text{sen}\theta_2}{V_{L_2}} \right)$$

Siendo  $V_{L_1}$  y  $V_{L_2}$  las velocidades de las ondas longitudinales para los dos materiales respectivamente y  $\theta_1$  y  $\theta_2$  los ángulos de energía incidente y refractada respectivamente.

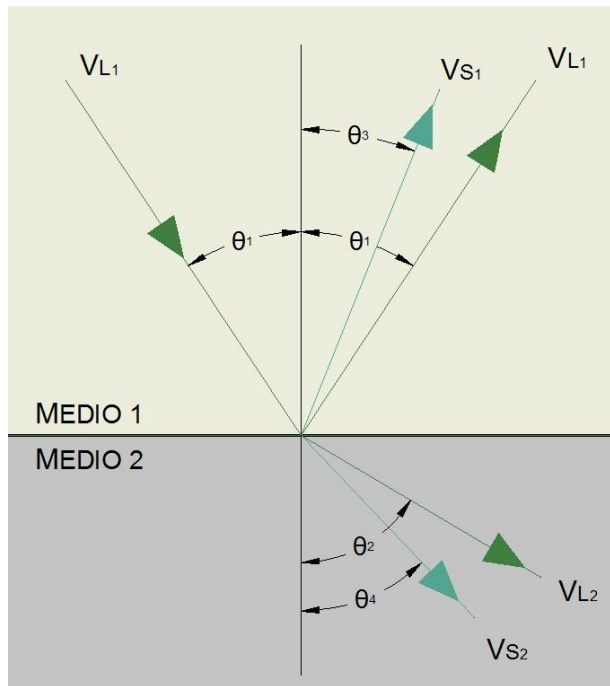


Figura 2.5-8 Reflexión y refracción de una onda longitudinal cuando incide sobre un medio con diferente índice de refracción con un ángulo no normal y genera una onda transversal.

Por otra parte, cuando una onda acústica atraviesa un material sólido, la energía que porta la onda puede ser transformada; cuando una onda longitudinal impacta con una interfase a un determinado ángulo, parte de esa energía causa movimiento de partículas en el sentido transversal, lo cual origina una onda transversal. Esto ocurre cuando la onda encuentra una interfase de materiales con diferentes impedancias acústicas y el ángulo de incidencia no es normal a la interfase. La onda transversal convertida experimenta una menor refracción que la onda longitudinal debido a que la velocidad de las ondas transversales es

menor que la velocidad de las ondas longitudinales. Por el mismo motivo, cuando una onda longitudinal se ve refractada dentro del material, la correspondiente onda transversal refractada lo hace en un ángulo menor a la longitudinal.

Ecuación 2.5-8

$$\frac{\text{sen}\theta_1}{V_{L1}} = \frac{\text{sen}\theta_2}{V_{L2}} = \frac{\text{sen}\theta_3}{V_{S1}} = \frac{\text{sen}\theta_4}{V_{S2}}$$

Siendo,

$V_{L1}$  y  $V_{L2}$  las velocidades de las ondas longitudinales en el material 1 y el material 2 respectivamente.

$\theta_1$  y  $\theta_2$  los ángulos incidente y refractado de las ondas longitudinales en los materiales 1 y 2 respectivamente.

$V_{S1}$  y  $V_{S2}$  las velocidades de las ondas transversales en el material 1 y el material 2 respectivamente.

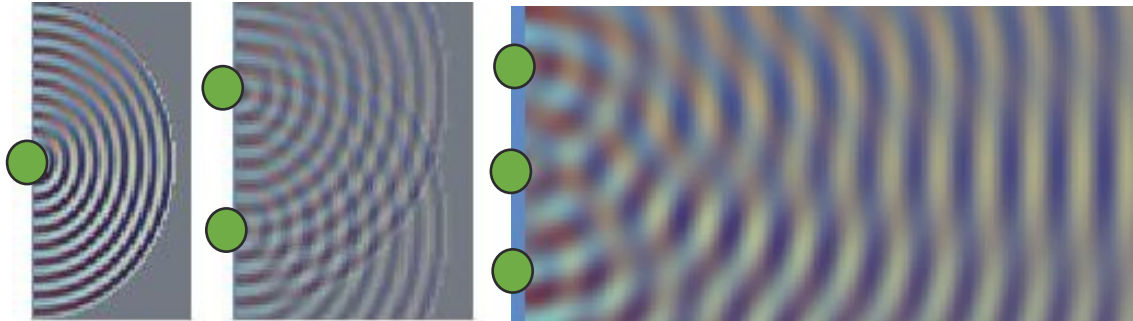
$\theta_3$  y  $\theta_4$  los ángulos incidente y refractado de las ondas transversales en los materiales 1 y 2 respectivamente.



## SUPERPOSICIÓN DE ONDAS

Cuando un transductor acústico genera ondas acústicas, no lo hace desde un solo punto sino desde varios puntos de la superficie del piezoelectrico. Esto da lugar a un campo acústico con muchas ondas interactuando e interfiriendo entre ellas. Cuando dos ondas interactúan, se superponen, y la amplitud de la onda sonora resultante en ese punto es la suma de las amplitudes de las dos ondas que interactúan. Si las ondas están en fase, duplican su amplitud. Si las ondas se encuentran en oposición de fase, se anulan mutuamente.

En la Figura 2.5-9 pueden observarse las interacciones de ondas generadas en dos y tres puntos. Cuando las ondas interactúan cerca del transductor, se generan gran cantidad e interferencias, y el campo acústico es muy irregular. Esta zona es la que se conoce como “campo cercano” o “zona Fresnel”. Sin embargo, el campo acústico se regulariza en el “campo lejano” o “zona Fraunhofer”. A cierta distancia del transductor, en su zona central las diferentes ondas se unifican en una. Conocer la posición de dicha zona es importante en la realización de ensayos basados en el estudio de ondas acústicas.



*Figura 2.5-9 Superposición de ondas. A la izquierda se observa la onda generada desde un único punto. En el centro y a la derecha, resultados de la combinación de ondas generadas desde dos y tres puntos respectivamente. La imagen de la derecha muestra cómo, a una determinada distancia de los puntos de generación acústica, la superposición de ondas genera una única onda definida, es lo que se denomina zona Fraunhofer.*

## 2.5.1. IMPACTO-ECO (IMPACT-ECHO, IE)

### 2.5.1.1. INTRODUCCIÓN

---

Se trata de una técnica de evaluación no destructiva basada en el estudio de la propagación de la energía acústica generada por un impacto mecánico en el material en estudio. La energía, es posteriormente registrada por un transductor ultrasónico y procesada. Esta técnica permite detectar anomalías como grietas, oquedades, delaminaciones y pérdidas de adherencia entre materiales, en fábricas de diferentes configuraciones, siempre que sus materiales estén ligados; también permite calcular espesores de elementos arquitectónicos.

Las TND basadas en el estudio de la reflexión de la energía acústica, generan las ondas acústicas, bien con un transductor o mediante un impacto mecánico. Si se utiliza un transductor, el método se denomina impulso-eco (*pulse-eco*) mientras que si se utiliza un impacto mecánico (generalmente un martillo instrumentalizado) se denomina impacto-eco (*impact-echo*). Ambas técnicas estudian la reflexión de las ondas.

La TND del *pulse-echo* (o ultrasonidos) introducida a mediados del siglo XX había demostrado buenos resultados en materiales homogéneos, pero no en otros como el hormigón, ya que las altas frecuencias empleadas eran fuertemente atenuadas por la naturaleza heterogénea del material. En la década de 1970, se comenzaron a utilizar métodos de impacto para testear la integridad de cimentaciones profundas, como pilotes. Se utilizaban martillos que generaban frecuencias muy bajas, inferiores a 1 kHz, para poder determinar la profundidad de los pilotes (Sansalone, M.; Carino, N.J., 1986). A principios de la década de 1980, científicos del cuerpo *U.S. National Bureau of Standards* investigaron el uso de impactos mecánicos breves, producidos por esferas de acero, como fuente de generación de ondas para testear elementos estructurales de hormigón, tales como losas o forjados (Sansalone, M., 1986). Descubrieron que es posible generar ondas de frecuencias alrededor de los 80 kHz escogiendo el tamaño de esfera adecuado. La onda se transmitía a través del hormigón como si se tratase de un medio elástico homogéneo, pero eran reflejadas en interfases y anomalías. Denominaron al

método *impact-echo* para diferenciarlo de los métodos *pulse-echo*, en los que era necesario un transductor para generar las ondas. A mediados de la década de 1990 se comenzó a utilizar el método con éxito en fábricas de piedra (Williams & et. al., 1997).

## 2.5.1.2. ANTECEDENTES HISTÓRICOS

---

Durante 1970, el *National Bureau of Standards* (NBS) llevó a cabo investigaciones en varios edificios y puentes que habían colapsado. Una de las conclusiones de dichas investigaciones fue la necesidad de desarrollar métodos de evaluación no destructiva para detectar fallos en de resistencia y anomalías. En 1983 Nicholas Carino, un ingeniero de estructuras, investigador miembro de NBS y Mary Sansalone, una estudiante en prácticas de Cornell University, comenzaron a desarrollar un método capaz de detectar dichas anomalías en hormigón, el impacto-eco; finalmente éste se convertiría en la tesis doctoral de Snsalone. En el desarrollo del método, financiado por NBS, también intervinieron el ingeniero Nelson Hsu y el físico Thomas Proctor, ambos empleados de NBS.

Los primeros estadios de la investigación se centraron en identificar un método capaz de localizar grietas, oquedades y otros defectos en estructuras de hormigón. La investigación incluía estudios teóricos, de cálculo y de laboratorio. Fueron cuatro los progresos que llevaron al éxito de la técnica: simulación numérica de la propagación de las ondas en solidos utilizando modelos informáticos basados en el método de elementos finitos, el uso de esferas de acero calibradas como elemento generador de las ondas, identificar un transductor suficientemente sensible a los desplazamientos de la superficie y la utilización del análisis en dominio frecuencia para interpretar los resultados.

En 1982, Proctor inventó un transductor de banda ancha suficientemente sensible, que respondía con precisión a los desplazamientos normales a la superficie. En origen, se inventó para testear metales, pero pronto fue adaptado a la técnica del impacto-eco. Consistía en un elemento piezoeléctrico cónico con un amortiguador de bronce y una zapata de plomo que propiciaba un acoplamiento satisfactorio a superficies rugosas como hormigón o ladrillo sin necesidad de utilizar un

acoplante. Cuando se presionaba contra la superficie, detectaba las llegadas de los reflejos de las ondas acústicas con un voltaje proporcional al desplazamiento normal a la superficie, produciendo señales mayores a un voltio en respuesta a los desplazamientos de la superficie menores a una micra.

Entre 1987 y 1997 continuaron las investigaciones en Cornell University. Los esfuerzos en esta etapa se centraron en aplicar el método a diferentes materiales y geometrías. Se estudiaron defectos tales como grietas, oquedades, delaminaciones, pérdida de adherencia parcial total y deterioro por compresión excesiva. También se identificaron y explicaron los efectos de las señales del impacto-eco en el armado del hormigón y en las estructuras post-tensadas. En esta época, también se aplicó y aprobó el método para fábricas de ladrillo y piedra de varias hojas, llegándose a la conclusión de que es posible detectar grietas, oquedades y otras anomalías en estas fábricas siempre y cuando todos los elementos estén bien adheridos entre sí (Figura 2.5-10).

Durante el desarrollo del método del impacto-eco, se utilizaron, en plataformas informáticas, códigos basados en elementos finitos para simular la respuesta de estructuras complejas a ondas elásticas. En 1988 se comenzó a utilizar un código tridimensional basado en elementos finitos denominado DYNA, desarrollado por el laboratorio Lawrence Livermore para resolver deformaciones finitas producidas por impactos de contacto dinámicos (Goudrea & Hallquist, 1982). Dichas simulaciones proporcionaron información detallada sobre la propagación y reflexión de las ondas mecánicas en estructuras con defectos; también ayudaron a determinar las formas y correspondientes frecuencias de las resonancias transitorias excitadas en las diferentes interfases, es decir los patrones de comparación.



*Figura 2.5-10 Tests de laboratorio. En la imagen se muestra el encofrado de una losa de 0,5 m de profundidad, que contiene varios discos de aislante a modo de simulación de grietas planas u oquedades a diferentes profanidades (Sansalone, M.; Carino, N.J., 1986).*

Otro de los acontecimientos que favorecieron el desarrollo de la técnica fue la creación de una unidad portable. A finales de la década de 1980, la mejora de los sistemas de registro analógico-digital junto con la posibilidad de utilizar ordenadores portátiles hizo posible fabricar una unidad de impacto-eco de campo

ligera y robusta. El sistema, de alrededor de 15 kg, diseñado por M. Sansalone y D. Pratt y patentado por Cornell University, estaba compuesto por: juego de impacto (esferas), transductor receptor, sistema de adquisición/registro, ordenador portátil y software para transferir, analizar y almacenar los datos del test (Figura 2.5-11). Este modelo mostraba los resultados en la pantalla en aproximadamente 4 segundos desde el impacto; en la siguiente década, gracias a los avances tecnológicos el tiempo descendió a un segundo.



*Figura 2.5-11 Imagen del primer modelo de sistema impacto-eco, manipulado por su inventora M. Sansalone, en una investigación para detectar oquedades en los tendones de un elemento post-tensado. Kay Chernash (Sansalone & Streett, 1997)*

El último gran avance de la técnica de impacto-eco fue, a finales de la década de 1990, la utilización de métodos de inteligencia artificial para facilitar el proceso de reconocimiento de patrones e interpretación de las reflexiones.

### 2.5.1.3. FUNCIONAMIENTO

---

El método de impacto-eco se basa en la utilización de ondas generadas por un impacto elástico. Un impacto de corta duración, producido por el golpe de una pequeña esfera de acero contra la superficie del material en estudio, genera ondas de baja frecuencia que se propagan a través del material y se reflejan en anomalías e interfases. Los micro-desplazamientos de la superficie al recibir esas reflexiones son registradas por un transductor situado junto al impacto. Dichos desplazamientos y los tiempos registrados son transformados a dominio frecuencia, obteniéndose gráficos de amplitud versus frecuencia denominados espectros. Las reflexiones múltiples entre la superficie, las anomalías y las interfases dan lugar a resonancias que pueden ser identificadas en el espectro y utilizadas para evaluar la integridad de la estructura y evaluar la presencia de determinadas lesiones (Figura 2.5-12).



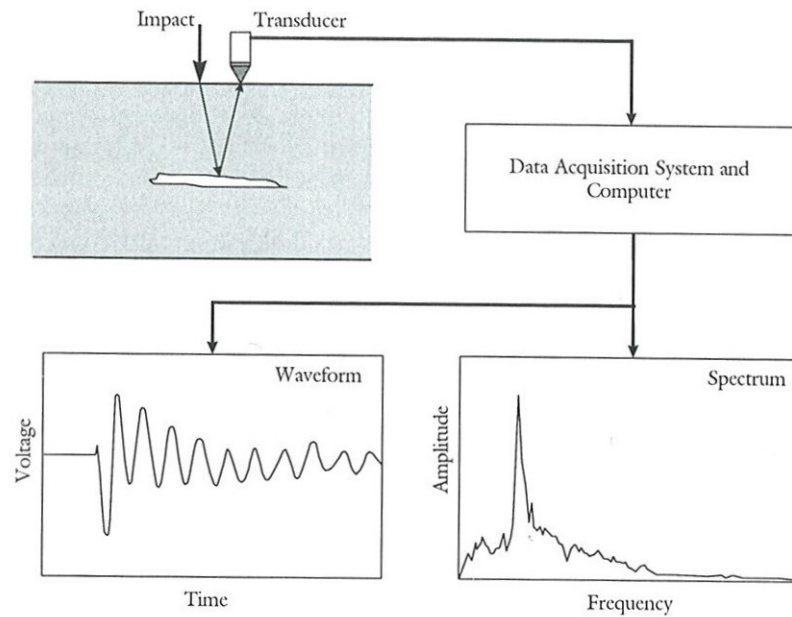


Figura 2.5-12 Las reflexiones múltiples entre la superficie, las anomalías y las interfases dan lugar a resonancias que pueden ser identificadas en el espectro y utilizadas para evaluar la integridad de la estructura e identificar la presencia de determinadas lesiones (Sansalone & Streett, 1997, p. 13)

El impacto elástico del acero en la superficie del sólido resulta en una función fuerza-tiempo definida y que es matemáticamente simple; los diagramas de onda generados facilitan la interpretación de la señal recibida. La utilización de un impacto mecánico permite eliminar el transductor emisor y generar ondas de baja frecuencia, corta duración, con energía suficiente como para penetrar en el hormigón. Si bien es posible utilizar otros elementos metálicos, el uso de esferas calibradas facilita la estandarización del método. Es muy común la utilización de martillos. Las esferas varían en diámetro de 4 a 15 mm<sup>25</sup>, generando velocidades entre 2 y 10 m/s y tiempos de impacto de entre 15 y 80 μs (Sansalone & Streett, 1997). El impacto con dichas esferas genera ondas de frecuencias menores a 80 KHz con suficiente energía para penetrar en fábricas de hormigón hasta 1,5 m. La elección de la esfera definirá la frecuencia y la profundidad de penetración de la onda, por lo que se habrá de tener en cuenta la posible localización del objetivo de la investigación.

Diámetro esfera (mm)	Tiempo Contacto (μs)	Frecuencia a Max. (kHz)	Profundidad mínima, d, anomalía (mm)	Tamaño mínimo, e, anomalía (mm)
5	22	57	35	70
6.5	29	43	46	91
8	35	36	56	112
9.5	42	30	67	133
11	48	26	77	154
12.5	55	23	88	175

Figura 2.5-13 Valores de profundidad mínima a la que tiene que estar la anomalía y espesor mínimo de la misma, para ser detectada con la TND del IE, en función del diámetro de la esfera (tabla adaptada de (Sansalone & Streett, 1997)).

<sup>25</sup> En la actualidad se pueden encontrar juegos que incluyen más diámetros, como el de 2 mm.

Cabe destacar que los materiales del estudio en impacto-eco son considerados linealmente elásticos, isotrópicos y homogéneos. Las ondas generadas tienen unas frecuencias de menos de 80 kHz lo que implica longitudes de onda desde los pocos centímetros a varios metros. Con estas longitudes de onda, materiales heterogéneos como el hormigón, las fábricas de ladrillo o piedra, asfalto, son homogéneos para las ondas, siempre que sus componentes sean menores a la longitud de onda empleada, por lo que pueden ser modelados como isotrópicos y homogéneos.

Son los patrones que presentan los diagramas y espectros los que proporcionan información sobre la existencia y localización de anomalías o de las dimensiones de la estructura. Para cada una de las formas de elementos estructurales sólidos, los test generan formas de onda y espectros distintivos, en los que los patrones dominantes, especialmente número y distribución de picos en el espectro, son fácilmente reconocibles. Si hay lesiones presentes (grietas, vacíos, delaminaciones, etc.) estos patrones se interrumpen y cambian de modo que pueden proporcionar información cualitativa y cuantitativa sobre la existencia y localización de lesiones.

## 2.5.1.4. REPRESENTACIÓN DE RESULTADOS

---

Ya a mediados de la década de 1980, Sansalone se percató de la dificultad inherente a interpretar los diagramas de la onda de desplazamiento en dominio tiempo. Por este motivo se propuso transformar esas señales a dominio frecuencia utilizando el método de transformación Fourier. Esta transformación descompone la onda en una serie de fracciones simples, generando un gráfico de amplitud-frecuencia denominado espectro. Los picos en el espectro representan las resonancias transitorias causadas por múltiples reflexiones de la onda entre la superficie y las anomalías que encuentra en el interior del material en estudio.

### EL DOMINIO FRECUENCIA

El análisis de la frecuencia se utiliza para identificar las frecuencias dominantes de la onda en estudio.

En sólidos cohesionados que contienen defectos, las reflexiones de la onda suceden en diferentes interfases y provocan desplazamientos de la superficie, con diferentes frecuencias y amplitudes, produciendo frentes de onda que suelen ser complejos de interpretar. En algunas ocasiones, es difícil si no imposible identificar los tiempos de llegada e identificar las frecuencias clave para la evaluación del frente de onda fruto de las reflexiones. Sin embargo, si el frente de onda se transforma a dominio frecuencia, las frecuencias importantes aparecen en picos en el espectro. Esta transformación es llevada a cabo haciendo uso de una función matemática llamada Transformada de Fourier<sup>26</sup>, basada en el principio de que cualquier función dependiente del factor tiempo puede ser representada como una suma de las curvas seno de las diferentes amplitudes y frecuencias (Sansalone & Streett, 1997, p. 53).

En términos generales, un espectro típico en un material en buen estado muestra un único pico de amplitud que corresponde a la frecuencia espesor de la onda P. Sin embargo, si el material testeado presenta anomalías, el espectro mostrará una amplitud similar, pero con menor frecuencia (normalmente acompañado de otros picos de amplitud de mayor frecuencia) aunque se pueden dar otros resultados que no siguen este patrón.

A continuación, se muestran gráficos representando ondas simples y sus respectivos espectros.

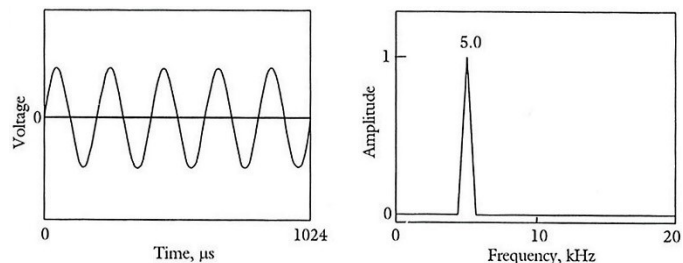


Figura 2.5-14 Representación de una onda simple de 5 kHz y su espectro correspondiente (Sansalone & Streett, 1997).

La Figura 2.5-14 representa una onda simple de frecuencia 5 kHz y amplitud 1. El espectro correspondiente refleja un único pico de 5 kHz.

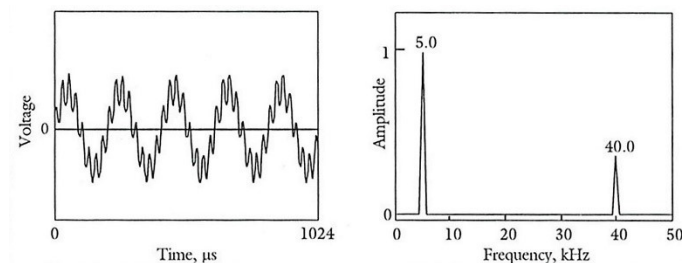


Figura 2.5-15 Representación de un frente de onda formado por dos ondas simples de frecuencias 5 y 40 kHz y su espectro correspondiente (Sansalone & Streett, 1997).

La Figura 2.5-15 representa un frente de onda formado por dos ondas sencillas sinusoidales de frecuencias 5 y 40 kHz y amplitudes 1 y 0,30 kHz.

<sup>26</sup> Fourier Transform. Se denomina FFT (Fast Fourier Transform) cuando se aplica en versión digital.

La Figura 2.5-16 representa un frente de onda correspondiente a la suma de tres ondas sinusoidales de diferentes amplitudes y frecuencias y su correspondiente espectro.

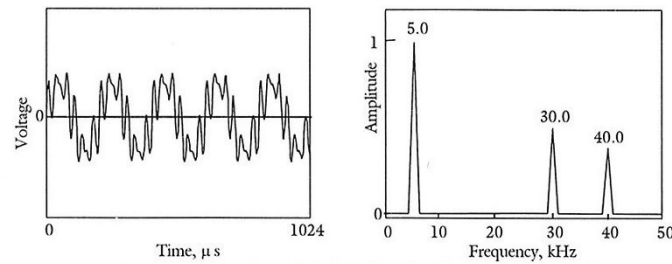


Figura 2.5-16 Representación de un frente de onda formado por tres ondas simples de diferentes frecuencias y su correspondiente espectro (Sansalone & Streett, 1997).

En la realidad, los frentes de onda generados en impacto-eco son una combinación de desplazamientos no periódicos (provenientes por ejemplo de las ondas R) y de desplazamientos/oscilaciones periódicas de diferentes frecuencias y amplitudes (ondas P). La representación de dicho frente de onda como suma de curvas sinusoidales necesita de un espectro que cubra un amplio rango de frecuencias y amplitudes.

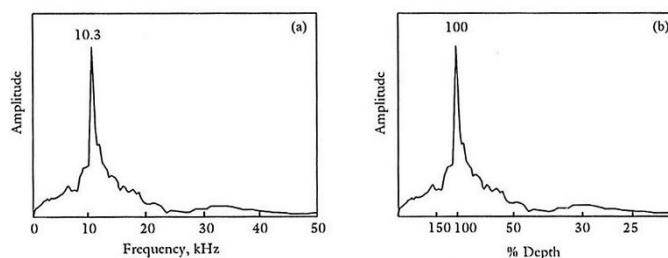


Figura 2.5-17 Representación de la onda en un test a una losa de hormigón en masa de 200 mm de espesor (Sansalone & Streett, 1997).

La Figura 2.5-17 muestra la representación de una onda producto de un test de impacto-eco en una losa de hormigón en masa de 200 mm de espesor. La velocidad de la onda en este material es de 4.290 m/s. La Ecuación 2.5-9 se utiliza para calcular la frecuencia espesor<sup>27</sup> en una placa. A pesar de que el pico corresponde claramente a la frecuencia 10,3 kHz, existen otras formas diferentes al espectro plano de la Figura 2.5-14. Estas formas representan el rango de frecuencias y

<sup>27</sup> Sansalone denomina al pico de frecuencia del espectro correspondiente al espesor del elemento  $f_t$ , del inglés *Thickness Frequency* (Sansalone & Streett, 1997, p. 55).

amplitudes de la onda R y otras características de la onda como suma de curvas sinodales.

Ecuación 2.5-9

$$f = \frac{\beta C_p}{2A}$$

Siendo,

f, frecuencia en hertzios (Hz)

$\beta$ , factor de forma, que en el caso de una placa es 0,96

$C_p$  es la velocidad de la onda en ese medio, en metros por segundo (m/s)

T, grosor del elemento, en metros (m).

En el espectro en dominio frecuencia, los componentes de la onda-R son en la mayor parte de los casos insignificantes y en los casos en los que no lo son es porque, bien el elemento a estudiar es muy grueso o bien porque el elemento tiene varias capas superficiales. En dichos casos, si se desea reducir ese efecto, es posible hacerlo cortando los valores de la onda resultante que excedan los valores de voltaje aplicado.

## 2.5.1.5. INSTRUMENTACIÓN

---

El equipo consta de (Figura 2.5-19):

- Receptor y unidad de procesado.
- Esferas de acero de varios diámetros de 2 a 15 mm.
- Unidad de control.
- Software de la unidad de control Impact-Echo
- Software para el post-procesado y análisis.



Figura 2.5-18 Imagen de la pantalla de test del software Impact-Echo SN IM02-266



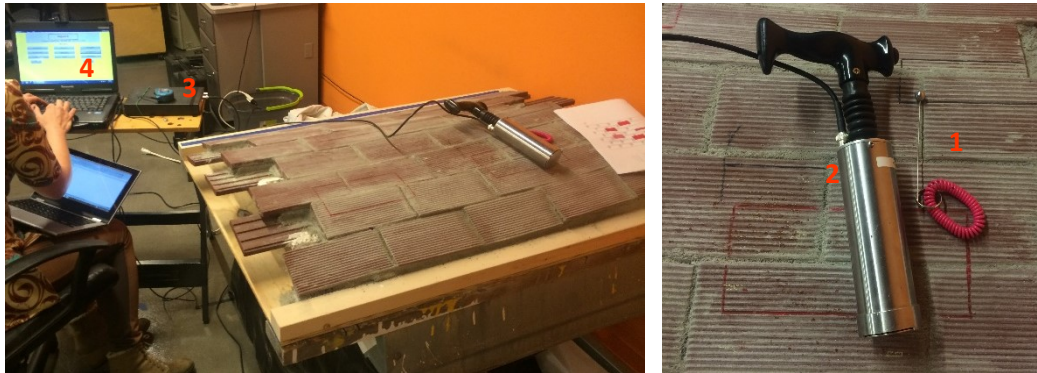


Figura 2.5-19 El equipo del test IE se compone de las bolas de impacto (1), un receptor (2), una unidad de procesado (3), un ordenador con el software IE como unidad de control (elección de valores para los parámetros, registro, procesado y análisis) (4).

## 2.5.1.6. APLICACIONES EN PATRIMONIO CONSTRUIDO

---

### LADRILLO, PIEDRA, MORTERO Y HORMIGÓN

Para que se pueda aplicar la evaluación con el método del impacto-eco, es necesario que los componentes del elemento estén unidos entre sí con, por ejemplo, mortero, de manera que el elemento responda como una única unidad continua cuando se someta al test.

Tal y como se expone en el apartado “Impedancia Acústica” en el apartado 2.5, es la diferencia relativa entre las impedancias acústicas de dos materiales la que determina si las ondas serán predominantemente reflejadas o transmitidas a través de la interfase que separa ambos materiales. Si el coeficiente de reflexión,  $R$ , tiene un valor absoluto menor de alrededor a 0,24, la mayoría de la energía incidente es transmitida y la interfase no puede ser detectada. El coeficiente de reflexión ladrillo/mortero es menor de 0,24 en el 70-85 % de los casos, con lo cual la interfase no es detectada, la energía se transmite y el test puede realizarse con éxito. Los casos en los que ese coeficiente es mayor, es decir, las reflexiones son significantes, son aquellos que tienen propiedades muy diferentes, como por ejemplo una pared construida con mortero muy débil y piedra muy dura.

Ecuación 2.5-10

$$R = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_1 + Z_2}$$

Siendo,

R, Coeficiente de reflexión, adimensional.

Z1 y Z2, impedancias acústicas de los materiales 1 y 2 en rayl (Pascal segundo por metro, Pa ·s/m).

Por consiguiente, la ecuación básica que se utiliza en impacto-eco, puede ser utilizada en fábricas de ladrillo y piedra:

MATERIAL	VELOCIDAD ONDA P
Bloque de hormigon	3.500 - 4.050
Ladrillo	2.700 -3.250
Lechada de cemento	3.200 -3.500
Mortero	3.700 -4.100

Figura 2.5-20 Velocidades típicas de la onda P en metros por Segundo (m/s) (Sansalone & Streett, 1997, p. 278).

Ecuación 2.5-11

$$f = \frac{0,96C_P}{2T}$$

Siendo,

T, el espesor del elemento, en metros (m).

0,96 el factor forma para una placa.

C<sub>P</sub> es la velocidad de la onda P<sup>28</sup>, en metros por segundo (m/s).

f, es la frecuencia de la onda P, en Hertziros (Hz).

Hasta principios de la década de 1930, los ladrillos empleados en Estados Unidos eran macizos, si bien a partir de esa época comienzan a utilizarse ladrillos perforados. La diferencia en los espectros es una variación en el pico de frecuencia debido a la menor rigidez del ladrillo. Las fabricas construidas con ladrillos con perforaciones mayores al 25% de la superficie total de una de las caras del ladrillo, son considerados huecos y no

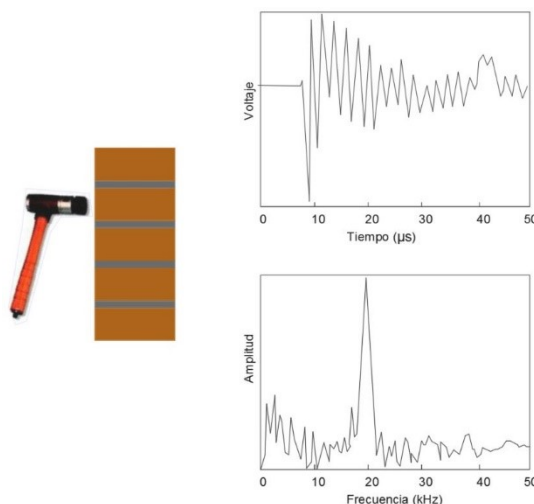


Figura 2.5-21 Sección esquemática de muro sencillo de ladrillo macizo. El diagrama superior corresponde a la representación de la onda resultante de aplicar un impacto de 30 μs y el diagrama inferior es el espectro de esa misma onda en dominio frecuencia.

<sup>28</sup> En solidos isótropos, la onda P es longitudinal.

pueden ser evaluados con el método de impacto-eco.

La Figura 2.5-21 muestra la sección esquemática de un muro sencillo de ladrillo macizo y sus respectivos diagramas de forma de onda y espectro.

Las Figura 2.5-22 y 3 muestran la sección esquemática de varios tipos de muros sencillos y compuestos de dos hojas sus respectivos espectros. Para la obtención de estos diagramas, el transductor y el impacto se localizan en el mismo ladrillo. La duración del impacto es de 30  $\mu$ s. El diagrama en dominio tiempo muestra la porción inicial de la forma de onda.

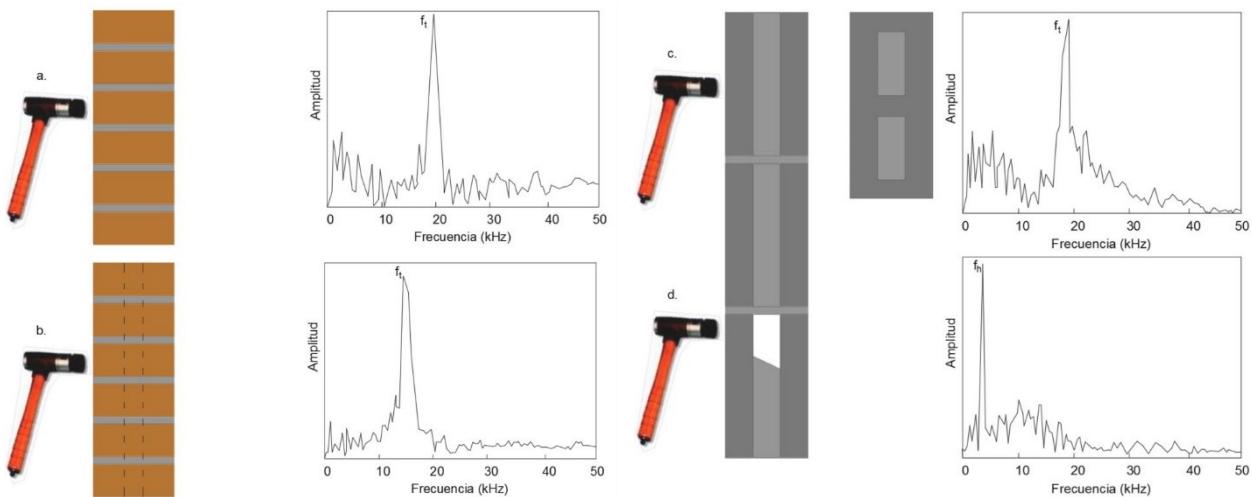


Figura 2.5-22 La figura a. muestra el espectro en un muro sencillo de ladrillo macizo de una hoja. La figura b. muestra el espectro del mismo muro que a. pero realizado con ladrillos perforados (con superficie de orificios menor al 25% de la superficie total de esa cara del ladrillo). Por último, la figuras c. y d. corresponden a los espectros de test realizados en un muro de bloque de hormigón con mortero vertido en su interior; en la localización c. no existen bolsas de aire en el inyectado mientras que en d. sí.

La Ecuación 2.5-12 sirve para calcular la respuesta de una pared compuesta de diferentes hojas.

Ecuación 2.5-12

$$f_t = \frac{1}{\left(\frac{2T_1}{0,96C_{P1}}\right) + \left(\frac{2T_2}{0,96C_{P2}}\right) + \left(\frac{2T_3}{0,96C_{P3}}\right) + \dots}$$

Siendo,

$f_t$ , el pico de frecuencia de la onda P, en Hertzios (Hz).

$T_1$  es el espesor de la hoja 1, en metros (m).

$T_2$  es el espesor de la hoja 2, en metros (m) y así sucesivamente.

$c_{p1}$ , es la velocidad de la onda P en el material 1, en metros por segundo (m/s).

$c_{p2}$ , es la velocidad de la onda P en el material 2, en metros por segundo (m/s) y así sucesivamente.

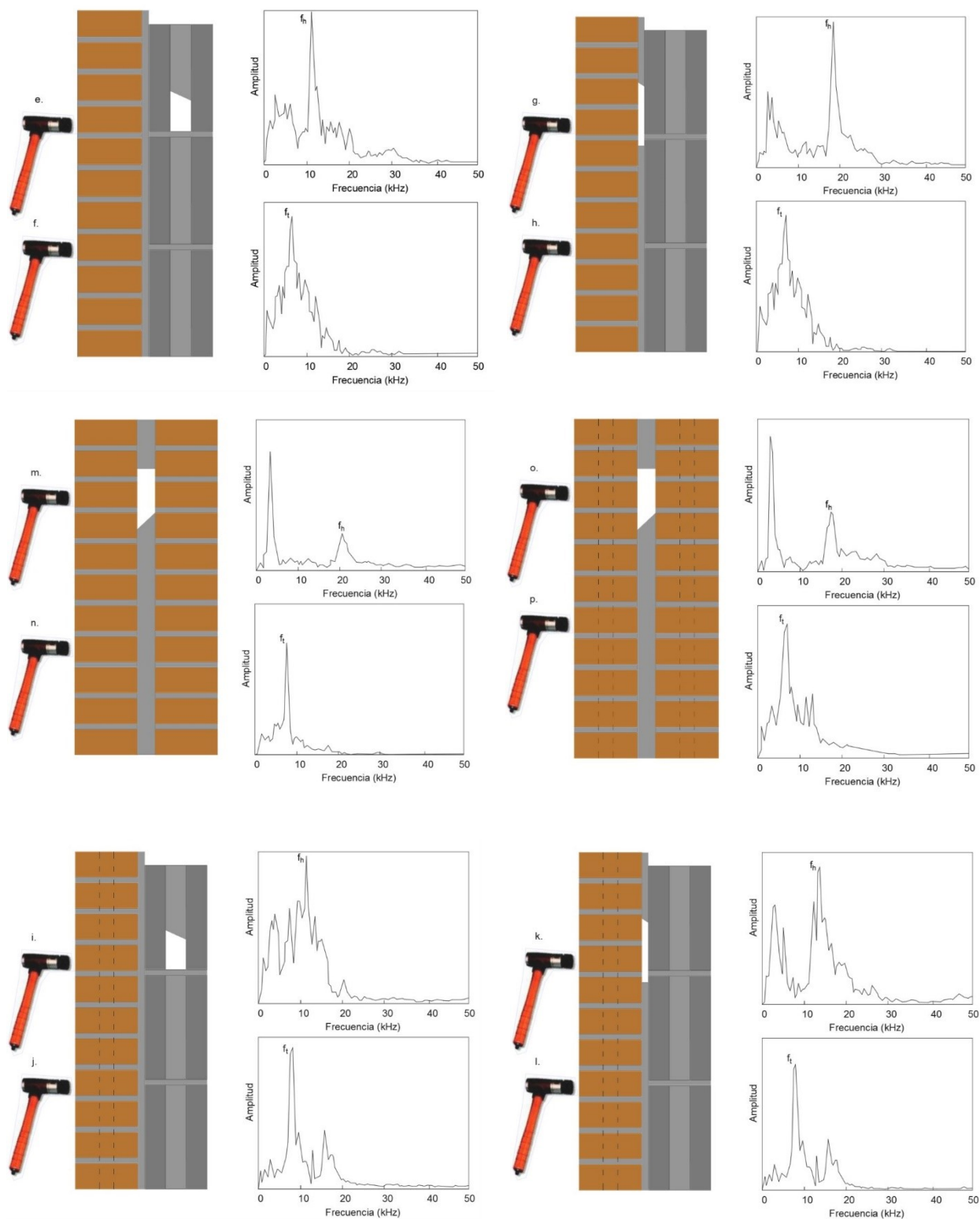


Figura 2.5-23 Espectros correspondientes a distintos casos de configuración de muros compuestos de varias hojas en función de su configuración y de la existencia o no de oquedades.

Sansalone llevó a cabo estudios en los que demuestra que un muro con numerosas grietas en las juntas de testa sigue respondiendo al test de impacto-eco como si se tratase de una placa. Sin embargo, puede no ocurrir así si las grietas están localizadas en la tabla del ladrillo, especialmente si la profundidad de estas es igual a la del ladrillo (Sansalone & Streett, 1997, p. 282).

De los estudios de Sansalone en fábricas de ladrillo simples y compuestas se deducen las siguientes conclusiones: las oquedades en inyecciones de mortero en elementos arquitectónicos de ladrillo, bloques y hormigón pueden ser detectados. Así mismo, la discontinuidad en la junta de unión de diferentes hojas también puede ser detectada. En el caso de tratarse de muros de ladrillos perforados (con huecos en menos de un 25% en cualquiera de sus superficies), es posible aplicarles el método de impacto-eco siempre que la duración del impacto sea superior a 30  $\mu$ s; las perforaciones provocan cambios cuantificables en la respuesta, pero no impiden la detección de defectos.

El espesor completo de un elemento puede ser evaluado siempre que sus hojas estén unidas entre sí sin espacios intersticiales. En caso de existir una oquedad o grieta, las ondas serán reflejadas en las interfases solido-aire o solido-agua y no será posible obtener información del material detrás de la anomalía. En algunos casos es posible eliminar esta limitación realizando otro test en el mismo lugar en la superficie opuesta del elemento.

Otra aplicación de esta técnica es la localización de llaves de ladrillo en muros de varias hojas de ladrillo tal y como se muestra en la Figura 2.5-24. El método consiste en comparar los espectros obtenidos in situ con los espectros patrón. En el caso de que el test se realice en un ladrillo sin llave, la respuesta será similar a la de un muro de una hoja ya que la cámara de aire entre hojas reflejará toda la onda. En el caso de que el test se realice en un ladrillo

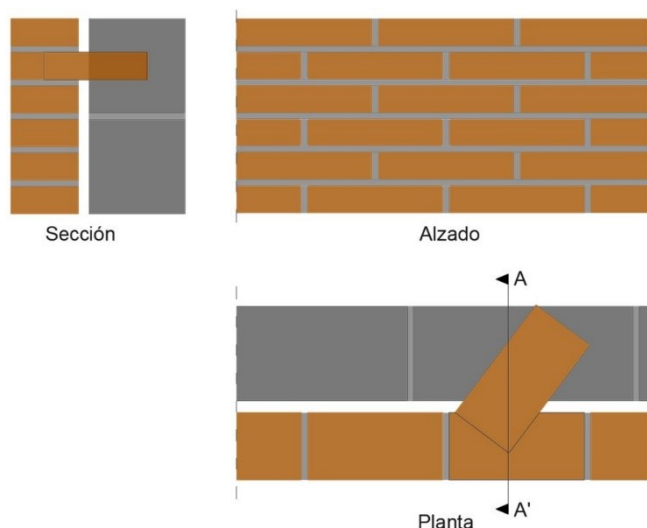


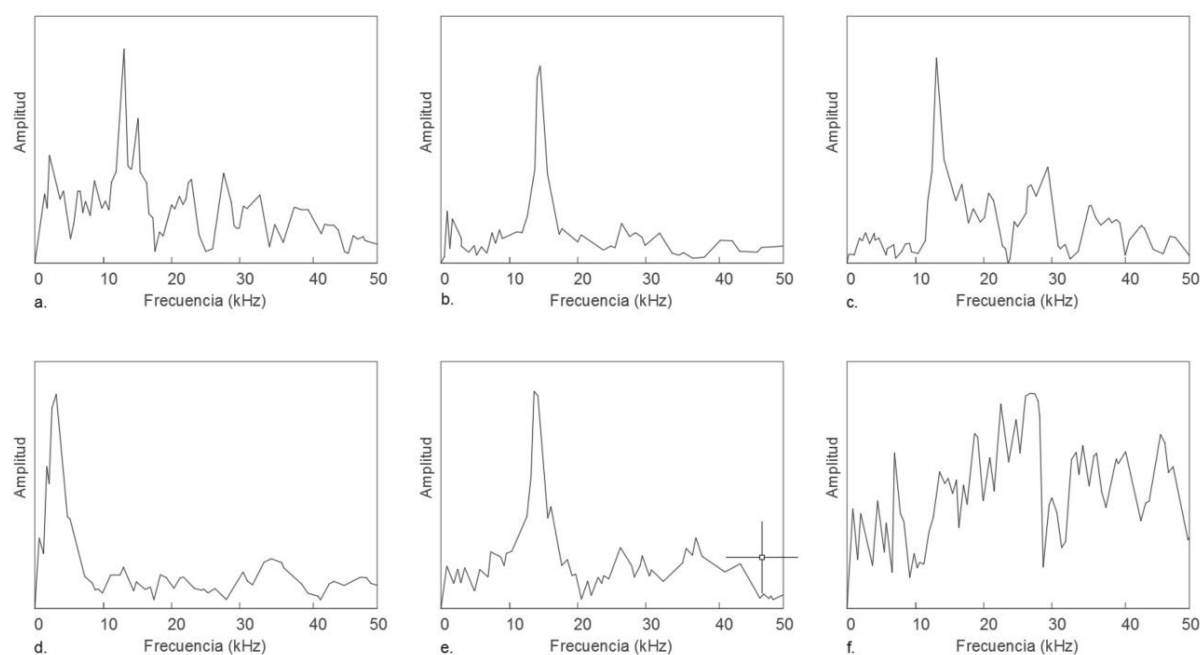
Figura 2.5-24 Representación esquemática de una llave tradicional de ladrillo que conecta dos hojas en un muro de fachada.

con llave, la respuesta será diferente en función de si la llave está unida con mortero a ambas hojas o solo a una; si existe unión, la respuesta será compleja



fruto de una geometría compleja. Si no existe unión entre la llave y el ladrillo, la respuesta será similar a la de una delaminación, ya que la profundidad de material es muy reducida.

En la Figura 2.5-25, los espectros a, b, c y e corresponden a espectros muy similares obtenidos en localizaciones donde no existe llave, con lo que la respuesta es la de una hoja de ladrillo simple. El espectro d, corresponde a una localización con llave, pero sin unión entre la llave y el ladrillo testeado. La respuesta es similar a la de una delaminación debido a la poca sección de ladrillo existente en esa localización. El espectro f, corresponde a una localización en la que hay una llave pero en este caso sí que está conectada con ambas hojas por medio de mortero. El resultado es un espectro complejo fruto de las múltiples reflexiones en diferentes interfases de geometría compleja.



*Figura 2.5-25 Espectros obtenidos en la investigación de un muro de ladrillo compuesto cuyas hojas están conectadas con llaves de ladrillo. Los espectros a, b, c, y e, corresponden a localizaciones en las que no existe llave, por lo que el espectro es parecido al de una hoja simple de ladrillo. La figura d, corresponde a una localización en la que existe una llave de ladrillo que no está conectada al muro, por lo que el espectro es similar al de una delaminación debido a la reducida sección de ladrillo. En el caso de f, existe una llave bien conectada a ambas hojas, lo que produce un espectro complejo debido a las diferentes interfases que atraviesa la onda.*

ASTM C1383 Describe el proceso de medir el espesor de elementos arquitectónicos utilizando el método del impacto-eco.

Así pues, la TND del impacto-eco puede resultar útil en los siguientes casos:

- Determinar la localización y alcance de lesiones como grietas, oquedades, delaminaciones y pérdida de adherencia en hormigón en masa, post-tensado y hormigón armado, incluyendo elementos como placas (losas de cimentación, pavimentos, paredes), columnas y vigas (redondas, cuadradas, rectangulares y muchas de las de forma de I y T), muros, cilindros huecos (tuberías túneles, cisternas), tableros de puentes, etc. (Sansalone & Streett, 1997).
- Determinar la existencia y alcance de grietas, oquedades y pérdida de adherencia en elementos arquitectónicos de ladrillo, bloque, piedra y mortero.
- Comprobación de la aplicación de inyecciones de mortero tras la restauración de elementos como muros, cimientos, etc.
- Proporciona dimensiones del grosor de elementos arquitectónicos.

Es muy común y conveniente la utilización de técnicas mixtas. Por ejemplo, para estudiar un muro, se puede utilizar un test acústico directo con ultrasonidos, para calcular la velocidad de la onda P en el material. Con la comparativa de varias mediciones directas es posible localizar zonas en peor estado o con presencia de huecos. A continuación, realizando tests indirectos es posible averiguar/confirmar la velocidad de la onda P y la de la onda R así como una estimación (normalmente un rango) de las propiedades mecánicas de la albañilería: coeficiente de Poisson ( $\nu$ ) y módulo de elasticidad (E). Por último con tests de impacto-eco es posible averiguar el espesor de los elementos que conforman el muro o las anomalías. Hay casos en los que se conocerá el valor de alguno de estos parámetros en algunas zonas, pero se desconocen en otras, como por ejemplo el espesor del elemento.

## 2.5.1.7. VENTAJAS Y LIMITACIONES DE LA TÉCNICA DEL IE

---

### VENTAJAS

- No requiere acceso por ambas caras.
- El coste del equipo es reducido.
- Utiliza frecuencias bajas que permiten detectar anomalías que otras técnicas no detectan.

### INCONVENIENTES

- En fábricas compuestas de diferentes elementos, como en el caso de los muros de ladrillo, bloques, piedra, etc. dichos elementos han de estar conectados entre sí con un aglutinante, de manera que el elemento responda como una unidad frente al impacto mecánico.
- Es incompatible con cámaras de aire, debido a que, en una interfase con aire, la mayor parte de la onda será reflejada haciendo impracticable el estudio del material a partir de esa interfase de aire.
- La interpretación de resultados requiere de mucha experiencia y formación previa.
- Es una técnica de evaluación puntual, proporciona información en un área pequeña y concreta.
- El test in situ es tedioso y lento.

## 2.5.2. ULTRASONIDOS (ULTRASONIC PULSE VELOCITY-UPV-)

---

*Definición: "My invention pertains to a device for detecting the presence of inhomogeneities of density or elasticity in materials. For instance if a casting has a hole or a crack within it, my device allows the presence of the flaw to be detected and its position located, even though the flaw lies entirely within the casting and no portion of it extends out to the surface. ... The general principle of my device consists of sending high frequency vibrations into the part to be inspected, and the determination of the time intervals of arrival of the direct and reflected vibrations at one or more stations on the surface of the part."*

---

Dr. Floyd Firestone

### 2.5.2.1. INTRODUCCIÓN

---

La técnica no destructiva de ultrasonidos se basa en el estudio de la propagación de ondas acústicas de altas frecuencias, normalmente entre 0,5 y 50 MHz, en el material a analizar (Igel, 2013). Además de sus aplicaciones en ingeniería, aeronáutica, arquitectura y restauración del patrimonio construido, la técnica de ultrasonidos mayormente aplicada en el campo médico (ultrasonido terapéutico, ecografías, etc.)

En términos generales la técnica se basa en la captura y cuantificación de, bien las ondas acústicas reflejadas (*pulse-echo*), bien las ondas transmitidas (*Through-transmission*). La principal diferencia es que el primero únicamente requiere acceso por una de las caras del material a analizar.



*Figura 2.5-26 El campo médico es puntero en el desarrollo de métodos que utilizan ondas acústicas en la frecuencia de los ultrasonidos para generar escáneres próximos en resolución a la calidad fotográfica (Downtown Presviterian Hosiptal, New York)*

## 2.5.2.2. ANTECEDENTES HISTÓRICOS

---

En 1794, el biólogo italiano Lazzaro Spallanzani fue el primero en descubrir la existencia de los ultrasonidos, demostrando la habilidad de los murciélagos, que podían volar en la oscuridad, guiados por el eco reflejado de sonidos de alta frecuencia que ellos emitían, inaudibles para el ser humano. En 1876 el científico británico Francis Galton inventó el “silbato Galton”, capaz de generar sonidos de muy alta frecuencia.

En 1880 los hermanos franceses Pierre y Jaques Curie descubrieron el efecto piezoeléctrico; comprobaron que se generaba un potencial eléctrico cuando se aplicaba presión mecánica a un cristal de cuarzo como la sal Rochelle. En 1881, el científico franco-luxemburgués Gabriel Lippman dedujo matemáticamente la reacción recíproca del material piezoeléctrico al generar impulso mecánico a partir de la aplicación de una diferencia de voltaje, principio que es verificado por los hermanos Curie (Woo, 2008).

En el campo de la acústica, en 1826, el físico suizo Jean-Daniel Colladon utilizó lo que él denominó “bocina submarina”, para determinar la velocidad del sonido en las aguas del lago de Ginebra. A finales de ese siglo, los físicos trataban de definir los principios de las ondas acústicas tales como la transmisión, la propagación y la refracción. Uno de ellos, el inglés Lord Rayleigh publicó en 1877 “La Teoría del Sonido”, en la que describe la onda acústica a través de una ecuación matemática que sentó las bases de la acústica moderna.

El primer campo en el que se aplicó la tecnología de los ultrasonidos fue en la navegación submarina, durante la Primera Guerra Mundial, y potenciado por el hundimiento del Titanic en 1912. En ese mismo año, el científico austriaco Alexander Belm describió un dispositivo submarino basado en el eco de las ondas ultrasónicas, y tan solo un mes más tarde de la tragedia del Titanic, el metereólogo británico Lewis Richardson solicita la patente de un sonar ultrasónico submarino. El primer sistema sonar en ponerse en funcionamiento fue diseñado y fabricado por el científico canadiense Rignald Fessenden en 1914; se trataba de un oscilador electromagnético de bobina móvil, que emitía sonidos de baja frecuencia y que se conectaba a un receptor para escuchar las reflexiones. Era capaz de detectar un iceberg a tres kilómetros, pero no era capaz de identificar la dirección en la que se encontraba.



Pocos años después, el físico francés Paul Langevin y el científico ruso Constantin Chilowsky, mejoran el invento de Ressenzen y lo denominan “hidrófono” (Zimmerman, 2002). Introducen al sistema un transductor de ultrasonidos compuesto de una fina capa de cuarzo entre dos pletinas metálicas, sensible a cambios en la presión del agua, generados por ondas acústicas, lo que permitía al usuario determinar la distancia y la dirección del objeto bajo el agua. Trabajaba a una frecuencia media de 150 KHz. Entre 1915 y 1918, se llevaron a cabo investigaciones clasificadas que mejoraron el hidrófono y propiciaron su uso en la vigilancia de barcos y submarinos alemanes. El primer submarino detectado con hidrófono y hundido, que se tenga constancia, ocurrió durante la Primera Guerra Mundial, en el Atlántico, el 22 de marzo de 1916; el barco británico Farnborough (*Q-ship*) detectó y hundió en Kerry, Irlanda, a un submarino alemán U-68 (Flank, 2013).

El hidrófono fue evolucionando y hacia 1930, ya era común su uso en barcos y submarinos.

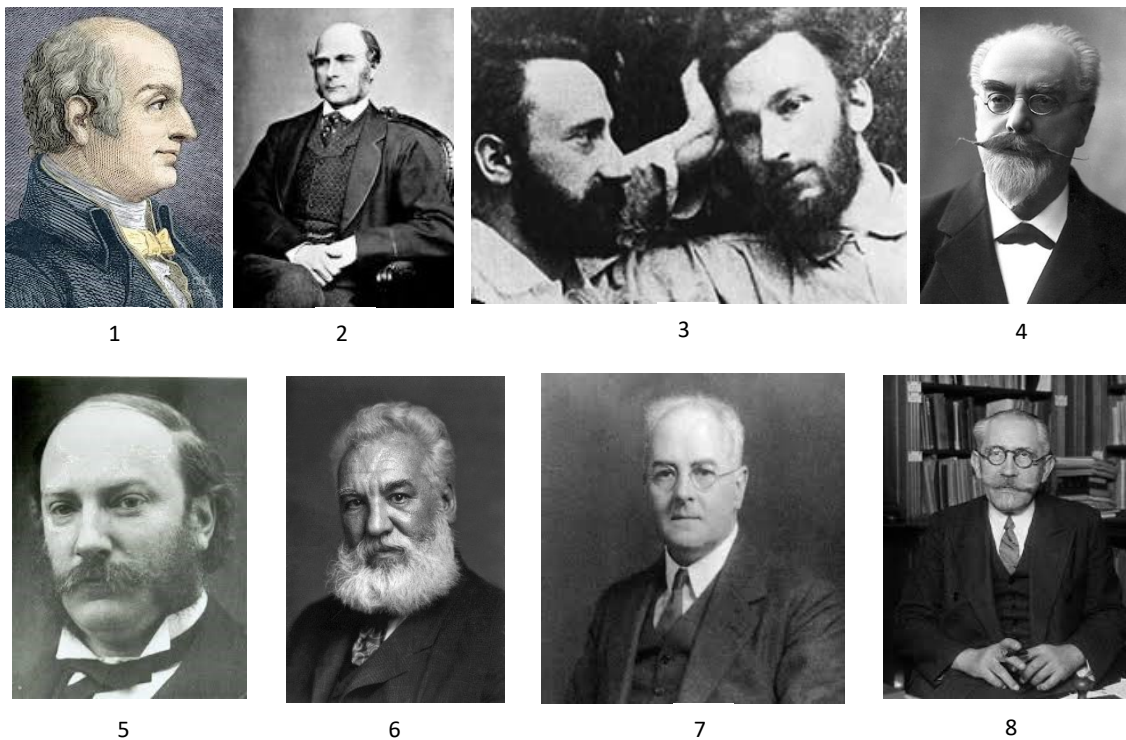


Figura 2.5-27 1. Lazzaro Spallanzani (1729-1799) descubrió los ultrasonidos en 1794. 2. Francis Galton (1822-1915) inventó el silbato Galton en 1876. 3. Pierre y Jaques Curie (1859-1906, 1856-1941) descubrieron el efecto piezoeléctrico en 1880. 4. Gabriel Lippman (1845-1921) calculó la ecuación matemática del efecto piezoeléctrico en 1881. 5. Lord Rayleigh (1842-1919) publicó “La Teoría del Sonido” en 1877. 6. Alexander Belm (1847-1922) describió un dispositivo capaz de detectar objetos bajo el agua a través de ondas acústicas. 7. Lewis Richardson (1881-1953) patentó el sonar submarino en 1912. 8. Paul Langevin (1872-1946) inventó, junto a Constantin Chilowsky, el hidrófono.

El concepto de detección de anomalías en piezas metálicas mediante ultrasonidos fue introducido por el científico soviético Sergei Y. Sokolov en 1928 en el Instituto Electrotécnico de Leningrado. Demostró que se podía utilizar la energía acústica a través de un metal para detectar ciertas anomalías, aunque la resolución era mala, por lo que sugirió el uso de reflexiones de ondas en lugar del método directo, tecnología que no estaría disponible hasta la década de los 40 del siglo XX.

El investigador de la universidad de Michigan Dr. Floyd Firestone, recibió la primera patente <sup>29</sup> otorgada a una aplicación práctica de la tecnología de ultrasonidos el 21 de abril de 1942, denominada "*Flaw Detecting Device and Measuring Instrument*" (Birks, Green, & MacIntire, 1991).

La compañía británica Kelvin and Hughes fabricó uno de los primeros detectores de anomalías impluso-eco, el M1. La primera versión alemana la produjeron Josef y Herbert Krautkrämer para Köln en 1949. Siguió otras versiones como la de la alemana Siemens, la de KretzTechnik AG en Austria, Ultrasonique en Francia o Mitsubishi en Japon. En 1949, Benson Carlin publicó en el MIT, *Ultrasonics*, la primera publicación en inglés sobre esta técnica (Carlin, 1949).

En 1966 el ingeniero de radio James F. McNulty de California, obtiene una patente<sup>30</sup> de un sistema mejorado con respecto al del Dr. Firestone denominado "*Ultrasonic Testing Apparatus and Method*".

Los aparatos utilizados en la actualidad son descendientes del que patentó McNulty; las principales mejoras son las relativas a la digitalización del proceso y la aplicación de softwares de procesado y post-procesado que limpian la señal y localizan objetivos en función de la aplicación del sistema. Las características y capacidades de los últimos modelos se detallan en el apartado 2.5.2.5.

### 2.5.2.3. FUNCIONAMIENTO

---

Para desarrollar un test de ultrasonidos, normalmente se necesita un emisor/receptor de ondas acústicas, un transductor y una pantalla de visualización de resultados. El emisor, es un dispositivo electrónico que produce impulsos

---

<sup>29</sup> U.S. Patent No. 2,280,226

<sup>30</sup> U.S. Patent No. 3,260,105

eléctricos de alto voltaje, que son transformados por el transductor en energía de ultrasonidos de alta frecuencia. La energía sonora se introduce en el material en forma de ondas. Cuando existe una discontinuidad o anomalía en su camino, parte de esta energía acústica será reflejada. La parte de la onda que es reflejada, se transforma en una señal eléctrica por el transductor para ser visualizada en una pantalla. Sabiendo la velocidad de las ondas, el tiempo de recorrido, medido por un circuito electrónico, se relaciona con la distancia que la onda ha recorrido. De esta manera, es posible obtener información acerca de la localización de la anomalía que provocó la reflexión, así como tamaño, orientación, etc.

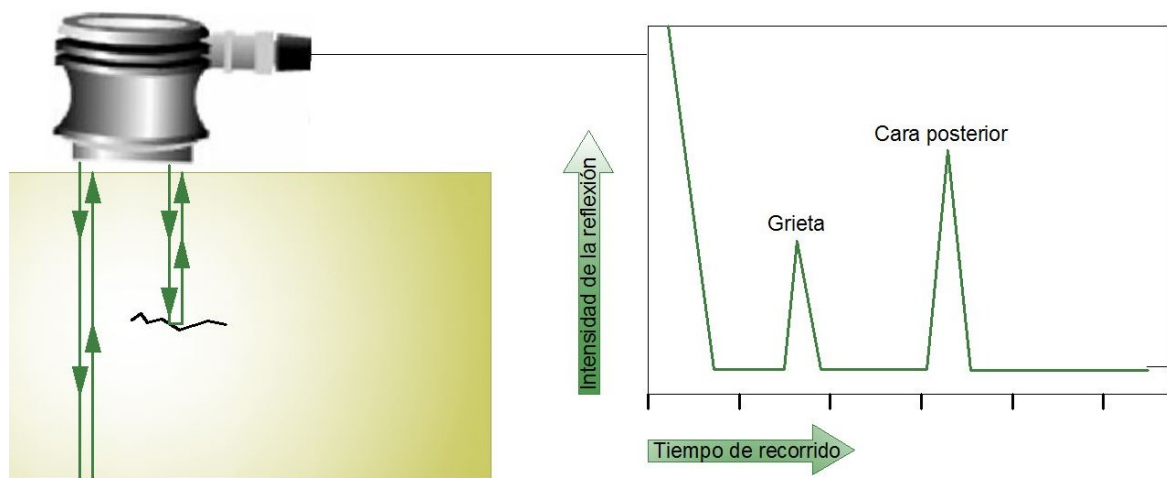


Figura 2.5-28 Esquema básico de funcionamiento de la técnica no destructiva de ultrasonidos.

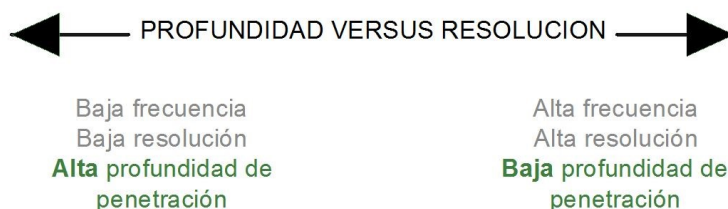
Con el fin de generar ondas acústicas para el test de ultrasonidos, se utiliza un cristal piezoeléctrico. Este material tiene la propiedad de que cuando se le aplica un voltaje, éste se expande; cuando se anula el voltaje, el cristal vuelve a su volumen inicial. Si dicho voltaje se aplica y anula rápida y repetidamente, el cristal se expande y relaja rápidamente generando ondas de ultrasonidos.

Las ondas generadas viajan por el material y se reflejan en discontinuidades. La técnica de ultrasonidos se basa en la lectura del tiempo que tardan en ser reflejadas y la intensidad con la que lo hacen. Los cristales piezoeléctricos poseen otra propiedad útil para este test. Cuando un cristal piezoeléctrico se contrae, genera un voltaje. Cuando las ondas sonoras reflejadas impactan con el cristal, éste se comprime y, por tanto, genera un voltaje que corresponde con la intensidad con la que fue impactado. En la práctica los equipos de ultrasonidos constan de varios cristales controlados por una unidad central que a su vez está conectada a una pantalla donde se visualizan los resultados.

Las ondas ultrasónicas se reflejan en interfases con aire, motivo por el cual es necesario utilizar un acoplante entre el emisor/receptor y el elemento a testear; de no ser así, las ondas se reflejarían y no penetrarían en el material. Del mismo modo, las ondas ultrasónicas viajan óptimamente a través de medios acuosos, por lo que generalmente se utiliza un líquido gelatinoso que ayuda a evitar burbujas de aire.

Tal y como se expone en el apartado de dicado a “Propiedades de las Ondas Acústicas”, en el apartado 2.5, cuando las ondas ultrasónicas penetran en el material, éstas pueden sufrir: atenuación, refracción, o reflexión. Las ondas que sufren atenuación al ser absorbidas por el material; a mayor profundidad de penetración mayor atenuación, motivo por el cual, la resolución de los resultados disminuye con la profundidad. Cada material tiene unas propiedades acústicas diferentes; una de las propiedades utilizadas en esta TND es la impedancia acústica. Cuando una onda ultrasónica atraviesa de un material a otro con diferentes impedancias, parte de la onda atraviesa y sigue su camino, aunque con una dirección ligeramente desviada con respecto a la inicial. Es decir, la onda sufre el fenómeno de la refracción. Otra parte de la onda, se refleja en esa interfase de impedancias diferentes hacia el emisor. La cantidad de onda reflejada depende de la diferencia de impedancias, a mayor diferencia, mayor reflexión. Estas reflexiones recopiladas proporcionan los datos para generar una imagen.

A menor longitud de onda, es decir, a mayor frecuencia, mayor resolución. Al mismo tiempo, a mayor frecuencia, menor profundidad de penetración (Figura 2.5-29). El rango de frecuencias que habitualmente se utiliza en la técnica de ultrasonidos aplicada a elementos arquitectónicos oscila entre los 20 MHz y los 50 MHz.



*Figura 2.5-29 Relación conceptual entre frecuencia, resolución y profundidad de penetración.*

## RECEPCIÓN DE LA ONDA: POR REFLEXIÓN O POR ATENUACIÓN

Existen tres métodos de realizar el test en función de la emisión y la recepción de la onda: reflexión, atenuación y resonancia. Otra manera de clasificar los métodos es por medición directa, semidirecta o indirecta.

El método de reflexión, también denominado “Impulso-eco” o indirecto, utiliza la porción reflejada del sonido para evaluar los defectos. El transductor ejecuta tanto el envío como la recepción de la onda acústica tras su reflexión (también puede realizarse con dos transmisores, uno emisor y otro receptor); la onda penetra en el material hasta que, al interceptar una interfase, tiene lugar una reflexión total o parcial. Pero toda la energía que es reflectada no es recogida por el transductor ya que parte de ella se refleja en la interfase entre cabezal y superficie del material, por lo que esa parte del sonido vuelve a atravesar la pieza por segunda vez; este ciclo se repite sucesivamente. También las anomalías producen reflexiones múltiples. En este método, se visualiza en forma de onda, con la amplitud representando la intensidad de la reflexión y el eje x representando el tiempo de llegada. Puesto que se puede medir el tiempo de recorrido y se conoce la velocidad del sonido en el material, es posible calcular la distancia entre el cabezal y las superficies reflectantes (Figura 2.5-30). Este es el principal motivo por el que este método es más empleado que el de transmisión. Otra ventaja importante es la no necesidad de utilizar dos cabezales, lo que anula el proceso de alineación de los mismos.

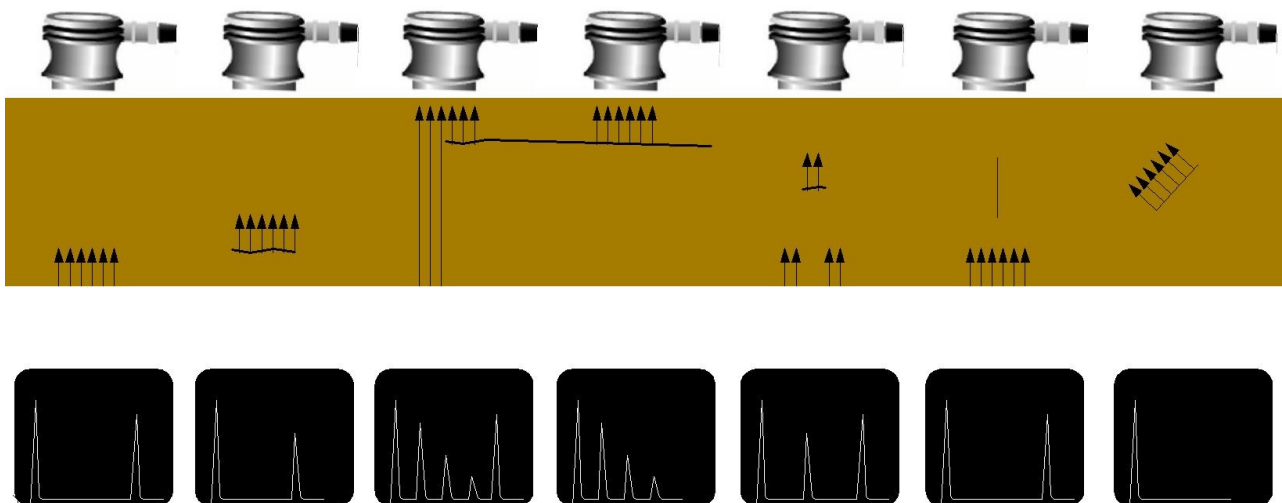


Figura 2.5-30 Distintas posibilidades de visualización en procedimiento pulso-eco.

En el método de atenuación, también denominado “de transmisión”, se utilizan dos transductores, normalmente uno a cada lado del elemento a inspeccionar (aunque



no necesariamente) de manera que un cabezal emite y otro recibe la energía acústica (medición directa). Las anomalías encontradas por la onda acústica en su camino de emisor a receptor reducen la cantidad de energía acústica transmitida, revelando de esta manera su presencia. En este caso no es posible determinar la profundidad a la que se encuentra la anomalía dentro del material. Otra desventaja a tener en cuenta es que es necesaria una exacta alineación entre el emisor y el receptor. Si bien para un mismo material y contexto, a menor velocidad, peor estado del material, y viceversa.

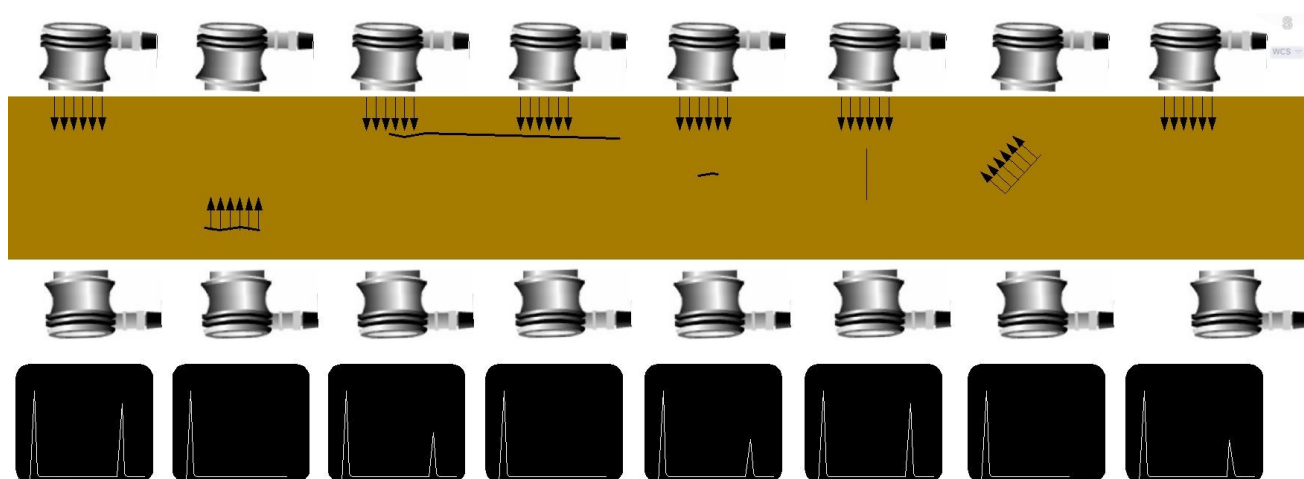


Figura 2.5-31 Distintas posibilidades de visualización en procedimiento de transmisión.

Existe un tercer método denominado “de Resonancia” que no se suele utilizar para aplicaciones de conservación del patrimonio arquitectónico. El método se basa en la medición de la frecuencia de resonancia por reflexión y se emplea principalmente para la medición de espesores de superficies paralelas con haces ultrasónicos de excitación continua. El haz ultrasónico que se utiliza tiene un amplio espectro de frecuencias, de modo que las correspondientes oscilaciones cuya semilongitud de onda sea un submúltiplo del espesor de la muestra, se reforzarán al superponerse en fase, debilitándose los restantes, dando lugar al fenómeno de resonancia, es decir, la formación de ondas estacionarias. Las oscilaciones características se podrán definir por el número de semilongitudes de onda contenidas en el espesor de la pieza (Rimoldi & Mundo, 2012).

## INSPECCIÓN NORMAL E INSPECCIÓN EN ÁNGULO

La técnica de ultrasonidos permite la localización de anomalías en el interior de una estructura a través de la medición precisa del tiempo que tarda una onda

ultrasonica en ser reflejada en una anomalía. Cuando las ondas se aplican perpendiculares a la superficie, esa fracción de tiempo, en el rango de los microsegundos, se divide por dos, dado que la onda va y vuelve de la discontinuidad y multiplicada por la velocidad del sonido en el material en estudio.

$$d = \frac{Vt}{2}$$

Siendo,

d, distancia desde la superficie a la discontinuidad, en metros (m)

V, velocidad del sonido en el material, en metros por segundo (m/s)

t, es el tiempo que tarda la onda en ir y volver desde la superficie a la anomalía que provoca la reflexión, en segundos (s)

Los medidores de espesor ultrasónicos (*ultrasonic thickness gage*) normalmente operan bajo frecuencias que oscilan entre los 500 kHz y los 20 MHz, pudiendo llegar a 50 MHz (Olympus, 2016). Para medir elementos gruesos y materiales que sufren gran atenuación o dispersión, se utilizan frecuencias bajas. Mientras que las altas frecuencias son recomendables para elementos delgados y materiales que no sufren atenuación ni dispersión.

Las inspecciones que se realizan con un ángulo diferente de 90° generan ondas transversales y permiten orientar la onda desde un lateral, lo cual mejora la detección de anomalías en elementos tales como soldaduras. La inspección en ángulo es diferente a la inspección normal principalmente porque no existe reflexión de la cara posterior del elemento. La Figura 2.5-32 representa la trayectoria de la onda dependiendo si impacta o no en la cara posterior del elemento en estudio.

En la opción A,

*Distancia en superficie = distancia recorrida x sin  $\theta_R$*

*Profundidad 1 = distancia recorrida x cos  $\theta_R$*

Siendo,  $\theta_R$  el ángulo de reflexión.

En la opción B,

*Profundidad 2 = 2T – (distancia recorrida \* cos  $\theta_R$ )*

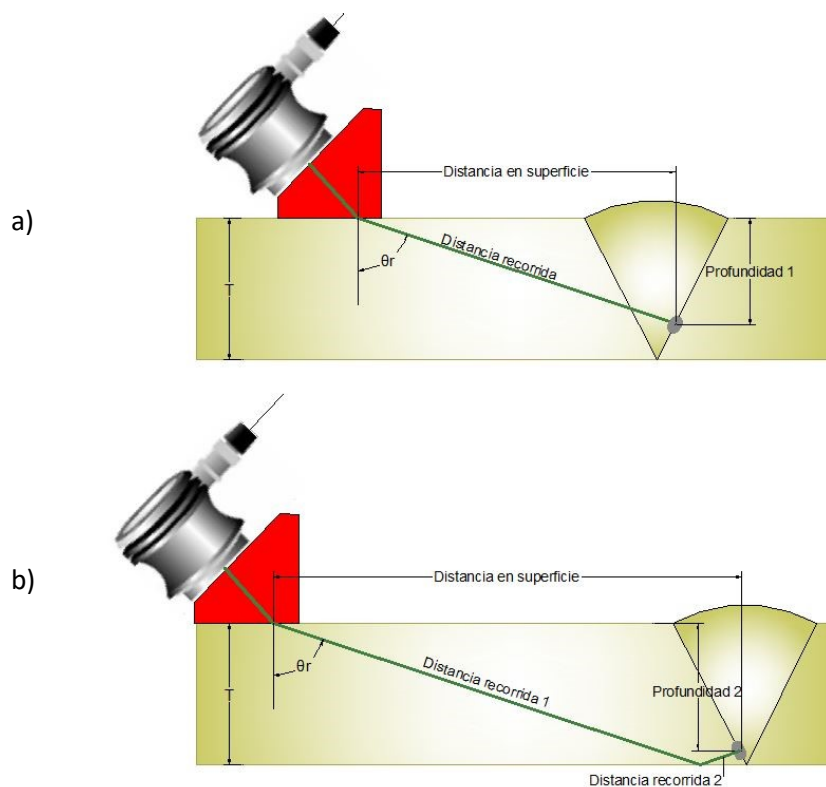


Figura 2.5-32 Representación esquemática del cálculo de la posición de imperfecciones con un transductor de cabezal en ángulo.

En el caso concreto de la inspección de soldaduras, los defectos más comunes son presencia de poros, inclusiones, reducido espesor, insuficiente penetración y existencia de grietas. Excepto la presencia de burbujas de aire, todas las demás anomalías pueden ser detectadas con la tecnología de ultrasonidos. Las inspecciones suelen realizarse utilizando una combinación de transductores de cabezal plano y de cabezal en ángulo. Con el transductor plano se localizan posibles delaminaciones. A continuación, con ayuda del transductor en ángulo se evalúan las diferentes partes de la soldadura: raíz, paredes laterales, corona, etc. Es conveniente utilizar diferentes ángulos con el fin de estudiar la soldadura desde diferentes perspectivas y orientaciones. Esta aplicación es más propia en aplicaciones industriales que en patrimonio arquitectónico, si bien puede ser conveniente utilizar esta TND para evaluar conexiones entre elementos metálicos en estructuras históricas.

Dos de los estándares ASTM que cubren el método de ultrasonidos son el *ASTM C597 – 16 Standard Test Method for Pulse Velocity Through Concrete* y el *ASTM-E 1065 Standard Guide of Evaluating Characteristics of Ultrasonic Search Units*.

## 2.5.2.4. REPRESENTACIÓN DE RESULTADOS

Los datos de los ensayos de ultrasonidos pueden recopilarse y presentarse de diferentes formas. Los más comunes dentro del campo de las TND son: A-scan, B-scan y C-scan. También pueden recogerse en un listado de velocidades o en un mapa de velocidades. Cada uno tiene una forma diferente de enfocar y evaluar la región del material a estudiar. Algunos equipos actuales, en combinación con los programas informáticos actuales permiten visualizar las tres modalidades simultáneamente.

- A-scan: representa la cantidad de energía ultrasónica recibida en función del tiempo. En el eje vertical se representa la cantidad de energía mientras que el tiempo se representa en el eje horizontal. Este tipo de representación puede presentar la onda en su forma de radiofrecuencia natural, o rectificada (mitad positiva, mitad negativa o ambas). El tamaño de las anomalías puede estimarse por comparación entre el reflector desconocido y un reflector conocido, es decir, comparando la amplitud de la señal obtenida mediante la implementación de un patrón. La profundidad de la anomalía puede determinarse por la posición de la señal en el eje horizontal, que representa el tiempo (Figura 2.5-33).

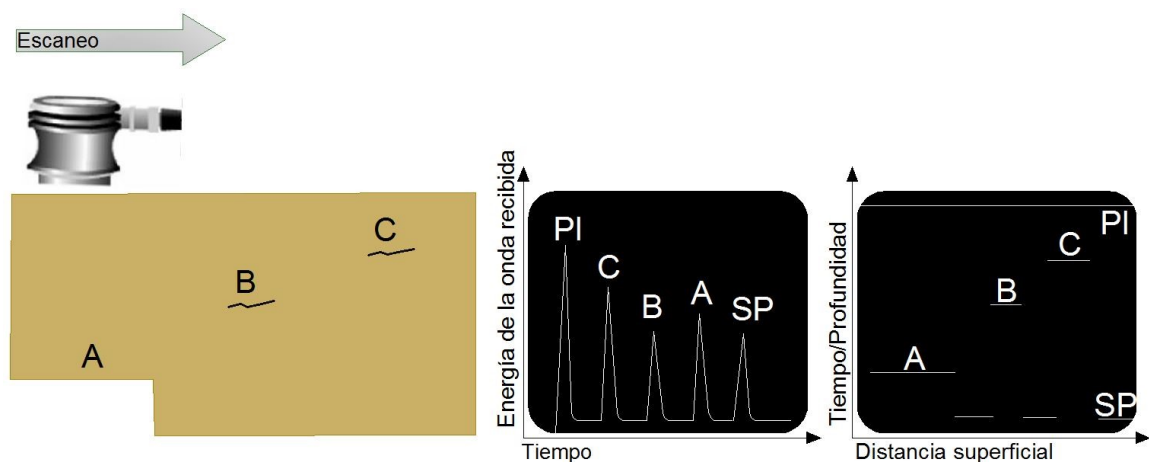


Figura 2.5-33 A la izquierda se muestra la representación esquemática de un caso de estudio. La imagen del centro corresponde a un A-scan, siendo PI, el pulso inicial y SP, superficie posterior. A la derecha se muestra la representación B-scan para el mismo caso de estudio.

- B-scan: este tipo de representación es posible si el test es lineal, de manera que pueda mostrarse un perfil del material en estudio. El tiempo se representa en el eje vertical y la posición lineal del transductor se representa en el eje horizontal. Tanto la profundidad del reflector, como el tamaño (horizontal) del mismo, se pueden determinar de las lecturas de tiempo y distancia lineal del diagrama. En los programas informáticos actuales, se establece un valor de intensidad de reflexión en el A-scan, de manera que dispere un B-scan cuando se alcanza el valor, con el fin de recabar más datos de la anomalía que genera la reflexión. Una limitación de esta representación es que las anomalías más próximas a la superficie pueden ocultar otras más alejadas de la misma.

- C-scan: este tipo de representación es válida para sistemas de escaneo automático en dos dimensiones. Proporciona una visualización tipo plano de las anomalías y sus tamaños. El plano de la imagen es paralelo al plano descrito por el transductor. La amplitud o el tiempo de reflexión se representan en una escala de grises para cada punto registrado. Así pues, el C-scan proporciona una imagen de las anomalías que producen reflexiones en la superficie y en interior de la pieza en ensayo. Los equipos de alta resolución proporcionan imágenes muy detalladas, como las de la Figura 2.5-34. En ese caso, las dos imágenes se tomaron con un equipo de ultrasonidos en modo impulso-respuesta, con el transductor en la cara de la cara de la moneda en un sistema de inmersión. Las zonas claras, son las que más energía reflejan. En la imagen superior los parámetros fueron establecidos para captar la amplitud de las



*Figura 2.5-34 Imágenes C-scan de una moneda de veinticinco céntimos de dólar. Ambas imágenes fueron tomadas utilizando la técnica de reflexión de ultrasonidos (pulse-echo) con el transductor situado en el lado de la cara de la moneda. Para la imagen de la izquierda, la profundidad de estudio se situó en la superficie de la cara de la moneda, para capturar la amplitud del sonido reflejado en esa superficie. En el C-scan de la derecha, la profundidad de estudio se movió para registrar la intensidad del sonido reflejado de la cara posterior de la moneda. Sigue apareciendo la cara dado que el sistema recoge las anomalías que encuentra en su trayectoria hasta el plano de estudio (National Science Foundation, 2014).*



reflexiones de la cara superior, mientras que para la inferior, los parámetros fueron ajustados para registrar las amplitudes de las ondas reflejadas de cara posterior de la moneda. Este método tiene utilidad para aplicaciones *in situ* en el campo de la conservación arquitectónica.

## 2.5.2.5. INSTRUMENTACIÓN

---

### TRANSDUCTORES

La conversión de impulsos eléctricos a vibración mecánica y viceversa es la base de la TND de ultrasonidos. Esta conversión se lleva a cabo en el transductor, concretamente en el elemento piezoeléctrico, con electrodos en las caras opuestas. Como ya se ha expuesto, un material piezoeléctrico es un material polarizado, que tiene parte de sus moléculas cargadas en positivo y parte cargadas en negativo; cuando se aplica un campo eléctrico, las moléculas polarizadas se alinean con el campo provocando un cambio de tamaño del material. Y este proceso se repite a la inversa, como resultado de la aplicación de la fuerza mecánica generada, el material genera un campo eléctrico, lo que se conoce como efecto piezoeléctrico. Dos ejemplos de materiales piezoeléctricos son el cuarzo ( $\text{SiO}_2$ ) y el titanato de bario ( $\text{BaTiO}_3$ ). Normalmente se utilizan elementos piezoeléctricos cerámicos, que pueden cortarse con diferentes formas con el fin de generar distintos tipos de ondas. Uno de los materiales cerámicos más utilizados en la TND de ultrasonidos es el titanato zirconato de plomo ( $\text{PZT}^{31}$ ). Al material piezoeléctrico también se le denomina material activo.

El espesor del material activo en el transductor viene determinado por la frecuencia que se desee generar. El elemento piezoeléctrico vibra con una longitud de onda que es dos veces su espesor, por lo que se cortan a espesores que son la mitad de la longitud de onda deseada. A mayor frecuencia del transductor, menor espesor tendrá en elemento activo.

Así pues, el transductor tiene una doble función. En su función de transmisor, convierte impulsos eléctricos en vibraciones mecánicas mientras que, en su función como receptor, convierte las vibraciones mecánicas, en impulsos eléctricos.

---

<sup>31</sup>  $\text{Pb}[\text{Zr}_x\text{Ti}_{1-x}]\text{O}_3$  ( $0 \leq x \leq 1$ )

Dos de los factores más determinantes que influyen en el comportamiento de un transductor son el material y la manera en que está construido.

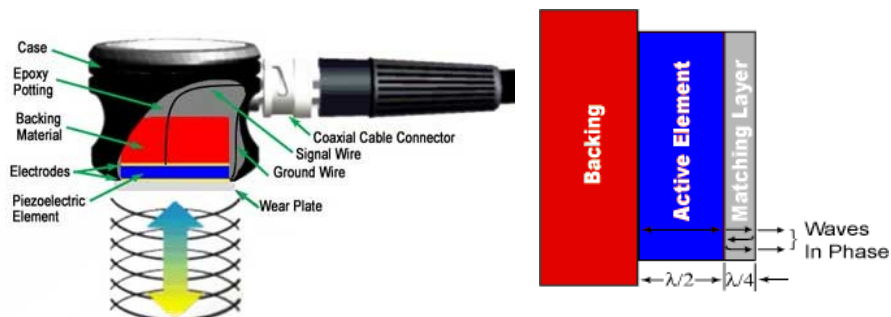


Figura 2.5-35 Sección de un transductor de contacto similar a los utilizados en piedra, ladrillo y hormigón en aplicaciones de conservación (Gowda, 2014).

Con el fin de aprovechar lo máximo posible la energía del transductor, se coloca una capa de material de impedancia similar entre el elemento activo y el material a testear; el espesor de dicha capa es un cuarto de la longitud de onda deseada. Debido a esto, las ondas salen de la cabeza emisor en fase. Para los transductores de contacto, la impedancia de esta capa se elige de modo que tenga un valor intermedio entre el elemento activo y el material a testear. Si el transductor es de inmersión, el valor de la impedancia de dicha capa estará entre las impedancias del elemento activo y el líquido.

En la parte posterior del elemento piezoeléctrico se coloca una capa de soporte de impedancia similar a la del material piezoeléctrico, cuya función es la de amortiguar al elemento activo. Esto facilita que el transductor tenga mayor sensibilidad y resolución. A mayor diferencia entre los valores de las impedancias acústicas de piezoeléctrico y la capa de soporte, mayor capacidad de penetración de las ondas del transmisor pero menor resolución del resultado.

El ancho de banda del transductor hace referencia al rango de frecuencias a las que el dicho transductor trabaja. La frecuencia nominal del transductor suele ser la frecuencia media de ese rango. Los transductores con menor capa de amortiguación poseen un ancho de banda menor, menor resolución, pero mayor capacidad de penetración.

En definitiva, los transductores de bajas frecuencias, entre 0,5 MHz y 2,25 MHz, proporcionan mayor penetración en el material, mientras que transductores de alta frecuencia, entre 15 MHz y 25 MHz, proporcionan menor capacidad de penetración, pero mayor sensibilidad y resolución.

Tal y como se expone en la introducción a este apartado 2.5, dedicada a las ondas acústicas, debido a las irregularidades del campo acústico en la zona Fresnel, puede ser muy complicado detectar anomalías en el material situado en esta zona. El área siguiente al campo cercano es la zona Fraunhofer. La transición entre ambos campos ocurre a una distancia N del transductor y es en esa zona de transición donde la onda se optimiza mejor para localizar anomalías en el material. Para un transductor de superficie redonda, que son los comúnmente utilizados en aplicaciones del patrimonio arquitectónico, esa distancia N se calcula con la siguiente expresión:

*Ecuación 2.5-13*

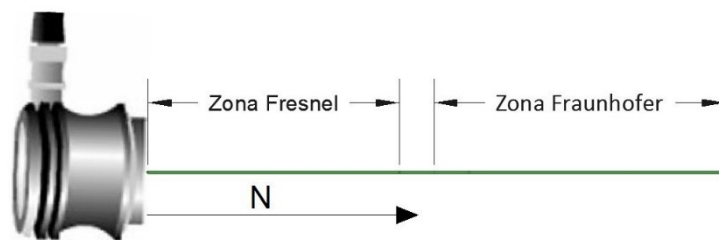
$$N = \frac{D^2 f}{4V}$$

Siendo,

D, diámetro del transductor, en m

f, frecuencia del transductor en Hz.

V, velocidad de la onda longitudinal en el medio en estudio en m/s.



*Figura 2.5-36 N es la distancia desde el transductor a la zona de transición de la Zona Fresnel a la zona Fraunhofer. Es la distancia a la que mejor se optimiza la onda para localizar anomalías.*

Existen multitud de variedad de transductores de ultrasonidos fabricados en función de su aplicación. Algunos factores, como la construcción mecánica

(superficie de radiación, amortiguamiento, carcasa y conexionado, entre otros) y eléctrica, afectan el comportamiento del cabezal. Es crucial en cualquier investigación elegir un transductor con la apropiada frecuencia, sensibilidad, resolución y profundidad de penetración para optimizar resultados. Los transductores se clasifican en dos grandes categorías atendiendo a su uso:

- **Transductores de contacto:** se utilizan en tests en los que el transductor está en contacto directo con el medio a analizar. Están protegidos con una carcasa para evitar su desgaste al deslizarlos por las superficies y suelen ser manipulados con la mano. Con el fin de evitar aire intersticial entre el transductor y el medio es necesario utilizar un material acoplante que puede ser de base acuosa, grasa, de aceite o cualquier otra combinación comercial. Existen gran variedad de configuraciones en función de la aplicación. El transductor de contacto plano mostrado en la (Figura 2.5-37) es el utilizado para superficies planas en investigaciones donde la resolución en la superficie del elemento no es crucial. Este tipo de transductor de contacto es el utilizado en aplicaciones de patrimonio arquitectónico. Si la superficie a investigar es curva, como por ejemplo una tubería, el transductor llevará una zapata curva. La frecuencia habitual de trabajo para los transductores de contacto normales a la superficie oscila entre 1-10 MHz (UNE-EN583-1 1999, 1999)



Figura 2.5-37 Transductores de contacto standard de la marca Olympus con frecuencias desde 0,1 a 10 MHz. (Olympus, 2016)

Dentro de transductores de contacto existen otras clasificaciones como:

- **Cabezal dual (*dual element*):** contiene dos elementos activos dentro de una misma carcasa. Uno de ellos emite las ondas sonoras y el otro las recibe. Cuando un transductor no dual opera en modo *pulse echo* el elemento activo no puede comenzar a recibir ondas reflejadas hasta

que el elemento deja de transmitir; es lo que se denomina efecto *ring down*. Los dos elementos activos están ligeramente inclinados el uno hacia el otro para facilitar la recepción de la señal. Este tipo de transductor es especialmente apropiado en aplicaciones en las que es necesario estudiar anomalías muy próximas a la superficie del material ya que el diseño anula el efecto *ring down*. Es también apropiado para medir el espesor de materiales finos.

- Cabezales de retardo (*delay line*): se trata de cabezales con elementos separadores que alejan la fuente del ultrasonido de la superficie de la pieza con el fin de evitar que la zona Fresnel se introduzca en el material a utilizar. Son transductores con diferentes opciones de accesorios del cabezal por lo que son aptos para mayor rango de aplicaciones. Su principal característica es que introducen un retraso entre la generación de la onda acústica y la llegada de la onda reflejada. Esto facilita al transductor la finalización de su función transmisora antes de iniciar su misión receptora, de manera que mejora la resolución cerca de la superficie. Este tipo de cabezal es apropiado para realizar mediciones de precisión de espesores de materiales delgados, y para detectar anomalías muy cercanas a la superficie o en la superficie misma.
- Cabezales angulados (*angle beam*): se utilizan para introducir ondas transversales en el test. Pueden ser cuñas con ángulos fijos o ajustables. Son útiles en la inspección de soldaduras y también para introducir ondas de superficie para detectar defectos en la superficie de un elemento, por ejemplo, una tubería. Su utilización en conservación arquitectónica no es habitual.

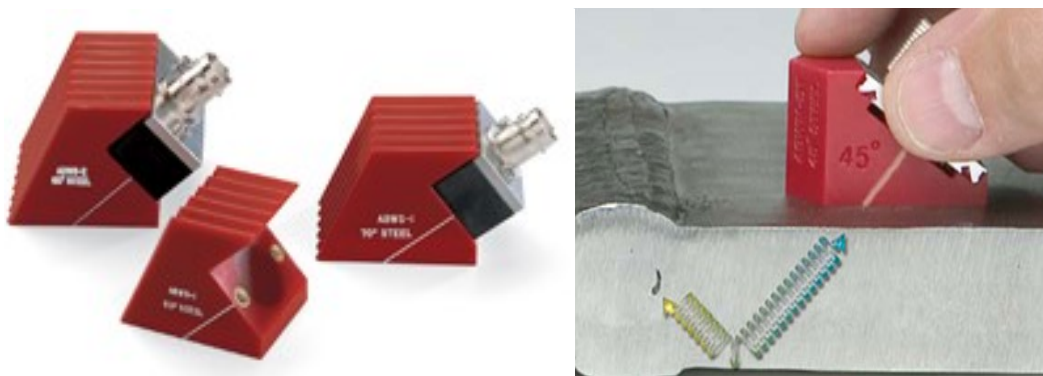


Figura 2.5-38 Transductores en ángulo de la firma Olympus (Olympus, 2016).



- Transductores de inmersión: están diseñados para funcionar sumergidos en un líquido y su cabezal puede adoptar diferentes formas en función del objetivo a inspeccionar. Dado que su uso en el campo de aplicación que abarca esta tesis es muy limitado, no se profundiza en su estudio.

Existe otro tipo de transductores modernos cuyo funcionamiento se basa en principios físicos diferentes al de los transductores piezoeléctricos; se trata de los transductores acústicos electromagnéticos (*electromagnetic acoustic transducers-EMAT*). Cuando un alambre se sitúa cerca de la superficie de un material conductor y se le aplica una corriente a la requerida frecuencia ultrasónica, se generan corrientes de Foucault (*eddy currents*) en la región cercana a la superficie del material. Si, además, existe un campo magnético estático, las corrientes de Foucault experimentarían unas fuerzas denominadas Lorentz, que provocarían ondas acústicas en la superficie y que se propagarían en el interior del material. Una de las principales ventajas es que no necesitan acoplante, lo que implica que no es necesario que el cabezal entre en contacto con el material en estudio. Este tipo de transductores pueden generar, además de ondas longitudinales, ondas transversales y de superficie variando la orientación del campo magnético estático situado en su interior. Son apropiados para detectar anomalías dentro del material, para calcular espesores y para caracterización de materiales.

Son varias las empresas que manufacturan tecnología de ultrasonidos en los Estados Unidos, entre las que caben destacar: Mouser electronics<sup>32</sup> de Texas, NDT James Instruments<sup>33</sup> de Chicago, Olympus<sup>34</sup> con sede en Massachusetts, Dakota Ultrasonics<sup>35</sup> de California, Proceq Pundit<sup>36</sup> con sede en Pensilvania y Olson<sup>37</sup> de Colorado.

Los precios dependen de la aplicación y precisión que ésta requiera, pero a modo orientativo, un equipo completo de inspección (V-Meter Mk IV Pulse Velocity Meter de Certified MPT<sup>38</sup>, mostrado en Figura 2.5-39) ronda los \$6.000, mientras que el precio de una aplicación concreta, como un detector de nivel freático

<sup>32</sup> <http://www.mouser.com/catalogviewer/default.aspx>

<sup>33</sup> <http://www.ndtjames.com/V-Meter-MK-III-8482-s/64.htm>

<sup>34</sup> <http://www.olympus-ims.com/ultrasonic-transducers/>

<sup>35</sup> <http://www.dakotaultrasonics.com/product/>

<sup>36</sup> <http://www.proceq.com/nondestructivetestequipment>

<sup>37</sup> <http://www.olsoninstruments.com/index.php>

<sup>38</sup> <http://www.certifiedmtp.com/v-meter-mk-iv-pulse-velocity-meter-complete-set/>

(Flawdetector FDT21 de Omega<sup>39</sup>) o un medidor de espesor para metales (MTG8 de Eclometer<sup>40</sup>) es de \$2.000.

## ACOPLANTE

El acoplante es un material que facilita la transmisión de la energía acústica desde el transductor al material en estudio. Es necesario porque la diferencia de impedancias entre el elemento activo y el aire, provocaría que la mayor parte de la onda acústica se reflejase en el aire, no penetrando en el material, anulando de este modo el test. El acoplante desplaza el aire intersticial que pueda quedar entre ambos elementos. Normalmente el acoplante está compuesto de glicerina, aceite o agua. En el caso de que en la investigación por ultrasonidos sea necesaria la utilización de ondas transversales, es aconsejable que el acoplante tenga un alto grado de viscosidad.

## GENERADOR EMISOR-RECEPTOR

Los generadores ultrasónicos se diseñan para la aplicación concreta que desempeñan, por lo que hay gran variedad de ellos. En los equipos portables actuales, el emisor-receptor y la pantalla se albergan en la misma carcasa, todo operado por baterías recargables.

El emisor genera impulsos eléctricos cortos, de amplitud alta, que son convertidos a impulsos ultrasónicos por el transductor ultrasónico. En la mayoría de los modelos se puede controlar la longitud del impulso, es decir la cantidad de tiempo que se aplica el impulso al transductor ultrasónico. También se puede controlar la energía del impulso, es decir, el voltaje que se le aplica al transductor, que normalmente oscila entre 100 y 800 voltios. El mismo generador también activa la base de tiempos.

En su función de receptor, las señales eléctricas que recibe del transductor de ultrasonidos son amplificadas para ser visualizadas en una pantalla. Las funciones que pueden controlarse de un receptor son la cantidad de amplificación de la señal, los filtros aplicados a la imagen y la rectificación de señal (puede ser

---

<sup>39</sup> <http://www.omega.com/pptst/FDT21.html>

<sup>40</sup> <http://www.elcometerusa.com/ultrasonic-ndt/MTG-Series-Gauges/>

visualizada como media onda positiva, media onda negativa u onda completa). Existen numerosas configuraciones de equipos. Así mismo los equipos pueden o no llevar osciloscopios incorporados.

Así pues, la capacidad de un equipo depende de parámetros como: longitud de la onda que emite, tipo y voltaje aplicado al transductor, propiedades del transductor, material y diámetro del cabezal y circuito de procesamiento de datos del equipo (Rimoldi & Mundo, 2012). Y los resultados para un mismo equipo dependen principalmente del tamaño del grano del material en estudio, sus propiedades acústicas, el espesor del elemento, tipo de anomalía, tamaño y probable localización.



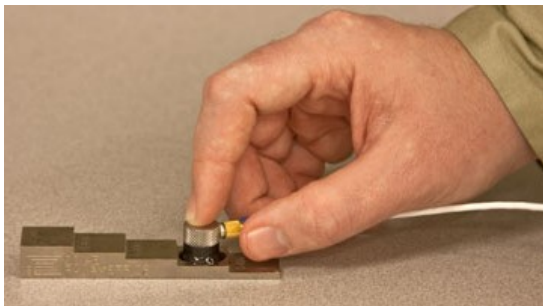
Figura 2.5-39. Equipo V-Meter Mk IV Pulse Velocity Meter de NDT James Instruments, tiene display automático, una precisión de 0,1 microsegundos y pesa 2.75 Kg (NDT James Instruments).

## CALIBRACIÓN

Durante el proceso de calibración se evalúa y ajusta la precisión de medición del equipo. Una primera fase corresponde a la calibración de la electrónica del equipo, la cual la realiza el fabricante. A continuación, el usuario debe proceder a la calibración del usuario, que comprende la valoración y correcta elección de los ajustes y opciones del aparato (monitor, emisor-receptor y transductor) y la planificación del test para conseguir los resultados deseados, en función de la resolución y la precisión. Existen diferentes estándares de referencia que facilitan que los ajustes y equipos proporcionen resultados similares independientemente del día, el técnico, el equipo y sus ajustes. Los estándares también sirven de ayuda al técnico para identificar anomalías en función del resultado obtenido.

Uno de los métodos más comunes y efectivos consiste en utilizar el estándar en combinación con una anomalía de tamaño y distancia conocidas, para comparar su resultado y poder estimar otros parámetros desconocidos de la anomalía real. Cabe destacar que el material del patrón a utilizar debe ser el mismo que el del material a testear.

Los estándares de referencia se utilizan también para verificar el correcto funcionamiento del transductor (resolución, sensibilidad, etc.), determinar el punto de salida de transductores en ángulo, así como el valor del ángulo generado, calibrar la velocidad del sonido en el material en estudio y verificar el correcto funcionamiento de toda la instrumentación. Existen gran variedad de estándares en función de la aplicación de la evaluación. Algunos estándares requieren el uso de *bloques* (Figura 2.5-40) con formas específicas para calibrar parámetros dependiendo del material, el equipo, las anomalías, etc. Los más utilizados en USA son los de la *American Society of Testing and Materials* (ASTM) y la *American Welding Society* (AWS)



A common calibration sequence is as follows:

- (1) Couple the transducer to the thick reference sample.
- (2) Using the keypad, enter the "calibrate velocity" command.
- (3) When the thickness reading is stable, press ENTER.
- (4) Using the keypad, adjust the displayed value to correspond to the actual thickness of the thick reference sample.
- (5) Couple the transducer to the thin reference sample.
- (6) Using the keypad, enter the "calibrate zero" command.
- (7) When the thickness reading is stable, press ENTER.
- (8) Using the keypad, adjust the displayed value to correspond to the actual thickness of the thin reference sample.
- (9) Press the MEASURE key to complete the process.

Figura 2.5-40 Bloque de calibración Olympus para medidor de espesores ultrasónico y la secuencia de calibración que recomiendan para utilizarlo (Olympus).

## 2.5.2.6. APLICACIONES EN PATRIMONIO CONSTRUIDO

---

La técnica de ultrasonidos en el patrimonio construido se aplica en la caracterización y estado de materiales, en control de calidad y en mantenimiento preventivo. Los materiales de composición homogénea dan mejores resultados: determinadas piedras, materiales cerámicos, metales, determinadas maderas densas, plásticos, determinados hormigones y morteros, resinas, etc. Las principales aplicaciones dentro del campo de la conservación del patrimonio arquitectónico son:

- Detección y caracterización de anomalías internas, tales como:
  - Grietas, siempre que éstas no sean paralelas a la dirección de propagación de la energía acústica. La técnica tiene la capacidad de detectar la grieta y de averiguar la profundidad.
  - Localización de cavidades, si éstas son mayores que la mitad de la longitud de onda de la energía acústica. En determinados casos es posible determinar su tamaño.
  - Detección de material disgregado, escamas y delaminaciones. Es posible gracias a la comparación de velocidades en material en estado óptimo y material deteriorado. La velocidad será menor cuanto más disgregado se encuentre el material.
  - Detección de pérdida de adherencia entre materiales.
  - Determinación del espesor y dimensiones del elemento en función del tiempo y la velocidad de la onda acústica.
- Caracterización de materiales.
- Detección del nivel de agua.
- Inspección de soldaduras: presencia de poros, inclusiones, reducido espesor, insuficiente penetración y existencia de grietas.
- Detección y medición de la extensión de oxidación de un elemento.
- Obtención del módulo de elasticidad del material (Monteagudo V., 2010).



## DETECCIÓN DE ANOMALÍAS

El técnico encargado de realizar el test de ultrasonidos debe decidir la frecuencia, y por tanto la longitud de onda, a que se realizará la investigación. En general, la regla a tener en cuenta es que el test será capaz de detectar irregularidades mayores a la mitad de la longitud de onda (Rimoldi & Mundo, 2012). La sensibilidad del test es la capacidad de detectar irregularidades, a mayor sensibilidad, menor será el tamaño de éstas. La sensibilidad aumenta con la frecuencia, de modo que a mayor frecuencia mayor sensibilidad y menor longitud de onda. La resolución es la habilidad del sistema para localizar discontinuidades que están próximas entre sí dentro del material investigado. La resolución también aumenta con la frecuencia (Figura 2.5-41). Dado que, a mayor frecuencia, menor profundidad de penetración, la frecuencia óptima implica encontrar el balance óptimo resolución-sensibilidad-profundidad de penetración. Así pues, en el proceso de elección de la frecuencia habrá de considerarse la estructura del material, composición y espesor, así como el tamaño y tipo de irregularidades, y localización probable. Los materiales de obra vertidos in situ normalmente son de grano grueso y por tanto son recomendables frecuencias bajas para su estudio; los metales con estructura de grano refinada y direccional suelen testearse con altas frecuencias.

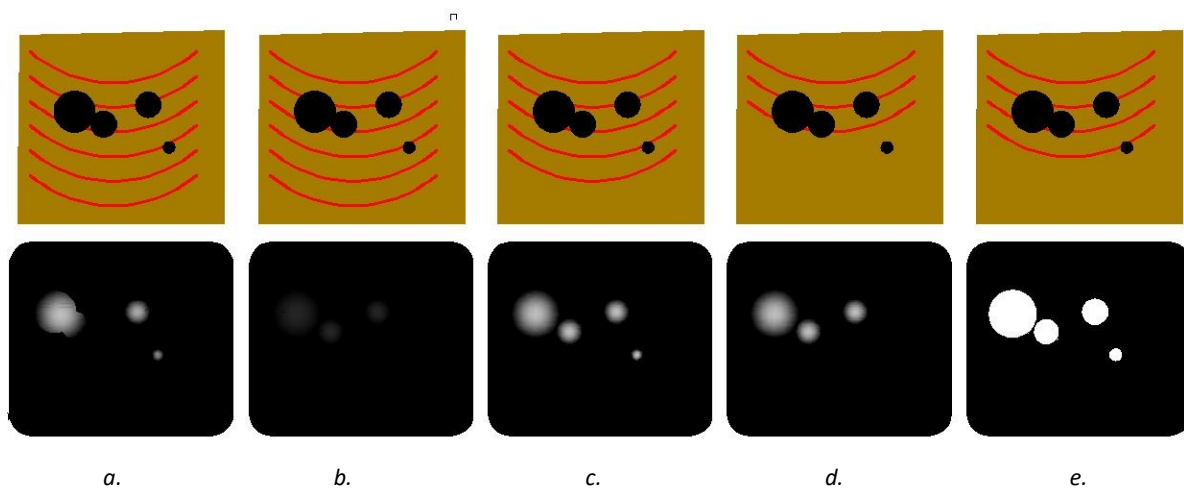


Figura 2.5-41 En las figuras a. y b. se observa el resultado esquemático de un test con baja resolución/baja sensibilidad respectivamente debido a un alcance mayor al necesario. En la figura c. el resultado presenta mayor resolución dado que el alcance es más ajustado. En la figura d. la profundidad es menor de la necesaria y finalmente, la figura e. muestra el alcance perfecto para una óptima relación profundidad/resolución/sensibilidad.

Cabe destacar que existen otras variables que influyen en la capacidad de un test de ultrasonidos de detectar anomalías, además de la longitud de la onda, tales

como tipo y voltaje aplicado al cristal, propiedades del cristal, tipo de material de soporte del cristal, diámetro del transductor, y tipo de receptor.

Los cambios en la velocidad de propagación ultrasónica, son proporcionales al contenido de anomalías tales como cavidades, poros, fisuras y microfisuras, grietas y delaminaciones. Es decir, en términos generales, para un mismo material y contexto, a mayor velocidad de propagación de la onda ultrasónica, mayor resistencia mecánica (Ercolani, Ortega, & Señas, 2007). Por ejemplo, la velocidad del sonido en hormigón es de 4 a 4,5 metros por segundo. Esta velocidad aumenta a mayor resistencia del hormigón (Standard Test Method for Pulse Velocity through concrete ASTM C597-83, 1987).

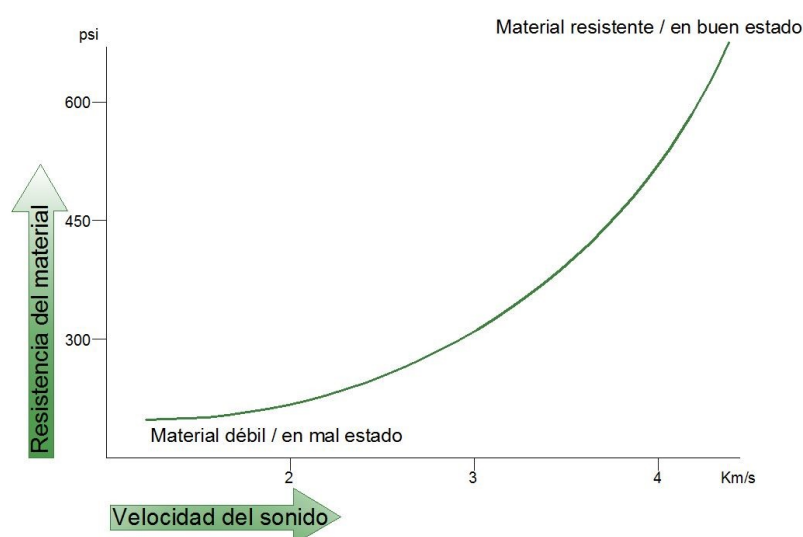


Figura 2.5-42 Para un mismo material, a mayor velocidad de propagación del sonido en su interior, mayor resistencia del mismo (Bell, 2016).

## EVALUACIÓN DE GRIETAS

Cuando la geometría y la composición del material se consideran buenas para la técnica de ultrasonidos y la orientación de la grieta es conocida, la longitud de ésta puede ser determinada con un método denominado *Crack tip diffraction*.

Cuando se utiliza un transductor en ángulo y se escanea una grieta como la de la Figura 2.5-43, aparece una reflexión correspondiente a la reflexión de la grieta en la base del elemento. Conforme se desplaza el transductor, aparece otra reflexión, en este caso menor, generada en el extremo opuesto de la grieta. Como la distancia

recorrida es menor en la segunda reflexión, ésta aparece antes en el A-scan. La altura de la grieta se calcula en función de la velocidad de la onda transversal.

Ecuación 2.5-14

$$a = \left( \frac{V_T dt}{2} \right) \times \cos \theta_R$$

Siendo,

$V_T$ , velocidad de la onda transversal, en metros por segundo (m/s)

$dt$ , tiempo transcurrido entre las llegadas al transductor de las dos ondas reflejadas, en segundos (s).

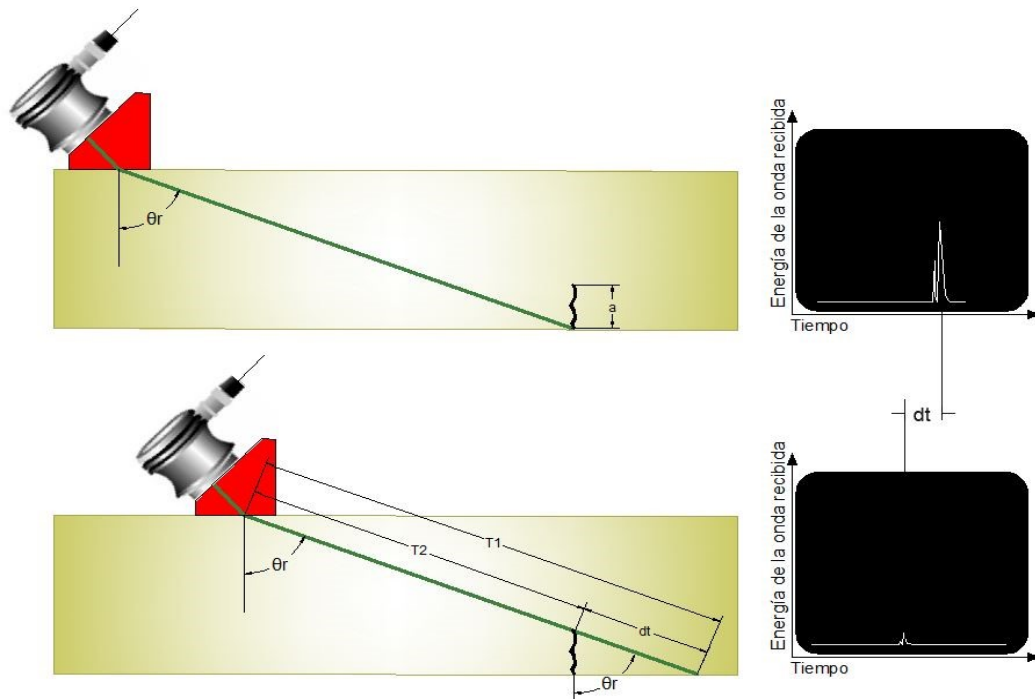


Figura 2.5-43 Representación esquemática del método de cálculo de la longitud de una grieta con la TND de ultrasonido, con cabezal en ángulo.

Existen equipos, como el Ultrasonic Concrete Tester Ultracon – 170 de la casa coreana Qseeman que disponen de modos automáticos de cálculo de profundidad de grietas como se muestra en la pantalla de la Figura 2.5-44.

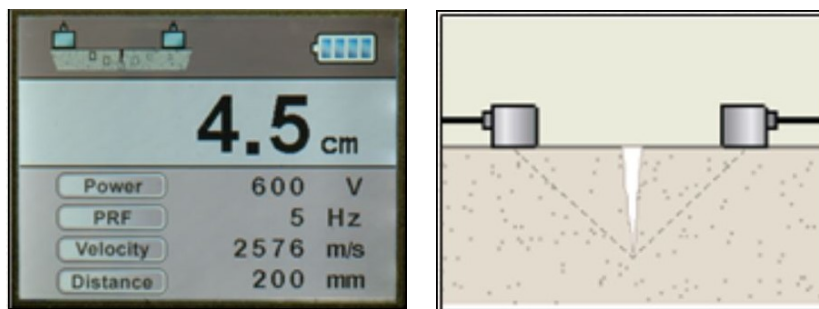


Figura 2.5-44 Sistema automático de cálculo de profundidad de grietas del modelo Ultrasonic Concrete Tester Ultracon-170 de la casa Qseeman. A la izquierda se muestra la captura de pantalla cuando el aparato se encuentra en modo Crack Depth y a la derecha se muestra el esquema de la anomalía (Oseeman).

## COMPROBACIÓN DEL ESTADO DEL HORMIGÓN

El método estándar para evaluar la resistencia del hormigón es la extracción de probetas y su ensayo posterior en el laboratorio. En un ensayo de ultrasonidos, existe una relación directa entre la velocidad de la onda longitudinal que viaja por el hormigón y la resistencia del mismo para unas condiciones específicas (GB Geotechnics, 2015): el descenso en el valor de la densidad debido, por ejemplo, a un elevado ratio agua/cemento o a una mala compactación provoca un descenso de la resistencia de ese hormigón y un descenso de la velocidad de la onda longitudinal (Carino & Sansalone, 1988). Así mismo, la presencia de grietas que intersectan con la trayectoria de la onda causa una reflexión de la onda y un descenso de su velocidad. Si las grietas se encuentran paralelas a la dirección de propagación de la onda, éstas pueden pasar desapercibidas.

Ecolani, Ortega y Señas llevaron a cabo una investigación en la que demuestran la relación de la pérdida de velocidad ultrasónica con la pérdida de resistencia en hormigones sometidos a altas temperaturas debido a un incendio (Ecolani, Ortega, & Señas, 2007). El hormigón está formado por diferentes materiales con coeficientes de dilatación diferentes, que, al someterse a altas temperaturas, provocan cambios volumétricos desiguales, apareciendo fisuras y microfisuras, las cuales merman la capacidad resistente del hormigón. A los 105°C, la pasta se deshidrata, y por tanto se contrae. A temperaturas más elevadas, los agregados se

expanden y predomina la expansión de los mismos frente a la contracción de la pasta (Giaccio, Tobes, Torrijos, & Zerbino, 2005). A los 180°C comienza la deshidratación del silicato de calcio hidratado y a partir de los 500°C, la mayor parte de los agregados pasan a ser inestables y las consecuencias irreversibles, con una creciente densidad de microfisuras en la interfase pasta-agregado (Bazant & Kaplan, 1996). La misma investigación explica cómo las

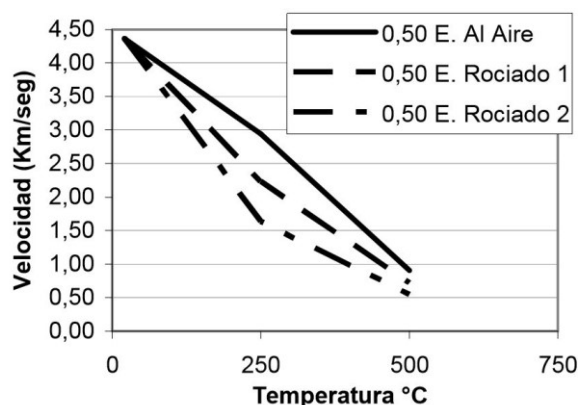


Figura 2.5-45 Relación entre la velocidad de ondas acústicas ultrasónicas y la temperatura de exposición del hormigón con una relación a/c de 0,50, en función del procedimiento de enfriamiento tras la aplicación del calor (Ercolani, Ortega, & Señas, 2007).

consecuencias de este proceso pueden agravarse dependiendo del tipo de enfriado al que se someta al hormigón. Los resultados demuestran que la velocidad desciende con una pauta aproximadamente lineal, en función de la temperatura a la que fue expuesta la probeta de hormigón. Al mismo tiempo, el descenso de la velocidad es menor en la probeta enfriada al aire que en las humedecidas (Figura 2.5-45). Estas afirmaciones las corroboraron con ensayos paralelos de esclerometría.

Otra aplicación de la técnica de ultrasonidos es la detección de ataques de organismos xilófagos en madera, si bien se considera una aplicación marginal y anecdótica, dado que son muy pocos los ejemplos que existen en los Estados Unidos. Un equipo de ingenieros llevó a cabo una investigación en 2013 en la que demuestran que la técnica de ultrasonidos es apropiada para cuantificar el ataque de xilófagos en piezas de *Araucaria angustifolia* (Weiler, Missio, Gatto, & Güths, 2013). Al igual que en hormigón, comprobaron que, a mayor deterioro de la madera, menor es la velocidad de transmisión de las ondas ultrasónicas. Los organismos xilófagos, provocan un descenso de la densidad de la pieza a medida que crean galerías internas, lo cual implica un descenso de las propiedades mecánicas de la madera tales como el módulo de elasticidad y el módulo de rotura (Bucur, 2006).

No son muchas las empresas que aplican la tecnología de ultrasonidos al campo del patrimonio arquitectónico a nivel nacional, y son las mismas empresas que aplican END en general. Las principales son: Atkinson-Noland & Associates Inc.



con sede en Colorado<sup>41</sup>, GB Geotechnics USA Inc. con sede en NYC<sup>42</sup>, E<sup>2</sup>chem Consultants<sup>43</sup> de Nueva York y WJE Engineers<sup>44</sup> de Illinois. Todas ellas trabajan en todo el territorio nacional.

## 2.5.2.7. VENTAJAS Y LIMITACIONES DE LA TÉCNICA DEL UPV

---

### VENTAJAS

- El test puede ser realizado accediendo únicamente a una cara del material por el método indirecto.
- La profundidad de penetración puede ser superior a otras TND, dependiendo de la resolución requerida de los resultados. La profundidad máxima de penetración suele rondar los 25 cm (Bransby-Zachary, C., 2015)
- Es una técnica precisa para determinar la posición de la reflexión y estimar de manera aproximada el tamaño y la forma.
- La preparación del test es mínima.
- Los resultados son instantáneos.
- La combinación de los últimos equipos y softwares proporciona imágenes de buena resolución, lo cual facilita la interpretabilidad de resultados.
- Carece de riesgos para la salud de los operarios y no afecta en ningún modo a los elementos a testear.
- El equipo es portable y muy manejable, pudiéndose realizar tests en horizontal, vertical e incluso en techos.
- Es un método apropiado en presencia de humedad y agua en el material a analizar.

---

<sup>41</sup> <http://ana-usa.com/>

<sup>42</sup> [http://www.gbg-us.com/#!\\_home](http://www.gbg-us.com/#!_home)

<sup>43</sup> <http://www.e2chem.com/index.php/non-destructive-evaluations-nde>

<sup>44</sup> <http://www.wje.com/services/nondestructive-evaluation-NDE-NDT>

- Da buenos resultados en materiales homogéneos, con superficies lisas y materiales con altas densidades.

## LIMITACIONES

- En la gran mayoría de los casos en aplicaciones en el patrimonio arquitectónico, el método utilizado es por contacto, por lo que la superficie debe ser accesible para la realización del test.
- No es un método apropiado en presencia de cámaras de aire.
- Es necesario que el ejecutor disponga de capacidad, formación y conocimientos técnicos extensos para el desarrollo de procedimientos de inspección e interpretación.
- En el caso de utilizar transductores acústicos, es necesario utilizar un acoplante para transferir la energía sonora al medio en estudio. Dicho acoplante puede dejar residuo, con lo que hace impracticable la técnica en superficies que no pueden mancharse (frescos, tapices, elementos policromados, determinadas piedras históricas porosas, etc.)
- Los materiales que son muy irregulares, o muy pequeños, son difíciles o imposibles de inspeccionar con esta técnica. Por ejemplo, el hierro fundido, debido a su composición de grano grueso y su baja conductividad del sonido, es difícil de inspeccionar con ultrasonidos, ya que los resultados son limitados debido al exceso de ruido.
- Los defectos y discontinuidades lineales cuya orientación es paralela a la dirección de propagación de la energía sonora pueden pasar desapercibidos.
- El equipo requiere de calibración del fabricante y del usuario, y el test tiene que ser realizado siguiendo ciertas directrices y estándares para obtener resultados precisos.
- La técnica recoge tanto anomalías como características propias del material, por lo que en determinados casos en los que las características intrínsecas al material se confunden con las anomalías en estudio, puede generarse demasiado ruido, obteniendo resultados escasos o limitados.

En estos casos puede ser necesaria la aplicación en combinación con otras TND.

- La técnica funciona mejor cuanto más homogéneo sea el material. En fábricas con presencia de juntas, por ejemplo, en un muro de ladrillo, la velocidad desciende en su encuentro con la junta (Ennis & Silman , 1993)

## 2.6. MÉTODOS FACILITADORES DE END

La realidad demuestra que un alto número de proyectos de END no serían posibles sin la combinación de métodos de apoyo a las técnicas de END. Algunas de estas técnicas, como las técnicas modernas de fotogrametría digital, van tan vinculadas al uso de nuevas tecnologías como los vehículos aéreos no tripulados (UAVs), que no incluirlas supondría limitar el entendimiento de éstas (ampliado en el apartado “1.3 Objetivos y Alcance”). Por este motivo, en el presente apartado se incluyen dos métodos facilitadores: UAVs y técnicas de acceso industrial con cuerdas (IRA). Ambos, pueden ser considerados métodos de acceso (integral o remoto). Los UAVs representan una tecnología con potenciales aplicaciones útiles al patrimonio arquitectónico, pero muy limitada, de momento, por las restricciones legales. El IRA se utiliza habitualmente en Estados Unidos en inspecciones de patrimonio arquitectónico desde 1996.

## 2.6.1. VEHÍCULOS AÉREOS NO TRIPULADOS (UNMANNED AERIAL VEHICLES -UAV-)

---

*They are economical, efficient and environmentally friendly.*

---

Philip Kenul, vicepresidente del Comité F38 de ASTM.

### 2.6.1.1. INTRODUCCIÓN Y CONTEXTO

---

Los vehículos aéreos no tripulados (UAV) se conocen comúnmente como drones. Su origen proviene de la industria bélica y se remonta a la década de 1880 cuando Austria envió un globo aerostático para atacar Venecia (Taylor, 1978). Estados Unidos, en la guerra de Vietnam, ya utilizó aviones no tripulados y desarrolló la generación de UVAs que ha evolucionado hasta los modelos que se usan actualmente.

El uso de UAVs en los campos de la arquitectura, ingeniería y construcción (AEC) está en constante evolución. Bibliografía e inspecciones datadas hace pocas semanas pueden estar ya desfasadas.

Su utilización en el campo de la restauración arquitectónica en los Estados Unidos es aún es limitada, sobre todo al exterior, debido a los condicionantes legales que existen relativos al uso de UAV. Quizá por su reciente aparición y todavía escasa aplicación, no hay consenso en cuanto a considerar los drones dentro de la categoría de END si bien es cierto que son las empresas especializadas en la aplicación de END las que están siendo pioneras en su utilización, añadiendo la capacidad de utilización de UAV a su catálogo de servicios.

En esta tesis se ha preferido no incluir los UAV dentro de la clasificación de END, sin embargo, se considera importante incluirlos como medios facilitadores de END, por su tremenda utilidad a este respecto y la prometedora proyección de futuro



que representan. Su utilización en evaluación del patrimonio construido, consiste en la utilización de TND instaladas en la aeronave: cámaras digitales fotográficas o de video, cámaras térmicas, termómetros, etc. Algunos de los proyectos de END no podrían ser llevados a cabo sin la ayuda de UAVs.

Existen diferentes terminologías para referirse a lo que comúnmente se conoce como dron; UAV es el acrónimo de *unmanned aerial vehicle*, y se refiere a una aeronave sin piloto a bordo. Se vuelan remotamente, bien con un piloto o con un vuelo pre-programado. La organización internacional de aviación civil (ICAO) también los denomina naves tripuladas remotamente (*remotely piloted aircrafts*, RPA). El acrónimo UAV se extiende en algunos casos a UAVS, acrónimo de *unmanned aircraft vehicle system*, para incluir todos los elementos del sistema relativos al dron (sistema). La Administración Federal de Aviación (FAA) utiliza oficialmente el acrónimo UAS, de *unmanned aircraft system* para incluir en la nomenclatura los sistemas complejos que pueden incluir estaciones de tierra y otros elementos adicionales a la aeronave. El término UAV cubre, desde los modelos de \$200, a los complejos aparatos cinematográficos equipados con cámaras de video de alta calidad.

A los efectos de esta tesis, todas estas nomenclaturas se consideran sinónimas, y se utilizará de ahora en adelante el acrónimo UAV, por ser el más utilizado en el campo de la restauración arquitectónica en los Estados Unidos.

En Estados Unidos, para volar un UAV de uso comercial se requiere que el técnico que lo opera sea un piloto profesional y que haya un observador acreditado junto al piloto cuando el aparato está en uso. Además, se requiere una exención FAA 333 expedida por la FAA. Se han puesto multas hasta de \$1,9 millones por operar sin la exención (Humphrey, 2016). Estos obstáculos son el principal motivo por el que la adaptación de drones a la industria de la restauración arquitectónica está siendo lenta. Además, hay miles de áreas en las que el uso de UAV está terminantemente prohibido (Figura 2.6-3). Por ejemplo, quedan excluidos todos los núcleos urbanos, lo que, en el campo de la restauración arquitectónica, incluye la mayor parte de los edificios (Figura 2.6-2).

La previsión de la industria de los UAV para 2016 es de \$4 billones, cifra que representa la creciente importancia de esta industria (Carson, 2015).

Son varias las páginas web especializadas en UAVs que informan sobre la actualidad cambiante de los mismos en Estados Unidos. Es recomendable visitar

estos sitios web antes de realizar inspecciones ya que constituyen la fuente de información más eficiente para informar sobre los cambios constantes legales a nivel municipal, estatal y nacional, los desarrollos tecnológicos y en general todas las noticias relacionadas con UAVs:

<http://jdasolutions.aero/blog/drone-publication-46/> Este sitio web incluye la conocida Digest 46, un resumen semanal de las principales noticias que afectan el mundo de los UAV.

<http://www.suasnews.com/> Como su nombre indica, trata diariamente todo tipo de noticias relacionadas con los UAV.

<http://unmanned-aerial.com/> Incluye noticias recientes relativas al mundo de los UAV que se actualizan diariamente.

<http://theuavdigest.com/> Además de noticias, este sitio web incluye un podcast semanal resumiendo la actualidad del mundo UAV.

<http://www.smalluavcoalition.org/uavheadlines/> Este sitio web pertenece a la Small UAV Coalition, una asociación de compañías que emplean recursos en investigación y desarrollo y que se han unido para luchar por cambios legales que alienten y faciliten el uso de los UAV en la industria civil.

## ASPECTOS LEGALES/CONTROVERSIA

Si bien es cierto que el aparato legislativo estadounidense está muy retrasado con respecto a la rápida evolución tecnológica relativa a los UAV, está justificado ante la tremenda dificultad de regular el uso; las aplicaciones son variadas y muy prácticas, pero los riesgos son también muy elevados. La utilización de drones para traficar con droga o para instalarles pistolas que pueden disparar desde el aire son dos de los numerosos ejemplos que se han dado, y justifican la cautela (SUAS News, 2016). Cabe recordar, además, que el espacio aéreo estadounidense es el más transitado y complejo del mundo (Quigley, 2015).



Figura 2.6-1 Uno de los carteles de la FAA prohibiendo el uso de UAVs. (Federal Aviation Administration, 2016)

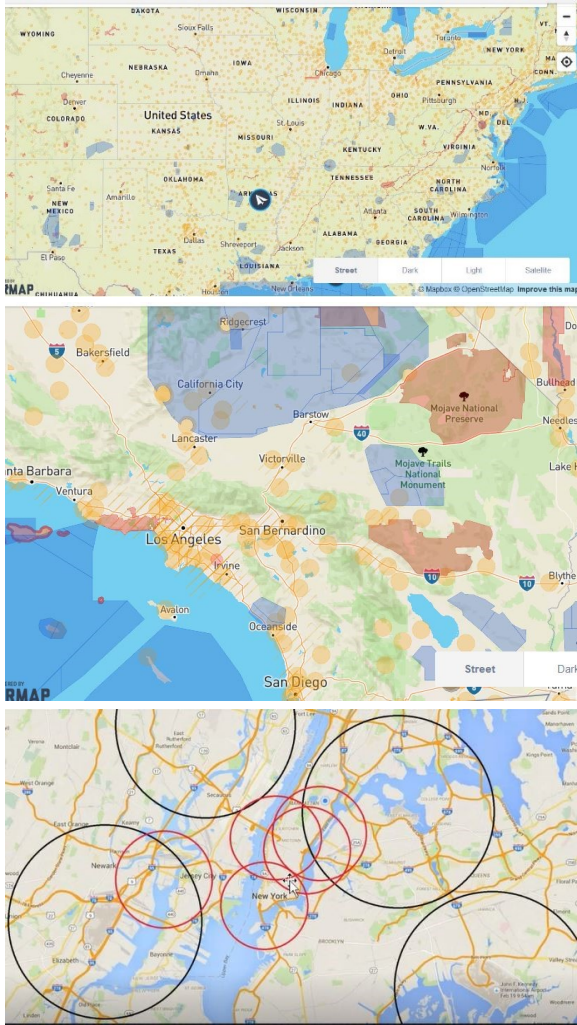


Figura 2.6-2 Los círculos o sombras son áreas en las que no se puede volar: parques nacionales, bases militares, un radio de 5 millas alrededor de aeropuertos, helipuertos, zonas temporalmente restringidas (Ej. Un incendio), espacios aéreos prohibidos (Ej. La Casa Blanca), zonas marinas protegidas NOAA, zonas habitadas (diferentes normativas locales). En sentido descendente: mapa de la costa este y centro del país, Los Angeles, y Nueva York. Mientras la legislación no establezca excepciones, la mayoría del patrimonio arquitectónico se encuentra dentro de estas áreas no-fly (Airfly, 2016).

El caso de la ciudad de Nueva York, es particular. Es la ciudad en la que mayor uso se le podría dar a los UAV con fines de inspección e investigación en edificios históricos, por dos motivos: el gran número de edificios históricos y la altura de éstos. Sin embargo, es el espacio aéreo más utilizado de todo el país, 117 millones de personas utilizan el espacio aéreo de la ciudad de Nueva York anualmente. La Global Gateway Alliance, una asociación que vela por la salud del espacio aéreo, anunció que el número de accidentes con drones en Nueva York alcanzaba casi un tercio de los ocurridos en el resto del país. En dos de esos incidentes sendos drones estuvieron cerca de colisionar con aviones de pasajeros (Quigley, 2015). La Global Gateway Alliance es uno de los grupos con más influencia que está luchando por endurecer la regulación con respecto al uso de drones comerciales y recreacionales: exigen zonas de “No Fly Zones”, mejorar ciertos aspectos tecnológicos de los drones, formación obligatoria para los usuarios y monitoreo del tráfico aéreo. Cabe

recordar que los usos recreacionales no requieren de acreditación oficial para utilizarlos, simplemente seguir unas directrices y que el UAV no exceda de 25 Kg. Estas regulaciones, conllevan a plantearse qué diferencia oficial existe entre un vuelo comercial y uno recreativo ya que, si la diferencia únicamente se establece en la compensación económica, cabría la posibilidad de que las empresas realizasen vuelos gratis, mientras cubren el coste del servicio en otra partida. De hecho, esta es la zona gris en la que muchas empresas están llevando a cabo vuelos, no cobran por el vuelo, sino por la edición del material que genera el UAV.

La ciudad de Washington en su totalidad fue declarada “No drone zone” en mayo del 2015 con el lema: *Enjoy your visit to the Nation’s Capital. Bring your family, your cameras and plenty of sunscreen. Just don’t bring your drone.*

Las zonas prohibidas incluyen inmediaciones de aeropuertos, parques nacionales, edificios gubernamentales e infraestructuras críticas (Figura 2.6-2). Antes de cada vuelo, se ha de comprobar cualquier restricción temporal (TFRs). En enero de 2016, la FAA lanzó una aplicación B4UFLY para Smartphone que informa a usuarios acerca de restricciones en la zona que se desee volar (Figura 2.6-3).

La FAA trabaja contrarreloj para asistir las demandas de una industria en aumento, con un gran potencial económico. El 29 de agosto de 2016, la FAA actualizó una de las regulaciones, la Small UAS Rule (Part 107) pero sin suficiente contundencia para ser efectiva. El principal cambio es que el conductor del UAV ya no necesita ser un piloto comercial, sino que puede obtener un certificado de piloto remoto pasando un test y una verificación de antecedentes. Los otros cambios importantes son: que el aparato debe pesar menos de 25 Kg, el piloto debe estar registrado y tener más de 16 años, el piloto debe tener visión directa de la aeronave, volar a menos de 400 pies (121,92 m), volar durante el día y por debajo de 100 millas por hora (160,93 Km/h) y no puede volar sobre seres humanos. A su vez el comité ASTM 38 trabaja en paralelo, focalizando sus esfuerzos (en el verano de 2016) en UAV’s de menos de 250 gramos, lo cual sigue restringiendo el uso de UAVs con cámaras potentes en áreas congestionadas. La FAA tiende a seguir las recomendaciones del comité de ASTM pero en este caso es muy probable que sea más laxo y admita un uso más práctico de aeronaves de menos de 2 Kg en edificios ocupados en áreas metropolitanas en un futuro próximo.

El otro gran obstáculo que las compañías deben superar para poder operar con UAVs son las compañías de seguros, que por el momento o bien no aseguran, o lo hacen a cifras prohibitivas. Uno de los argumentos de las aseguradoras, además del alto índice de siniestros, es la invasión de privacidad inherente al uso de UAVs,

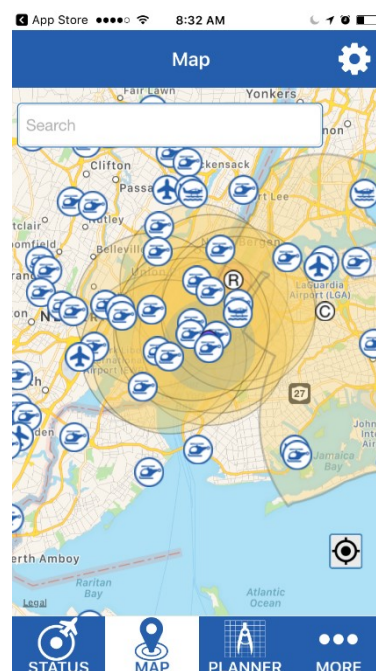


Figura 2.6-3 Captura de pantalla de la aplicación B4UFLY de la FAA que informa a los usuarios de UAV de las zonas restringidas y otras aeronaves en el espacio aéreo en tiempo real. La imagen corresponde a Nueva York (Federal Aviation Administration, 2016).



cuyas regulaciones pueden ser muy estrictas y que afecta de forma diferente a cada estado, al no ser una legislación federal. En general, las restricciones legales locales y estatales conciernen más a la privacidad que a la seguridad.

Según Ted Wierzbanski, chariman del comité 38 de ASTM, en octubre de 2015 habían de tres a cuatro millones de UAVs comerciales o recreacionales en circulación. La FAA comenzó a otorgar licencias de uso comercial a aplicaciones de poco riesgo en septiembre de 2014; En julio de 2015 700 firmas ya disponían de una, con un aumento semanal de 50 licencias a la semana. Más del 45% de esas licencias corresponden a usos cinematográficos y fotográficos; la mayor parte del resto son para servicios públicos, energía, infraestructuras, inmobiliarias, agricultura, construcción, educación y servicios de emergencia (Quigley, 2015) (Figura 2.6-4).

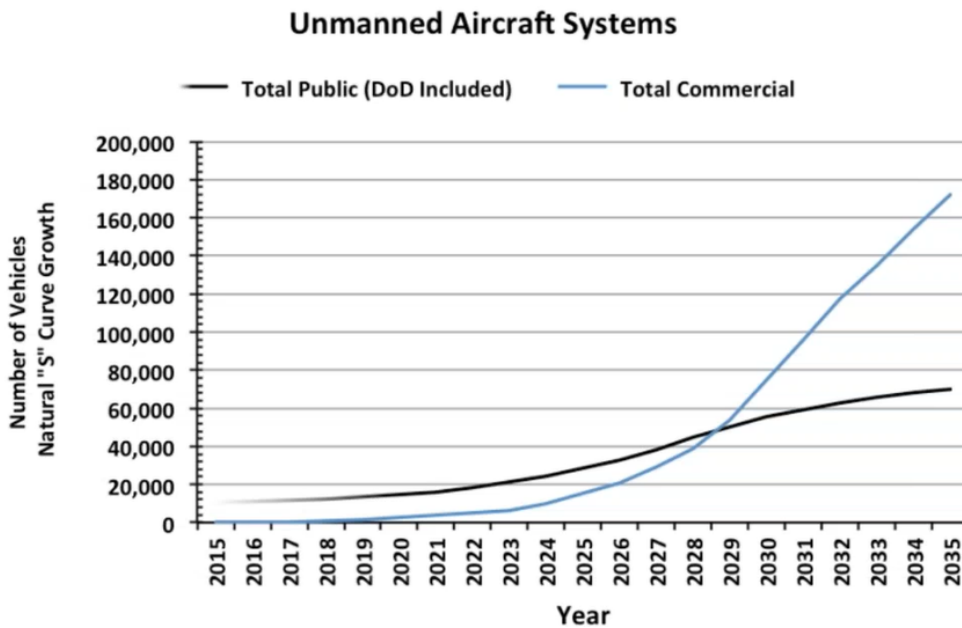


Figura 2.6-4 Gráfico que muestra la previsión del número de UAVs comerciales y privados hasta 2035 (U.S. Department of Transportation. John A. Volpe National Transportation Center., 2013)



## 2.6.1.2. TIPOS DE UAVS

---

Hay muchas clasificaciones para catalogar tipos de UAV. Una de ellas hace referencia al número de motores que utiliza para volar; un *multirotor copter* utiliza entre tres y ocho controladores de rotación de las hélices (*counter-rotating propellers*) para equilibrarse y moverse en todas las direcciones. Un multi-rotor con cuatro hélices se denomina cuadricóptero (*quad-copter*) y un octocóptero (*octo-copter*) utiliza ocho hélices y ocho motores. La ventaja de disponer de varios motores y hélices es que en conjunto con dispositivos GPS y barómetros, requieren de menos experiencia y pueden mantener su posición incluso con vientos fuertes.

Con un presupuesto de alrededor de \$5,000 una firma dedicada a la restauración arquitectónica puede adquirir un UAV equipado con cámara de alta definición.

Son varios los parámetros a tener en consideración para la correcta elección de un UAV en función de la aplicación:

- Estabilidad: afecta directamente a la calidad del material gráfico registrado, especialmente el video. En términos generales, cuantos más motores/hélices tenga un UAV, mejor será la estabilidad, y mayor será el peso que éste pueda acarrear, con lo que la cámara instalada puede ser de mayor calidad; a mayor capacidad portante, mayor número de unidades de batería podrá acarrear.
- Seguridad: esta es una de las ventajas de los UAV pequeños y ligeros. Un DJI Phantom 2 pesa 1,3 Kg. mientras que un DJI S1000 pesa 4,2 Kg. Si existe el riesgo de que caiga sobre coches o personas (por ejemplo, en la inspección de un puente histórico por el que pasa una autovía), puede ser motivo suficiente para primar la ligereza sobre la calidad del material fotográfico. En la ciudad, además del riesgo propio de que pueda caer el UAV, existe la posibilidad de perder control sobre el mismo debido al elevado número de radio ondas que coexisten en el aire. Existen radio transmisores que limitan el ruido de éstas.
- Portabilidad: este es otro factor a favor de los UAV pequeños. Si bien los UAV de gran tamaño pueden desmontarse, se requiere de más tiempo para ponerlos en funcionamiento, además de que las juntas por las que se pliegan

son un punto de rotura o deterioro común, con respecto a los que se guardan de una sola pieza.

- Precio: en la mayor parte de los casos este es el factor más determinante. Existe un amplio rango de posibilidades que oscilan desde los \$200 a los \$100.000. A continuación, se presentan algunos ejemplos:
  - Por \$1.600 se puede adquirir un UAV DJI Phantom 3 con una GoPro. Reemplazar la aeronave después de un choque cuesta alrededor de \$1.000.
  - La compañía estadounidense 3DR comercializó a finales de 2015 el Solo con control de vuelo Pixhawk y con cuatro modos de vuelo automático (*cablecám, orbit, selfie y follow me*). El modelo con GoPro se vende por \$1.800.
  - Alrededor de \$2.500 es el precio de mercado de un TBS Discovery Pro con GoPro, un cuadricóptero que produce excelentes videos. También incluye gafas FPV.
  - En el precio de \$3.500 está el Atlanta Hobby DJI F550, un hexacóptero con GoPro que es más grande y estable que el TBS.
  - \$6.350 es el precio del DJI S-1000, que puede llevar casi cualquier cámara digital. A ese precio hay que añadir \$3.000 para adquirir extra baterías, radios e instalación de los dispositivos adicionales por parte del fabricante.
  - Los UAV personalizados de alta gama pueden tener un precio desde \$10.000 a \$100.000, dependiendo de los dispositivos adicionales que se les incluyan; diferentes opciones que justifican dicho precio incluyen cámaras térmicas (normalmente de la firma FLIR), escáner laser LIDAR con precisión de 2,5 cm a 40 m y sensores para evitar obstáculos.
- Durabilidad y reparaciones: existen modelos en los que todo es reemplazable, con lo que las averías propias o debidas a accidentes pueden ser reparadas sin sustituir el UAV. En otros, las piezas disponibles para reparaciones son escasas o nulas. DJI es el gigante chino que comercializa drones a precios asequibles. Su paquete cerrado de componentes es parecido

al enfoque comercial de firmas como Apple. Generalmente, los componentes DJI sólo son compatibles con otros DJI. Si deja de funcionar, lo más efectivo es comprar otro nuevo. Al contrario, la firma estadounidense 3DR se ha convertido en la firma de referencia, con su controlador de vuelo Pixhawk que admite muchas más funciones y operaciones, pero es más complejo de operar; se compone de tres elementos: el Pixhawk, que es el hardware del controlador de vuelo (\$200), el código APM, que es el software que controla el Pixhawk (gratis) y el Mission Planner, que es el software de ordenador que permite ampliar las posibilidades desde el ordenador.



Figura 2.6-5 De izquierda a derecha, de arriba abajo: DJI Phantom 3, 3DR Solo, DJI F550 hexacoptero, TBS Discovery Pro y DJI S-1000.

En cuanto a las cámaras, la más utilizada es la GoPro por cuatro motivos principales: su precio asequible (\$400), su reducido tamaño y peso, su calidad fotográfica en relación a los otros factores, y su robustez. Graba video hasta una calidad de 4K, pudiendo elegir también entre 2,7K, 1440 y 1080. Se pueden extraer fotografías de buena resolución 8x10 de videos de 1080p. Uno de los inconvenientes de la GoPro es la distorsión de la imagen debida al gran angular de su lente, lo cual reduce la calidad de los mosaicos en aplicaciones de fotogrametría aérea. Esto puede ser remediado cambiando la lente de la GoPro con un coste adicional. Originalmente diseñadas para aplicaciones deportivas, su focal es fija, a distancia media, por lo que fotos muy próximas pueden resultar ligeramente desenfocadas. Por otra parte, GoPro anunció que está desarrollando su propio UAV que espera lanzar al mercado entre 2016 y 2017.

Canon también fabrica cámaras de bajo peso con GPS interno ideadas para UAVs, así como Sony, que también fabrica los modelos NEX 3 (\$500) y NEX 7 (\$670) que son populares debido a su capacidad de grabar video de alta calidad, así como la Panasonic Lumix (\$800).

Otros UAVs, como el Selfie-drone Lily y Nixie (sobre los \$700) incluyen otras opciones como la de seguir a un objeto en movimiento, que en algunas aplicaciones en patrimonio construido, como la de inspecciones por terceros, puede resultar útil (Rosenbloom, 2015).

### 2.6.1.3. INSTRUMENTACIÓN

---

El objetivo de este apartado no es profundizar en la tecnología de los UAVs, sino presentar escuetamente los principales componentes de los UAV utilizados en aplicaciones en el campo de la restauración del patrimonio arquitectónico.

Las compañías pueden comprar modelos ya montados o hacerse sus propios modelos, aunque cada vez más se opta por la primera opción.

- Baterías. Una de las limitaciones actuales de los UAV es la poca autonomía de que disponen, alrededor de 25 minutos, dependiendo del modelo. Debido a la adaptabilidad para ser flexibles, las baterías que se utilizan habitualmente son de polímero de litio (LiPo).
- El controlador de vuelo, FC, es el pequeño ordenador de a bordo que controla cada motor. Un controlador apropiado para uso comercial dispone de tres modos: el modo manual es el más complicado, pero a la vez muy versátil. En el modo de altitud, el FC mantiene al UAV al mismo nivel. Por último, el modo GPS permite registrar las coordenadas GPS antes del vuelo y el UAV realizara exactamente ese recorrido. La mayor parte de los modelos cuentan con una opción de fallo de servicio, que consiste en que el aparato vuelve a un lugar determinado en caso de sufrir un fallo en la señal de radio comunicación u otro tipo de avería (que le permita volar).
- Los radio-transmisores transmiten la orden desde un transmisor en los mandos de tierra a un receptor en la aeronave, que a su vez la transmiten al FC. Ocho canales son suficientes para manejar el UAV, pero es preferible

utilizar dieciocho canales para poder operar en modo dual, de manera que un piloto pueda controlar el UAV y un técnico controle la cámara o el dispositivo de inspección abordo.

- El sistema cardan es el mecanismo que estabiliza la cámara/dispositivo de inspección, normalmente debajo el UAV, y controla la orientación de la cámara. Los cardan de dos ejes mantienen la cámara nivelada y permiten que oscile de arriba abajo. Los cardan de tres ejes además permiten el giro a izquierda y derecha, indistintamente del movimiento del UAV. El sistema cardan es crucial en la estabilidad de la cámara y por tanto del material gráfico que esta registra.

Dependiendo de la aplicación para la que se destine, los UAVs pueden incluir muy variados dispositivos. Por ejemplo, existen modelos como el Ricopter de Riegl, equipados con un sensor LiDAR VUZ-1UAV, unidad IMU/GNSS y cuatro cámaras de alta resolución. Este sistema de escáner láser permite hacer levantamientos con un FOV de 230°, 350.000 puntos por segundo y exactitud de 10 mm.

El UAV de la Figura 2.6-6, utilizado para la inspección de patrimonio arquitectónico, es un cuadricóptero Phantom 2 con una suspensión Cardán Zenmuse H3 sobre la que se monta una cámara GoPro Hero3 para capturar videos y fotografías. El conjunto de soportes pivotados con suspensión Cardán permite mantener la orientación de un eje de la cámara mientras el UAV se mueve en los tres ejes. La aeronave también dispone de un sistema de posicionamiento global (GPS) y de una unidad de medición inercial (IMU) que mide la velocidad, orientación y fuerzas gravitacionales usando un acelerómetro y un giroscopio. Además, se le puede adaptar una cámara de infrarrojos, puede retransmitir en directo y transmitir la información al sistema de anotación digital

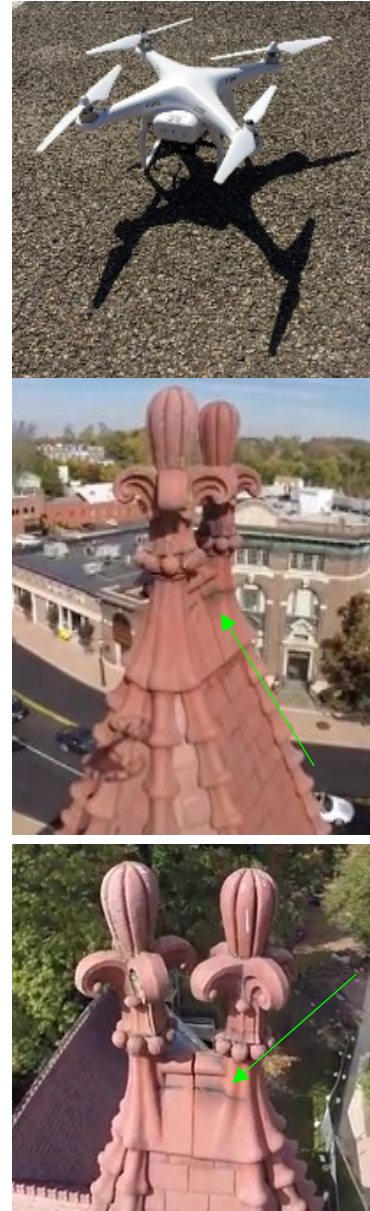


Figura 2.6-6 UAV cuadricóptero Phantom 2 y fotografías tomadas con este aparato. Las dos imágenes inferiores muestran una grieta detectada en la decoración de terracota. Las imágenes son capturas del vídeo del vuelo realizado en 2014 en Philadelphia.



TPAS. Su batería dura 25 minutos. En la actualidad, gracias a los sistemas de estabilización, las cámaras montadas en este tipo de UAV documentan elementos del tamaño de clavos y fisuras.

## 2.6.1.4. APLICACIONES EN PATRIMONIO CONSTRUIDO

---

Su utilización en el campo de la conservación arquitectónica en los Estados Unidos es aún muy limitada debido a las restricciones legales que existen relativas al uso de UAV. Sin embargo, las posibilidades que presentan pueden transformar significativamente elementos críticos en la práctica de la restauración arquitectónica. Muchas de las zonas que deben ser evaluadas en un proyecto típico de restauración son áreas de difícil acceso (Figura 2.6-7). Las dos maneras actuales de aproximación son utilizando elementos auxiliares como andamios y cuerdas o realizar inspecciones remotas con prismáticos. En cualquiera de las opciones los UAV podrían ser útiles.



Figura 2.6-7 El UAV de la imagen, un Phantom 3, equipado con cámara térmica FLIR, fue utilizado en noviembre de 2016, para evaluar el estado de una cúpula de Guastavino situada en la posición más alta del monumento Soldiers and Sailors en Manhattan. A la derecha pueden observarse, una captura del video digital y otra captura del video termográfico del encuentro de dicha cúpula con su base. Ambas imágenes delatan la presencia de filtraciones.

Además, podrían servir como herramienta auxiliar para la instalación de sistemas de acceso industriales por medio de cuerdas; con un mecanismo simple puede situar una cuerda o guía en la posición necesaria para instalar el sistema de

cuerdas, en zonas en las que de otra manera sería imposible o prohibitivamente costoso (por ejemplo, en una estatua que corona un edificio de cincuenta plantas).

Un UAV equipado con cámara de fotos puede registrar fotografías y video a un precio asequible. El análisis visual de dichos archivos, es solo el principio. Programas de software como Pix4D, Agisoft PhotoScan, PhtoModeler, ReCap 360 y otros pueden generar modelos 3D de elementos arquitectónicos, incluso de un edificio completo.

Son pocos los exteriores de edificios históricos que han sido investigados con UAVs hasta la fecha. El 4 de noviembre de 2015 se inspeccionó en Jacksonville, Florida el histórico trío de edificios de hasta 18 pisos de altura Barnett and Laura Street Trio (Moyer, 2015). La compañía que llevó a cabo el vuelo, la empresa constructora Denis, aludió a la seguridad pública y a la rapidez de la inspección, para justificar la decisión. Las imágenes, además ser utilizadas para detectar patologías, fueron enviadas a la Jackson Historic Preservation Society como documento histórico a archivar con el resto de documentación histórica arquitectónica de la zona.

En septiembre de 2015, se utilizó un UAV para tomar fotografías y videos como primer paso en el proyecto de restauración de la iglesia St. Mary the Virgin Aldermanbury en Fulton, Missouri. La iglesia, del siglo XVII, fue construida por el Arquitecto Christopher Wren, a quien se le encargaron 52 iglesias tras los fuegos de Londres de 1666. En 1960, la iglesia fue desmontada y transportada a su ubicación actual. La arquitecta a cargo del proyecto de restauración, Geist Gaebler, obtuvo planos 2D en AutoCAD a con tecnología SfM a partir de la información gráfica registrada con el UAV (Bethell, 2015).

En abril del 2016 se inspeccionó el invernadero histórico de la ciudad de Montreal, Canadá. La estructura, de 1926, que apoya sobre una base de madera de ciprés del siglo XVIII, fue considerada no segura y cerrada hasta poder ser restaurada tras analizar el material fotográfico y los videos recolectados por el UAV.

El Department of Transportation (DOT) utilizó en agosto del 2016 un UAV para inspeccionar el puente más largo del estado de Connecticut, el Gold Star sobre el río Thames. Se trató de un proyecto piloto para comprobar la idoneidad de esta tecnología para inspeccionar puentes. El DOT está al cargo de cientos de puentes históricos en el país, lo cual genera una industria cuya misión es inspeccionar puentes periódicamente. El mismo DOT dispone de equipos de técnicos formados en el uso de técnicas de acceso vertical con cuerdas. El otro método tradicional

consiste en la utilización de cestas que se descuelgan desde el tablero del puente. Ambas técnicas requieren de muchos más recursos que la utilización de UAVs.

La principal aplicación consiste en la toma de fotografías y videos de alta calidad. La cámara más utilizada es la GoPro con tarjeta microSD de alta velocidad. Muchos UAV incorporan un video link que permite ver lo que la cámara registra en tiempo real (Figura 2.6-9). Cámaras más avanzadas en drones de mayor tamaño tienen la posibilidad de hacer zoom para observaciones muy próximas. Además, los UAV que disponen de protecciones laterales permiten acercarse al objeto sin el temor de colisionar, lo cual puede ser muy útil en patrimonio construido (Figura 2.6-8).

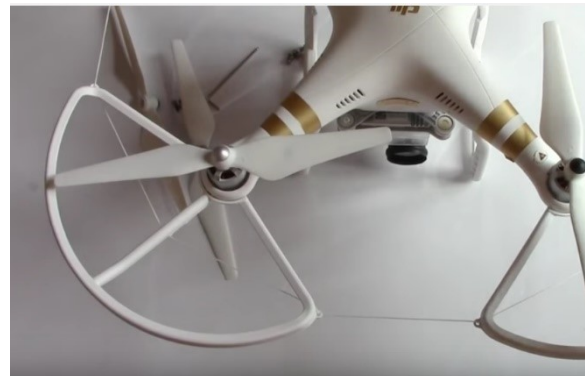


Figura 2.6-8 Protección de hélices en el modelo DJI Phantom 3.

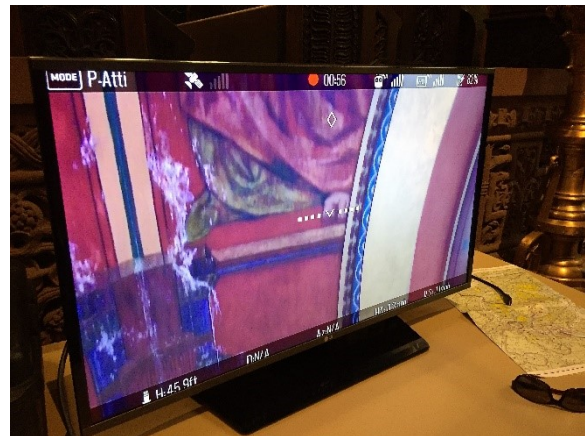


Figura 2.6-9 Vuelo de un UAV DJI Phantom 3 con protección de hélices en el interior de la iglesia Trinity en Boston. A la derecha puede observarse la pantalla a la visión en tiempo real de la cámara GoPro instalada en el UAV. La imagen delata una patología de decoloración de la pintura mural, muy probablemente fruto de humedades intersticiales en esa zona. Dicha patología no puede ser observada desde el suelo de la nave (K. Diebolt).

Una de las principales ventajas de la utilización de UAV es el poco tiempo que se necesita para poder observar zonas que con otros medios se tardaría mucho más. Por ejemplo, tras un fenómeno meteorológico extraordinario, como un huracán, en cuestión de minutos, tras una rápida calibración para conectarse a los satélites que gestionan las coordenadas GPS, el UAV puede inspeccionar un tejado para identificar tejas faltantes (Figura 2.6-10).

Otra aplicación tremendamente útil es la inspección de estructuras afectadas, con el fin de valorar su estabilidad antes de que los técnicos entren a trabajar. Por ejemplo, tras un terremoto, la posibilidad de observar el interior de un edificio antes de físicamente entrar en él, puede ser crucial.



Figura 2.6-10 Imagen de un tejado en Ithaca (NY) tomada con una GoPro Hero3+ montada en un DJI Phantom cuadricóptero, para evaluar los daños provocados por un tornado (J. Haun).

Otra aplicación especialmente interesante para patrimonio construido, es la posibilidad que ofrecen muchos drones de pre-programar el vuelo, introduciendo en su software las coordenadas GPS de su recorrido. Esto ofrece la posibilidad de hacer el mismo vuelo de forma periódica, independientemente del piloto o el equipo a cargo del patrimonio; esta aplicación constituye una herramienta de documentación y conservación del patrimonio construido.

Una de las principales aplicaciones es la de realizar modelos 3D del volumen del edificio en combinación con técnicas de fotogrametría. Si bien los UAV proveen el medio para capturar las imágenes desde el aire, es el software que transforma esas imágenes 2D en modelos 3D y la capacidad de fusionarlos con otros escáneres, lo que convierte a la combinación en una tecnología revolucionaria. La técnica utiliza SfM (del inglés *Structure for Motion*) para hacer un primer modelo básico 3D a partir de fotografías. SfM es un método para obtener modelos 3D a partir de la superposición de fotografías 2D (Apartado 2.3.2 de esta tesis). La resolución de los modelos 3D SfM es, en la actualidad, menor que la de un escáner laser, si bien es mucho más rápida, sencilla y más precisa que otros métodos convencionales de medición y representación. Existe la posibilidad de implementar los modelos SfM con escáneres laser para mejorar la calidad del volumen 3D; la combinación de ambas tecnologías permite contar con las ventajas de ambas. Además, SfM permite incluir en el modelo imágenes tomadas desde tierra, de mejor calidad que las tomadas desde el aire. Cuanto más cerca se encuentre la cámara de la zona a representar, mayor será el número de puntos de la nube, y por tanto mayor será la calidad del resultado. Esta tecnología permite preservar digitalmente el patrimonio construido y provee información objetiva para análisis y visualización en el futuro.



La utilización de UAV en combinación con cámaras y software SfM está siendo implementada en lo que se denomina la “Roofing industry” (Industria de los tejados) con el fin de obtener planos precisos del tejado para diferentes aplicaciones (restauración arquitectónica, instalaciones solares, medición de reparaciones, etc.). Una de las desventajas es que el sistema requiere aun mucha interacción humana y depende en gran medida de la calidad de las fotografías. Por ejemplo, edificios con árboles en las proximidades pueden ser difíciles de capturar debido a las sombras y a las zonas ocultas tras las ramas.

Existe una nueva y más precisa variación de esta aplicación, el lidar, que incorpora la tecnología láser y puede construir un modelo 3D instantáneamente. De esta manera las sombras ya no influyen en el modelo ya que el láser es capaz de escanear a través de las hojas (Gilett, 2015). Esta variación reduce el tiempo del técnico que genera el modelo.

Otra aplicación consiste en la utilización de drones en combinación con cámaras térmicas para detectar posibles restos arqueológicos bajo tierra ya que, según Adam Kaptocz, presidenta de la asociación Drone Adventures y arqueóloga, el material de que se componen los restos arqueológicos suele tener diferentes propiedades térmicas que el material de relleno que lo circunda (Hodson, 2014)

La mayor parte de los controladores de radio que utilizan los modelos apropiados para el patrimonio arquitectónico, operan con una frecuencia de 2,4 giga hertzios. Estas ondas no penetran bien en los materiales solidos por lo que los vuelos tienen que estar en la línea de visión (LOS). Esto implica que el piloto no puede perder de vista el UAV, con lo que no podrá introducirlo en zonas que queden fuera de su línea de visión. Dicha limitación es solucionable mejorando el sistema de control a un transmisor y receptor UHF de 433 mega hertzios (por aproximadamente \$400), cuya penetración de onda es mayor, y puede volar el UAV hasta 25 millas de distancia sin perder la señal. Cuando un piloto está volando más allá de su LOS, debe utilizar gafas de acceso remoto o monitor remoto, lo que se denomina *first person view* (FPV).

Otra limitación importante a considerar es el viento, ya que, a partir de determinados valores, en función del modelo de UAV, las vibraciones empeoran considerablemente la imagen y la conducción del aparato se complica. Otras condiciones atmosféricas, como la lluvia, pueden inhabilitar la mayoría de los modelos, que no son resistentes al agua.



ASTM Committee F38 en Unmanned Aircraft Systems es el comité de ASTM encargado de coordinar los estándares relativos al uso de UAV. Está compuesto por 130 miembros de 17 naciones y cubren principalmente formación y operaciones aéreas, ambas aplicables a las aplicaciones en el patrimonio arquitectónico.

## 2.6.1.5. VENTAJAS Y LIMITACIONES DEL USO DE UAS

---

### VENTAJAS

- En la mayor parte de los casos es más seguro que cualquier otro método.
- Es un método de acceso para inspección visual, fotogrametría, laser y termografía, generalmente más económico que otros métodos tales como sistemas industriales de acceso con cuerdas, andamios o plataformas elevadoras.
- Es uno de los métodos de aproximación al edificio en altura más medioambientalmente sostenible.
- Es rápido. La información registrada por un dron en pocas horas, puede tardar en recopilarse meses utilizando métodos tradicionales.
- Posibilidad de programar vuelos de manera que, registrando las coordenadas del vuelo, éste puede ser repetido periódicamente independientemente del piloto que opere el UAV.
- Existen modelos asequibles.

### INCONVENIENTES

- La legislación limita significativamente su uso. Las posibilidades de uso son más amplias que las aplicaciones permitidas.
- Hay ciertas limitaciones que imposibilitan o merman su utilización: viento y lluvia son las más importantes.

- La mayor parte de los modelos aptos para inspeccionar patrimonio arquitectónico, no puede volar en LOS si no se modifica la frecuencia del transmisor receptor.
- La autonomía que proporcionan las baterías de los modelos actuales suele rondar los 25 minutos, lo que no suele ser suficiente, requiriendo cambios de batería múltiples para un mismo trabajo.
- Dependiendo de la calidad que se requiera y de la aplicación, los equipos pueden llegar a costes elevados.

## 2.6.2. ACCESO CON SISTEMAS INDUSTRIALES DE CUERDAS (INDUSTRIAL ROPE ACCESS -IRA-)

---

*It is a well-established fact that rope access is not only faster and more cost efficient [for inspections], but overall it is actually safer, faster, less disruptive, more cost efficient and has minimal aesthetic architectural impact. IRATA/SPRAT statistics show that rope access is an extremely safe form of access, showing that in 2011 there was only 1 fatality in 5 million hours of work; the first fatality in over a decade.*

---

Emma Halsey (Halsey, 2013)

### 2.6.2.1. INTRODUCCIÓN

---

Gran parte del patrimonio arquitectónico existente estadounidense se construyó en altura (Figura 2.6-11, Figura 2.6-13). El primer rascacielos de la historia se construyó en Chicago en 1885, el Home Insurance Building. El sistema estructural de acero se convirtió en la estructura tipo a utilizar en los rascacielos posteriores. Once edificios estadounidenses han ostentado el título del “edificio más alto del mundo”. Nueve de ellos se encuentran en el barrio de Manhattan, en Nueva York, que tiene el *skyline* más alto del país.

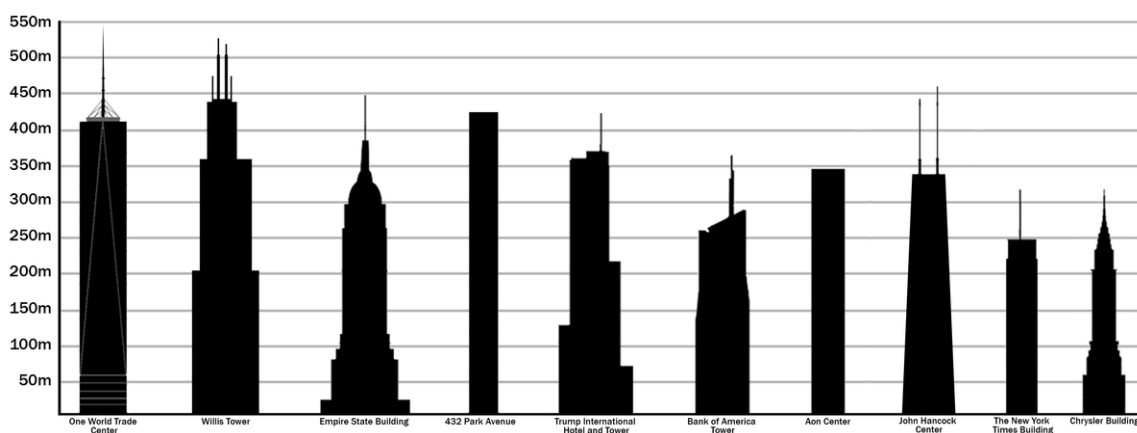


Figura 2.6-11 Gráfico de los edificios más altos de los Estados Unidos (Zifan, 2016).

La inspección regular de estos edificios es necesaria principalmente por motivos de seguridad pública. Algunas ciudades cuentan con legislación que obliga a los propietarios de los edificios a realizar una inspección por parte de un arquitecto o ingeniero que acredite su estado. Si se determina que el edificio supone un peligro para la seguridad pública, se instala una marquesina de protección hasta que las lesiones hayan sido subsanadas. En el caso de Nueva York, la ley se denomina Local Law 11 y obliga a inspeccionar la fachada de los edificios cada 6 años (ampliado en el apartado “1.2 Contexto. Estado del Arte”).

Ya sea para la inspección rutinaria obligatoria de fachadas, en inspecciones previas a la compra de un inversor o inspecciones previas a una intervención de restauración, la utilización de END es habitual y constituye una de las grandes aplicaciones de IRA en la restauración del patrimonio arquitectónico.

La instalación de andamios convencionales en estos edificios sería muy ineficiente en tiempo y en coste. Ante esta realidad, los métodos más utilizados para inspeccionar fachadas son los andamios colgados y los sistemas industriales de acceso con

Años record	EDIFICIO	CIUDAD	ALTURA (m)
1884-1890	Home Insurance Building	Chicago	42
1890-1894	New York World Building	Nueva York	94
1894-1895	Manhattan Life Insurance Building	Nueva York	100
1895-1899	Milwaukee City Hall	Milwaukee	108
1899-1908	Park Row Building	Nueva York	119
1901-1908	Philadelphia City Hall	Philadelphia	167
1908-1909	Singer Building	Nueva York	186
1909-1913	Metropolitan Life Tower	Nueva York	213
1913-1930	Woolworth Building	Nueva York	241
1930	Bank of Manhattan Trust Building	Nueva York	283
1930-1931	Chrysler Building	Nueva York	318
1931-1972	Empire State Building	Nueva York	381
1972-1974	World Trade Center	Nueva York	417
1974-1998	Sears Tower	Chicago	442

Figura 2.6-13 Listado de los edificios más altos del mundo desde 1884 hasta 1998. Todos ellos se encuentran en Estados Unidos.



Figura 2.6-12 En Estados Unidos, especialmente en ciudades como Chicago o Nueva York, gran parte del patrimonio construido corresponde a edificios de más de quince plantas. El acceso por medio de cuerdas facilita las inspecciones habituales de fachadas y la aplicación de END. La fotografía se tomó durante la inspección del Municipal Building en Manhattan, de McKim, Mead & White inaugurado en 1914 con 176 m de altura. Al fondo se observa en Woolworth Building, el edificio más alto del mundo desde 1913 a 1930, y otros de gran altura construidos en la misma época (K. Diebolt).

cuerdas, siendo este último el más respetuoso con el edificio, el más eficiente en tiempo, menos disruptivo y más flexible.



*Figura 2.6-14 La fotografía de la izquierda fue tomada durante la inspección, por medio de sistemas industriales de cuerdas, de 512 5<sup>th</sup> Avenue, en Manhattan. Arquitectos e ingenieros descenden, o son descendidos, a las zonas que necesitan evaluar. El edificio coronado en pirámide es Metropolitan Life Tower de Napoleon LeBrun & Sons, el edificio más alto del mundo de 1909 a 1913. La fotografía de la derecha se tomó durante la inspección, con acceso mediante sistemas industriales de cuerdas, de los ornamentos de piedra tallada del reloj. Acceder a esas áreas de la fachada con andamios convencionales, costaría millones de dólares, lo que imposibilitaría las investigaciones de END en muchos de los proyectos (K. Olson).*

## 2.6.2.2. FUNCIONAMIENTO

---

“Acceso mediante sistemas industriales de cuerdas” se refiere al conjunto de técnicas en las que las cuerdas, en combinación con dispositivos especiales, constituyen el medio principal de desplazamiento y soporte de los usuarios. El sistema es siempre redundante, con una línea/cuerda como soporte principal/de trabajo y la segunda de seguridad.

Todo lo que el técnico necesita para acceder a cualquier punto de la fachada es un arnés, dos cuerdas que lleguen al punto de interés y los dispositivos manuales que permiten desplazarse en sentido ascendente o descendente por las cuerdas. Ambas líneas han de anclarse a sistemas estructurales diferentes, por ejemplo, una columna y la base de un depósito de agua, a no ser que sólo exista un sistema estructural, pero éste sea suficientemente estable (Figura 2.6-12). Dichos anclajes normalmente se materializan rodeando el elemento estructural.



### Equipamiento del sistema de cuerdas:

- Anclajes: Los anclajes se realizan con cuerdas estáticas de nylon de diámetro de  $\frac{1}{2}$ " (12,5 mm), terminadas en bucles metálicos. La cuerda se protege con una camisa doble de nylon proporcionando una triple protección frente a abrasiones. Cada cuerda cuenta con un anclaje individual. A ser posible, dos miembros estructurales diferentes serán rodeados para cada técnico, un anclaje corresponderá a la línea de trabajo y el segundo anclaje a la línea de seguridad. Los conectores de los anclajes y de todo el sistema, son mosquetones de acero con resistencia de rotura es superior a 6.000 libras (27 kN).

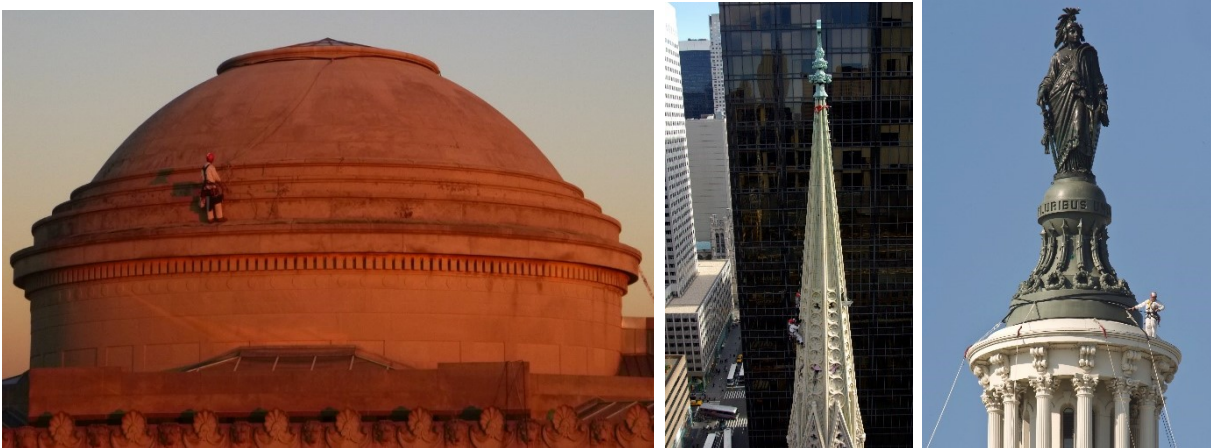


Figura 2.6-16 Diferentes ejemplos de anclajes rodeando un único elemento arquitectónico (capaz de soportar más de 10.000 libras). La fotografía de la izquierda corresponde a la cúpula de Guastavino del Museo de Brooklyn; la imagen del centro fue tomada durante una inspección del estado de la piedra en las agujas de la catedral de Saint Patrick, en la Quinta avenida de Manhattan. La fotografía de la derecha se tomó durante la inspección del ayuntamiento de Filadelfia. (V.A. LLC)

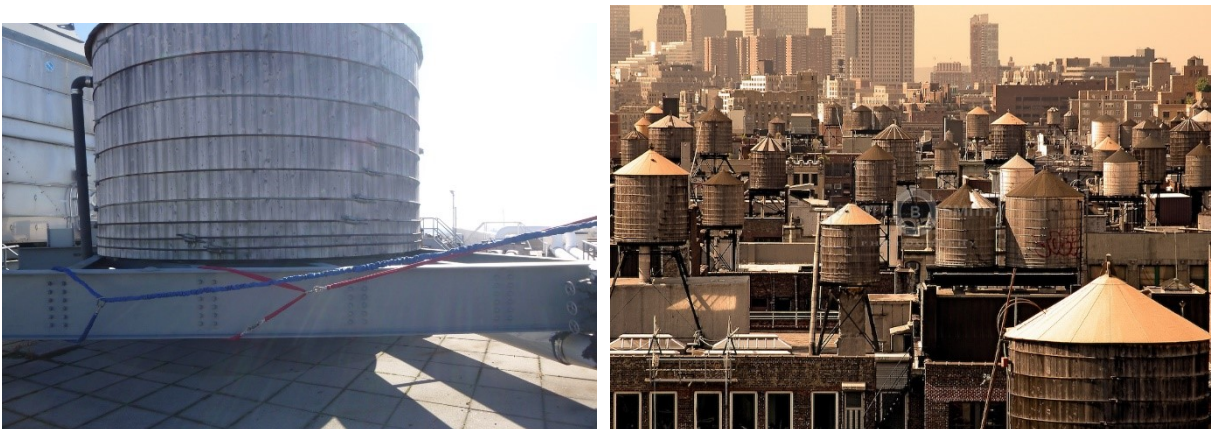


Figura 2.6-16 Un anclaje habitual consiste en rodear los diferentes elementos estructurales de la base de los depósitos de agua, que tienen la mayor parte de los edificios. La fotografía de la derecha muestra la abundancia de depósitos que facilitan el anclaje de los sistemas industriales de acceso mediante cuerdas, para acometer END (Scott B. Smith).

- **Cuerda de trabajo y de seguridad:** Ambas cuerdas son de nylon, tienen un diámetro de 7/16" (11 mm), son estáticas tipo Kernmantle con una resistencia mínima de rotura de 6.000 libras (27 kN) y una carga de trabajo habitual de 700 libras. La resistencia de este tipo de cuerdas la proporciona el centro (*Kern*) construido con mechones entrelazados continuos de nylon. La camisa (*mantle*) está diseñada para proteger el centro de daños por abrasión. Todas las cuerdas se protegen en los bordes de elementos estructurales con los que entran en contacto. Dicha protección consiste en piezas de lienzo o nylon con velcro. No debe de cargarse ninguna línea con más de 250 libras de peso.
- **Cuerdas dinámicas:** se utilizan únicamente si el proyecto de acceso requiere emplear técnicas de escalada en las que el técnico lidera la ascensión.

Equipo de protección personal en un sistema industrial de acceso mediante cuerdas:

- **Arnés:** Especialmente diseñados para esta aplicación, combina las facetas de protección contra caídas y posición de trabajo.
- **Descensor:** permite al técnico deslizarse por la cuerda en dirección descendente; los más utilizados son los de la marca Petzl, denominados I'D. Se puede bloquear en posición de trabajo y dispone de un dispositivo anti pánico.
- **Ascensor:** se utilizan para ascender por la cuerda de trabajo y consta de dos piezas, el bloqueador de pecho y el pedal.
- **Dispositivos de protección en la caída:** se colocan en la cuerda de seguridad y únicamente entran en funcionamiento si el sistema de acceso de la cuerda de trabajo falla. El aceptado por SPRAT es el ASAP.
- **Cascos especiales para IRA.** Deben cumplir el estándar ANSI Z89, que entre otros aspectos, especifican que deben poderse fijar a la cabeza.

Todo lo que vaya a ser utilizado desde, por ejemplo, un lápiz a un escáner laser, debe estar sujeto mediante cordeles al técnico o a algún punto del sistema industrial de cuerdas.



Figura 2.6-17 El inspector de la imagen se dispone a utilizar un sistema industrial de acceso mediante cuerdas para acceder a las ventanas de la planta 84 a la 86 del Empire State Building, para evaluar el estado del encuentro de las mismas con la fachadas, mediante la técnica de END de termografía. Todo lo que el técnico necesita es el arnés, dos cuerdas (y sus respectivos anclajes), ascensor y descensor.

Todos los elementos del sistema de cuerdas y los métodos utilizados, deben inspeccionarse diariamente y guardar los registros *in situ*; además, deben cumplir las directrices de la *Occupational Safety and Health Administration* (OSHA)<sup>45</sup> y los estándares y recomendaciones fijadas en el documento de la *Society of Professional Rope Access Technicians* (SPRAT) denominado *Safe Practices for Rope Access Work*.

Los técnicos deben tener una certificación expedida por una de las dos organizaciones reconocidas: *Society of Professional Rope Access Technicians* (SPRAT)<sup>46</sup> o la *International Rope Access Trade Association* (IRATA)<sup>47</sup>.

En el apéndice 9.2.5 de la presente tesis se incluye un documento en PDF con las hojas técnicas de todos los dispositivos que pueden utilizarse en un sistema industrial de acceso mediante cuerdas.

<sup>45</sup> <https://www.osha.gov/>

<sup>46</sup> <https://sprat.org/cert/>

<sup>47</sup> [http://www.irata.org/training\\_certification\\_scheme.php](http://www.irata.org/training_certification_scheme.php)



## 2.6.2.3. END QUE PUEDE EJECUTARSE CON IRA

En Estados Unidos, por los motivos descritos anteriormente, es común aplicar END accediendo a determinadas partes del edificio mediante sistemas industriales de cuerdas. La condición para poder utilizar una técnica es que el equipo sea manejable por una persona y que su ejecución no requiera apoyarse en la pared vertical.

Las diferentes técnicas que habitualmente se aplican desde un sistema de acceso mediante cuerdas son:

- Ultrasonidos
- Test de percusión con martillos.
- GPR
- Termografía, aunque está limitada a pequeñas áreas, ya que normalmente no se dispone del suficiente campo de visión.
- Boroscopio
- TPAS
- Detección de metales



*Figura 2.6-18 Ayuntamiento de Búfalo. El objetivo de la investigación con END era localizar los anclajes metálicos para determinar su estado, en función del resto de patologías encontradas en la decoración Art Déco de terracota y el aplacado de piedra caliza. La duración del proyecto fue de cuatro días para cuatro arquitectos. Su coste aproximado fue de \$30.000. Este mismo proyecto utilizando como medio de acceso un andamio tradicional, hubiera costado millones de dólares y durado meses. La flecha amarilla señala al técnico realizando la evaluación (V.A. LLC).*

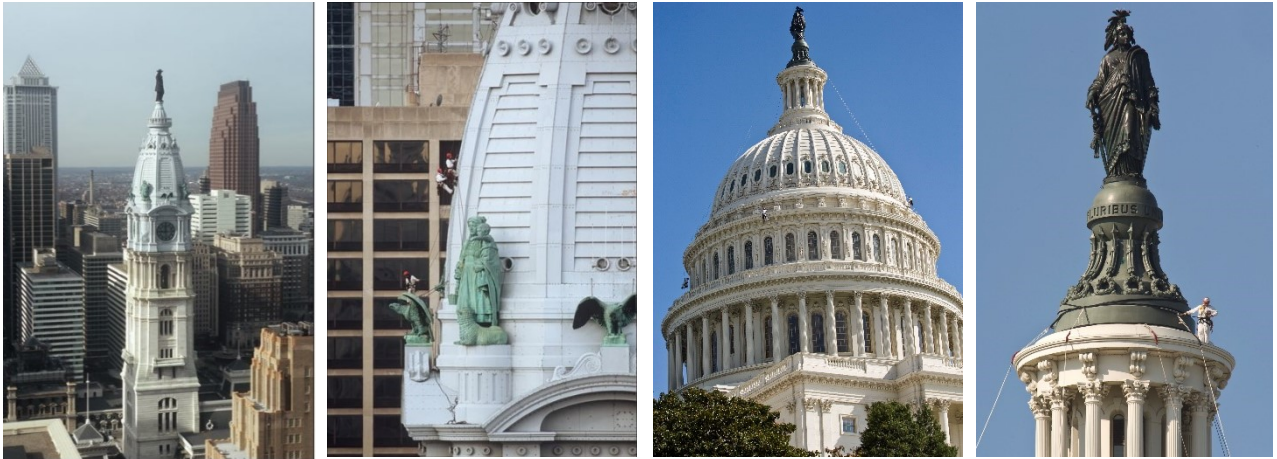


Figura 2.6-20 Las dos fotografías de la izquierda corresponden a una inspección de las estatuas de bronce del ayuntamiento de Philadelphia; la superior es la estatua más alta del mundo situada en un edificio. Las fotografías de la derecha corresponden a una inspección de los ornamentos de acero colado de la cúpula del Capitolio de Washington. En ambos casos, se realizaron evaluaciones utilizando TPAS (V.A. LLC)



Figura 2.6-20 La fotografía de la izquierda corresponde a una inspección de las bóvedas de Guastavino por el intradós en la iglesia de St. Thomas en Manhattan; se realizó test de percusión con ladrillo e instalación de monitores de grietas. La foto central se tomó durante una inspección consistente en mapear los elementos metálicos desde el trasdós de la bóveda principal, de Guastavino, en la iglesia de St. Francis the Sales en Philadelphia. En la tercera imagen se observa a un arquitecto suspendido de un sistema industrial de cuerdas en el interior de Grants Tomb en Manhattan; durante la inspección se utilizaron boroscopios, termografía, instalación de monitores de grietas y TPAS (V.A. LLC)

## 2.6.2.4. VENTAJAS Y LIMITACIONES DE IRA PARA END

### VENTAJAS

- Es más rápido de instalar que cualquier otro sistema de acceso.
- Debido a la flexibilidad y eficiencia del sistema, las inspecciones llevadas a cabo con IRA necesitan menos tiempo que el resto de los sistemas de acceso.



- Es un sistema muy seguro. En 2014 sólo 6 accidentes resultaron en bajas mayores a 7 días o muertes de un total de 12.369 técnicos con certificado IRATA (en 12 países diferentes) (IRATA, 2014)
- En la mayor parte de los casos, es el sistema más económico.
- El impacto visual es mínimo durante la inspección y nulo entre jornadas.
- Mediante diferentes sistemas de cuerdas es posible acceder a casi cualquier zona del edificio.
- Si no se dispone del certificado pertinente para utilizar el sistema de cuerdas de manera independiente, el arquitecto o ingeniero puede utilizarlo operado por personal especializado nivel III, acreditado por SPRAT o IRATA y así acceder a cualquier zona de interés.

## LIMITACIONES

- Las técnicas que requieren apoyarse en la fachada pueden ser difíciles o imposibles de realizar desde un sistema de cuerdas; por ejemplo, la técnica del impacto-eco, al tener que presionar el transductor receptor hacia el edificio, es complicada de ejecutar desde cuerdas en superficies verticales.
- Hay ciertas técnicas que requieren cierta distancia del elemento arquitectónico para conseguir el campo de visión suficiente para poder ser ejecutadas. Por ejemplo, la termografía, la fotogrametría o los escáneres laser, suelen ser tres técnicas difíciles o imposibles de ejecutar desde un sistema industrial de cuerdas. En el caso del escáner laser, además, la mayor parte de los equipos requieren una estabilidad difícil de conseguir en un sistema de este tipo.
- Ciertos métodos que requieren ser ejecutados en un mismo test, pueden ser no factibles, especialmente si la dirección del test es horizontal. Por ejemplo, un escáner de GPR, si por el objetivo a detectar, requiere escaneos horizontales de más de 10 m, será necesario, o bien dividirlo en varios tests más cortos (lo que implicará un replanteo muy preciso) o instalar un sistema de varios técnicos que puedan pasarse el equipo mientras escanea. En este caso, habrá que adaptar el equipo y la toma de datos ya que la velocidad del escáner no será homogénea.

- Para poder utilizar en sistema con independencia, es necesario disponer de un certificado expedido por SPRAT o IRATA que se ha de renovar cada tres años.

# 3. CASOS DE ESTUDIO

## 3.1. CASO DE ESTUDIO: EDIFICIO DE LA CONFEDERACIÓN

MEND: TPAS + IMPULSO-ECO + IRA

### LOCALIZACIÓN

El edificio institucional de La Confederación es el más alto de la ciudad de St. John, en Canadá.

### DESCRIPCIÓN DEL EDIFICIO Y ANTECEDENTES

Construido entre 1959 y 1960, se trata de un edificio con una torre de once pisos de altura y alas de tres a cinco pisos, que proyectan al suroeste, noroeste y noreste. La torre, rectangular en planta, está recubierta de ladrillo y aplacado de piedra caliza, rematada por un tejado de lámina metálica con linterna. La estructura del edificio es estructura metálica. La piedra caliza proviene de la cantera de St. Marc de Quebec. En la torre se encuentra la piedra en forma de aplacado de cuatro pulgadas de espesor (10,16 cm), cogido a la estructura con garras metálicas. Las juntas entre placas están rellenas de un sellante de uretano gris muy deteriorado.

Debido a la caída de lajas de piedra, algunos ejemplares habían sido retirados de la fachada sur para su estudio, comprobándose que algunas de las piezas presentaban la lesión de delaminación invisible, consistente en la separación del material en planos paralelos a la superficie de la piedra. Esta lesión, era completamente invisible desde el exterior, haciéndose patente en el momento de la caída del material comprendido entre la superficie y la delaminación, sin previo aviso, con el consiguiente peligro público. Esta lesión hacía necesaria e inminente la restauración de la torre. Con el fin de redactar el proyecto de restauración, se encargó una investigación del estado del aplacado de piedra caliza, investigación que se expone a continuación.



Figura 3.1-1 Vista general del edificio Confederación (D. Shorrock)

## OBJETIVOS DE LA EVALUACIÓN

El alcance de la investigación incluía una inspección próxima de cada una de las losas de piedra caliza en la fachada, a través de una inspección visual y por percusión, por medio del tapeado con diferentes martillos manuales, así como la documentación de las condiciones existentes por análisis visual computarizado. El objetivo principal de la investigación era la detección de delaminaciones invisibles en las losas de piedra caliza y, en la medida de lo posible, establecer las causas que propiciaban la existencia de esta lesión.

El segundo objetivo de la investigación era el desarrollo de un protocolo de evaluación no destructiva, que permitiera discernir qué unidades de piedra presentaban delaminación oculta; se utilizó un transductor ultrasónico para registrar la llegada de la onda elástica generada en el impacto de un martillo contra la piedra.

## INVESTIGACIÓN IN SITU

En general, la piedra caliza de la torre parecía estar en buen estado, en base a la observación visual. Se detectaron pequeños desconchados, fisuras y grietas finas y algunos desplazamientos ligeros. Cada una de las 1.050 placas de piedra fue sometida al test de percusión con martillo con el fin de identificar las que presentaban delaminación invisible. Para ello, se utilizaron dos martillos, uno acrílico de 453 gramos (16 onzas) y otro metálico de 141 gramos (5 onzas). 39 de las 1.050 placas de caliza resultaron posibles casos patológicos, basándose en dicha técnica. Esto representa una proporción de 3,7% del total de unidades. Las unidades de las enjutas y las jambas presentan los planos de estratificación paralelos a la pared. Basándose en las unidades previamente retiradas de la torre, la delaminación parecía originarse en el corte de los bordes superior o inferior alrededor de la mitad del espesor de las piezas de cuatro pulgadas de espesor total (10,16 cm).

De las 39 piezas detectadas mediante percusión con martillo, trece pertenecían a la fachada sur, dos a la norte, diez a la oeste y catorce a la este. El relativo pequeño número de piezas en la fachada norte puede deberse a que dicha fachada, ligeramente encarada al oeste, es la que menor lluvia racheada y exposición medioambiental recibe, con respecto a las otras tres fachadas. Veintiocho de las piezas detectadas pertenecían a unidades de las enjutas y once a las jambas de las ventanas.

Tras el análisis visual computarizado, se llevó a cabo la investigación acústica de cada piedra teniendo en cuenta diferentes factores derivados de los principios de emisión acústica y la técnica de impulso-eco con el fin de determinar el método más apropiado en este caso.

Para el test de impulso-eco (test adaptado), se utilizó un programa informático personalizado capaz de transformar el dominio tiempo al dominio frecuencia. El resultado permite analizar el contenido de frecuencia de la respuesta acústica de la piedra.

El equipo utilizado para el estudio de impulso eco constó de: Una tarjeta de datos de la casa National Instruments (NI), una unidad central personalizada, un transductor piezoeléctrico de la casa ANDEC, un ordenador portátil con software de la casa NI y el programa MATLAB personalizado para el análisis y procesamiento de las ondas.

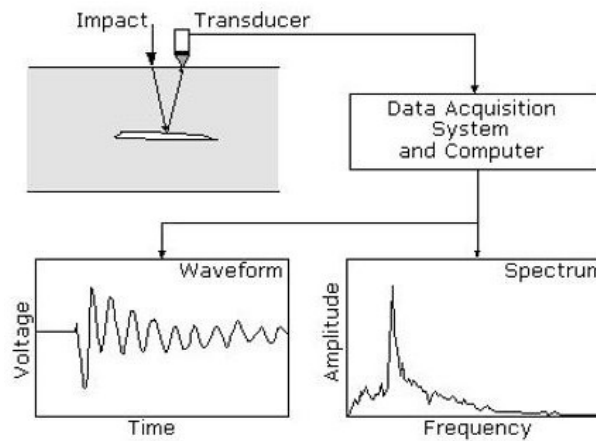


Figura 3.1-2 Esquema de toma y procesado de datos, de dominio tiempo a dominio frecuencia (Streeter, 2011).

### CALIBRACIÓN

Con el fin de encontrar patrones de reconocimiento de lesiones, el primer paso de la investigación con impulso-eco fue calibrar el sistema. Para ello, se utilizaron algunas de las piedras que habían sido retiradas de la fachada oeste. Para el proceso de calibración, se utilizaron tanto piedras en buen estado como piedras que presentaban delaminación oculta, con el fin de averiguar la profundidad optima aproximada de estudio para ajustar la frecuencia, así como obtener los perfiles en dominio frecuencia-amplitud para poder comparar resultados. El hecho de que las condiciones de los bordes de las piezas de calibración no fueran las mismas que las piezas colocadas no influyó en el proceso de calibración, dado que tanto el espesor de las placas como la forma y el material eran idénticos.



Figura 3.1-3 Delaminación tipo en una de las piezas utilizadas para la calibración del equipo.

El cálculo de la velocidad de la onda acústica en la piedra también se realizó en el proceso de calibración, con las losas que habían sido retiradas de la fachada.

Ecuación 3.1-1

$$d = v \cdot \frac{1}{2f}$$

Siendo,

d, la profundidad de la reflexión en metros (m).

v, la velocidad de la onda en el material en estudio, en metros por segundo (m/s).

f, el valor del pico de frecuencia, en hercios (Hz).

Aplicando la Ecuación 3.1-1 para el cálculo de la velocidad en las losas utilizadas para la calibración:



$V=2fd$ , donde  $f=34.600$  Hz (el pico primario registrado),  $d=2$  pulgadas (0,1126157 m), con lo que  $v=3.515$  m/s

Este valor está comprendido dentro del rango de la velocidad en hormigón (de 3.000 a 4.500 m/s).

Cuanto más tenue sea el pico de frecuencia, más alejado de la superficie está la anomalía causante de la reflexión. El corte de anclaje de estas losas está a aproximadamente la mitad de la losa, a unas dos pulgadas (5,08 cm) de la superficie, que corresponde a la zona de 34,650 Hz de frecuencia. Calculando el área de frecuencias en el rango de 34 KHz a 36 KHz, es posible filtrar los datos en búsqueda de espectros con altos valores de área dentro de ese rango, para localizar unidades con desplazación oculta. A mayor área, mayor probabilidad de existencia de la anomalía.

En la Figura 3.1-4 se muestran los perfiles de cuatro tests, dos en unidades sanas, y dos en unidades con delaminación oculta. Las trazas verde y azul oscuro corresponden a las señales registradas por el transductor en las muestras de calibración sanas, mientras que las trazas azul claro y rojo pertenecen a muestras con delaminación oculta. Las trazas de muestras sanas presentan una cresta que corresponde a la reflexión de la onda en la parte trasera de la pieza, sin interferencia alguna. Contrariamente, las dos trazas de muestras defectuosas presentan una doble cresta inicial correspondiente a la energía reflejada en ambas superficies de la delaminación; una tercera llegada, a los 3,3 milisegundos, corresponde a la reflexión en la cara posterior de la losa de piedra. Obsérvese que la reflexión de la cara posterior tarda en llegar el doble en las piezas deterioradas que en las piezas sanas, cumpliéndose el principio de la técnica de ultrasonidos, de que a menor velocidad en un mismo material, menor resistencia del mismo.

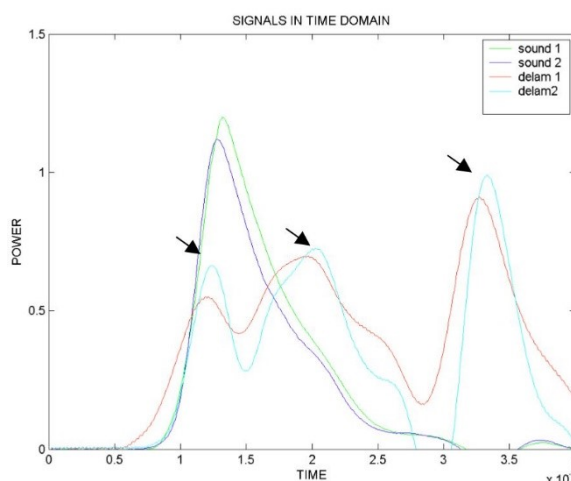


Figura 3.1-4 Grafico de la representación de la señal en dominio tiempo en el proceso de calibración. Las trazas verde y azul oscuro corresponden a piezas sanas y las trazas roja y celeste corresponden a piezas con delaminación invisible.

#### PROCESADO DE LA SEÑAL

Para cada piedra se tomaron al menos 6 mediciones, con el fin de calcular una media de todas ellas para reducir el efecto de información anómala. Los valores claramente erróneos por encontrarse lejos de las tablas de valores habituales tras la calibración, fueron excluidos del cálculo de la media.

Cuando el transductor ultrasónico recibe la señal, ésta se registra en el dominio tiempo. Los gráficos generados tiempo-intensidad permiten, mediante comparación con los gráficos de calibración, ser interpretados comparando las formas de las curvas con el conocimiento previo de su forma y tamaño con la presencia o ausencia de delaminaciones.

El análisis numérico más común en dominio tiempo, es a través del cálculo de la velocidad de la onda, si bien en este caso no se consideró apropiado, al tratarse de piezas de cuatro pulgadas de espesor (10,16 cm); la precisión para tan poca profundidad puede no ser aceptable en este caso, motivo por el cual se decidió analizar la información transformando los gráficos en dominio tiempo a dominio frecuencia.

Con el fin de investigar el contenido de frecuencia de las diferentes ondas registradas, se aplicó una función matemática que transforma los gráficos de dominio tiempo a dominio frecuencia. Para representar la intensidad para diferentes frecuencias de una determinada onda se utiliza el Power Spectrum Density (PSD).

En la Figura 3.1-5 puede observarse el espectro convertido de dominio tiempo a dominio frecuencia. Obsérvese el pico de potencia en los espectros correspondientes a piezas con delaminación interna.

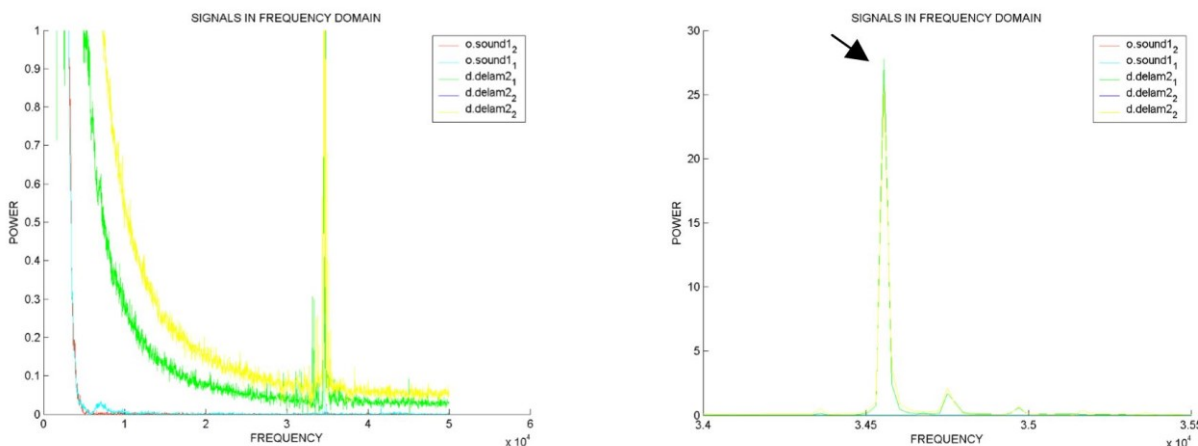


Figura 3.1-5 Espectro en dominio frecuencia de las muestras de calibración. Las trazas celeste y rojas corresponden a piezas sanas mientras que las verde y amarilla corresponden a piezas con delaminación invisible. El gráfico de la derecha corresponde a las trazas del gráfico de la izquierda aislando y escalando el rango de frecuencia de interés (34-35,5 KHz).

Posteriormente, los valores de frecuencia fueron escalados en los gráficos, aislando el rango de frecuencia de interés (en este caso de 34-35 kHz) con el fin de adaptar la escala a un formato manejable. Por tanto, la representación observada en los diferentes gráficos resultantes, es relativa en el dominio frecuencia.

Calibration type	Centroid (e+4 kHz)	Area between 34kHz and 36kHz (e-5 V <sup>2</sup> )
Sound	3.41	7.32
Delaminated	4.37	970

Figura 3.1-6 La tabla muestra los valores medios y en el rango de frecuencia en estudio (34-36 kHz) en el proceso de calibración para piezas sanas y piezas con delaminación invisible.

## RESULTADOS

El test acústico de percusión con martillo dio como resultado que 39 de las 1.050 placas de caliza resultaron posibles casos patológicos basándose en el sonido y vibración percibidos por los técnicos.

El test de impulso-eco fue realizado en dos de las áreas más afectadas por delaminación invisible en base al test de percusión con martillo. Un total de catorce unidades fueron testeadas, resultando en trece resultados válidos. Se detectó delaminación en un 23% de los casos. En el extremo sur de la fachada este, dos de las seis unidades del antepecho testeadas, se identificaron dos con delaminación invisible. Una de las unidades coincidía con el test del martillo, mientras que la segunda unidad identificada, en la tercera hilada debajo de la piedra de remate, no había sido identificada con el test del martillo. Otras dos piezas se identificaron como posibles fisuras internas o venas, no llegando a ser consideradas delaminación invisible. En el extremo oeste de la fachada sur, se aplicó impulso-eco a ocho unidades, dos en el antepecho y seis en las enjutas; una de las unidades de las enjutas dio positivo a delaminación, no habiendo dado positivo en el test percusión y tres dieron positivo a venas y fisuras internas.

La discrepancia entre el porcentaje de casos detectados, utilizando el test de percusión con martillo o impulso-eco, 3,7% y 23% respectivamente, se debe al hecho de que la investigación de impulso-eco se realizó en aquellas zonas en las que mayor proporción de casos existían en base al test de percusión con martillo. El estudio de una mayor área con impacto-eco sería deseable para comparar porcentajes totales. También es posible que la técnica de tapeado de martillo diese negativos falsos.

La Figura 3.1-7 muestra los resultados de la toma de datos para cada una de las 14 unidades ensayadas. Como puede observarse, aislando y analizando el rango de frecuencia 34-36 kHz es fácil observar qué lecturas salen del patrón reconocido como piedras sanas en el proceso de calibración.

El resultado indica que tres de las catorce placas presentan delaminación oculta: 2, 3 y 13. La comparación de la traza en dominio tiempo, la frecuencia pico y el área del espectro en el rango de delaminación indican la existencia de una anomalía del tipo de delaminación.

Sample Number	Centroid (e+4 kHz)	Area between 34kHz and 36kHz (e-5 V <sup>2</sup> )
1	4.02	2.89
<b>2</b>	<b>4.32</b>	<b>64.29</b>
3	4.07	2.33
4	4.01	1.95
<b>5</b>	<b>4.25</b>	<b>44.71</b>
6	3.14	2.37
7	3.73	1.42
8	4.03	2.76
9	4.11	3.33
10	4.06	4.27
11	4.28	1.827
12	4.29	2.27
<b>13</b>	<b>4.36</b>	<b>10.69</b>
14	Signal error: inconclusive	Signal error: inconclusive

Figura 3.1-7 La tabla muestra los valores medios y en el rango de frecuencia en estudio (34-36 kHz) de las diferentes muestras ensayadas. Los valores fuera de lo común, atribuidos a posibles delaminaciones invisibles, se representan en negrita.

Sólo una de las tres piezas identificadas con claro resultado de delaminación invisible con impulso-eco fue detectada con percusión de martillo, lo cual sugiere que, en este caso, el test por percusión parece no ser una técnica suficientemente apropiada para detectar

delaminación invisible, ya que de ser real la proporción de casos detectados por impulso-eco, el número total de piezas afectadas sería de 225 versus las 39 identificadas con el test de percusión con martillo.

La conclusión es que esta aplicación de la técnica no destructiva del impulso-eco, parece apta para este caso gracias a la posibilidad de realizar un calibrado preciso al disponerse de unidades sanas y defectuosas. Para cerciorarse de su idoneidad sería necesaria, bien la aplicación de otras TEND que corroboraran los resultados, bien de catas destructivas que los confirmasen. Sería aconsejable ampliar el tamaño del muestreo para poder hacer una comparación más real con los resultados obtenidos del test de tapeo de martillo.

## 3.2. CASO DE ESTUDIO: GRANTS TOMB

MEND: TPAS + DETECTOR DE METALES + BOROSCOPIO

### LOCALIZACIÓN

El edificio se encuentra situado exento en un jardín en la calle W 122 & Riverside Drive en Manhattan, New York, NY 10027.

### DESCRIPCIÓN DEL EDIFICIO Y ANTECEDENTES

Se trata de un mausoleo que contiene los restos del general y 18° presidente de los Estados Unidos (dos legislaturas 1869-1877) Ulysses S. Grant y su mujer, Julia Dent Grant. Tras la muerte del general en 1885, se formó la comisión Grant Monument Association, que patrocinó la competición arquitectónica en 1888 para el diseño del memorial a Grant; la ganó el arquitecto neoyorquino John Duncan.

El monumento, construido entre 1881 y 1897, responde al estilo neoclásico de orden dórico y está inspirado en el Mausoleo de Halicarnaso (Bordum, Turquía). En el exterior, la estructura consiste en una base cuadrada coronada por una cúpula cónica sobre un alto tambor con columnas, todo ello de granito. A la entrada principal, situada al sur, le antecede una plaza ancha, con escalones que llevan a un pórtico que cubre las monumentales puertas de bronce. En el interior, tanto la planta calle como el sótano están cubiertos de mármol. Existe una apertura en forma de óculo en el forjado entre la planta calle y el sótano que permite la visión directa de los sarcófagos. Las áreas superiores del interior, incluyendo las cuatro bóvedas de cañón, que apuntan a los cuatro puntos cardinales en la base del monumento, las pechinas que transicionan hacia la cúpula principal y ésta misma, están recubiertas de yeso ornamentado. Si bien Duncan estipuló que dicho recubrimiento fuera “escayola refinada y cemento Keene”, todo indica que se trata de yeso (Jacob, 1996).



Figura 3.2-1 Vista general exterior del monumento

El 23 de agosto del 2011, un movimiento sísmico de 5,8 grados en la escala de Richter, con epicentro a 340 millas de NYC, en Virginia, sacudió la costa este de US. Ese fue el motivo por el que los responsables de los diferentes monumentos estatales y nacionales decidieron llevar a cabo inspecciones visuales en numerosos de ellos. En una de esas inspecciones se



descubrieron varios cuadros de grietas, en las pilastras interiores del tambor de la cúpula central de este monumento. Se desconocía si estas grietas existían con anterioridad al movimiento sísmico de 2011.

## OBJETIVOS DE LA EVALUACIÓN

El objetivo de la END consistía en evaluar el estado actual de las pilastras de la cúpula central e investigar la causa de los múltiples patrones de grietas que éstas presentaban, así como determinar la estabilidad del recubrimiento de yeso.

## INVESTIGACIÓN *IN SITU*

Durante la planificación de la evaluación se consideró que, debido a la naturaleza de las lesiones a investigar, era necesario tener contacto directo con las grietas y sus inmediaciones, descartando de este modo, todos los medios de acceso remoto. Debido a la complicación y coste de instalar andamios, se estimó que el medio más apropiado era IRA.

Con el fin de instalar un sistema de cuerdas que los arquitectos pudieran escalar, se realizaron cuatro perforaciones en la cúpula. Al no existir visión directa ni conexión entre el espacio sobre la cúpula (bajo cubierta) y el intradós la cúpula, se utilizó termografía activa para determinar la posición idónea en la que realizar la perforación para las cuerdas. Éstas se anclarían a la estructura de cubierta situada en el espacio sobre la bóveda.

Una vez instalado el sistema de acceso, los técnicos escalaron las cuerdas para proceder a la inspección. El primer paso consistió en una inspección visual documentada con TPAS. Seguidamente se procedió al uso de un detector de metales en las pilastras para, en el caso de existir elementos metálicos, determinar si podían ser la causa de alguna de las lesiones. Finalmente se realizaron inspecciones visuales con el boroscopio aprovechando aperturas existentes en las grietas, en piezas desplazadas o en huecos dejados en la construcción del monumento.



*Figura 3.2-2 La imagen muestra un termograma dentro de una fotografía digital de la cúpula. El termograma es el resultado de aplicar termografía activa a través de una pistola de calor desde el trasdós, con el fin de relacionar la posición de los casetones de yeso vistos en el intradós, para averiguar dónde anclar las cuerdas para acceder al intradós y para proceder a la inspección desde el trasdós y el intradós.*



Figura 3.2-4 El acceso para poder tener contacto directo con las lesiones en estudio se realizó con IRA.



Figura 3.2-4 Técnico utilizando un dispositivo de detección de metales.



Figura 3.2-6 La fotografía muestra la lesión investigada, cuadros de grietas en las pilastras de la cúpula central, en la pilastra #6.



Figura 3.2-6 En la imagen, el técnico de la izquierda está realizando un test con boroscopia mientras que la de la derecha realiza una inspección visual documentada con TPAS.



La investigación demostró que, si bien todas las pilastras presentaban grietas en los paneles de yeso que las recubren, las cuatro más al norte presentaban un cuadro mucho más avanzado y severo, especialmente en la pilastra #6 (Figura 3.2-6). Se determinó que existía un patrón de grietas similar en todas las columnas, que iban desde media altura de la cara de la pilastra hacia el dintel entre pilastras, lo cual sugiere un problema sistemático y no una lesión puntual. Además, la inspección visual próxima determinó que la mayor parte de las grietas no tenían una antigüedad reciente (es decir, no eran fruto del terremoto de agosto del 2011).

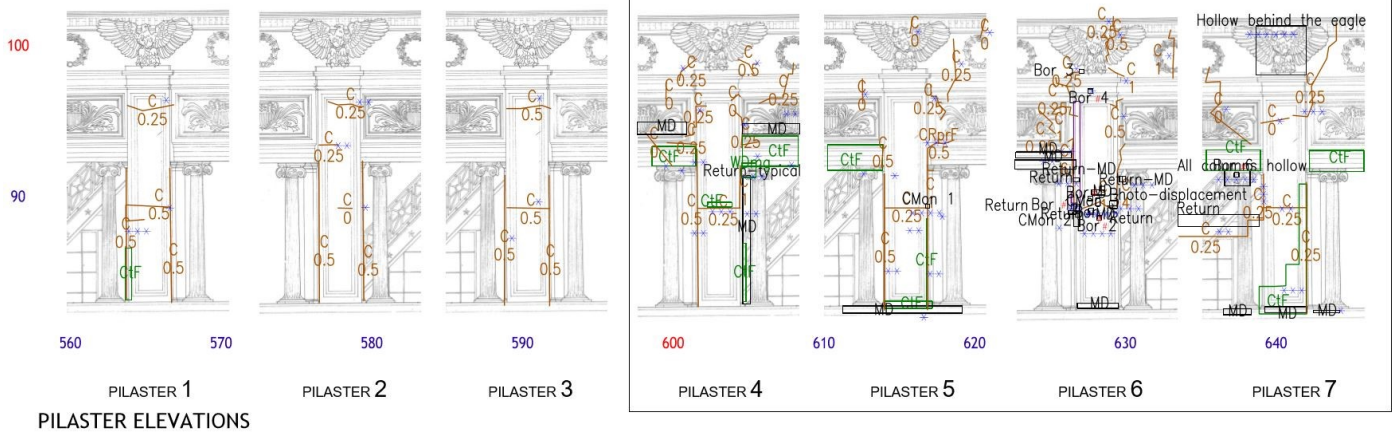


Figura 3.2-7 La figura muestra la nomenclatura de las pilastras, así como el plano TPAS donde claramente se observa un patrón en las grietas de las pilastras.

Además, gracias a los tests practicados con boroscopio, se pudo demostrar la existencia de una estructura de madera que conecta el recubrimiento de yeso con el soporte, consistente en una pilastra de ladrillo a una separación de aproximadamente 7,5 cm. Además, gracias a la investigación con boroscopio, también se pudo saber que había existido actividad animal entre los paneles de recubrimiento de yeso y la pilastra de ladrillo debido a la observación de la presencia de semillas, excrementos, y restos de lo que pueden ser nidos o madrigueras, especialmente severos en la pilastra #6. El estudio de la historia del edificio reveló que el monumento estuvo sometido a un estado de deterioro durante

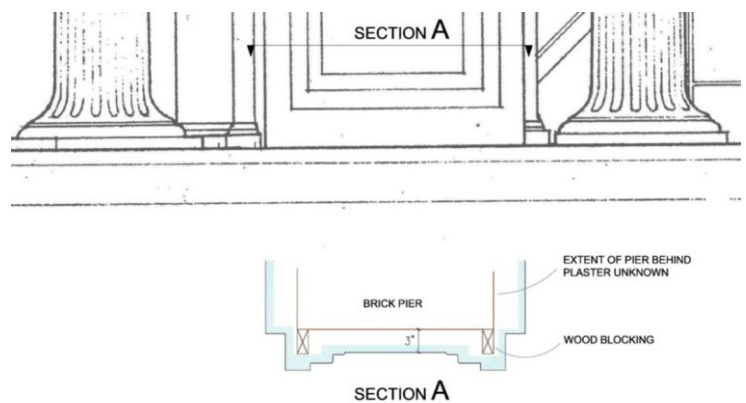


Figura 3.2-8 Composición interna de las pilastras determinada gracias a la investigación de END.

las décadas de los 70 y 80 del siglo XX, que incluía falta de cristales de cerramiento, lo cual explica los restos de dicha actividad animal.

La utilización del boroscopio también determinó la presencia de un dintel compuesto de un perfil metálico entre pilastras.

El dispositivo de detección de metales demostró que existían elementos metálicos en alguna zona, sin embargo, la localización no respondía a un patrón regular excepto en las bases de las pilastras. Se comprobó que la zona de grietas más severa (a mitad de altura de la pilastra), no presenta elementos metálicos de forma sistemática, sin embargo, en la pilastra #6 el dispositivo de detección de metales emitió señales débiles de presencia de elemento metálico. Se llegó a la conclusión de que correspondía a clavos de la estructura de madera que se descubrió entre el recubrimiento de yeso y la pilastra de ladrillo.

Se detectó un pedazo de yeso que presentaba pérdida de adherencia con el soporte y cierto movimiento, si bien se determinó que no suponía una situación de riesgo inminente.

Finalmente, dado el estado de las grietas se instaló un sistema de monitoreo y se recomendó que la inspección del monumento para evaluar la evolución del cuadro de lesiones en las pilastras, debía ser llevado a cabo con periodicidad anual.



Figura 3.2-9 Sistema de monitoreo de grietas instalado como parte de la evaluación.

## 3.3. CASO DE ESTUDIO: CÚPULA DE GUASTAVINO EN BROOKLYN

MEND: TPAS + IRT

### LOCALIZACIÓN

El edificio se encuentra situado en el barrio de Brooklyn en la ciudad de Nueva York.

### DESCRIPCIÓN DEL EDIFICIO Y ANTECEDENTES

La cúpula es el elemento arquitectónico central en un edificio diseñado por la firma de arquitectos McKim, Mead & White y construida entre 1893 y 1897. Se trata de una doble cúpula. El constructor y arquitecto de la cúpula exterior fue el español Rafael Guastavino Moreno; se compone de una cúpula tabicada de ladrillo que hace de encofrado perdido de la hoja exterior, de piedra caliza oolítica (presumiblemente de Indiana a juzgar por su color, textura e inclusiones).

### OBJETIVOS DE LA EVALUACIÓN

El objetivo de la END consistía en realizar una inspección visual próxima y documentada, para dotar al equipo del proyecto de restauración de información para la confección de los documentos de restauración. La inspección tenía además, como objetivo más concreto, determinar si existían filtraciones y de ser así, la cuantía, el estado y las causas.

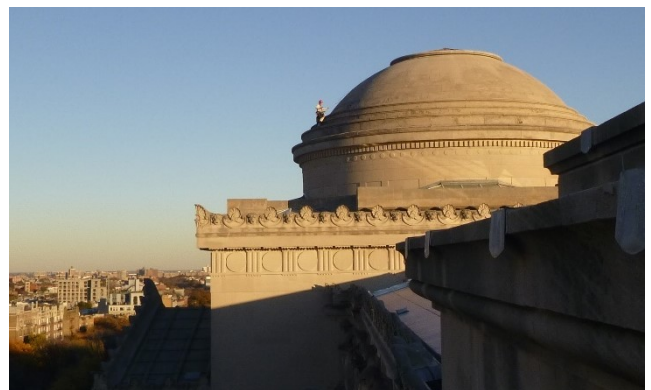


Figura 3.3-1 Vista general de la cúpula tabicada revestida con piedra.

### INVESTIGACIÓN IN SITU

En primer lugar, se procedió a una inspección de la cúpula de piedra por el exterior, documentando todo tipo de condiciones (reparaciones previas, grietas, fisuras, desplazamientos, estado de las juntas, faltantes, delaminaciones, etc.) con TPAS. Las principales lesiones encontradas fueron grietas en unidades y sistemas de grietas en unidades



y juntas. Algunas de las cuales ya habían sido reparadas con anterioridad. El posterior análisis de la documentación computarizada reveló un patrón de sistema de grietas horizontales en la base de la cúpula y otro patrón en la coronación de la cúpula.



*Figura 3.3-2 Lesiones comunes documentadas durante la inspección visual del exterior de la cúpula; grietas y fisuras horizontales al mismo nivel alrededor de la cúpula (a la izquierda), sistemas de grietas verticales previamente reparadas que han vuelto a abrir (centro) y mortero faltante o muy deteriorado en las juntas entre unidades de piedra (derecha).*

Una vez analizados los resultados de la investigación del exterior, combinados con los resultados de la investigación histórica pertinente, se planificó una inspección con termografía pasiva desde el interior. Para ello, se estableció como premisa que la investigación debía ser llevada a cabo tras un episodio de lluvia de, al menos, 2 pulgadas en 48 horas (5,08 cm). Además, la investigación debía ser llevada a cabo entre las 10 AM y las 11:30 AM, idealmente en un día soleado. Y, dado que la investigación ocurriría en invierno, la calefacción interior del edificio debía conectarse diez minutos antes del inicio de la inspección.

## RESULTADOS

El análisis de la investigación documentada en el exterior proporcionó información para clasificar las lesiones que afectaban la estabilidad estructural de la cúpula en tres categorías: grietas horizontales en la base de la cúpula, sistemas verticales de grietas a diferentes alturas, falta de mortero o mortero deteriorado en las juntas entre unidades de piedra.

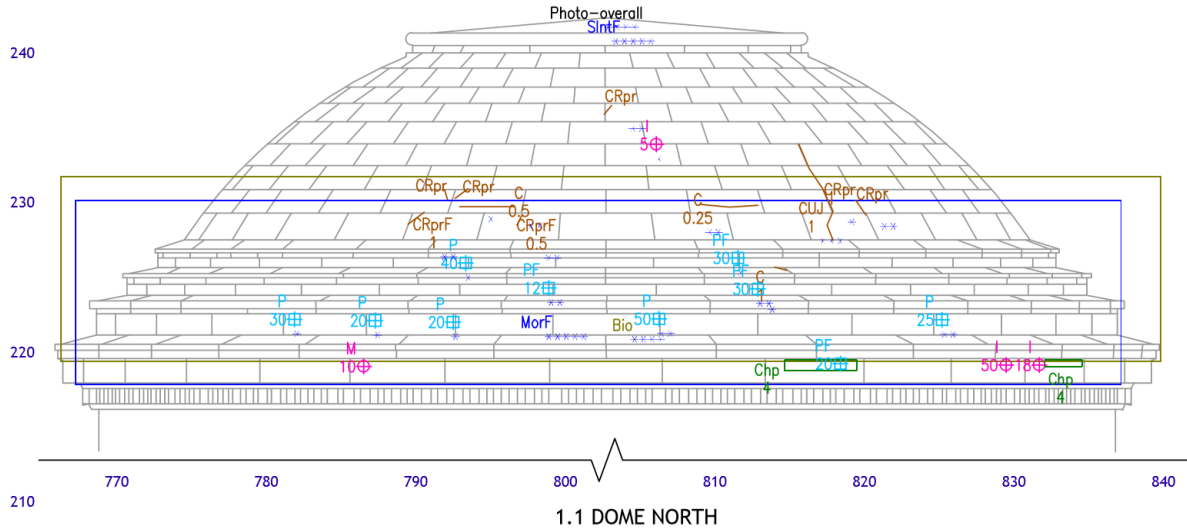


Figura 3.3-3 Resultado del análisis visual computarizado para la orientación norte de la cúpula.

En cuanto a la investigación con termografía, los resultados fueron determinantes; existían filtraciones activas que comprometían la estabilidad inmediata de la cúpula. Se determinó que existían tres tipos de filtraciones activas de agua:

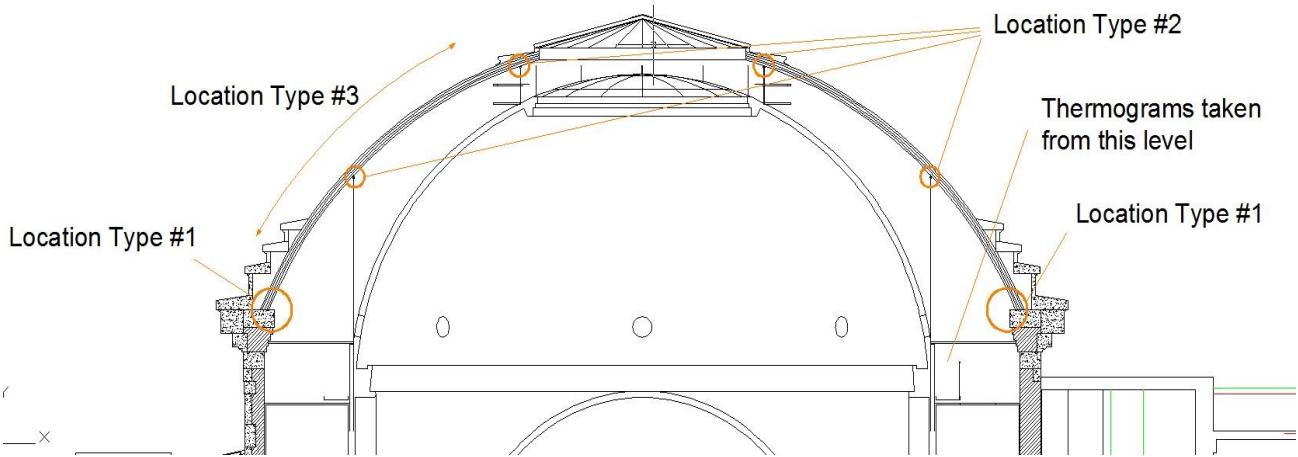


Figura 3.3-4 Sección de la cúpula en la que se señalan las localizaciones de los diferentes tipos de filtraciones.

Tipo 1: en la base de la cúpula en el encuentro entre los ladrillos y la piedra. Esta lesión se daba en el 80% de los sillares de la base (Figura 3.3-5, Figura 3.3-6 y Figura 3.3-7).



Figura 3.3-5 Encuentro en la base de la cúpula entre el ladrillo y la piedra sobre la que se asienta.



Figura 3.3-6 Termograma del encuentro en la base de la cúpula entre el ladrillo y la piedra sobre la que se asienta. Las manchas más oscuras corresponden a áreas con menor temperatura, en este caso, áreas con presencia de agua.

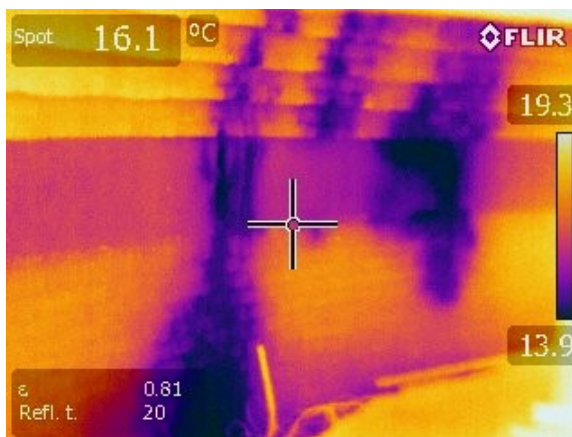
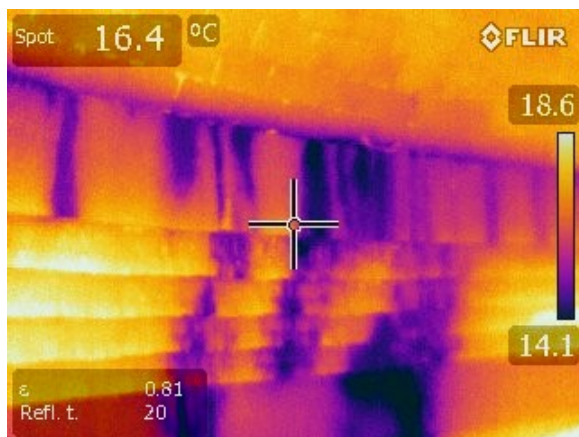


Figura 3.3-7 Termograma del encuentro en la base de la cúpula entre el ladrillo y la piedra sobre la que se asienta. El termograma de la derecha corresponde a la continuación, en sentido descendente, del termograma de la izquierda. Las manchas más oscuras corresponden a áreas con menor temperatura, en este caso, áreas con presencia de agua.



Tipo 2: encuentro entre los tirantes de acero de conexión entre la cúpula superior y la inferior en los dos niveles de tirantes (Figura 3.3-4). El grado de entrada de agua era tal que la cúpula inferior se veía afectada.



Figura 3.3-8 La fotografía de la izquierda muestra el nivel superior de tirantes de conexión de acero (conectan la cúpula superior de ladrillo con la cúpula inferior de yeso). La fotografía de la derecha muestra el nivel inferior de conectores.



Figura 3.3-9 Los tres conectores de acero en el extremo derecho en la imagen de la izquierda mostraban filtraciones activas en su encuentro con la cúpula superior tal y como puede observarse en la mancha oscura del termograma de la derecha.

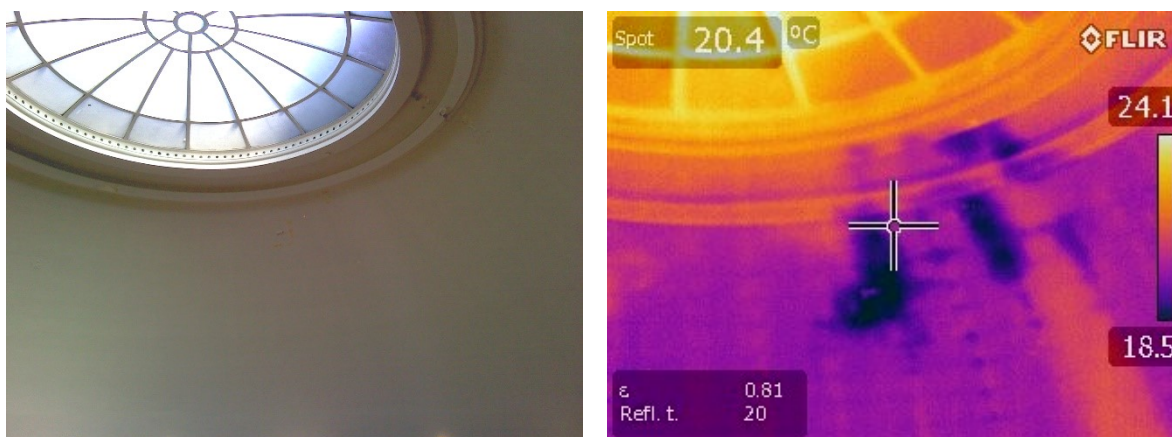


Figura 3.3-10 Fotografía/termograma que muestra una gotera activa (manchas oscuras). En este caso, corresponde al encuentro de uno de los conectores del nivel superior (Figura 3.3-9) con la cúpula de ladrillo.

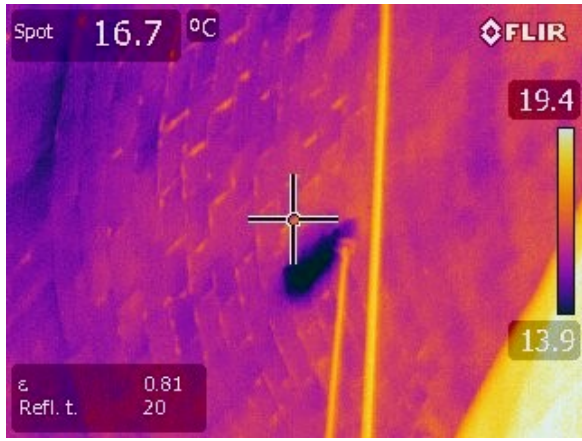
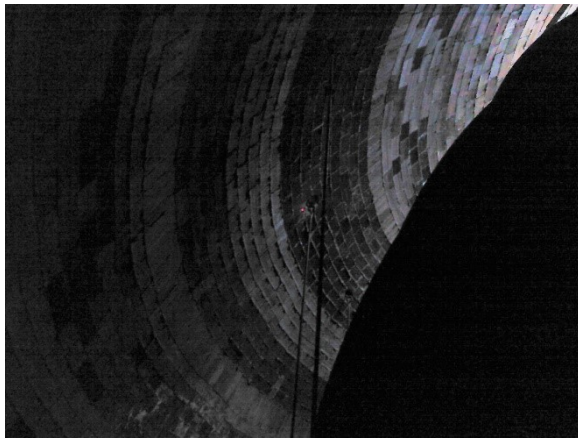


Figura 3.3-12 El encuentro entre el conector de acero y la cúpula de ladrillo genera una filtración que afecta tanto a la bóveda de ladrillo, como a la inferior de yeso (Figura 3.3-13).

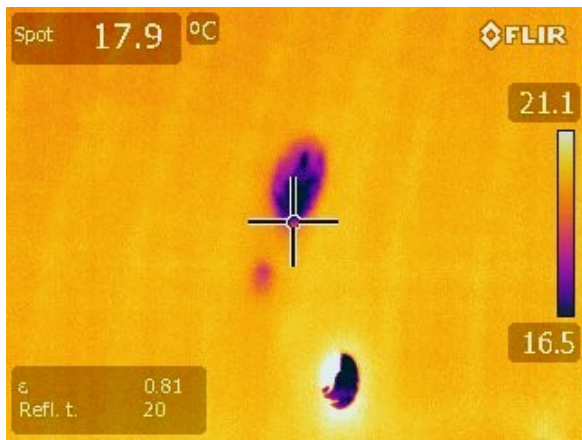
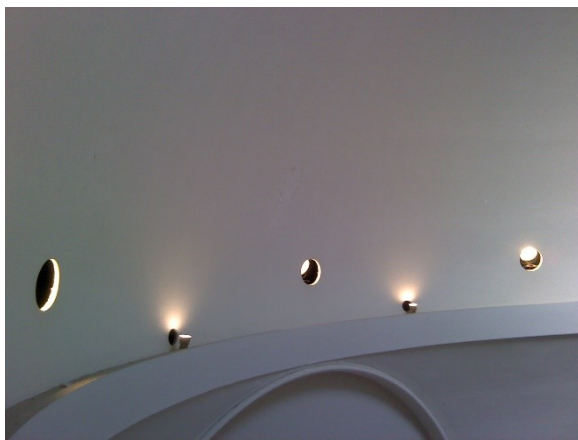


Figura 3.3-13 Fotografía/termograma que muestra una filtración activa. Obsérvese que no es posible percibir la filtración a simple vista.

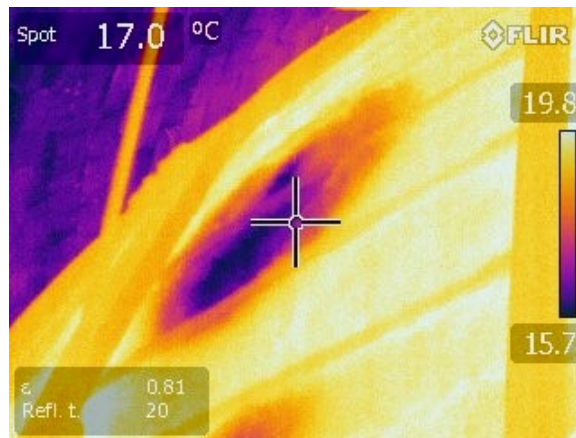


Figura 3.3-11 Termograma del área de la filtración mostrada en la Figura 3.3-13 tomada desde el trasdós de la cúpula de yeso (inferior).



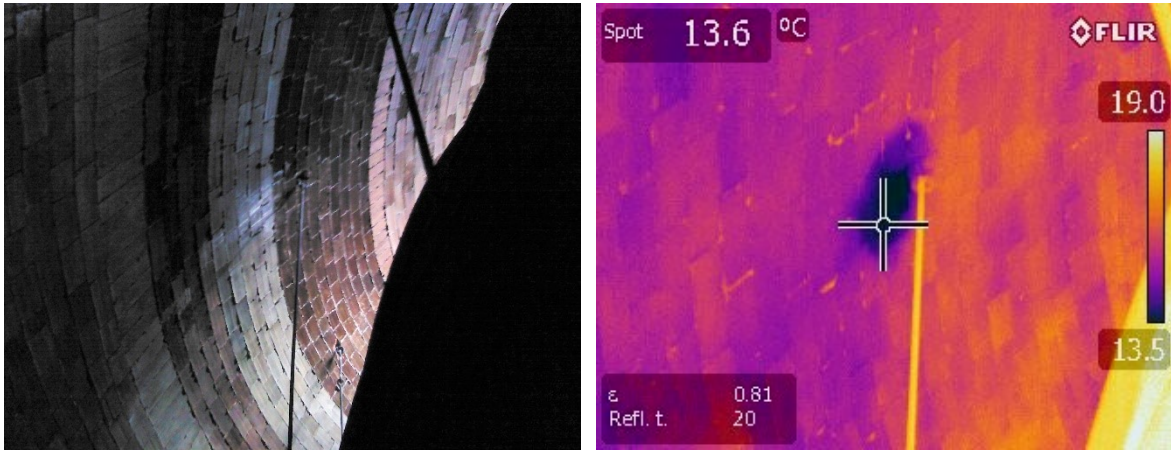


Figura 3.3-15 Fotografía y termograma de uno de los encuentros de los conectores de acero y la cúpula exterior de ladrillo. El termograma permite verificar la presencia de humedad (zona oscura).



Figura 3.3-14 Fotografía/termograma que muestra una filtración activa. Obsérvese que no es posible percibir la filtración a simple vista (zona oscura en el termograma).

Tipo 3: filtraciones genéricas en la cúpula fácilmente identificables por la formación de eflorescencias que generaban (Figura 3.3-17 y Figura 3.3-16).

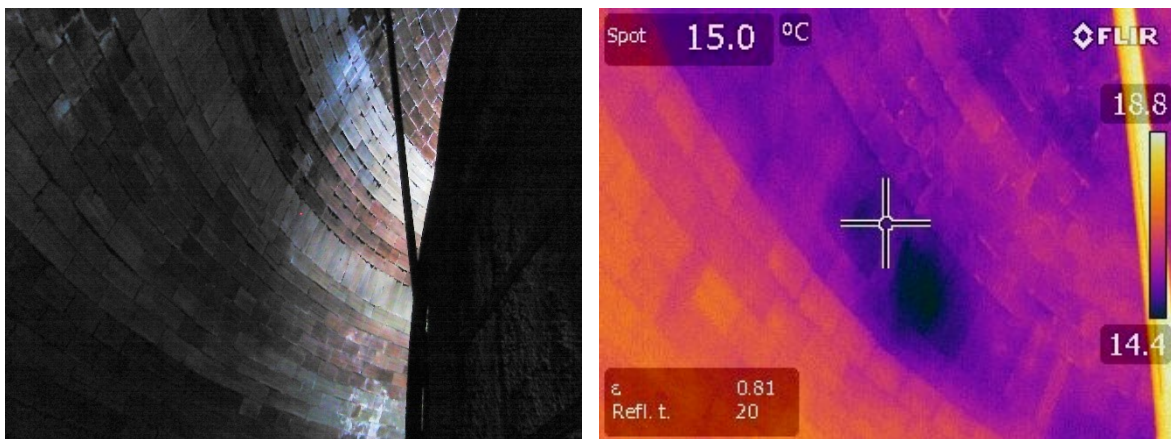


Figura 3.3-16 Fotografía / termograma de una eflorescencia que demuestra que se trata de una filtración activa.

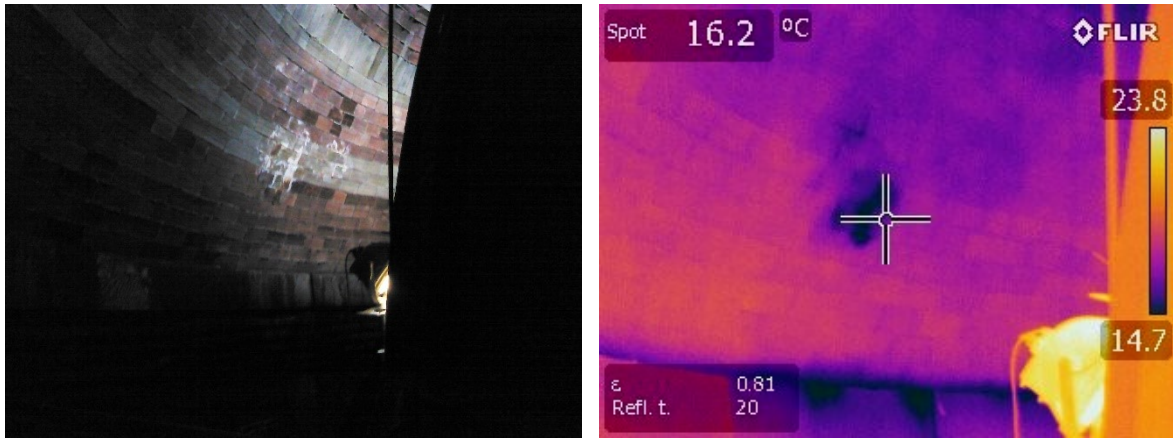


Figura 3.3-17 Fotografía / termograma de una eflorescencia que demuestra que se trata de una filtración activa.

## 3.4. CASO DE ESTUDIO: EDIFICIO WFB

MEND: TPAS + PERCUSIÓN CON MARTILLO + DETECTOR DE METALES + CÁMARA DE TUBERÍA + BOROSCOPIO + IRT.

### LOCALIZACIÓN

El edificio está localizado en la ciudad de Washington, en la calle 7<sup>a</sup>

### DESCRIPCIÓN DEL EDIFICIO Y ANTECEDENTES

Construido entre 1965 y 1968, fue el primer edificio de la administración Kennedy dentro del programa de 1962 “Guiding Principles of Federal Architecture” (Guiando los principios de la arquitectura federal). El edificio, diseñado por Marcel Breuer, de Herbert Beckhad y Nolen Swinburne Associates, es un edificio federal que alberga oficinas.

Diseñado en estilo brutalista, habitual en Breuer, tiene diez pisos y su uso es únicamente de oficinas. La estructura consta de elementos de hormigón vertido in situ y de hormigón prefabricado y tiene también función decorativa, ya que se encuentra visto en determinadas zonas. A este respecto, este edificio influyó la arquitectura federal posterior de los próximos años.

En planta, el edificio tiene forma curvilínea de X con ventanas en las fachadas mayores y muros sin aperturas en las menores. Las ventanas de las fachadas mayores están conformadas por elementos prefabricados de hormigón mientras que los muros ciegos están cubiertos con un aplacado de granito negro tipo Cold Spring Cranite Charcoal Black, French



Figura 3.4-1 Vista general del edificio. La imagen de la derecha muestra el aplacado de granito (Ben Schnall, 1968) (GSA, 2016)

Creek Foshill o Geourgi Granite Jet Mist, según los planos de proyecto. En cualquier caso, el granito utilizado es de grano grueso con pocas inclusiones o venas visibles.

En los planos de proyecto, las fachadas ciegas tenían ángulos continuos de 3x3x1/4 pulgadas (7,62 x 7,62 x 0,635 cm) en cada línea de forjado, para soportar tres hiladas de aplacado. Cada panel tiene unas dimensiones de 48 pulgadas (121,92 cm) de alto, 72 pulgadas (182,88 cm) de ancho y 2-3/4 pulgadas (6,985 cm) de espesor, con variaciones en aquellos paneles situados en las cajas de escalera, aleros y antepechos. Además, las piedras se sujetan con discos de 3 pulgadas (7,62 cm) de espesor insertados en los cuatro lados de cada panel anclados a la pared mediante tacos expansivos y localizados en el punto medio de las juntas verticales y en cada cuarto de la junta horizontal.

## OBJETIVOS DE LA EVALUACIÓN

El motivo de la evaluación era recopilar datos para conocer el estado de los elementos de las fachadas ciegas para 1) averiguar si peligraba la seguridad pública y 2) confeccionar un plan de reparaciones, mantenimiento preventivo y de conservación.

Habían sido observados tres problemas principales:

- Retención de agua en la cubierta noroeste por falta de drenaje de la bajante en esa zona de cubierta. Se sospechaba que la causa de la falta de drenaje era la rotura o bloqueo de la bajante oculta que recogía las aguas de la cubierta inmediatamente superior.
- Se tenía constancia, por actuaciones pasadas, de grietas en alguna de las losas de granito de los muros ciegos. Algunas de esas grietas habían sido reparadas cerrándolas con mortero de cemento.
- Se desconocía si la ejecución del aplacado de piedra coincidía con el diseño de proyecto.

Además, otros factores a tener en cuenta en la elaboración del plan de evaluación eran:

- Por cuestión de seguridad, el gestor del edificio no aceptaba la instalación de andamios para acceder a las zonas en estudio.
- Por los mismos motivos que en el punto anterior, existía una restricción de tiempo, la evaluación debía ser completada en tres días festivos.
- La altura del edificio y las características de las inmediaciones, imposibilitaban el acceso con plataforma elevadora.

En función de la problemática observada, el equipo técnico estableció los siguientes objetivos:

- a. Era necesario conocer el estado de todas las piedras de granito y su soporte a la fachada.
- b. Encontrar la causa de las humedades en la caja de escalera y la extensión de las mismas, así como el grado de deterioro que había supuesto en la estructura de soporte del aplacado de granito.
- c. Averiguar si el sistema existente de anclado del aplacado de granito respondía al diseñado en proyecto.

Una vez establecidos los objetivos de la evaluación, estudiado el edificio y conocidas las limitaciones del proyecto, se estimó que la investigación in situ debía consistir en la aplicación de una combinación de técnicas.

En primer lugar, se determinó que el acceso al aplacado de granito se llevaría a cabo con técnicas de IRA. Una vez establecido el acceso, para conocer el estado de cada una de las placas de granito, se procedió al sondeo con percusión de martillo (martilloacrílico de 16 onzas) en combinación con una observación visual próxima de cada una de ellas.

Se documentó con TPAS la localización, severidad y cantidades de cada una de las lesiones tales como desplazamientos, grietas, pérdidas de material y reparaciones previas, así como la localización de los distintos tests realizados. TPAS facilitó el análisis posterior de toda la evaluación en su conjunto, así como la gestión de la gran cantidad de información recabada y la posibilidad de compartirla con el resto de miembros del equipo de un modo sencillo.

Con el fin de localizar los elementos metálicos que conforman la estructura de sujeción del aplacado de granito, se utilizó un detector de metales Protovale Imp. Una vez localizados los elementos, se utilizó un boroscopio rígido con una visión a 90° al que se le acopló una cámara de video para registrar la inspección, compartirla con el resto del equipo y analizarla con posterioridad.

En la bajante proveniente de cubierta, en la escalera norte, se utilizó una cámara de tubería de la marca Seesnake para localizar la causante de las humedades en esa zona. Consiste en una videocámara conectada a un monitor mediante un cable semirrígido de 200 pies de longitud (61 m). Esta herramienta de diagnóstico, se utiliza para identificar agujeros, grietas o bloqueos en bajantes y tuberías. Incluye un odómetro para localizar la distancia relativa de las anomalías. En combinación con la cámara de tubería, se utilizó IRT en el interior de la caja de escalera para identificar posibles filtraciones.

## RESULTADOS

La lesión más notable observada en el aplacado de granito fue el desplazamiento post-construcción de los paneles, siendo más pronunciada en las partes elevadas de los muros en la línea de forjado. En algunos casos llegaban a 2,5 cm (Figura 3.4-8). Dichos desplazamientos son la causa de apertura de grietas y mortero faltante en las juntas (Figura 3.4-10). Observando las juntas, también se determinó que algunas losas de piedra fueron instaladas no alineadas o ligeramente desplazadas desde un inicio.

Los tests con boroscopio fueron realizados en juntas verticales próximas a líneas de forjado aprovechando faltantes de mortero en las juntas. En cuanto a la estructura metálica que soporta el aplacado, se comprobó que los ángulos de las cuatro plantas superiores, que en proyecto eran continuos siguiendo la línea de forjados, en realidad son discontinuos. En cuanto a los anclajes laterales, la investigación in situ confirmó su presencia, coincidiendo con la localización del diseño original. En alguno de los casos se observó corrosión del acero (Figura 3.4-7).

El granito se encuentra en buen estado con grietas aisladas y pequeñas y muy limitadas áreas de desprendimiento de material. La zona más deteriorada corresponde al alero bajo el aplacado, con grietas y desplazamientos notables (hasta 2 cm).



Se observó presencia de mortero en la base de las placas de granito en su encuentro con el ángulo metálico que soporta tres hiladas. Dicho mortero, que no estaba en el diseño de proyecto, puede estar limitando el movimiento de los paneles.

En la inspección visual se comprobó que, en términos generales, el mortero y el sellante entre placas se encuentra en mal estado, comprometiendo la estanqueidad.

Otras observaciones fueron documentadas en TPAS, tales como restos de intervenciones previas, fisuras, así como el tipo de material de las juntas (sellante o mortero) y su estado de conservación.



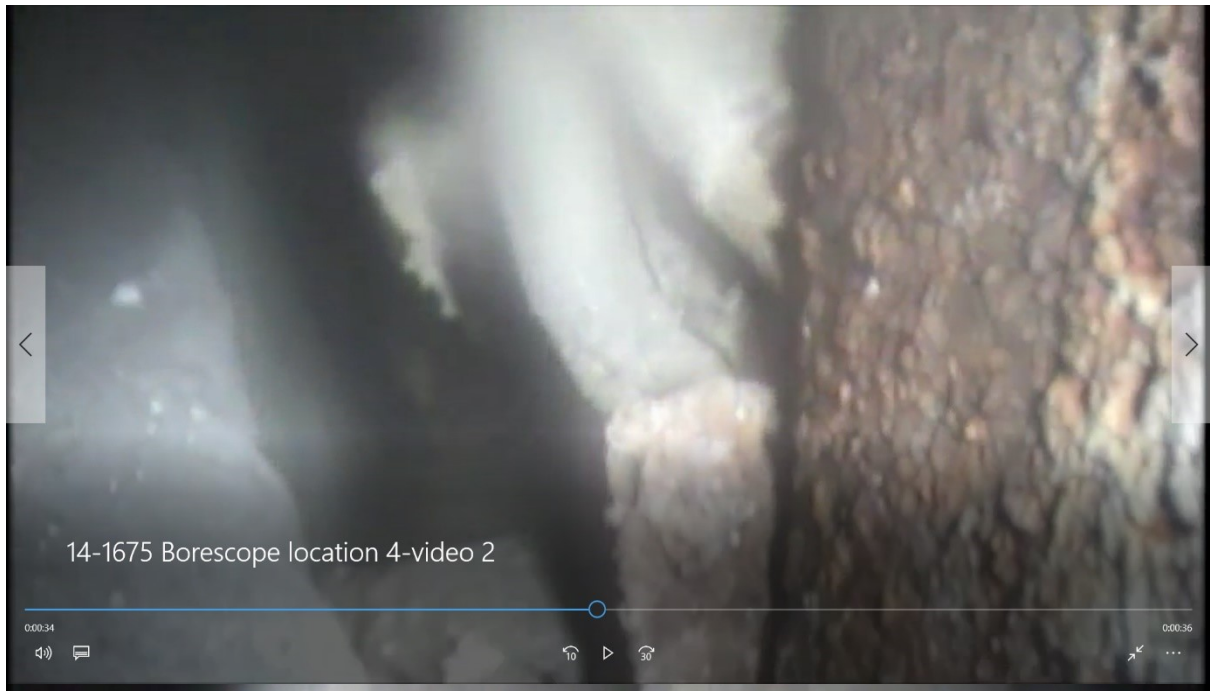
*Figura 3.4-3 Investigación con boroscopio rígido. En lugar de utilizar el visor, el técnico utiliza el monitor del sistema de grabación de vídeo para ver la cara trasera del aplacado.*



*Figura 3.4-2 Boroscopio rígido introducido por uno de los faltantes de junta.*



*Figura 3.4-4 Martillo acrílico de 13 onzas utilizado para el sondeo por percusión de cada una de las piezas de granito.*



*Figura 3.4-7 Fotografía de una de las secuencias del video registrado con el boroscopio. La imagen muestra la corrosión superficial de uno de los perfiles en línea de forjado.*



*Figura 3.4-6 Fotografía de una de las secuencias del video registrado con el boroscopio. La imagen muestra uno de los anclajes laterales y su buen estado de conservación.*



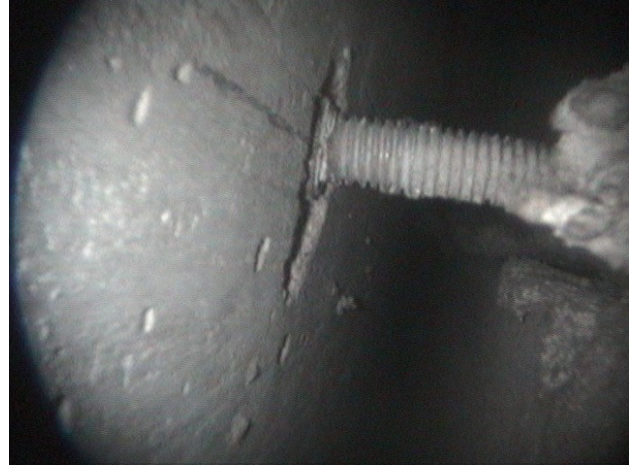
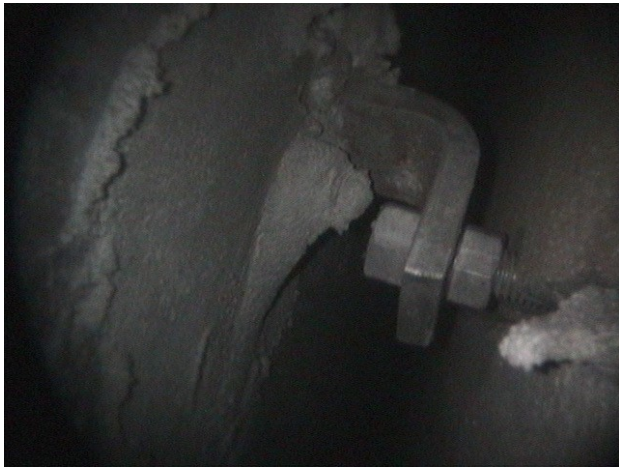


Figura 3.4-9 Fotografías tomadas con el boroscopio. Ambas imágenes muestran diferentes configuraciones de anclajes laterales.



Figura 3.4-8 Fotografías que muestran desplazamientos del aplacado de granito.

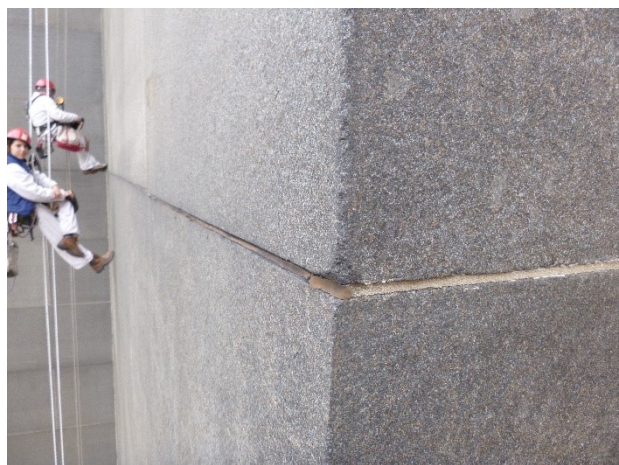


Figura 3.4-10 La imagen de la izquierda muestra desprendimiento del mortero de cemento de las juntas, mientras que la imagen de la derecha muestra la existencia de dos materiales diferentes en la junta. También puede observarse el acceso por el método no invasivo IRA.





Figura 3.4-12 Desprendimientos menores de material. Ejemplo genérico de algunas de las lesiones documentadas en TPAS.

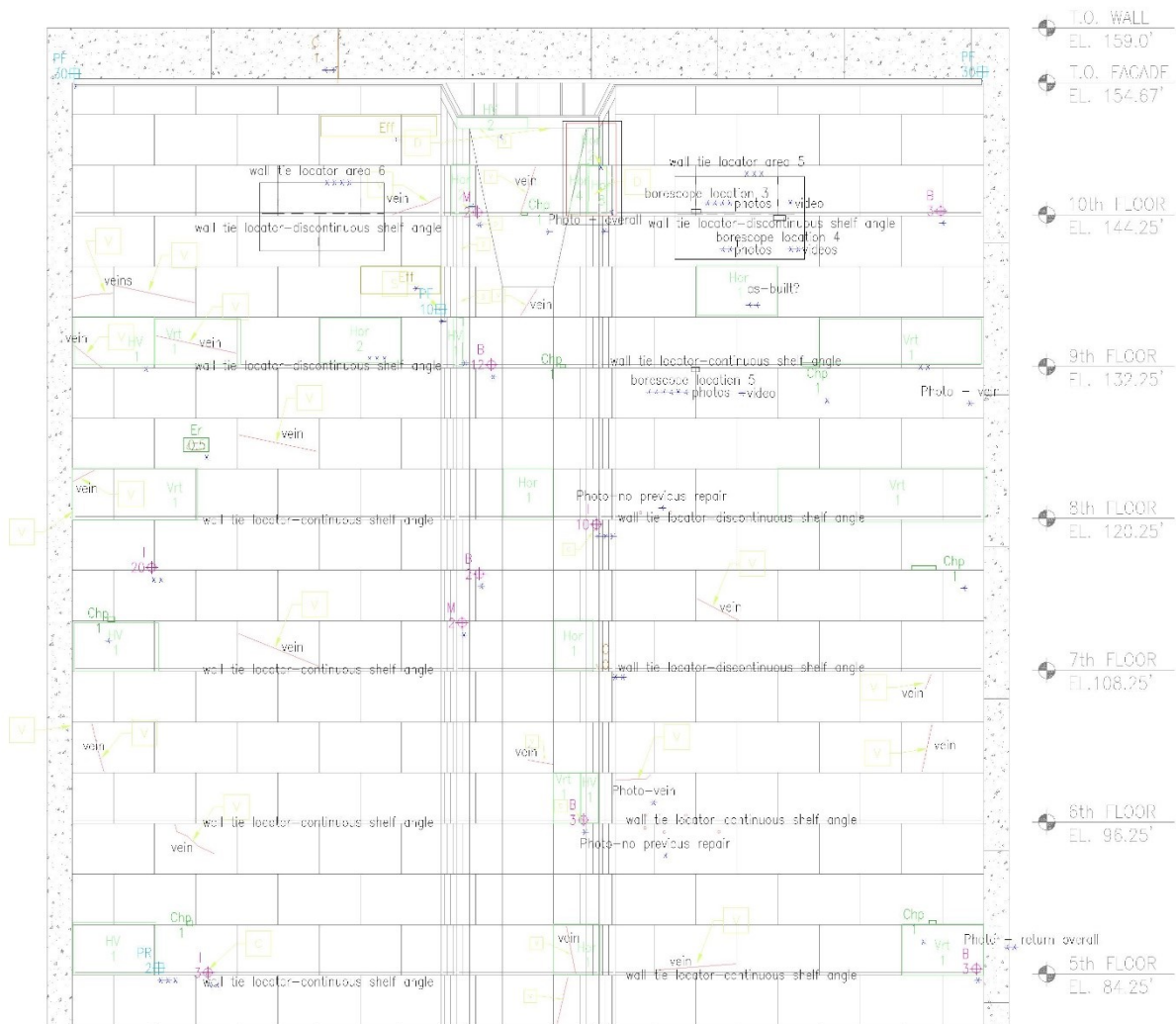


Figura 3.4-11 Ejemplo de resultado de la recopilación de datos con TPAS. Además de las lesiones recogidas por bloques de TPAS, se añaden otras notas. Los asteriscos son hipervínculos a archivos de END tales como fotografías y videos.

Name	Condition	X	Y	Code	Amount	Severity	Priority	Date	Photo
Concrete Crack	Repair failed	78	14	CRprF	2.788	0.5	Pr2	2012	Yes
Concrete Crack	Single unit	362	15	C	2.994	0	Pr2	2015	Yes
Concrete Crack	Single unit	365	128	C	3.766	0.5	Pr2	2015	Yes
Concrete Crack	Single unit	1017	128	C	4.342	1	Pr2	2015	Yes
Concrete Crack	Single unit	1061	14	C	3.133	0	Pr2	2015	Yes
Concrete Embedment	Ferrous Element	673	15	Fe			Pr2	2015	No
Concrete Embedment	Ferrous Element	676	15	Fe			Pr2	2015	No
Concrete Embedment	Ferrous Element	679	15	Fe			Pr2	2015	No
Concrete Embedment	Ferrous Element	684	15	Fe			Pr2	2015	No
Concrete Embedment	Ferrous Element	687	15	Fe			Pr2	2015	No
Concrete Embedment	Ferrous Element	690	15	Fe			Pr2	2015	No
Concrete Embedment	Ferrous Element	691	129	Fe			Pr3	2015	Yes
Concrete Embedment	Ferrous Element	694	15	Fe			Pr2	2015	No
Concrete Embedment	Ferrous Element	697	15	Fe			Pr2	2015	No
Concrete Embedment	Ferrous Element	724	14	Fe			Pr2	2015	Yes
Concrete Joints	Sealant Failed	85	127	SlntF	71.795		Pr3	2012	Yes
Concrete Joints	Sealant Failed	91	128	SlntF	3.907		Pr3	2012	Yes
Concrete Joints	Sealant Failed	92	96	SlntF	108.728		Pr3	2012	Yes
Concrete Joints	Sealant Failed	743	127	SlntF	13.089		Pr2	2015	No
Concrete Repair	Patch Failed	89	16	PF	80		Pr2	2012	Yes
Concrete Repair	Patch Failed	360	15	PF	200		Pr2	2015	Yes
Concrete Repair	Patch Failed	368	17	PF	500		Pr2	2015	No
Concrete Repair	Patch Failed	391	17	PF	500		Pr2	2015	Yes
Concrete Repair	Patch Failed	395	14	PF	15		Pr2	2015	Yes
Concrete Repair	Patch Failed	396	15	PF	200		Pr2	2015	Yes
Concrete Repair	Patch Failed	686	17	PF	400		Pr2	2015	Yes
Concrete Repair	Patch Failed	687	16	PF	200		Pr2	2015	Yes
Concrete Repair	Patch Failed	718	17	PF	400		Pr2	2015	Yes
Concrete Repair	Patch Failed	728	16	PF	200		Pr2	2015	Yes
Concrete Renair	Patch Failed	998	127	PF	30		Pr2	2015	Yes

Figura 3.4-13 Extracto a modo de ejemplo de los atributos de los bloques de TPAS, que corresponden a las características de cada una de las lesiones e incluye: nombre, código, cantidad, severidad, prioridad, fecha y si existe hipervínculo a un archivo gráfico.

La investigación con la cámara de tubería sólo pudo llevarse a cabo en los 20 primeros pies (6 m), ya que, a partir de ese punto, los múltiples codos y quiebras de la tubería imposibilitaron el avance de la cámara. La investigación reveló corrosión severa en el interior de la tubería en toda la superficie y longitud de la tubería documentada. No se detectaron grietas, roturas, agujeros ni bloqueos. Una inspección visual y con termografía en el interior de la escalera, descartó la existencia de filtraciones.



## 3.5. CASO DE ESTUDIO: MONUMENTO S&S

MEND: TPAS + PERCUSIÓN CON MARTILLO + DETECTOR DE METALES + ULTRASONIDOS (UPV) + TERMOGRAFÍA PASIVA MEDIANTE UAS.

### LOCALIZACIÓN

El edificio está localizado en la isla de Manhattan, en el barrio del *Upper East Side*.

### DESCRIPCIÓN DEL EDIFICIO Y ANTECEDENTES

Inaugurado en 1902, es un monumento dedicado a los soldados y marineros de la Union Army que sirvieron en la guerra de Secesión de los Estados Unidos (Guerra Civil, 1861-1865). Fue diseñado por los arquitectos Charles y Arthur Stoughton. El arquitecto Paul Duboy diseñó los ornamentos decorativos. Inspirado en la Linterna de Lísclates, ubicada cerca de la Acrópolis de Atenas, consta de una prominente base cilíndrica, un tambor cilíndrico rodeado por doce columnas corintias y un tejado cónico rebajado. El entablamento, situado entre los capiteles de las columnas y la cubierta cónica, se divide en un arquitrabe, un friso en el que se lee “*To the memory of the brave soldiers and sailors who saved the unión*”, y la cornisa, con modillones rectangulares. El monumento tiene una altura aproximada de 30 m sobre el nivel de la plaza sobre la que se apoya.

El exterior del monumento está revestido de mármol blanco de Dover y Vermont, y granito en la base, conformando un banco que rodea el monumento. Una pequeña puerta de entrada, situada al sur, permite acceder al interior del espacio, cubierto por una cúpula de Guastavino con un óculo central, sobre el que se cierra el espacio con una segunda cúpula de ladrillos vidriados, también de Guastavino.

La última intervención documentada se llevó a cabo en 1962, y comprendió numerosos injertos de piedra en el exterior, reemplazamiento de los capiteles, impermeabilización de la cubierta cónica con láminas de plomo y de parte del arquitrabe con piezas de granito.

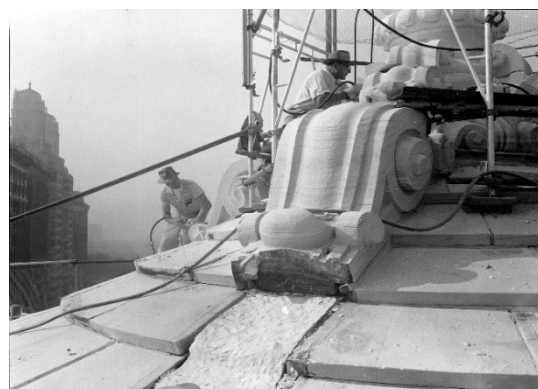


Figura 3.5-1 Fotografías tomadas durante la restauración de 1962 (New York City Park Photo Archives -NYCPPA)

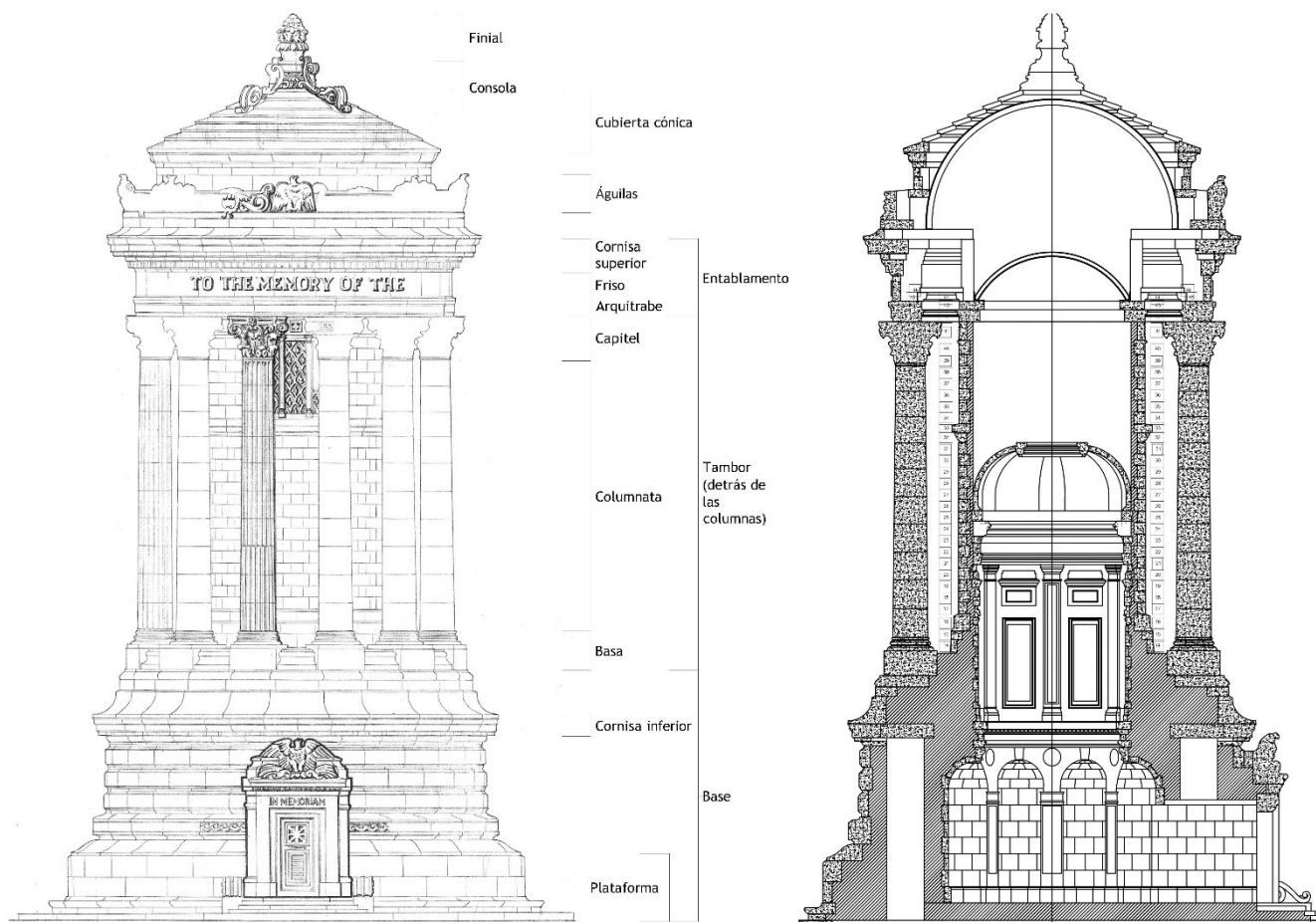


Figura 3.5-3 El plano de la izquierda corresponde a la fachada principal del monumento (sur) en la que se indica la nomenclatura utilizada (HABS, 1962). En la sección de la derecha, por su eje central de norte a sur, se observan las dos cúpulas de Guastavino y el óculo que las separa (LERA Architects).

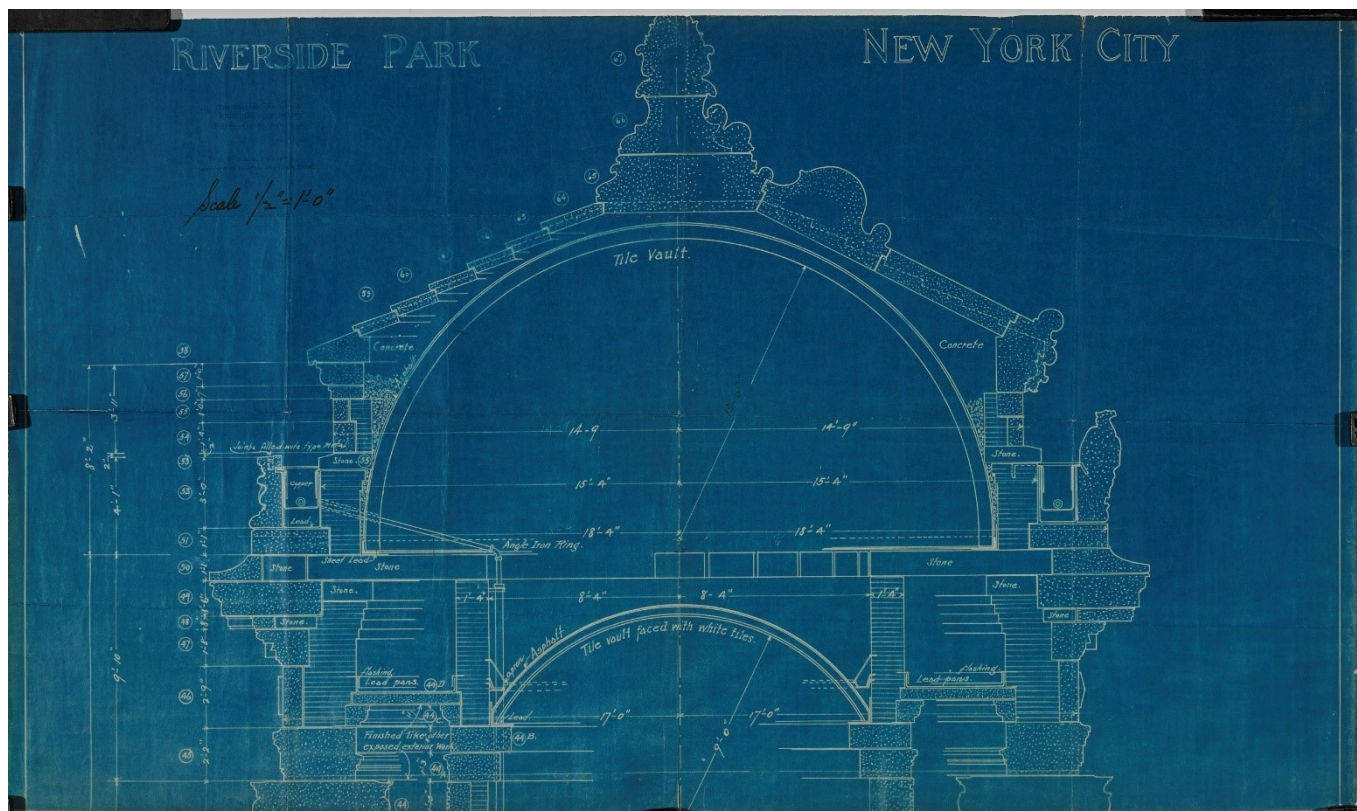


Figura 3.5-2 Plano original de la Guastavino Construction Company, circa 1900 en el que se representan dos de las cúpulas (Avery Library).

## OBJETIVOS DE LA EVALUACIÓN

El objetivo principal era realizar una inspección y evaluación visual próxima del monumento para dotar al equipo multidisciplinar, encargado de redactar el plan de conservación y restauración, de información detallada sobre el estado real del monumento.

Algunos de los modillones del entablamento presentaban signos de deterioro y huellas de haber sido reforzados en la intervención de 1962. Era necesario determinar el estado de cada uno de ellos, y la existencia de lesiones ocultas que pudieran comprometer su estabilidad y provocar el desprendimiento de unidades totales o parciales.

Otro de los objetivos de la evaluación consistía en evaluar la estanqueidad del monumento. La configuración morfológica de las cúpulas superpuestas en el interior dificultaba la evaluación remota de filtraciones de agua.

Otros factores a tener en cuenta en la elaboración del plan de evaluación eran:

- La legislación federal y local en la ciudad de Nueva York prohíbe el uso de vehículos aéreos no tripulados (UAV/UAS) en exteriores para esta aplicación, en el área de ubicación del monumento.
- La totalidad de la investigación debía suceder en un plazo máximo de una semana, lo cual descartaba la instalación de andamios tanto en el interior como en el exterior.
- La configuración de la plaza y el desconocimiento de la naturaleza subsuelo llevaron al equipo a eliminar la posibilidad de utilizar una plataforma elevadora.

En función de la problemática observada, el equipo técnico estableció los siguientes objetivos:

- d. Era necesario conocer el estado y estabilidad de todos los ornamentos exteriores.
- e. Determinar si existían filtraciones de agua en el interior del monumento. En caso de existir, determinar la naturaleza de las mismas en cuanto al origen y la extensión.
- f. Averiguar el estado general de los materiales en el interior del monumento.

## INVESTIGACIÓN IN SITU

Una vez establecidos los objetivos de la evaluación, estudiado el edificio, su historia y conocidas las limitaciones del proyecto, se estimó que la investigación *in situ* debía consistir en la aplicación de una combinación de técnicas.

Si bien la utilización de un UAV hubiera sido efectiva para la mayor parte de la inspección visual exterior del monumento, las limitaciones legales obligaron a descartar dicha opción. Debido a las restricciones de tiempo y logísticas, se estimó que el método acceso que satisfacía todos los condicionantes era un sistema industrial de cuerdas (Figura 3.5-4 y Figura 3.5-5).





Figura 3.5-5 La fotografía de la derecha muestra el sistema industrial de cuerdas instalado para tres personas. La imagen central muestra dos de los arquitectos del equipo de LERA/VA durante el proceso de inspección. La fotografía de la derecha corresponde al equipo de ingenieros de GBG durante parte de la evaluación no destructiva.



Figura 3.5-4 Secuencia del recorrido ascendente del ingeniero en su tarea de inspección visual próxima y documentación de lesiones y condiciones en el archivo TPAS-CAD mediante una cámara digital y una Tablet que hipervincula las fotografías.

Durante la inspección visual próxima se procedió al sondeo con percusión de martillo (cabeza dual goma/acrílico de 6 onzas -170 gr-) para evaluar la estabilidad de los materiales. Todas las lesiones, su severidad y la localización de los diferentes tests de END, fueron documentados utilizando TPAS; al archivo de .dwg se hipervincularon fotografías, vídeos, termogramas y archivos de UPV. En los bloques adaptados de TPAS se documentaron las cantidades que definían cada una de las lesiones. El archivo final facilitó el análisis posterior de toda la evaluación en su conjunto, así como la gestión de la gran cantidad de información recabada y la posibilidad de compartirla con el resto de miembros del equipo. En algunas de las lesiones en las que el material pétreo aparecía disgregado o con principio de desprendimiento (*spall*), se hizo uso de un detector de metales para analizar si la causa de la lesión podía ser la corrosión del metal, en caso de existir.

Con el fin de detectar modillones con lesiones ocultas, se utilizó la técnica de ultrasonidos (UPV) en medición directa o semidirecta para registrar las velocidades en diferentes recorridos. El test con UPV únicamente se llevó a cabo en aproximadamente el 25% de los modillones para adaptarse al presupuesto (13 unidades); los valores obtenidos se extrapolarían al conjunto. Los transductores piezoeléctricos se acoplaron a la superficie de la piedra mediante gel. La respuesta se registró en dominio tiempo, es decir, el tiempo que necesitó la onda para realizar determinados recorridos, con el fin de analizar las propiedades mecánicas del material. La velocidad es proporcional a la densidad y al módulo elástico del material. Por tanto, la UPV se utilizó para analizar la resistencia relativa del material pétreo de los modillones e identificar posibles lesiones como grietas, discontinuidades microestructurales y oquedades. En resumen, la técnica se apoya en el hecho de que la energía

ultrasonica no puede atravesar una grieta u oquedad, y viajará a menor velocidad en mármol con mayor discontinuidad microestructural; como resultado, la velocidad será registrada como menor cuando la energía acústica pasa rodeando las citadas lesiones. Cuando varias tomas delatan una reducción significativa de velocidad, es posible evaluar por comparación el estado del material. Cada pieza se sometió a 12 tests. La Figura 3.5-6 ilustra el proceso de calibración para averiguar la velocidad de una pieza en buen estado.

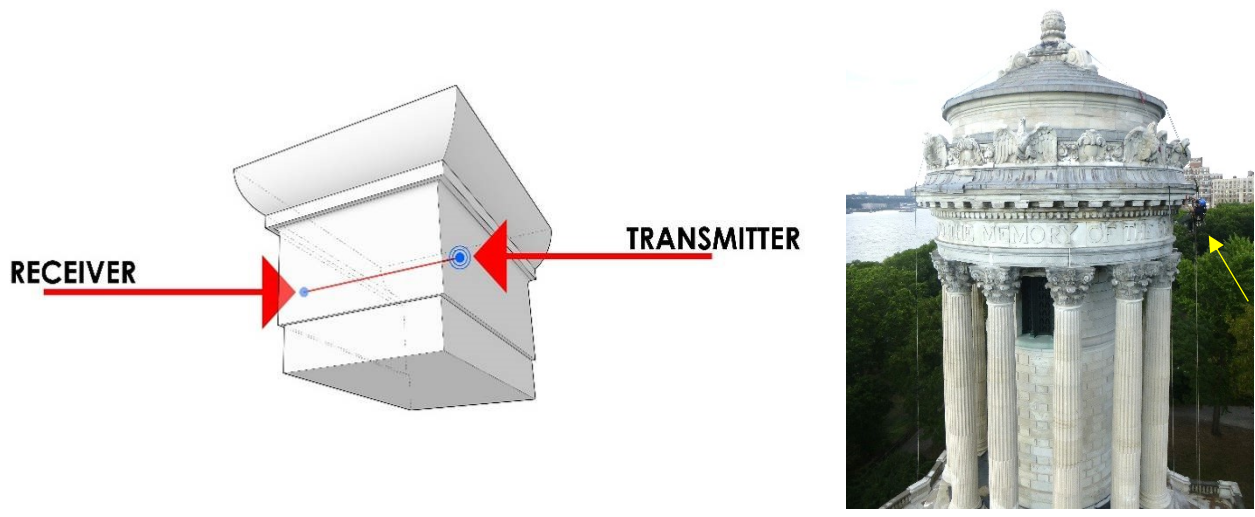


Figura 3.5-6 La figura de la izquierda indica la localización del transmisor y el receptor en el proceso de calibrado para averiguar la velocidad en el mármol Dover en buen estado. La imagen de la derecha corresponde a la realización del test.

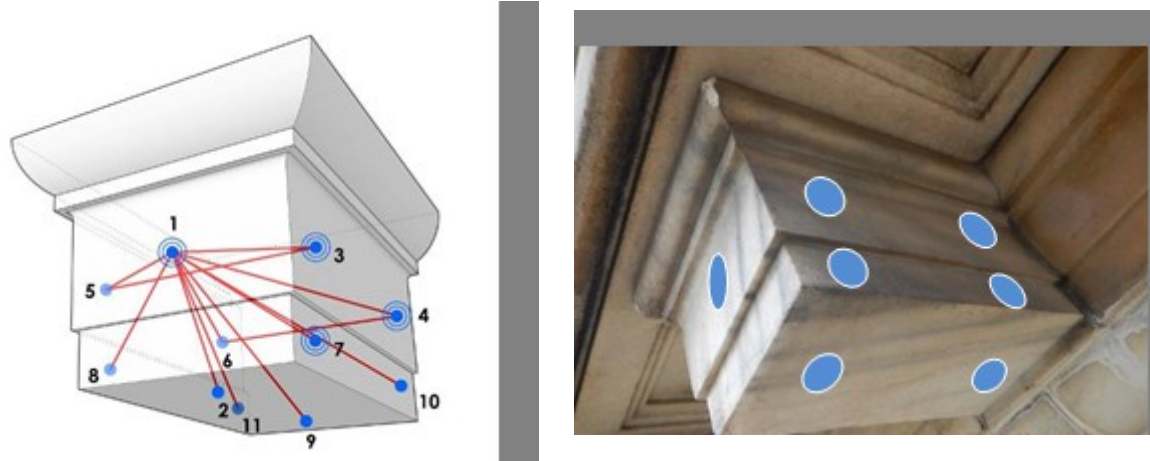


Figura 3.5-7 La imagen muestra la posición de los transductores en cada una de los 12 test realizados a cada modillón.

Dado que la legislación actual no limita el uso de UAV en interiores en Manhattan, se optó por utilizar un DJI Phantom 4 Pro con protección de hélices, para realizar la inspección visual del interior y, dotando al UAV de una cámara térmica (FLIR Vue Pro 640 9mm 30Hz - Thermal Vision), llevar a cabo una segunda investigación con termografía infrarroja. La finalidad de la investigación termográfica era determinar si existían filtraciones que comprometieran la estanqueidad del interior del monumento. Ambas investigaciones fueron registradas en formato video. Se estableció como condición que el día anterior a la investigación del interior del monumento, debía haber llovido, al menos 2 pulgadas (5 cm).



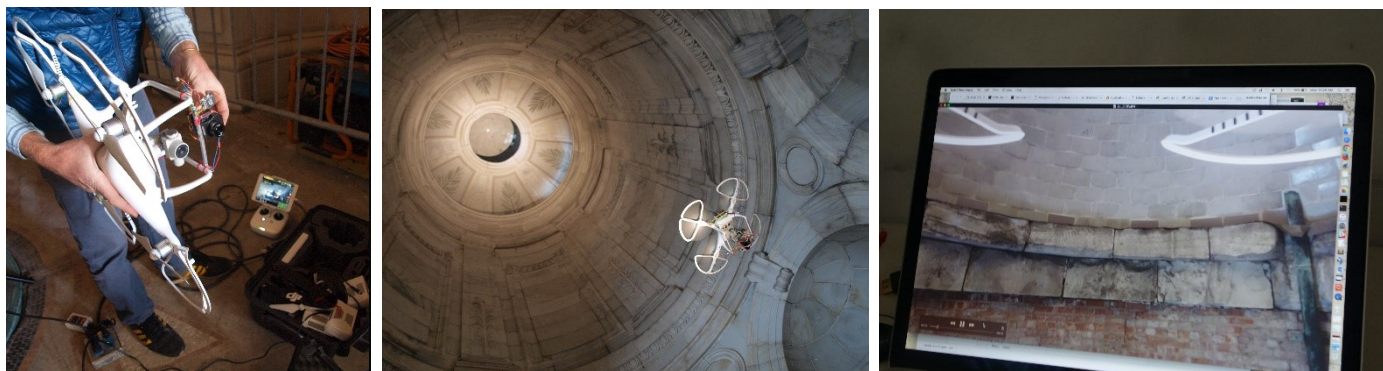


Figura 3.5-9 En la imagen de la izquierda aparece el UAV utilizado, un DJI Phantom 4 Pro con la termocámara instalada (FLIR Vue Pro 640 9mm 30Hz - Thermal Vision) y la pantalla/mandos del piloto. En la imagen central se observa el UAV dirigiéndose al óculo que separa dos de las cúpulas. La imagen de la derecha muestra el monitor que retransmite en vivo lo que registra la cámara del UAV; en este caso, se trata del encuentro entre la cúpula de Guastavino y el tambor de sillería y ladrillo.

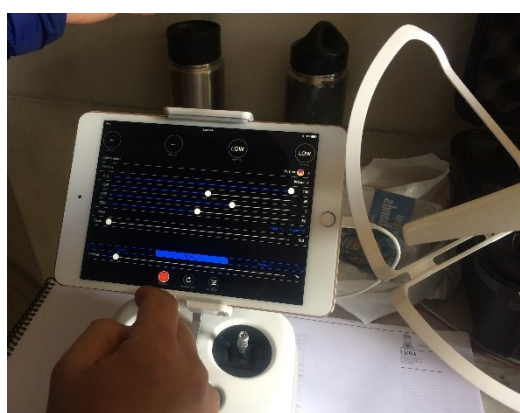


Figura 3.5-8 La imagen muestra la pantalla de los mandos del piloto. El software de la termocámara de FLIR, permite al piloto controlar valores como paleta, tipo de termograma, etc.

## RESULTADOS

Como parte de la investigación, se documentaron todas las lesiones representativas y notables en el exterior del monumento durante la inspección visual. A cada lesión se le asignó un valor de prioridad equivalente a la nomenclatura utilizada por la *Local Law 11* de inspección de fachadas; prioridad 1 corresponde a lesiones que suponen un riesgo inminente (*unsafe*), como injertos sueltos de piedra y, material inestable; prioridad 2 equivale a lesiones que requieren de mantenimiento a corto plazo para que no evolucionen a prioridad 1 (*safe with repair and maintenance program*), tales como grietas, principio de exfoliaciones, fallos en la lámina impermeabilizante de plomo o pérdida de mortero en juntas; se clasifican con prioridad 3 aquellas lesiones que no suponen un riesgo ni a corto ni a largo plazo (*safe*), suponen sobre todo un impacto estético, como manchas, sales, grafitis, etc. Cada lesión recibió una de estas tres clasificaciones a través de los bloques de TPAS, quedando reflejado en la tabla Excel generada con la función de extracción de atributos del archivo de TPAS-CAD (Figura 3.5-11).

Las lesiones y condiciones existentes documentadas en el exterior, resultaron ser en su mayoría exfoliaciones, grietas, pérdidas superficiales de material, reparaciones previas, perforaciones en la lámina de plomo y áreas con pérdida de mortero en juntas o suciedad. En





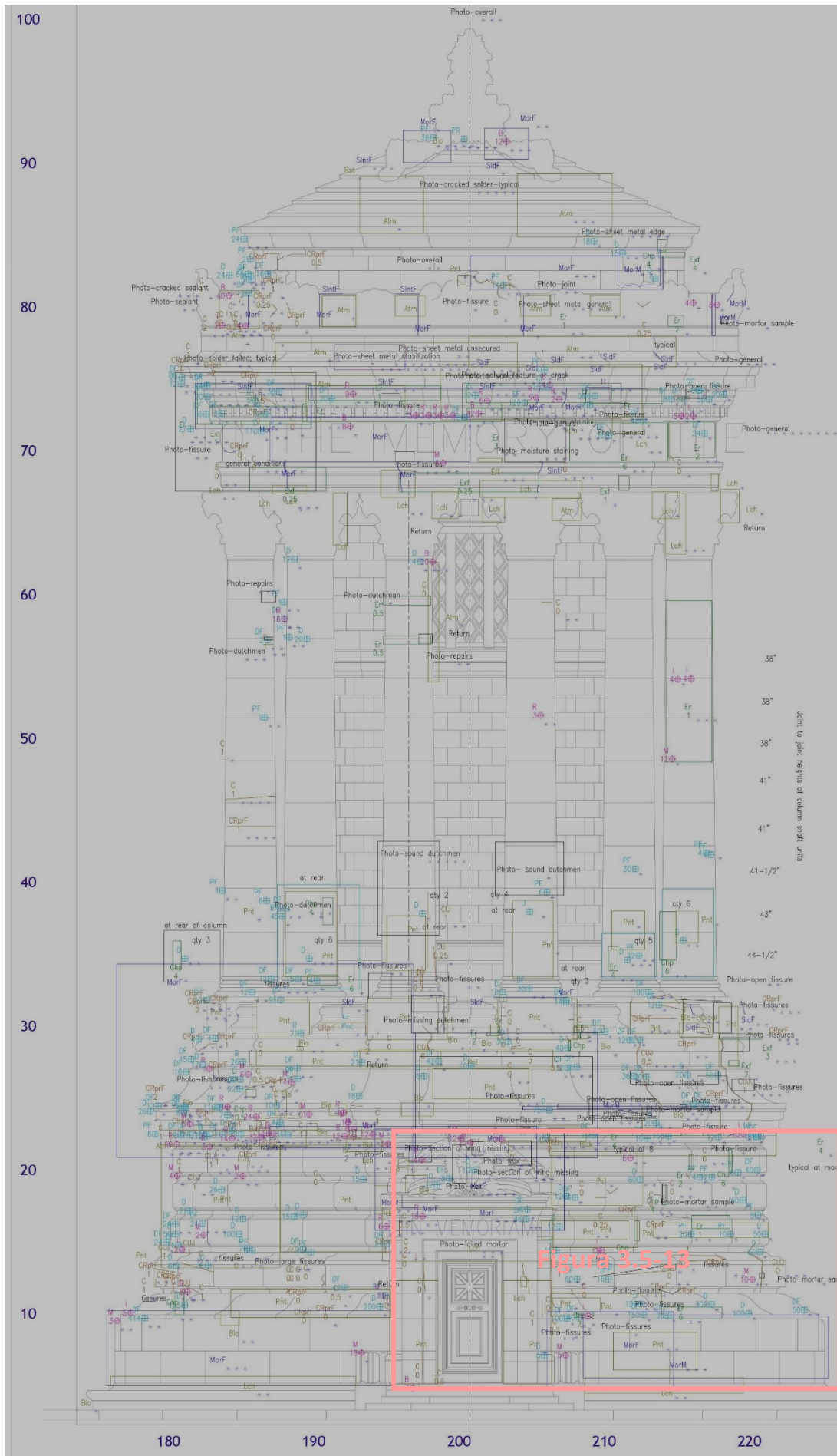


Figura 3.5-12 Vista general del plano TPAS de la fachada sur con todas las capas de lesiones activadas. Los asteriscos azules son hipervinculos a otros archivos (fotografías, videos, archivos de UPV, termogramas).

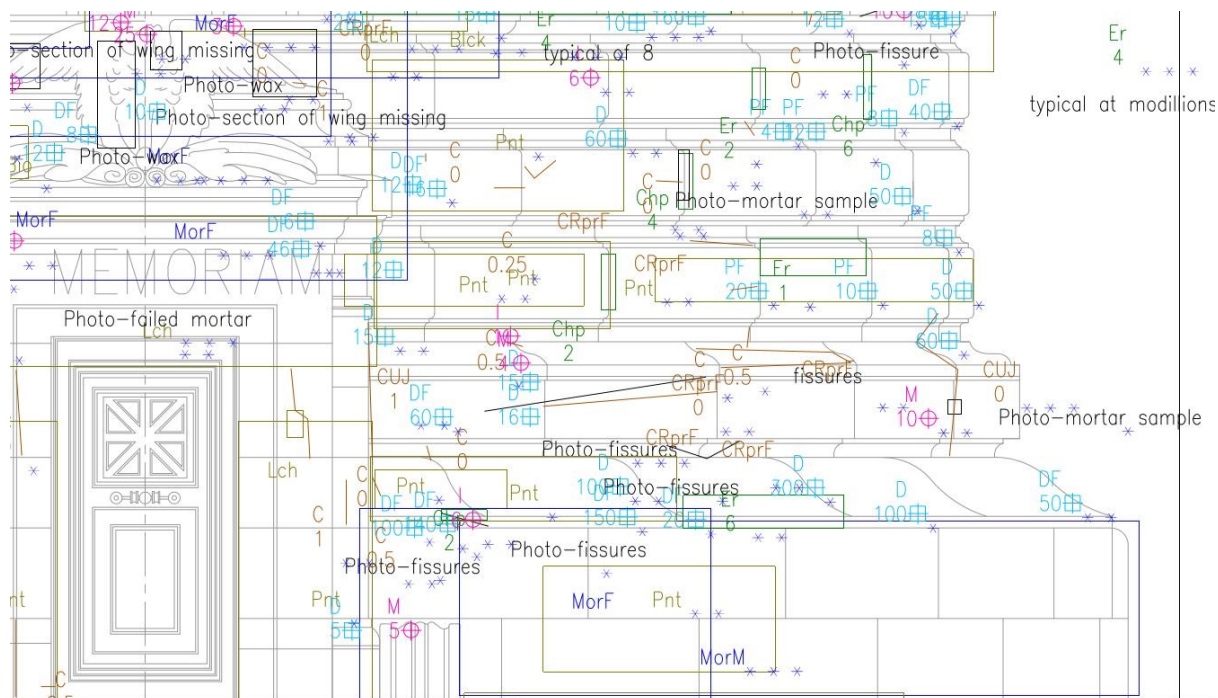


Figura 3.5-13 Detalle del plano de la Figura 3.5-12. A cada tipo de condición se asigna automáticamente una capa, de manera que puede adaptarse el plano activando o desactivando capas.

La inspección visual interna por medio de un UAV permitió registrar en video lesiones como grietas, suciedad, eflorescencias, presencia de escombros, entre otras (Figura 3.5-14).

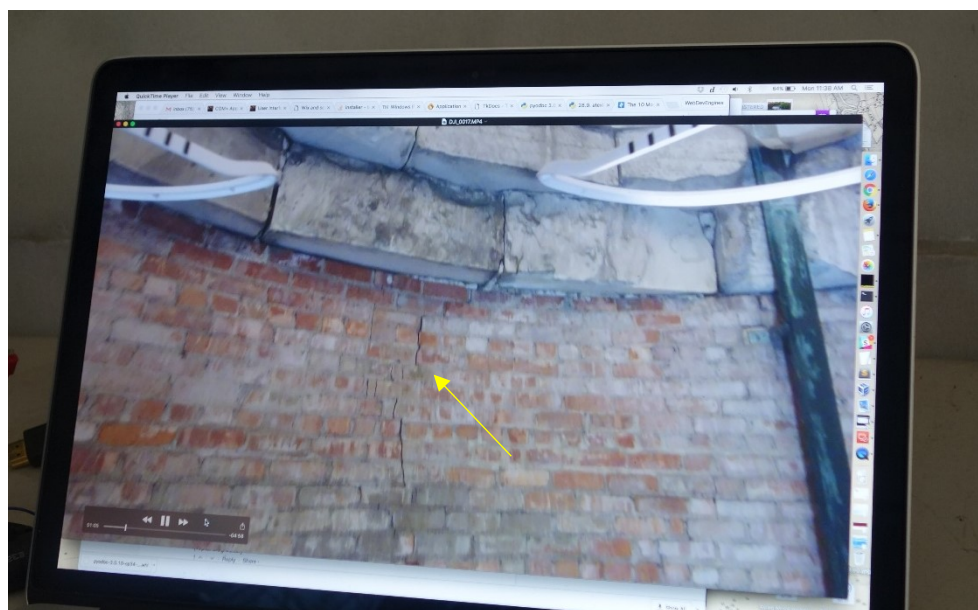


Figura 3.5-14 La imagen corresponde a una secuencia del video retransmitido en directo desde el UAS, en la que se observó una grieta vertical descendente que afectaba a mortero y unidades de ladrillo.

La investigación con termografía infrarroja permitió detectar presencia de humedad en la base de la cúpula inferior de Guastavino en su encuentro con el muro. Comparando el archivo TPAS registrado durante la investigación visual en el exterior del monumento, con la localización de las humedades en el interior, todo



parece apuntar que el origen de las filtraciones se debe al deterioro de las láminas de plomo instaladas durante la renovación de 1962.



Figura 3.5-15 En ambas imágenes, la fotografía de la izquierda fue tomada con el UAS utilizando la cámara instalada y los termogramas fueron registrados con el mismo UAS, mediante una cámara térmica. Fotografía y termograma pertenecen a la misma zona del monumento. Lo que parecen zonas de humedad en las fotografías se confirma en los termogramas con tonos morados, correspondientes a zonas más frías.



Figura 3.5-16 A la izquierda, fotografía tomada con el UAS del encuentro entre la cúpula de Guastavino y el tambor de piedra. En el termograma de la derecha se observa el reflejo del ladrillo vidriado de la cúpula (no debe confundirse con una zona más caliente) y que la primera hilada de ladrillos de la base de la cúpula está más fría. Puede ser un indicio de humedad, sin embargo, esta imagen no permite confirmarlo.



La investigación de la estabilidad de los modillones mediante un método combinado de inspección visual próxima y test de UPV, determinó que un 25% de los testeados con UPV (13 unidades) presentaban algún tipo de lesión interna que comprometía su estabilidad. La Figura 3.5-17 muestra los valores generales del análisis y la Figura 3.5-18 corresponde a la categoría asignada a cada modillón en función de la velocidad obtenida.

Se debe puntualizar que, si bien este test puede resultar de gran utilidad para determinar la presencia de lesiones internas que comprometan la estabilidad del elemento, no permite evaluar el estado del encuentro entre el modillón y la fachada; esto se debe a que la morfología del elemento impide realizar un test UPV que permita evaluar esa conexión.

	<b>Average</b>	<b>Standard Deviation</b>	<b>Minimum</b>	<b>Maximum</b>
<b>Dover</b>	2652	900	673	5001

Figura 3.5-17 Valores medios obtenidos durante el test de UPV realizado al 25% de los modillones.

	<b>Unsafe (0)</b>	<b>Very Poor (1)</b>	<b>Poor (2)</b>	<b>Fair (3)</b>	<b>Good (4)</b>	<b>Very Good (5)</b>
<b>Dover</b>	2347	2338	2937	3140	3360	4002

Figura 3.5-18 Tabla de categorías asignadas (inseguro, estabilidad muy pobre, pobre, normal, buena y muy buena) en función de la velocidad resultante.



# 4. APLICACIÓN EXPERIMENTAL DE END A UNA BÓVEDA DE GUASTAVINO

---

## 4.1. INTRODUCCIÓN

En 1885, el arquitecto español Rafael Guastavino Moreno patentó en Estados Unidos la técnica de la bóveda tabicada, como un sistema constructivo resistente al fuego. A partir de ese momento, sólo él podría utilizar dicha técnica constructiva. Entre 1889 y 1962, sólo en Estados Unidos, su compañía (*Guastavino Fireproof Construction Company* desde 1889 hasta 1897 y *R. Guastavino Company* desde 1897 hasta 1962) participó en la construcción de más de 1.000 edificios que

contenían bóvedas tabicadas (Ochsendorf, 2010). En una encuesta realizada en 1900 para escoger los edificios más bellos en US (“Brochure Series”, VI, January 1900), todos menos dos de los construidos tras la llegada de Rafael, contenían bóvedas de la compañía. En 1967 el *American Institute of Architects* eligió treinta



Figura 4.1-1 Proceso de inspección de la cúpula tabicada de Guastavino en la iglesia de St. Francis de Sales, Philadelphia (PA), por la empresa Vertical Access (V.A.LLC).

y ocho edificios excepcionales en Manhattan; de los veintidós construidos durante los años de existencia de la compañía, más de la mitad contenían bóvedas de Guastavino (Parks & Alan, 1996). Estos datos, ejemplifican la enorme importancia de la obra de la *R. Guastavino Company* y de la técnica constructiva de la bóveda tabicada en US. Trabajar en el campo del patrimonio arquitectónico en Estados Unidos implica estar en contacto con las bóvedas tabicadas de Guastavino.

Evaluar el estado de conservación de dichas bóvedas tabicadas puede ser un proceso complejo y tedioso debido a los medios de acceso; los espacios que cubren suelen ser espacios públicos altamente transitados (estaciones de tren, zoos, iglesias, bancos, universidades, puentes, estaciones de metro, etc.) en los que instalar un andamio o cualquier otro medio de acceso puede resultar problemático, poco eficiente y costoso.



*Figura 4.1-2 La ingeniera Kelly Streeter evaluando la bóveda de Guastavino de 1921 del Plymouth Rock Portico (de los arquitectos McKim, Mead and White), en Massachusetts (V.A. LLC)*

Dicha dificultad sumada al desconocimiento estructural y constructivo por parte de ciertos ingenieros y arquitectos, ha resultado en la demolición de muchas de ellas simplemente por el desprendimiento de uno de los ladrillos de la capa vista desde el intradós, lesión que, por sí sola, si se conoce la técnica y el comportamiento estructural, no supone riesgo estructural de la bóveda (Streeter & Diebolt, 2012).

La lesión más común es la pérdida de adherencia entre la primera capa del intradós y la siguiente, llegando, en los casos más extremos a producirse desprendimientos de alguno de los ladrillos. Típicamente, la evaluación se lleva a cabo por medio de percusión con martillo desde el intradós, lo cual, además de los problemas de acceso anteriormente señalados, añade el factor de subjetividad inherente a la interpretación del técnico que lo ejecuta (en el anexo 9.3.7 de esta tesis se incluyen varios videos de análisis mediante percusión con diferentes tipos de martillos).

La investigación llevada a cabo en este capítulo examina la viabilidad de utilizar un método de evaluación no destructiva con el que evaluar las bóvedas desde el trasdós, ya que suelen ser espacios más fácilmente accesibles.

El objetivo pues de esta investigación es determinar si alguno de los métodos ensayados es válido para detectar falta de adherencia entre la primera y la segunda capa ejecutada desde el intradós: GPR, impacto-eco (IE), ultrasound pulse velocity (UPV), ultrasonic thickness gauge, termografía infrarroja (IRT).

## CONSTRUCCIÓN DE LA BÓVEDA Y TESTEO

Con el fin de poder ensayar diferentes métodos de END, se decidió construir una bóveda de Guastavino o bóveda tabicada. El motivo principal por el que construir una bóveda en lugar de utilizar una existente fue poder insertar y controlar dichas faltas.

Como ya se ha expuesto, el objetivo era comprobar la idoneidad de diferentes métodos de END para detectar falta o pérdida de adherencia entre las capas primera y segunda. Así pues, se insertaron cuatro faltas simulando dicha lesión (Figura 4.1-3), dos de ellas de papel plástico flexible corriente (ladrillos 9 y 29), otra con un plástico flexible de micro burbujas (ladrillo 12) y una cuarta de papel plástico flexible de macro burbujas (ladrillo 27), cuya finalidad era aumentar la cámara de aire entre hojas. Además, con el fin de observar el resultado con END de otros patrones de deterioro y de cara a otras investigaciones futuras, se insertaron dos faltas más: una grieta que partía el ladrillo 23, y una pletina metálica sobre los ladrillos 19 y 20 (Figura 4.1-3).

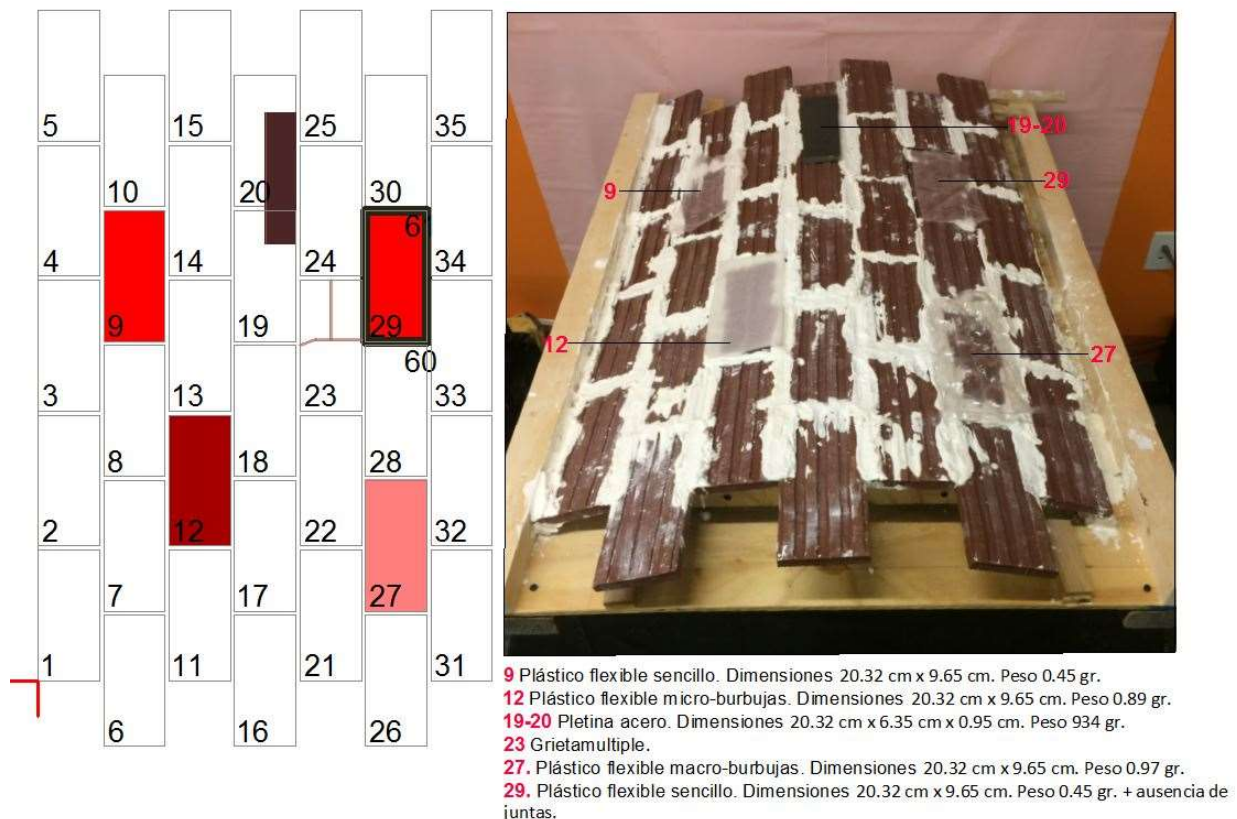


Figura 4.1-3 Localización y naturaleza de las faltas insertadas entre las hojas primera y segunda durante la construcción de la bóveda.



La construcción se llevó a cabo siguiendo la metodología tradicional de las bóvedas tabicadas de Guastavino: una primera hoja tomada con yeso, levantada sin encofrado en base a unas guías, y una segunda y tercera hojas tomadas con mortero de cemento utilizando la primera hoja como encofrado perdido. Una vez concluida la primera hoja, se insertaron las faltas entre la primera y segunda hojas. Seguidamente se procedió a la construcción y curado de la segunda hoja (Figura 4.1-5).

Uno de los factores que se quería estudiar era la diferencia en los resultados de END dependiendo del número de hojas que compongan la bóveda. Por este motivo, se procedió a una ronda completa de tests con la bóveda de dos hojas, que se denominó Fase I. Una vez concluida dicha ronda, se procedió a la construcción, y curado de la tercera hoja, tras los cuales se procedió a la segunda y definitiva ronda de tests, la Fase II (Figura 4.1-4).

Cada uno de los ladrillos recibe un número determinado, indicado en los planos en la esquina inferior izquierda (Figura 4.1-4). En los planos, la primera hoja se representa con un tono gris, la segunda con un tono azul y la tercera con un tono rosado. La esquina roja en la parte inferior a la izquierda corresponde a un hipotético punto 0,0,0 cuya finalidad es establecer la relación espacial entre las diferentes hojas.

#### MATERIALES

- Ladrillo cerámico de dimensiones 8" x 3,8" x 6,6" (20,32 cm x 9,65 cm x 1,52 cm). Se utilizaron 105 unidades.
- Yeso. Plaster of Paris CAS26499-65-0 Sheetrock. Puede contener caliza CAS 1317-65-3 o dolomita CAS 16389-88-1. Se utilizaron 10,6 kg.
- Mortero de cemento prefabricado (cemento y arenas) #1102 ASTM C-270 Tipo N. Se utilizaron 27,2 Kg.

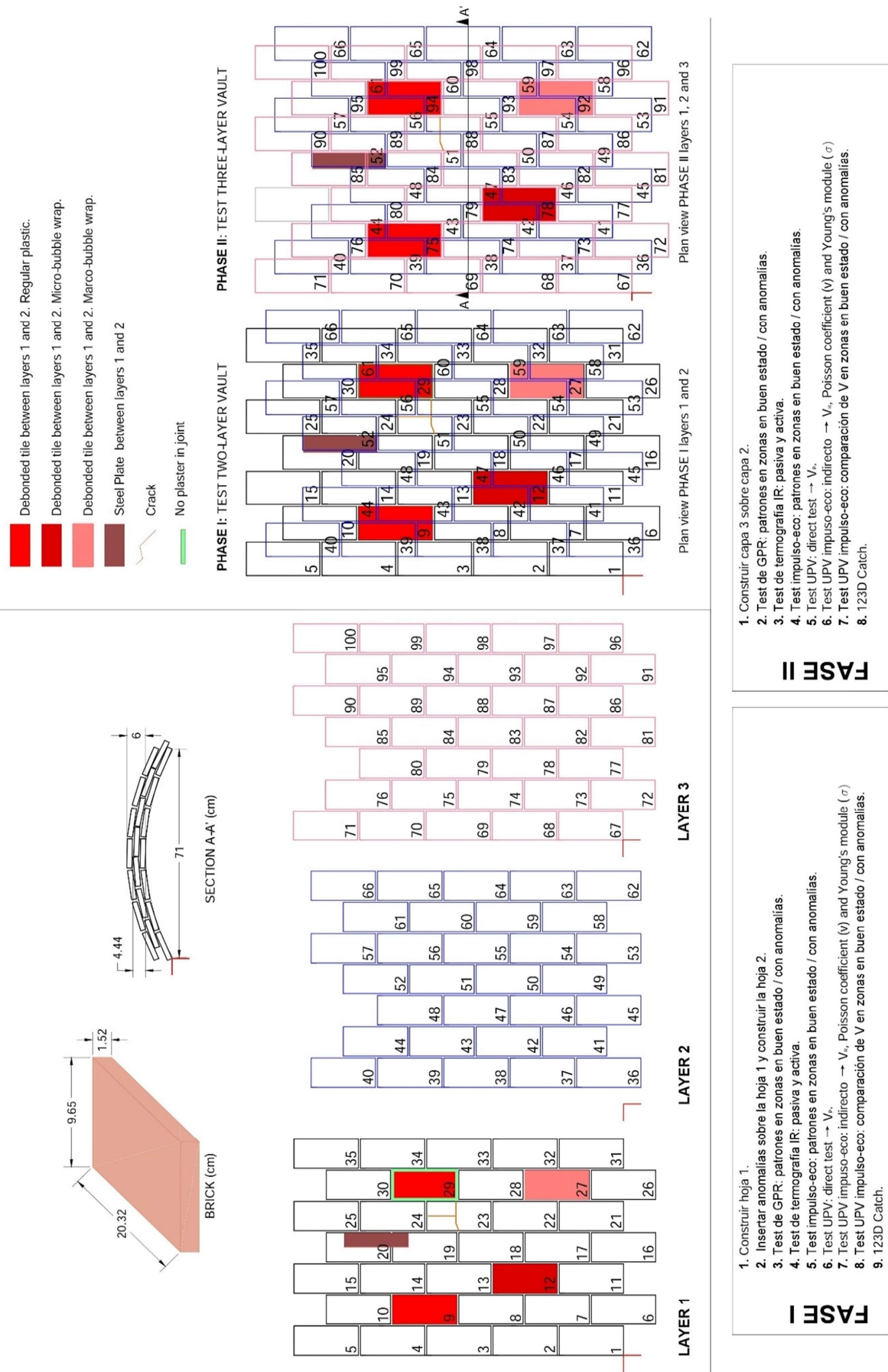


Figura 4.1-4 Esquema de construcción de la bóveda y resumen de las Fases I y II.



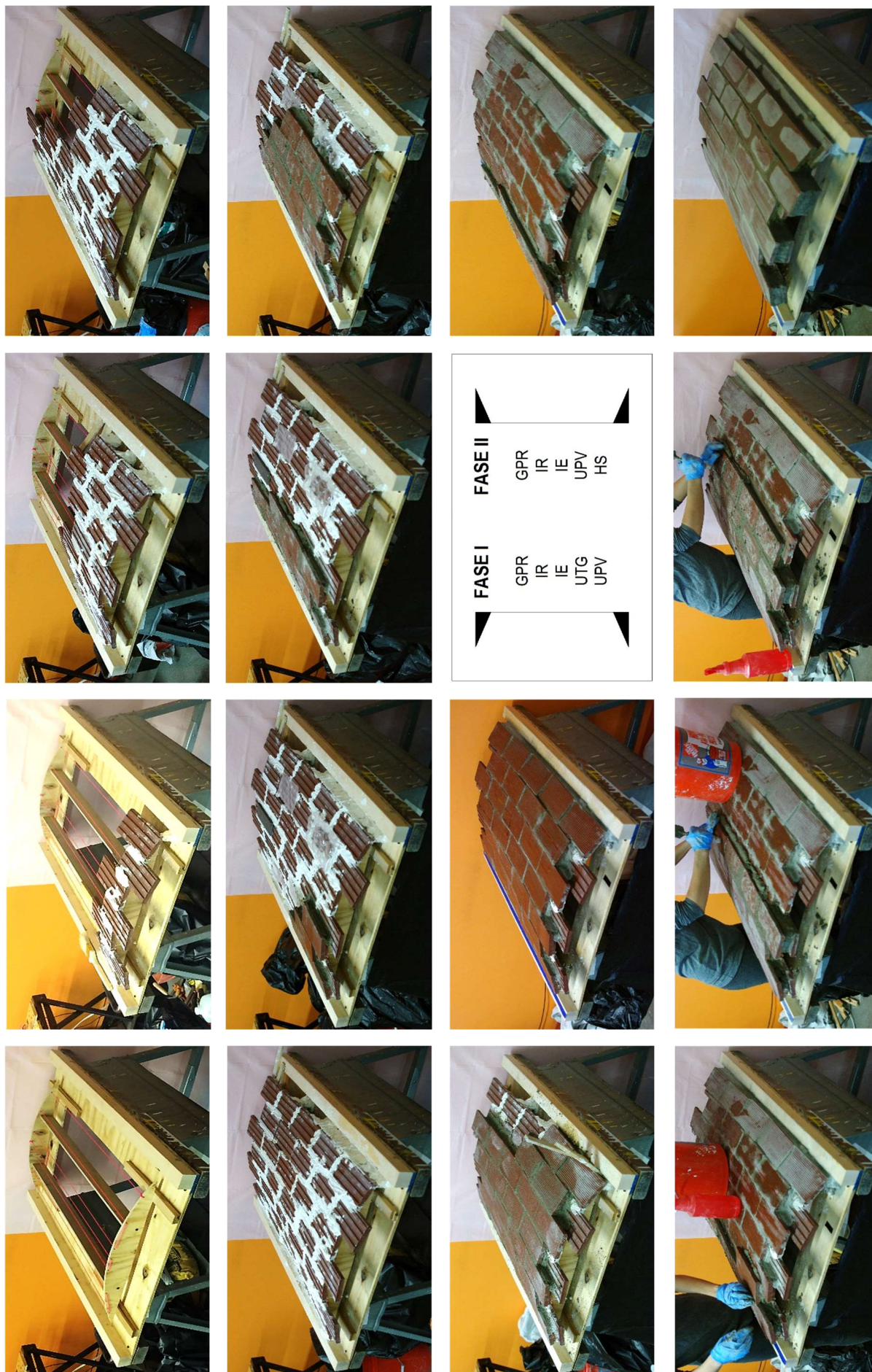


Figura 4.1-5 Secuencia de construcción de las tres hojas que conforman la bóveda.

Durante las fases de construcción se generaron modelos 3D de la bóveda. La aplicación escogida fue 123D Catch ya que la totalidad de la bóveda podía registrarse con menos de 80 fotografías, que es el límite de la aplicación. La toma de datos resultó rápida y útil para visualizar el elemento arquitectónico desde cualquier perspectiva.

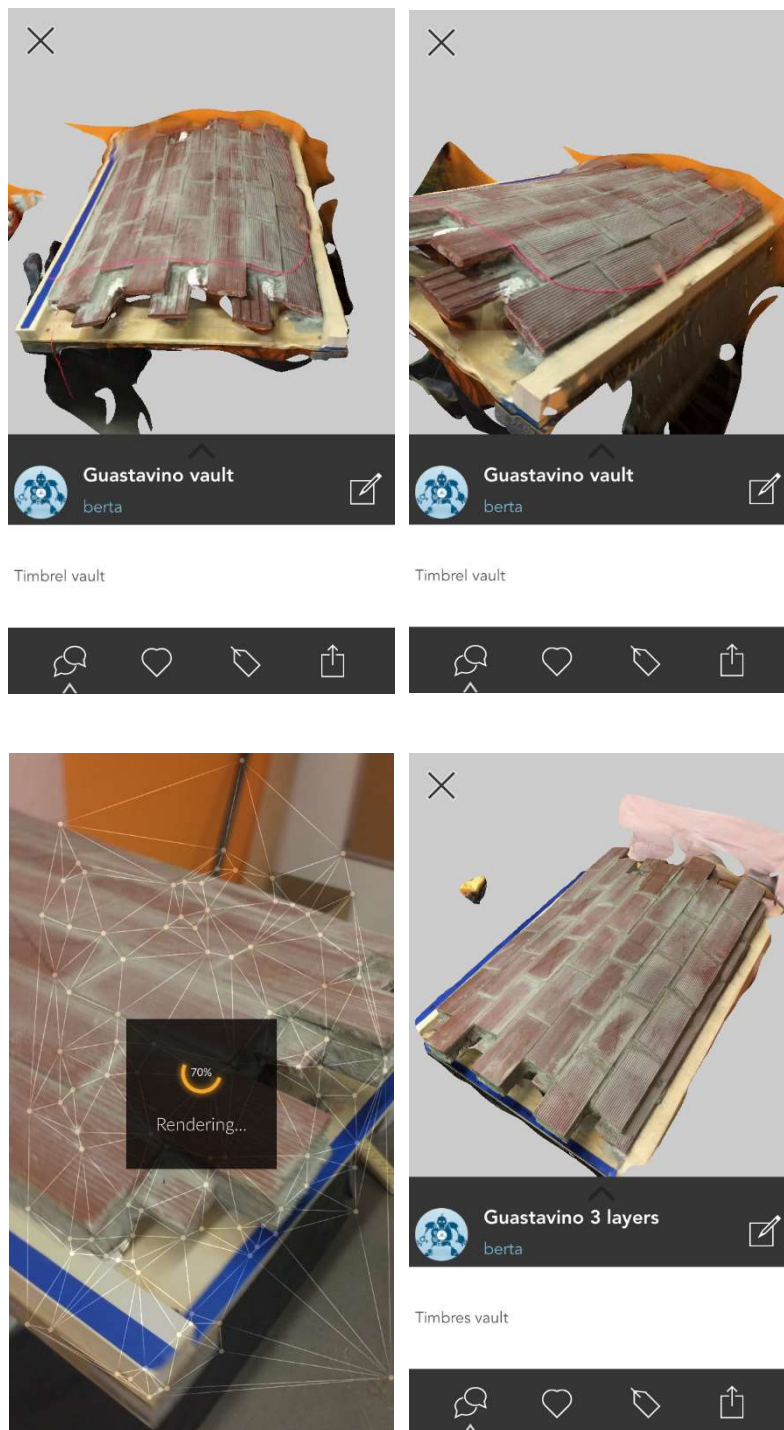


Figura 4.1-6 Capturas de pantalla del modelo 3D generado con la aplicación 123D Catch. Las dos fotos superiores corresponden a la fase 1 mientras que las dos inferiores pertenecen a la fase 2.



## 4.2. GEO-RADAR (GROUND PENETRATING RADAR -GPR-)

Se aplicó la técnica del GPR a la bóveda realizando escáneres desde el trasdós tanto en sentido longitudinal como en sentido transversal en ambas fases.

### 4.2.1. OBJETIVOS

El objetivo de aplicar GPR a la bóveda tabicada era comprobar la utilidad de esta técnica para detectar falta de adherencia entre los ladrillos de la primera y la segunda capa accediendo únicamente al trasdós de la bóveda.

### 4.2.2. METODOLOGÍA

En ambas fases se utilizó una antena de muy alta frecuencia, 2,6 GHz, porque la penetración que se necesitaba era pequeña (el espesor total de la bóveda en la Fase I era de aproximadamente 4,5 cm y en la Fase II de aproximadamente 6 cm), y a su vez es la que mejor resolución da por este mismo motivo.

El primer paso consistió en calibrar el sistema. Para ello se coloca una placa metálica bajo la bóveda. Al mismo tiempo se sitúa el transductor sobre la misma y se comienza un escaneo sin mover el transductor y moviendo la placa de arriba abajo. Esta operación genera un escaneo a partir del cual es posible averiguar la constante dieléctrica del elemento a estudiar si previamente conocemos el grosor del elemento (Figura 4.2-1). En este caso la constante dieléctrica resulta en un valor de  $\epsilon_r = 5,2$



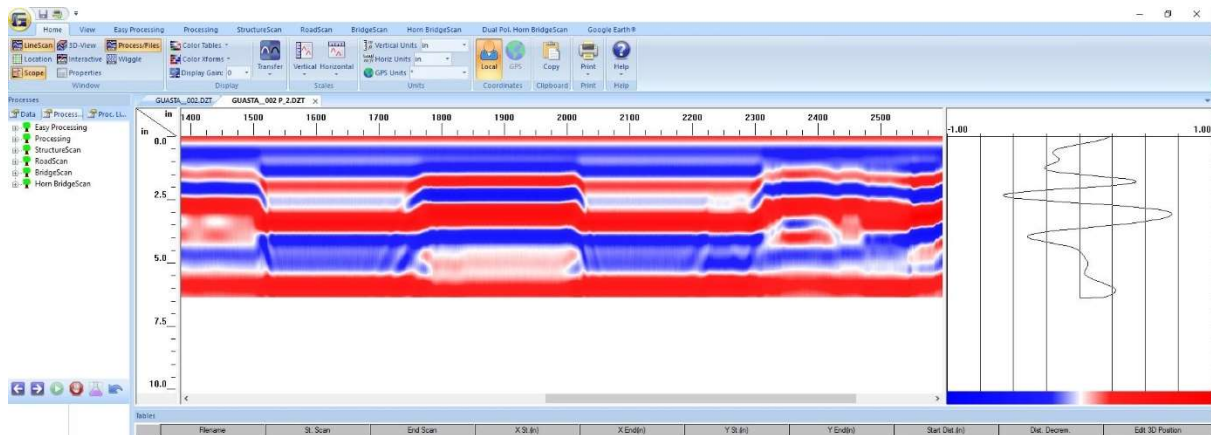


Figura 4.2-1 Radargrama resultante del proceso de calibración a partir del cual se haya el valor de la constante dieléctrica del material.

Aplicando la fórmula para resolver la velocidad de la onda electromagnética en dicho material ( $v_r$ )

Ecuación 4.2-1

$$v_r = c/\sqrt{\epsilon_r}$$

Donde,

$c$  es la velocidad de propagación en el vacío,  $3 \times 10^8$  m/s

$\epsilon_r$  es la constante dieléctrica o permitividad relativa del material.

Al mismo tiempo también será útil para interpretar los resultados la siguiente fórmula que despeja  $d$ , la distancia a un objetivo dentro del material:

$$d = \frac{v_r t_r}{2}$$

Donde,

$t_r$  es el tiempo de transito de la onda de y hasta el objetivo.

$\epsilon_r$  es la constante dieléctrica o permitividad relativa del material.

De todo lo anterior se extrae que la velocidad de propagación de la onda electromagnética en la bóveda tabicada es de  $0,115$  m/  $\mu$ s. La velocidad típica en ladrillo ronda los  $1,16$  m/  $\mu$ s por lo que el resultado es razonable.

En este caso existen dos posibilidades de toma de datos, en modo tiempo y en modo espacio. En modo tiempo, el aparato emite ondas constantemente por lo que el

operador debe tratar de mantener una velocidad constante en el movimiento de deslizamiento del transductor durante la lectura. Existe un pulsor cuya finalidad es generar en el radargrama una referencia. En este caso, cada vez que el operador atravesaba una junta, generaba una referencia que se visualiza como una fina línea de puntos en los radargramas lo cual facilita enormemente la lectura del radargrama.

El segundo método de toma de escáneres es por distancia; en este caso el aparato lleva acoplado un dispositivo en forma de rueda que detecta la distancia que va recorriendo el transductor y genera impulsos en relación a dicho movimiento de manera que si el transductor para deja de emitir impulsos.

En este caso se opta por el primer método por dos motivos; la superficie a escanear es muy reducida por lo que se requeriría un dispositivo muy preciso en el método de distancia. En segundo lugar, la existencia de juntas de distribución fija facilita el marcado de referencias en los radargramas proporcionando la localización necesaria.

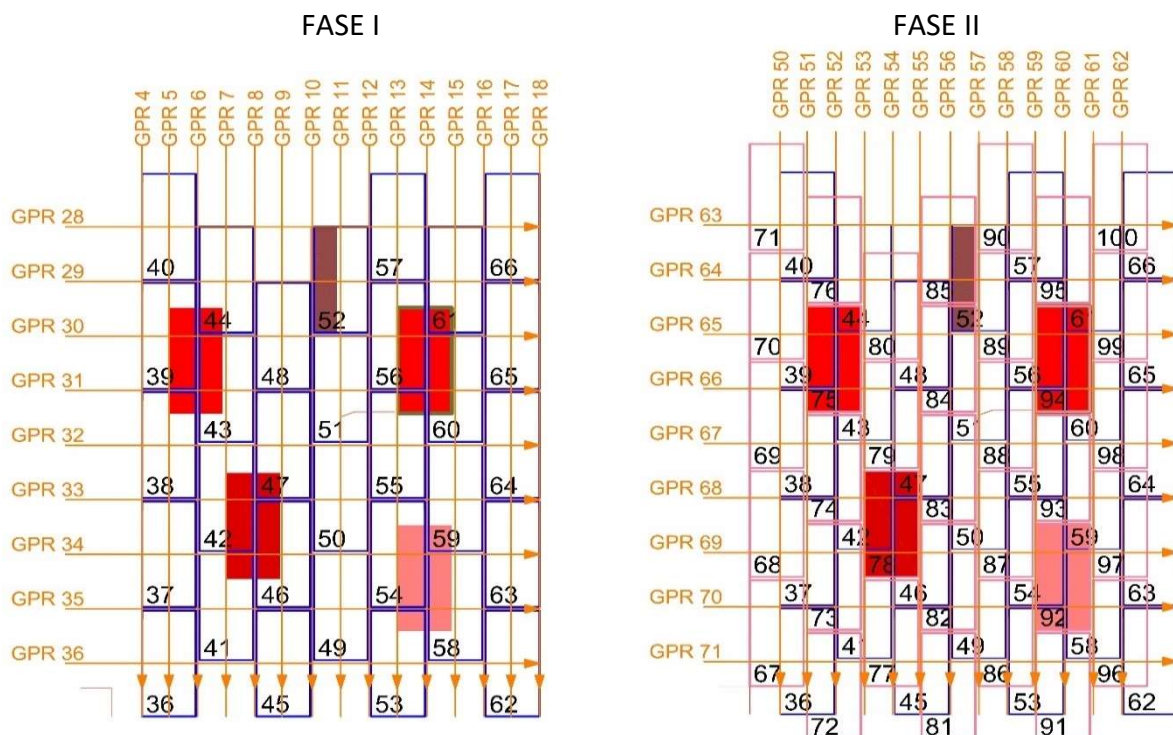


Figura 4.2-2 Esquema de distribución de los escáneres en la Fase I y en la Fase II. Las líneas azules representan los ladrillos de la segunda rosca mientras que las líneas salmón representan los ladrillos de la tercera rosca de ladrillo. Cada escáner queda representado con una flecha naranja indicando el número de archivo (GPR X).

En ambas fases se realizaron tanto escáneres longitudinales como escáneres transversales, en ese mismo orden, en cada junta y mitad de ladrillo en ambos sentidos, tal y como se muestra en la Figura 4.2-2.

Una vez obtenidos todos los radargramas se inicia, en ambas fases, el proceso de gestión de la información y elección filtros post test en el programa informático RADAN.

En primer lugar, se procedió a la reducción de escala en el eje x con el objetivo de que todo el escáner cupiese en una misma pantalla/hoja de impresión (tamaño 11x17”).

En segundo lugar, se ejecuta lo que se denomina *Time Zero*, que consiste en eliminar la parte del radargrama que se sitúa por encima de la superficie del material en estudio (Figura 4.2-3). Antes de realizar este paso, la lectura de distancia del eje “y” no es correcta, puesto que localiza el punto 0 por encima de la superficie del material.

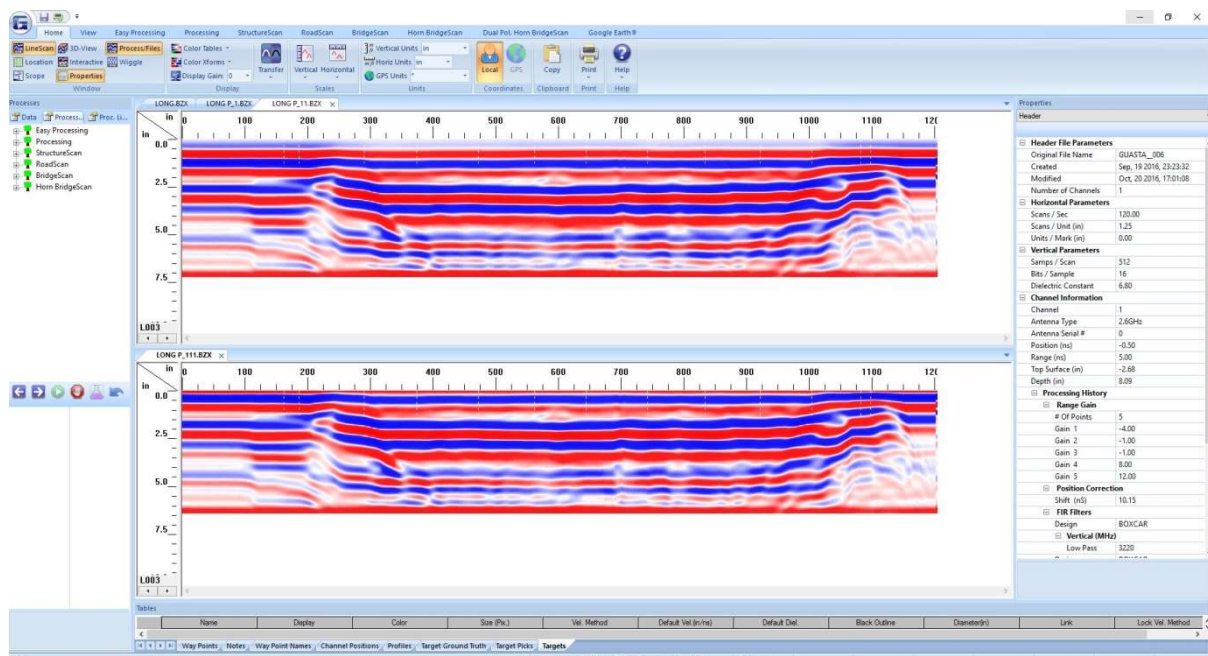


Figura 4.2-3 Radargrama antes y después de aplicarle el proceso *Time Zero* -Start pulse correction-.

El siguiente paso efectivo que se realizó consistió en lo que se denomina *background removal*, que consiste en la eliminación automatizada de todas las respuestas que el software considera que son reflexiones que no aportan información e incluso pueden ocultar información. Al ser un proceso automático, es importante no aplicarlo directamente sin valorar previamente si en ese caso concreto conviene aplicarlo, ya que también puede eliminar información que sea relevante, dependiendo del caso. Tras un estudio de 15 radargramas se concluyó que en este caso era beneficioso aplicar este filtro.

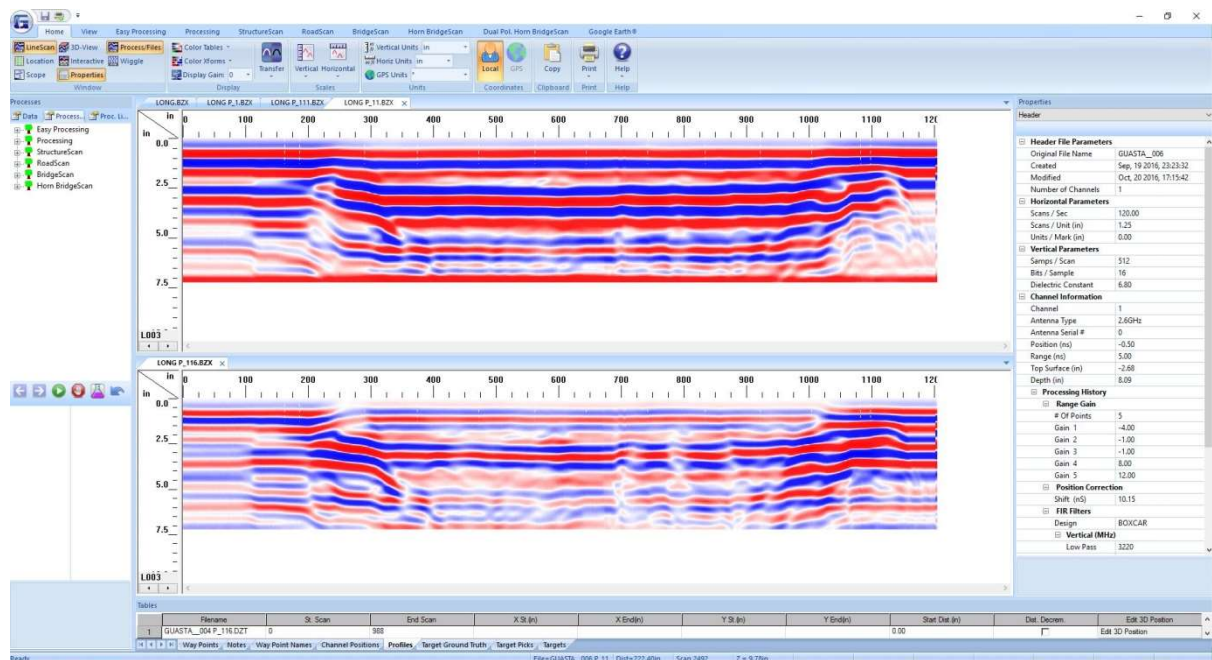


Figura 4.2-4 Antes (radargrama superior) y después (radargrama inferior) de la aplicación del filtro Background removal.

El último filtro a aplicar en este caso consiste en elegir aquellas respuestas cuya frecuencia de onda es la más apropiada en este caso, lo que se denomina filtro FIR. Si bien la frecuencia centro del emisor es 2,6 GHz, el rango total va de 1,3 GHz a 3,9 GHz. Los rangos aplicados fueron: 1,3-1,95 GHz, de 1,95-3,25 GHz, de 3,25-3,9 GHz y 1,6-4 GHz siendo este último el que mejores resultados obtuvo. De nuevo se observa que a mayor frecuencia mayor resolución.

En la interpretación de resultados es importante destacar lo que se denomina Edge effect, que es el efecto que provocan los bordes del material (en este caso la bóveda) en el radargrama. Dicho efecto debe identificarse para evitar interpretaciones erróneas.

Una vez aplicado el proceso de gestión y filtrado a todos los radargramas se observan zonas con un color más intenso que otras. A mayor amplitud de la señal recibida, mayor intensidad del color. Una mayor amplitud de señal responde a una mayor reflexión de la señal que a su vez responde a una mayor diferencia en la constante dieléctrica entre materiales en una interfase, lo cual ocurre en el caso de que haya presencia de aire fruto de una delaminación, por lo que estas áreas de color más intenso fueron analizadas con detalle (Figura 4.2-5). El análisis prestó especial atención tanto a las variaciones en la intensidad del color del gráfico cromático como variaciones en la amplitud capaces de generar variaciones cromáticas anómalas (Test FI GPR 29).



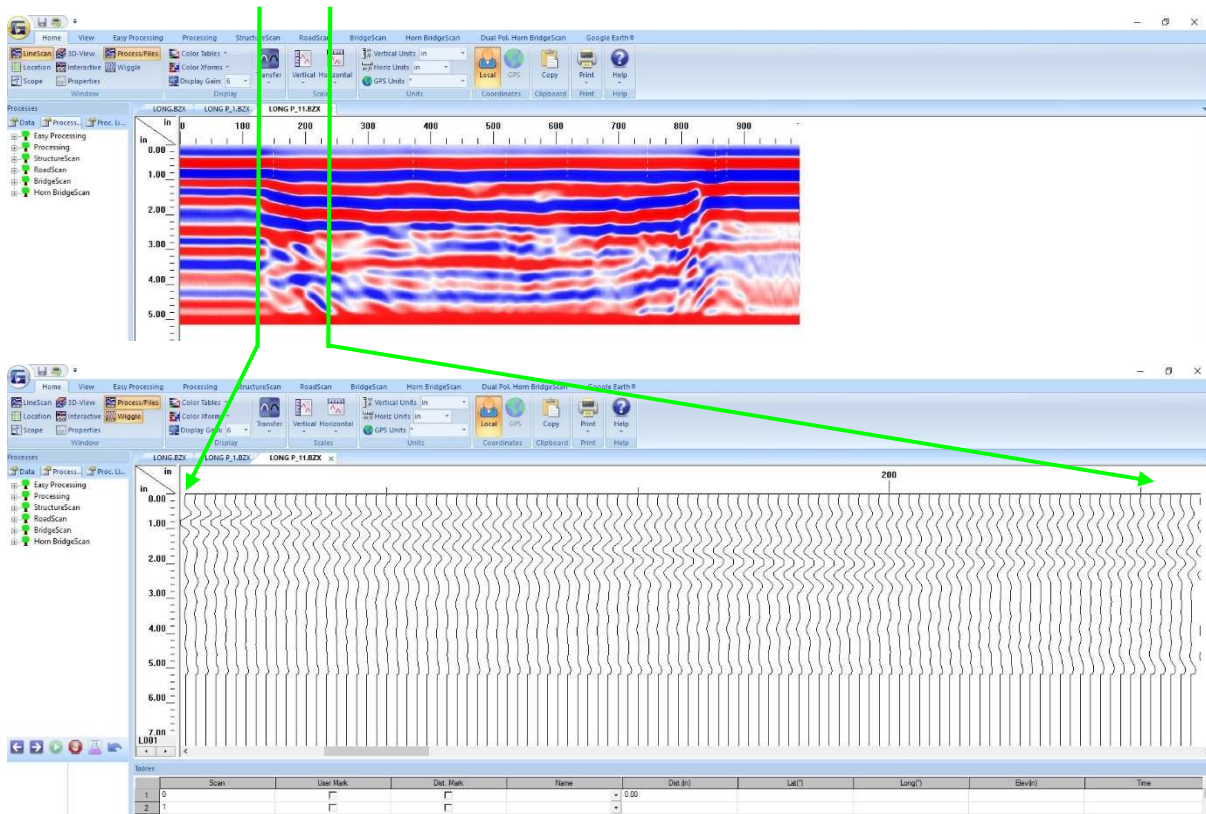


Figura 4.2-5 Las variaciones en el signo de la amplitud de la forma de la onda recibida (imagen inferior) son identificadas por el software aplicando variaciones cromáticas (imagen superior). A mayor intensidad en la amplitud de la onda recibida, mayor intensidad en el color de la representación gráfica-cromática. Las formas de onda de la imagen superior corresponden al tramo enmarcado en verde del radargrama de la imagen superior.

### 4.2.3. EQUIPO

#### Hardware

- Unidad de GPR GSSI SIR 3000
- Antena GSSI 2,6 GHz con emisor y receptor en la misma carcasa.
- ASUS 17.3" Republic of Gamers GL752VW para el post-procesado.

#### Software

- Software RADAN para el post-procesado.
- Sistema operativo Windows 10 para el post-procesado



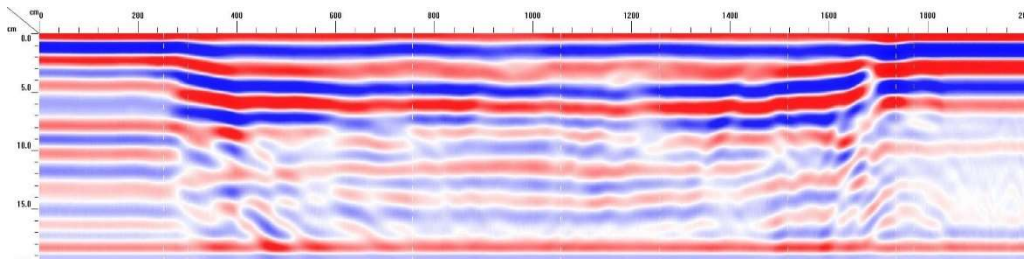
Figura 4.2-6 El equipo de GPR utilizado consta de 1. Unidad central GPR GSSI SIR 3000, 2. antena GSSI 2,6 GHz y 3. Emisor/receptor GSSI (S. Cole).



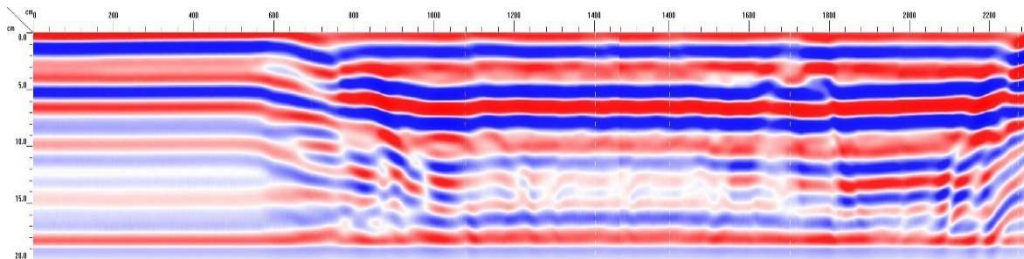
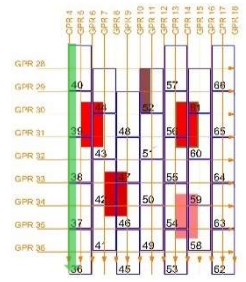
## 4.2.4. RESULTADOS

A continuación, se incluyen los radargramas longitudinales y transversales de la Fase I. Cada uno de ellos se localiza en una planta situada a la derecha de cada uno de ellos indicando su posición con una flecha verde. Las anomalías en dicha planta se representan en tonos rojizos.

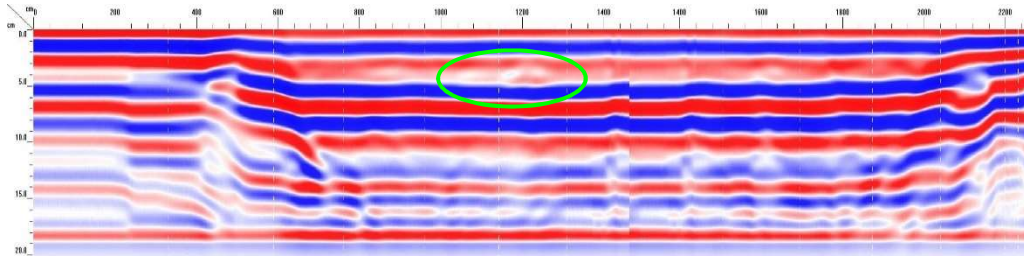
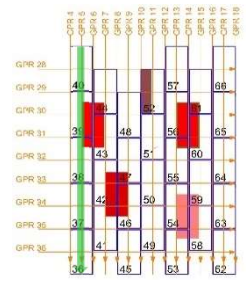
FASE I



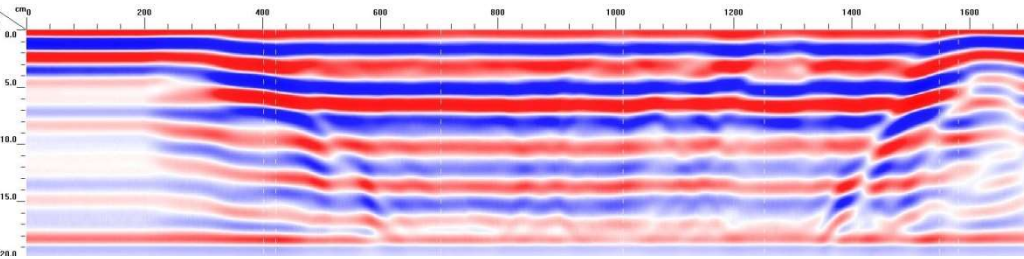
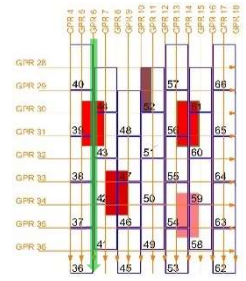
Test FI GPR 4



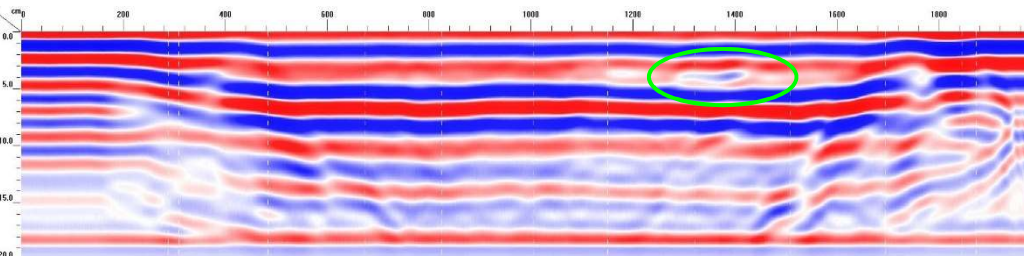
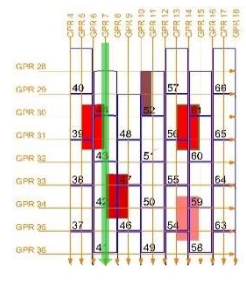
Test FI GPR 5



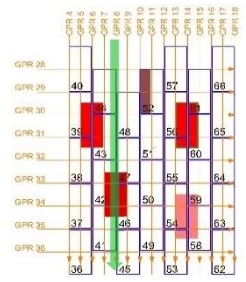
Test FI GPR 6



Test FI GPR 7

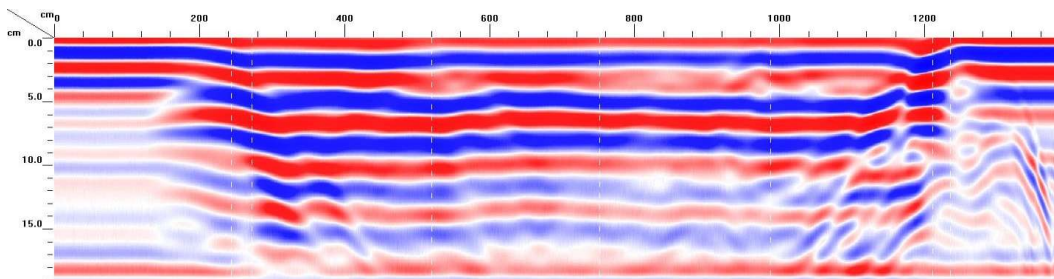


Test FI GPR 8

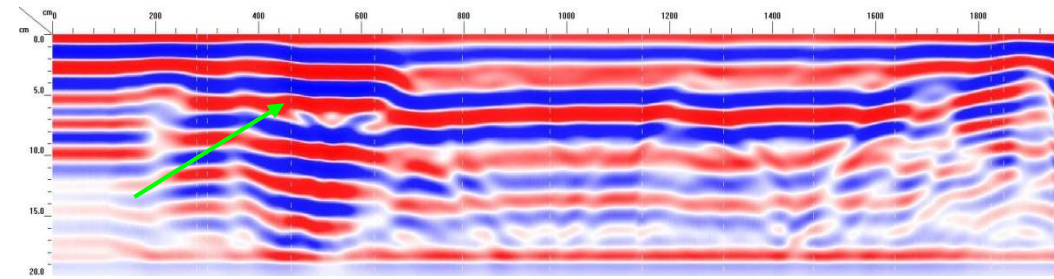
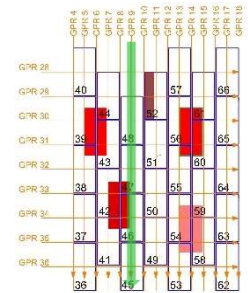




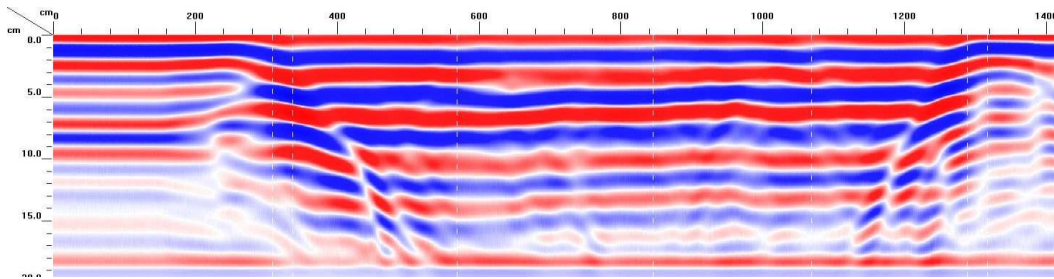
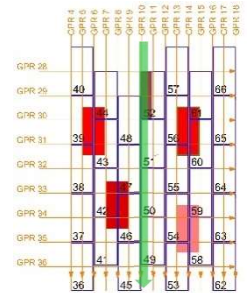
CAPÍTULO 4. Aplicación experimental de END a una bóveda de Guastavino



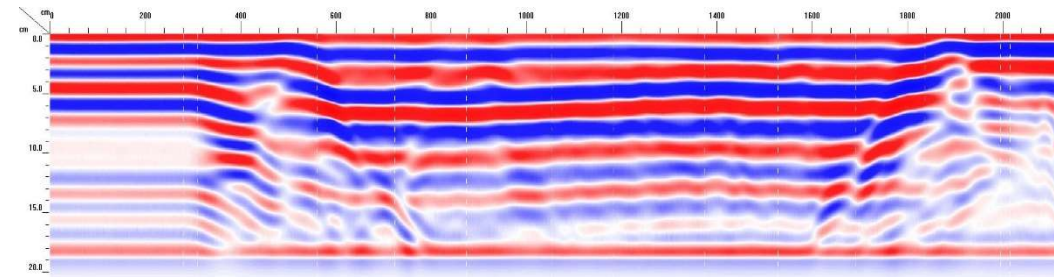
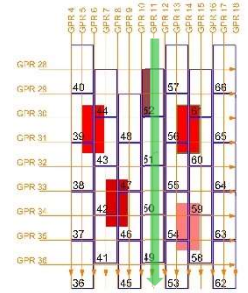
Test FI GPR 9



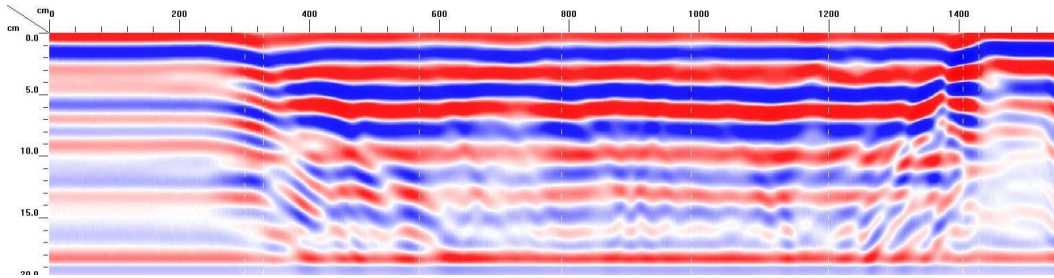
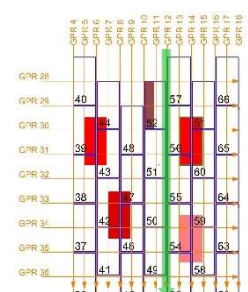
Test FI GPR 10



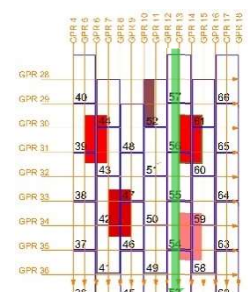
Test FI GPR 11



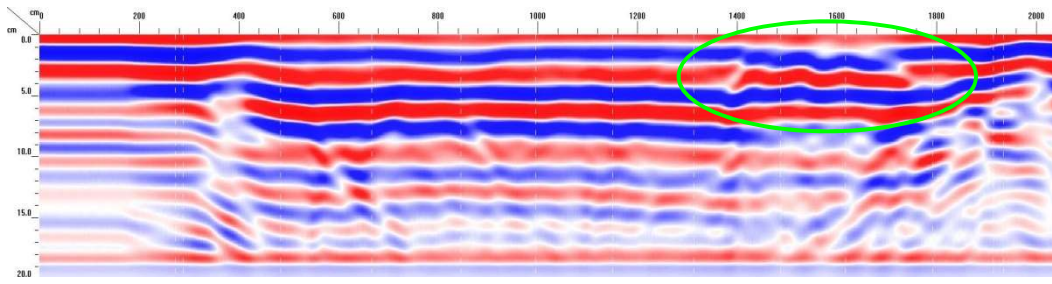
Test FI GPR 12



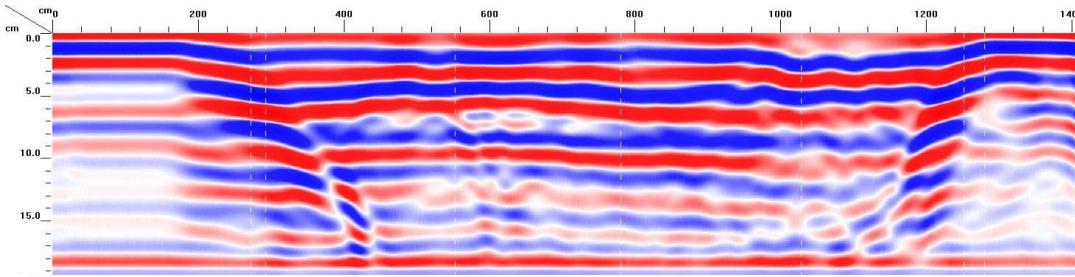
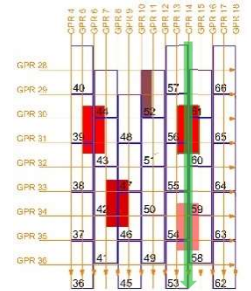
Test FI GPR 13



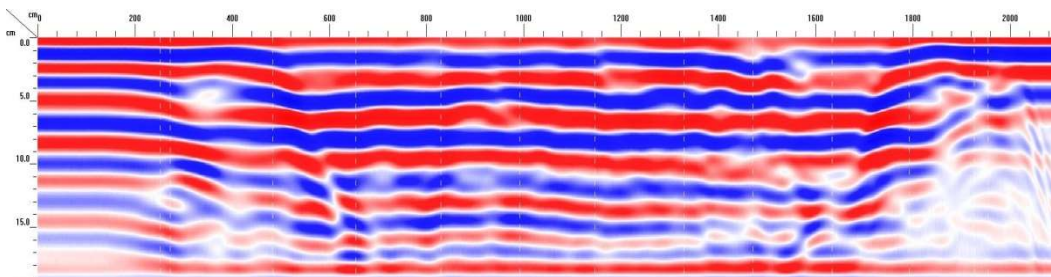
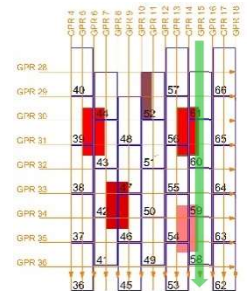




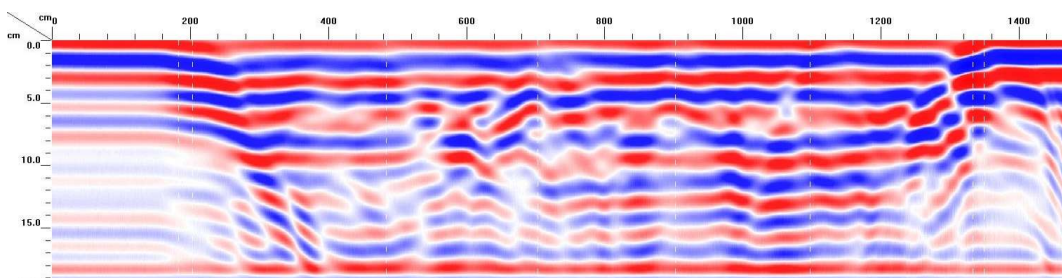
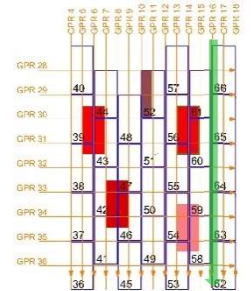
Test FI GPR 14



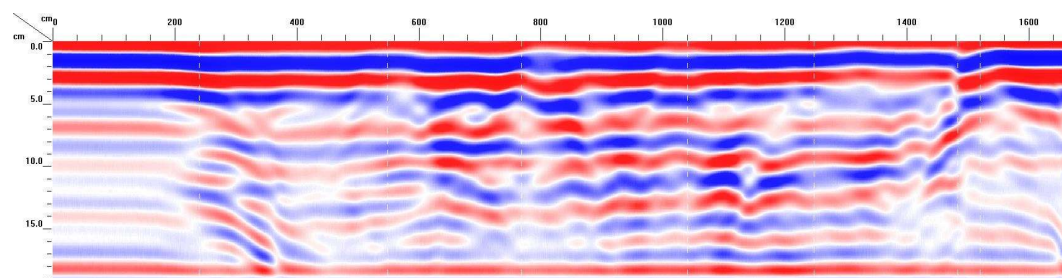
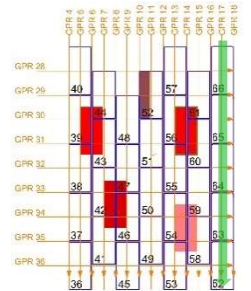
Test FI GPR 15



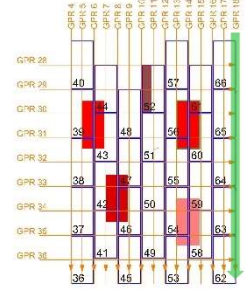
Test FI GPR 16



Test FI GPR 17

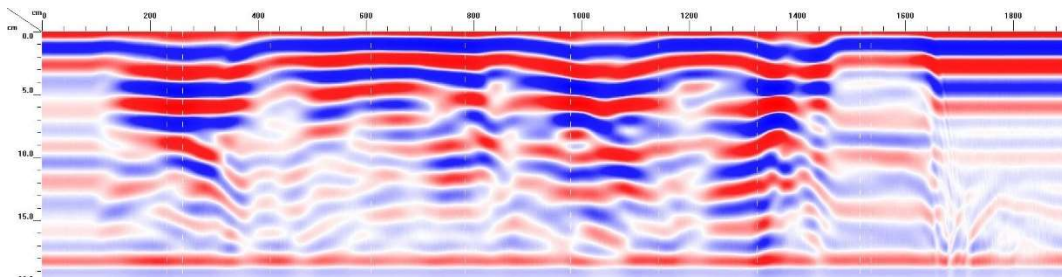


Test FI GPR 18

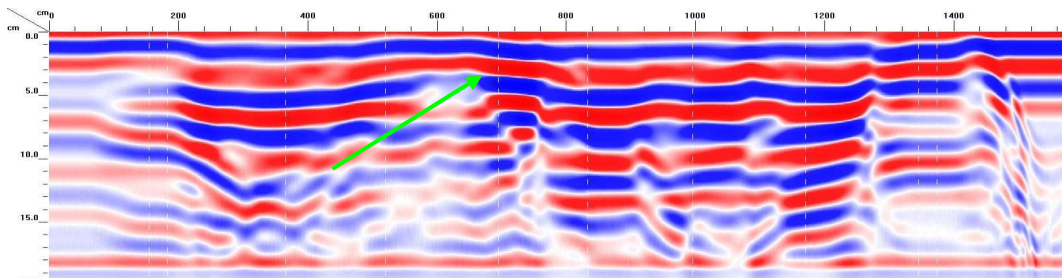
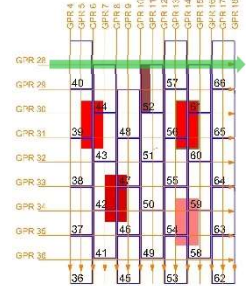




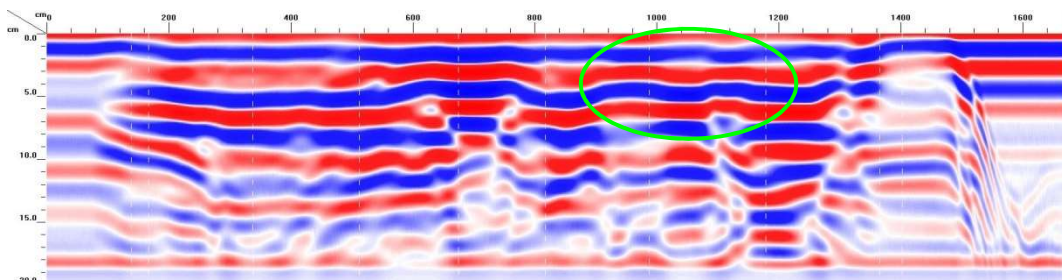
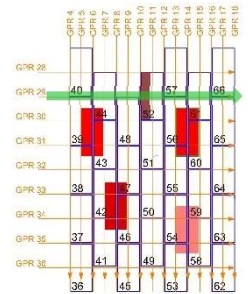
CAPÍTULO 4. Aplicación experimental de END a una bóveda de Guastavino



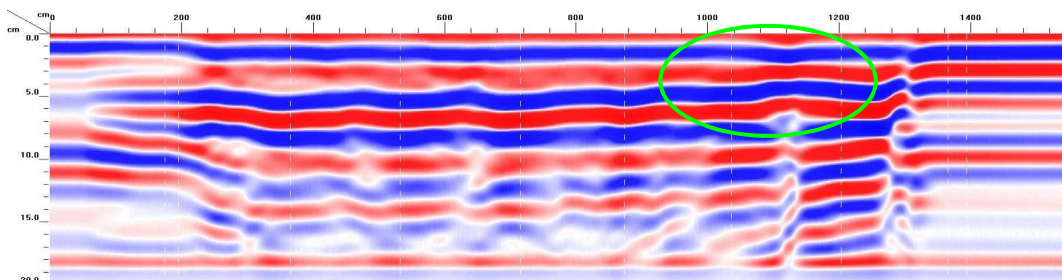
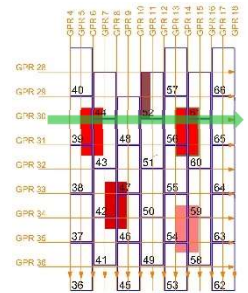
Test FI GPR 28



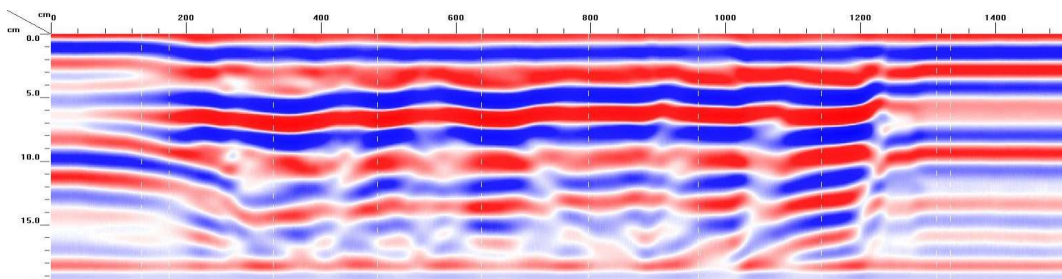
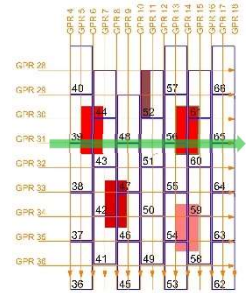
Test FI GPR 29



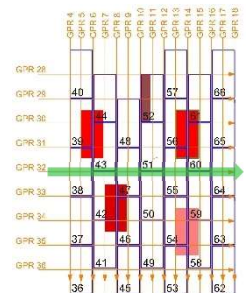
Test FI GPR 30



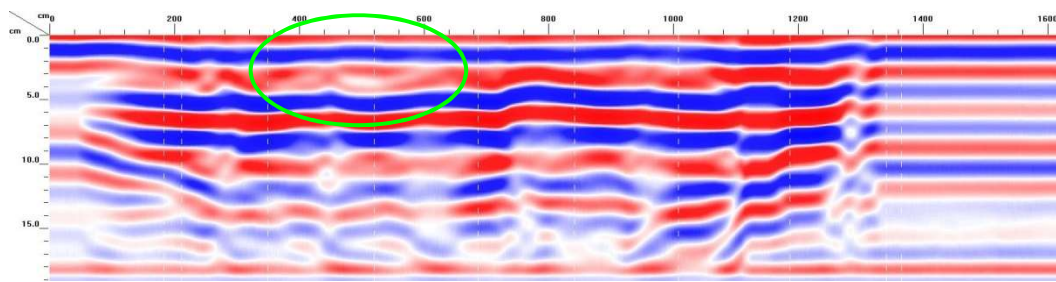
Test FI GPR 31



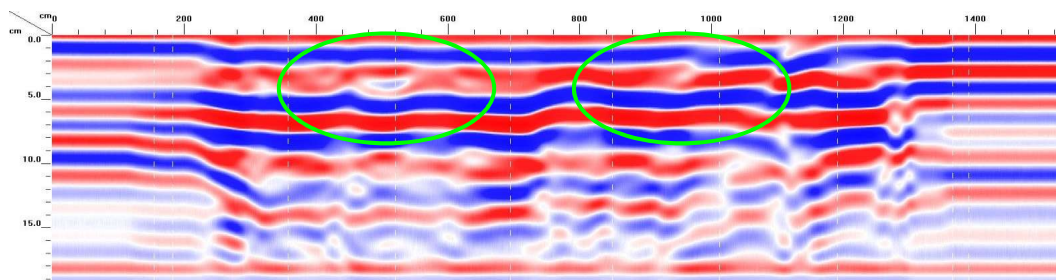
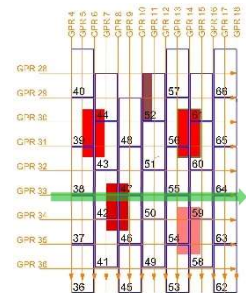
Test FI GPR 32



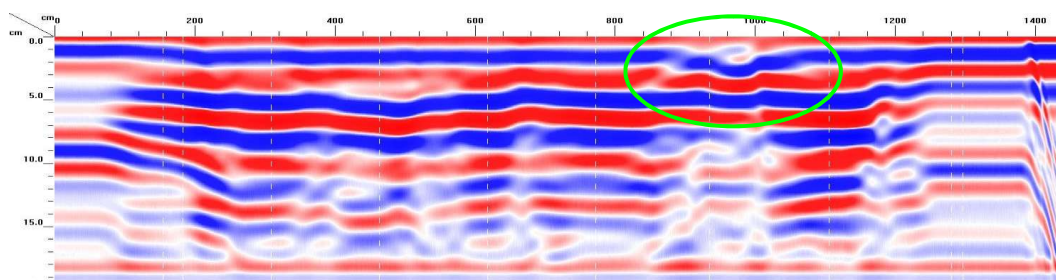
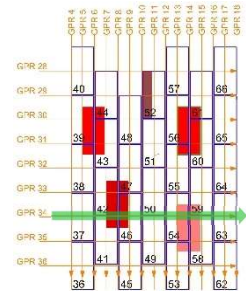




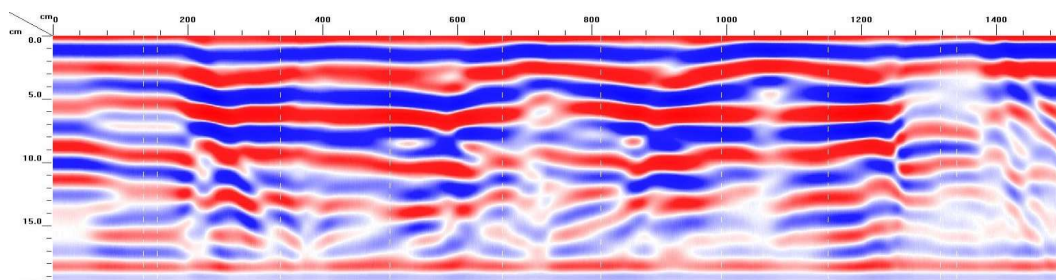
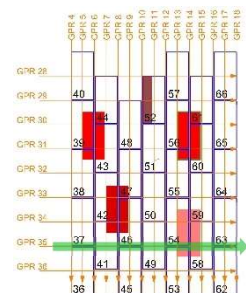
Test FI GPR 33



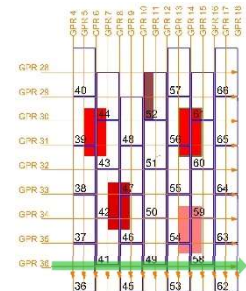
Test FI GPR 34



Test FI GPR 35



Test FI GPR 36



Los radargramas de la ronda de la Fase I arrojaron los siguientes resultados:

En el radargrama Test FI GPR 6 se observa una leve variación de color de rojo a azul en la posición que corresponde con la anomalía sobre el ladrillo 9 (marcado con un círculo verde). Lo mismo ocurre en el radargrama Test FI GPR 8, con más intensidad que en el ejemplo anterior.

La placa metálica insertada sobre el ladrillo 20 puede detectarse en los radargramas Test FI GPR 10 y Test FI GPR 29 (marcado con una flecha verde) gracias a una marcada intensidad en el color en esa zona. La reflexión en el metal es mayor, por lo que la amplitud también es mayor y el software lo refleja en la intensidad del color. En el radargrama Test FI GPR 14 cabría esperar alguna variación entre la segunda y tercera traza de puntos (equivalente a las juntas) correspondiente a la anomalía sobre el ladrillo 29, sin embargo, no es así. Conviene recordar que la anomalía insertada sobre el ladrillo 29 es idéntica a la del ladrillo 9 (que tímidamente es detectada por este test en el Test FI GPR 6) acentuada por la ausencia de juntas con los ladrillos colindantes. Sin embargo, por motivos desconocidos, el test no la detecta. Sin embargo, en este mismo radargrama Test FI GPR 14 se detecta claramente la anomalía sobre el ladrillo 27 (marcada con un círculo verde). La respuesta es clara. En el Test FI GPR 30 deberían observarse dos anomalías, sin embargo, la correspondiente al ladrillo 9 pasa desapercibida, y la que corresponde al ladrillo 29 presenta cierta variación en la intensidad del color, si bien no es concluyente (señalado con círculo verde). Lo mismo exactamente puede decirse del Test FI GPR 31. La anomalía sobre el ladrillo 12 puede intuirse en el Test FI GPR 33 y con más claridad en el Test FI GPR 34 con una variación en el color de la reflexión (marcado con círculo verde). En este último radargrama también se marca con un círculo una respuesta anómala sobre el ladrillo 27. La calidad de la variación cromática y morfológica no es suficiente como para determinar la presencia de pérdida de adherencia. Lo mismo puede decirse de la misma localización en el radargrama siguiente, el Test FI GPR 35.

Obsérvese que en el radargrama Test FI GPR 30 de la Figura 4.2-7, el test diferencia a través de la intensidad del color resultante tras aplicar el test de *background removal*, la posición de las juntas de la segunda hoja. Esto puede deberse a que la variación en la constante dieléctrica del mortero con respecto al ladrillo aumenta la amplitud de la onda electromagnética reflejada, y por tanto la intensidad del color.

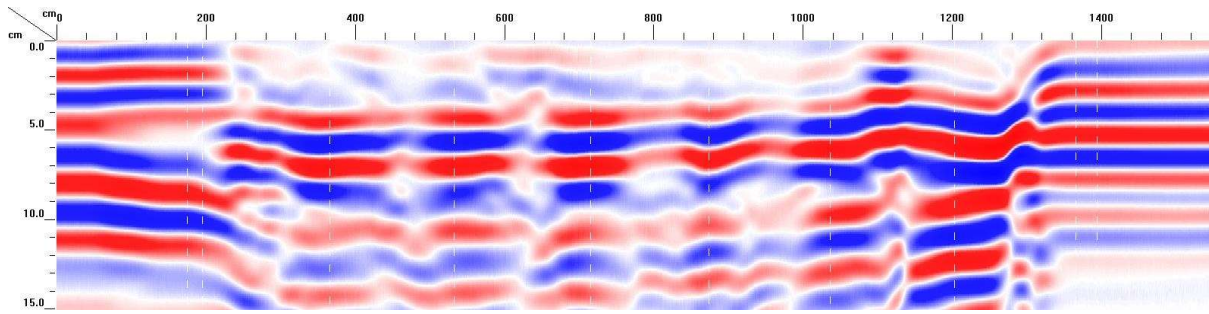
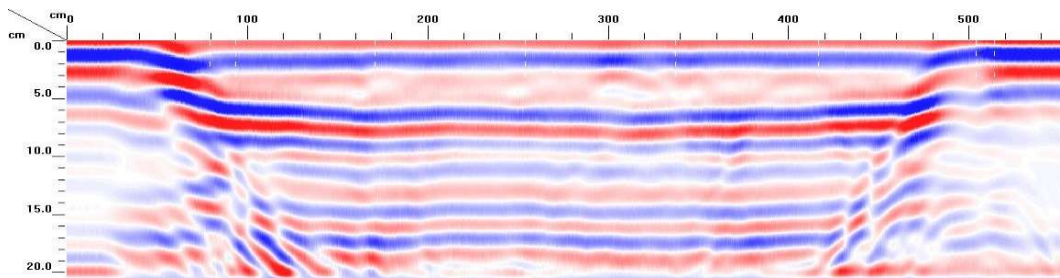


Figura 4.2-7 Radargrama Test FI GPR 30 tras aplicar el filtro de background removal. El test diferencia mediante intensidad de color las juntas, coincidentes con las líneas punteadas blancas. Sólo sucedió con esta claridad en este caso.

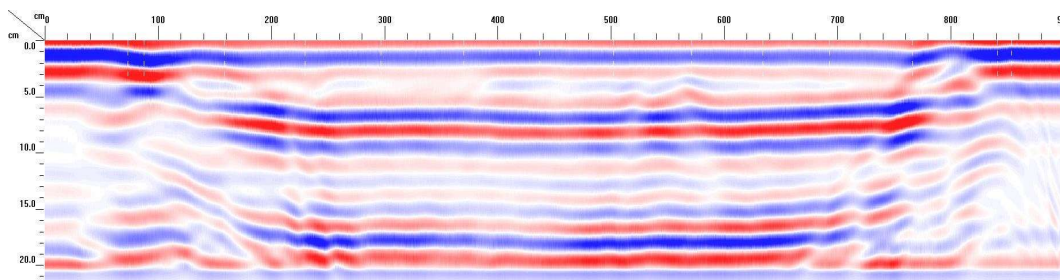
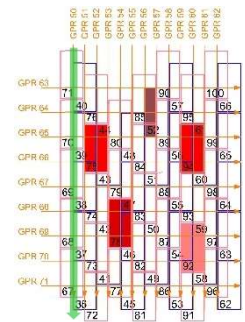
A continuación, se incluyen los radargramas longitudinales y transversales de la la Fase II. Cada uno de ellos se localiza en una planta situada a la derecha de cada uno de ellos indicando su posición con una flecha verde. Las anomalías en dicha planta se representan en tonos rojizos.



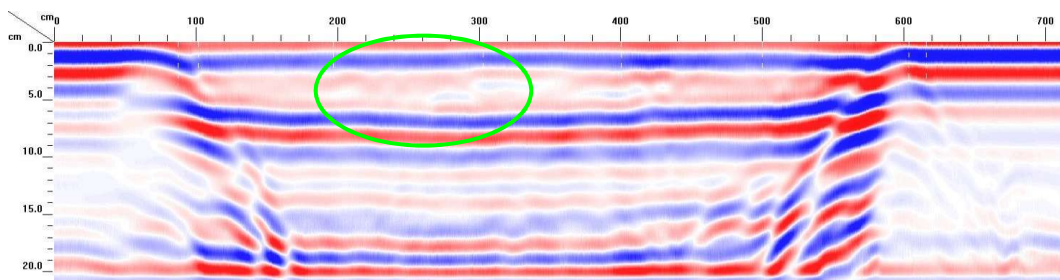
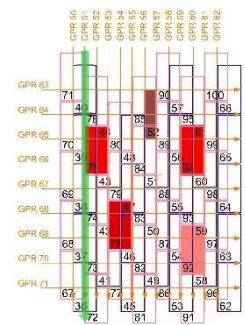
FASE II



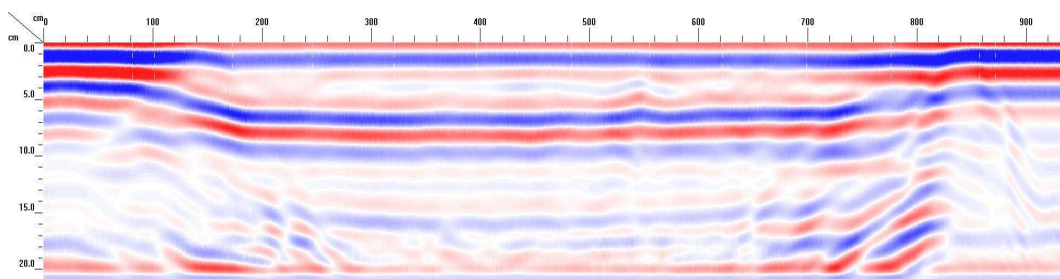
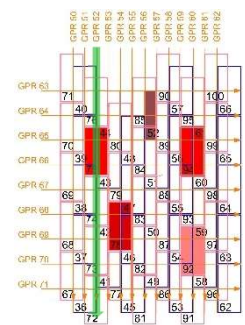
Test FII GPR 50



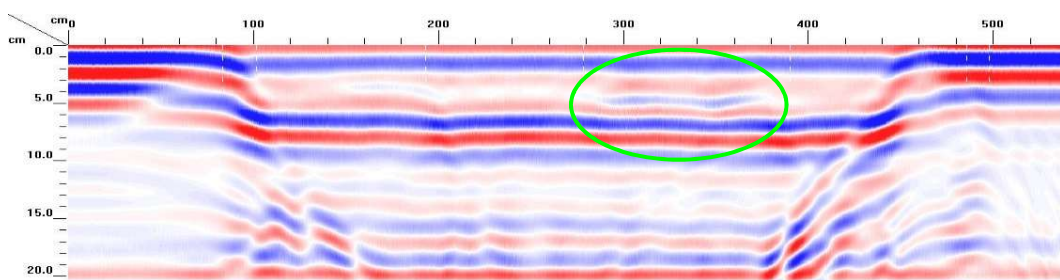
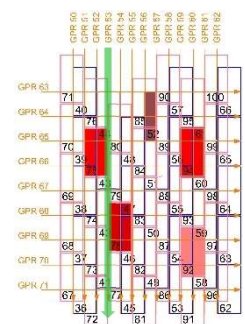
Test FII GPR 51



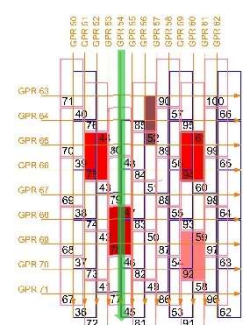
Test FII GPR 52



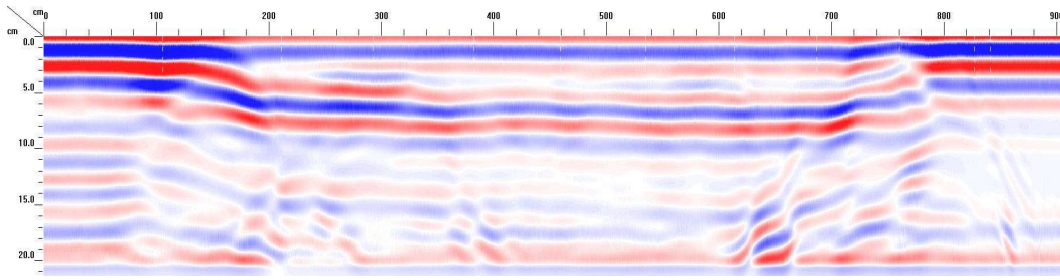
Test FII GPR 53



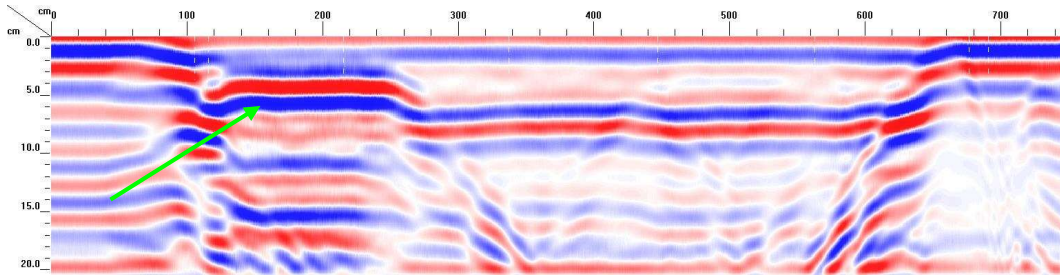
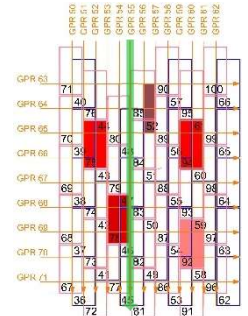
Test FII GPR 54



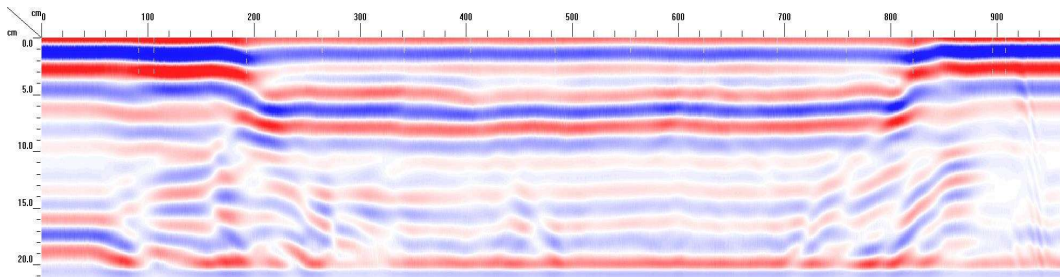
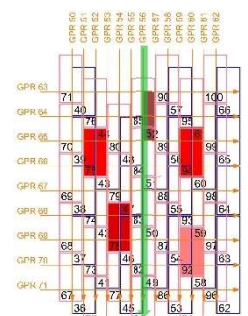




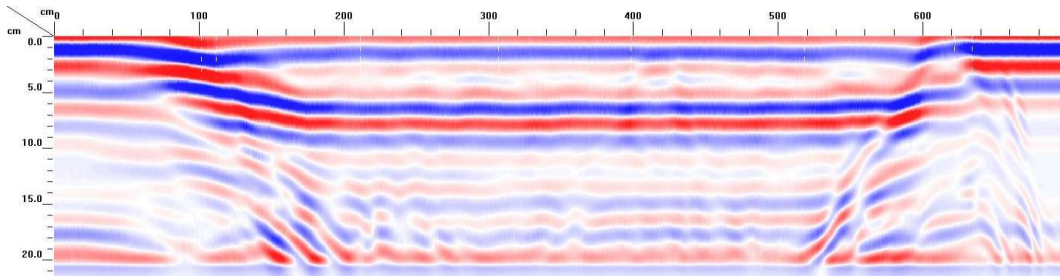
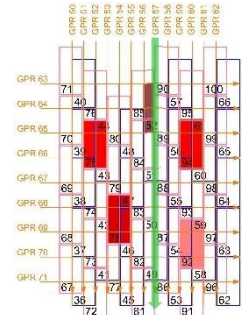
Test FII GPR 55



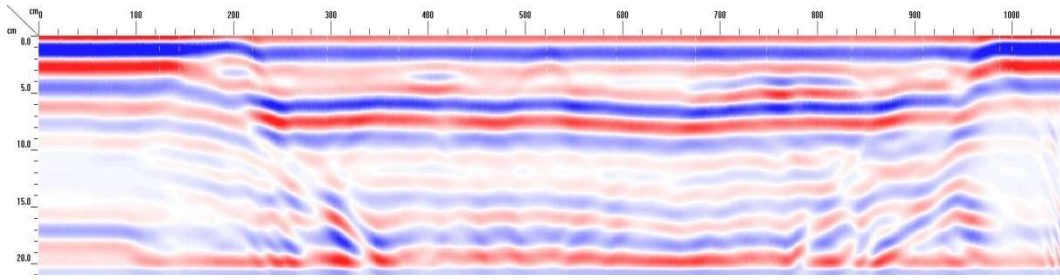
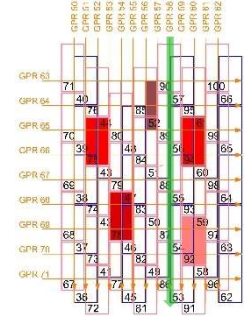
Test FII GPR 56



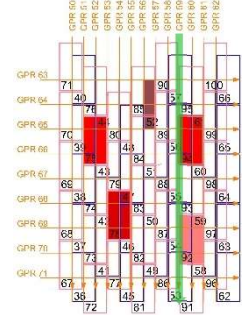
Test FII GPR 57



Test FII GPR 58

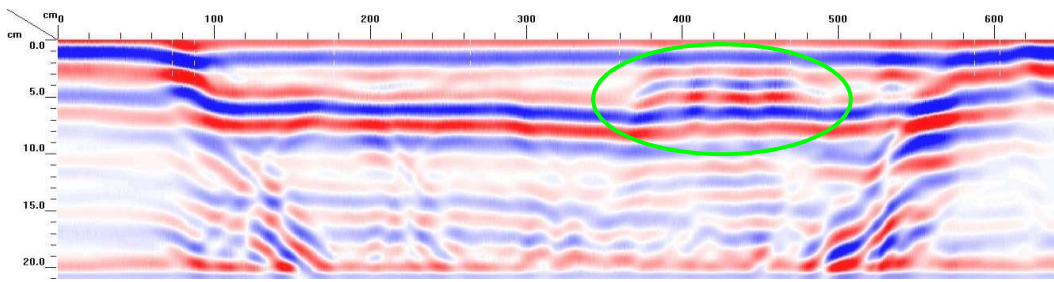


Test FII GPR 59

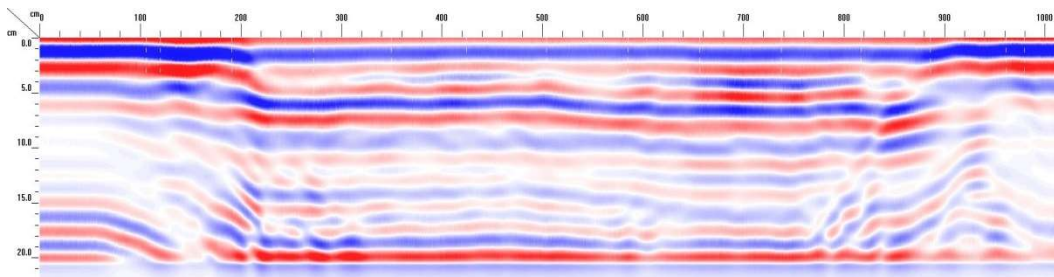
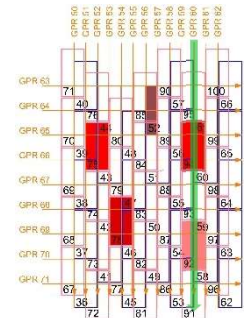




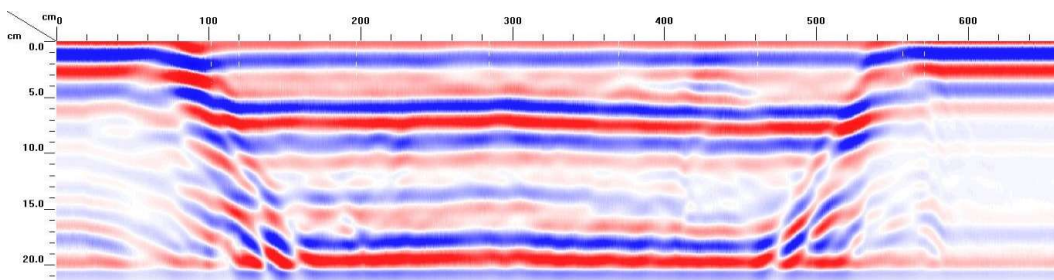
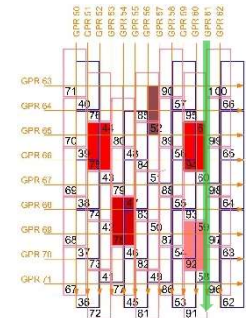
CAPÍTULO 4. Aplicación experimental de END a una bóveda de Guastavino



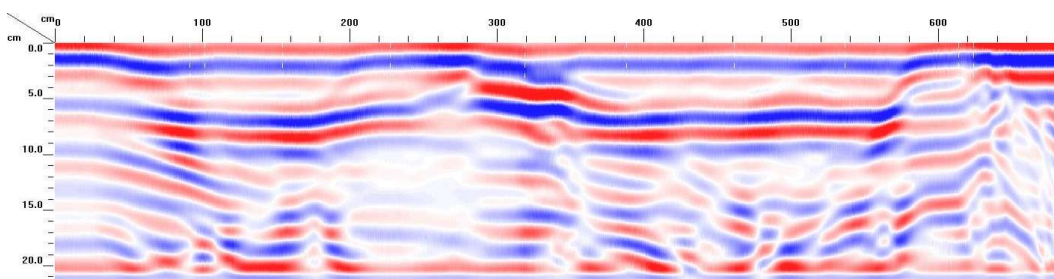
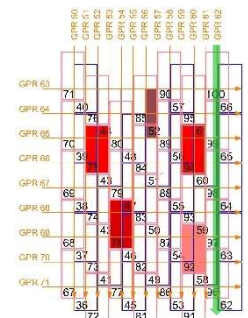
Test FII GPR 60



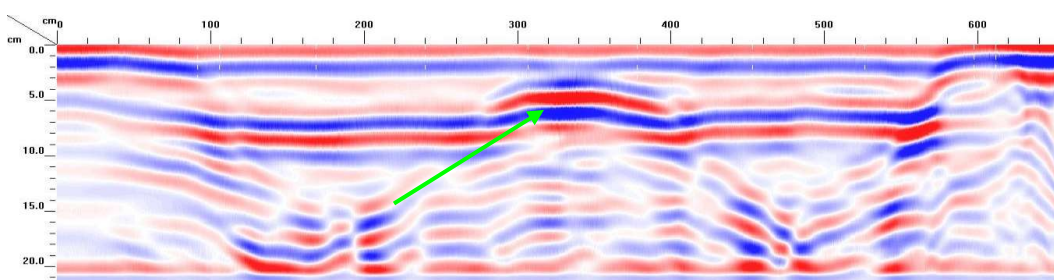
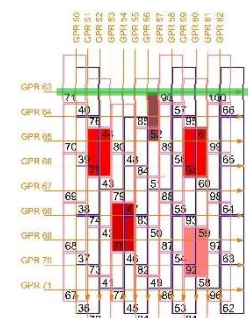
Test FII GPR 61



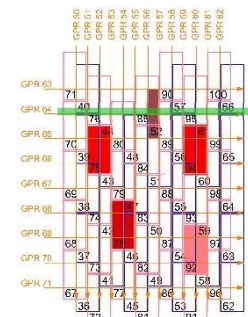
Test FII GPR 62



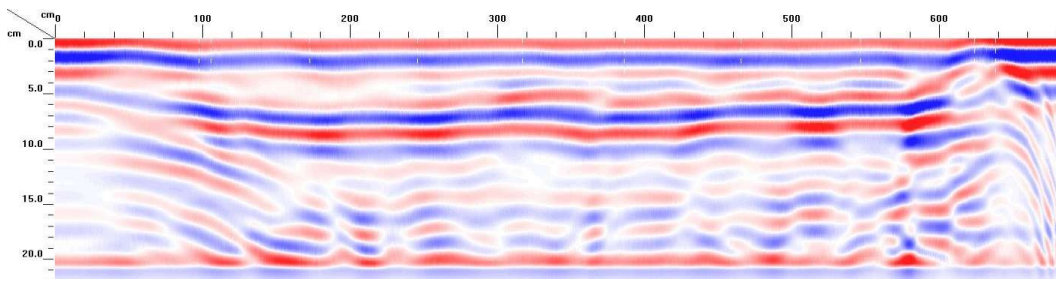
Test FII GPR 63



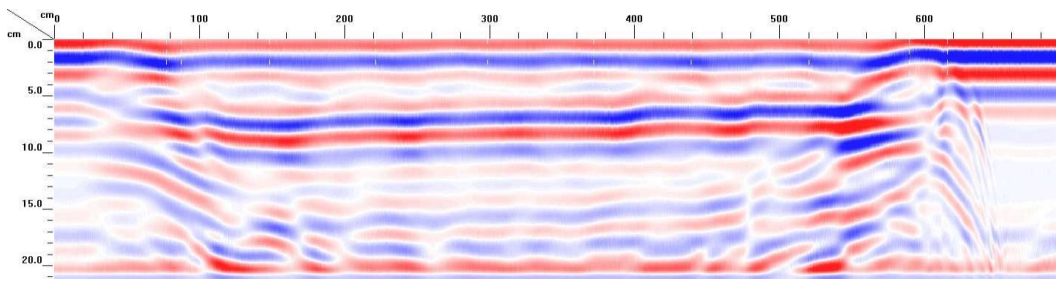
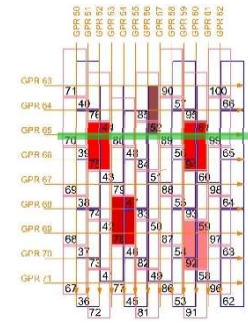
Test FII GPR 64



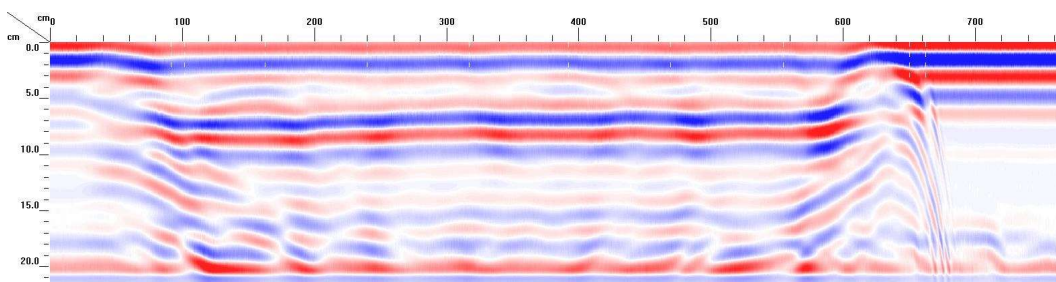
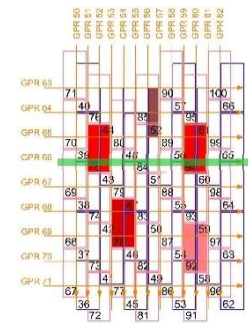




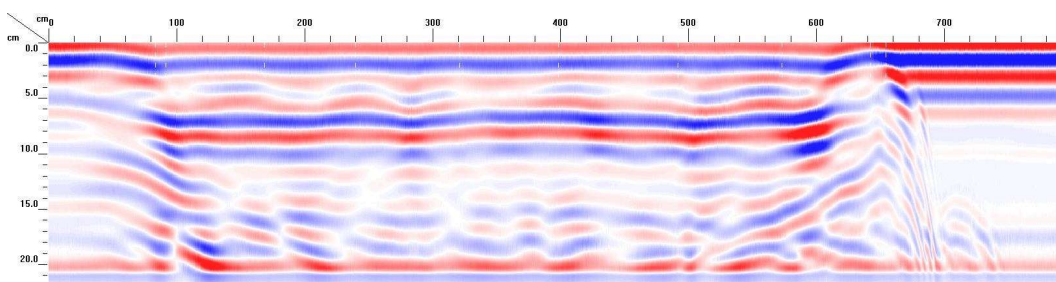
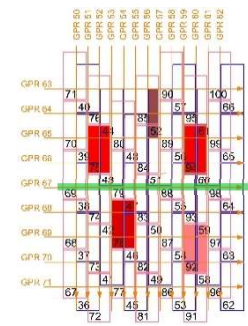
Test FII GPR 65



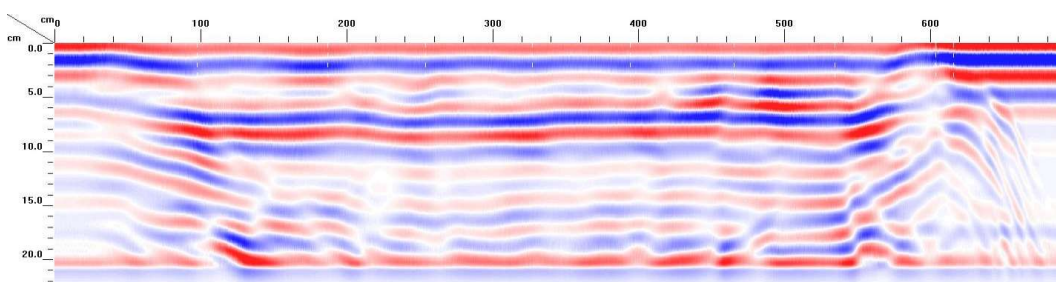
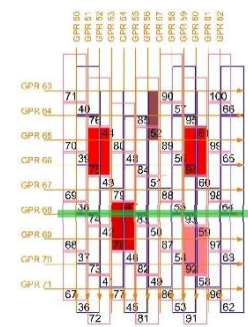
Test FII GPR 66



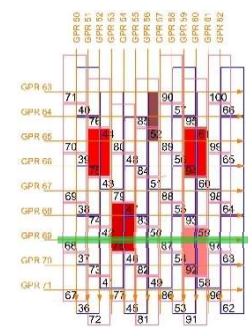
Test FII GPR 67

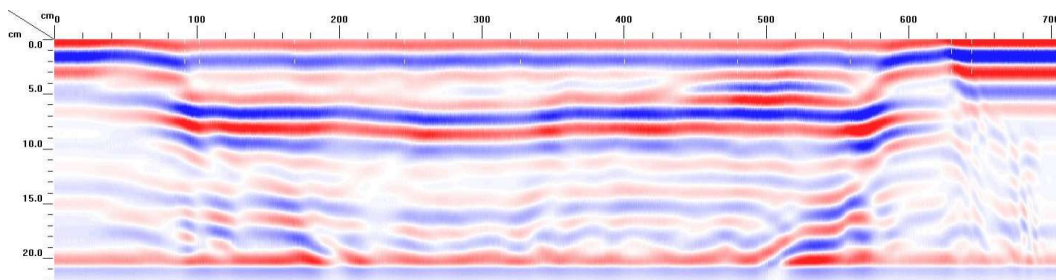


Test FII GPR 68

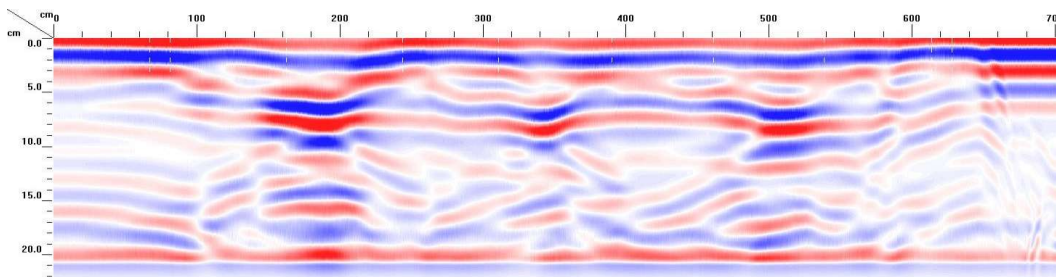
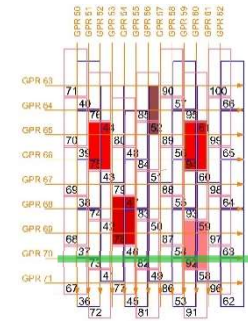


Test FII GPR 69

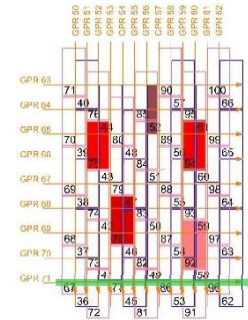




Test FII GPR 70



Test FII GPR 71



La anomalía sobre el ladrillo 9 no se detecta en el Test FII GPR 52 como cabría esperar. La anomalía sobre el ladrillo 12 sí que es posible intuir la analizando el radargrama Test FII GPR 54 (ambas marcadas con un círculo verde). La pletina metálica sobre el ladrillo 20 puede detectarse analizando la variación en la intensidad de color de los radargramas Test FII GPR 56 y Test FII GPR 64 (señalado con una flecha verde). El radargrama Test FII GPR 60 pasa por dos anomalías, sin embargo, solo una de ellas, la correspondiente a la del ladrillo 27 queda claramente reflejada en el radargrama; la correspondiente al ladrillo 27 pasa desapercibida. Las anomalías sobre los ladrillos 9 y 29 no se detectan ni en el radargrama Test FII GPR 65 ni en el Test FII GPR 66, ya que, si bien parece percibirse cierta variación morfológica, la intensidad del color no detecta variación alguna en la intensidad de la amplitud de la onda recibida. Exactamente lo mismo puede decirse de la anomalía sobre el ladrillo 9 en el radargrama Test FII GPR 68. Sí que se detecta de nuevo la anomalía sobre el ladrillo 27 en los Test FII GPR 69 y Test FII GPR 70 debido a una variación contundente de la intensidad del color del radargrama en el área correspondiente a la anomalía.

## 4.2.5. REFLEXIONES

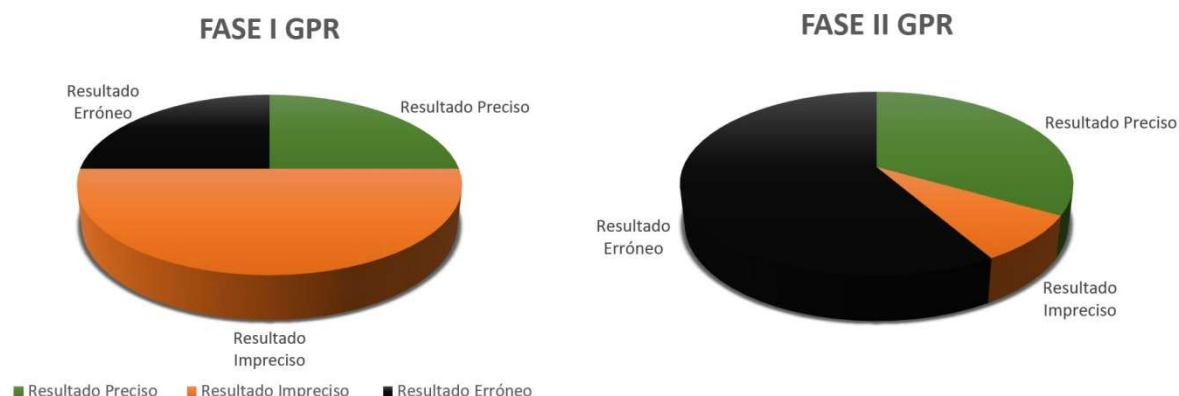


Figura 4.2-8 Representación gráfica de los resultados de la aplicación de la técnica del GPR para detectar pérdida de adherencia entre roscas de ladrillo en la bóveda tabicada para las fases I y II.

- La única anomalía detectada en ambas fases tanto en los escáneres longitudinales como en los transversales es la lesión sobre el ladrillo 27. La pérdida de adherencia en esa localización es la que mayor cámara de aire presenta, de lo cual se deduce que, a mayor espesor de la cámara de aire generada por la pérdida de adherencia, más posibilidades existen de que sea detectada por la técnica del GPR.
- Las anomalías sobre los ladrillos 9 y 29 son levemente detectadas o no detectadas, posiblemente por el mismo motivo, el espesor de la cámara de aire de dichas lesiones es muy reducido.
- En todos los radargramas realizados en la zona donde se insertó la pletina de acero, se observa perfectamente la variación morfológica y en intensidad del color que permite detectar la existencia y localización de la misma. Comparando esta respuesta con la registrada en los radargramas de la lesión sobre el ladrillo 27 (correspondiente a los mejores resultados del test de este tipo de lesión en este caso) se deduce que, si bien la técnica puede ser útil, los resultados no son tan precisos como lo son en la detección de inclusiones metálicas.
- Una limitación es que para realizar la calibración del sistema y calcular la constante dieléctrica, es necesario conocer previamente el espesor de la bóveda.
- El proceso de obtención del conjunto de filtros más efectivos es un proceso lento que debe ser realizado por un técnico experimentado con formación específica. Sin embargo, una vez planificada la investigación por un experto, la ejecución



de la toma de datos puede ser realizada por personal no especializado con una breve sesión de formación en el funcionamiento del aparato.

- El resultado es subjetivo y está sujeto a la interpretación del quien realiza el análisis.
- El marcado de las juntas por el procedimiento manual del pulsor puede dar lugar a error. Sería recomendable el método de distancia si se dispone de un medidor de recorrido de gran precisión.
- A la vista de los resultados positivos, sería recomendable continuar con la investigación de GPR para la detección de pérdida de adherencia entre ladrillos de roscas contiguas en bóvedas tabicadas, ampliando el rango de la investigación: aumentando el número de muestras, probando antenas de mayor resolución y otras variaciones en la técnica tanto en el post-procesado como en la toma de datos.



## 4.3. TERMOGRAFÍA INFRARROJA (INFRARED THERMOGRAPHY -IRT-)

Se aplicaron los dos tipos de termografía a la bóveda: termografía pasiva y termografía activa. A su vez se aplicaron tres métodos diferentes de termografía activa en la Fase I y dos en la Fase II, dependiendo del tipo de la fuente de calor aplicado, así como de la localización del foco (intradós y trasdós de la bóveda).

### 4.3.1. OBJETIVOS

El objetivo de aplicar IRT a la bóveda tabicada era comprobar la utilidad de esta técnica para detectar falta de adherencia entre los ladrillos de la primera y la segunda capa.

### 4.3.2. METODOLOGÍA

Se realizó una ronda de tests en la Fase I y otra ronda de tests en la Fase II, ambos explicados detalladamente en este apartado. En la ronda de la Fase I se realizaron: los tests TP (trasdós pasiva), TACT (trasdós activa contacto), TACV (trasdós activa convección) y IACV (intradós activa convección), mientras que en la ronda de la fase II se realizaron: los tests TP (trasdós pasiva), TACT (trasdós activa contacto) y TACV (trasdós activa convección).

El primer paso consistió en calcular la emisividad del ladrillo. Para ello se colocó un cuerpo negro en la superficie de la bóveda y se midió su temperatura, la cual coincide con la temperatura ambiente del laboratorio. El cuerpo negro utilizado fue un pedazo de 4 centímetros de cinta aislante negra mate. A continuación, se tomó un termograma que incluyese el cuerpo negro. En los parámetros de la cámara se fijó la emisividad a 1 y la temperatura. A continuación, se mueve la cámara hacia un punto de la superficie de emisividad desconocida y se baja la

emisividad hasta que la temperatura coincida con el valor conocido de la temperatura. Cuando coincide, ese es el valor de la emisividad.

$T$  de la bóveda =  $T$  del laboratorio = 22,4 °C

Emisividad del cuerpo negro: 1

Resultante de la emisividad del ladrillo de la bóveda: 0,81



Figura 4.3-1 Las fotografías muestran diferentes fases en el método de la obtención de la emisividad de la superficie de la bóveda.

- Colocación de la cámara desde el trasdós:

El segundo paso consistió en la elección de la posición de la termocámara y su instalación. Antes de la construcción de la bóveda se tuvo en cuenta este factor de manera que pudiese instalarse un trípode sobre la misma y al mismo tiempo la altura fuese tal que fuese posible tomar imágenes desde el intradós; sin embargo, no fue posible construir la bóveda de manera que la distancia de la termocámara a la bóveda fuera la misma desde el trasdós que desde el intradós. De este modo, la distancia entre la termocámara y la superficie de la bóveda en el trasdós era de 1,55 m y la distancia entre la termocámara y la superficie de la bóveda en el intradós, de 0,35 m (Figura 4.3-2). Este hecho obligó a variar la metodología y presentación de resultados de los tests dependiendo de si se realizaban desde el trasdós o desde el intradós. Se primó en todo momento el acceso por el trasdós dado que el objetivo era

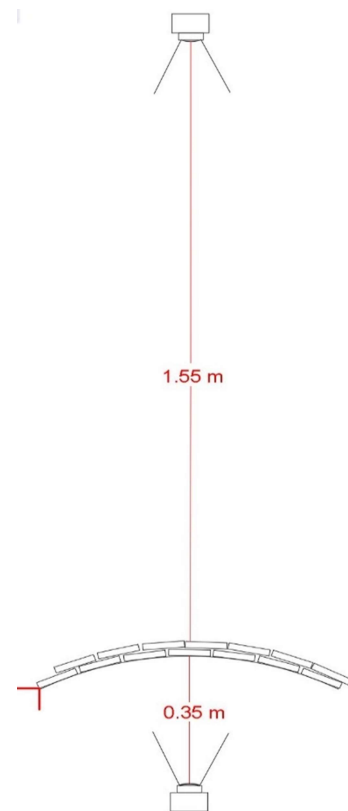


Figura 4.3-2 Posición de la termocámara con respecto a la bóveda en el trasdós y en el intradós.

encontrar un método de localización de pérdida de adherencia entre ladrillos desde el trasdós por los motivos expuestos en la introducción de este apartado.

Ante la imposibilidad de que el campo de visión de la termocámara abarcara toda la bóveda en el trasdós, ésta se abarcó con dos encuadres, a los que se denominó A y P (Figura 4.3-3).

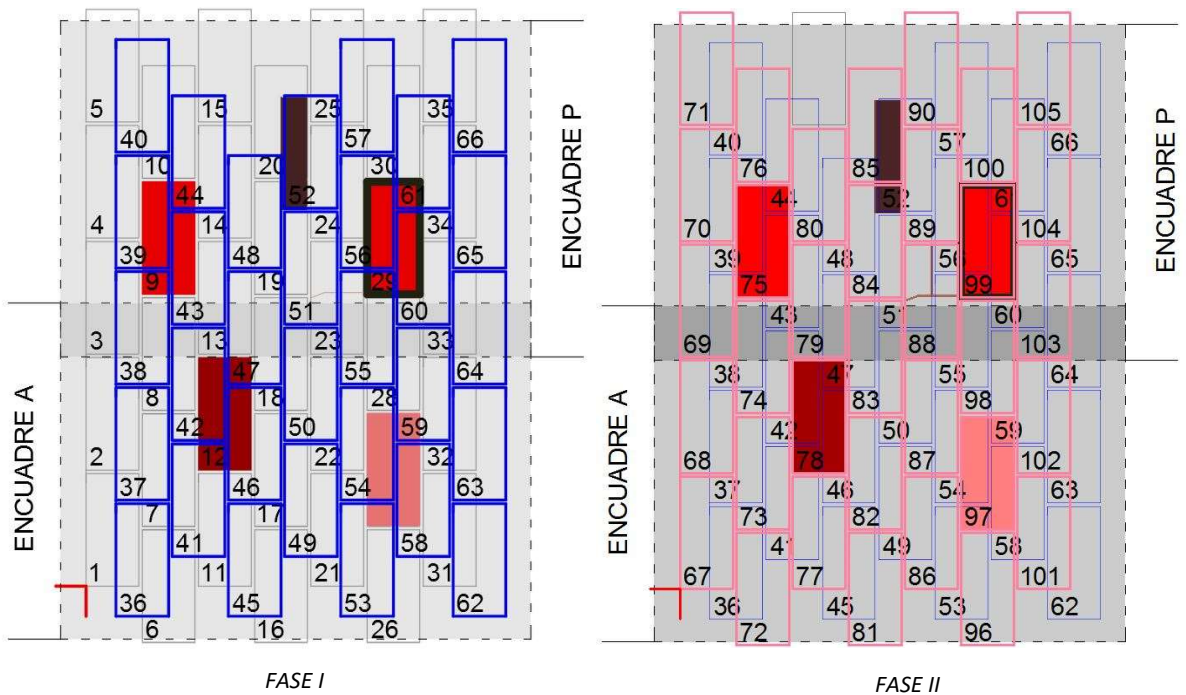


Figura 4.3-3 Esquema de localización de los dos encuadres A y P de toma de termogramas desde el trasdós en la Fase I (izquierda) y Fase II (derecha).

Colocar la termocámara sobre un trípode a su vez instalado sobre la bóveda, conlleva la necesidad de enfocar y disparar remotamente. La planificación inicial contemplaba controlar la cámara desde un teléfono móvil iPhone 5 a través de la aplicación FLIR Tools para dispositivos móviles. Sin embargo, tras varios intentos (a través de Wifi y Bluetooth), se desestimó el método porque la aplicación dejaba de funcionar, teniendo que reiniciar y reestablecer los parámetros en ambos aparatos, lo cual resultaba ser muy inefectivo. Ante dicha circunstancia se varió el sistema de control remoto de la termocámara con un cable USB de 4 metros de longitud que conectó la termocámara a un ordenador PC portátil con la aplicación FLIR tolos, con óptimos resultados. Se controlaban los parámetros y el disparo remoto desde el ordenador.

La termocámara empleada disponía de adaptador para trípode sin embargo seguía teniendo cierto juego por lo que, con el fin de tener exactamente el mismo encuadre en todos los termogramas, se fijó además de a través de la zapata y se reforzó por medio de cinta americana.

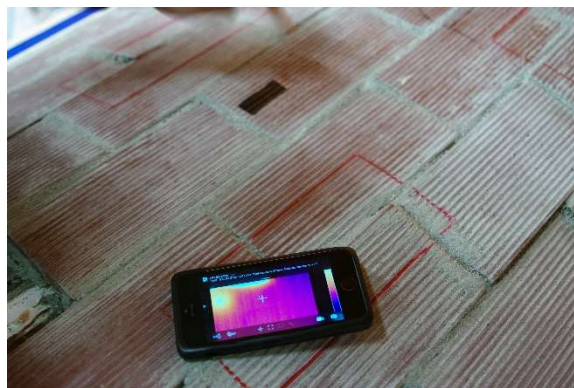


Figura 4.3-4 La cámara utilizada, la FLIR E60, permite la visualización del campo de la imagen térmica de la termocámara, así como el control de los parámetros desde un dispositivo móvil bien a través de Wifi o Bluetooth gracias a la aplicación FLIR Tools.

En cuanto al enfoque de la cámara, el modelo disponible para este test únicamente contaba con enfoque manual, motivo por el cual se preenfocó antes de su colocación definitiva. Para ello, se situó la cámara sobre el trípode apoyado en el suelo y se colocó un ladrillo sobre el mismo, a la misma distancia que la termocámara en su posición de test estaría respecto a la bóveda; a dicho ladrillo se le aplicó una fuente de calor temporal para afinar el enfoque (huella dactilar). Una vez enfocada, se fijó en enfoque, que permaneció fijo durante todo el test.



Figura 4.3-5 Fotografía del proceso de pre-enfoque. En la pantalla del PC portátil puede observarse la huella digital aplicada al ladrillo.

· Colocación de la cámara desde el intradós:

La ubicación de la bóveda, a 78 centímetros sobre el suelo imposibilitaba la utilización de trípode (Figura 4.3-2). Por este motivo la toma de termogramas desde el intradós se realizó con la cámara en la mano en modo de disparo dual, es decir, por cada termograma la termocámara toma una fotografía convencional, de esta manera es posible ubicar los termogramas. Cabe destacar que el encuadre y el campo de visión de las cámaras térmica y digital insertadas en la carcasa de la termocámara no coinciden, teniendo menos campo de visión el termograma que la fotografía digital. Dichas fotografías digitales son además muy oscuras. Se valoró y se decidió no

aportar iluminación adicional con el fin de no aportar otra fuente de calor en las proximidades de la bóveda.

Por último, se eligió un iPhone 5 conectado al PC a modo de cronometro para disparar a los intervalos de tiempo preestablecidos.

En cuanto a las fuentes de calor, se utilizaron dos:

- Método por conducción: manta eléctrica. El objetivo de este método era controlar con precisión el área de la superficie calentada y tener una distribución homogénea del calor.
- Método por convección: calentador cerámico de aire. A diferencia del método de contacto, este método calienta el volumen de aire que envuelve a la bóveda y este a su vez calienta a la bóveda.



*Figura 4.3-6. Fuentes de calor en la termografía activa: por convección con calentador cerámico (izquierda) y por contacto con manta eléctrica (derecha).*



### 4.3.3. EQUIPO

#### HARDWARE

- Cámara térmica FLIR E60
- Trípode GIT 20 GT1530
- Manta eléctrica Therapedic Electric Heated Silky Plush Throw Blanket. 60" x 50". 110-120V 50-60 Hz 75-100 W
- Calefactor de aire HC-0179 120V-60Hz 1500W de Intertek
- Cámara Pentax K20. Objetivo SMC Pentax-FA 1:2.8 28-70 mm.
- iPhone 5
- PC portátil Panasonic CF 53 para la toma de datos *in situ*
- ASUS 17.3" Republic of Gamers GL752VW para el post-procesado.



Figura 4.3-7 Imagen general del proceso de toma de termogramas desde el trasdós.

#### SOFTWARE

- FLIR tools
- Sistema operativo Windows 7 para la toma de datos *in situ*
- Sistema operativo Windows 10 para el post-procesado

#### TIPOS DE TESTS

- Toma de datos de termografía pasiva desde el trasdós (Test TP):

Se tomaron termogramas de la bóveda a temperatura ambiente de 25 °C en la Fase I y de 24,1°C (encuadre A) y 25°C (encuadre P) en la Fase II.

- Toma de datos de termografía activa por contacto desde el trasdós (Test TACT):

En ambas fases, se utilizó una fuente de calor consistente en una manta eléctrica con un área suficiente como para calentar el campo de visión de la cámara. Se colocó la manta doblada en doble durante 5 minutos, tiempo tras el cual se retiró y se comenzaron a registrar termogramas a intervalos de 20 segundos hasta los 360 segundos; a partir de 360 segundos se registraron los termogramas cada 60 segundos hasta un total de 20 minutos. En los resultados se muestra el termograma de la manta en la fase de calentado para aportar la información de la distribución de la energía térmica de la manta (serpentín) para poder comprobar si ésta afectaba en algún modo al resultado final obtenido.

– Toma de datos de termografía activa por convección desde el trasdós (TACV):

En ambas fases se utilizó el calentador cerámico colocado en el intradós dirigido manualmente hacia la bóveda con movimiento oscilatorio circular tratando de cubrir toda la superficie del cada encuadre (A y P) de manera homogénea. El tiempo de aplicación del calor fue de 5 minutos tiempo tras el cual se comenzaron a registrar termogramas a intervalos de 20 segundos hasta los 360 segundos; a partir de 360 segundos se registraron los termogramas cada 60 segundos hasta un total de 20 minutos.

Se tomó la temperatura en la superficie del intradós antes y después de los 5 minutos de aplicar calor por convección: 24,5 °C y 34,4 °C; por tanto, se elevó la temperatura del ambiente bajo la bóveda un total de 9,9 °C.

– Toma de datos de termografía activa por convección desde el intradós (IACV):

Este test únicamente se llevó a cabo en la Fase I. Se utilizó el calentador cerámico colocado en el trasdós dirigido manualmente hacia la bóveda con movimiento oscilatorio circular tratando de cubrir toda la superficie de manera homogénea. El tiempo de aplicación del calor fue de 5 minutos tiempo tras el cual se comenzaron a registrar termogramas en función dual de los diferentes ladrillos vistos desde el intradós. Se registraron termogramas durante 10

minutos, tiempo tras el cual se paralizó la toma de termogramas ante la normalización de la temperatura de la bóveda.

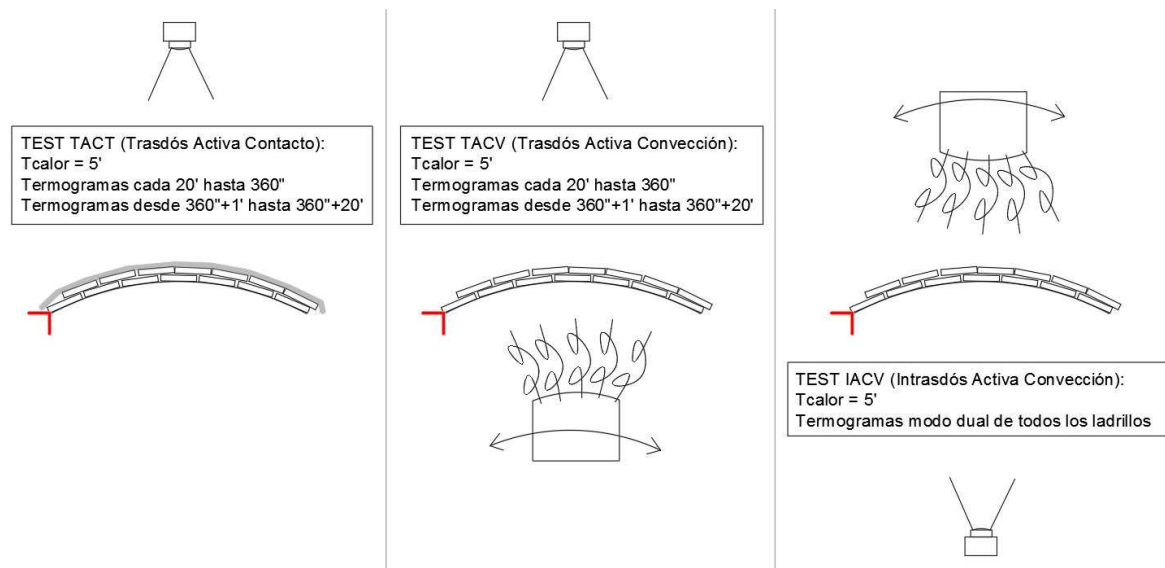


Figura 4.3-8 La figura representa los tres tipos de test de termografía activa aplicados durante la Fase I. En la Fase II se llevaron a cabo el test TACT y el test TACV.

Tanto en los tests TACT como en los TACV, los fotogramas se toman cada 20" durante los primeros 360", momento a partir del cual se toman cada 60". La razón por la que se tomó este criterio es la variación térmica de la superficie de la bóveda varía más drásticamente durante los primeros instantes del test (los primeros 300").

## 4.3.4. RESULTADOS

### TERMOGRAFÍA PASIVA:

Los resultados de termografía pasiva resultaron no dar ningún tipo de información útil en cuanto al estado de la bóveda o la presencia de anomalías ni desde el trasdós ni desde el intradós ni durante la Fase I ni durante la Fase II. Los termogramas únicamente muestran un tono, que corresponde a la temperatura a la que se encuentran los materiales de la bóveda, que a su vez coincide con la temperatura ambiente del laboratorio. La termocámara no distingue siquiera diferentes materiales, por lo que se deduce que la emisividad del ladrillo es similar a la de las juntas.

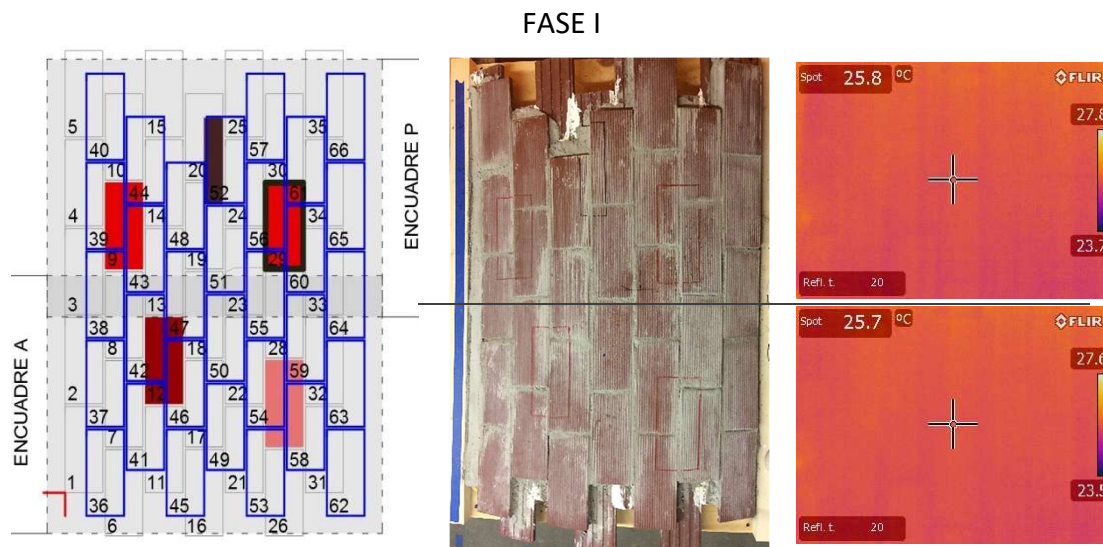


Figura 4.3-10 Fase I. Resultado de la termografía pasiva desde el trasdós de la bóveda. El test no aporta información útil para la detección de pérdida de adherencia entre las hojas de ladrillo.

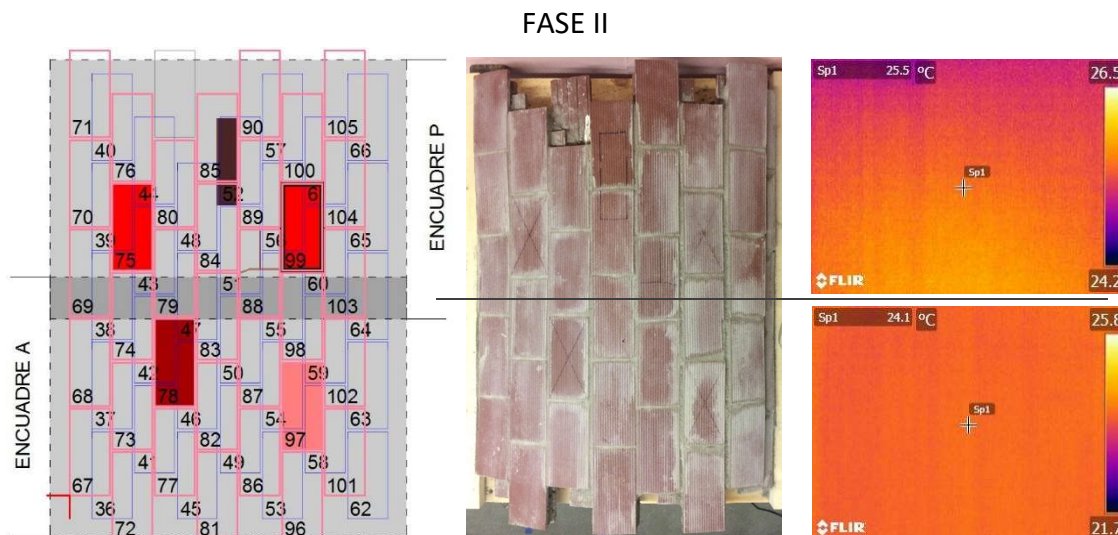


Figura 4.3-9 Fase II. Resultado de la termografía pasiva desde el trasdós de la bóveda. El test no aporta información útil para la detección de pérdida de adherencia entre las hojas de ladrillo.

## TERMOGRAFÍA ACTIVA POR CONTACTO DESDE EL TRASDÓS (TEST TACT):

En este caso el calor por contacto aplicado por el trasdós se transmite a la(s) capa(s) inferiores. En el caso de existir una cámara de aire (falta de adherencia) en alguna zona, ésta tardará más en transmitir el calor la(s) capa(s) inferiores y por tanto almacenará más energía térmica. En la Fase I, los termogramas muestran la localización de las anomalías insertadas, especialmente en el encuadre A, ladrillos 12 y 27 (Figura 4.3-11). Sin embargo, el mismo test en la Fase II, da peores resultados. De cuatro faltas pueden observarse (no claramente) dos, las de los ladrillos 75 (sobre el #9) y 78 (sobre el #12) (Figura 4.3-14).

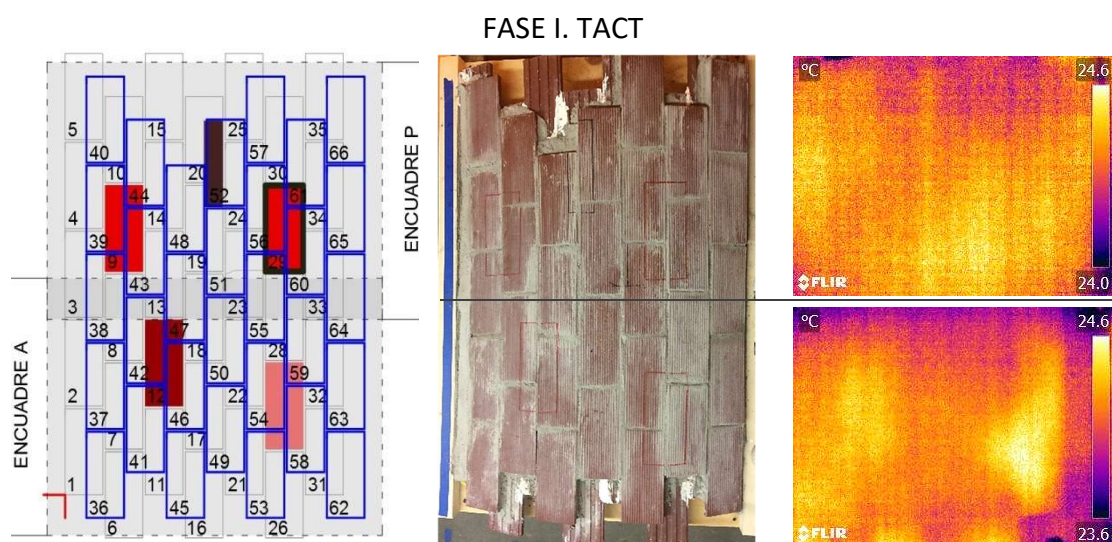


Figura 4.3-11 Los dos termogramas de la derecha muestran el encuadre A (inferior, termograma en la secuencia: IR TACT FI Encuadre A tiempo 360"+5') y el P (superior, termograma en la secuencia: IR TACT FI Encuadre P tiempo 360"+15') antes del post-procesado. Las zonas más calientes corresponden a los tonos amarillos, que a su vez coinciden con la localización de la falta de adherencia entre ladrillos.



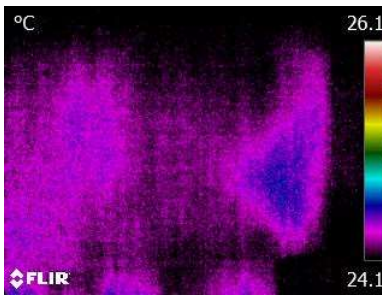
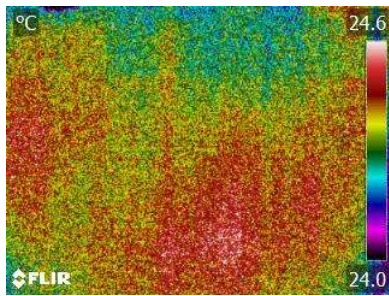


Figura 4.3-14 Ambos termogramas son los mismos de la Figura 4.3-11 variando parámetros en el software FLIR Tools para facilitar la visualización de la lesión. En el termograma de la izquierda IR TACT FI Encuadre A tiempo 360”+5’) se ha variado la paleta, de Iron a Rainbow HC. En el termograma de la derecha (IR TACT FI Encuadre P tiempo 360”+15’), además del paso anterior se ha variado el rango ampliándolo de 23,6-24,6 a 24,1-26,1.

### FASE II. TACT

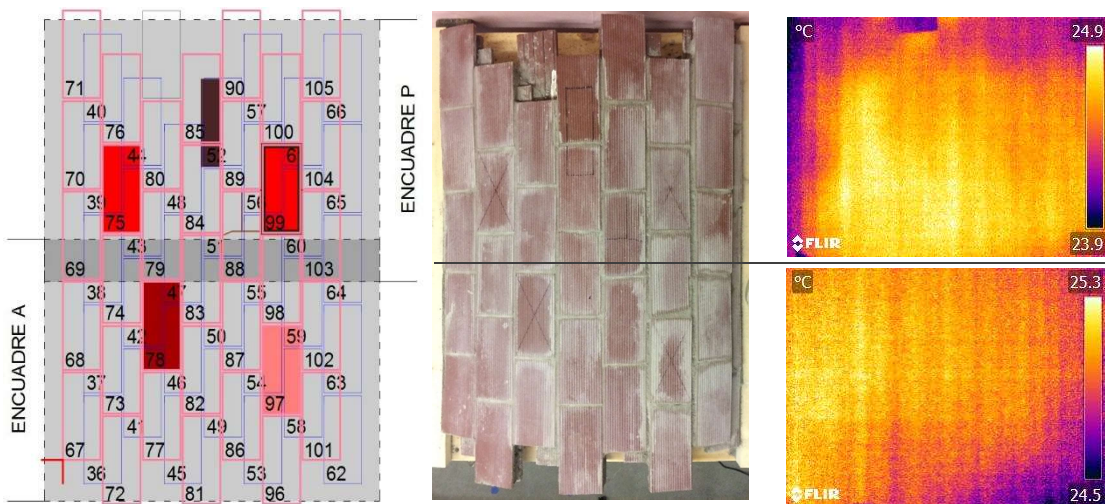


Figura 4.3-14 Los dos termogramas de la derecha muestran el encuadre A (inferior, termograma en la secuencia: IR TACT FII Encuadre A tiempo 360”+13’) y el P (superior, termograma en la secuencia: IR TACT FII Encuadre P tiempo 340”) antes del post-procesado. Las zonas más calientes corresponden a los tonos amarillos; en el resultado del encuadre P coincide una zona caliente con la posición del ladrillo con falta de adherencia #75 (sobre #9). Sin embargo, el test no detecta la falta de adherencia en los ladrillos #78 (sobre #12), #99 (sobre #29) y #97 (sobre #27).

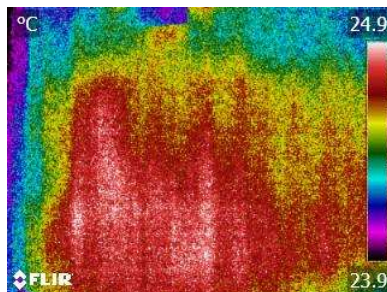
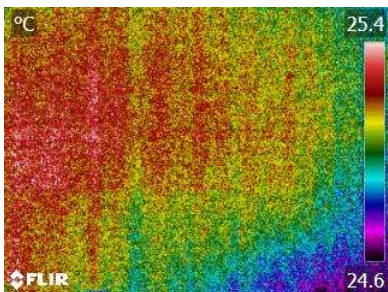


Figura 4.3-14 Ambos termogramas son los mismos de la Figura 4.3-14 variando parámetros en el software FLIR Tools para facilitar la visualización. En ambos termogramas (a la izquierda IR TACT FII Encuadre A tiempo 360”+13’ y a la derecha IR TACT FII Encuadre P tiempo 340”) se ha variado la paleta, de Iron a Rainbow HC.

A continuación, se incluyen todos los termogramas tomados en Fase I encuadre A y los más representativos de Fase I encuadre P y Fase II encuadres A y P. De la secuencia Fase I encuadre A en adelante únicamente se incluirán en este apartado algunos de los termogramas más representativos de cada test, pudiendo encontrar la totalidad de los termogramas en el anexo 9.3.3 adjunto a esta tesis.



FASE I. TACT ENCUADRE A

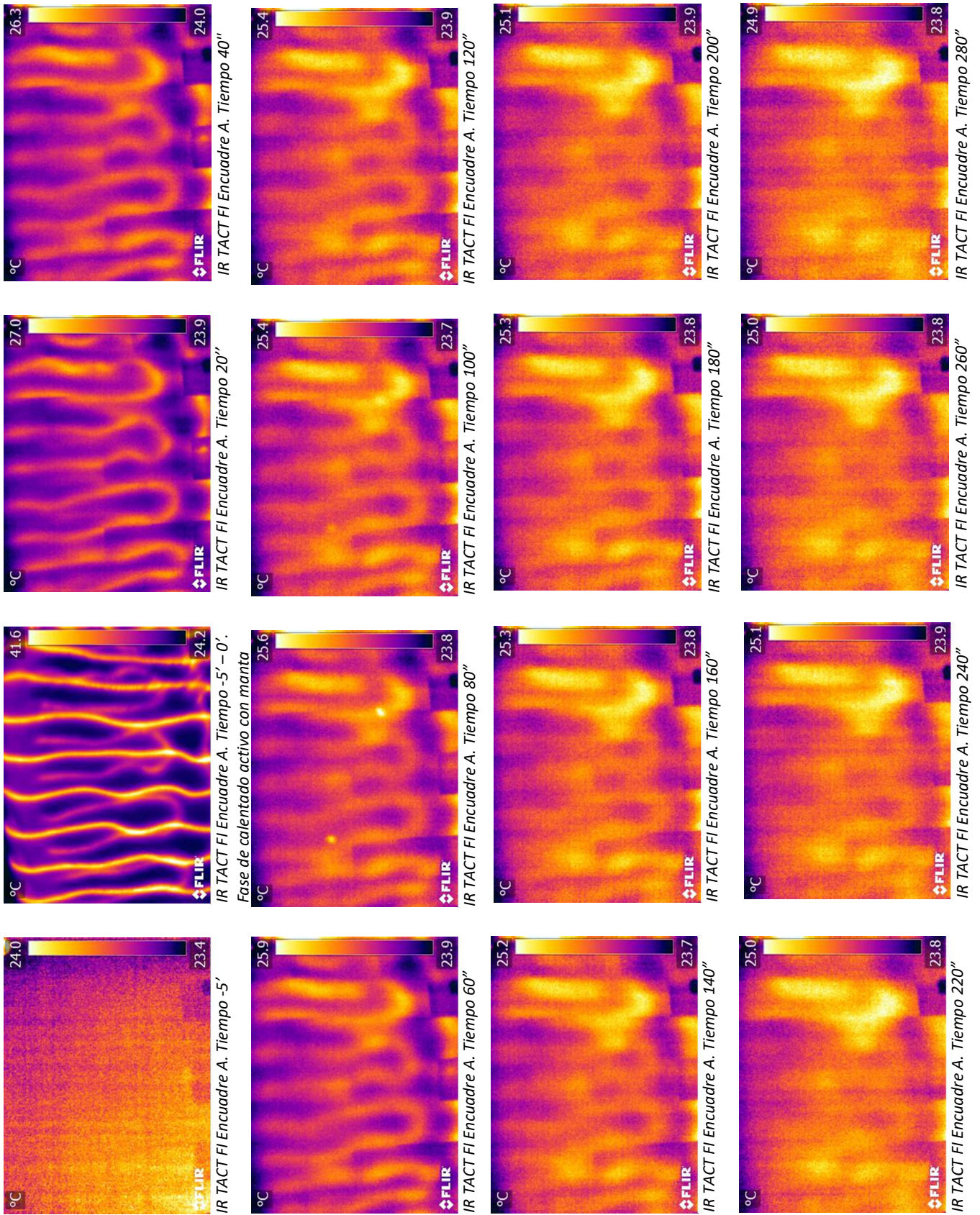


Figura 4.3-15 FASE I. Test TACT FI Encuadre A. 1 de 3: tiempo -5' – 280''



FASE I. TACT ENCUADRE A

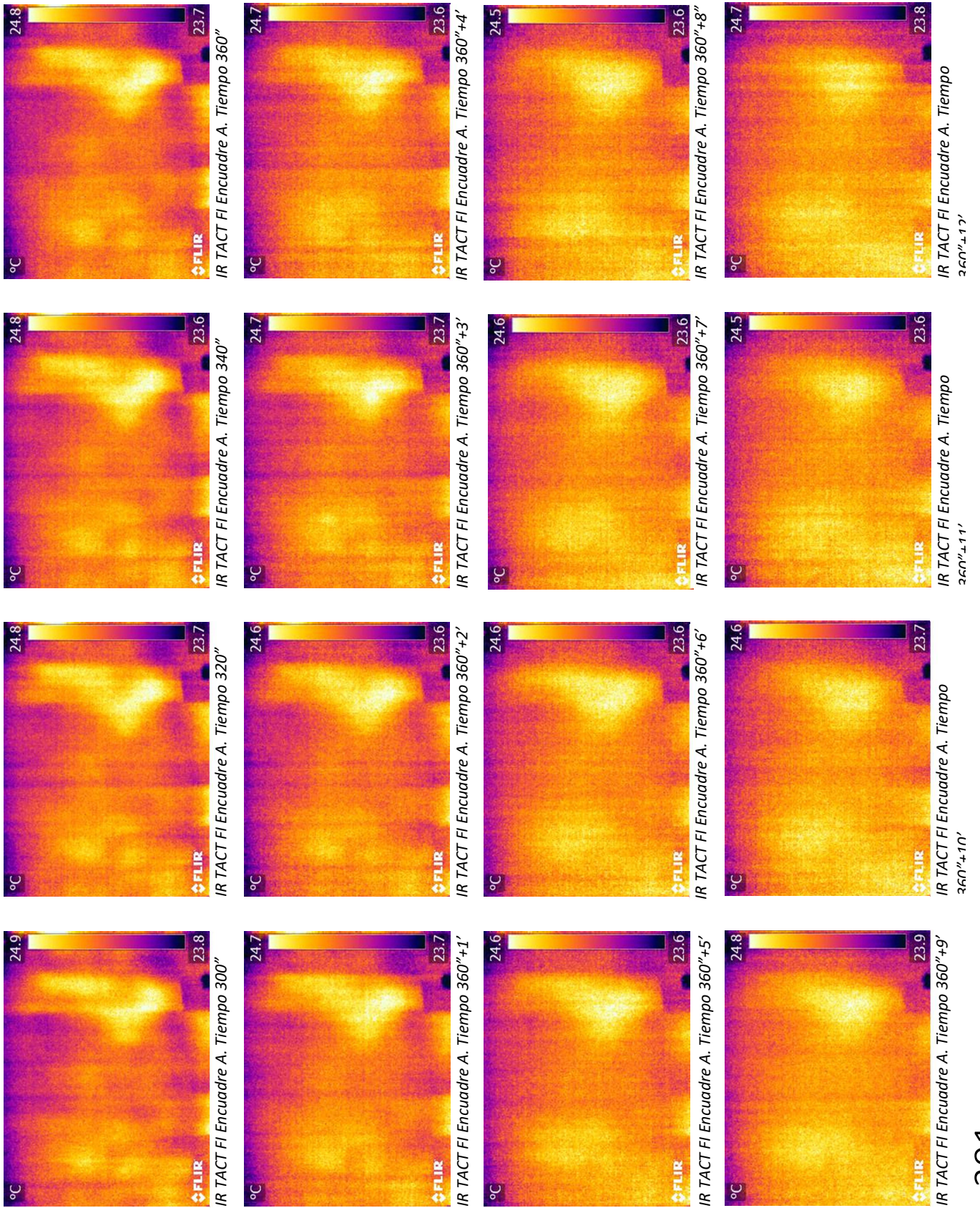


Figura 4.3-16 Test TACT FI Encuadre A. 2 de 3: tiempo 300'' – 360''+12'



FASE I. TACT ENCUADRE A

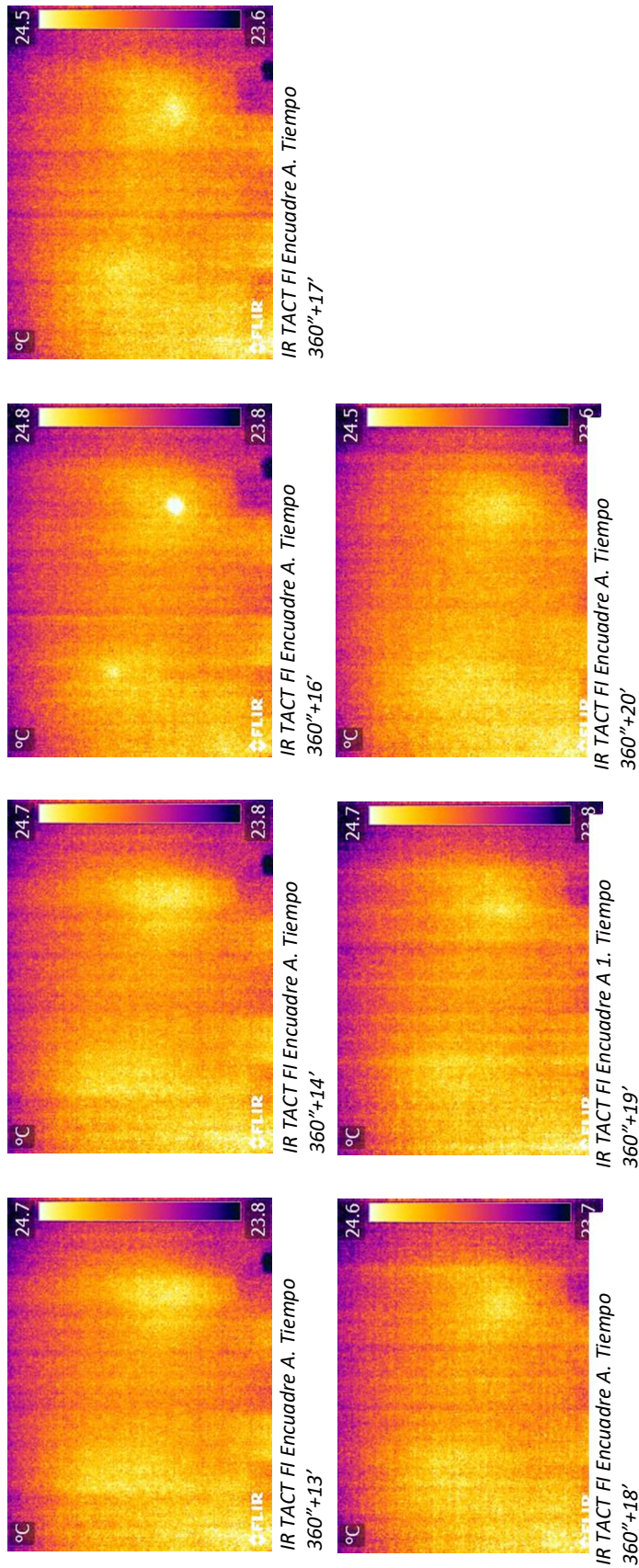


Figura 4.3-17 Test TACT FI Encuadre A. 3 de 3: tiempo 360''+13' – 360''+20'



FASE I. TACT ENCUADRE P

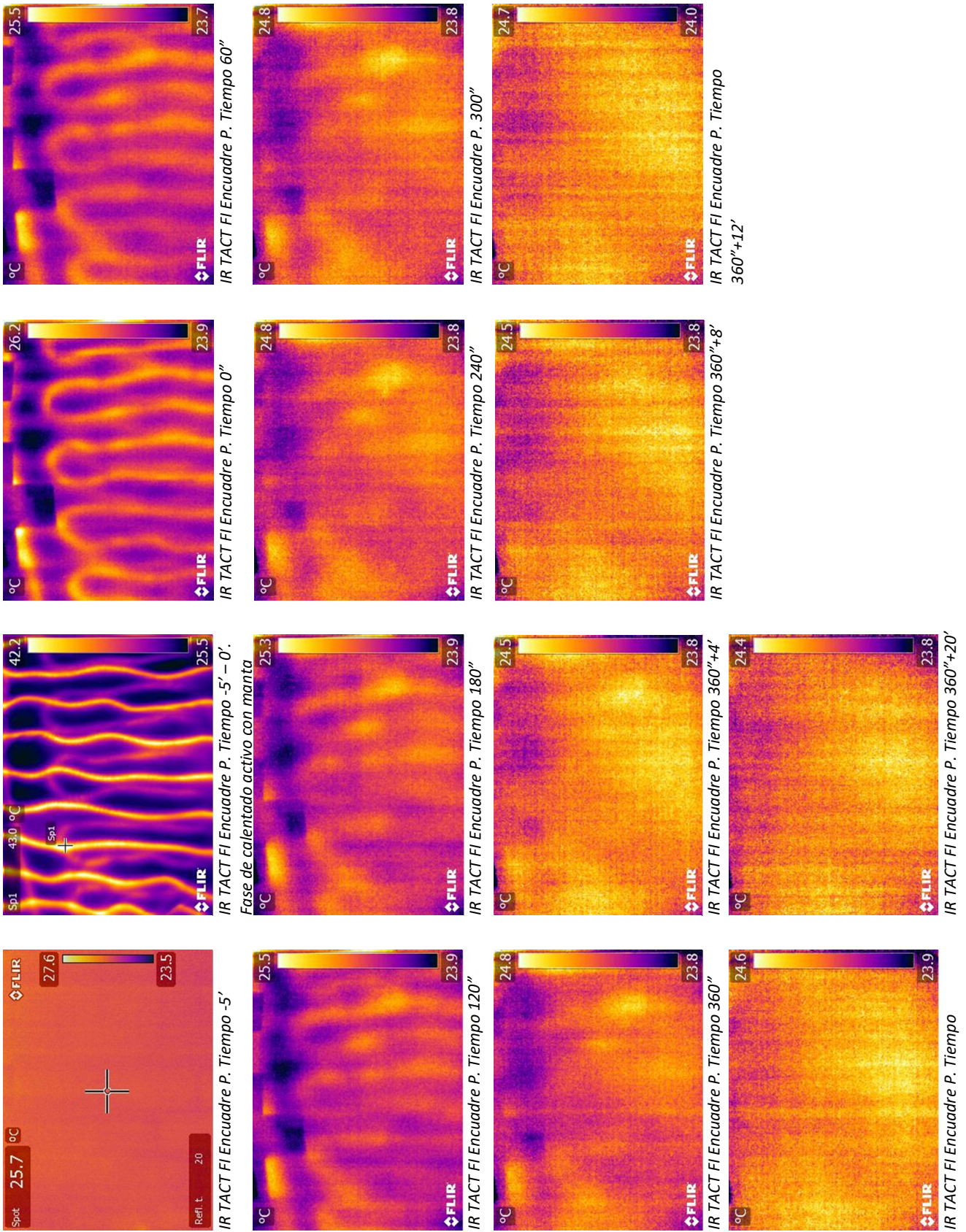


Figura 4.3-18 Selección de termogramas del test TACT FI Encuadre P. Tiempo -5' - 360''+20'



FASE II. TACT ENCUADRE A

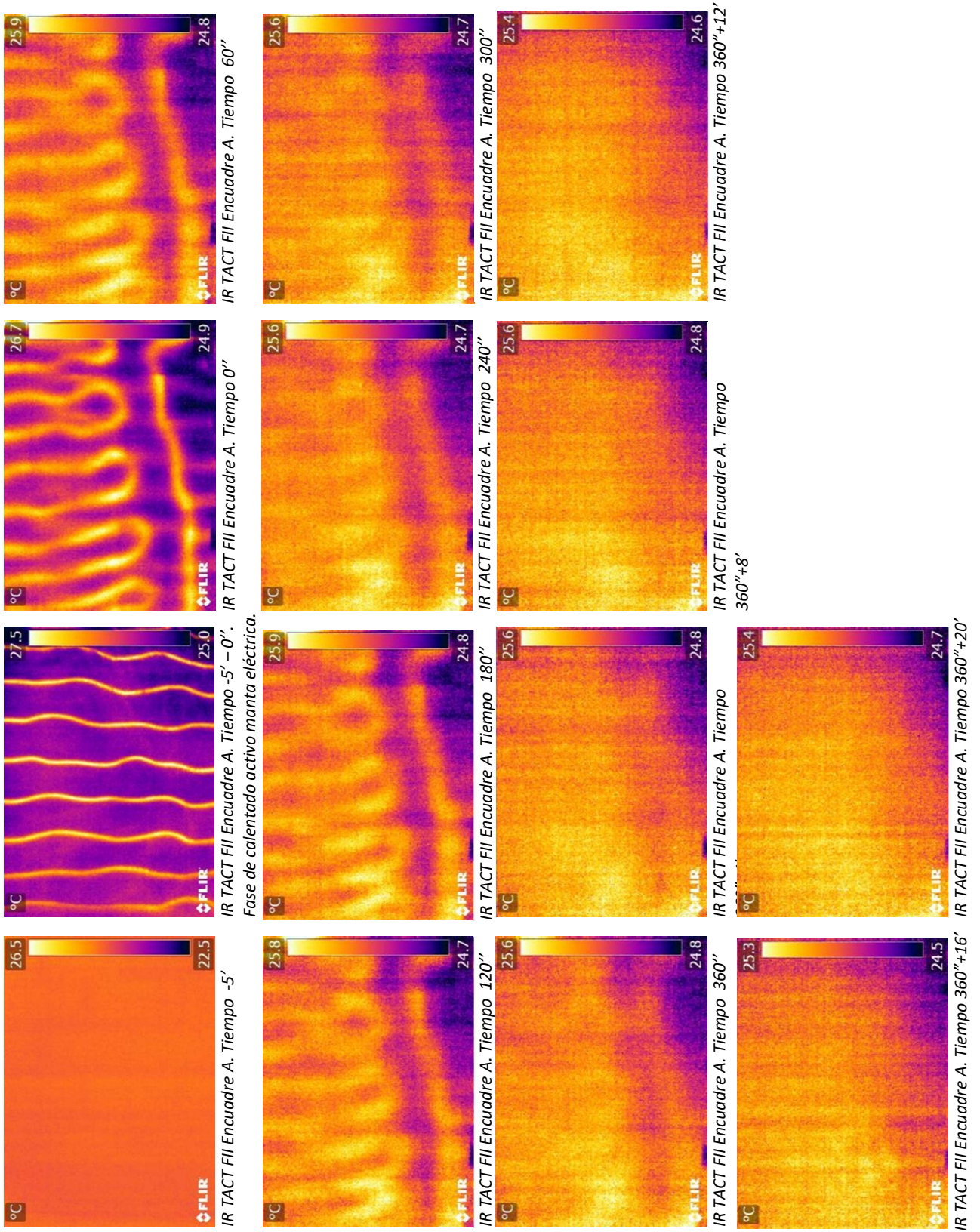


Figura 4.3-19 Selección de termogramas del test TACT FII Encuadre A. Tiempo -5' – 360"+20'



FASE II TACT ENCUADRE P

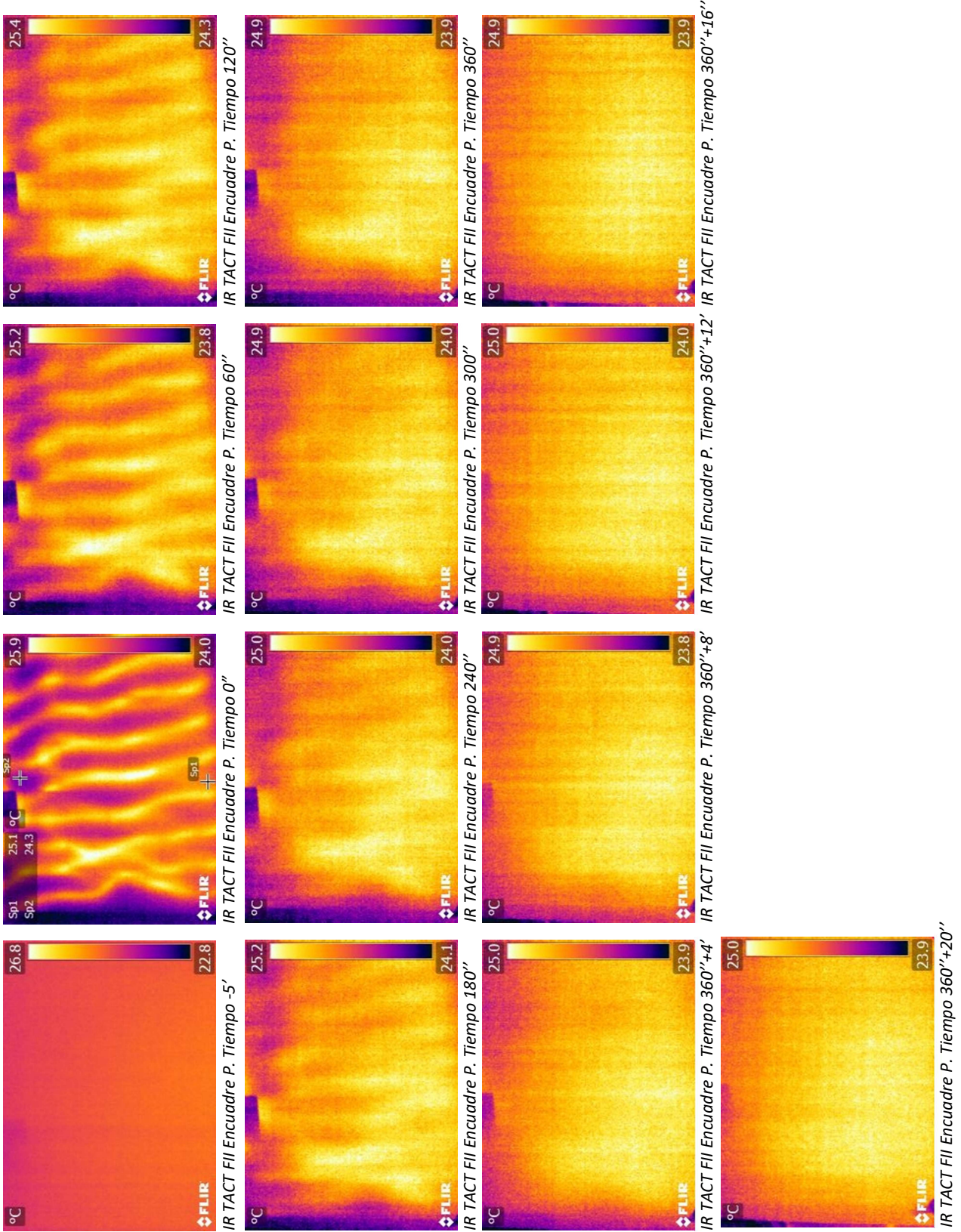


Figura 4.3-20 Selección de termogramas del test TACT FII Encuadre P. Tiempo -5' – 360'+20'

– Termografía activa por convección desde el trasdós (test TACV):

En este test, la energía térmica se aplica desde el intradós por convección y la lectura se hace por el trasdós. Si existe una bolsa de aire (falta de adherencia) entre ladrillos, la energía térmica tardará más en alcanzar la capa superficial (trasdós) y aparecerá en el termograma como una zona fría. El test TACV dio para la Fase I excelentes resultados especialmente para el encuadre A. En este caso, puede observarse con toda claridad las lesiones en el ladrillo 12 y 27. En cuanto al encuadre P de la Fase 1 el test reconoce una zona fría en el ladrillo 25, sin embargo, el resultado sobre el ladrillo 9 es más confuso ya que el área fría es mayor en superficie a la falta de adherencia insertada. Primero se procedió al test en el encuadre A y posteriormente al test en el encuadre P. Una de las desventajas de la utilización de termografía activa por convección se evidencia en el test del encuadre P ya que la bóveda había adquirido calor que dificultó la visualización de las lesiones en el Encuadre P. El área afectada por calor por convección es difícil de controlar. Por este motivo, en la Fase II se dejaron 24 horas entre el test en el encuadre A y el P.

En la Fase II los resultados fueron parecidos, pero menos certeros que en la Fase I. A la vista de los resultados es posible que la plataforma de madera de base de la bóveda afectase en la distribución uniforme de la energía térmica por convección en el encuadre P, ya que coincide su posición con un área general más fría en los termogramas (Figura 4.3-21, Figura 4.3-22)

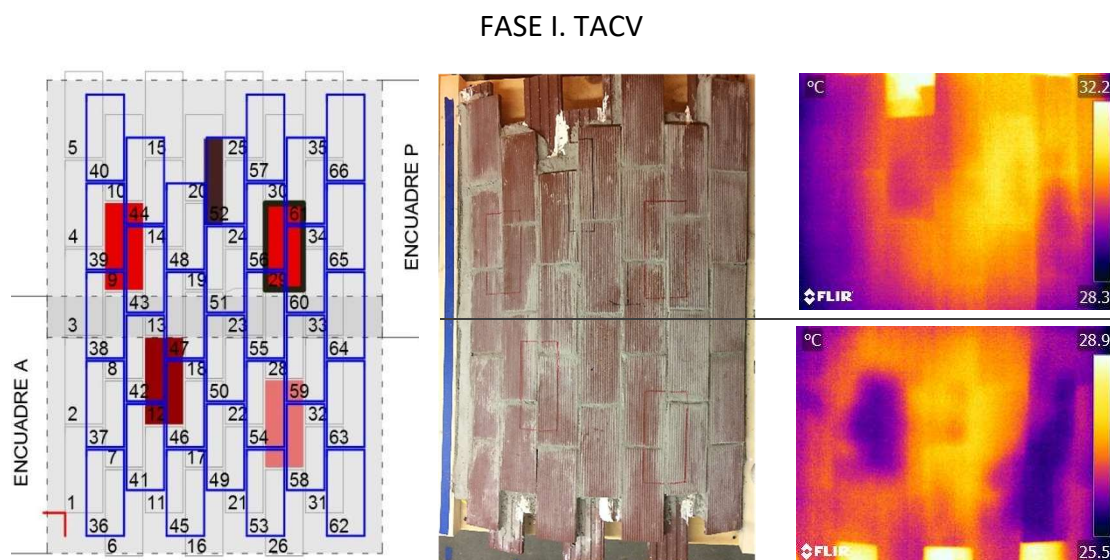


Figura 4.3-21 Los dos termogramas de la derecha muestran el encuadre P (inferior, termograma en la secuencia: IR TACV FI Encuadre A. Tiempo 300") y el P (superior, termograma en la secuencia: IR TACV FI Encuadre P. Tiempo 0"). Las zonas más frías corresponden a los tonos morados, que a su vez coinciden con la localización de la falta de adherencia entre ladrillos.



FASE II. TACV

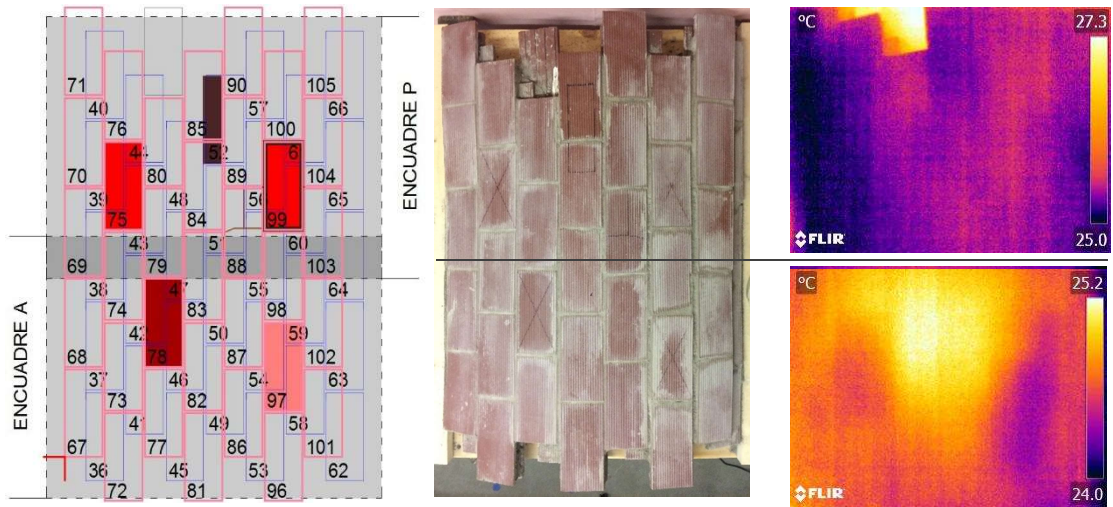


Figura 4.3-22 Los dos termogramas de la derecha muestran el encuadre A (inferior, termograma en la secuencia: IR TACV FII Encuadre A tiempo 360"+9') y el P (superior, termograma en la secuencia: IR TACV FII Encuadre P tiempo 360"+4') variando el rango en el postprocesado a 29,4-27,3 C . Las zonas más frías corresponden a los tonos azules; en el resultado del encuadre A coinciden las zonas frías con la posición de los ladrillos con falta de adherencia #97 (sobre #26) y #78 (sobre #12). Sin embargo, en el encuadre P los resultados no son tan claros, ya que, si bien el test detecta tres zonas frías, dos de ellas se sitúan en las inmediaciones de los ladrillos #75 (sobre #9) y #99 (sobre #29), sin embargo, la del ladrillo #75 (sobre #9) es mayor que la falta. Una tercera zona fría corresponde a la pletina metálica insertada en #85 (sobre #20).

FASE I TACV ENCUADRE A

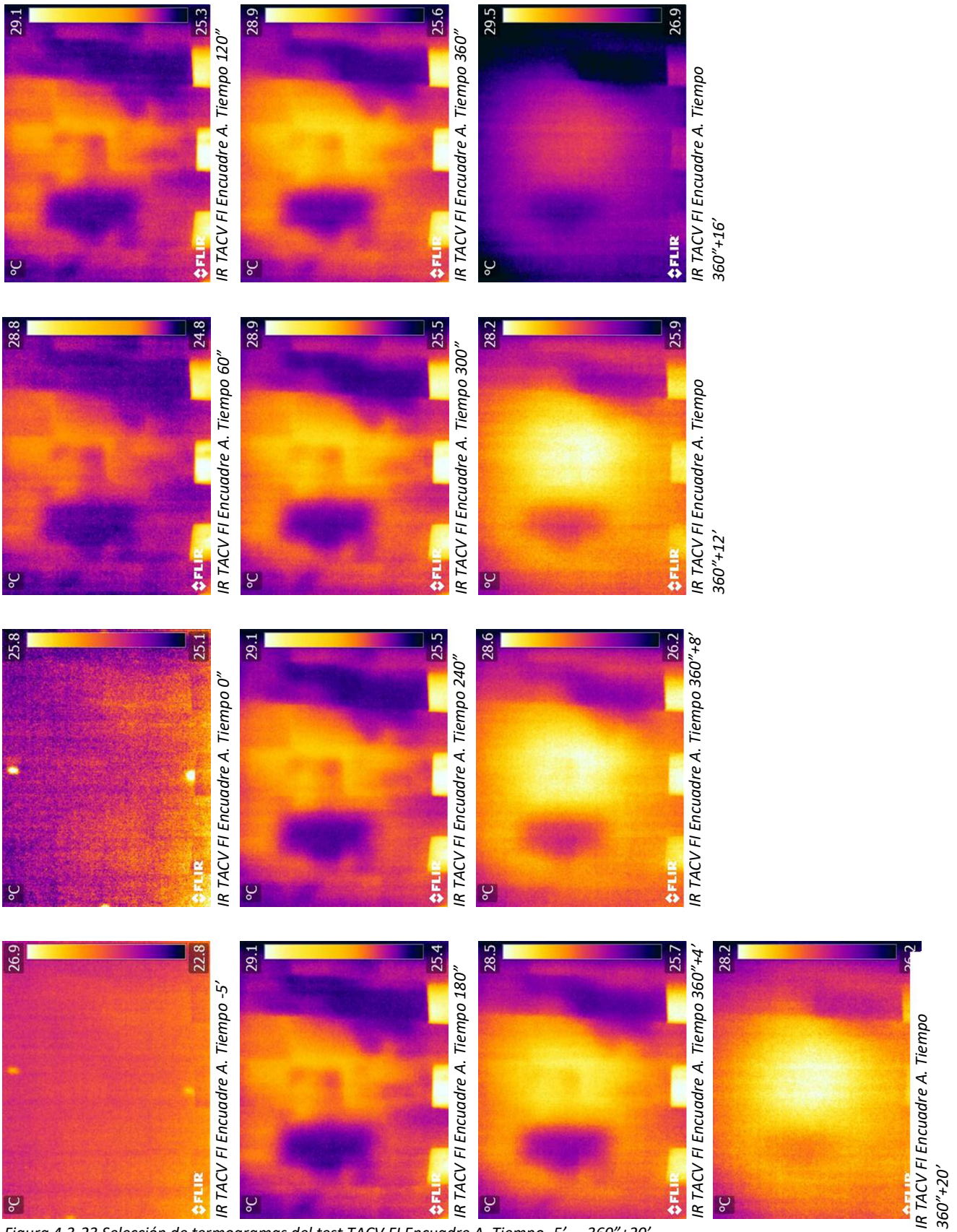


Figura 4.3-23 Selección de termogramas del test TACV FI Encuadre A. Tiempo -5' – 360''+20'



FASE I TACV ENCUADRE P

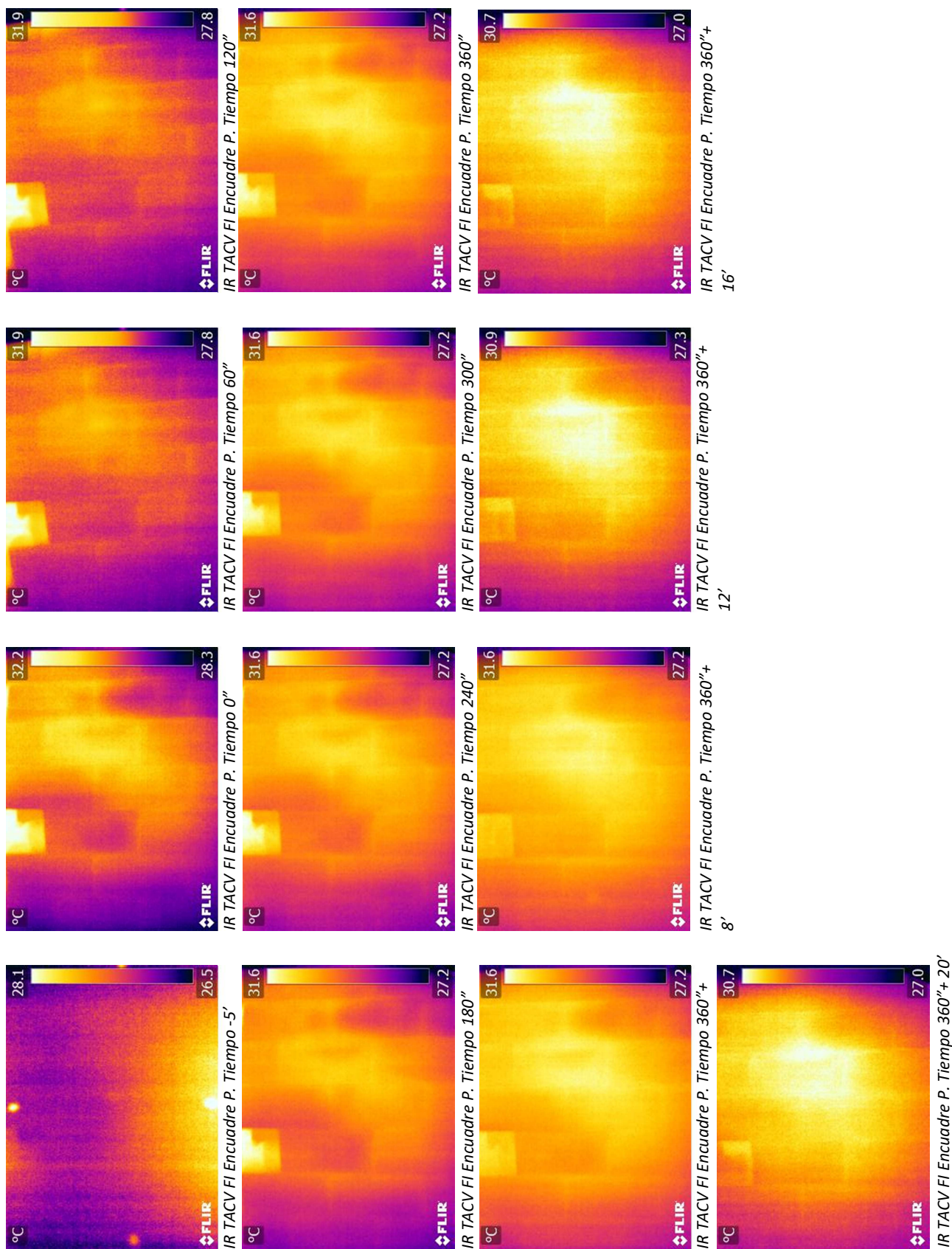


Figura 4.3-24 Selección de termogramas del test TACV FI Encuadre P. Tiempo -5' – 360''+20'



FASE II TACV ENCUADRE A

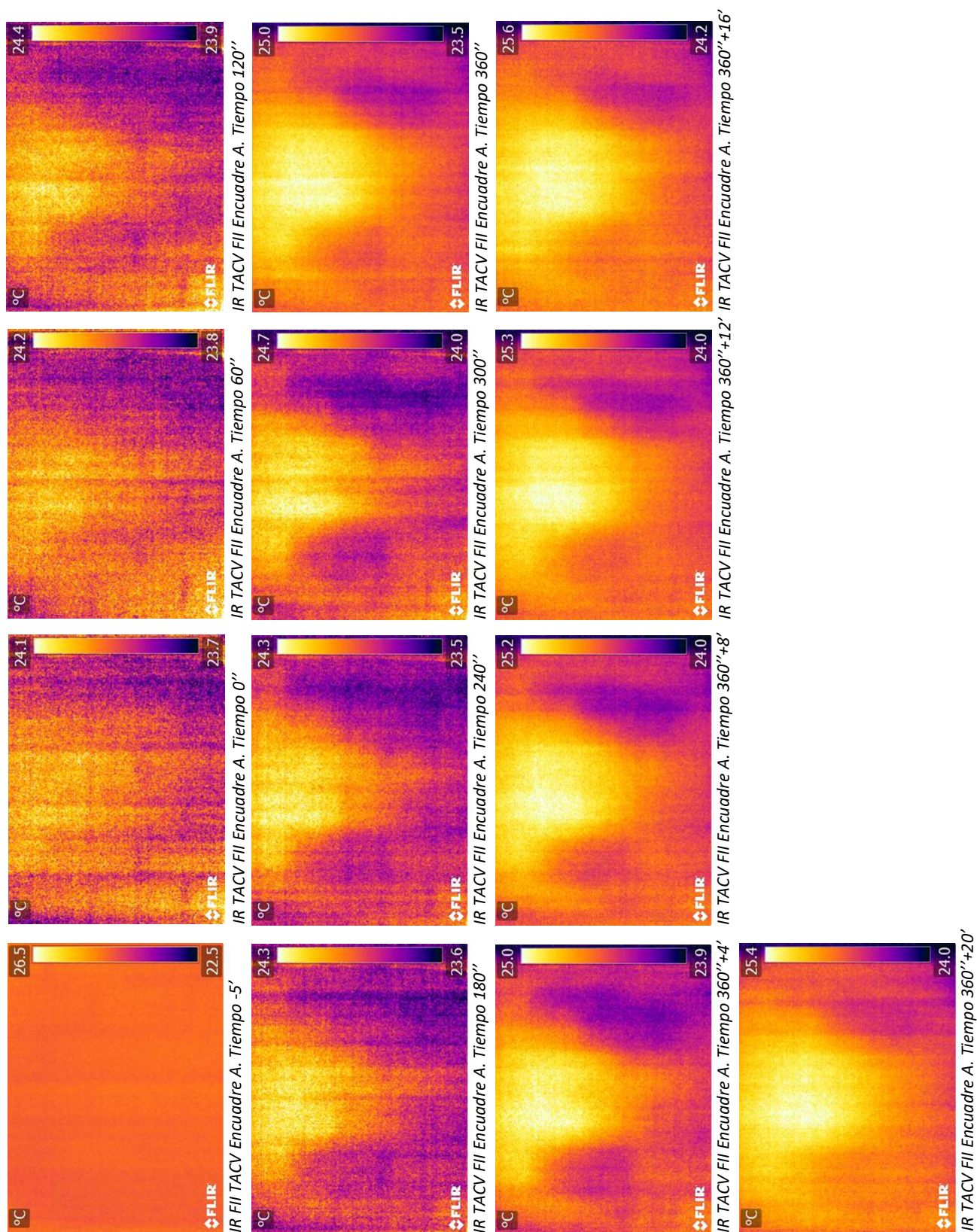


Figura 4.3-25 Selección de termogramas del test TACV FII Encuadre A. Tiempo -5' – 360''+20'



FASE II TACV ENCUADRE A

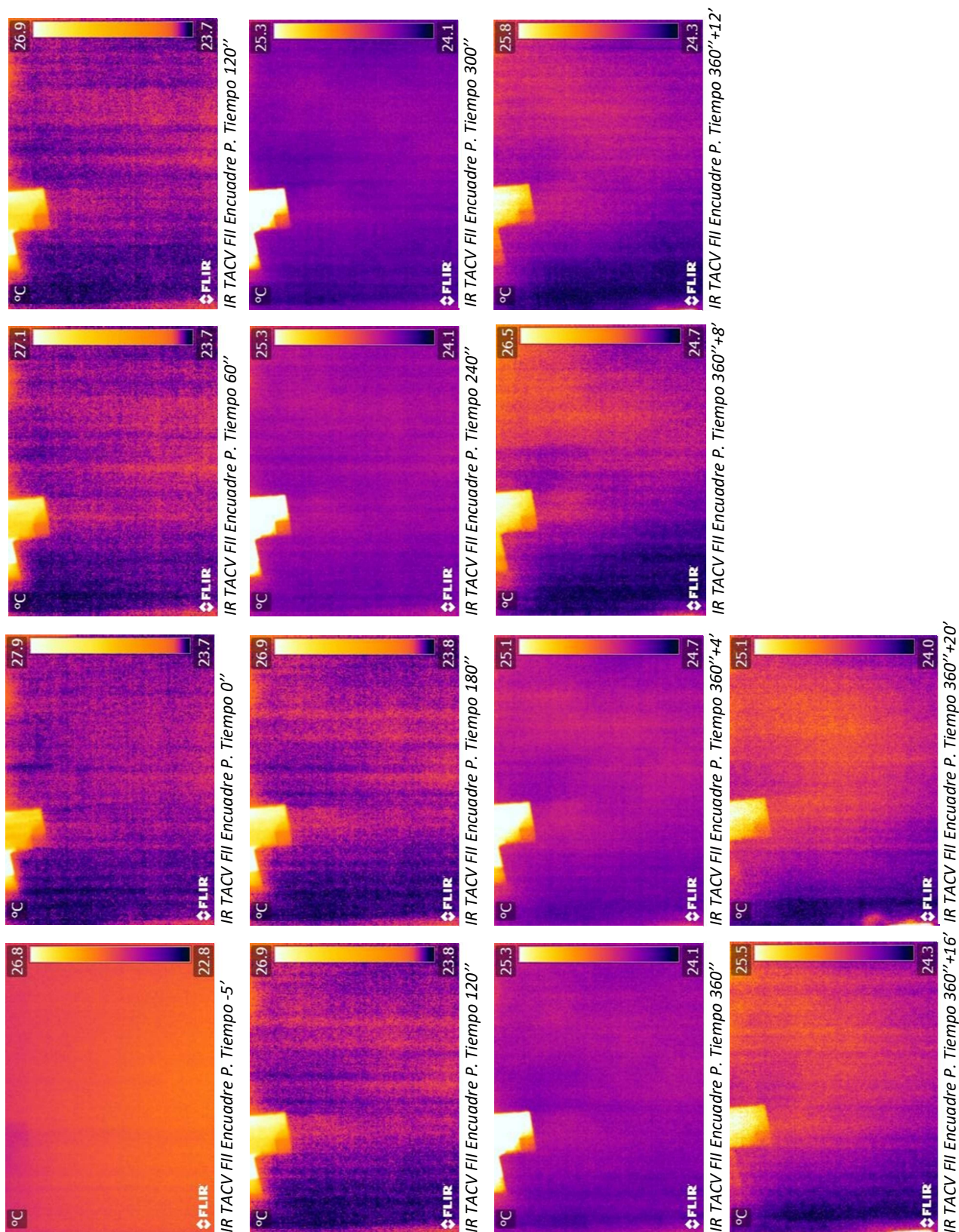


Figura 4.3-26 Selección de termogramas del test TACV FII Encuadre P. Tiempo -5' – 360''+20'

– Termografía activa por convección desde el intradós (test IACV):

Este test se llevó a cabo únicamente durante la Fase I. El test IACV obtuvo fotografías que, con un mínimo procesamiento posterior, aportaron información útil. El post-procesado consistió en variar las temperaturas máxima y mínima mostrada en el fotograma, así como el rango de muestra. Los datos más interesantes fueron los de los fotogramas del ladrillo 29 y 23. El ladrillo 29, además de presentar falta de adherencia con la segunda hoja, carece de la mayor parte de sus juntas. Por este motivo, la termocámara capta claramente más calor en la zona de las juntas que en el resto, ya que no hay material que calentar. Del mismo modo, el ladrillo 23 presenta una grieta que es claramente visible en los termogramas, por el mismo motivo. El test también muestra los sobrantes de yeso más fríos que el resto de la bóveda, ya que, al estar más lejos de la fuente de calor, la energía térmica debe viajar a través de más cantidad de material, tardando más en calentar esas zonas.

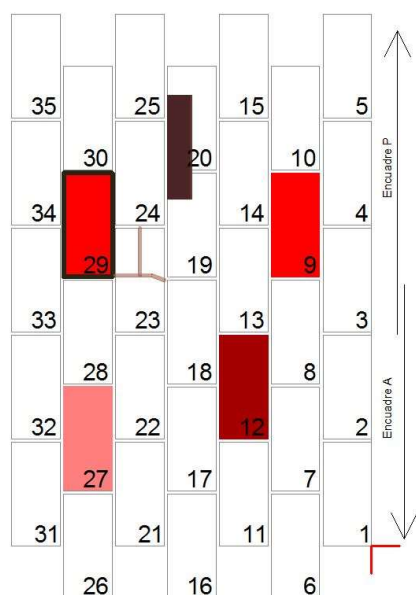


Figura 4.3-27 Planta cenital de la bóveda vista desde el intradós.



Figura 4.3-28. Termograma del ladrillo 29 en el que claramente se aprecia la falta de junta.

A continuación, se incluyen alguno de los conjuntos termograma-fotografía digital más representativos. La totalidad de los conjuntos se encuentran recogidos en el anexo 9.3.3 de la presente tesis.



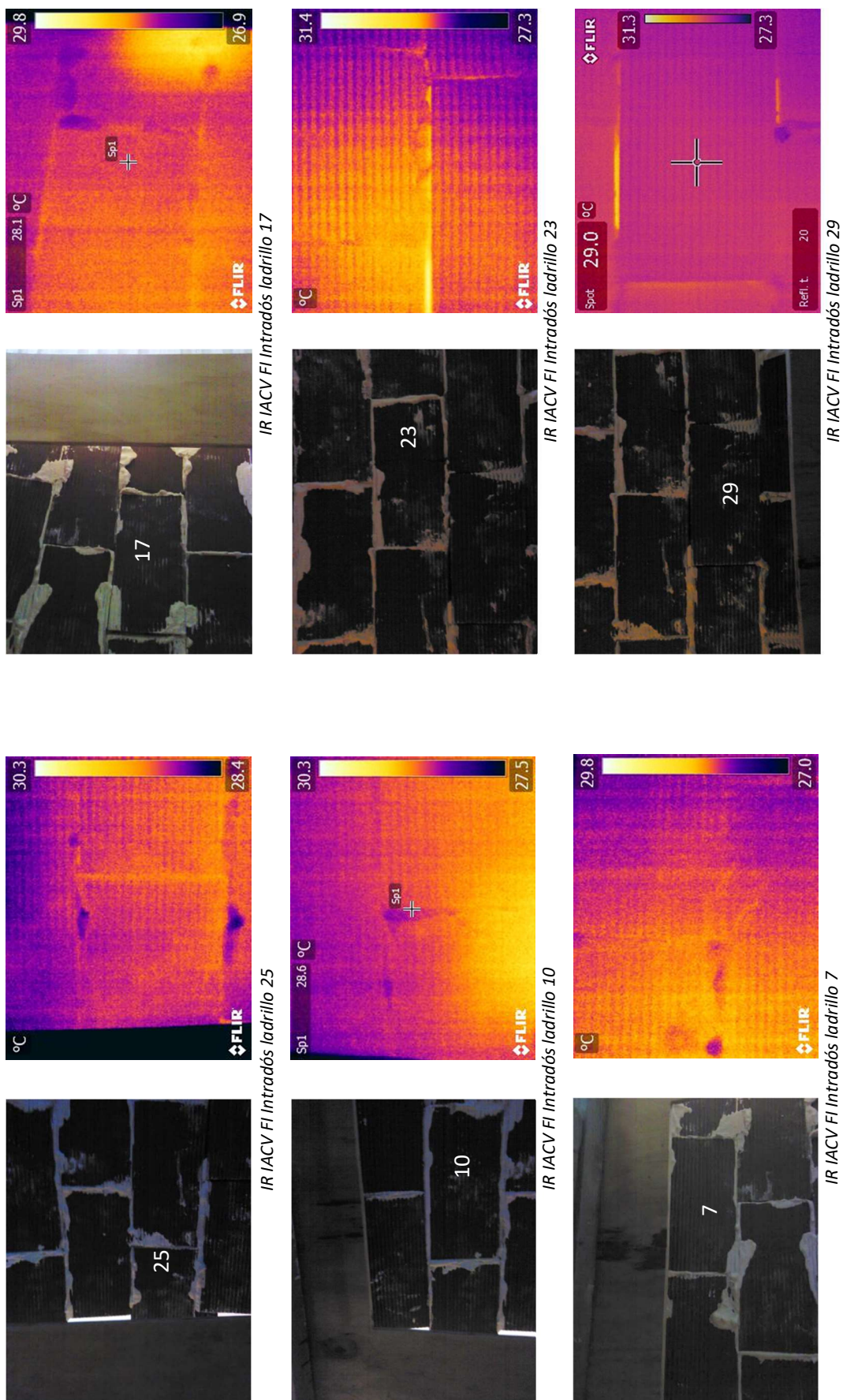
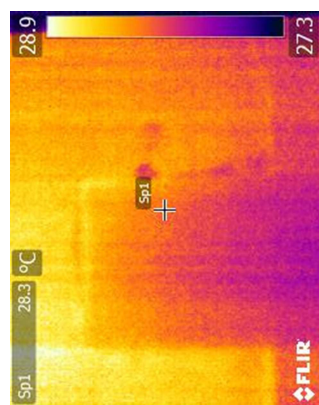
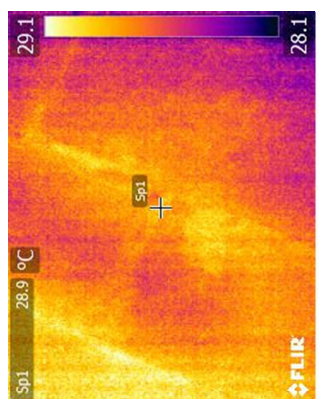


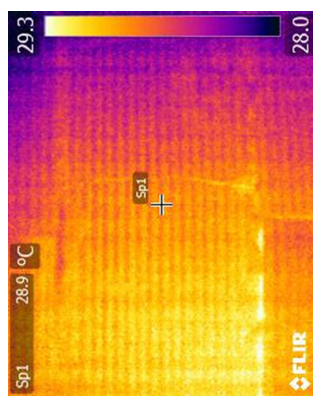
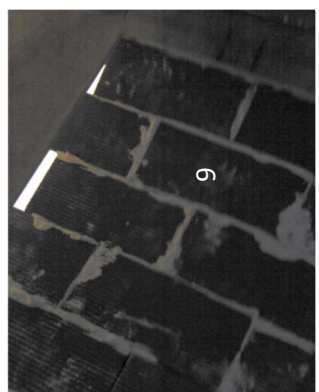
Figura 4.3-29 Selección de termogramas del test IACV 0 – 10. 1 de 2.



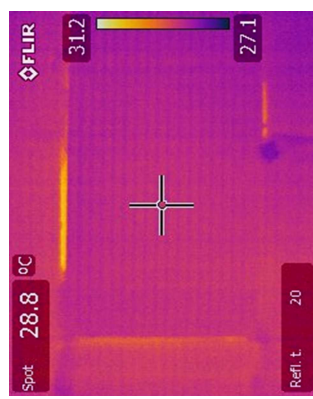
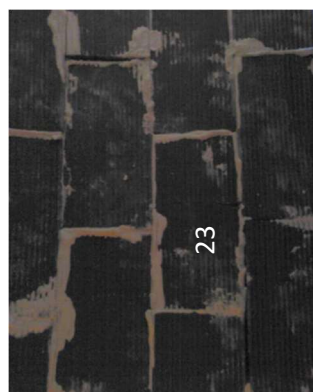
IR IACV FI Intradós ladrillo 17



IR IACV FI Intradós ladrillo 9



IR IACV FI Intradós ladrillo 23



IR IACV FI Intradós ladrillo 29

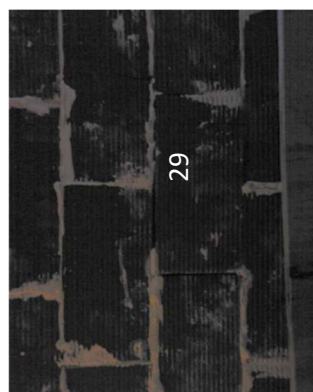


Figura 4.3-30 Selección de termogramas del test IACV 0 – 10. 2 de 2.



### 4.3.5. REFLEXIONES

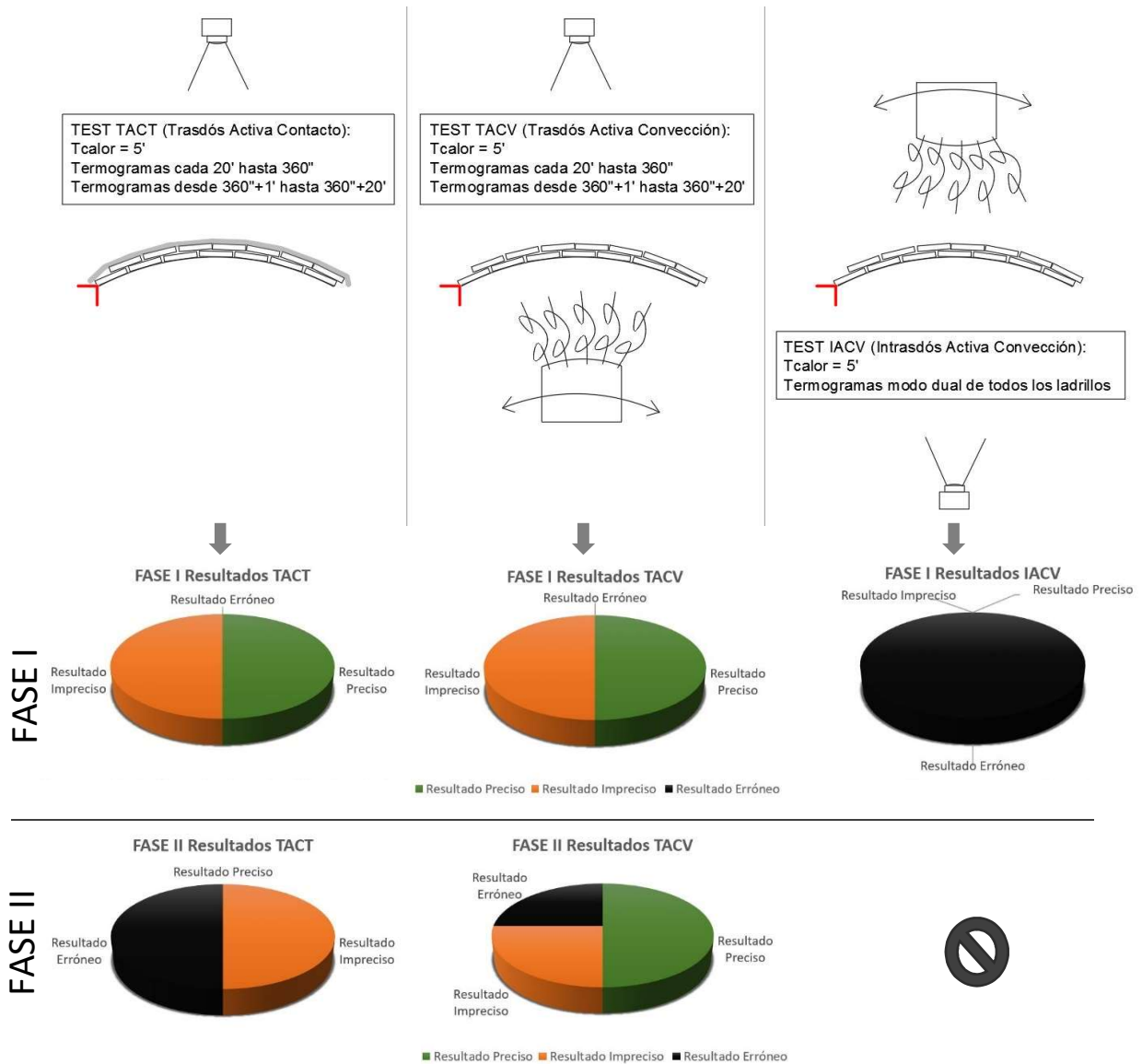


Figura 4.3-31 Gráfico resumen de los resultados del test IRT activa aplicados a la bóveda.

- Los resultados más precisos, tanto en la Fase I como en la Fase II, se registraron con el test TACV, tomando los termogramas desde el trasdós aplicando una fuente de calor activo por convección en el intradós durante 5 minutos. Los termogramas que permiten visualizar mejor la falta de adherencia se dieron entre el minuto 5 y el 15 en el encuadre A. Los resultados del encuadre P no son tan acertados como los del encuadre A. Para este test, se

obtienen resultados más contundentes en la Fase I que en la Fase II. El motivo es que en la Fase II hay una hoja de ladrillo más que en la Fase I, por lo tanto, la energía térmica debe atravesar mayor cantidad de material, y dado que las lecturas del test TACV se hacen desde el trasdós, la energía térmica tarda más en llegar al trasdós cuantas más hojas de ladrillo existan. De esta investigación se deduce que este test es más efectivo a menor espesor de la bóveda y a la inversa, menos efectivo a mayor espesor de la misma.

Debido a la dificultad de controlar la energía térmica administrada por convección, la experiencia demostró que es necesario dejar enfriar completamente la bóveda entre tests contiguos para mayor efectividad en los resultados (TACV Fase 1, encuadre A y encuadre P). Tener que esperar a que la bóveda se enfríe representa un gran inconveniente en aplicaciones reales en obra, por lo que sería necesario realizar este test en un caso real para comprobar si es necesario esperar al enfriamiento total entre tests contiguos.

En casos reales, aplicar energía térmica por el intradós de la bóveda puede ser factible o no. En este caso hubo que elevar la temperatura del intradós un total de 9,9 °C. Dado que el aire caliente sube en el espacio porque tiene menos densidad que el aire frío, si se aplican grandes calefactores a nivel del suelo bajo la bóveda, sería posible aplicar dicha energía térmica desde el intradós; sin embargo, dependiendo del caso, ésta puede no ser suficiente. Una alternativa puede ser realizar el test a la inversa, es decir, aplicar energía térmica desde el trasdós, y realizar los termogramas desde el intradós, a nivel del suelo bajo la bóveda.

- El calentamiento homogéneo por convección de sistemas abovedados es muy complicado si no imposible. Es la experiencia del técnico que ejecute el test quien discernirá entre distribuciones no homogéneas de la energía térmica debido a este motivo y las faltas reales de la bóveda.
- El test TACT, únicamente en la Fase I, también arrojó resultados acertados y precisos, es decir, termogramas registrados por el trasdós tras haber aplicado una fuente de calor por contacto en el trasdós durante 5 minutos. Los termogramas que permiten visualizar mejor la falta de adherencia se dieron entre los 180 y los 300 segundos.
- En una investigación experimental de este tipo conviene fijar la cámara a un trípode para obtener termogramas igualmente centrados y enfocados. Sin

embargo, dado que en la práctica no todos los píxeles de la cámara térmica captan la energía térmica con la misma sensibilidad y la perspectiva puede variar el resultado, es aconsejable disponer de una segunda cámara para poder variar la perspectiva del termograma para comprender determinados mapas o patrones térmicos que pueden ser incomprensibles con una cámara fija. En la práctica, no es recomendable utilizar un trípode, por estos mismos motivos.

- Cabe destacar que en el test TACV, son las zonas frías las que corresponden con la falta de adherencia entre hojas, mientras que en el test TACT, son las zonas calientes las que corresponden con la falta de adherencia entre ladrillos. En el test TACV, la “cámara de aire” entre las hojas en las zonas defectuosas, retrasa la transmisión del calor aplicado desde el intradós. En el test TACT, la misma “cámara de aire” impide que se transmita la energía térmica a la hoja inferior, resultando en una acumulación mayor de esa energía en las zonas con pérdida de adherencia entre hojas.
- Los resultados más claros corresponden, tanto en el test TACT como en el TACV a la falta insertada sobre el ladrillo 27. Dicha falta consistía en una lámina plástica de burbujas mayores a las del resto de las faltas, de lo cual se deduce que, a mayor volumen de aire debido a la delaminación, mejores resultados.
- El hecho de que, durante la Fase I, los resultados de termografía activa desde el trasdós sean mucho más precisos en el encuadre A que en el P, llevan a la conclusión de que los materiales del encuadre P fueron calentados por el calor aplicado en A y no se enfriaron a tiempo para la toma de termogramas en P. Si bien no se anticipó dicho proceso en la Fase I, a la vista de los resultados se decidió, en la Fase II, confirmar el enfriamiento total (hasta temperatura ambiente) de los materiales del segundo encuadre antes de proceder a la realización del test en Encuadre P.
- En el test TACT, de existir una manta con distribución del calor homogénea, sería más apropiada que la utilizada de serpentín, ya que el calor al principio del test (aproximadamente 8 primeros minutos) se concentra en la zona del serpentín, haciendo más compleja la interpretación del resultado.
- Sería más práctico y efectivo contar con un sistema que permitiese subir y bajar la bóveda con el fin de poder efectuar las termofotografías a la misma distancia

desde el trasdós y desde el intradós para poder aplicar la misma metodología a todos los tests.

- Disponer de una termocámara de enfoque automático es más eficiente tanto en tiempo como en calidad de resultados.
- En el test TACV se hace patente la importancia de contar con un sistema de calentado de la bóveda lo más homogéneo posible, ya que tal y como puede apreciarse en el termograma IR TACT Encuadre P Tiempo 0”, la zona a la izquierda de la imagen (ladrillos 38, 39 y 40) no se calentaron con la misma intensidad que los del resto del encuadre.
- En el test IACV la falta de perspectiva debido a la proximidad de la bóveda al suelo combinada con el reducido campo de visión de la termocámara, impide tener un termograma más completo del intradós y los termogramas registran a dos ladrillos como máximo. Esta situación imposibilita el proceso de comparación entre ladrillos, y además no se da en la realidad. Por estos dos motivos principales se decidió eliminar el test de la fase II. Cabe destacar, que el test TACV es análogo a éste para dos hojas de ladrillo, ya que es el mismo test, intercambiado la localización del foco de calor y termocámara.



## 4.4. IMPACTO-ECO (*IMPACT-ECHO* -IE)

Tras la aplicación de IRT, se procedió al test de impacto-eco (IE).

### 4.4.1. OBJETIVOS

El objetivo de la aplicación del test IE era determinar si esta técnica resultaba apta para la identificación de pérdida de adherencia entre los ladrillos de la primera y segunda hoja; y, de ser así, cuáles eran los parámetros a utilizar dependiendo de las características de la bóveda.

### 4.4.2. METODOLOGÍA

#### FASE I

Antes de proceder a realizar el test, se deben seleccionar diferentes parámetros tanto en el software como en el hardware. Es una primera fase importante, ya que, si no se eligen las opciones correctas, los resultados pueden resultar inútiles. Así pues, con el fin de determinar qué parámetros eran los más indicados, se procedió a realizar una primera ronda de tests. Los parámetros a determinar antes de comenzar un test de IE son:

1. Tamaño de las esferas de impacto. A menor diámetro, mayor frecuencia y por lo tanto mayor resolución, pero también menor penetración. El juego de bolas del instrumento de IE que se utiliza tiene 9 esferas de tamaños: 2, 3, 4, 5, 6, 8, 9, 11 y 12 mm. Se eligen los diámetros de 11 mm, 5 mm y 2 mm. Diámetros mayores a 5 mm se consideran inapropiados por el espesor de la

bóveda (37 mm) (Sansalone & Streett, 1997); la elección del diámetro 11 se elige con el fin de corroborar dicha teoría.

2. Numero de muestras que el aparato recibe y utiliza para generar la traza (N). A mayor número de pulsos, mayor resolución, lo cual implica que el sistema detectará más anomalías, pero también el resultado tendrá más ruido. Habrá que determinar si ese ruido imposibilita la detección del objetivo del test que son las delaminaciones. En el caso de que imposibilite esa lectura, será necesario probar diferentes posibilidades de filtrado para comprobar si alguna es apropiada para este caso. El instrumento utilizado ofrece, a través del software, tres posibilidades, 512, 1024 y 2048. En este caso se elige 2048 con el fin de optar a la mayor resolución posible.
3. Tiempo entre el registro de las muestras (t). A menor tiempo, mayor frecuencia de resolución, lo cual implica que el sistema detectará más anomalías y por tanto el resultado tendrá más ruido. Habrá que determinar si ese ruido imposibilita la detección del objetivo del test que son las delaminaciones. En el caso de que imposibilite esa lectura, será necesario probar diferentes posibilidades de filtrado para comprobar si alguna es apropiada para este caso. El instrumento utilizado ofrece, a través del software cuatro posibilidades 1, 2, 5 y 10 ms. Para la ronda de test de calibración se eligen 1, 5 y 10 ms.



Figura 4.4-1 El juego de bolas del instrumento de IE que se utiliza tiene 8 esferas de tamaños: 3, 4, 5, 6, 8, 9, 11 y 12 mm

La frecuencia de resolución del test IE es función de los valores seleccionados para N y t.

Ecuación 2

$$Fr. Res = \frac{1}{Nt}$$

Donde,

Fr. Res es la frecuencia de resolución en kilo hertzios (kHz).

N, es el número de muestras

t, es el tiempo entre muestras, en micro segundos ( $\mu s$ )

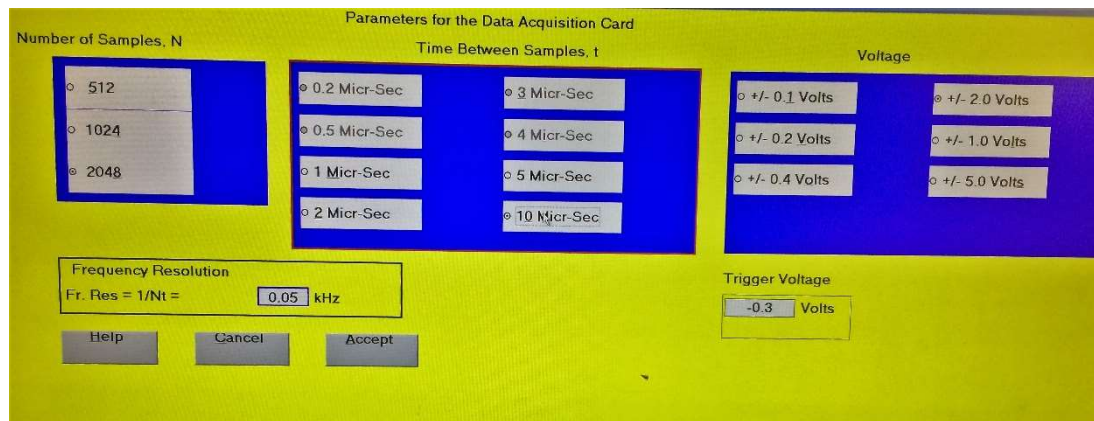


Figura 4.4-2 Pantalla de elección de valores para los parámetros de N, t y voltaje del software Impact-Echo SN IM02-266 .

Dada la imposibilidad de comprobar todos los parámetros y sus respectivas combinaciones (con 8 bolas, tres valores de N, y 4 valores de t, serían un total de 367.290 posibilidades para cada test), se determina elegir tres opciones semiextremas con el fin de discernir cuál de las tres opciones arroja mejores resultados y proseguir con otra ronda de tests con valores en el rango de dicha elección (Figura 4.4-3)

## TIPOS DE TESTS

### FASE I

La primera ronda de tests del proceso de calibración, denominada P9, se realizó en los ladrillos 50, 55 y 60; la unidad 50 se eligió como representación de unidad perfectamente adherida y alejada de los bordes y las 55 y 60 se escogieron como representación de unidad que presenta una pérdida de adherencia en parte de su superficie con la hoja inferior. En cada ladrillo se tomaron datos en un total de 9 posiciones (Figura 4.4-3). A su vez, a cada posición se aplicaron un mínimo de dos impactos con el fin de tener tests dobles en cada posición.

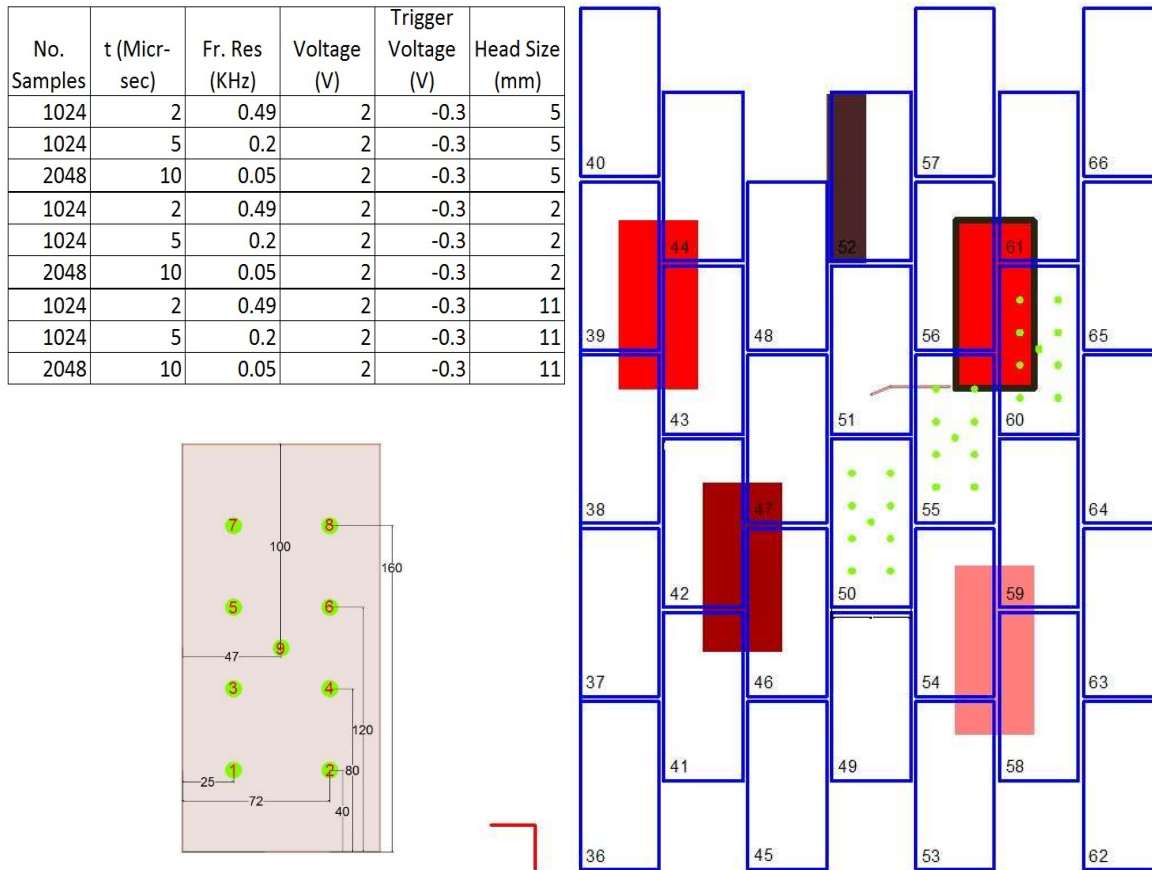


Figura 4.4-3 Esquema del test FI P9. La tabla muestra los valores para los diferentes parámetros ensayados durante la ronda de calibración. La imagen de la izquierda representa las diferentes posiciones del transductor receptor en cada una de las lecturas (en verde). La imagen de la derecha muestra la bóveda completa en la Fase I y los ladrillos testeados en la ronda de calibración para el test P9 (en verde).

En primer lugar, se realizó la primera ronda FI P9 con la esfera de diámetro 11 mm. Posteriormente se pasó a realizar la segunda ronda FI P9 con la esfera de diámetro 5 mm. El tamaño y la ligereza de la esfera hicieron complicada la toma de datos, ya que era complicado golpear con la suficiente intensidad para que el transductor receptor registrase la llegada de la onda. En tercer lugar, se procedió a la tercera ronda FI P9, con esfera de 2 mm; debido al reducido tamaño y peso de la esfera, fue imposible realizar los tests, ya que el transductor receptor no registraba la onda reflejada. Por este motivo hubo que desestimar esferas inferiores a 5 mm en la Fase I.

Una vez concluida la ronda de calibración FI P9 y tras el procesado y análisis de sus resultados, se procedió a realizar una ronda de tests con los parámetros que mejor visibilidad habían aportado: esfera de acero de diámetro 5 mm, N=2048 y t=10 ms (Fr. Res.= 0,05 kHz).



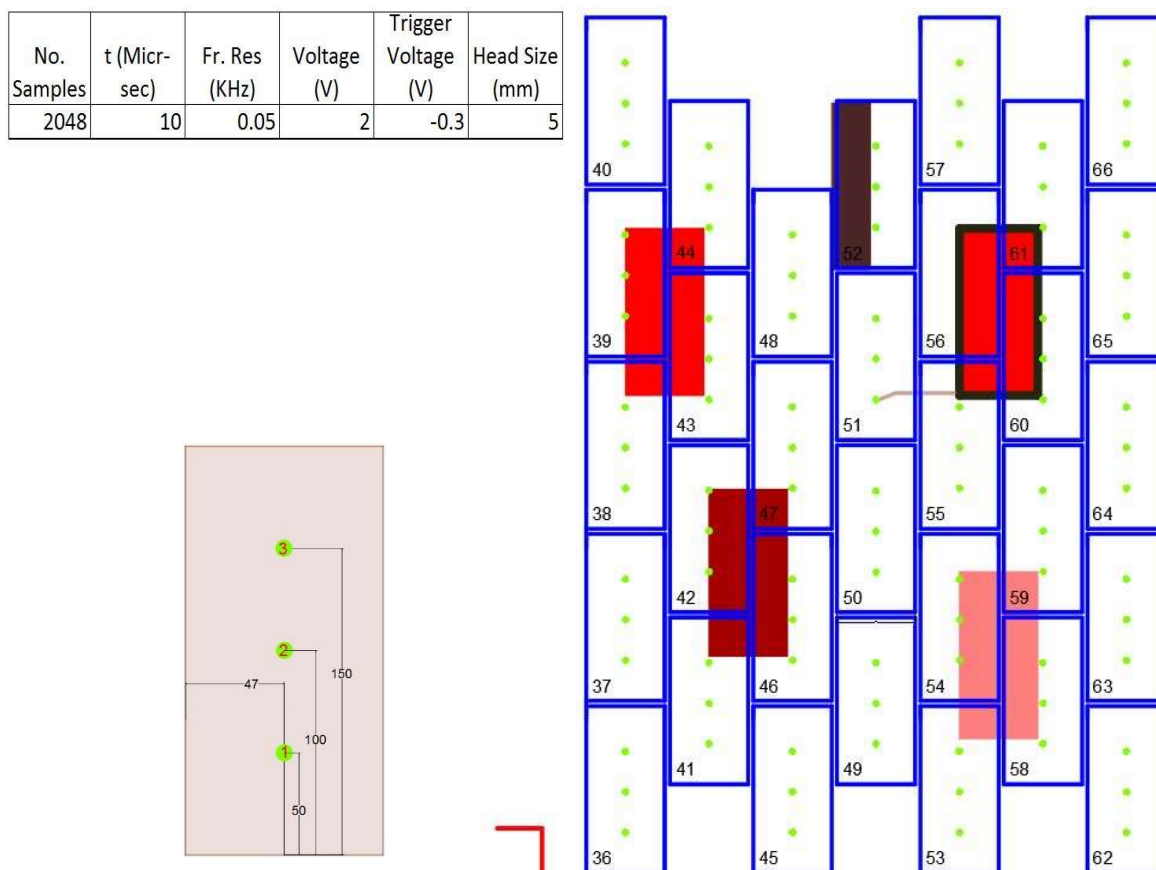


Figura 4.4-4 Esquema del test FI P3. La tabla muestra los valores para los diferentes parámetros ensayados durante la ronda de calibración. La imagen de la izquierda representa las diferentes posiciones del transductor receptor en cada una de las lecturas (en verde). La imagen de la derecha muestra la bóveda completa en la Fase I y los ladrillos testeados en la ronda de tests P3 (en verde).

La denominación de cada toma en todos los tests corresponde a la siguiente lógica:

N.D.F.P.R donde,

N, es el número de ladrillo.

D, es el diámetro de la esfera (en mm).

F es la frecuencia resolución (en kHz).

P, es la posición del test en el ladrillo (Figura 4.4-3 y Figura 4.4-4).

R, es el número de repetición; si R=0, se trata del primer impacto.

Una vez registrados los archivos por el software Impact-Echo SN IM02-266 (extensión .dat) se importaron al software FRECKLeS de la empresa GBG con el fin de poder aplicar filtros a todos los espectros en conjunto. Los filtros y parámetros que se aplicaron fueron los siguientes:

- Eliminación de la primera oscilación de la traza en dominio tiempo para eliminar el efecto de la onda R.
- Eliminación de la traza a partir de la cuarta oscilación en dominio tiempo ya que dicha sección de la traza corresponde a reflexiones de reflexiones y por tanto no aporta información, únicamente ruido al espectro en dominio frecuencia.
- Elección de 4 picos de frecuencia para visualizar con más facilidad los cuatro valores de intensidad de frecuencia.
- Introducir el valor de la velocidad de la onda acústica a través de la bóveda, la cual fue determinada realizando un test directo de ultrasonidos: 2480 m/s.

## FASE II

Durante la Fase II, utilizando como base los resultados de la Fase I y un sondeo de diámetros menores a 5 mm se realizaron dos rondas de tests, FII P3 D5 y FII P3 D3. El sondeo consistió en probar todos los diámetros inferiores a 5 mm con el fin de averiguar cuál era el menor diámetro que el transductor era capaz de recibir en esta bóveda en esta fase. El

Sphere Diameter (mm)	Contact Time ( $\mu$ s)	Max. Useful Frequency (kHz)	Minimum Depth, d, of Flaw That Can Be Detected (mm)	Minimum Size, $\ell$ , of Flaw That Can Be Detected (mm)
5	22	57	35	70
6.5	29	43	46	91
8	35	36	56	112
9.5	42	30	67	133
11	48	26	77	154
12.5	55	23	88	175

Figura 4.4-5 La figura muestra una tabla en la que se especifica la profundidad media alcanzada en función del diámetro de la esfera empleada. La tabla también incluye el espesor de la lesión detectada. Esta tabla se desarrolló para aplicaciones en hormigón, por lo que si bien es orientativa, puede no ser precisa para aplicaciones en fábrica de ladrillo (Sansalone & Streett, 1997, p. 302).

diámetro menor resultó ser el de la esfera de 3 mm. El motivo por el que era necesario utilizar el menor diámetro posible era porque a menor diámetro mayor probabilidad de detectar la pérdida de adherencia en este caso, debido a las características físicas de la lesión. Tal y como muestra la Figura 4.4-5, el diámetro de la esfera es inversamente proporcional a la frecuencia, y por tanto directamente proporcional a la profundidad alcanzada. Además, en dicha tabla se utiliza la fórmula genérica que calcula el espesor de la lesión menor detectada multiplicando el diámetro de la esfera empleada por catorce. En vista a todos los datos presentados, la mayor probabilidad de éxito correspondía a la menor esfera detectable por el transductor, en este caso, 3mm.

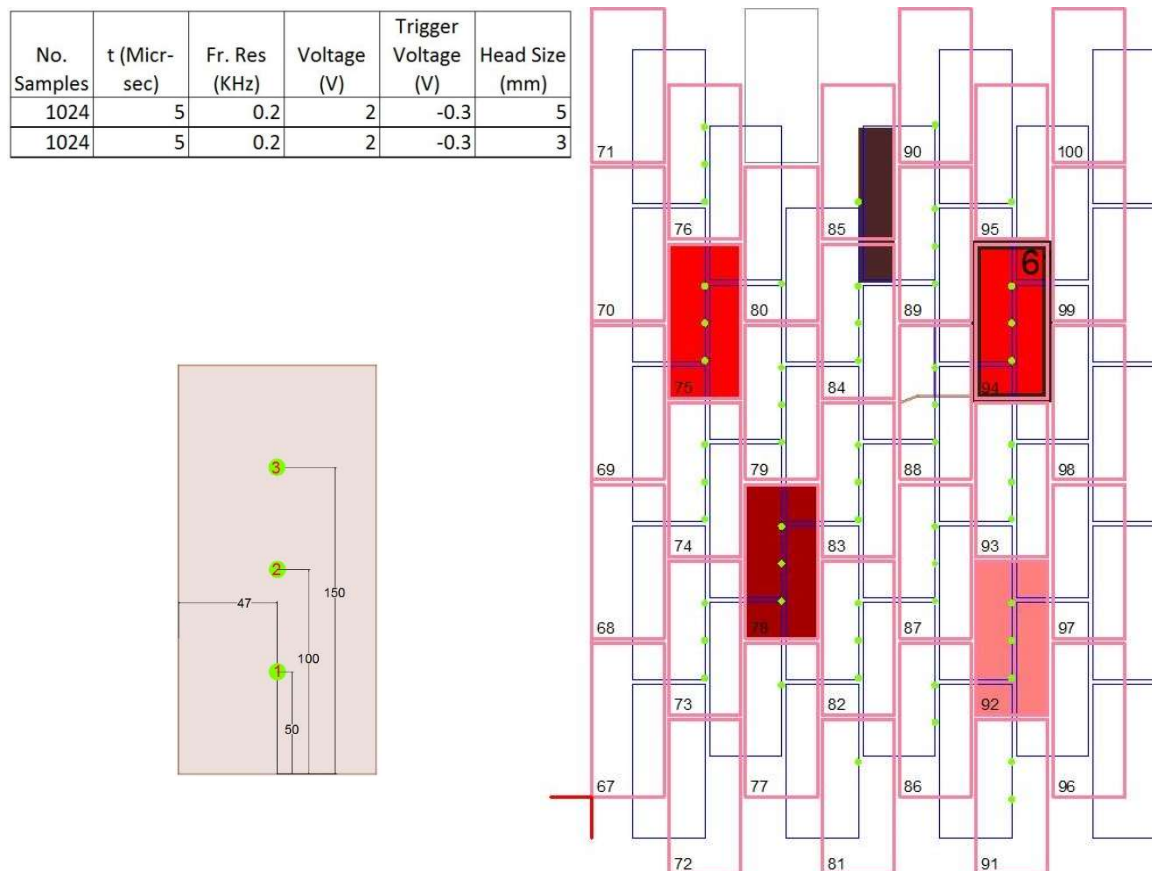


Figura 4.4-6 Esquema del test FII P3 D5 y D3. La tabla muestra los valores para los diferentes parámetros ensayados durante la ronda de calibración. La imagen de la izquierda representa las diferentes posiciones del transductor receptor en cada una de las lecturas (en verde). La imagen de la derecha muestra la bóveda completa en la Fase II y los ladrillos testeados en la ronda de tests P3 (en verde).

Los filtros y parámetros que se aplicaron durante la Fase II fueron los siguientes:

- Eliminación de la primera oscilación de la traza en dominio tiempo para eliminar el efecto de la onda R.
- Eliminación de la traza a partir de la cuarta oscilación en dominio tiempo ya que dicha sección de la traza corresponde a reflexiones de reflexiones y por tanto no aporta información, únicamente ruido al espectro en dominio frecuencia.
- Elección de 2 picos de frecuencia para visualizar con más facilidad los dos valores de intensidad de frecuencia.
- Introducir el valor de la velocidad de la onda acústica a través de la bóveda, la cual fue determinada realizando un test directo de UPV: 2480 m/s.

## 4.4.3. EQUIPO

### HARDWARE

- Receptor y unidad de procesado AC-IE-01 y IM02266 respectivamente de la marca IEL.
- Esferas de acero de diámetro 2, 3, 5 y 11.
- Unidad de control: PC portátil Panasonic CF 53.
- ASUS 17.3" Republic of Gamers GL752VW para el registro en tabla Microsoft Excel *in situ* y post-procesado.



Figura 4.4-7 El equipo del test IE se compone de las bolas de impacto (1), un receptor (2), una unidad de procesado (3), un ordenador con el software IE como unidad de control (elección de valores para los parámetros, registro, procesado y análisis) (4). En este caso se utilizó un segundo ordenador portátil para registrar con Microsoft Excel los diferentes tests (5).

### SOFTWARE

- Software Impact-Echo SN IM02-266 Ver 4.4.3 S STD
- Software FRECKLeS, de GBG, para el post-procesado y análisis.
- Sistema operativo Windows 7 para la toma de datos *in situ*.
- Sistema operativo Windows 10 para la toma de datos *in situ* y el post-procesado.

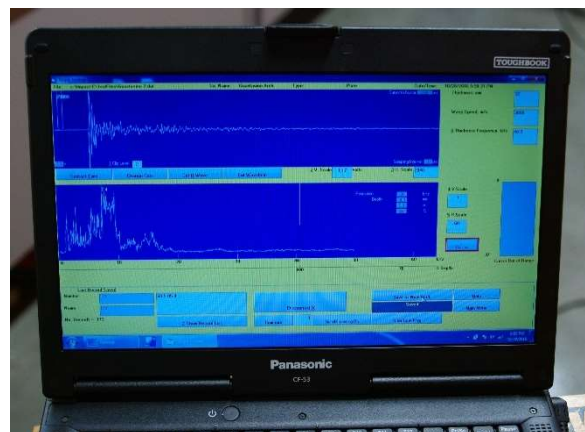


Figura 4.4-8 Imagen de la pantalla de test del software Impact-Echo SN IM02-266



## 4.4.4. RESULTADOS

Teóricamente, las mayores posibilidades de éxito, tal y como se explica en el apartado 4.4.2, correspondían a la esfera de diámetro 2 mm. Tras ser descartada en ambas fases ante la imposibilidad de registrar la onda reflejada debido a la baja intensidad del impacto generado con ésta, la esfera de diámetro 5 mm pasó a ser la única opción con posibilidades de éxito en la Fase I, ya que, tal y como era de esperar a tenor de los estudios teóricos, la esfera de diámetro 11 no resultó apropiada para este caso, ya que la profundidad a partir de la cual podía detectar faltas se comprobó ser mayor a los 44 mm de la bóveda en la Fase I <sup>1</sup>.

Durante la Fase II el diámetro mínimo detectable resultó ser de 3 mm, lo cual amplió las posibilidades de éxito.

Para todos los tests de IE, el análisis consistió en dos pasos:

- a) Comparación morfológica de los espectros con el fin de reconocer patrones comunes relacionados con el estado de la adherencia entre ladrillos.
- b) Comparación de los picos de frecuencia entre espectros con el fin de reconocer rangos relacionados con el estado de la adherencia entre ladrillos.

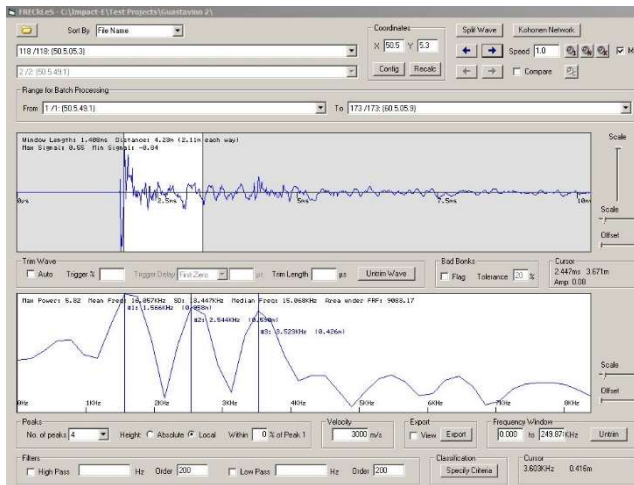
Todos los espectros se encuentran recogidos en el anexo 9.3.4 de la presente tesis. A continuación, se muestran algunos representativos con el fin de ejemplificar el resultado.

El análisis de los espectros de los tests FI P9 de la Fase I no arrojó ninguna información que pudiera establecer un patrón para reconocer delaminaciones. Lo mismo ocurrió con los espectros del test FI P3.

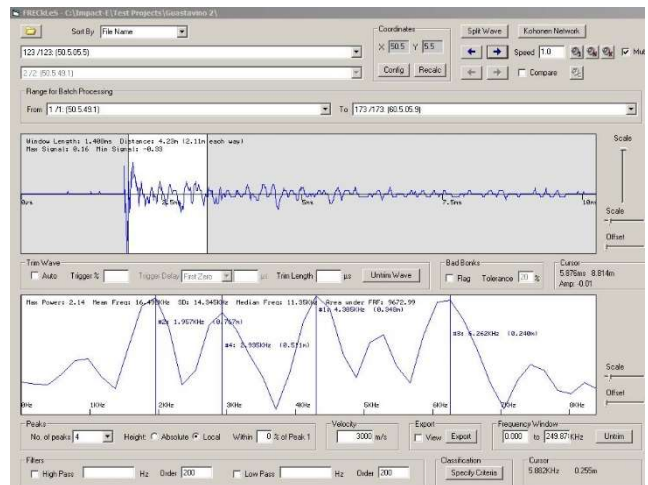
---

<sup>1</sup>  $d_{\min} = 7D$ , siendo  $d_{\min}$  la profundidad mínima a la que la técnica detecta lesiones y D el diámetro de la esfera (Sansalone & Streett, 1997, p. 301).

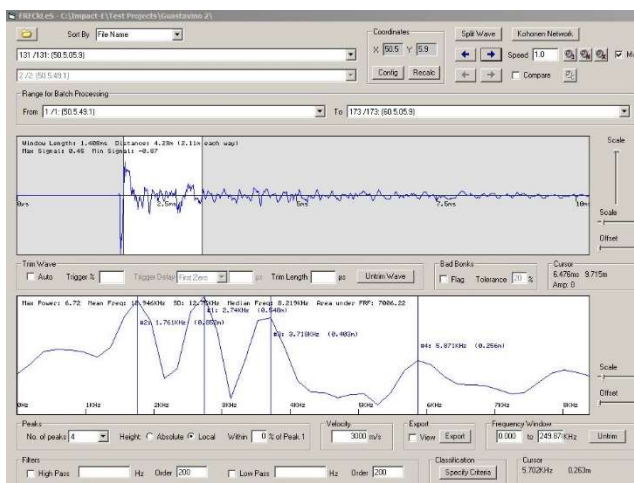
RESULTADOS PARA FI P9 FR. RES.=0,05 KHZ (N=2048, T=10 μS) LADRILLO 50



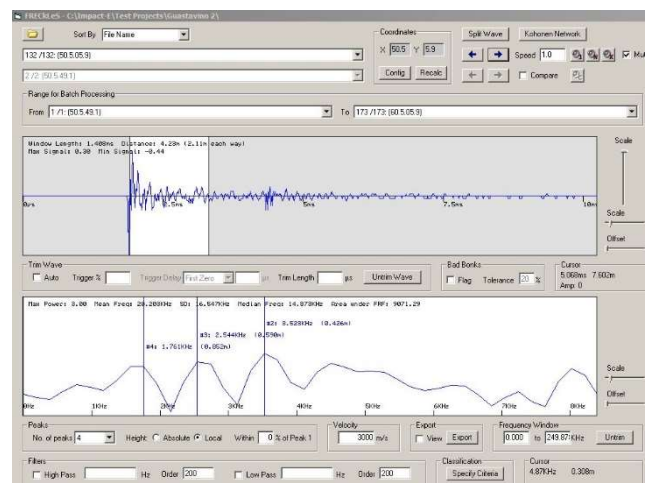
Test 50.5.05.3 Se observa un pico máximo en 1,5 kHz



Test 50.5.05.5 Se observa un pico máximo en 4,3 kHz



Test 50.5.05.9 Se observa un pico máximo en 2,74 kHz



Test 50.5.05.9 Se observa un pico máximo en 3,52 kHz

Figura 4.4-9 La imagen incluye cuatro de los 25 test realizados al ladrillo 50 durante la ronda de test P9 con frecuencia de resolución 0,05. Tal y como se observa en los cuatro test representativos, no existe un patrón morfológico ni un patrón en picos de frecuencia como cabría esperar de estos tests, que deberían dar resultados casi idénticos (comparten las mismas condiciones).

Nomenclatura: N.D.F.P.R donde,  
 N, es el número de ladrillo.  
 D, es el diámetro de la esfera (en mm).  
 F es la frecuencia resolución (en kHz).  
 P, es la posición del test en el ladrillo (Figura 4.4-3 y Figura 4.4-4).  
 R, es el número de repetición; si R=0, se trata del primer impacto.

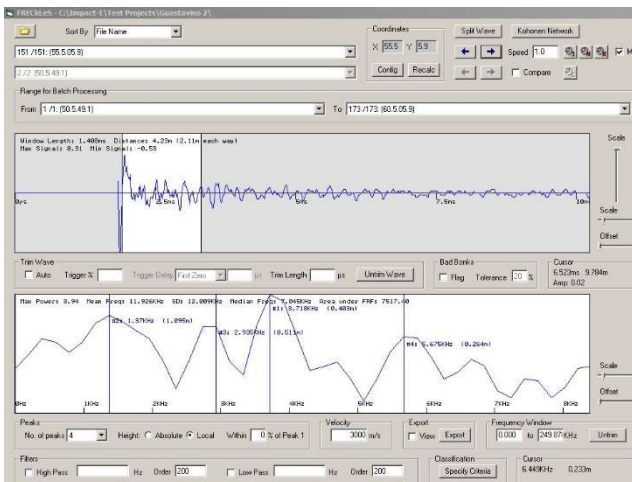
Código de color (Figura 4.4-3):

N.D.F.P.R, Test realizado en áreas en buen estado

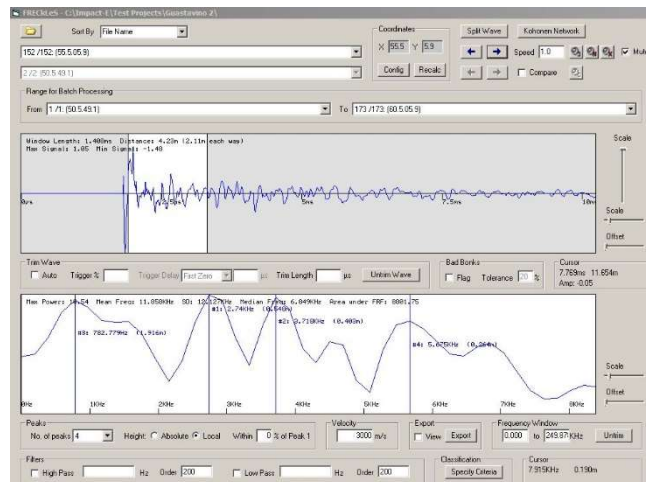
N.D.F.P.R, Test realizado en áreas en el límite entre áreas en buen estado y áreas con pérdida de adherencia.

N.D.F.P.R, Test realizado en áreas con pérdida de adherencia.

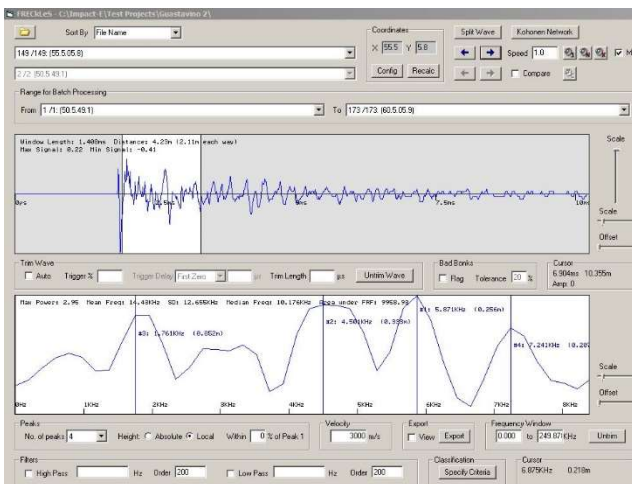
RESULTADOS PARA FI P9 FR. RES.=0,05 KHZ (N=2048, T=10 μS) LADRILLO 55



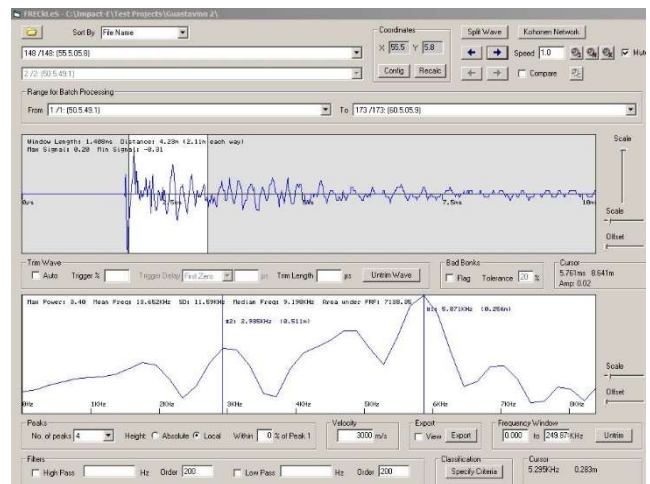
Test 55.5.05.9 Las condiciones del material en este test son idénticas a las de la Figura 4.4-9, sin embargo, no existe ningún patrón morfológico ni numérico que permita deducirlo.



Test 55.5.05.9 Este test se realiza exactamente en la misma localización que el 55.5.05.9 (izquierda) y, si bien el resultado es similar (y similar también al test 50.5.05.5 de la Figura 4.4-9, no establece un patrón sobre el que poder comparar.



Test 55.5.05.8 Esta localización corresponde a un área con falta de adherencia. Sin embargo, no se observa ningún indicio ni en la forma del espectro ni en los picos de frecuencia que así lo indiquen.



Test 55.5.05.8.2 Este test se realiza exactamente en la misma localización que el 55.5.05.8 (izquierda), sin embargo, el resultado es muy diferente. Se trata de un claro indicio de que el test no está funcionando.

Figura 4.4-10 La imagen incluye cuatro de los 25 test realizados al ladrillo 55 durante la ronda de test P9 con frecuencia de resolución 0,05. Tal y como se observa en los cuatro test representativos, no existe un patrón morfológico ni un patrón en picos de frecuencia como cabría esperar de estos tests.

Nomenclatura: N.D.F.P.R donde,  
 N, es el número de ladrillo.  
 D, es el diámetro de la esfera (en mm).  
 F es la frecuencia resolución (en kHz).  
 P, es la posición del test en el ladrillo (Figura 4.4-3 y Figura 4.4-4).  
 R, es el número de repetición; si R=0, se trata del primer impacto.

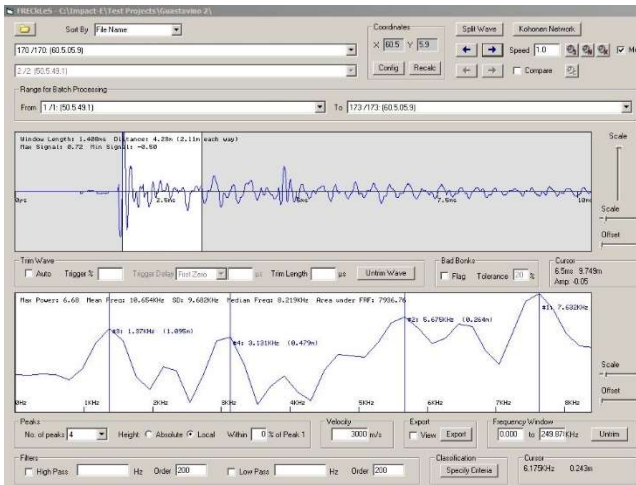
Código de color (Figura 4.4-3):

N.D.F.P.R, Test realizado en áreas en buen estado

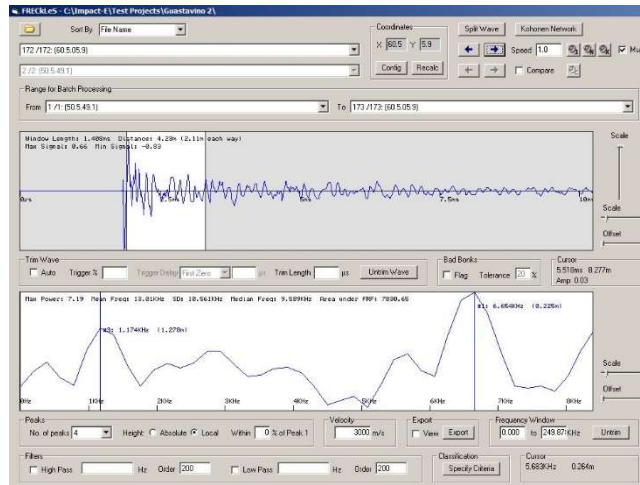
N.D.F.P.R, Test realizado en áreas en el límite entre áreas en buen estado y áreas con pérdida de adherencia.

N.D.F.P.R, Test realizado en áreas con pérdida de adherencia.

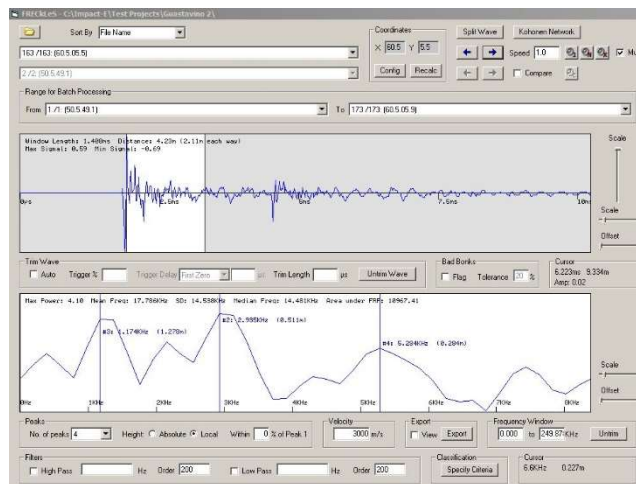
RESULTADOS PARA FI P9 FR. RES.=0,05 KHZ (N=2048, T=10 μS) **LADRILLO 60**



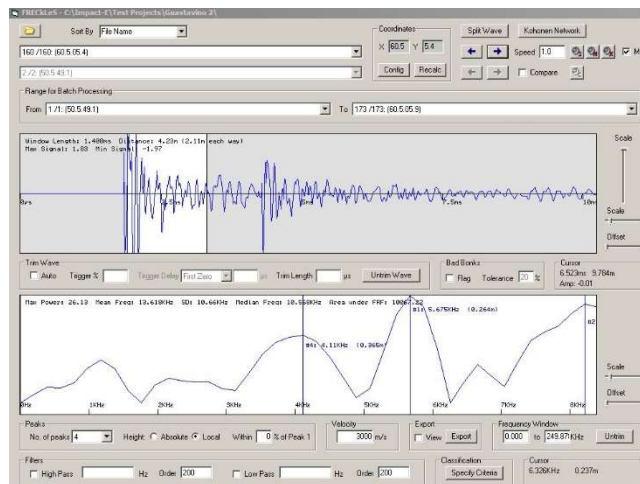
**Test 60.5.05.9** Esta localización corresponde a un área con falta de adherencia. Sin embargo, no se observa ningún indicio ni en la forma del espectro ni en los picos de frecuencia que así lo indiquen.



**Test 60.5.05.9.2** Tal y como ocurre en la Figura 4.4-10, este test se realiza exactamente en la misma localización que el 60.5.05.9 (izquierda), sin embargo, el resultado es muy diferente. Se trata de un claro indicio de que el test no está funcionando.



**Test 60.5.05.5.** Este test se realiza en un área con pérdida de adherencia. El resultado no permite caracterizar un patrón para la identificación de la lesión.



**Test 60.5.05.4** El resultado no responde a ningún patrón. En este caso, cabría esperar resultados similares a los espectros de la Figura 4.4-9, que, a su vez, deberían ser similares entre sí.

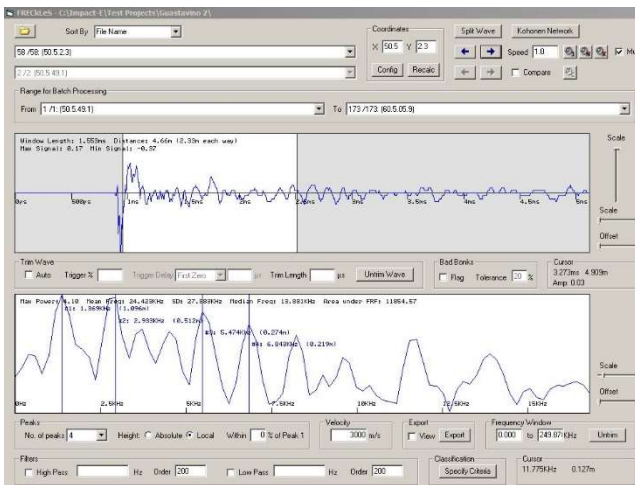
**Figura 4.4-11** La imagen incluye cuatro de los 25 test realizados al ladrillo 60 durante la ronda de test P9 con frecuencia de resolución 0,05. Tal y como se observa en los cuatro test representativos, no existe un patrón morfológico ni un patrón en picos de frecuencia como cabría esperar de estos tests.

**Nomenclatura:** N.D.F.P.R donde,  
 N, es el número de ladrillo.  
 D, es el diámetro de la esfera (en mm).  
 F es la frecuencia resolución (en kHz).  
 P, es la posición del test en el ladrillo (Figura 4.4-3 y Figura 4.4-4).  
 R, es el número de repetición; si R=0, se trata del primer impacto.

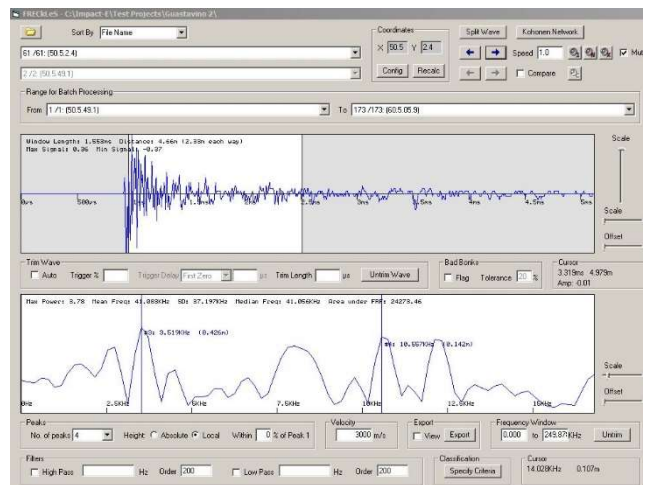
**Código de color (Figura 4.4-3):**  
 N.D.F.P.R, Test realizado en áreas en buen estado.  
 N.D.F.P.R, Test realizado en áreas en el límite entre áreas en buen estado y áreas con pérdida de adherencia.  
 N.D.F.P.R, Test realizado en áreas con pérdida de adherencia.



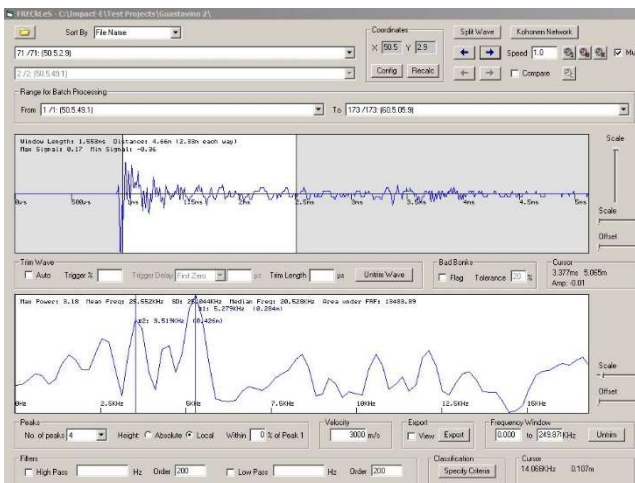
RESULTADOS PARA FI P9 FR. RES.=0,2 KHZ (N=1024, T=5 μS) LADRILLO 50



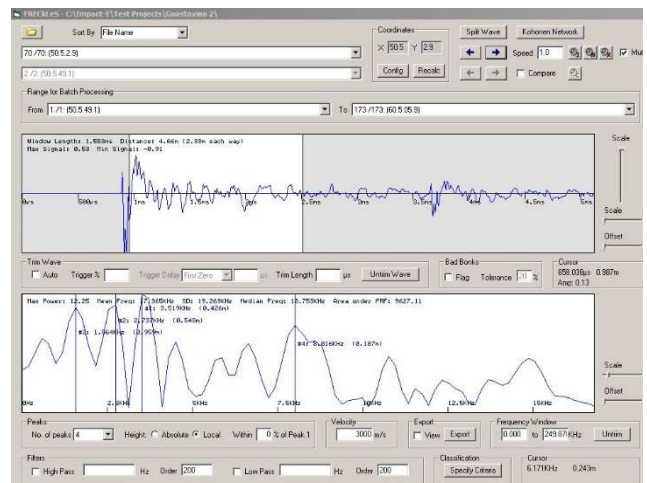
Test 50.5.2.3



Test 50.5.2.4



Test 50.5.2.9



Test 50.5.2.9.2 Este test y el 50.5.2.9 (izquierda) se tomaron en el mismo punto, por lo que cabría esperar que los espectros fueran parecidos, si no coincidentes.

Figura 4.4-12 La imagen incluye cuatro de los 25 test realizados al ladrillo 50 durante la ronda de test P9 con frecuencia de resolución 0,2. Tal y como se observa en los cuatro test representativos, no existe un patrón morfológico ni un patrón en picos de frecuencia como cabría esperar de estos tests, que deberían dar resultados casi idénticos (comparten las mismas condiciones).

Nomenclatura: N.D.F.P.R donde,  
 N, es el número de ladrillo.  
 D, es el diámetro de la esfera (en mm).  
 F es la frecuencia resolución (en kHz).  
 P, es la posición del test en el ladrillo (Figura 4.4-3 y Figura 4.4-4).  
 R, es el número de repetición; si R=0, se trata del primer impacto.

Código de color (Figura 4.4-3):

N.D.F.P.R, Test realizado en áreas en buen estado.

N.D.F.P.R, Test realizado en áreas en el límite entre áreas en buen estado y áreas con pérdida de adherencia.

N.D.F.P.R, Test realizado en áreas con pérdida de adherencia.

## Resultados para FI P9 Fr. Res.=0,2 kHz (N=1024, t=5 μs) LADRILLO 55

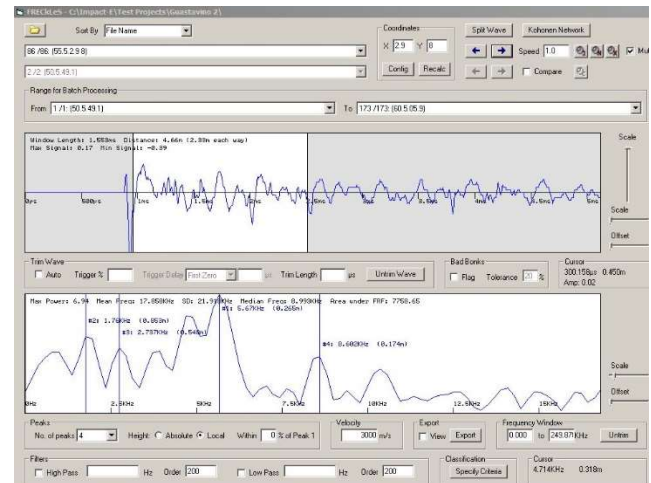
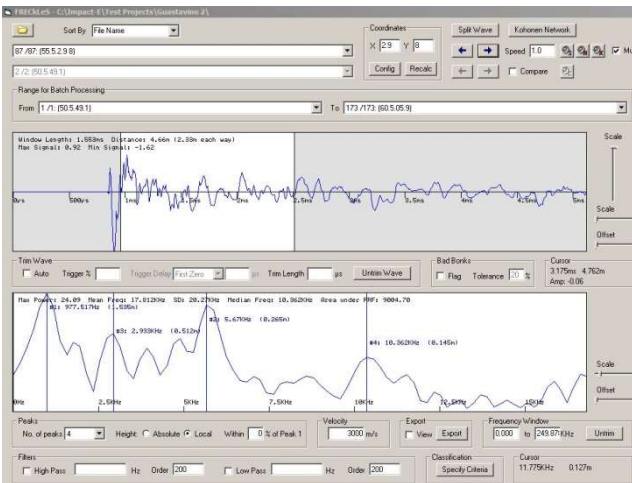
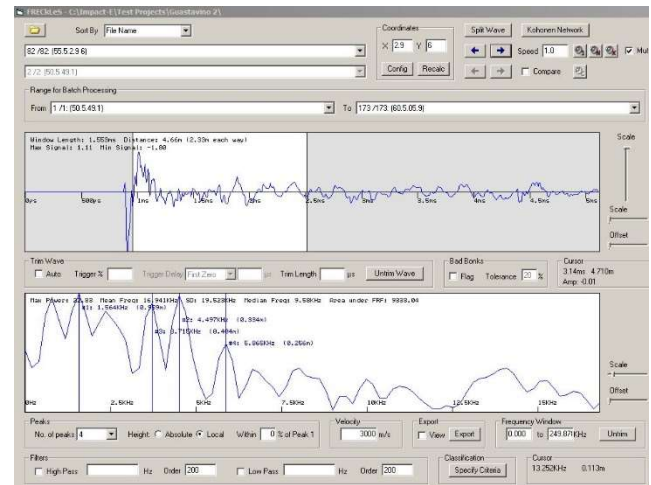
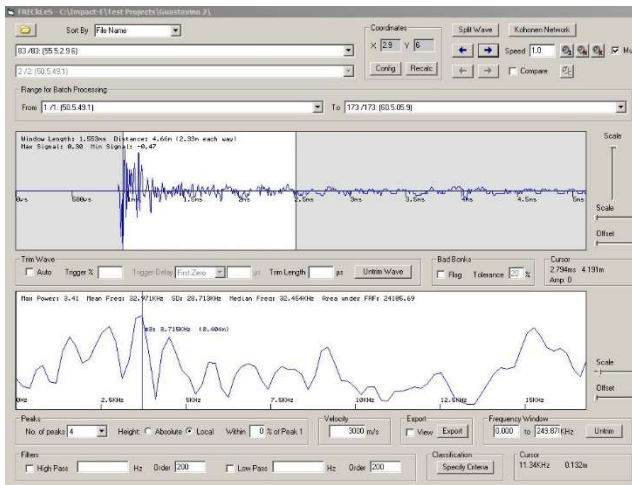
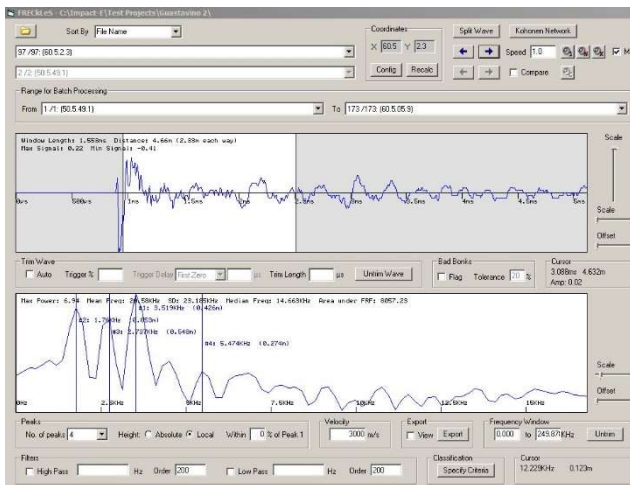


Figura 4.4-13 La imagen incluye cuatro de los 25 test realizados al ladrillo 55 durante la ronda de test P9 con frecuencia de resolución 0,2. Tal y como se observa en los cuatro test representativos, no existe un patrón morfológico ni un patrón en picos de frecuencia como cabría esperar de estos tests, ni en los realizados sobre áreas en buenas condiciones ni en los realizados en áreas con pérdida de adherencia.

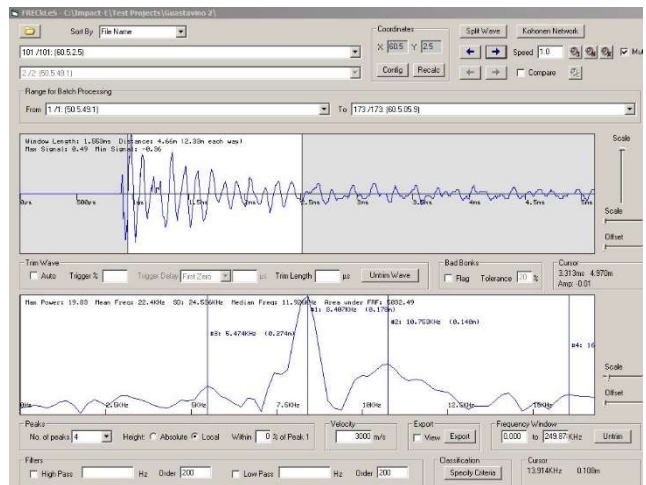
Nomenclatura: N.D.F.P.R donde,  
 N, es el número de ladrillo.  
 D, es el diámetro de la esfera (en mm).  
 F es la frecuencia resolución (en kHz).  
 P, es la posición del test en el ladrillo (Figura 4.4-3 y Figura 4.4-4).  
 R, es el número de repetición; si R=0, se trata del primer impacto.

Código de color (Figura 4.4-3):  
 N.D.F.P.R, Test realizado en áreas en buen estado.  
 N.D.F.P.R, Test realizado en áreas en el límite entre áreas en buen estado y áreas con pérdida de adherencia.  
 N.D.F.P.R, Test realizado en áreas con pérdida de adherencia

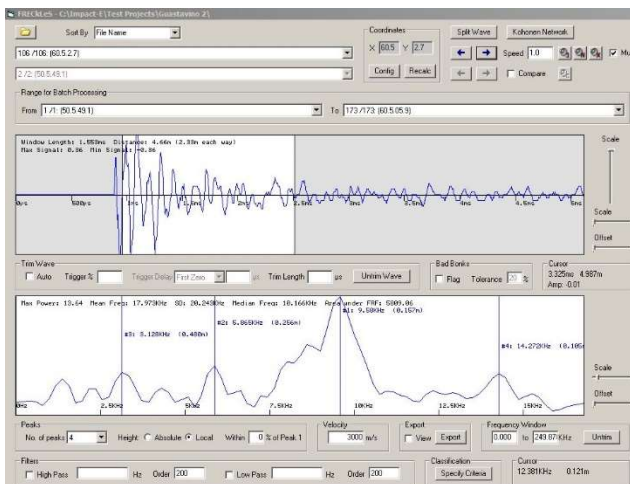
RESULTADOS PARA FI P9 FR. RES.=0,2 KHZ (N=1024, T=5 μS) LADRILLO 60



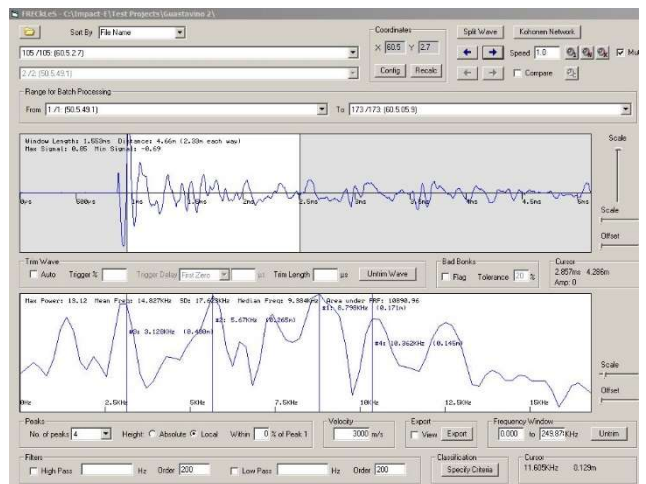
Test 60.5.2.3



Test 60.5.2.5



Test 60.5.2.7



Test 60.5.2.7.2

Figura 4.4-14 La imagen incluye cuatro de los 25 test realizados al ladrillo 60 durante la ronda de test P9 con frecuencia de resolución 0,2. Tal y como se observa en los cuatro test representativos, no existe un patrón morfológico ni un patrón en picos de frecuencia como cabría esperar de estos tests, todos ellos practicados en áreas con pérdida de adherencia entre la primera y segunda capa.

Nomenclatura: N.D.F.P.R donde,

N, es el número de ladrillo.

D, es el diámetro de la esfera (en mm).

F es la frecuencia resolución (en KHz).

P, es la posición del test en el ladrillo (Figura 4.4-3 y Figura 4.4-4).

R, es el número de repetición; si R=0, se trata del primer impacto.

Código de color (Figura 4.4-3):

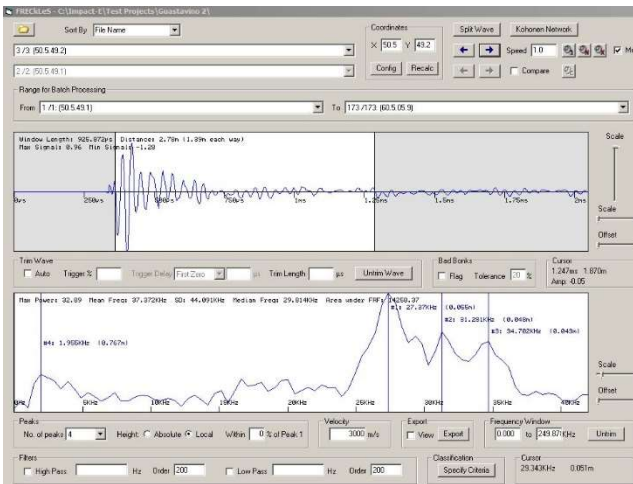
N.D.F.P.R, Test realizado en áreas en buen estado.

N.D.F.P.R, Test realizado en áreas en el límite entre áreas en buen estado y áreas con pérdida de adherencia.

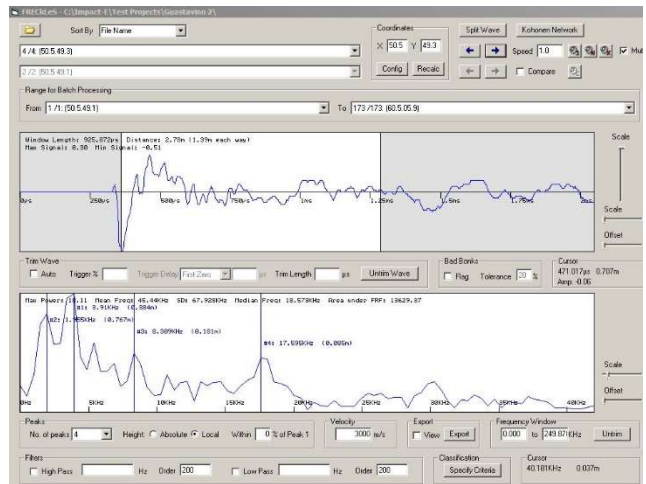
N.D.F.P.R, Test realizado en áreas con pérdida de adherencia



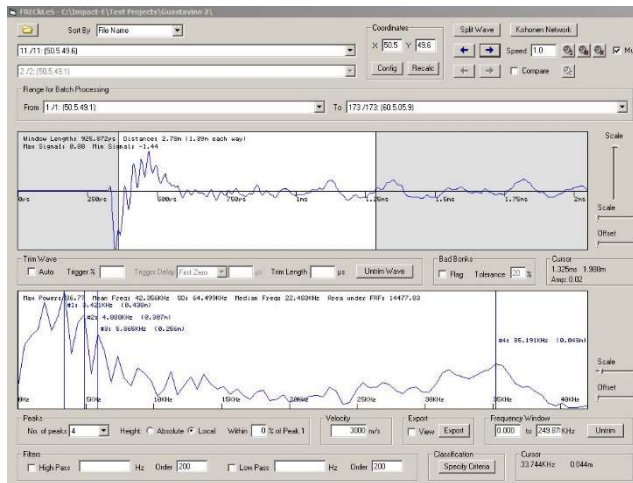
RESULTADOS PARA FI P9 FR. RES.=0,49 KHZ (N=1024, T=2 μS) LADRILLO 50



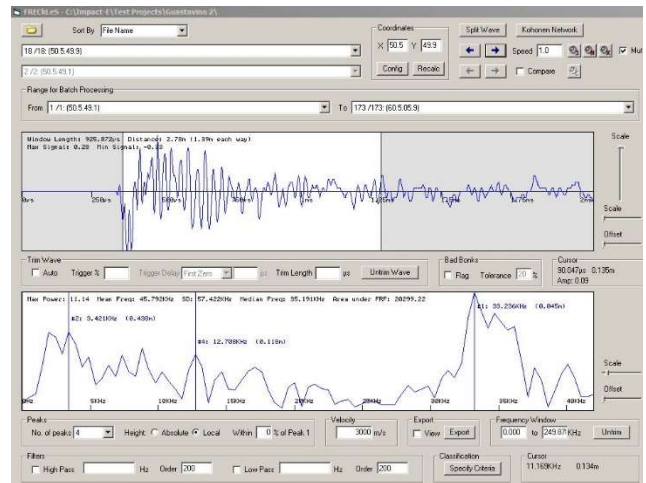
Test 50.5.49.2



Test 50.5.49.3



Test 50.5.49.6



Test 50.5.49.9

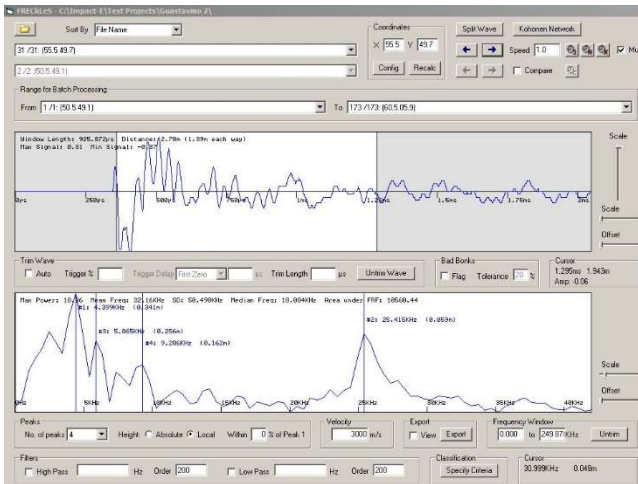
Figura 4.4-15 La imagen incluye cuatro de los 25 test realizados al ladrillo 50 durante la ronda de test P9 con frecuencia de resolución 0,49. Tal y como se observa en los cuatro test representativos, no existe un patrón morfológico ni un patrón en picos de frecuencia como cabría esperar de estos tests, que deberían dar resultados casi idénticos (comparten las mismas condiciones). Estos parámetros (Fr. Res. =0,49 kHz) son los que peor resultado dan, ya que ni siquiera la primera oscilación de frecuencia, correspondiente a la onda R, es coincidente en dominio tiempo, lo que implica que el primer paso del post-procesado, la eliminación de esa primera oscilación (y que se realiza para el conjunto de tests con los mismos parámetros), no coincide en todas las trazas, imposibilitando la lectura.

Nomenclatura: N.D.F.P.R donde,  
 N, es el número de ladrillo.  
 D, es el diámetro de la esfera (en mm).  
 F es la frecuencia resolución (en kHz).  
 P, es la posición del test en el ladrillo (Figura 4.4-3 y Figura 4.4-4).  
 R, es el número de repetición; si R=0, se trata del primer impacto.

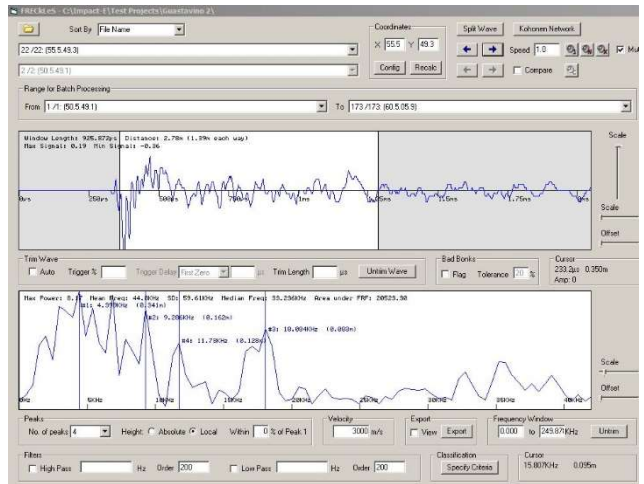
Código de color (Figura 4.4-3):  
 N.D.F.P.R, Test realizado en áreas en buen estado.



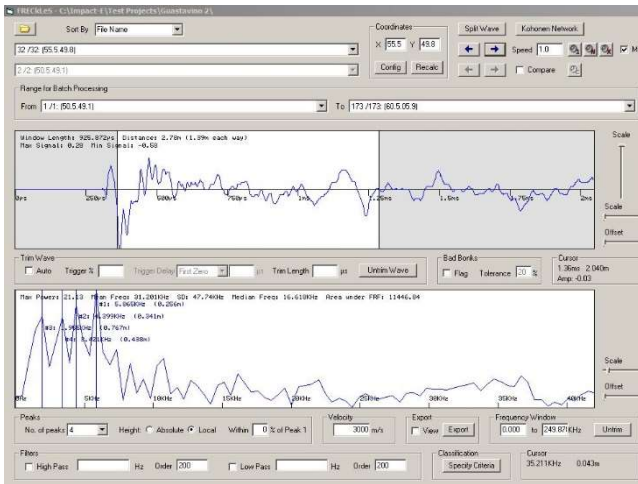
RESULTADOS PARA FI P9 FR. RES.=0,49 KHZ (N=1024, T=2 μS) LADRILLO 55



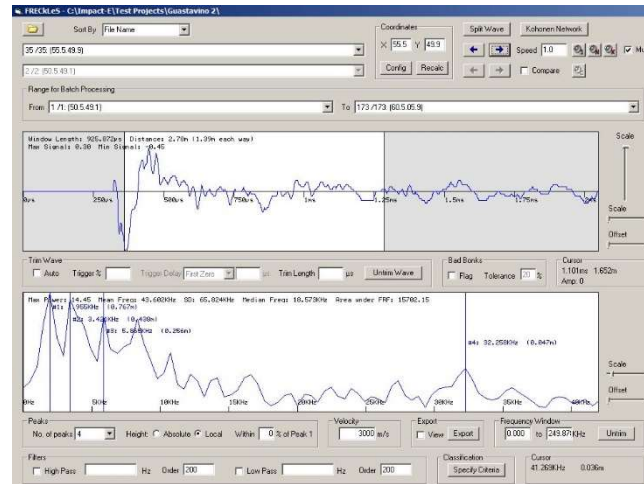
Test 55.5.49.7



Test 55.5.49.3



Test 55.5.49.8



Test 55.5.49

Figura 4.4-16 La imagen incluye cuatro de los 25 test realizados al ladrillo 55 durante la ronda de test P9 con frecuencia de resolución 0,49. Tal y como se observa en los cuatro test representativos, no existe un patrón morfológico ni un patrón en picos de frecuencia como cabría esperar de estos tests, ni en los realizados sobre áreas en buenas condiciones ni en los realizados en áreas con pérdida de adherencia. Tal y como se explica en la Figura 4.4-16, estos parámetros (resultantes en una Fr. Res.=0,49 kHz), son los de proporcionan peores resultados.

Nomenclatura: N.D.F.P.R donde,  
 N, es el número de ladrillo.  
 D, es el diámetro de la esfera (en mm).  
 F es la frecuencia resolución (en kHz).  
 P, es la posición del test en el ladrillo (Figura 4.4-3 y Figura 4.4-4).  
 R, es el número de repetición; si R=0, se trata del primer impacto.

Código de color (Figura 4.4-3):

N.D.F.P.R, Test realizado en áreas en buen estado.

N.D.F.P.R, Test realizado en áreas en el límite entre áreas en buen estado y áreas con pérdida de adherencia.

N.D.F.P.R, Test realizado en áreas con pérdida de adherencia

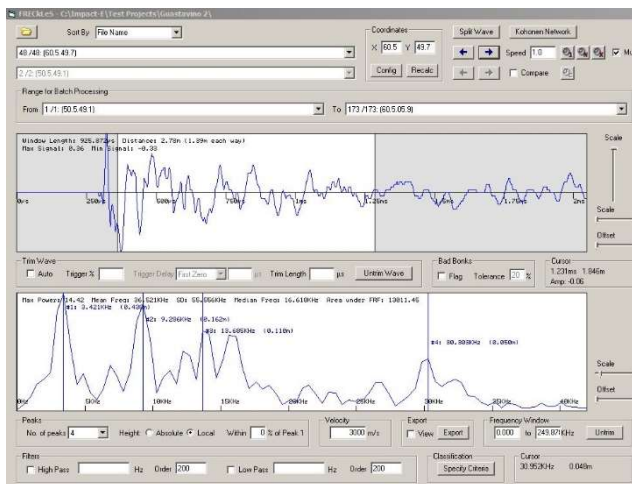
RESULTADOS PARA FI P9 FR. RES.=0,49 KHZ (N=1024, T=2 μS) LADRILLO 60



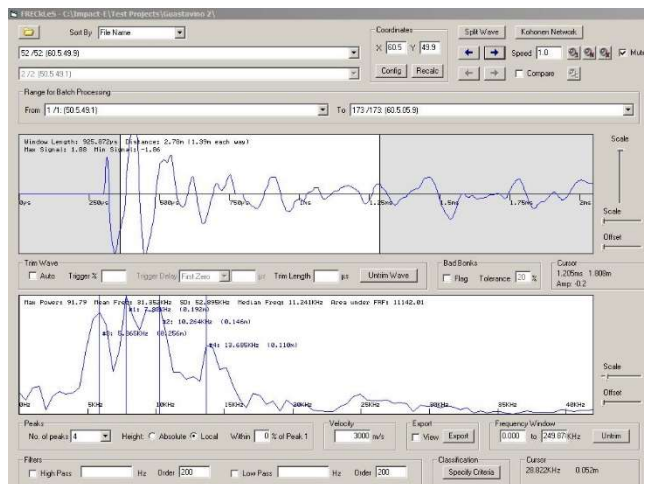
Test 60.5.49.5



Test 60.5.49.7



Test 60.5.49.9



Test 60.5.49.9

Figura 4.4-17 La imagen incluye cuatro de los 25 tests realizados al ladrillo 60 durante la ronda de test P9 con frecuencia de resolución 0,49. Tal y como se observa en los cuatro test representativos, no existe un patrón morfológico ni un patrón en picos de frecuencia como cabría esperar de estos tests, todos ellos, excepto el último, practicados en áreas con pérdida de adherencia entre la primera y segunda capa. Tal y como se explica en la Figura 4.4-16, estos parámetros (resultantes en una Fr. Res.=0,49 kHz), son los de proporcionan peores resultados.

Nomenclatura: N.D.F.P.R donde,

N, es el número de ladrillo.

D, es el diámetro de la esfera (en mm).

F es la frecuencia resolución (en kHz).

P, es la posición del test en el ladrillo (Figura 4.4-3 y Figura 4.4-4).

R, es el número de repetición; si R=0, se trata del primer impacto.

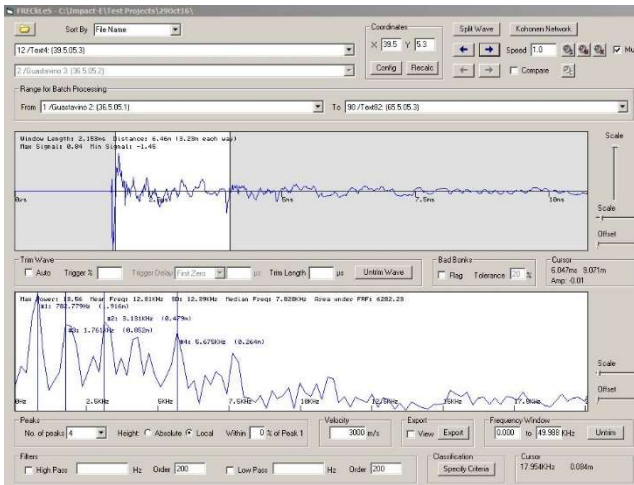
Código de color (Figura 4.4-3):

N.D.F.P.R, Test realizado en áreas en buen estado.

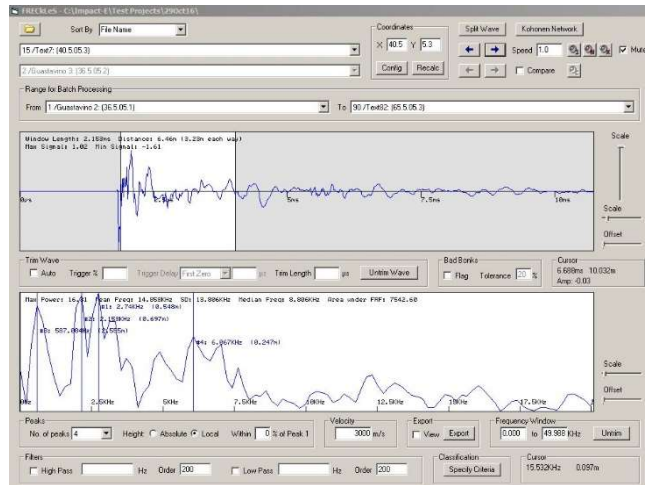
N.D.F.P.R, Test realizado en áreas en el límite entre áreas en buen estado y áreas con pérdida de adherencia.

N.D.F.P.R, Test realizado en áreas con pérdida de adherencia

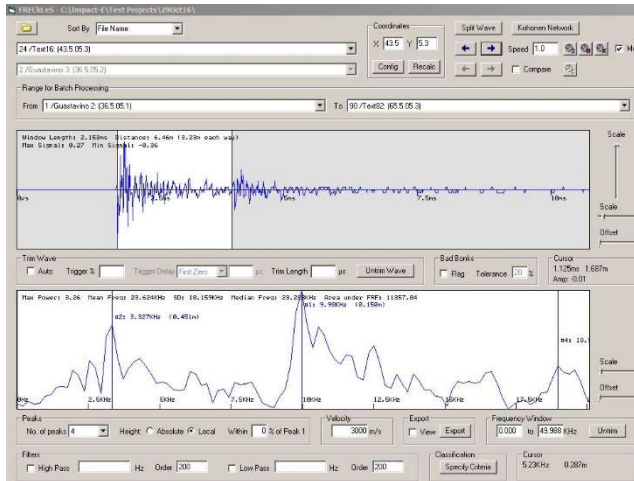
RESULTADOS PARA FI P3 FR. RES.=0,05 KHZ (N=2048, T=10 μS)



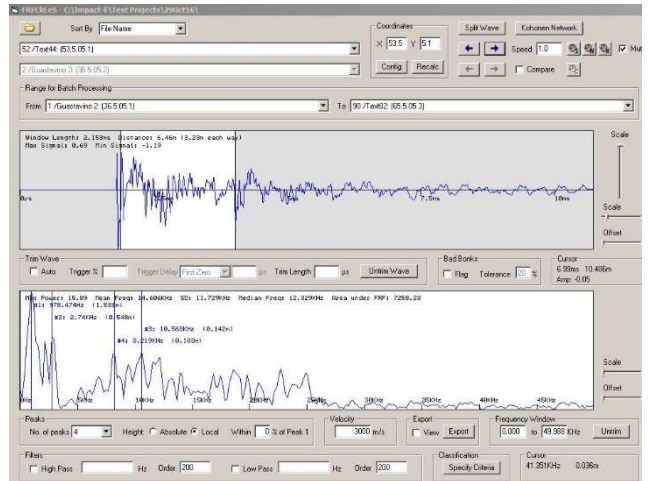
Test 39.5.05.3



Test 40.5.05.3



Test 43.5.05.3



Test 53.5.05.1

Figura 4.4-18 La imagen incluye cuatro de los 93 test realizados a los 31 ladrillos de la segunda capa durante la ronda de test P3 con frecuencia de resolución 0,05. Tal y como se observa en los cuatro test representativos, no existe un patrón morfológico ni un patrón en picos de frecuencia que permita deducir la existencia o no de pérdida de adherencia entre la primera y segunda capas.

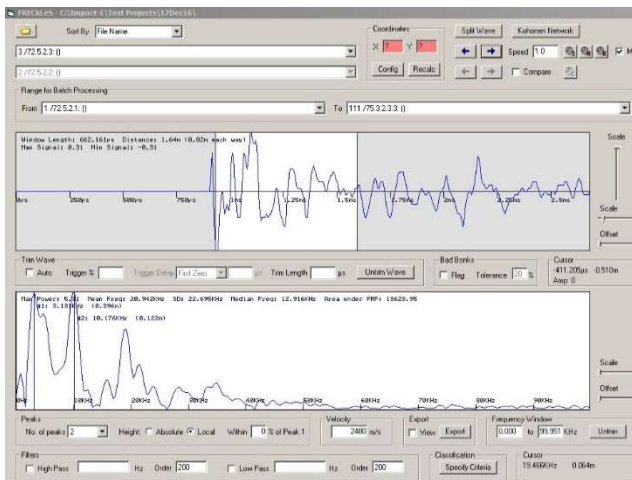
Nomenclatura: N.D.F.P.R donde,  
 N, es el número de ladrillo.  
 D, es el diámetro de la esfera (en mm).  
 F es la frecuencia resolución (en kHz).  
 P, es la posición del test en el ladrillo (Figura 4.4-3 y Figura 4.4-4).  
 R, es el número de repetición; si R=0, se trata del primer impacto.

Código de color (Figura 4.4-3):  
 N.D.F.P.R, Test realizado en áreas en buen estado.  
 N.D.F.P.R, Test realizado en áreas en el límite entre áreas en buen estado y áreas con pérdida de adherencia.  
 N.D.F.P.R, Test realizado en áreas con pérdida de adherencia

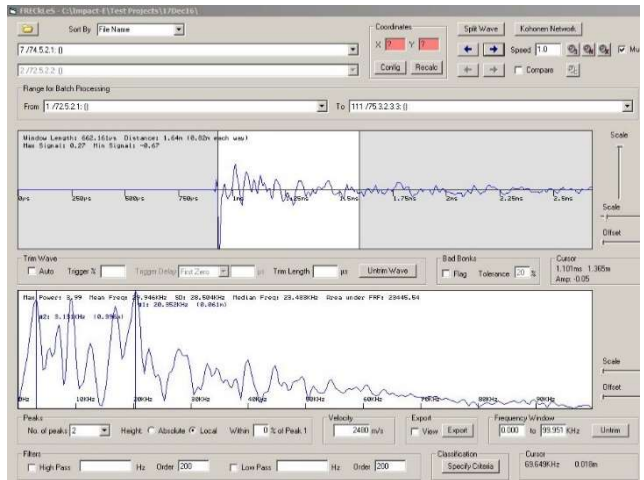
A continuación, se muestran los resultados representativos del test FII P3 D5 y FII P3 D3, con el fin de ejemplificar el resultado. El primero de los test no arrojó resultados suficientemente claros como para poder establecer un patrón de reconocimiento de la lesión de pérdida de adherencia entre ladrillos para este caso de bóveda de tres hojas, sin embargo, el test FII P3 D3 sí que permitió reconocer un patrón, pero no con la suficiente contundencia como para diseñar un protocolo.



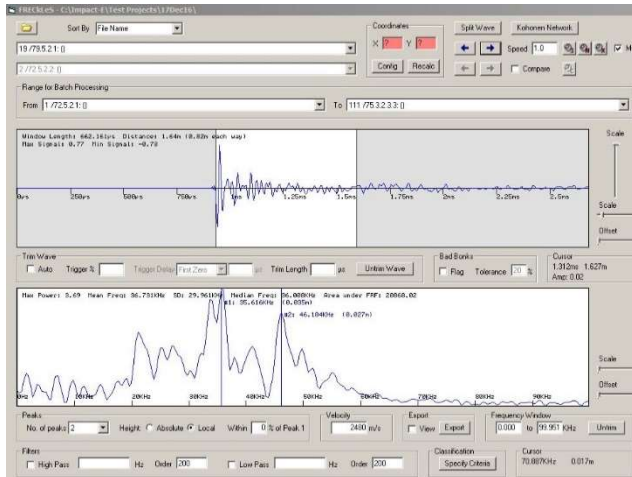
RESULTADOS PARA FII P3 D5 FR. RES.=0,2 KHZ (N=1024, T=5 μS)



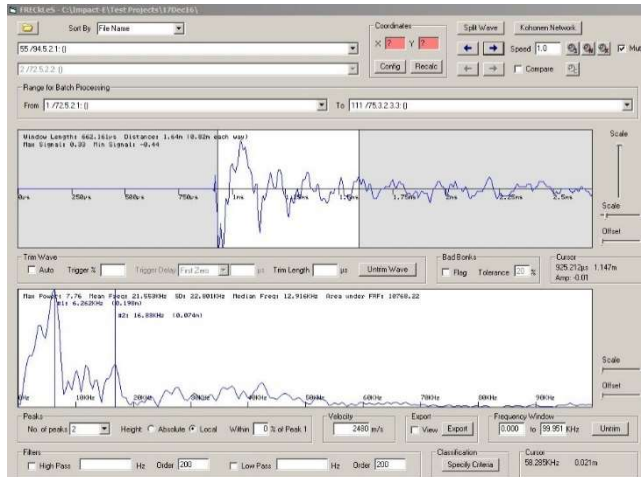
Test 72.5.2.3



Test 74.5.2.1



Test 79.5.2.1



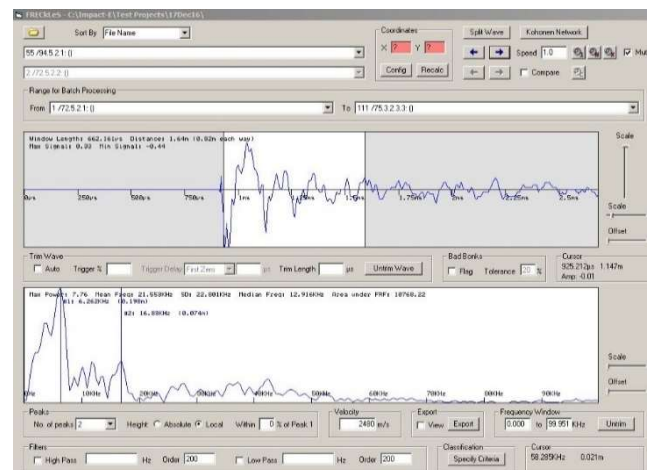
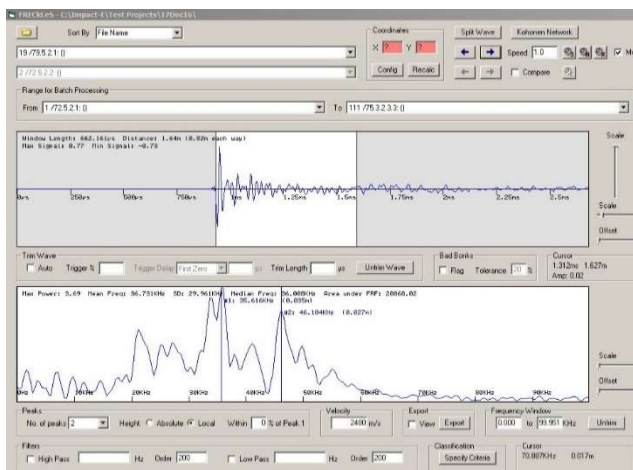
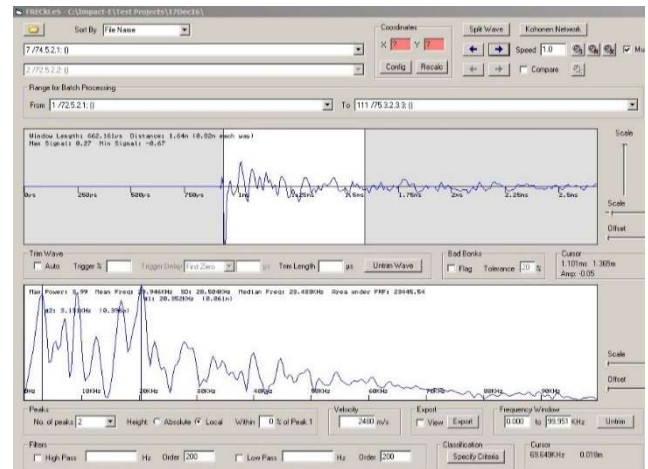
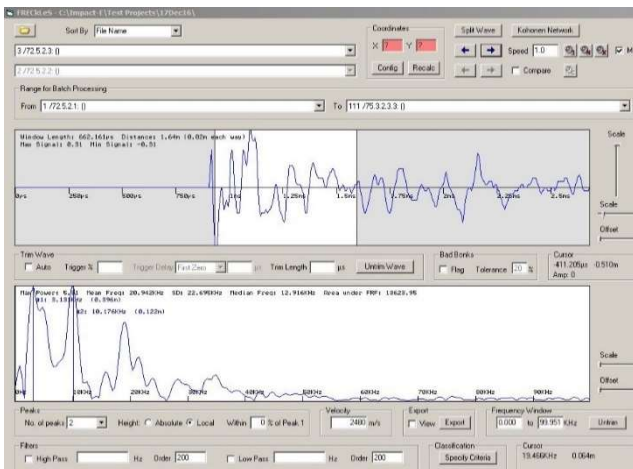
Test 94.5.2.1

Figura 4.4-19 La imagen incluye cuatro de los 63 test realizados a los 34 ladrillos de la tercera capa durante la ronda de test FII P3 D5 con frecuencia de resolución 0,2. Tal y como se observa en los cuatro test representativos, no existe un patrón morfológico ni un patrón en picos de frecuencia que permita deducir la existencia o no de pérdida de adherencia entre la primera y segunda capas.

Nomenclatura: N.D.F.P.R donde,  
 N, es el número de ladrillo.  
 D, es el diámetro de la esfera (en mm).  
 F es la frecuencia resolución (en kHz).  
 P, es la posición del test en el ladrillo (Figura 4.4-6).  
 R, es el número de repetición; si R=0, se trata del primer impacto.

Código de color (Figura 4.4-6):  
 N.D.F.P.R, Test realizado en áreas en buen estado.  
 N.D.F.P.R, Test realizado en áreas en el límite entre áreas en buen estado y áreas con pérdida de adherencia.  
 N.D.F.P.R, Test realizado en áreas con pérdida de adherencia

RESULTADOS PARA FII P3 D5 FR. RES.=0,2 KHZ (N=1024, T=5 μS)



Test 79.5.2.1

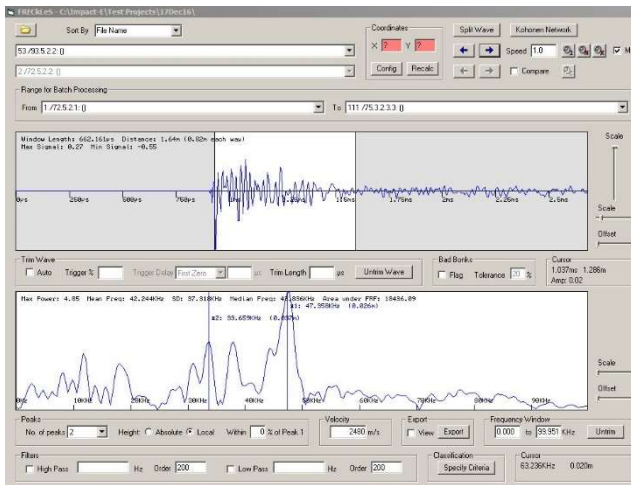
Test 94.5.2.1

Figura 4.4-20 La imagen incluye cuatro de los 63 test realizados a los 34 ladrillos de la tercera capa durante la ronda de test FII P3 D5 con frecuencia de resolución 0,2. Tal y como se observa en los cuatro test representativos, no existe un patrón morfológico ni un patrón en picos de frecuencia que permita deducir la existencia o no de pérdida de adherencia entre la primera y segunda capas.

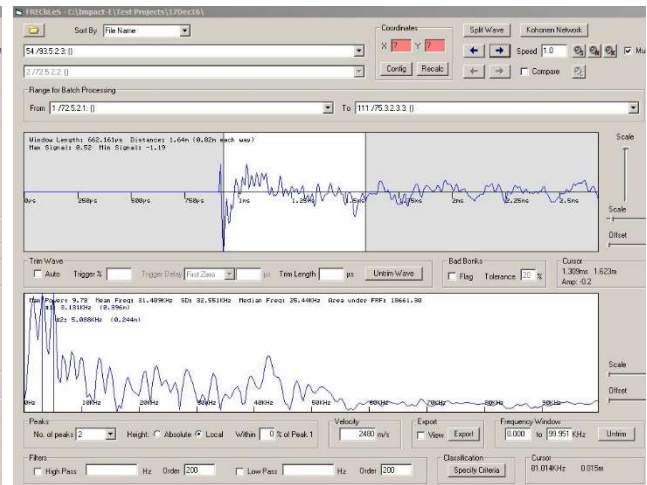
Nomenclatura: N.D.F.P.R donde,  
 N, es el número de ladrillo.  
 D, es el diámetro de la esfera (en mm).  
 F es la frecuencia resolución (en kHz).  
 P, es la posición del test en el ladrillo (Figura 4.4-6).  
 R, es el número de repetición; si R=0, se trata del primer impacto.

Código de color (Figura 4.4-6):  
 N.D.F.P.R, Test realizado en áreas en buen estado.  
 N.D.F.P.R, Test realizado en áreas en el límite entre áreas en buen estado y áreas con pérdida de adherencia.  
 N.D.F.P.R, Test realizado en áreas con pérdida de adherencia

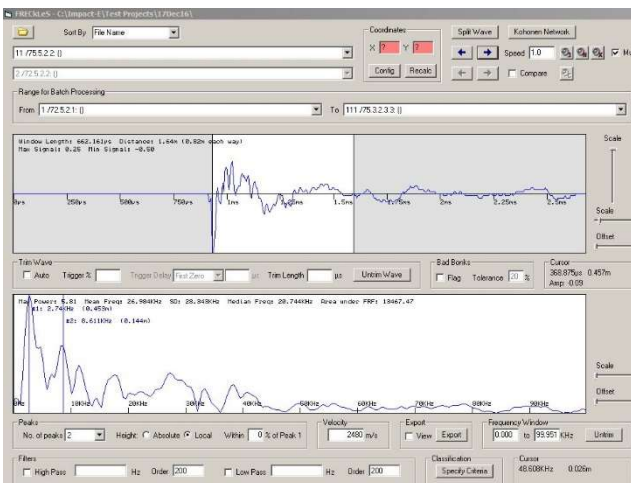
RESULTADOS PARA FII P3 D5 FR. RES.=0,2 KHZ (N=1024, T=5 μS)



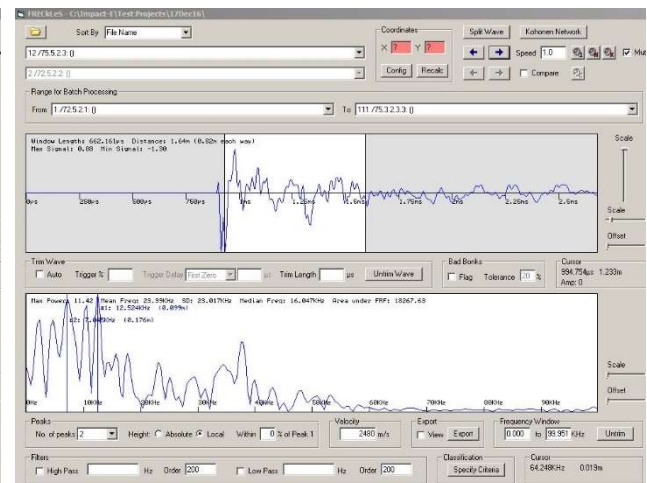
Test 93.5.2.2



Test 93.5.2.3



Test 75.5.2.2



Test 75.5.2.3

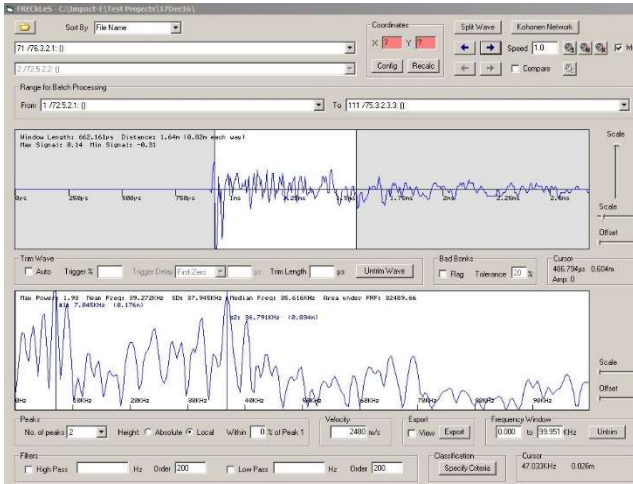
Figura 4.4-21 La imagen incluye cuatro de los 63 test realizados a los 34 ladrillos de la tercera capa durante la ronda de test FII P3 D5 con frecuencia de resolución 0,2. Tal y como se observa en los cuatro test representativos, no existe un patrón morfológico ni un patrón en picos de frecuencia que permita deducir la existencia o no de pérdida de adherencia entre la primera y segunda capas. Nótese que los dos gráficos superiores corresponden al ladrillo 93 mientras que los dos inferiores corresponden al ladrillo 75. Dichas parejas de tests deberían ser similares entre sí dado que las condiciones son las mismas.

Nomenclatura: N.D.F.P.R donde,  
 N, es el número de ladrillo.  
 D, es el diámetro de la esfera (en mm).  
 F es la frecuencia resolución (en kHz).  
 P, es la posición del test en el ladrillo (Figura 4.4-6).  
 R, es el número de repetición; si R=0, se trata del primer impacto.

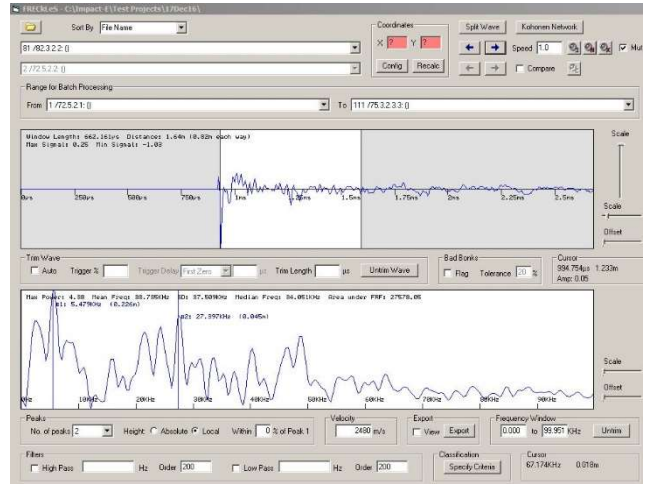
Código de color (Figura 4.4-6):  
 N.D.F.P.R, Test realizado en áreas en buen estado.  
 N.D.F.P.R, Test realizado en áreas en el límite entre áreas en buen estado y áreas con pérdida de adherencia.  
 N.D.F.P.R, Test realizado en áreas con pérdida de adherencia



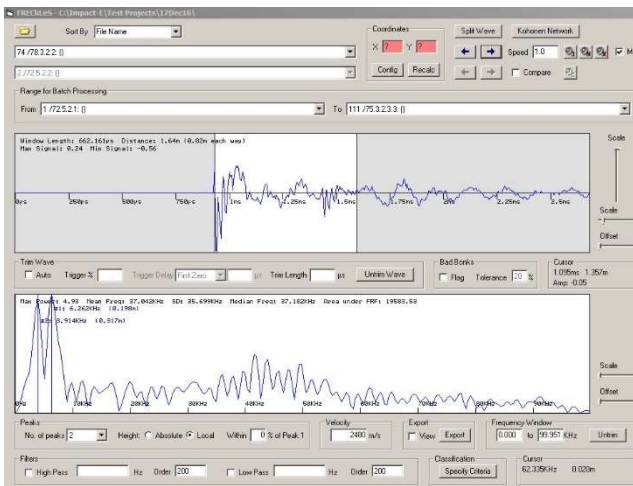
RESULTADOS PARA FII P3 D3 FR. RES.=0,2 KHZ (N=1024, T=5 μ)



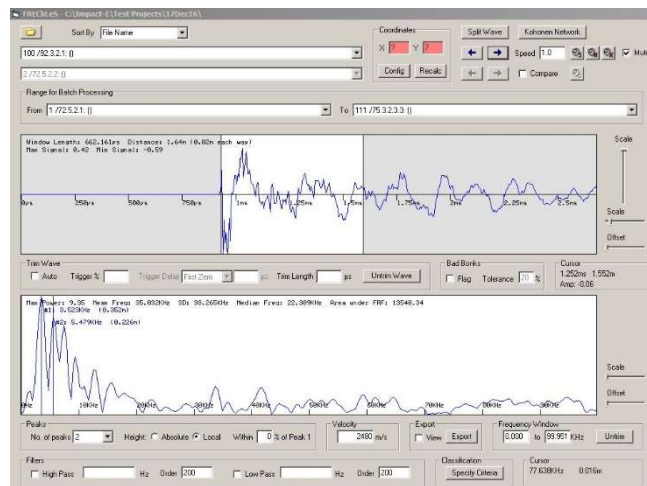
Test 76.3.2.1



Test 82.3.2.2



Test 78.3.2.2



Test 92.3.2.1

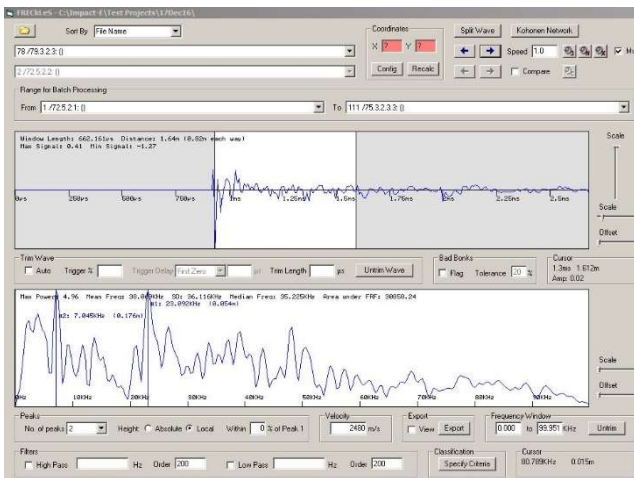
Figura 4.4-22 La imagen incluye cuatro de los 63 test realizados a los 34 ladrillos de la tercera capa durante la ronda de test FII P3 D3 con frecuencia de resolución 0,2. Este es el único caso en el que pudo observarse cierto patrón, sin embargo, la consistencia del mismo no fue suficiente para establecer un protocolo de reconocimiento de la lesión. Algunos de los espectros de frecuencia de ladrillos en buen estado muestran dos picos de frecuencia separados alrededor de los 6 y los 30 kHz. Sin embargo, los espectros de algunos de los ladrillos con pérdida de adherencia presentan dos picos de baja frecuencia muy próximos. Este patrón no se cumple en todos los casos tal y como se demuestra en la Figura 4.4-23.

Nomenclatura: N.D.F.P.R donde,  
 N, es el número de ladrillo.  
 D, es el diámetro de la esfera (en mm).  
 F es la frecuencia resolución (en kHz).  
 P, es la posición del test en el ladrillo (Figura 4.4-6).  
 R, es el número de repetición; si R=0, se trata del primer impacto.

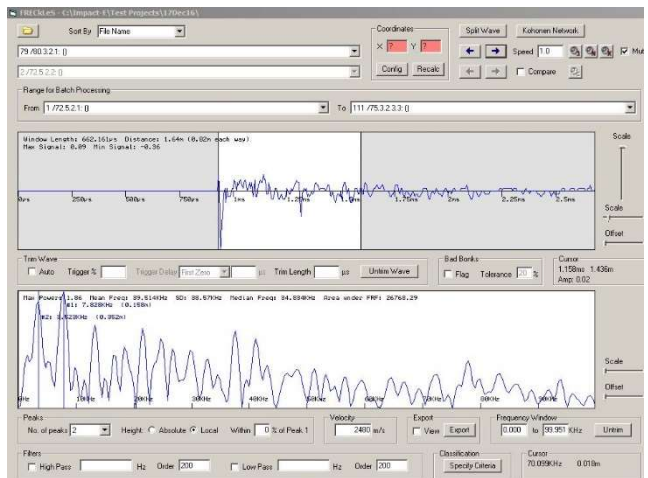
Código de color (Figura 4.4-6):  
 N.D.F.P.R, Test realizado en áreas en buen estado.  
 N.D.F.P.R, Test realizado en áreas en el límite entre áreas en buen estado y áreas con pérdida de adherencia.  
 N.D.F.P.R, Test realizado en áreas con pérdida de adherencia



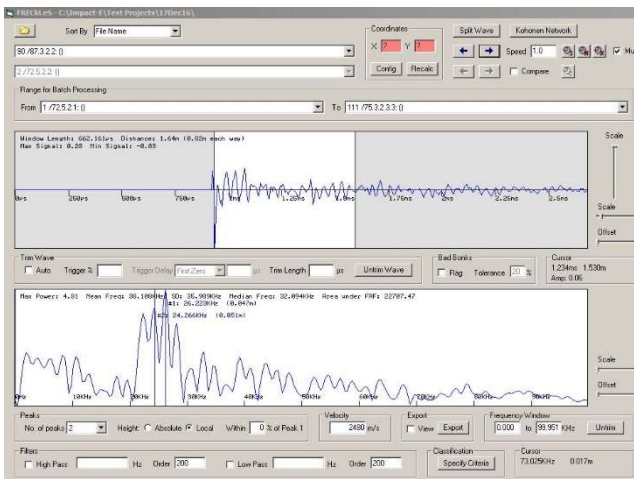
RESULTADOS PARA FII P3 D3 FR. RES.=0,2 KHZ (N=1024, T=5  $\mu$ )



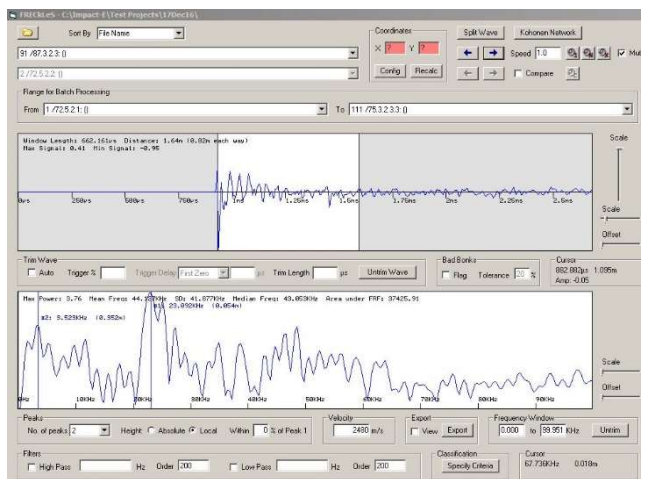
Test 79.3.2.3



Test 80.3.2.1



Test 87.3.2.2



Test 87.3.2.3

Figura 4.4-23 La imagen incluye cuatro de los 63 test realizados a los 34 ladrillos de la tercera capa durante la ronda de test FII P3 D3 con frecuencia de resolución 0,2. Tal y como se expone en la 4.4-22 no todos los espectros del test cumplen el patrón como ejemplifican las figuras 80.3.2.1 y 87.3.2.2, ambas en áreas en buen estado. El espectro que cabría esperar tendría dos picos de frecuencia entre los 6 y los 30 kHz separados entre sí, similares a los espectros de la figura 87.3.2.3.

Nomenclatura: N.D.F.P.R donde,  
 N, es el número de ladrillo.  
 D, es el diámetro de la esfera (en mm).  
 F es la frecuencia resolución (en kHz).  
 P, es la posición del test en el ladrillo (Figura 4.4-6).  
 R, es el número de repetición; si R=0, se trata del primer impacto.

Código de color (Figura 4.4-6):  
 N.D.F.P.R, Test realizado en áreas en buen estado.  
 N.D.F.P.R, Test realizado en áreas en el límite entre áreas en buen estado y áreas con pérdida de adherencia.  
 N.D.F.P.R, Test realizado en áreas con pérdida de adherencia

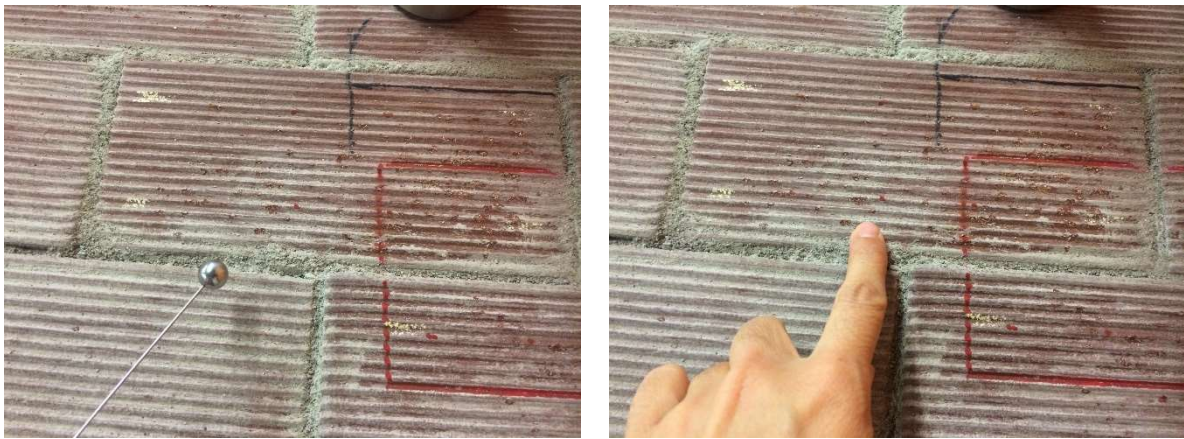
## 4.4.5. REFLEXIONES

- Los resultados de la técnica de IE aplicada en la Fase I no aportan información que permita determinar un patrón para detectar pérdida de adherencia entre hojas de ladrillo tal y como se demuestra en los espectros representativos en la Figura 4.4-9, Figura 4.4-10, Figura 4.4-11, Figura 4.4-12, Figura 4.4-13, Figura 4.4-14, Figura 4.4-15, Figura 4.4-16, Figura 4.4-17 y Figura 4.4-18. A la vista de los resultados todo parece indicar que los motivos principales son dos: la pérdida de adherencia no se encuentra lo suficientemente profunda (es decir, el espesor de la bóveda no es suficiente para esta técnica con estos parámetros) y el espesor de las faltas no tiene suficiente dimensión como para ser detectado por las esferas utilizadas (11, 5 mm) tal y como se explica en el apartado 4.4.2.
- Los resultados de la técnica de IE aplicada en la Fase II, test FII P3 D5 no aportan información que permita determinar un patrón para detectar pérdida de adherencia entre hojas de ladrillo tal y como se demuestra en los espectros representativos en la Figura 4.4-19 y Figura 4.4-21. El motivo principal, al igual que en el punto anterior, parece ser que el diámetro de la esfera (5 mm) es demasiado grande para detectar lesiones en el espesor de la bóveda de tres hojas.
- Los resultados de la técnica de IE aplicada en la Fase II, test FII P3 D3 permiten identificar un patrón para detectar pérdida de adherencia entre hojas de ladrillo tal y como se demuestra en los espectros representativos en la Figura 4.4-22. Sin embargo, dicho patrón no es suficientemente contundente como para determinar un protocolo de reconocimiento tal y como se demuestra en la Figura 4.4-23. Se aprecia que en algunos de los espectros de test en áreas en buenas condiciones se registran dos picos de frecuencia, uno de baja frecuencia en torno a los 6 kHz y otro de mayor frecuencia, en torno a los 30 kHz; en zonas que presentan pérdida de adherencia en los ladrillos de la primera hoja del intradós, se observan dos picos de baja frecuencia próximos entre sí, menores a 6 kHz (Figura 4.4-22 y Figura 4.4-23).
- A la vista de los resultados, sería recomendable ampliar la investigación con diámetro de 3 mm ampliando el número de ladrillos ensayados y el número de

tests por localización para contar con más casos y de esta manera comprobar si la teoría de patrón se cumple consistentemente.

- Así mismo también sería interesante realizar la misma investigación en bóvedas de cuatro y cinco hojas con el fin de establecer la relación entre número de hojas -espesor de la bóveda- / diámetro de esfera. Incluida en esa investigación debería estudiarse si existe alguna combinación de los factores número de tomas, y tiempo entre tomas que aportase espectros más fácilmente interpretables.
- Independientemente de los resultados, el proceso de calibrado de la técnica para encontrar la combinación optima de tamaño de la bola, numero de pulsos, tiempo y filtros es tedioso, complicado y lento. Este proceso requiere de menos tiempo si la fábrica es similar a una ya ensayada, ya que pueden extrapolarse datos como tamaño de esfera óptimo.
- Las estrías propias del ladrillo impiden la correcta colocación del transductor, lo que provoca que sean necesarios varios impactos hasta que el transductor recoge la lectura. Se dan una media de 8 golpes por test hasta conseguir una recepción exitosa en el transductor receptor.
- El mismo motivo anteriormente expuesto provoca que el disco/sensor protector del transductor se deteriore con rapidez, siendo necesario su reemplazamiento cada 80 tests aproximadamente.
- Para facilitar tanto el impacto como la recepción de la onda acústica, es necesario que el ladrillo esté limpio.
- El test es lento, a tres lecturas por ladrillo, toma aproximadamente cuatro horas testear treinta ladrillos, lo que extrapolado a un caso real hace la técnica poco práctica si no inviable para examinar bóvedas en su totalidad. De poder determinar un patrón para una bóveda en concreto, su aplicación sería más efectiva como técnica secundaria, para testear áreas concretas que otra/s técnicas/s presenten como dudosas.
- La técnica del IE es compleja en todas sus fases: calibración, aplicación e interpretación de los resultados. Esto implica la necesidad de que sea llevada a cabo por personal altamente experimentado y formado en esta técnica en concreto.

- Tanto los resultados como su interpretación están sujetos a un alto grado de subjetividad debido a la complejidad de la técnica en todas sus fases.
- Tanto en la Fase I como en la Fase II, una vez concluida la ronda de tests, se comprueba que para este caso el test es semidestructivo, pues los impactos con la bola, incluso con la bola de 3 mm hacen saltar pequeñas lascas de material cerámico (Figura 4.4-24).



*Figura 4.4-24 El test resulta ser semidestructivo sobre el ladrillo, ya que levanta pequeñas muescas.*



## 4.5. ULTRASONIDOS (*ULTRASOUND PULSE VELOCITY -UPV-*)

### 4.5.1. OBJETIVOS

El objetivo de aplicar UPV a la bóveda tabicada era comprobar la utilidad de esta técnica con método de medición indirecta para detectar falta de adherencia entre los ladrillos de la primera y la segunda capa diagnosticada con acceso únicamente a los ladrillos del trasdós.

### 4.5.2. METODOLOGÍA

El método ideal para comprobar la idoneidad de esta técnica sería practicar tests directos para registrar la velocidad en una retícula y analizarlas para detectar anomalías; sin embargo, en la práctica no es posible realizar mediciones directas en una bóveda desde el trasdós, motivo por el que se utilizó el método indirecto.

#### FASE I

Con el fin de determinar qué parámetros eran más efectivos para este método, se realizó una primera ronda de tests durante la Fase I. Los parámetros a determinar eran:

1. Tipo de transductores a utilizar. El laboratorio tenía dos tipos de transductores, ambos de 54 kHz, los pequeños de 25 mm de diámetro y los grandes de 50 mm de diámetro.
2. Separación entre transductores.
3. Además, se tomaron varias medidas para determinar la velocidad longitudinal y la velocidad superficial.

#### 4. Calibrar el aparato a utilizar.

En primer lugar, se calibró el aparato, proceso necesario al comienzo de cada sesión y que se efectúa siguiendo los pasos especificados en el manual, utilizando un bloque de calibración (Figura 4.5-1).



Figura 4.5-1 El proceso de calibración del equipo se lleva a cabo al comienzo de cada sesión con un bloque de calibración siguiendo el método descrito por el aparato. Los valores mostrados en la pantalla deben coincidir con los especificados en el bloque.

En segundo lugar, se procedió al cálculo de la velocidad mediante una medición directa. Para ello se midió el espesor de la bóveda y se introdujo como parámetro fijo que correspondía a la separación entre el transductor emisor y el receptor. A continuación, se realizó el test, dando como resultado una velocidad de 2480 m/s (Figura 4.5-2).

A continuación, se procedió al cálculo de la velocidad superficial ( $V_s$ ) de la onda acústica en la bóveda mediante un test indirecto siguiendo el procedimiento establecido por el aparato, que consiste en realizar un test indirecto a una distancia entre transductores X y posteriormente realizar otro test variando X a Y ( $=2X$ ). Registrando los valores de X e Y, el aparato calcula la  $V_s$  (Figura 4.5-2), que en este caso resultó ser de 2.610 m/s.

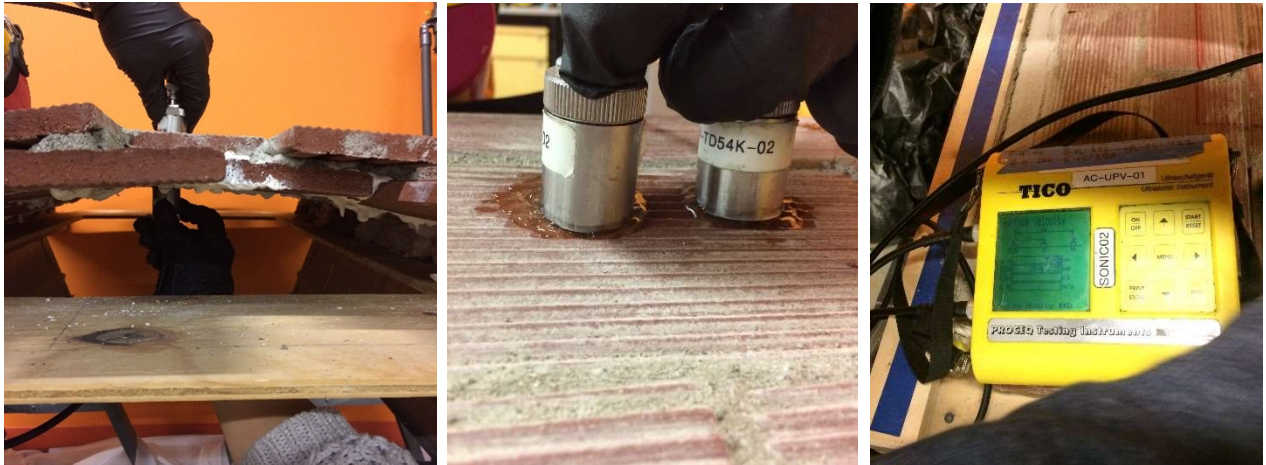


Figura 4.5-2 La imagen de la izquierda muestra el método de medición directa para averiguar la velocidad longitudinal. Las imágenes del centro y la derecha muestran el método de medición indirecta y la pantalla para calcular la velocidad superficial de la onda en el material en estudio.

El siguiente paso consistió en una ronda de test indirectos, tres tests por ladrillo, con los transductores de 25 mm siguiendo la retícula de la Figura 4.5-3. La separación entre los transductores fue de 0,05, 0,10 y 0,15 m. Los tiempos transcurridos y las respectivas velocidades fueron registradas en la tabla de la Figura 4.5-6.

Durante la Fase I se utilizó cinta de pintor para facilitar la nomenclatura de los tests. Durante la Fase II se varió dicho método haciendo uso de un plano a escala de tamaño 11x17” con los ladrillos numerados de manera que fuera posible registrar la nomenclatura y localización de los tests directamente.

FASE I

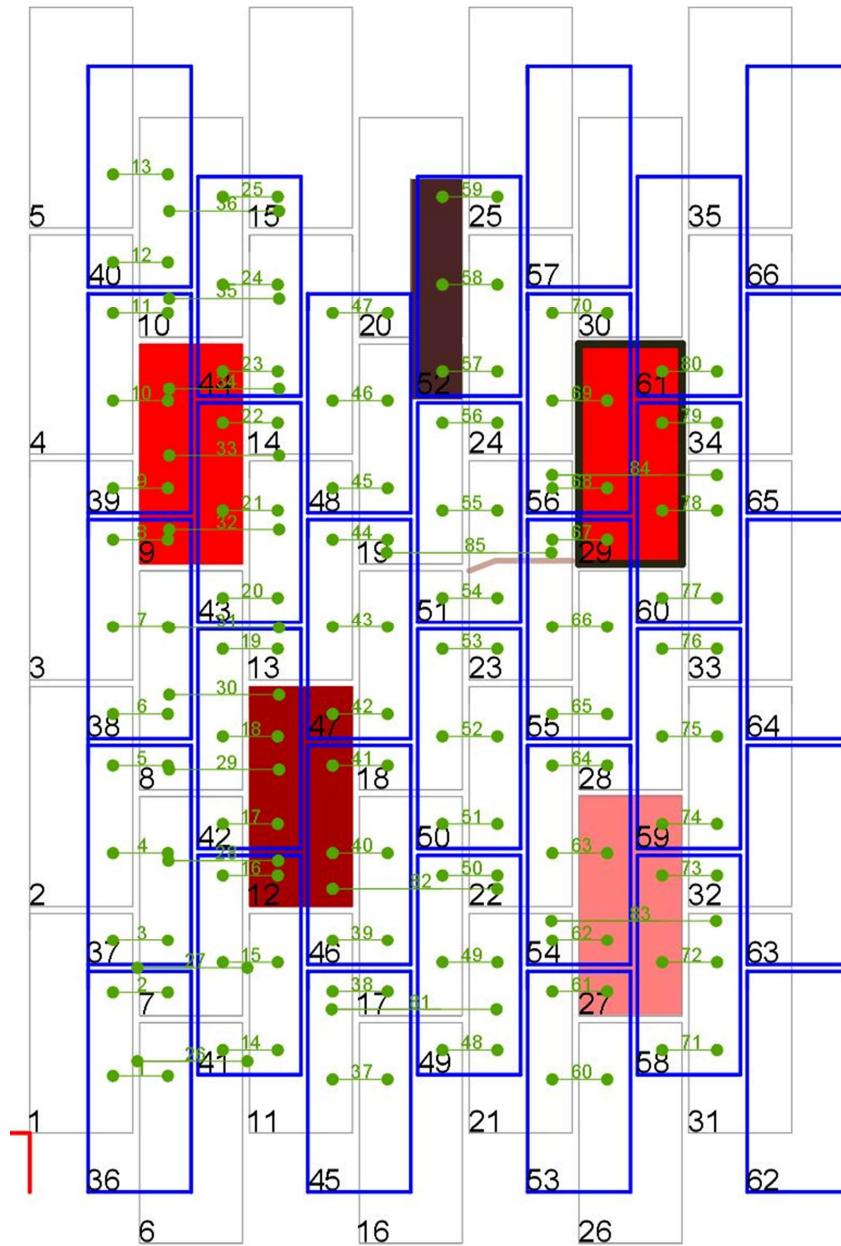


Figura 4.5-3 Esquema de test UPV realizados sobre la bóveda durante la Fase I. Las líneas azules representan los ladrillos de la segunda rosca y las grises las de la primera. Los números negros corresponden al número designado a cada ladrillo (esquina inferior izquierda) mientras que los datos en verde corresponden a los tests de UPV realizados.



## FASE II

Durante la Fase II se realizaron las mismas operaciones de calibrado que en la Fase I. También se calculó la velocidad superficial siguiendo la misma metodología que en la Fase I. En este caso se registraron seis mediciones diferentes, resultando la media de ellas en 2.106 m/s. Finalmente se procedió a tres rondas de tests con distancias entre transductores de 50 mm, 100 mm y 200 mm cuya distribución y localización se recogen en la Figura 4.5-4 . Las mediciones, sus parámetros y los resultados fueron registrados en la tabla de la Figura 4.5-4.

En ambas fases se registró un valor por punto testado. La metodología que se empleó para considerar los valores a registrar consistió en realizar varias mediciones en el mismo punto hasta recibir tres mediciones similares, registrando la tercera de ellas. Esta metodología implicó tomar mediciones en cada punto una media de 6 veces.

FASE II

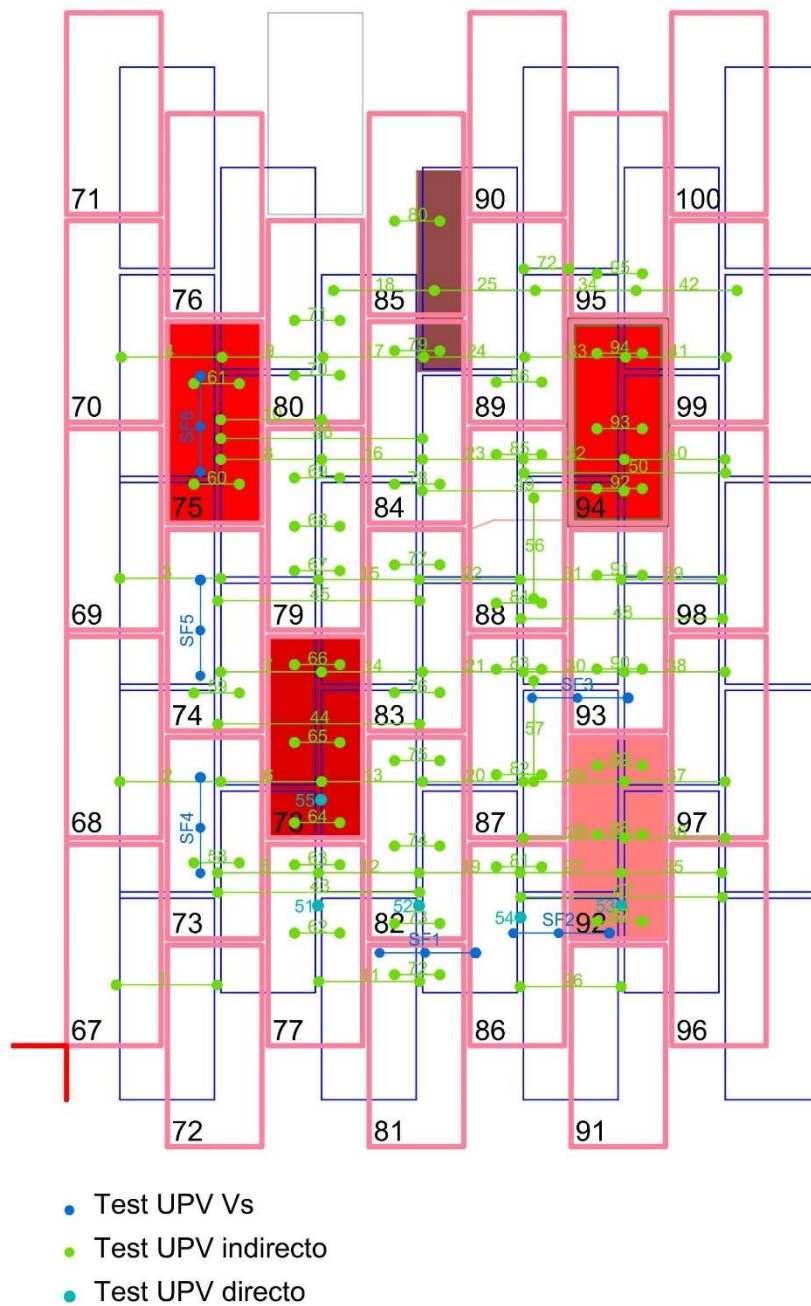


Figura 4.5-4 Esquema de los tests UPV realizados sobre la bóveda durante la Fase II. Las líneas salmón representan los ladrillos de la tercera rosca, las azules los de la segunda rosca y las grises los de la primera. Los números negros corresponden al número designado a cada ladrillo (esquina inferior izquierda) mientras que los datos en diferentes verdes corresponden a los tests de UPV realizados.

### 4.5.3. EQUIPO

#### *Hardware*

- UPV Tester: TICO Ultraschall-Meter. Versión 1.11
- Transducers: Proceq TD 54 kHz de 25 mm de diámetro y Proceq TD 54 kHz de 50 mm de diámetro.
- ASUS 17.3" Republic of Gamers GL752VW para el registro en tabla Microsoft Excel *in situ* y post-procesado.
- Gel Davis Gel PostiTector

#### *Software*

- Microsoft Excel para el registro de las medidas.
- Surfer 13 de Golden Software para la generación de mapas de velocidades.



Figura 4.5-5 Imagen en la que se observa el equipo del test UPV, compuesto de unidad central, transductores y gel acoplante.

## 4.5.4. RESULTADOS

### FASE I

Test # FI	Transducer (mm)	Dimensión (m)	Tiempo (ns)	Velocidad (m/s)	Test # FI	Transducer (mm)	Dimensión (m)	Tiempo (ns)	Velocidad (m/s)	Test # FI	Transducer (mm)	Dimensión (m)	Tiempo (ns)	Velocidad (m/s)
1	25(I)	0.05	19.2	2600	45	25(I)	0.05	24.9	2008	89	50(I)	0.15	56.1	2674
2	25(I)	0.05	19.5	2650	46	25(I)	0.05	24.9	2008	90	50(I)	0.15	31.2	4808
3	25(I)	0.05	26.2	1910	47	25(I)	0.05	22.3	2242	91	25(D)	0.04	16.1	2480
4	25(I)	0.05	18.2	2750	48	25(I)	0.05	24.2	2066					
5	25(I)	0.05	18.2	2750	49	25(I)	0.05	23.3	2146					
6	25(I)	0.05	20.3	2460	50	25(I)	0.05	24.2	2066					
7	25(I)	0.05	21	2380	51	25(I)	0.05	25.8	1938					
8	25(I)	0.05	28.8	1740	52	25(I)	0.05	25.8	1938					
9	25(I)	0.05	21.2	2360	53	25(I)	0.05	25.2	1984					
10	25(I)	0.05	29.7	1720	54	25(I)	0.05	31.8	1572					
11	25(I)	0.05	20.2	2480	55	25(I)	0.05	31.7	1577					
12	25(I)	0.05	19.4	2580	56	25(I)	0.05	23.7	2110					
13	25(I)	0.05	19.4	2580	57	25(I)	0.05	23.1	2165					
14	25(I)	0.05	20.2	2480	58	25(I)	0.05	23.2	2155					
15	25(I)	0.05	20.2	2480	59	25(I)	0.05	31.2	1603					
16	25(I)	0.05	40	1250	60	25(I)	0.05	21.3	2347					
17	25(I)	0.05	33.8	1430	61	25(I)	0.05	23.2	2155					
18	25(I)	0.05	19.4	2580	62	25(I)	0.05	24.2	2066					
19	25(I)	0.05	20	2500	63	25(I)	0.05	22.1	2262					
20	25(I)	0.05	19.8	2640	64	25(I)	0.05	23	2174					
21	25(I)	0.05	19.3	2591	65	25(I)	0.05	22	2273					
22	25(I)	0.05	21.8	2294	66	25(I)	0.05	24.2	2066					
23	25(I)	0.05	19.9	2513	67	25(I)	0.05	31.7	1577					
24	25(I)	0.05	20.2	2480	68	25(I)	0.05	23.2	2155					
25	25(I)	0.05	21.2	2360	69	25(I)	0.05	24.3	2058					
26	25(I)	0.1	47.4	2110	70	25(I)	0.05	31.7	1577					
27	25(I)	0.1	56.3	1776	71	25(I)	0.05	23.7	2110					
28	25(I)	0.1	41.2	2427	72	25(I)	0.05	22.9	2183					
29	25(I)	0.1	40.8	2451	73	25(I)	0.05	24.1	2075					
30	25(I)	0.1	41.2	2427	74	25(I)	0.05	25.1	1992					
31	25(I)	0.1	40.2	2488	75	25(I)	0.05	24.3	2058					
32	25(I)	0.1	37.5	2667	76	25(I)	0.05	22.3	2242					
33	25(I)	0.1	39.2	2551	77	25(I)	0.05	24.3	2058					
34	25(I)	0.1	39.3	2545	78	25(I)	0.05	24.8	2016					
35	25(I)	0.1	38.3	2611	79	25(I)	0.05	23.8	2101					
36	25(I)	0.1	40.2	2488	80	25(I)	0.05	24.1	2075					
37	25(I)	0.05	27.1	1850	81	25(I)	0.15	60.3	2488					
38	25(I)	0.05	25.9	1930	82	25(I)	0.15	63.4	2366					
39	25(I)	0.05	26.6	1880	83	25(I)	0.15	80.2	1870					
40	25(I)	0.05	25.8	1940	84	25(I)	0.15	79.2	1894					
41	25(I)	0.05	26.3	1901	85	25(I)	0.15	70.3	2134					
42	25(I)	0.05	22.3	2242	86	50(I)	0.15	51.2	2930					
43	25(I)	0.05	31.1	1608	87	50(I)	0.15	38.1	3937					
44	25(I)	0.05	23.3	2146	88	50(I)	0.15	35.7	4202					





	Localización sin anomalía	Media v (I)	2171
	localización con pérdida de adherencia	<b>Media v (I)</b>	2195
	Localización sobre grieta	<b>Media v (I)</b>	2136
	Localización sobre acero		
D	Método directo		
I	Método indirecto		

Figura 4.5-6 Tabla de toma de datos y resultados de la Fase I



FASE II

Test # FII	Transductor (mm)	Dimensión (m)	Tiempo (ns)	Velocidad (m/s)	Test # FII	Transductor (mm)	Dimensión (m)	Tiempo (ns)	Velocidad (m/s)	Test # FII	Transductor (mm)	Dimensión (m)	Tiempo (ns)	Velocidad (m/s)
1	25(I)	0.1	39.5	2530	45	25(I)	0.2	89.4	2240	89	25(I)	0.05	43.5	1150
2	25(I)	0.1	41	2440	46	25(I)	0.2	732	2730	90	25(I)	0.05	31.8	1570
3	25(I)	0.1	42.2	2370	47	25(I)	0.2	99.6	2010	91	25(I)	0.05	36.5	1370
4	25(I)	0.1	39.4	2540	48	25(I)	0.2	100.2	2000	92	25(I)	0.05	39.9	1250
5	25(I)	0.1	39.9	2510	49	25(I)	0.2	111.4	1800	93	25(I)	0.05	36	1390
6	25(I)	0.1	40.9	2450	50	25(I)	0.2	124.2	1610	94	25(I)	0.05	36	1390
7	25(I)	0.1	42.7	2340	51	25(D)	0.06	23.1	2600	95	25(I)	0.05	36.8	1360
8	25(I)	0.1	44.3	2260	52	25(D)	0.06	22.7	2640	96 ST	25(I)	0.05	41.9	1193
9	25(I)	0.1	44.6	2240	53	25(D)	0.06	129.8	460	97 ST	25(I)	0.05	42.7	1170
10	25(I)	0.1	44.1	2270	54	25(D)	0.06	20	3000	98 ST	25(I)	0.15	32.7	2560
11	25(I)	0.1	42.2	2370	55	25(D)	0.06	122.3	490	SF 1	25(I)	0.05-0.15	26.9/45.6	2670
12	25(I)	0.1	41.9	2390	56	25(I)	0.1	36.2	2760	SF 2	25(I)	0.05-0.15	26.6/45.1	2700
13	25(I)	0.1	45.3	2210	57	25(I)	0.1	45.1	1200	SF 3	25(I)	0.05-0.15	25.1/58.9	1479
14	25(I)	0.1	40.2	2490	58	25(I)	0.05	29	1720	SF 4	25(I)	0.05-0.15	20.6/44.8	2070
15	25(I)	0.1	38.8	2580	59	25(I)	0.05	26.9	1860	SF 5	25(I)	0.05-0.15	19.9/47	1845
16	25(I)	0.1	40.1	2490	60	25(I)	0.05	27.7	1810	SF 6	25(I)	0.05-0.15	22.4/49.1	1873
17	25(I)	0.1	46.3	2160	61	25(I)	0.05	21.3	2350					
18	25(I)	0.1	45.3	2210	62	25(I)	0.05	21.6	2320					
19	25(I)	0.1	37.3	2680	63	25(I)	0.05	24.6	2030					
20	25(I)	0.1	38.8	2580	64	25(I)	0.05	32	1560					
21	25(I)	0.1	39.2	2550	65	25(I)	0.05	26	1920					
22	25(I)	0.1	42.1	2380	66	25(I)	0.05	27.9	1720					
23	25(I)	0.1	48	2080	67	25(I)	0.05	25	2000					
24	25(I)	0.1	45.8	2180	68	25(I)	0.05	26.4	1890					
25	25(I)	0.1	45.4	2200	69	25(I)	0.05	26.5	1890					
26	25(I)	0.1	41.2	2430	70	25(I)	0.05	34.1	1470					
27	25(I)	0.1	41.2	2430	71	25(I)	0.05	33.1	1510					
28	25(I)	0.1	46.9	2130	72	25(I)	0.05	32.4	1540					
29	25(I)	0.1	42.1	2380	73	25(I)	0.05	25.1	1990					
30	25(I)	0.1	42.3	2360	74	25(I)	0.05	24.8	2020					
31	25(I)	0.1	47.9	2090	75	25(I)	0.05	25.9	1940					
32	25(I)	0.1	47.8	2090	76	25(I)	0.05	28	1786					
33	25(I)	0.1	44.3	2260	77	25(I)	0.05	34.2	1462					
34	25(I)	0.1	43	2330	78	25(I)	0.05	29.9	1670					
35	25(I)	0.1	47.8	2090	79	25(I)	0.05	26.7	1870					
36	25(I)	0.1	48.2	2080	80	25(I)	0.05	33.8	1480					
37	25(I)	0.1	52	1920	81	25(I)	0.05	21.6	2320					
38	25(I)	0.1	43	2330	82	25(I)	0.05	26.3	1900					
39	25(I)	0.1	49	2040	83	25(I)	0.05	21.5	2330					
40	25(I)	0.1	43.3	2310	84	25(I)	0.05	34.9	1430					
41	25(I)	0.1	42.8	2340	85	25(I)	0.05	37.7	1330					
42	25(I)	0.1	41.2	2430	86	25(I)	0.05	34.4	1450					
43	25(I)	0.2	73.2	2730	87	25(I)	0.05	36	1390					
44	25(I)	0.2	77.4	2580	88	25(I)	0.05	43.9	1140					





	Localización sin anomalía	Media v (I) Total	2082
	localización con pérdida de adherencia	<b>Media v (I)</b> d=0.1,0.2 y 0.05	2026
	Localización sobre grieta	<b>Media v (I)</b> d=0.1,0.2 y 0.06	2014
	Localización sobre acero	<b>Media v (I)</b> d=0.1 y 0.2	2402
ST	Ladrillo aislado	<b>Media v (I)</b> d=0.1 y 0.3	2256
D	Método directo	<b>Media VS (I)</b>	2106
I	Método indirecto		

Figura 4.5-7 Tabla de toma de datos y resultados de la Fase II

Los resultados de la primera ronda de tests resultaron no concluyentes. El resultado esperado era que las zonas con anomalías diesen menor velocidad que el mismo tests en las zonas sin anomalías. Sin embargo, este resultado no se dio en todos los casos tal y como se muestra en la tabla de la Figura 4.5-6 . Si bien es cierto que, en la mayoría de las localizaciones con pérdida de adherencia, la velocidad resultante era menor, no siempre ocurría y, aún en el caso de hacerlo, la diferencia no fue tal como para establecer un patrón certero. La media de las velocidades por el método indirecto en localizaciones en buen estado resultó de 2.195 m/s, mientras que la media de las velocidades con método indirecto en localizaciones con pérdida de adherencia dio como resultado 2.136 m/s. De las 90 mediciones, 33 se tomaron en zonas con pérdida de adherencia, y de esas velocidades, sólo 19 resultaron estar por debajo de la media de velocidades en localizaciones en buen estado, lo que ejemplifica el bajo índice de fiabilidad del test con esas condiciones en la Fase I.

Durante la Fase II los resultados fueron ligeramente más precisos. En general, las velocidades tomadas en zonas con falta de adherencia resultaban menores que las tomadas en zonas en buen estado, pero de nuevo, la diferencia y certeza no resultaron suficientes como para establecer un patrón general. La media de las velocidades por el método indirecto en localizaciones en buen estado resultó de 2.026 m/s, mientras que la media de las velocidades con método indirecto en localizaciones con pérdida de adherencia fue de 2.014 m/s. De las 90 mediciones indirectas de velocidad, 32 se tomaron en zonas con pérdida de adherencia, y de esas velocidades, sólo 13 resultaron estar por debajo de la media de velocidades en localizaciones en buen estado. Los resultados arrojaron otro dato interesante, las mediciones que se tomaron con separación entre transductores de 100 mm o mayor, resultaron más fiables que los tomados con separación menor. Esto puede deberse a las características propias de la bóveda en combinación con los transductores utilizados. Así pues, si se aíslan los tests realizados utilizando el método indirecto con una distancia entre transductores  $\geq 100$  mm, resulta una media en localizaciones en buen estado de 2.402 m/s, mientras que la media de las velocidades con método indirecto en localizaciones con pérdida de adherencia fue de 2.256 m/s.

La velocidad superficial durante la Fase II resultó ser de 2.106 m/s.

Analizar la información numérica es una labor tediosa y con elevada posibilidad de error, o de obviar información importante, motivo por el cual se decidió volcar la información de la Fase II en un software de generación de mapas (Surfer 13) para poder analizar gráficamente los resultados y, por tanto, el éxito del método. Para ello se utilizaron todos los datos tomados de manera indirecta con una distancia entre transductores de 10 cm. Los resultados vistos de esta manera resultan más claros. El método de UPV detecta claramente un descenso de velocidad en las zonas sobre las pérdidas de adherencia de los ladrillos 27 y 29, sin embargo, no detecta las de los ladrillos 9 y 12. Se generaron tres modalidades diferentes de representación gráfica: mapa de curvas de nivel (donde las curvas se generaron con los valores resultantes de velocidad), vista tridimensional de malla y vista tridimensional con escala de colores. El motivo por el que el método detecta esos ladrillos puede deberse a dos motivos; el ladrillo 27 es el que mayor cámara de aire presenta en la delaminación, mientras que el 29 carece de juntas, por lo que es posible que la reflexión de la onda acústica acuse una variación en la vibración generada con motivo del impacto de la onda y el ladrillo (más acentuada).

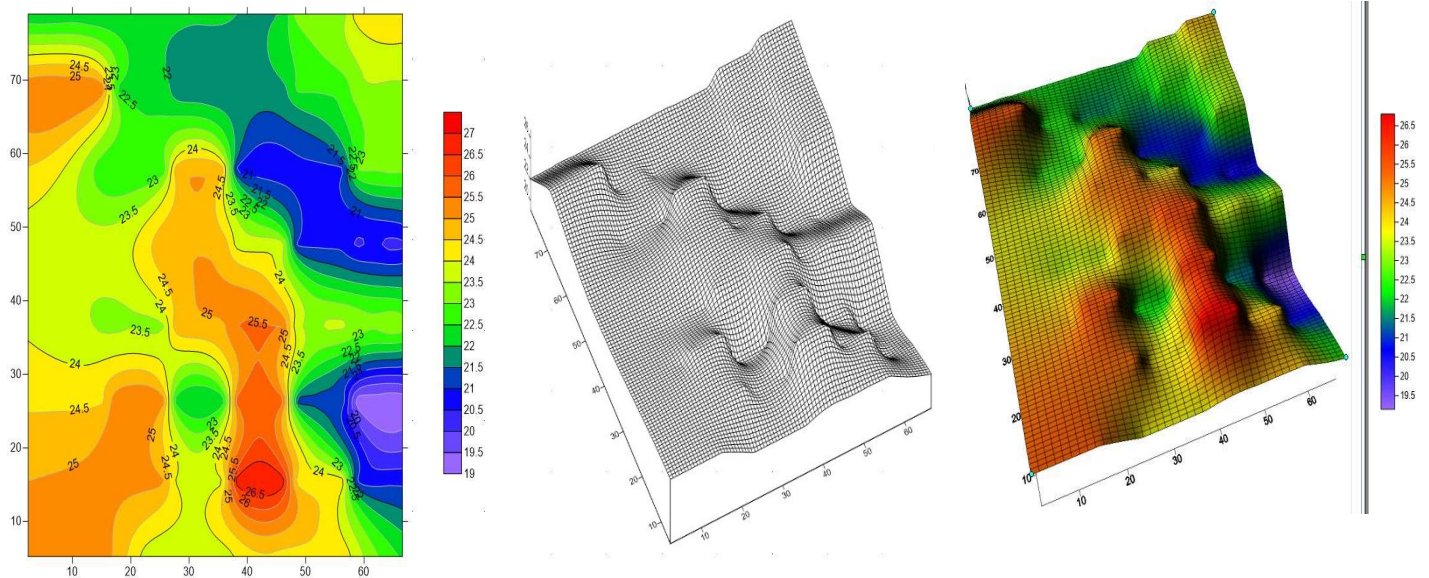


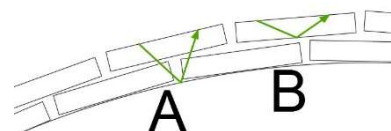
Figura 4.5-8 Diferentes representaciones gráficas de los resultados de la Fase II con método indirecto y separación entre transductores de 10 cm. Las depresiones (azul y morado) corresponderían a zonas con velocidades más bajas, que en este caso corresponderían a los ladrillos 27 y 29. Las velocidades se expresan /100, es decir en hm/s.

Como parte del estudio también se procedió a la medición directa en cinco puntos de la bóveda, tres en buenas condiciones y dos con pérdida de adherencia (Test 1-

55 en Figura 4.5-7). Los resultados fueron contundentes y no dejaban lugar a interpretación, las velocidades en zonas en buen estado fueron de 3.000, 2.600 y 2.640 m/s mientras que las velocidades en zonas con pérdida de adherencia (ladrillos 27 y 12) resultaron de 460 y 490 m/s.

## 4.5.5. REFLEXIONES

- La ronda de test de UPV de la Fase I no proporcionó resultados válidos para establecer un patrón de velocidades que determinase la localización de zonas con presencia de pérdida de adherencia entre sus capas. Una de las hipótesis era que la onda no llegase a recorrer la totalidad del espesor de la bóveda si no que fuese reflejada en la primera interfase ladrillo-mortero o en otra interfase. Se quedó a la espera de confirmar dicha hipótesis tras la construcción de la tercera rosca de ladrillo. Una vez concluida la Fase II se compararon los resultados equivalentes, es decir, se calculó la media de todas las medidas realizadas en áreas en



*Figura 4.5-9 Esquema de hipótesis tras la primera ronda de UPV en la Fase I. Los resultados no parecían variar consistentemente ante la presencia de una anomalía insertada entre las rosas, por lo que se barajó la posibilidad de que la onda acústica registrada por el receptor viniese reflejada de la interfase ladrillo-mortero (B) en lugar de la superficie del intradós (A).*

- buen estado con una distancia entre transductores de 50 mm realizada con el método indirecto; la media de la Fase I resultó de 2.191 m/s (es decir, su tiempo de recorrido fue de  $1,36 \times 10^{-3} \mu\text{s}$ ) mientras que la media de la Fase II resultó de 1.784 m/s (tiempo de recorrido fue de  $3,36 \times 10^{-3} \mu\text{s}$ ), es decir, la onda de la Fase II recorría más distancia que la onda de la Fase I, con lo que quedó descartada la hipótesis anteriormente descrita.
- A la vista de los resultados de medición directa tanto de la Fase I como de la Fase II se extrae que, con el método de medición directa, sí es posible detectar la lesión de pérdida de adherencia entre hojas de ladrillo.



- Para este caso concreto, las mediciones realizadas con una separación entre transductores  $\geq 100$  mm y  $\leq 200$  mm da resultados más aproximados que las realizadas con una separación menor entre transductores.
- En zonas en buen estado en la Fase II, la velocidad media superficial es de 2.106 m/s, la velocidad media longitudinal por método indirecto es de 2.026 m/s y la velocidad media longitudinal por método directo de 2.746 m/s. Dichos resultados sugieren que el transductor receptor puede estar percibiendo parte de la información de la onda superficial. La velocidad de la onda longitudinal debería ser superior a la superficial. La velocidad longitudinal debería ser similar, para iguales condiciones, medida con método directo o método indirecto.
- Las estrías propias del ladrillo impiden la correcta colocación de los transductores, lo que provoca que sea necesaria una gran cantidad de gel para liberar a las estrías de burbujas de aire. Este hecho implica el consumo de mucho gel, dejando la superficie manchada y pegajosa (Figura 4.5-5)
- El ratio de progresión del test en una bóveda de este tipo es de aproximadamente 3 horas para 90 tests. Para facilitar la lectura, es necesario que el ladrillo esté limpio de restos de mortero y ladrillo.
- Las velocidades varían ligeramente dependiendo de la distancia entre los transductores y la posición de los mismos, lo cual no debería ser así a iguales condiciones. Es posible que la heterogeneidad de los materiales provoque un comportamiento no predecible de la onda y su reflexión, lo cual imposibilita un patrón que permita identificar pérdida de adherencia entre hojas de ladrillo con método indirecto.

# 5. CONCLUSIONES Y FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

---

---

*Technology solves nothing: is the skill and ingenuity of its user that brings value.*

---

George Ballard, GBG

## 5.1. VERSIÓN EN CASTELLANO

En respuesta al envejecimiento del patrimonio arquitectónico en los Estados Unidos, las técnicas y métodos de reconocimiento y evaluación no destructiva (MEND) se utilizan como herramienta de monitoreo, método de investigación de condiciones existentes y de control de calidad para nuevas intervenciones en patrimonio construido. La aplicación de END para evaluar las condiciones del patrimonio arquitectónico proporciona información esencial, disponible para todos los agentes responsables de su mantenimiento y conservación.

Las características del patrimonio estadounidense, en combinación con el mercado de la conservación del patrimonio arquitectónico en Estados Unidos, son las dos principales causas por las que las técnicas de reconocimiento y evaluación no destructivas que se aplican en este campo sean relativamente limitadas y se apliquen con metodologías repetitivas. Al mismo tiempo, el volumen de utilización de las mismas es muy alto, como consecuencia de las mismas dos causas: el elevado número de edificios con sistemas constructivos similares y evaluaciones con objetivos similares; a su vez, las técnicas END son aplicadas por las pocas

empresas especializadas en este campo. A su vez, la investigación está limitada a varias universidades como las universidades de Pennsylvania, Cornell o Drexel y principalmente a la aplicación *in situ*, en función de sus necesidades comerciales, por parte de las pocas empresas especializadas en END + patrimonio arquitectónico que existen en el mercado estadounidense.

De las muchas clasificaciones posibles, las técnicas de END tratadas en esta tesis se dividen en tres grandes bloques: métodos visuales instrumentados, métodos de ondas electromagnéticas y métodos de ondas acústicas. Un último bloque, métodos facilitadores de END, incluyen métodos de acceso que hacen posible los MEND y van normalmente aparejados.

Las técnicas de reconocimiento visual, denominadas “Métodos instrumentados de inspección visual y técnicas visuales de análisis y documentación” en esta tesis, facilitan la visualización de los materiales y lesiones, permiten representarlos y, en conjunto con los adecuados paquetes de software, permiten documentar el estado del elemento e hipervincular diferentes tipos de archivos, así como organizar toda la información para hacerla manejable y accesible a los grandes equipos multidisciplinares que participan en la conservación del patrimonio arquitectónico. Los boroscopios, flexoscopios, videoscopios, cámaras de chimenea, SeeSnake y demás dispositivos, diseñados para facilitar la visualización de áreas ocultas para el ojo desnudo del usuario, permiten comprobar visualmente el estado de los materiales, averiguar sistemas constructivos y características constructivas, identificar elementos ocultos y lesiones tales como fugas, grietas, roturas, humedades, existencia de seres vivos, etc. Los sistemas modernos de fotogrametría han revolucionado el mundo de la documentación visual del estado previo a la restauración en los edificios, desplazando a la técnica del escáner láser. Los softwares especializados en fotogrametría de última generación, tales como Pix4D o Argisoft, generan modelos 3D texturizados a partir de fotografías tomadas por cualquier cámara sin necesidad de calibración por parte del usuario. A partir de estos modelos es posible generar planos 2D, 3D, ortofotografías, vuelos y animaciones 3D, facilitando la visualización y comprensión del edificio y sus lesiones, posibilitando el análisis de las mismas de modo individual o en conjunto, para detectar patrones generales de deterioro (desplomes, desplazamientos, etc.). A su vez, la técnica TPAS se ha posicionado, durante los últimos años, como el método por excelencia de análisis visual computerizado, documentación y registro del estado previo en un edificio, ya que permite la estandarización del proceso por medio de la biblioteca de condiciones, la documentación ordenada y funcional y el

almacenado de información gráfica, numérica y archivos asociados a cada lesión. Además, puede utilizarse como plataforma y base de datos para el monitoreo de la evolución del estado del edificio en el tiempo.

Las técnicas que utilizan ondas electromagnéticas son útiles para la localización de elementos conductores, instalaciones, estructuras ocultas, humedades y control de calidad en procesos de inyección. La termografía identifica la variación térmica en la superficie de los materiales para detectar diferentes características constructivas y lesiones, como una pérdida de adherencia entre capas, oquedades, humedades, canalizaciones, determinar materiales de diferente naturaleza, etc. El estudio de las reflexiones de la energía electromagnética en las diferentes interfases en la técnica del geo-radar permite detectar y mapear armaduras, conductos y subestructuras en materiales como el hormigón, tierra o madera, determinar espesores de elementos, nivel de humedad e identificación de lesiones internas como grietas y exfoliaciones.

Las técnicas que utilizan ondas acústicas, se basan en el análisis de las ondas acústicas que atraviesan o son reflejadas en el elemento en estudio y son efectivas para localizar vacíos, interfases, espesores, estado de conservación y desplazaciones. La técnica del impacto eco permite detectar lesiones como grietas, oquedades y pérdida de adherencia en diferentes materiales de construcción. La técnica de ultrasonidos también es útil para detectar grietas y la profundidad de éstas, así como oquedades, material disgregado, pérdida de adherencia entre capas y cálculo de espesor de elementos. La velocidad será menor cuanto peor sea la condición del material.

Los dos métodos facilitadores de END incluidos en esta tesis son los sistemas aéreos no tripulados (UAS/UAV), comúnmente denominados drones, y el acceso por medio de sistemas industriales de cuerdas. El motivo principal por el que se incluyen es por la estrecha relación que existe en la realidad entre estos dos sistemas y la aplicación de END. Por ejemplo, la fotogrametría de última generación se aplica en la mayoría de los casos con UAS, del mismo modo que la salida al mercado de nuevos modelos de termocámaras adaptadas a UAS están dando lugar a modificar el modo de toma de datos en los proyectos en los que se utiliza la termografía como END, ya que, en muchos casos, es más efectivo hacerlo desde UAS. Las características de los sistemas de acceso mediante cuerdas (IRA), con respecto a métodos más tradicionales como andamios o plataformas elevadoras, conllevan que una gran parte de la aplicación de END en fachadas de edificios de



más de quince plantas se efectúe con sistemas de IRA. Además, permite una reducción drástica del presupuesto y del tiempo de inspección.

En la práctica, las diferentes técnicas son complementarias y la planificación de la evaluación incluye conjuntos de técnicas que dependerán de las condiciones, características y limitaciones de cada proyecto. Por ejemplo, las técnicas de ondas electromagnéticas no son compatibles con presencia de agua, ya que la energía electromagnética queda absorbida, mientras que las técnicas acústicas no dan buenos resultados en presencia de oquedades, porque la mayor parte de la energía acústica se refleja en la interfase aire y no es posible evaluar el material situado detrás. La planificación de la evaluación es pues esencial y tan importante como la evaluación en sí, ya que de ella depende en gran medida el éxito de la aplicación de END.

Si bien la utilización de técnicas de END puede ser beneficiosa y útil, se ha de ser consciente de las importantes limitaciones de cada técnica en particular. A continuación, se incluye una tabla con las principales características, aplicaciones, ventajas y limitaciones de cada una de las técnicas tratadas en esta tesis.

MÉTODOS VISUALES INSTRUMENTADOS		OBJETIVO	PRINCIPIO	PARÁMETROS	PROFUNDIDAD DE PENETRACIÓN	APLICACIONES EN PATRIMONIO CONSTRUÍDO*	VENTAJAS	LIMITACIONES	ESPECIALIZACIÓN DIRECTOR(A) TEST (Alta: A, Media: M, Baje: B)	PRECIO EQUIPO (\$\$\$->\$10.000, \$\$-\$5.000-\$10.000, \$-<\$5.000)	DURACIÓN TEST (Alta: A, Media: M, Baje: B)	INTERPRETACIÓN (Complejo-C, Normal-N, Sencilla: S)	EJECUCIÓN (Complejo-C, Normal-N, Sencilla: S)
ENDOSCOPÍA	Observación indirecta del interior del elemento a través del endoscopio	Sistema óptico que consta de una lente en un extremo, un visor que amplifica en el otro y la conexión entre ambos, o un sistema equivalente de fibra óptica o video.	- Boroscopio rígido/fibroscopios/videoscopio. - Grabación de inspección: sí/no. - Iluminación: tipo y potencia. - Diámetro del cabezal/apertura necesaria.	Pueden llegar a 30 metros (LongSteer)	- Comprobar visualmente el estado del material oculto. - Averiguar sistemas constructivos tras las capas visibles del edificio. - Averiguar el espesor de determinados elementos arquitectónicos. - Detección de múltiples patologías como fugas, roturas, existencia animal, etc.	- No es necesario personal especializado para realizar el test (si se registra puede ser analizado por personal especializado). - Permite visualizar zonas sin retirada de material. - El mercado dispone de multitud de modelos que pueden adaptarse a cada caso de estudio. - Son instrumentos ligeros, sencillos de utilizar y robustos. - Existen en el mercado modelos a precios muy asequibles.	- Es necesario que exista un espacio intersticial para ubicar el cabezal y tener campo de visión. - En caso de no existir perforación, es necesario practicar una. - Los boroscopios rígidos dan mejor resolución pero, al no poder doblarse, tienen limitado el campo de visión. - Si el espacio al que se accede carece de referentes y el ángulo de visión es limitado, puede resultar complicado interpretar la visualización. - Si la calidad de imagen requerida es alta, el coste del equipo puede superar los \$3.000.	B	\$\$\$\$	B	S	S	
	Generar imágenes y modelos 3D sobre los cuales poder obtener dimensiones e información escalada del objeto fotografiado	Localización de puntos en el espacio por medio de triangulación espacial de los mismos a través del solape estereoscópico y software SfM.	- Resolución del modelo definida por el GSD. - Precisión.	-	- Documentación de las condiciones existentes del elemento arquitectónico a través de la generación de un modelo 3D texturizado. - Mediciones directas del modelo 3D. - Generación de planos 2D y 3D. - Generación de orto-fotografías que contengan la información fotográfica a escala y rectificadas de elemento arquitectónico. - Registrar vuelos y animaciones 3D del elemento, facilitando su visualización y la observación de las condiciones existentes. - Posibilitar la observación de patologías en su conjunto que, en un reconocimiento próximo pueden no percibirse, como por ejemplo desplomes, sistemas de grietas o grandes zonas de humedad. - Posibilitar la detección de cambios a través de inspecciones cíclicas.	- No requiere contacto con el elemento a investigar. - Permite realizar modelos texturizados 3D, ortofotografías y planos por un coste muy inferior a los métodos utilizados hasta el momento. - Constituye una herramienta de documentación muy potente. Es posible documentar casi cualquier elemento arquitectónico con una gran precisión y calidad y generar un modelo 3D en pocas horas. - Los archivos fotográficos y su respectiva metadatos podrán ser utilizados en el futuro con softwares más potentes. - Para el mismo nivel de detalle, esta suele resultar la técnica más asequible.	- Los softwares profesionales requieren un conocimiento especializado y un periodo de formación previo. - Si la pieza arquitectónica a representar consta de elementos repetitivos o curvos, el resultado puede ser muy confuso, para ello puede ser necesario añadir marcadores que el software identifique. En ocasiones, no es posible instalar marcadores (por ejemplo en una chimenea exenta). - Un equipo profesional completo, de rango medio, que incluya software, PC, UAS y cámara(s), ronda los \$8.000. - Si el elemento a representar consta de partes reflectantes como espejos o cristales de alta reflexión, la generación del modelo 3D puede no ser posible.	A-M-B	\$\$\$\$	B	S	C-S	
	Registro digital de los datos y archivos de inspección <i>in situ</i> para su posterior análisis y almacenaje.	Recopilación del estado actual con una tableta digital a través de una librería de condiciones albergada en una plataforma de software de AutoISP+AutoCAD con capacidad de hipervincular archivos y recoger en su metadatos información gráfica y numérica.	- Nivel de detalle de la inspección. - Customización de bloques en función del proyecto. - Calidad de los planos de base.	-	- Documentación de condiciones existentes de un edificio de una manera ordenada, eficiente y funcional. - Almacenado de la información gráfica y numérica, así como archivos asociados a cada condición concerniente al estado de un edificio. - En edificios grandes, o en edificios con cuadros complejos de patologías, es útil en la búsqueda y análisis de patrones de patologías. - Plataforma para el monitoreo de la evolución de patologías en el tiempo. - Utilizando como plataforma AutoCAD, agiliza la generación de informes del estado actual y de documentos de mediciones para el diseño. - Herramienta de documentación y consulta de reparaciones e intervenciones. - Base de datos del estado del edificio en el tiempo.	- TPAS facilita y agiliza la toma de datos in situ. - Aumenta la calidad y sofisticación de los datos registrados. - Minimiza el tiempo de post-procesado de la información. - La existencia de librerías predefinidas facilita la estandarización de la nomenclatura y el registro de patologías, lo cual facilita la investigación por diferentes técnicos, al asegurar la homogeneidad en cuanto a nomenclatura, valoración de grados de deterioro, etc. - Elimina errores de transcripción e interpretación. - TPAS produce informes más completos, versátiles, de mejor calidad que los métodos de documentación in situ tradicionales maximizando la utilidad del producto final. - En un plano realizado con TPAS se pueden extraer los datos numéricos a formatos .xlsx agilizando el proceso de mediciones. - Hipervinculado de los archivos relacionados con las patologías (fotografías, videos, ficheros de END, etc.) in situ. - Posibilidad de utilizar ortofotografías como base. - No requiere contacto con el elemento a investigar, lo que permite aplicar la técnica en todos los casos independientemente del estado de deterioro.	- Para trabajar con un proyecto de TPAS en toda su capacidad, es necesario disponer del software AutoCAD. - Es necesario disponer de conocimientos de AutoCAD al menos al nivel de usuario. Además, para su óptima utilización, se requiere de una formación mínima y un periodo de aprendizaje. - El coste de todo el equipo incluyendo el software es en torno a \$7.000. - Es necesario disponer de tabletas digitales robustas o disponer de seguros que cubran el equipo frente a daños. - La visibilidad de la pantalla en ambientes soleados o muy luminosos puede ser limitada dependiendo del modelo de la tableta, dificultando y ralentizando la toma de datos; la opción de aumentar el brillo al máximo del aparato acorta considerablemente la duración de la batería. - La duración de la batería de la tableta digital sigue siendo un problema in situ, ya que normalmente dura alrededor de tres horas. - Si los planos de base no son precisos, el resultado final no será óptimo.	M	\$	B	S-N	N	

Tabla Conclusiones 1 (1/3): Tabla resumen de conclusiones en las que se incluyen las principales características de las técnicas de reconocimiento y evaluación tratadas en esta tesis.

MÉTODOS DE ONDAS ELECTROMAGNÉTICAS		OBJETIVO	PRINCIPIO	PARÁMETROS	PROFUNDIDAD DE PENETRACIÓN	APLICACIONES EN PATRIMONIO CONSTRUÍDO*	VENTAJAS	LIMITACIONES	ESPECIALIZACIÓN DIRECTOR(A) TEST (Alta: A, Media: M, Baja: B)	PRECIO EQUIPO (\$\$\$->\$10.000, \$\$-\$5.000-\$10.000, \$->\$5.000)	DURACIÓN TEST (Alta: A, Media: M, Baja: B)	INTERPRETACIÓN (Complejo: C, Normal: N, Sencilla: S)	EJECUCIÓN (Complejo: C, Normal: N, Sencilla: S)
	<b>TERMÓGRAFIA</b>	Conocer las variaciones de temperatura en la superficie de un material para poder extrapolar dicha información al estado y características del mismo.	La termografía infrarroja consiste en medir la longitud de onda de las ondas electromagnéticas del espectro de los infrarrojos que emite una superficie para generar, a través de un software especializado, un mapa de temperaturas.	- Emisividad del material. - Termografía activa o termografía pasiva. - Temperatura. - Distancia entre la termocámara y el objeto. - Rango y escala	-	- Localizar pérdida de adherencia superficial dentro del material. - Detectar oquedades superficiales. - Detectar actividad de termitas. - Diferenciar fases constructivas y detección de reparaciones. - Localizar aperturas tapiadas. - Localizar canalizaciones. - Mapeado de humedades y fenómenos de capilaridad. - Análisis de irregularidades bajo morteros de acabado, estucos y frescos. - Estudio de puentes térmicos. - Localizar nidos o seres vivos dentro de paredes. - Determinar existencia de materiales de diferente naturaleza. - Evaluar daños estructurales tras terremotos. - Evaluar la eficacia de tratamientos de consolidación. - Estudio de fugas de aire. - Diagnóstico de membranas impermeabilizantes en tejados. - Determinar el contenido de humedad en elementos de ladrillo poroso. - Detectar pérdida de adherencia entre hojas en bóvedas tabicadas.	- No requiere contacto con el elemento a investigar, lo que permite aplicar la técnica en todos los casos independientemente del estado de deterioro. - Sólo se requiere de acceso por una cara del elemento. - No requiere de iluminación para realizar el test. - Proporciona resultados instantáneos in situ en tiempo real y sin necesidad de post-procesado. - Es una técnica intuitiva, fácilmente interpretable, aunque es necesaria cierta especialización para aplicar la técnica. - Es versátil, rápida y en la mayoría de los casos los resultados son fiables. - Es una técnica respetuosa con el medio ambiente y segura para las personas y el entorno. - En su aplicación pasiva no requiere de fuente de calor externa. - Es la técnica ideal para el estudio de pérdidas energéticas.	- Puede dar lugar a lecturas erróneas si el técnico que ejecuta la toma de termogramas no tiene formación específica adecuada. - Es una técnica limitada, y en muchos casos no se puede asegurar la obtención de resultados hasta haber realizado el test. Es común la necesidad de otros test END para corroborar los resultados de IRT. - Los resultados o/y su interpretación, pueden ser subjetivos. - En su aplicación pasiva, los tiempos de espera pueden ser largos. - En su aplicación pasiva, el test depende de las condiciones ambientales sin que el técnico pueda hacer nada para controlarlas. - En su aplicación activa, puede ser necesario dejar enfriar los materiales calentados entre tests contiguos, lo cual puede ralentizar el progreso o dar resultados erróneos. - Se obtienen mejores resultados a la apropiada distancia, cerca del objeto pero lo suficientemente lejos como para captar el conjunto para poder analizar por comparación. Dicha distancia no siempre es posible. - Puede ser costoso y complicado calentar grandes zonas para su aplicación activa. - En muchos casos en conservación del patrimonio puede no ser posible su aplicación activa, que es más efectiva, en términos generales, que su aplicación pasiva.	B-M	\$\$\$	B-M	S	S-M
	<b>GPR</b>	Obtener un escáner (radiograma) del interior del material basado en la detección de interfaces, con propiedades dieléctricas diferentes, en el interior del mismo.	Se basa en el principio de reflexión de ondas electromagnéticas, que se propagan en un medio, al encontrar interfaces con características dieléctricas diferentes.	- Propiedades dieléctricas del material. - Amplitud/frecuencia de la onda/transductor utilizado. - Ondas de radio entre 2.5 Hz y 300 MHz. - Reticula de distribución de tests.	Puede alcanzar los 15 metros si las condiciones son idóneas.	- Detectar y mapear cables post tensados, armaduras, conductos (metálicos, plásticos, hormigón), cables y subestructuras. - Localizar estructuras o cavidades enterradas o en el subsuelo. - Detectar inclusiones de elementos metálicos o de madera, entre otros. - Determinar profundidades y espesores de elementos como muros, cimentaciones, losas, forjados o columnas embebidas. - Estudio y caracterización de materiales de construcción. - Inspección, diagnosis y estudio de manifestaciones patológicas en elementos arquitectónicos. Identificación de daños en la estructura como grietas internas, exfoliaciones o disgregación y deterioro del material. - Localizar áreas seguras para extraer probetas, practicar aperturas e instalar anclajes. - Identificación de presencia y nivel de humedad. - Comprobación del estado de elementos metálicos como anclajes. - Comprobación de la efectividad de reparación por técnicas de inyección. - Evaluación de tablero/calzada en puentes de hormigón armado. - Detección de raíces de árboles (si existe suficiente contraste dieléctrico entre las raíces y el suelo). - Evaluación del contenido de humedad en el subsuelo.	- En condiciones óptimas, puede detectar objetos pequeños a relativamente grandes distancias y ofrece la posibilidad de averiguar profundidades. - Es una técnica segura para el ser humano, por lo que no se requiere de perímetro de seguridad como ocurre con la técnica de rayos X. La radiación que emiten los equipos equivale a la radiación emitida por un teléfono móvil. - La toma de datos es rápida. - Los resultados se pueden ver en tiempo real con el adecuado software y equipo. - Sólo se requiere de acceso por una cara del elemento. - En la aplicación en investigaciones de puentes y calzadas, una de las mayores ventajas de esta aplicación es que no se requiere de cierre de carriles, ya que la evaluación se realiza a velocidad de autopista con el equipo montado sobre un vehículo. Es la única técnica NDE que no requiere el cierre de carriles durante la recopilación de datos. - Para determinados equipos, el operario no requiere formación previa para realizar el test.	- La principal desventaja es que, si las condiciones no son las ideales, los resultados son muy limitados. Por ejemplo, medios arcillosos, saturados de agua, o los contaminados con sal, suelen ser problemáticos debido a su alta conductividad, que provoca la disipación de la señal y lecturas erróneas. - Las interpretaciones de resultados pueden ser subjetivas debido a que el resultado gráfico puede ser difícil de analizar. - La técnica no funciona óptimamente en determinados medios heterogéneos, ya que las numerosas reflexiones originan excesivo ruido. - La interpretación de resultados puede ser muy compleja, por lo que requiere de personal cualificado con experiencia. Por ejemplo, un técnico puede localizar el armado en un muro de hormigón, pero será más complicado y a veces imposible calcular el diámetro. En elementos con complejas disposiciones internas, como muros con armados densos y complejos, puede ser muy complejo o imposible de representar con la técnica de GPR. - En inspecciones de grandes extensiones de terreno, puede ser necesario un alto consumo de energía. - Para detectar los cambios en el material, el radar necesita estar en movimiento, lo que limita la inspección de ciertos elementos arquitectónicos. - En áreas con muchas o muy potentes señales electromagnéticas, éstas pueden interferir con las ondas del test, resultando en la no detección de determinados objetos o resultados incorrectos.	M-A	\$\$	B	N-C	S
	<b>RAYOS X</b>	Obtener radiografías de elementos arquitectónicos que permitan visualizar el interior de dichos elementos.	La técnica se basa en lanzar energía electromagnética en la frecuencia de los Rayos X al objeto en estudio. La cantidad de energía que atraviesa el objeto, queda grabada en una placa, donde el color negro corresponde a zonas donde los electrones atravesaron el cuerpo y el blanco a las zonas a las que no llegaron electrones al ser absorbidos por el cuerpo.	- Frecuencias entre 30 y 30.000 PHz. - Diseño del plan de seguridad.	Alrededor de 50 cm.	- Averiguar qué elementos metálicos componen los encuentros de elementos estructurales de madera, como cerchas. - Obtener radiografías del interior de elementos estructurales de hormigón, como columnas.	- Mayor resolución de imagen que el GPR, lo que implica menor factor de interpretabilidad.	- Los rayos X utilizan cobalto-60, un isótopo altamente radioactivo que implica riesgo por radiación y por tanto necesidad de instalar perímetro de seguridad. - Se requiere acceso por ambas caras del material. - Se necesita una licencia para efectuar el test. - El personal que trabaja en la ejecución del test debe disponer de formación específica.	A	\$\$\$	A	S	C

Tabla Conclusiones 1 (2/3): Tabla resumen de conclusiones en las que se incluyen las principales características de las técnicas de reconocimiento y evaluación tratadas en esta tesis.

MÉTODOS DE ONDAS ACÚSTICAS		IMPACTO ECO	OBJETIVO	PRINCIPIO	PARÁMETROS	PROFUNDIDAD DE PENETRACIÓN	APLICACIONES EN PATRIMONIO CONSTRUÍDO*	VENTAJAS	LIMITACIONES	ESPECIALIZACIÓN DIRECTOR(A) TEST (Alta: A, Media: M, Baje: B)		
			ULTRASONIDOS	Obtención de espectros, en dominio frecuencia, que permitan identificar patrones para detectar anomalías en el interior del material.	Estudio de la propagación de energía acústica generada por un impacto mecánico en el material en estudio.	- Diámetro de la esfera a utilizar. - Se trabaja con frecuencias hasta los 80 kHz. - Número de muestras que el aparato recibe y utiliza para generar la traza (N) - Tiempo entre el registro de las muestras (t). - Reticula de distribución de tests.	Alrededor de 2 m.	- Determinar la localización y alcance de patologías como grietas, oquedades, delaminaciones y pérdida de adherencia en hormigón en masa, post-tensado y hormigón armado, incluyendo elementos como placas (losas de cimentación, pavimentos, paredes), columnas y vigas, muros, cilindros huecos (tuberías túneles, cisternas), tableros de puentes, etc. - Determinar la existencia y alcance de grietas, oquedades y pérdida de adherencia en elementos arquitectónicos de ladrillo, bloque, piedra y mortero. - Comprobación de la aplicación de inyecciones de mortero tras la restauración de elementos como muros, cimientos, etc. - Con los datos obtenidos es posible calcular el espesor de elementos arquitectónicos.	- No requiere acceso por ambas caras. - El coste del equipo es asequible con respecto a otras técnicas. - Utiliza frecuencias bajas que permiten detectar anomalías que otras técnicas no detectan. - Permite la inspección de elementos heterogéneos que son considerados homogéneos gracias a que la longitud de onda, fruto de las bajas frecuencias del test, es mayor que las heterogeneidades.	- En fábricas compuestas de diferentes elementos, como en el caso de los muros de ladrillo, bloques, piedra, etc. dichos elementos han de estar conectados entre sí con un aglutinante de manera que el elemento responda como una unidad frente al impacto mecánico. - Es incompatible con cámaras de aire, debido a que, en una interfase con aire, la mayor parte de la onda será reflejada haciendo impracticable el estudio del material a partir de esa interfase de aire. - La interpretación de resultados requiere de mucha experiencia y formación previa. - Es una técnica de evaluación puntual, proporciona información en un área pequeña y concreta. - El test in situ es tedioso y lento. - El impacto con las esferas puede deteriorar/escamar el material en estudio.	A	S
ULTRASONIDOS	Averiguar características de la propagación de energía acústica en un medio, como la velocidad de la onda en el material en estudio, o las reflexiones internas, para extrapolarla al estado y presencia de anomalías en el mismo.	Se basa en el estudio de, bien las ondas acústicas reflejadas (pulsos, eco, medición indirecta), bien las ondas acústicas transmitidas (Through-transmission, medición directa) emitidas por un transmisor de ultrasonidos.	- Las frecuencias utilizadas para ensayos ultrasónicos oscilan entre 0.5 MHz a 50 MHz aproximadamente. - Frecuencia y tipo (de contacto o acústico electromagnético -EMAT-) del transductor. - Tipo de medición: directa, semidirecta o indirecta. - Reticula de distribución de tests. - Distancia entre transductores.	Con equipos convencionales, las profundidades máximas suelen rondar los 25 cm pero existen métodos que pueden llegar a 10 metros (LRUT).	- Detección y caracterización de grietas, siempre que éstas no sean paralelas a la dirección de propagación de la energía acústica. La técnica tiene la capacidad de detectar la grieta y de averiguar la profundidad. - Localización de cavidades, si éstas son mayores que la mitad de la longitud de onda de la energía acústica. En determinados casos es posible determinar su tamaño. - Detección de material disgregado, escamas y delaminaciones. Es posible gracias a la comparación de velocidades en material en estado óptimo y material deteriorado. La velocidad será menor cuanto más disgregado se encuentre el material. - Detección de pérdida de adherencia entre materiales. - Determinación del espesor y dimensiones del elemento en función del tiempo y la velocidad de la onda acústica. - Inspección de soldaduras: presencia de poros, inclusiones, reducido espesor, insuficiente penetración y existencia de grietas. - Detección y medición de la extensión de oxidación de un elemento.	- El test puede ser realizado accediendo únicamente a una cara del material, aunque tener acceso a ambas caras facilita el test. - La profundidad de penetración puede ser superior a otras TND, dependiendo de la resolución requerida en los resultados. La profundidad máxima de penetración suele rondar los 25 cm. - Es una técnica precisa para determinar la posición de la reflexión y estimar de manera aproximada el tamaño y la forma de la anomalía. - La preparación del test es mínima. - Los resultados son instantáneos, aunque en determinadas aplicaciones/aparatos puede ser necesario un post-procesado. - La combinación de los últimos equipos y softwares proporciona imágenes de buena resolución, lo cual facilita la interpretabilidad de resultados. - Carece de riesgos para la salud de los operarios y no afecta en ningún modo a los elementos a testear. - El equipo es portable y muy manejable, pudiéndose realizar tests en horizontal, vertical e incluso en techos. - Es un método apropiado en presencia de humedad y agua en el material a analizar. - Da buenos resultados en materiales homogéneos, con superficies lisas y materiales con altas densidades.	- En la mayoría de los casos en aplicaciones en el patrimonio arquitectónico, el método utilizado es por contacto (si se utilizan transductores de contacto), por lo que la superficie debe ser accesible para la realización del test. - No es un método apropiado en presencia de cámaras de aire. - Es necesario que el ejecutor disponga de capacidad, formación y conocimientos técnicos extensos para el desarrollo de procedimientos de inspección e interpretación con determinados equipos y aplicaciones. - En el caso de utilizar transductores de contacto, es necesario utilizar un acoplante para transferir la energía sonora al medio en estudio. Dicho acoplante puede dejar residuo, con lo que hace impracticable la técnica en superficies que no pueden mancharse (frescos, tapices, elementos policromados, determinadas piedras históricas porosas, etc.) - Los materiales que son muy irregulares, o muy pequeños, son difíciles o imposibles de inspeccionar con esta técnica. - Los defectos y discontinuidades lineales cuya orientación es paralela a la dirección de propagación de la energía sonora pueden pasar desapercibidos. - El equipo requiere de calibración del fabricante y del usuario, y el test tiene que ser realizado siguiendo ciertas directrices y estándares para obtener resultados precisos. - La técnica recoge tanto anomalías como características propias del material por lo que en determinados casos en los que las características intrínsecas al material se confunden con las anomalías en estudio, puede generarse demasiado ruido, obteniendo resultados escasos o limitados. - La técnica funciona mejor cuanto más homogéneo sea el material. En fábricas con presencia de juntas, por ejemplo en un muro de ladrillo, la velocidad desciende en su encuentro con la junta.	M-A	S	M	N-C	S-N

\* No todas las aplicaciones se pueden llevar a cabo para todos los casos. Se numeran aplicaciones posibles si se dan determinadas circunstancias.

**Tabla Conclusiones 1 (3/3):** Tabla resumen de conclusiones en las que se incluyen las principales características de las técnicas de reconocimiento y evaluación tratadas en esta tesis.



El cuadro incluido a continuación muestra las técnicas apropiadas en función de la aplicación. Téngase en cuenta que la posibilidad de aplicación de cada técnica para cada caso depende de las características intrínsecas de cada proyecto y que no en todos los casos será posible. El cuadro se ha realizado para casos generales y suponiendo que se reúnen las condiciones idóneas para la aplicación de la técnica.

		TÉCNICA DE EVALUACION NO DESTRUCTIVA									
		Visual/optical	GPR	Ultrasound Pulse Velocity	Impact Echo	Detección de metales	Rayos X	IRT	Endoscopia	TPAS	Fotogrametría UG
Coste relativo (\$,\$,\$,\$,\$)		\$	\$\$\$	\$\$\$	\$\$\$	\$	\$\$\$	\$\$	\$\$	\$\$	\$\$
Complejidad (B=baja, M=media, A=alta)		M	A	A	A	B	M	M	B	M	M
PARÁMETRO/PATOLOGÍA	Resistencia			P	P						
	Uniformidad	P	B	B	B		B	P	P	P	P
	Deformabilidad		B	P					B		
	Localización de grietas	P	P	E	E		B		P	P	P
	Movimientos	P			B		B		P	P	P
	Localización de armaduras		B	B		E	E	P	P		
	Tamaño de armaduras		B				E				
	Localización de anclajes		B	B		E	E	P	P		
	Oquedades		E	P	P		E	P	P		
	Oxidación de armaduras embebidas		P				P				
	Durabilidad/disgregación	P		B	P		P	P	P		P

Figura 5.1-2 Tabla Conclusiones 2. La tabla indica la aptitud de cada técnica para determinar características del material. E = excelente información, B = buena información y P = información aproximada.

	OPERARIO ESPECIALIZADO	INTERPRETACIÓN	PRECIO APROXIMADO DIARIO
GPR	M	M	\$6,500
IE	A	A	\$7,500
UPV	A	A	\$6,500
IRT	M	B	\$3,000
Endoscopia	B	B	\$2,000
UAV	A	B	\$10,000
TPAS	M	M	\$4,000
Fotogrametría UG	M	B	\$10,000
Rayos X	A	B	\$15,000

Figura 5.1-1 Tabla Conclusiones 3. Además del nivel de especialización del operario y de la interpretación, la tabla incluye el precio aproximado diario de referencia (estos precios pueden variar significativamente en función de la empresa, la localización, la época del año, etc). A = alto, M = medio B = bajo.

La continua aparición en el mercado de dispositivos mejorados, implica la necesidad de comprobar las posibilidades para cada proyecto. Si hace dos meses, por ejemplo, no existía una cámara térmica con elección de rango, suficientemente ligera para ser montada en determinado UAS, dos meses después es posible que existan varios modelos con diferentes capacidades. El avance es tan rápido e intenso en campos como los softwares de procesado y post-procesado, que cada proyecto requiere un periodo de investigación al respecto. El futuro de los MEND está directamente relacionado con este desarrollo de la tecnología. Las técnicas descritas van evolucionando siendo más potentes y precisas gracias a los avances tecnológicos en la instrumentación y a la mejora de los soportes informáticos de procesado, postprocesado e interpretación.

Ya existen aplicaciones para *smartphone*, que permiten medir e identificar condiciones existentes, ampliando los recursos disponibles del abanico de

herramientas y métodos de reconocimiento y evaluación no destructivos; se prevé que surjan más en un futuro próximo. Estas aplicaciones comprenden sistemas y softwares de escaneo y reconocimiento con capacidades avanzadas de visión, aplicaciones que calculan la pendiente un tejado utilizando el giroscopio insertado en el dispositivo móvil, distanciómetros, niveles, análisis del espectro de color para hacer reintegraciones sin tomar muestras, e incluso detección de metales que utilizan sensores ya existentes en algunos *smartphones* (Gilett, 2015). Otra de las tecnologías que están aterrizando en el panorama digital es la *advanced vision capability*, tecnología que utiliza varios sensores y cámaras para registrar la realidad que el usuario atraviesa y generar modelos 3D conforme camina. Esta tecnología, en combinación con tecnología de reconocimiento de elementos puede, por ejemplo, hacer posible identificar modelos y procedencia de elementos arquitectónicos, comparando forma y otras características con bases de datos preestablecidas.

Las opciones de elección son muchas y se requiere de planificación, especialización y formación continua para poder escoger la técnica más adecuada.

## CONCLUSIONES DE LA APLICACIÓN EXPERIMENTAL DE END A UNA BÓVEDA TABICADA/BÓVEDA DE GUASTAVINO

Rafael Guastavino Moreno fue un arquitecto español que emigró a Estados Unidos junto a su hijo Rafael Guastavino Expósito en 1881. Patentó un sistema resistente al fuego basado en la técnica de la bóveda catalana o bóveda tabicada y fundó una compañía constructora, la Guastavino Fireproof Construction Company (R. Guastavino Company a partir de 1897). Durante sus 73 años de vida, la compañía (1889-1962) participó en más de 1.300 proyectos, parte de los cuales corresponden al actual patrimonio arquitectónico de los Estados Unidos, como representan los ejemplos de Gran Central Terminal, la catedral de Saint John the Divine, la estación del City Hall y Saint Thomas Church en Nueva York, la Public Library de Boston, la estación central de Michigan en Detroit o el edificio UC Hearst Mining Building en Berkeley, California. Desafortunadamente, se desconoce el número total de proyectos y también cuáles de ellos han sido demolidos. Por este motivo se desarrolló para esta tesis una herramienta que permita recoger de una manera interactiva y dinámica todos los proyectos de la compañía: [www.guastavinomap.org](http://www.guastavinomap.org).

Varias circunstancias son las que hacen el caso de Guastavino excepcional; el hecho de que normalmente no fuese el arquitecto principal de las obras y de que entrase en ellas a través de contratos de constructor, explica que raramente aparezca su nombre en las fichas de historia de los edificios. Otros factores, como son el cierre de la compañía en los años 60 del siglo XX, hacen más complicada la recopilación de datos; la Guastavino Fireproof Construction Company contaba con varias oficinas, además de la Boston, que cerraron sus puertas sin que se tenga constancia de que se recuperasen todos los documentos. GuastavinoMap se desarrolló para encontrar y procesar la información con el fin de generar un catálogo real interactivo de las obras de la compañía y hacerlo fácilmente accesible a otros investigadores. El carácter digital de filtrado interactivo permite que cada usuario genere el catálogo personalizado adaptado a sus necesidades, siendo herramienta moderna, dinámica, sostenible, eficiente y accesible internacionalmente.

La investigación de [guastavinomap.org](http://guastavinomap.org) es un proyecto en marcha; regularmente se estudian edificios de las listas, se validan y se incluyen en la base de datos digital, para que pasen a visualizarse en el mapa. Además de continuar con esta labor, el siguiente paso del proyecto es desarrollar una aplicación para dispositivos móviles de manera que sea más accesible desde cualquier lugar con internet. Además, se está trabajando en la inserción de una variable más en la base de datos: “Características constructivas” con subgrupos que detallen el tipo de ladrillo utilizado, la morfología de las bóvedas tabicadas, información de los morteros y cualquier otra información relevante de sus características técnicas.

El desconocimiento de la técnica y de su valor histórico es el principal motivo por el que muchas bóvedas de Guastavino han sido demolidas en Estados Unidos. La lesión más común es el desprendimiento de ladrillos de la primera capa del intradós. Ante la inexistencia de investigaciones sobre la aplicación de métodos de END en bóvedas de Guastavino, para esta tesis se construyó una bóveda tabicada en la que poder desarrollar la aplicación experimental de END.

Esta investigación tenía como objetivo averiguar qué métodos de END eran útiles para detectar pérdida de adherencia entre la primera capa de ladrillo del intradós y la segunda, con acceso únicamente por el trasdós de la bóveda. Para ello, se construyó una bóveda tabicada de tres hojas con faltas planificadas simulando diferentes tipos de pérdida de adherencia (Figura 4.1-4). Se le aplicó END en dos fases, siendo la Fase I la bóveda de dos hojas antes de construir la tercera y la Fase

II la bóveda con tres hojas. De todas las técnicas aplicadas a la bóveda (Geo-radar, termografía activa y pasiva, impacto-eco, UPV y percusión por tapeo de martillo) la que mejor resultado dio fue la termografía activa.

Con la técnica del geo-radar fue posible detectar la pérdida de adherencia del ladrillo 27, que es la que mayor cámara de aire presentaba, alrededor de 1 cm de espesor; dicha cámara es mayor de lo que una pérdida de adherencia parcial de la pieza generaría normalmente. Por este motivo sería recomendable realizar más tests, ampliando el rango de la investigación, para confirmar la utilidad de esta técnica: ampliando el número de muestras, probando antenas de mayor resolución (mayor frecuencia) y variando filtros en el post-procesado. La antena utilizada, de alta frecuencia, tiene una capacidad de penetración aproximada en ladrillo de 20 cm. Sería recomendable realizar tests en bóvedas de espesores mayores y más hojas, para determinar si el método detecta la separación entre ladrillos a mayor distancia del transductor. Para realizar la calibración del sistema, es muy útil tener acceso al intradós de la bóveda y conocer el espesor de la misma. De no tener ese dato, podría hallarse con impacto eco (dependiendo del espesor total) o con ultrasonidos. Una de las ventajas de la aplicación de la técnica del geo-radar es que una vez planificada la evaluación por un experto, la toma de datos puede ser realizada por personal no especializado. Es recomendable utilizar un aparato que disponga de odómetro incorporado, además de pulsor para indicar las juntas en el radargrama. La aplicación de los filtros, el post-procesado y la interpretación, sin embargo, han de ser realizados por expertos.

El método que obtuvo mayor precisión en la detección de las 4 pérdidas de adherencia simulada fue el test TACV (trasdós-activa-convección) de termografía infrarroja, consistente en aplicar una fuente de calor que calentase la bóveda por convección desde el intradós mientras se registraron los termogramas desde el trasdós. El rango temporal que mejores resultados dio corresponde a los termogramas registrados entre el minuto 5 y el minuto 15. Los resultados fueron más contundentes durante los tests realizados durante la Fase I (dos hojas) que durante la Fase II (tres hojas) motivo por el cual sería recomendable ampliar la investigación al estudio de la misma técnica con mayor número de hojas (al menos 4) para confirmar o no que la técnica es válida también para bóvedas tabicadas con mayor número de hojas/mayor espesor. De esta investigación se deduce que este método es más efectivo a menor espesor de la bóveda. Una limitación de este test es que la imposibilidad de controlar el calor aplicado por convección, obliga a dejar enfriar los materiales entre tests contiguos, lo cual supone una pérdida de



eficiencia en tiempo que debe ser considerada al valorar este método. La segunda limitación a considerar en este test, es que puede no ser posible aplicar energía térmica por el intradós de la bóveda (en este caso se elevó la temperatura 9,9 °C), en cuyo caso podría ser una alternativa aplicar la energía térmica por convección en el trasdós y registrar los termogramas desde el intradós. Sería recomendable continuar esta investigación a dicho supuesto para comprobar la viabilidad de aplicar este método variando las posiciones de aplicación de calor y registro de termogramas. Una tercera limitación, no tan determinante como las dos anteriores, es que el calentamiento homogéneo de los materiales por convección en una aplicación real es complicado, en ocasiones imposible de conseguir; es el técnico quien debe ser consciente de este fenómeno para no realizar interpretaciones erróneas de los termogramas.

El test TACT (trasdós-activa-contacto) también obtuvo resultados precisos únicamente en la Fase I entre los 180 y 300 segundos, de lo que se deduce que este método podría ser válido únicamente para bóvedas de poco espesor (en este caso 4,44 cm).

Ambos tests TACV y TACT de termografía activa se realizaron con una cámara fijada en un trípode para poder comprender la evolución de los termogramas con fines investigativos. Sin embargo, en aplicaciones reales, se recomienda utilizar una cámara móvil o utilizar dos cámaras, una sobre fija y otra móvil. El motivo principal que guía esta recomendación es que la perspectiva varía el resultado del termograma, especialmente en superficies curvas, por lo que variar la posición de la termocámara facilita la interpretación y generación de termogramas más precisos.

La termografía pasiva no dio resultados útiles. Los termogramas resultantes eran monocromáticos, por tanto, la única información que permiten deducir es la temperatura superficial a la que se encuentra la superficie de la bóveda.

El test de impacto-eco con diámetros 11, 8 y 5 mm resultó ser inadecuado para la Fase I y la Fase II, ya no aportó resultados que permitieran determinar un patrón para detectar pérdida de adherencia entre hojas de ladrillo. Todo parece indicar que los motivos principales por los que los tests FI P9, FI P3 D5 y FII P3 D5 no dieron resultados útiles es porque la pérdida de adherencia no se encuentra lo suficientemente profunda (es decir, el espesor de la bóveda no es suficiente para que la lesión sea detectada con esta técnica utilizando estos parámetros) y el

espesor de las faltas no es suficiente como para ser detectado por la onda generada con las esferas utilizadas en estos tests (11 y 5 mm).

Sin embargo, el test FII P3 D3 (con los parámetros: diámetro de esfera = 3mm, número de tomas = 1.024, t entre tomas = 5  $\mu$ s, frecuencia de resolución = 0,20 kHz y voltaje = 2V) generó espectros que parecían seguir un patrón con el que poder identificar la pérdida de adherencia entre hojas de ladrillo, pero dicho patrón no fue suficientemente contundente como para determinar un protocolo de reconocimiento. En alguno de los espectros de tests en áreas en buenas condiciones se registraron dos picos de frecuencia, el de menor frecuencia en torno a los 6 kHz y el de mayor frecuencia, en torno a los 30 kHz; en zonas que presentaban pérdida de adherencia en los ladrillos de la primera hoja del intradós, se observaron dos picos de baja frecuencia próximos entre sí, menores a 6 kHz. En base a estos resultados, sería recomendable ampliar la investigación con la esfera de diámetro 3 mm, aumentando el número de ladrillos ensayados y el número de tests por localización, para contar con más muestras y de esta manera comprobar si la teoría de patrón se cumple consistentemente. De igual importancia sería ampliar la investigación incluyendo bóvedas de cuatro y cinco hojas con el fin de establecer una relación entre el número de hojas -espesor de la bóveda- y el diámetro de la esfera más apropiada. Además, debería seguir comprobándose en cada caso qué combinación de los factores número de tomas, y tiempo entre tomas aporta espectros más interpretables, reduciendo ruido sin perder información útil.

Debe destacarse que, si bien los resultados de aplicar impacto-eco con esfera de 3 mm durante la Fase II dan resultados prometedores, aunque se llegase a confirmar un patrón que permitiese establecer un método de reconocimiento de pérdida de adherencia, la técnica conlleva limitaciones que hacen complicada su aplicación *in situ*. En primer lugar, es una técnica que requiere mucho tiempo de ejecución en general, pero más si cabe en ladrillos estriados en particular. La configuración del transductor (plano y liso) y el tamaño de la esfera (de 3 mm) hacen necesario una media de 8 impactos para que el transductor capte la recepción de la onda acústica reflejada. Es difícil, tedioso y cansado presionar el gatillo y el transductor hacia la bóveda con una mano, mientras con la otra mano se impacta cerca del transductor con una esfera tan diminuta. Las estrías del ladrillo complican la colocación tanto del transductor como el impacto único con la esfera. Se ha de presionar con tanta intensidad el transductor contra la bóveda con el fin de recoger la respuesta, que el disco/sensor protector del transductor receptor se daña y ha de ser reemplazado cada 80 tests aproximadamente. Puede

tomar hasta cuatro horas testear treinta ladrillos, lo que supone un ratio de progreso muy lento, a tener en cuenta en la planificación de la evaluación. Otra limitación importante es la complejidad de la ejecución de la técnica en todas sus fases: calibración, aplicación e interpretación de resultados, lo que hace necesario personal altamente especializado en todo el proceso. Por último, los impactos de las esferas, incluso la de 3 mm, dañaron la superficie de los ladrillos.

A la vista de los resultados de esta investigación, la técnica de impacto eco proporciona resultados prometedores, pero no suficientes para confirmar su utilidad para la aplicación de la detección de pérdida de adherencia entre ladrillos testeados desde el trasdós. De confirmarse su utilidad, las limitaciones en tiempo de ejecución, dificultad y subjetividad de resultados harían recomendable su utilización como técnica de apoyo, es decir para estudiar casos concretos de dudosa interpretación con otra técnica.

La técnica de ultrasonidos UPV con medición indirecta no dio los resultados esperados. Se investigó su aplicación por el método indirecto, es decir, tanto el transductor emisor como el receptor se posicionaron en el trasdós a distancias de 5, 10, 15 y 20 cm. Durante el proceso de calibración del sistema se realizaron mediciones directas que dieron resultados contundentes y precisos en cuanto a la localización de pérdida de adherencia. En dichas mediciones directas, la velocidad en zonas en buen estado resultó ser entre 2.480 y 2.746 m/s mientras que la velocidad medida por método directo en zonas con pérdida de adherencia resultó entre 460 y 490 m/s, lo que confirma la utilidad de esta técnica por medición directa. Sin embargo, el propósito de esta investigación era determinar la utilidad de la técnica aplicada con medición indirecta, con acceso únicamente por el trasdós de la bóveda. En este caso, tanto en la Fase I como en la Fase II, la media de las velocidades en zonas en buen estado fue superior a la media de las velocidades en áreas que presentaban pérdida de adherencia entre ladrillos, pero dicha diferencia no fue lo suficientemente amplia como para reconocer un patrón fiable (Fase I: 2.195 m/s versus 2.136 m/s respectivamente. Fase II 2.402 m/s versus 2.256 m/s respectivamente). De la investigación también se extrae que, en este caso, una separación entre transductores de entre 100 mm y 200 mm aporta resultados más precisos que separaciones inferiores a 100 mm. En este caso concreto el equipo no captó las velocidades de manera precisa, como se deduce del resultado obtenido como valor de velocidad superficial en el proceso de calibración, 2.106 m/s, superior a los 2.026 m/s de media de velocidad longitudinal en la Fase II. En esta misma fase, la velocidad longitudinal con método directo resultó ser de 2.746 m/s. Dichos

valores (de velocidad longitudinal) deberían ser más aproximados. Del mismo modo, las velocidades varían dependiendo de la distancia entre transductores, lo cual no debería suceder a iguales condiciones. Es posible que la heterogeneidad de los materiales provoque un comportamiento no predecible en el recorrido de la onda que imposibilite la identificación de pérdida de adherencia en función del valor de la velocidad resultante. Independientemente de los resultados obtenidos, esta técnica presenta limitaciones importantes a tener en cuenta en la planificación de la evaluación. La mayor de todas ellas es que la necesidad de utilizar un gel acoplante convierte la aplicación en engorrosa y provoca el manchado de la superficie de la bóveda, que si no se limpia cuidadosamente genera acumulación de residuos en las zonas de gel y una apariencia no deseable. La presencia de estrías en el ladrillo hace necesario utilizar más cantidad de gel que si la superficie fuese lisa. Además, el tiempo de ejecución es lento, no tanto como la técnica del impacto-eco, pero suficientemente lento como para descartarlo en grandes superficies; en este caso la progresión fue de aproximadamente 30 test por hora (sin contar la limpieza del gel sobre los ladrillos posterior a su aplicación).

En base a los resultados obtenidos en el test de ultrasonidos UPV, sería recomendable ampliar esta investigación utilizando otro modelo de equipo, especialmente variando la frecuencia de los transductores, utilizando frecuencias más altas.

La bóveda tabicada que se construyó para llevar a cabo la investigación de la aplicación experimental es de menor escala que una bóveda tabicada de Guastavino (Aproximadamente 1:4); además, los materiales utilizados son una adaptación actual de los materiales originales. Es por esto que, para corroborar los resultados, habría que aplicar los diferentes métodos en una bóveda existente original.

## REFLEXIONES FINALES

En esta tesis se han investigado las técnicas más utilizadas aplicadas al patrimonio estadounidense y sus posibles aplicaciones al servicio de su conservación. Además del estudio teórico, se han aplicado diferentes técnicas *in situ*, recogiendo los resultados tanto en ejemplos en la investigación teórica, como en el Capítulo 3, destinado a casos de estudio. Finalmente, se ha llevado a cabo una aplicación experimental sin precedentes en el laboratorio con el fin de evaluar



la idoneidad de diferentes métodos, para detectar la pérdida de adherencia entre capas de ladrillo en bóvedas tabicadas de Guastavino.

**Investigación teórico-práctica de evaluación no destructiva aplicada al patrimonio estadounidense:** La elección, efectividad y posibles aplicaciones de las técnicas estudiadas durante la investigación teórico-práctica, depende de diferentes factores. Normalmente el éxito de la evaluación se alcanza con una combinación de técnicas que se complementen entre sí. Por ejemplo, en presencia de materiales conductores o en presencia de alto contenido de humedad, las técnicas basadas en el estudio de ondas acústicas dan mejores resultados que las que utilizan ondas electromagnéticas. Al contrario que las técnicas basadas en la propagación de ondas acústicas, las técnicas basadas en el estudio de las ondas electromagnéticas son compatibles con presencia de cámaras de aire, ya que permiten estudiar el material detrás de la opacidad.

Existen otros factores que determinan la elección de la/s técnica/s, como es la composición del material y el tamaño de la anomalía a detectar. Si el material es de composición heterogénea, los métodos que utilicen ondas con longitudes de onda menores a los componentes del material, registran las reflexiones de las interfases de los componentes, lo que genera excesivo ruido que imposibilita su uso (influyen también la constante dieléctrica o la impedancia acústica). Del mismo modo, si la anomalía a detectar es menor que la longitud de onda, ésta puede no interactuar con la anomalía pasando completamente desapercibida; sirva como ejemplo la técnica del impacto-eco, cuyas frecuencias, menores a 80 kHz, utilizan longitudes de onda suficientemente altas como para considerar isotrópicos y homogéneos materiales de composición heterogénea (hormigón, fábrica de ladrillo, etc.), haciendo imperceptibles anomalías de tamaños menores a la longitud de onda (en función del tamaño de la esfera empleada).

Otro factor a considerar en la elección del método es la profundidad a la que se encuentre la anomalía. Por ejemplo, en termografía activa, la profundidad determina la viabilidad, la posición de la fuente de calor y la elección de lectura directa o indirecta. Con la técnica del impacto eco no se detectan anomalías a una profundidad menor que la mitad de la longitud de onda empleada.

Otro de los factores determinantes en el diseño de la evaluación no destructiva es el acceso a la zona a investigar. En la práctica, es común que ciertas técnicas, como ciertos equipos de geo-radar, queden descartadas por no ser factibles

logísticamente. Los recién aparecidos sistemas aéreos no tripulados, facilitan la inspección visual, la termografía y la fotogrametría digital. Los sistemas industriales de cuerdas posibilitan el acceso a zonas en altura, muy comunes en el patrimonio estadounidense.

Para conocer estos factores son necesarios un estudio histórico y constructivo del elemento arquitectónico, así como un estudio de los objetivos de la evaluación y sus recursos; estos estudios han de realizarse previos a la planificación de la evaluación no destructiva.

**Aplicación experimental de END en bóveda tabicada de Guastavino:** De los cuatro métodos empleados (geo-radar, ultrasonidos, impacto-eco y termografía) para detectar la pérdida de adherencia entre la primera y segunda capa de ladrillo, con acceso por el trasdós, el único método efectivo fue la termografía activa, aplicando la fuente de calor desde el intradós y registrando los termogramas desde el trasdós de la bóveda. La técnica del geo-radar permitió detectar una de las cuatro lesiones, por lo que no queda descartado y abre una futura línea de investigación en la que se recomienda utilizar antenas de frecuencias mayores a 2,6 GHz y ampliar en número de muestras y el número de capas. La técnica de ultrasonidos por medición indirecta, permitió detectar dos de las cuatro lesiones, sin embargo, los valores de velocidad en otras zonas no respondían a una lógica o patrón, motivo por el cual sería recomendable continuar la investigación utilizando transductores de mayor frecuencia y ampliar tanto el número de muestras como el grosor de la bóveda (por tanto, la profundidad de las lesiones); sin embargo, la necesidad de utilizar gel y el bajo ratio de progreso desaconsejan utilizar esta técnica. Una alternativa para evitar dichas limitaciones, a incluir en la futura línea de investigación, sería utilizar un transductor acústico electromagnético. Por último, la técnica del impacto-eco no permitió detectar ninguna de las cuatro lesiones. Además, resultó ser una técnica tediosa y complicada de aplicar al ladrillo estriado de la bóveda, a la par que ineficiente en tiempo. Debido a la profundidad de penetración de este test, es posible que la técnica diera resultados aceptables en bóvedas de mayor espesor; esta teoría es una de las futuras líneas de investigación.

Fuera de Estados Unidos, el patrimonio arquitectónico ya incluye, e incorporará más en un futuro próximo, tipologías y sistemas constructivos similares al

patrimonio estadounidense actual. Las técnicas y métodos de reconocimiento y evaluación no destructivas son un recurso habitual y valioso en el campo de la conservación y restauración del patrimonio arquitectónico estadounidense. Permiten conocer el estado real del elemento arquitectónico para planificar correctamente su conservación y restauración eliminando, en la medida de lo posible, los imprevistos fruto del desconocimiento. En definitiva, un acertado uso de los recursos de evaluación no destructiva permite conocer el edificio, y por lo tanto ajustar el diagnóstico y la intervención, evitando actuaciones innecesarias y reduciendo el índice de incertidumbre y, por tanto, los costes.

## 5.2. VERSIÓN EN INGLÉS

In response to the aging architectural heritage in the United States, nondestructive evaluation methods and techniques (NDE) are used as a monitoring tool, condition survey assessment and quality control of restoration interventions. The use of NDE for analyzing architectural heritage elements, provides essential information making it available to all the agents responsible for its maintenance and conservation.

US architectural heritage properties in combination with US market of preservation are the two main causes why the variety of NDE methods and techniques is limited and applied with repetitive methodologies. At the same time, NDE is a common resource, also due to the same two causes: the large amount of buildings with similar constructive systems that require similar objectives of investigation; nevertheless, there are only a few companies in the country specialized in NDE + architectural heritage preservation. Research is limited to a few universities such as Pennsylvania University, Cornell o Drexel and, mainly, to *in situ* implementation by those few specialized companies previously mentioned.

There are many different possible options to classify the different NDE methods and techniques. In this thesis, they are divided in three blocks: instrumented visual methods, electromagnetic wave methods and acoustic wave methods. A fourth last block, NDE facilitating methods include means of access and approach that enable NDE and happen simultaneously.

Visual assessment techniques, called "*Métodos instrumentados de inspección visual y técnicas visuales de análisis y documentación*" in this thesis, allow visual inspection of hidden materials and conditions, facilitating their representation and, in combination with suitable software packages, allow to document and hyperlink different files, organizing the information in order to make it manageable and accessible to all the members of the large multidisciplinary preservation teams. Borescopes, flexoscopes, videoscopes, chimney cams,



SeeSnake, etc. are designed to allow visualization of hidden areas, visually assess material conditions, find out constructive systems and properties, identify hidden elements and conditions such as leaks, cracks, loose materials, moisture, living beings, etc. New photogrammetry has drastically transformed the field of visual documentation and visual condition assessments, replacing, in many cases, scanner laser techniques. Specialized photogrammetry software applications such as Pix4D or Argisoft, can generate texturized 3D models from photographs taken by any camera without previous manual calibration. These 3D models allow to generate 2D or 3D drawings, orthographs, flights and 3D animations, facilitating visualization and understanding of the architectural element and its conditions, enabling their analysis individually or collectively, in order to detect general deterioration patterns (displacements, out of plumbs, etc.). At the same time, during the last years TPAS has become the preferred condition assessment documentation method, since it allows to standardize the process thanks to the built-in condition library, its organization features and its use as a database for graphic, numeric and associated files embedded in each condition. Moreover, it can be used as a monitoring platform to analyze the evolution of the building.

Electromagnetic techniques can detect conductive elements, hidden facilities or structural elements, moisture, etc. Thermography can identify thermal variations in the surface of materials and by doing so, it can detect different constructive characteristics and anomalies, such as delamination, voids, moisture, certain facilities, materials of a different kind, etc. The study of the electromagnetic energy reflections when impacting different interfases within a material allows, through GPR technology, to detect and map out rebars, conducts, substructures, etc. in materials such as concrete, earth or timber; it is also useful for finding out thicknesses and moisture level and to identify internal conditions such as cracks and delaminations.

Acoustic techniques analyze how the waves behave when traveling through the material and are successful identifying voids, interfaces, thicknesses, honeycombing and delaminations. The impact-echo system is designed for detecting conditions such as cracks, voids and delaminations. Ultrasonic techniques are also useful for detecting cracks and calculating their depth, as well as identifying voids, greater microstructural discontinuity, delaminations and thicknesses. The pulse velocity between the two transducers is recorded as lower where it passes around a crack, flaw or discontinuity in the material.

The facilitating methods included in this thesis are the unmanned aerial systems or vehicles (UAS/UAV), usually referred as drones, and industrial rope access systems (IRA). The main reason why both were included is the narrow relationship that exists in between NDE and these to approach systems. For instance, last generation photogrammetry is mostly applied by UAS; at the same time, the latest thermo-camera models available for UAS are modifying the way thermal information is collected, given that it is usually more effective to do it by UAS than manually. The effectiveness of IRA building-friendly systems, compared to conventional approach methods such as pipe or hanging scaffolds and aerial platforms, are the reasons why an important portion of the NDE applied to historic facades in more than fifteen-floor buildings, is performed through IRA. Furthermore, IRA techniques are more affordable and time efficient than conventional methods.

In real applications, the different techniques complement each other; the planning of the evaluation includes sets of different techniques that are chosen depending on the conditions, characteristics and limitations of each project. For instance, electromagnetic techniques are not compatible with moisture because electromagnetic energy is absorbed by water molecules, while acoustic techniques are not compatible with voids, since acoustic energy is reflected in the air interface, preventing the evaluation of the material behind the void.

The planning of the evaluation is essential and as important as the evaluation itself; the NDE evaluation success depends on it.

While END can be useful and beneficial, it is important to be aware of its limitations. The following table includes main characteristics, applications, advantages and limitations for each one of the methods studied in this thesis.

INSTRUMENTED VISUAL METHODS		OBJECTIVE	PRINCIPLE	PARAMETERS	PENETRATION DEPTH	APPLICATIONS IN PRESERVATION	ADVANTAGES	LIMITATIONS	SPECIALIZATION OF TEST DIRECTOR (High: A, Medium: M, Low: B)	PRICE EQUIPMENT (\$\$\$->\$10,000, \$\$, \$5,000-\$10,000, \$, <\$5,000)	TEST DURATION (High: A, Medium: M, Low: B)	INTERPRETATION (Complex: C, Normal: N, Simple: S)	EXECUTION (Complex: C, Normal: N, Simple: S)
		ENDOSCOPY	PHOTOGRAMMETRY	TPAS									
	Indirect vision of the element interior/hidden spaces through a borescope.	Optical instrument consisting of a rigid or flexible tube with an optical relay inside so that the view through a lens at one end may be seen from an eyepiece in the opposite end of the tube or an equivalent optical fiber or video system.	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Rigid or flexible borescope/fiberscope/vidioscope.</li> <li>- Inspection recording: yes/no.</li> <li>- Illumination: type and power.</li> <li>- Head diameter/hole diameter.</li> </ul>	Can reach 30 meters (LongSteer)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Visually check the condition of hidden materials.</li> <li>- Find out constructive systems behind the visible layer of the building element.</li> <li>- Find out the thickness of certain architectural elements.</li> <li>- Detection of flaws such as: cracks, leaks, element braking, biological development, etc.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- No required specialist to perform the test (if recorded, can be analyzed by a specialist off site).</li> <li>- No contact is required with the element to inspect.</li> <li>- Allows to visualize areas without removing material.</li> <li>- There are multiple available models that can be customized for each case.</li> <li>- There are light, sturdy and easy to manipulate instruments.</li> <li>- There are some affordable models.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- It is necessary to have some interstitial space to insert the instrument and to have enough field of vision.</li> <li>- It is necessary to make a hole if there isn't one on place.</li> <li>- Rigid borescopes have better resolution than flexible ones but they have a more limited field of vision.</li> <li>- If the space to be inspected has no references and/or the field of vision is limited, it may be complicated to interpret the visualization.</li> <li>- If a high quality image is required, the equipment cost may reach \$3,000.</li> </ul>	B	\$\$\$\$	B	S	S	
	To generate images and 3D models geometrically corrected such that the scale is uniform; they can be used to measure true distances.	Locating points in the space using triangulation, through stereoscopic overlap and SfM algorithms.	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Model resolution, GSD.</li> <li>- Precision.</li> </ul>	-	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Condition documentation.</li> <li>- Direct measurements from the 3 D model.</li> <li>- 2D and 3D drawing generation.</li> <li>- Generation of orthophotographs which contain scaled rectified photographic information of the architectural element.</li> <li>- Register flights and 3D animations, enabling visualization of the architectural element and its conditions.</li> <li>- Enable the observation of pathologies as a whole that, in a close up survey may not be received, such as lines out of plumb, crack systems or large areas with moisture.</li> <li>- Same-Itinerary cyclic inspections using the same pre-designed flight itinerary in order to analyze condition evolution.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Contact with the element to be investigated is not required.</li> <li>- It provides texturized 3D models, orthophotographs and drawings more cost effectively than traditional methods.</li> <li>- It is a powerful documentation tool. It is possible to accurately document a regular architectural element, and generate the 3D model in a few hours.</li> <li>- Photographic files and metadata may be used in the future with more powerful software.</li> <li>- For the same level of detail, this is usually the most affordable NDE technique.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Professional software applications require specialization and a training period.</li> <li>- If the architectural element is composed by repetitive or curved shapes, the resulting 3D model can be confusing or incomplete; it may be necessary to add markers for the software to identify. Sometimes, this process is not possible, such as the case of an exempt chimney.</li> <li>- A complete, mid-range professional equipment, that includes software, PC, UAS and camera (s), is around \$8,000.</li> <li>- If the architectural element has reflective parts, such as mirrors or high reflection glasses, it may be not possible to generate a 3D model of the element.</li> </ul>	A-M-B	\$\$\$\$	B	S	C-S	
	On site data and associated files digital register for later analysis and storage.	Compilation of current conditions with a digital tablet through a condition library hosted on an AutoLISP + AutoCAD software platform that has the ability to hyperlink files and collect in its metadata graphic and numerical information.	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Documentation level of detail.</li> <li>- Block customization, if needed.</li> <li>- Quality of base drawings.</li> </ul>	-	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Documentation of existing building conditions in an orderly, efficient and functional manner.</li> <li>- Storage of graphical and numerical information, as well as files associated with each condition regarding to the current state of the building.</li> <li>- In large buildings and in buildings with complex pathology systems, it is useful in the research and analysis of condition patterns.</li> <li>- Platform for monitoring the evolution of pathologies overtime.</li> <li>- Using AutoCAD as the base platform, streamlines the generation of condition reports and quantity calculation for the design process.</li> <li>- Tool for documentation and consultation of repairs and interventions.</li> <li>- Database of the state of the building overtime.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- TPAS expedites the collection of onsite data.</li> <li>- Higher degree of quality and sophistication in registered data.</li> <li>- Minimization of post-processing time.</li> <li>- Condition libraries ensure standardization in the inspection process by different individuals (nomenclature, priorities, etc.).</li> <li>- Eliminates transcription and interpretation errors.</li> <li>- TPAS reports are more complete, versatile and better quality than traditional onsite documentation methods, maximizing the usefulness of the final product.</li> <li>- TPAS drawings allow to extract numerical data to formats xlsx, which expedites quantity calculation.</li> <li>- Onsite hyperlinking of condition blocks with related files (photographs, videos, NDE files, etc.)</li> <li>- It is possible to use orthophotographs as base drawing.</li> <li>- It does not require contact with the element to inspect.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- It is required to use AutoCAD to be able to use all TPAS features.</li> <li>- It is necessary to have user level AutoCAD skills; in addition the user needs a training period.</li> <li>- The cost of the equipment, including the software is around \$7,000.</li> <li>- Digital tablets should be sturdy or have them insured for damage.</li> <li>- Screen visibility in bright environments may be limited, depending on the tablet model, which may slow down data collection; increasing screen brightness compromises battery life.</li> <li>- Onsite battery life is still a limitation, since it usually lasts around three hours.</li> <li>- If base drawings are not accurate, final results won't be accurate.</li> </ul>	M	\$5	B	S-N	N	

Table Conclusions 1 (1/3) Table abstract of conclusions that includes the basic characteristics of the NDE techniques discussed in this thesis.

ELECTROMAGNETIC TECHNIQUES		OBJECTIVE	PRINCIPLE	PARAMETERS	PENETRATION DEPTH	APPLICATIONS IN PRESERVATION	ADVANTAGES	LIMITATIONS	SPECIALIZATION OF TEST DIRECTOR (High: A, Medium: M, Low: B)	PRICE EQUIPMENT (\$\$\$->\$10,000, \$\$, \$5,000-\$10,000, \$, <\$5,000)	TEST DURATION (High: A, Medium: M, Low: B)	INTERPRETATION (Complex: C, Normal: N, Simple: S)	EXECUTION (Complex: C, Normal: N, Simple: S)
		<b>IR THERMOGRAPHY</b>	Detect variations on the surface temperature of a material to extrapolate the thermal information to the analysis of the state of conservation and characteristics of the material.	Infrared thermography measures the wavelength of the electromagnetic wave of the infrared spectrum, emitted by a surface, to generate a temperature map, through specialized software.	- Emissivity of the material. - Active or passive thermography. - Temperature. - Distance between the thermocamera and the object. - Range and scale.	- Detect delamination . - Detect superficial voids. - Detect termite activity. - Discover construction phases and detect repairs. - Detect covered openings. - Detect pipelines. - Map out moisture. - Flaw analysis under mortars, stucco and frescoes. - Heat bridge analysis. - Detect nests or living beings within the architectural element. - Detect adjacent materials of different nature. - Evaluate structural damage after an earthquake event. - Evaluate efficiency of consolidation treatments. - Analysis of air leakage. - Diagnosis of waterproofing membranes. - Find out moisture content in porous brick elements. - Detect delamination between brick layers in Guastavino vaults.	- Contact with the element to investigate is not required. - The test can be performed having access just to one face of the element (depends on the case). - No illumination is required. - It provides instant results on site and, depending on the case, there is no need for post-processing to analyze the results. - In general, it is an intuitive technique, easy to interpret. - It is versatile, time efficient and in most cases, the results are reliable. - It is an environmentally friendly technique, safe for people. - Passive thermography does not require an additional heat source. - It is the most appropriate technique for the analysis of heat leaks.	- It can lead to misinterpretation if the individual performing the test does not have adequate specific training. - It is common that successful results can not be assured until the test has been performed. The need of other NDE tests may be necessary to corroborate IRT results. - The results and/or their interpretation may be subjective. - In passive thermography waiting times may be common and long. - In passive thermography the test success depends, among other, on the environmental condition, which in many cases can not be controlled. - In active thermography, it may be necessary to let cool materials between contiguous tests, which is time consuming. - Better results are obtained at the appropriate distance, as close as possible keeping the necessary distance to analyze by comparison with contiguous materials. This perfect distance is not always possible. - In active thermography, heating large areas may be complex and expensive. - In general, active thermography is more effective than passive thermography. However, in preservation, it is not always possible to apply heat.	B-M	\$\$\$	B-M	S	S-M
<b>GPR</b>	To obtain a radargram showing the interfaces between materials with different dielectric properties, in the interior of the architectural element.	It is based in the study of the reflection(s) of the electromagnetic waves, while traveling through a material. The reflections occur when the wave encounters interfaces between materials with different dielectric characteristics.	- Dielectric properties of the material(s). - Amplitude/wave frequency/transducer characteristics. - Radio waves with frequencies between 2.5 MHz and 300 MHz. - Test distribution grid.	- Detect post-tensioned cables, reinforcements, ducts (metallic, plastic, concrete), electrical cables and substructures. - Locate structures or/and voids buried underground. - Detect inclusions of metal or wood elements. - Finding out elements thicknesses, such as walls, foundations, slabs, embedded elements, etc. - Study and characterization of building materials. - Inspection, analysis and diagnosis of pathological manifestations in architectural elements. Identification of structural damage such as internal cracking, exfoliations and material deterioration. - Locate safe areas to remove samples, perform openings and install anchors. - Identification of moisture. - Checking the conditions of metallic elements such as anchors. - Corroboration of the effectiveness of injection repairs. - Assessment of slab in reinforced concrete bridges. - Detection of tree roots underground (if there is enough dielectric variation between soil and wood). - Evaluation of moisture content/level in the soil.	- In optimum conditions, the technique can detect small elements at relatively long distances and allows to find out the depth of the detected element. - It is a safe technique that does not require the installation of a security perimeter. The radiation emitted by the equipment is equivalent to the radiation emitted by a mobile phone. - Data collection is time efficient. - Results are immediate with the appropriate equipment. However, post-processing may be necessary. - Access is only required on one side of the element. - When testing bridges and roadways, it is not required to close lanes since the evaluation is performed at highway speed with the equipment mounted on a vehicle. It is the only NDE technique that does not require lane closure during data collection. - If the equipment has been prepared and calibrated, the operator does not need specific training to perform the test.	- The main disadvantage is that, if conditions are not ideal, the results may be limited. For instance, clayey soils, water-saturated or salt-polluted materials are often problematic because their high conductivity causes signal dissipation and misleading results. - Result interpretation may be subjective. - GPR does not work optimally in certain heterogeneous materials, since the numerous reflections may cause excessive noise. - Result interpretation may be complex, requiring skilled staff. For instance, a technician may detect and locate rebars in a reinforced concrete wall, but calculating their diameter can be complex, if not impossible. In elements with complex internal arrangements, it can be complicated to map out the interior. - The radar needs to be in motion to detect changes in the material, which limits the inspection of certain architectural elements. - In areas with many or very powerful electromagnetic signals, these may interfere with the test waves, resulting in the non-detection of certain elements or misleading results.	M-A	\$\$	B	N-C	S		
<b>X-RAY</b>	To obtain a radiograph of an architectural elements to visualize its interior.	The technique is based in sending electromagnetic energy, in the X-ray frequency, to the object in study. The amount of energy that passes through the object, is recorded in a plate, where the black color represents areas where the electrons passed through the body.	- Frequencies between 30 and 30,000 PHz. - Design of the security plan.	- Finding out some characteristics of the metallic elements (morphology, location, amount, etc.) found on structural timber elements, such as trusses. - Obtaining radiographs of structural elements (concrete, timber, plaster, etc.)	- Higher resolution than GPR, which reduces the interpretability factor.	- This technique uses cobalt-60, a highly radioactive isotope that that involves radiation risks; therefore a security perimeter and a safety protocol is needed. - Access is required on both sides of the architectural element. - A license is required to perform the test. - All the staff involved in the test must have specific training.	A	\$\$\$	A	S	C		

Table Conclusions 1 (2/3) Table abstract of conclusions that includes the basic characteristics of the NDE techniques discussed in this thesis.



ACOUSTIC TECHNIQUES		OBJECTIVE	PRINCIPLE	PARAMETERS	PENETRATION DEPTH	APPLICATIONS IN PRESERVATION	ADVANTAGES	LIMITATIONS	SPECIALIZATION OF TEST DIRECTOR (High: A, Medium: M, Low: B)	PRICE EQUIPMENT (\$\$\$>>\$10,000, \$\$, \$5,000-\$10,000, \$, <\$5,000)	TEST DURATION (High: A, Medium: M, Low: B)	INTERPRETATION (Complex: C, Normal: N, Simple: S)	EXECUTION (Complex: C, Normal: N, Simple: S)
ACOUSTIC TECHNIQUES	IMPACT-ECHO	To generate frequency domain spectrums, to identify patterns that allow to detect anomalies inside the material.	Study of the propagation in the material of the acoustic energy generated by a mechanical impact.	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Diameter of the steel ball.</li> <li>- Wave frequencies up to 80 KHz.</li> <li>- Number of samples that the device receives and uses for generating a trace (N).</li> <li>- Time between samples (t).</li> <li>- Test distribution grid.</li> </ul>	Approximately 2 m.	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Finding out location and extent of flaws such as cracks, voids, delaminations and exfoliations in post-tensioned and reinforced concrete, including elements such as slabs (foundations, pavements, walls), columns and beams, walls, cylinders (tunnel pipes, cisterns), bridge slabs, etc.</li> <li>- Identifying and locating cracks, voids and delaminations in architectural elements of brick, block, Stone and mortar (masonry in general).</li> <li>- Corroborating the success of grout injections in restoration interventions.</li> <li>- Calculating the thickness of architectural elements.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Access to both sides of the architectural element is not required.</li> <li>- Equipment cost is more affordable than in other NDE techniques.</li> <li>- It uses low frequencies, which allows detecting flaws that other techniques, such as UPV, do not detect.</li> <li>- It allows the inspection of heterogeneous materials that are treated as homogeneous, due to the wavelength used, as consequence of the low frequencies of the test (greater than the size of the heterogeneities).</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- In architectural elements composed of different materials, as in the case of brick walls, blocks, stone, etc., those different materials must be connected with a binder so that the different materials respond as a unit to the mechanical impact.</li> <li>- This technique is not compatible with voids, because the acoustic wave will be reflected in the air interface, precluding the study of the material behind the void.</li> <li>- Result interpretation requires experience a previous specific training.</li> <li>- The test is tedious and time consuming, therefore it is not advisable for large areas.</li> <li>- Impacts by the Steel balls may damage the Surface of the material to be tested.</li> </ul>	A	S	A	C	N
	ULTRASOUND PULSE VELOCITY	To analyze the characteristics of acoustic propagation energy in a material (wave velocity, internal reflections, etc.) to extrapolate the findings to the state, presence and extent of flaws in the material.	Studies either the reflected acoustic waves (pulse-echo, indirect measurement) or the transmitted acoustic waves (through-transmission, direct measurement), emitted by an ultrasonic transmitter.	<ul style="list-style-type: none"> <li>- UPV test frequencies usually range from 0.5 MHz to 50 MHz approximately.</li> <li>- Frequency and type (contact or electromagnetic acoustic -EMAT-) of the transducer.</li> <li>- Type of measurement: direct, semi-direct or indirect.</li> <li>- Test distribution grid.</li> <li>- Distance between transducers.</li> </ul>	With conventional equipment (used in preservation), the maximum depths are around 25 cm, but there are methods that can reach 10 m (LRUT).	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Detection and characterization of cracks, provided these are not parallel to the direction of propagation of the acoustic wave. In certain cases, the technique can detect the crack and the depth and extent of it.</li> <li>- Locating voids, if these are greater than half the wavelength. In certain cases, it is possible to find out their size.</li> <li>- Detection of poorly consolidated material and delaminations. It is possible by comparing velocities both in sound and unsound materials. For the same conditions, the higher the velocity, the sounder the material.</li> <li>- Detection of delamination.</li> <li>- Analysis of the thickness of the architectural element as a function of the time and the velocity of the acoustic wave.</li> <li>- Weld inspection: presence of pores, inclusions, reduced thickness, insufficient penetration and existence of cracks.</li> <li>- Detection and extent of corrosion.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- The test can be done by accessing only one side of the architectural element, although having access to both sides facilitates the test.</li> <li>- The depth of penetration depends, among other factors, on the resolution required. The maximum depth of penetration is around 25 cm.</li> <li>- It is an accurate technique to determine the position of the reflection and roughly estimate the size and shape of the flaw.</li> <li>- Test preparation is short.</li> <li>- Test results are immediate, although in some applications/devices, post-processing may be necessary.</li> <li>- Last generation equipment in combination with appropriate software, provides good resolution images, which facilitates result interpretation.</li> <li>- It is safe for human beings and does not affect in any harmful way the tested elements.</li> <li>- The equipment is portable and manageable, allowing test horizontal and vertical positions, including ceilings.</li> <li>- It is an appropriate method in the presence of moisture and water in the material to be analyzed.</li> <li>- It provides accurate results in homogeneous, high density materials, with smooth surfaces.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- In preservation on site applications, the most used method is by contact, so at least one surface must be accessible.</li> <li>- It is not an appropriate method in the presence of voids (unless the objective is to detect the voids).</li> <li>- The individual performing the test must have previous specific training and technical knowledge.</li> <li>- If the transducers used are contact type, it is required to use a coupling agent to transfer the acoustic energy to the material to be tested. This coupling agent stains the surface so it needs to be removed once the test is concluded, which precludes this test to be performed in surfaces that should not be stained (frescoes, tapestries, polychromed elements, certain historical porous stones, bricks, etc.)</li> <li>- Very irregular materials, or small elements are difficult if not impossible to inspect with this technique.</li> <li>- Linear flaws which direction is parallel to the direction of the propagation of the acoustic energy, may go unnoticed.</li> <li>- The equipment requires manufacturer and user calibration, and the test has to follow certain guidelines and standards to obtain accurate results.</li> <li>- The technique may detect both material characteristics and flaws, so in those materials whose intrinsic properties are similar to the flaws to be detected, too much noise may be generated, obtaining few or limited results.</li> <li>- The most homogenous the material is, the better this technique works. In the presence of mortar joints in masonry, for instance, the velocity descends when traveling through the joint.</li> </ul>	M-A	S	M	N-C	S-N

\* Not all the applications can be carried out for all cases. The applications included are feasible under ideal general circumstances.

Table Conclusions 1 (3/3) Table abstract of conclusions that includes the basic characteristics of the NDE techniques discussed in this thesis.

The following table includes the most appropriate techniques depending on the application. Bear in mind that the success of each technique greatly depends on the intrinsic characteristics of each project so there may be cases where it is not possible to apply certain technique. The table has been design for general cases with ideal conditions.

	NON-DESTRUCTIVE EVALUATION TECHNIQUE									
	Visual/optical	GPR	Ultrasound Pulse Velocity	Impact Echo	Metal detection	X-Ray	IRT	Endoscopy	TPAS	Photogrammetry
Relative cost (\$,\$,\$,\$,\$)	\$	\$\$\$	\$\$\$	\$\$\$	\$	\$\$\$	\$\$	\$\$	\$\$	\$\$
Complexity (B=low, M=medium, A=high)	M	A	A	A	B	M	M	B	M	M
<b>PARAMETER/CONDITION</b>										
Strength			P	P						
Uniformity	P	B	B	B		B	P	P	P	P
Deformability	B		P					B		
Crack location	P	P	E	E		B		P	P	P
Displacement	P			B		B		P	P	P
Rebar location		B	B		E	E	P	P		
Rebar size		B				E				
Anchor location		B	B		E	E		P		
Voids		E	P	P		E	P	P		
Rebar corrosion		P				P				
Durability/cohesion	P		B	P		P	P	P		P

Figura 5.2-2 Conclusion table 2. The table shows the suitability of each technique to determine material characteristics/conditions. E = excellent information, B = good information and P = approximate information

	SPECIALIZATION	INTERPRETATION	APPROXIMATE DAILY COST
<b>GPR</b>	M	M	\$6,500
<b>IE</b>	A	A	\$7,500
<b>UPV</b>	A	A	\$6,500
<b>IRT</b>	M	B	\$3,000
<b>Endoscopy</b>	B	B	\$2,000
<b>UAV</b>	A	B	\$10,000
<b>TPAS</b>	M	M	\$4,000
<b>Photogrammetry</b>	M	B	\$10,000
<b>X-Ray</b>	A	B	\$15,000

Figura 5.2-1 Conclusion table 3. In addition to the level of specialization and complexity of interpretation, the table includes the approximate daily price (these prices may vary significantly depending on the company, location, time of year, etc.). A = high, M = medium and B = low.

The ongoing technology improvements imply the need to check different possibilities for each project. For instance, if two months ago, there was not any available infrared camera with range options, light enough to be mounted on a UAV, two months later is possible that there are several models with different features. Progress is so intense and fast in fields such as processing and port-processing software, that each project requires a research period. The future of END is intimately related with technology development; the different methods evolve and become more powerful and effective thanks to technological improvements both in the devices and interpretation + processing software.

There are new smartphone applications that allow to measure and identify existing conditions, expanding the available resources of the NDE tool box; smartphone applications are one of the expanding industries for NDE. These applications include scanning and survey advanced vision features, capable of calculating, for instance, the slope in a roof using a gyroscope inserted in the cellphone; distance meters, levels, color spectrum analysis to match color reintegration without taking physical samples, or even metal detection that works with sensors already installed in some smartphones are some examples of where the direction technology of smartphones+NDE is taking (Gilett, 2015). Advanced vision capability is also a new digital technology that employs sensors and cameras to register the reality that the user is looking at, to generate 3D models while she/he walks. This technology in combination with element recognition technology could, for instance, identify patterns or the origin of architectural elements, comparing characteristics with databases.

Choices are many, therefore careful planning, specialization and continued education are requisites to being able to select the most appropriate for each case.

## CONCLUSIONS OF THE APPLICATION OF NDE TO A GUASTAVINO/TILED VAULT

Rafael Guastavino Moreno was a Spanish architect that emigrated to the United States with his son Rafael Guastavino Expósito in 1881. He patented a fireproof construction system based on the Catalan/timber vault and founded a construction company, the Guastavino Fireproof Construction Company (R. Guastavino Company after 1897). During the seventy three years that the company existed (1889-1962), it worked in more than 1,300 projects, part of which are today's US architectural heritage, such as Saint John the Divine, the City Hall subway stations and Saint Thomas Church in New York, the Boston Public Library, the Michigan train station in Detroit and the UC Hearst Mining Building in Berkeley, California. Unfortunately, it remains unknown the total number of projects and how many of them have already been demolished. That is the main reason why it was designed, for this thesis, an interactive tool which objective is all the projects of the company: [www.guastavinomap.org](http://www.guastavinomap.org).

Several circumstances make the Guastavinos exceptional; the fact that they were not usually the main project architect but a constructor, explains that their name is barely present in the architectural history of the building. Other factors, like

the closure of the company in the sixties, make even more difficult data gathering. The Guastavino Fireproof Construction Company had several offices that became out of business without any evidence that the documents were kept safe. GuastavinoMap was developed to find and process the information to generate a real catalogue that includes all the projects and to make it available to the public. The digital format and the interactive filtering feature allows the user to create a customized catalogue; it is a modern, dynamic, efficient and universally accessible tool.

Guastavinomap.org is an ongoing project; projects from the lists are studied, validated and included in the digital database so that they can be visualized in the website. In addition to continue with this task, the next step in the project is to develop an application for mobile devices. An additional feature that will soon be added is a new filterable variable called “Constructive characteristics” with subgroups including information such as type of brick, morphology of the curved structure, types of mortar and any other relevant information regarding to technical characteristics.

Ignorance about this construction technique and its historical value are the main cause why many Guastavino vaults have been demolished in the United States. The most common condition is the delamination of the bricks at the first layer. In the absence of research on the application of NDE in Guastavino structures, this research thesis included the construction of a vault to apply experimental NDE.

The main objective of this part of the research was to find out which methods, if any, were useful for detecting delamination of the first brick layer, with access exclusively from above. The mockup was a three-layer vault with four anomalies inserted in between the first and second layer during its construction (Figura 4.1-4). NDE was applied in two phases, being Phase I the two-layer vault before building the third layer and Phase II the three-layer vault. The techniques applied were: GPR, active and passive infrared thermography, impact-echo, UPV and hammer sounding); active infrared thermography was the most successful.

GPR detected the delamination above brick #27, which was the one with a thicker void, around 1 cm; that void is thicker than the common void due to a delamination. That is the reason why it is recommended to perform more tests, expanding the range of the investigation, in order to be able to confirm the usefulness of this technique: a larger number of samples, trying antennas with



higher resolution (higher frequency) and varying filtering options in the postprocessing. The antenna used for this research has a penetration depth of twenty cm. It would be interesting to test thicker vaults with more layers to study the relationship between effectiveness and depth. In order to calibrate the system, it is extremely useful to have access from below the vault and know its thickness. If there was no access to that information, it could be found out through impact-echo (depending on other factors such as total depth) or UPV. One of the advantages of GPR is that once the evaluation has been planned by an expert, data collection may be performed by non-specialized workforce. For this application, it is recommended to use a GPR device with odometer in addition to marker in order to register the joints in the radargram. However, postprocessing and interpretation must be performed by experts.

The most precise results detecting the four delaminations were achieved with active IRT, more precisely with the test TACV (from below-active-convection): applying a heat source that heats the vaults through convection from below while thermograms are registered from above. The most successful time range was from minute 5 and minute 15. Results were best in Phase I (two layers) than in Phase II (three layers), reason why it is recommendable to expand the research to a greater number of layers (at least 4) to study if this method is also valid for thicker vaults. One of the conclusions of this research is that the thinner the vault is, the most effective this method is. A limitation of this approach is the impossibility of controlling the heat applied by convection, forcing the need to let cool the materials in between contiguous tests, compromising time efficiency. The second limitation to consider is that it may not possible to apply thermal energy from below (in this case the temperature increase was  $9,9\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), in which case, an alternative approach could be to apply the thermal energy from above and register the thermograms from below. Varying the positions of heat source and thermo-camera is a future line of investigation. A third limitation, not as important as the previous, is that homogeneous heat distribution by convection in a real case, may be impossible to achieve; the professional performing the test should be aware of this fact to avoid misinterpretations.

Test TACT (from above-active-contact) also achieved precise results only in Phase I, between 180 and 300 seconds; from these results, this method is valid exclusively for thin vaults (in this case 4.44 cm).

Both TACV and TACT tests were performed with a fixed camera on a tripod, in order to understand the evolution of the thermograms from a research perspective. However, in real applications, is recommended to use also a movable second IR camera. The main reason is that perspective affects thermographs, especially in curved surfaces, therefore varying the position and orientation of the IR camera helps to create more precise thermograms and its interpretation.

Passive thermography didn't provide any useful result. Thermograms came out monochromatic, so that the only practical information they provide is the superficial temperature of the materials.

Impact-echo, with 11, 8 and 5 mm, proved to provide deficient results for both Phase I and Phase II; the results didn't allow to recognize a pattern to detect delamination between layers of brick. The most likely reason why tests FI P9, FI P3 D5 y FII P3 D5 didn't provide a pattern is due to the insufficient depth of the delamination (vault thickness is not enough to detect the flaw with those parameters) and the thickness of the flaw is not large enough to be detected by the wave generated with the balls used for these tests (11 and 5 mm).

However, the test FII P3 D3 (parameters: ball diameter = 3 mm, number of samples + 1.024, time between samples = 5  $\mu$ s, resolution frequency = 0,20 kHz, voltage = 2V) generated spectrums some of which seemed to be following a pattern in the presence of a delamination; nevertheless, that pattern was not accurate enough to stablish a flaw recognition protocol. Some of the spectrums in areas in good condition registered two frequency peaks, being the lower one, around 6 kHz and the higher one in the 30-kHz range; in areas with delaminations, two closer peaks were also registered, with lower values, both under 6 kHz. Based on these results, a future line of investigation would be to extend the research with the 3mm ball, raising the number of bricks tested and the number of impacts per location, in order to have more samples to corroborate whether the pattern is consistent. A parallel line of investigation would test four and five-layer vaults to study the correlation between number of layers/vault thickness and the most appropriate ball diameter. Both lines of investigation should check the combinations of software parameters: number of samples and time between samples, in order to find the most suitable combination for generating the most useful spectrums, reducing noise without losing practical information.

It should be noted that, even if future lines of investigation would succeed in establishing a recognition pattern for delaminated tiles, the technique entails limitations that make complicated, if not impossible, the onsite application. First, it is a high time consuming technique, even more if the surface to perform the test is a grooved brick. The morphology of the transducer (flat) and the size of the ball (3 mm), made necessary an average of 8 impacts for the transducer to register the acoustic wave reception. It is tedious and tiring to press the trigger and the transducer against the vault while with the other hand is manipulating the tiny steel ball to impact it next to the transducer. Brick grooves hinder both the flat connection between the transducer and the brick and the impact between the ball and the brick. This configuration requires applying more pressure to the transducer, which damages the transducer protector disk faster than usual, needing to be replaced every 80 tests, approximately. It takes around four hours to test thirty bricks, which is a progress rate to take into account when planning the evaluation. A second important limitation is the complexity of this technique in all its stages: calibration, application and interpretation of results, which requires specialized workforce during the whole process. Lastly, the impacts of the steel ball on the brick, damage the surface of the brick (chipping).

As a result of the above, according to this research, impact-echo was not useful for detecting delamination, but there are indications to believe that it may be useful for thicker vaults and thicker faults. However, even if those indications proved right, there are important limitations related to time efficiency, complexity and subjectivity of results that would relegate it to an auxiliary technique to corroborate results from other techniques.

Indirect UPV didn't prove useful for detecting delaminations from the top of the vault. Both the transmitter and receiver transducers were located at the same outer face of the vault, 5, 10, 15 and 20 cm away. During the calibration process, some of the tests were performed using the direct method, locating the transducers one on each side of the vault, resulting in clear and compelling results to detect the delaminations. In direct tests, the average velocity range in sound areas was 2.480-2.746 m/s, while the average velocity range was 460-490 m/s, which confirms the utility of the direct method for detecting delamination. However, the aim of this research was to define the effectiveness of this technique applied indirectly, having access exclusively from the top of the vault. In this case, both in Phase I and Phase II, the average velocity in sound areas was higher than the average velocity in unsound areas, however, that difference was not ample and consistent

enough to identify a reliable pattern (Phase I: 2,195 m/s versus 2,136 m/s respectively. Phase II: 2,402 m/s versus 2,256 m/s respectively). This research also shows that, in this case, a separation between transducers between 100 mm and 200 mm provides better results than separations below 100 mm. The results show an incongruity regarding the values for longitudinal and superficial velocities; during the calibration process, the calculated value for superficial velocity was 2,106 m/s, which is a slightly higher value than the average longitudinal velocity value, 2,026 m/s for Phase II. For this same phase, the longitudinal velocity with direct method was 2,746 m/s. These last two values should be closer. At the same time, velocity values vary depending on the distance between transducers, which shouldn't happen, if the rest of factors remain the same. It is possible that the material heterogeneity triggers a non-predictable wave behavior, which makes not possible to detect flaws studying wave velocity. Regardless of the results, this method has two main limitations to consider during the evaluation planning. First, the need to use a coupling agent makes the application on site tricky and dirty as the material gets stained with the gel; if it is not carefully removed, dust sticks to the stains leading to a non-desirable appearance. Brick grooves aggravate this situation, as it takes more coupling agent than a flat surface and they make more complicated to remove it. Secondly, the technique is time consuming for this application; although not as much as impact-echo, it makes it not appropriate for large surfaces. In this case, progress was around 30 tests per hour (without including gel removal).

Based upon the results obtained from the UPV tests, further investigation is recommended, trying different equipment. Ideally, a set of tests would be performed using the higher frequency transducers.

The tiled vault built for this experimental investigation is smaller in scale than a real Guastavino vault (approximately 1:4), and the materials used are a current adaptation to the original generic ones. Therefore, in order to corroborate these results, the different methods should be applied to an original existent vault.

## FINAL THOUGHTS

This thesis covers the research on the most common NDE techniques applied to architectural preservation in the United States, and their possible applications in this field. In addition to the theoretical research, different techniques have been applied on site; those cases are included both as practical examples in the



theatrical explanation, and in Chapter 3, dedicated to case studies. Lastly, an unprecedented experimental application has been carried out in the laboratory in order to evaluate the suitability of different methods to detect delamination between bricks in tiled Guastavino vaults.

**Theoretical and practical investigation of non-destructive evaluation applied to architectural heritage in the United States:** The selection, effectiveness and possible applications of the different techniques included in this research, rely on different factors. Usually the success of the evaluation is achieved with a combination of different techniques which complement each other. For instance, if the medium contains conductive materials or there is a high content of moisture, acoustic techniques are a better choice than electromagnetic techniques. Electromagnetic techniques are compatible with voids, since they allow to study the material behind the void.

Two important factors in the choice of technique/s, is material composition and size of the flaw to be detected. If the material is heterogeneous, methods that employ wavelengths smaller than the components of the material, will register the reflections on the different interfaces, which generates excessive noise (results are also affected by the dielectric constant value or the acoustic impedance value). In the same way, if the flaw size is smaller than the wavelength, the wave may not detect the flaw; for instance, frequencies lower than 80 kHz in impact-echo, are achieved with wavelengths large enough to consider homogenous and isotropic, materials such as concrete, brick masonry, etc. (the wavelength will depend on the steel ball size).

A fourth factor to consider when selecting a NDE method, is the depth of the flaw. For example, active thermography, may or may not be an appropriate technique for detecting delamination, depending on the depth of the flaw, which will also determine the position of the heat source and the choice between direct or indirect thermograms. With the impact-echo technique, no flaws are detected at a depth less than half of the wavelength.

A fifth factor to consider in the design of the evaluation planning is the access approach to the area to inspect. It is common to discard certain methods, such as those that require large instruments, because there are not logistically feasible. The recently appeared unmanned aerial systems, ease visual inspections, thermography and digital photogrammetry. Industrial rope access systems,

enable access to difficult to reach locations, fairly common in the field of architectural heritage in the United States.

In order to be aware of all these elements, the evaluator has to carry out an historic and constructive analysis of the architectural element, and careful study of the evaluation objectives and the available resources; all of the above should be previous to the NDE planning.

**NDE experimental application to a Guastavino tiled vault:** Of the four methods tested (GPR, UPV, impact-echo and thermography) to detect delamination between the first and second brick layers, with access from the top, the only effective method was active thermography, applying the heat source from below while registering the thermographs from above the vault. GPR allowed to detect one of the four flaws, therefore it was not ruled out and opens a future line of research, using higher than 2.6 GHz-frequency antennas and extending the number of samples and the number of layers. Indirect UPV succeeded in the detection of two of the four flaws, however, velocity values in certain areas didn't respond to a logical pattern, reason why it is advisable to continue the research using higher frequency transducers, increase the number of samples and the thickness of the vault (therefore, the depth of the flaws); however, the requirement to use a coupling agent and the low rate of progress make this technique inadvisable for this application. An alternative, included in the future research line, would be to use an electromagnetic electric transducer (EMAT). Finally, impact-echo spectrums didn't allow to identify any pattern to detect any of the four delaminations. Besides, it proved to be a tedious and complicated technique to apply due, among other reasons, to the grooved surface of the brick and very time inefficient. According to the theoretical concepts that explain this technique, the depth and thickness of the flaw may not be large enough to be detected with this technique; testing a thicker vault (deeper flaw) one of the future research lines.

Outside the United States architectural heritage already includes, and will incorporate more in the near future, typologies and constructive systems similar to the current American heritage. Non-destructive evaluation methods and techniques are a regular and valuable resource in US preservation field. They provide insight regarding the actual conditions of the architectural element, in order to properly plan and design its conservation and restoration removing, as

much as possible, unforeseen circumstances resulting from ignorance. In the end, a judicious use of non-destructive evaluation resources allows to know the building, and therefore, adjust the diagnosis and the intervention, avoiding unnecessary actions and reducing uncertainty and costs.

## 6. ABREVIACIONES Y ACRÓNIMOS

---

a/c: relación agua-cemento

AEC: del inglés *Architecture, Engineering and Construction*, arquitectura, ingeniería y construcción.

AI: del inglés *Artificial Intelligence*, inteligencia artificial.

ASNT: del inglés *American Society for Nondestructive Testing*, Asociación Americana de Tests No Destructivos.

ASTM: del inglés *American Society of Testing and Materials*, Asociación Americana de Tests y Materiales.

AWS: del inglés *American Welding Society*, Asociación Americana de la Soldadura.

BATs: del inglés *Block Attribute Tags*, etiquetas de bloques de atributos.

CRP: del inglés *Close Range Photography*, fotografía próxima.

DSP: del inglés *digital Signal Processing*, procesamiento digital de señales.

EMAT: del inglés *Electromagnetic Acoustic Transducers*, transductores acústicos electromagnéticos.

END: Evaluación No Destructiva.

FAA: del inglés *Federal Aerial Administration*, Administración Federal de Aviación.

FC: del inglés *Flight Controller*, controlador de vuelo.

FISP: del inglés *Facade Inspection Safety Program*, Programa de Seguridad de Inspección de Fachadas.

F/T: del inglés *Freeze-Thaw cycle*, ciclo de hielo-deshielo.

FPV: del inglés *First Person View*, visión en primera persona.

GA: del inglés *Genetic Algorithm*, algoritmo genético.

GSD: del inglés *Ground Sample Distance*, muestra de distancia en tierra.

GPR: del inglés *Ground Penetrating Radar*, georradar.



GPS: del inglés *Global Positioning System*, sistema de posicionamiento global.

HABS: del inglés *Historic American Buildings Survey*, Inspección de Edificios Americanos Históricos.

ICAO: del inglés *International Civil Aviation Organization*, Organización Internacional de Aviación Civil.

IE: Índice de rebote o Índice Esclerométrico.

IE: del inglés *Impact-Echo*, técnica del impacto-eco.

IRA: del inglés *Industrial Rope Access*, acceso por medio de sistemas industriales de cuerdas.

IRT: del inglés *Infrared Thermography*, termografía infrarroja.

LISA: del inglés *Linear Inverse Scattering Approach*, aproximación dispersión lineal inversa.

LISP: del inglés *List Processing*, código de programación.

LOS: del inglés *Line Of Sight*, línea de visión.

LRUT: del inglés *Long Range Ultrasonic Testing*, pruebas ultrasónicas de largo alcance.

MEND: Métodos de Evaluación No Destructiva.

MVS: del inglés *Multi-Viewpoint Stereo*, múltiple punto de visión y estéreo.

NHPA: del inglés *National Historic Preservation Act*, Ley Nacional para la Conservación Histórica.

NIST: del inglés *National Institute of Standards and Technology*, Instituto Nacional de Estándares y Tecnología.

NBS: del inglés *National Bureau of Standards*, Oficina Nacional de Estándares, ahora denominado *National Institute of Standards and Technology*, NIST.

NPS: del inglés *National Park Service*, Servicio Nacional de Parques.

PDA: del inglés *Personal Digital Assistant*, asistente digital personal.

PPR: del inglés *Pipe-Penetrating Radar*, radar para tuberías.

PSD: del inglés *Power Spectrum Density*, densidad espectral.

RPA: del inglés *Remotely Piloted Aircrafts*, aeronaves pilotadas de manera remota.

SI: Sistema Internacional.

TND: Técnica No Destructiva.

TTS: del inglés *self-Tracking Total Station*, estación total de auto-seguimiento.

UAS: del inglés *Unmanned Aircraft System*, sistema de aeronave sin tripulación.

UAV: del inglés *Unmanned Aerial Vehicles*, vehículos aéreos sin tripulación.

UAVS: del inglés *Unmanned Aircraft Vehicle System*, sistema de vehículo aéreo sin tripulación.

UHF: del inglés *Ultra High Frequency*, frecuencia ultra alta.

UPV: del inglés *ultrasound pulse velocity*, velocidad de onda ultrasónica.

USAF: del inglés *United States Air Force*, Fuerzas Aéreas de los Estados Unidos.

VA: Vertical Access

VHF: del inglés *Very High Frequency*, frecuencia ultra alta.

EMR: del inglés *Electromagnetic Radiation*, energía/radiación electromagnética.

3DMM: del inglés *3-Dimensional Measuring and Modeling*, modelado y medición de modelos tridimensionales.

# 7. GLOSARIO Y TABLAS DE CONVERSIÓN

---

## 7.1. GLOSARIO

**Algoritmo:** Conjunto prescrito de instrucciones definidas y finitas que permite llevar a cabo una actividad mediante pasos sucesivos que no generen dudas.

**Algoritmo genético (GA):** En el campo de la inteligencia artificial, se refiere a la búsqueda heurística que mimetiza el proceso de la selección natural. Se utiliza para generar soluciones de optimización y búsqueda semejantes a las que actúan en la evolución biológica.

**Amortiguación o atenuación:** es el decremento en el tiempo de la amplitud de una oscilación.

**Amplitud:** Es la máxima desviación de la oscilación; si esta decrece con el tiempo, la oscilación se considera amortiguada, es decir la amplitud decrece debido a la disipación de energía.

**Atenuación:** ver amortiguación

**Conductividad:** la medida de la capacidad de un material para dejar pasar la corriente eléctrica a través de él. Depende de la estructura atómica y molecular del material.

**Densidad espectral (Power Spectrum Density -PSD-):** referido a una señal es una función matemática que informa cómo está distribuida la potencia o la energía de la señal sobre las distintas frecuencias de las que está formada.

**Dispersión lineal inversa:** en matemáticas, método para resolver algunas ecuaciones diferenciales no lineales.

**Dominio frecuencia:** análisis de funciones matemáticas u ondas respecto a su frecuencia. Si el dominio frecuencia es discreto, el valor de la señal o función se conoce únicamente para algunos puntos del eje de energía o potencia.

**Dominio tiempo:** análisis de funciones matemáticas u ondas respecto al tiempo. Si el dominio tiempo es discreto, el valor de la señal o función se conoce únicamente para algunos puntos del eje temporal.

**Frecuencia:** Es la inversa del periodo.

**Frecuencia muy alta** (Very high frequency -VHF-): es la banda del espectro electromagnético que ocupa el rango de frecuencias de 30 MHz a 300 MHz.

**Frecuencia ultra alta** (Ultra high frequency -UHF-): es la banda del espectro electromagnético que ocupa el rango de frecuencias de 300 MHz a 3 GHz.

**Ground sample distance (GSD)**, muestra de distancia de tierra: en una fotografía digital, es la distancia en la realidad entre dos píxeles en la fotografía.

**Impedancia acústica:** es la resistencia que opone un medio a la propagación de las ondas acústicas. Se define como la razón entre la presión sonora y la velocidad de las partículas de un medio material. También puede calcularse como el producto entre la densidad del material y la velocidad del sonido en el material. La diferencia de impedancias acústicas en una interfase afecta el coeficiente de reflexión.

**Interfase:** superficie de separación entre dos medios con propiedades distintas.

**Límite de elasticidad (acústica):** la tensión máxima que un material elastoplástico puede soportar sin sufrir deformaciones permanentes. En general, un material sometido a tensiones inferiores a su límite de elasticidad es deformado temporalmente de acuerdo con la ley de Hooke.

**Longitud de onda:** es la distancia entre dos puntos adyacentes de condición de oscilación equivalente en una onda.

**Odómetro:** instrumento de medición que calcula la distancia total o parcial recorrida.

**Onda:** Es la propagación de una oscilación y sucede cuando las partículas de un material oscilan transmitiendo su vibración a la adyacente.

**Onda sinusoidal:** curva matemática que describe una oscilación repetitiva. Se define por su amplitud, su frecuencia, su frecuencia angular y su fase.

**Oscilación:** Es el cambio periódico de la condición o el comportamiento de un cuerpo.



**Periodo:** Tiempo necesario para llevar a cabo una oscilación.

**Procesamiento digital de señales (Digital signal processing -DSP-):** es la manipulación matemática de la información de una señal para mejorarla, en el caso del campo de la conservación arquitectónica, para hacerla más fácilmente interpretable. Se caracteriza por la representación generalmente en el dominio de tiempo o dominio frecuencia.

**Pulsación de onda electromagnética:** también denominada frecuencia angular de la onda, se refiere a la frecuencia del movimiento circular expresada en proporción del cambio de ángulo, y se define como  $2\pi$  veces la frecuencia (en Hercios -Hz-)

**Resistividad:** es la resistencia eléctrica específica de un determinado material (en ohm por metro - $\Omega\text{m}$ -), definida por la expresión  $\rho = R\left(\frac{S}{l}\right)$ , donde R es la resistencia en ohms, S, la sección transversal en  $\text{m}^2$ , y l la longitud en metros. El valor indica el comportamiento de un material frente al paso de la corriente eléctrica: a mayor valor, peor conductor será el material.

**Sistema de posicionamiento global (Global Positioning System -GPS-):** sistema que permite determinar las coordenadas de la posición de un objeto en la Tierra. Utiliza 24 satélites en órbita sobre el planeta Tierra.

**Transformada de Fourier:** (Fourier transform methods) transformación matemática empleada para transformar señales entre el dominio tiempo (espacial) y el dominio frecuencia. Es reversible.

## 7.2. TABLAS DE CONVERSIÓN DE UNIDADES<sup>1</sup>

LONGITUD					
metro m	milímetro mm	pulgada in (")	pie ft	yarda yd	milla (statute) mi
1	1000	39,3700787	3,2808399	1,0936133	0,00062137
0,001	1	0,0393701	0,0032808	0,0010936	0,0000062137
0,0254	25,4	1	0,08333	0,02777	0,000015782
0,3048	304,8	12	1	0,333	0,00018939
0,9144	914,4	36	3	1	0,00056818

SUPERFICIE					
metro cuadrado m <sup>2</sup>	Hectárea ha	pulgada cuadrada in <sup>2</sup>	pie cuadrado ft <sup>2</sup>	yarda cuadrada yd <sup>2</sup>	yarda cuadrada
1	0,0001	1550,0031	10,76391	1,19599	0,00024711
10000	1	15500031	107639,1	0,0001196	2,4710538
0,0006,4516	0,00000006451	1	0,006944	0,0007716	0,00000015942
0,09290304	0,000009290351	144	1	0,111	0,000022957
0,8361274	0,000083613	1296	9	1	0,00020661
4046,856	0,4046856	6272640	43560	4840	1

VOLUMEN					
metro cúbico m <sup>3</sup>	litro dm <sup>3</sup>	pie cúbico ft <sup>3</sup>	galón (USA) gal	galón imperial (GB) gal	barril de petróleo bbl (oil)
1	1000	35,3146667	264,17205	219,96923	6,2898108
0,001	1	0,0353147	0,2641721	0,2199692	0,0062898
0,0283168	28,3168466	1	7,4805195	6,2288349	0,1781076
0,0037854	3,7854118	0,1336806	1	0,8326741	0,0238095
0,0045461	4,5460904	0,1635437	1,20095	1	0,028594
1589873	158987295	56145833	42'	34,9723128	1

1 gal (USA) = 3,78541 dm<sup>3</sup>  
1 ft<sup>3</sup> = 0,0283 m<sup>3</sup>

ENERGÍA (CALOR Y TRABAJO)					
Kilojulio kJ	kW/hora kW h	Hourse power/hora USA 550 ft.lbf/seg hp. h	Caballo/hora 75 m.Kgf/seg CV.h	Kilocaloría (IT) Kcal (IT)	British Thermal Unit Btu (IT)
1	0,0002777	0,000372506	0,000377673	0,2388459	0,9478171
3600	1	1,3410221	1,3596216	859,84523	3412,1416
2684,5195	0,7456999	1	1,0138697	641,18648	2544,4336
2647,7955	0,7354988	0,9863201	1	632,41509	2509,6259
4,1868	0,001163	0,00155961	0,00158124	1	3,9683207
1,0550559	0,000293071	0,00039301	0,000398466	0,2519958	1

<sup>1</sup> Tablas adaptadas de R. Lamilla (Lamilla, 2016)

POTENCIA					
Kilovatio	Kilocaloría/hora	Btu (IT)/hora	Horse power (USA)	Caballo vapor métrico	Tonelada de refrigeración
kW	Kcal (IT)/h	Btu (IT)/h	hp	CV	
1	859,84523	3412,1416	1,3410221	1,3596216	0,2843494
0,001163	1	3,9683207	0,0015596	0,0015812	0,0003307
0,00029307	0,2519958	1	0,00039301	0,00039847	0,000083335
0,7456999	641,18648	2544,4336	1	1,0138697	0,2120393
0,7354988	632,41509	2509,6259	0,9863201	1	0,2091386
3,5168	3023,9037	11999,82	4,7161065	4,7815173	1
1 caballo vapor (métrico) = 75 m kgf/seg = 735,499 W					
1 Horse power (US) mecánico = 550 ft lbf/seg					

PREFIJOS DEL SISTEMA INTERNACIONAL DE UNIDADES																
Prefijo	exa	peta	tera	giga	mega	kilo	hecto	deca	deci	centi	mili	micro	nano	pico	femto	atto
Símbolo	E	P	T	G	M	k	h	da	d	c	m	μ	n	p	f	a
Factor	1e +18	1e +15	1e +12	1e +9	1e +6	1000	100	10	0,1	0,01	0,001	1e-6	1e-9	1e -12	1e -15	1e -18

TEMPERATURA
Temperatura en °C = (°F -32)/1,8
Temperatura en °F = 1,8 °C + 32
Temperatura en °K = °C + 273,14

## 8. REFERENCIAS

---

- Abad, S. (2009). *Evaluación de la técnica no destructiva del georadar para la inspección, diagnóstico y análisis resistente de la madera*. Valencia: UPV.
- Abney, W., & Festing, E. (1881). *Infrared absorption*. Estocolmo, Suecia: Phil.
- Admsgalan. (2011). *Ballon Frame*. Obtenido de admsgalan.blogspot:  
<http://admsgalan.blogspot.com/2011/05/balloon-frame-sistema-constructivo.html>
- Affinito, I., Alli, G., Catapano, I., del Moro, A., & Soldovieri, F. (2015). Forward-Looking Ground-Penetrating Radar via a Linear Inverse Scattering Approach. *Geoscience and Remote Sensing IEEE Transactions*, 53(10), 5624-5633.
- Airfly. (2016). *USA Space Map*. Obtenido de Know Before You Fly: <http://knowbeforeyoufly.org/air-space-map/>
- Albertz, J. (2001). Albrecht Meydenbauer - Pioneer of Photogrammetric Documentation of the Cultural Heritage. *Proceedings 18th International Symposium CIPA 2001*. Berlin: Technica University of Berlin, Photogrammetry and Cartography, EB 9.
- Alyssa, C. (29 de October de 2012). *It is not the camera, it's the pigeon*. Obtenido de Slate. Behold. The Photo Blog:  
[http://www.slate.com/blogs/behold/2012/10/29/julius\\_neubronner\\_and\\_the\\_amazing\\_world\\_of\\_pigeon\\_photography.html](http://www.slate.com/blogs/behold/2012/10/29/julius_neubronner_and_the_amazing_world_of_pigeon_photography.html)
- American Concrete Institute. (1994). *Guide for evaluation of Concrete Structures Prior to Rehabilitation 364.1R-94*. Michigan: Farmington Hills.
- American Industries Group. (2016). *American Industries Group*. Obtenido de American Industries:  
<http://www.americanindustriesgroup.com/re/why-mexico.html>
- American Institute of Steel Construction. (1987). *Guide to Design Criteria for Bolted and Riveted Joints*. Chicago: AISC.
- American Institute of Timber Construction. (2003). *Superior Fire Resistance*. Centennial, CO: American Institute of Timber Construction. Obtenido de <http://www.aitc-glulam.org/shopcart/Pdf/superior%20fire%20resistance.pdf>
- American Society for Testing and Materials. (2017). *Nondestructive Testing Standards*. Obtenido de ASTM International. Helping our world work better:  
<https://www.astm.org/Standards/nondestructive-testing-standards.html>



- American Society of Nondestructive Testing (ASTN). (2016). *American Society of Nondestructive Testing (ASNT)*. Recuperado el 23 de August de 2016, de American Society of Nondestructive Testing (ASNT): <https://www.asnt.org/MinorSiteSections/AboutASNT/Intro-to-NDT.aspx>
- Anderson, N., Cardimona, S., Wenzlick, J., & Willeford, B. (2000). Investigation of bridge decks utilizing ground penetrating radar. *International conference on the application of geophysical technologies to planning, design, construction and maintenance of transportation facilities*. St. Louis, USA.
- Annan, A. (1973). Radio interferometry depth sounding: Part I—Theoretical discussion. *Geophysics*, 38, 557–580.
- Annan, A. (2002). GPR-History, Trends, and Future Developments. *Subsurface Sensing Technologies and Applications*, 1(4).
- Annan, A., & Brewster, M. (1994). Ground-penetrating radar monitoring of a controlled DNAPL release: 200 MHz radar. *Geophysics*, 59, 1211–1221.
- Annan, A., & Chua, L. (1992). Ground Penetrating Radar Performance Predictions. *The Geological Survey of Canada*, 90(4), 5–13.
- Annan, A., & Davis, J. (1976). Impulse radar soundings in permafrost. *Radio Science*, 11, 383–394.
- Annan, A., Davis, J., & Gendzwill, D. (1988). Radar Sounding in Potash Mines: Saskatchewan, Canada. *Geophysics*, 53, 1556–1564.
- Annan, A., Fisher, E., & Mc. Mehan, G. (1992). Acquisition and processing of wide aperture ground penetrating radar data. *Geophysics*, 57, 495.
- APTI. (2013). *APTI.ORG*. Obtenido de WS4 Hands-on Construction of "Guastavino" Thin Tile Vaults: [http://www.apti.org/index.php?src=gendocs&ref=Workshops-NYC\\_Vaults\\_NEW&category=APT\\_2013\\_Conference\\_NEW](http://www.apti.org/index.php?src=gendocs&ref=Workshops-NYC_Vaults_NEW&category=APT_2013_Conference_NEW)
- ASNT. (2016). *Introduction to Nondestructive Testing*. Recuperado el 24 de 08 de 2016, de American Society for Nondestructive Testing: <https://www.asnt.org/MinorSiteSections/AboutASNT/Intro-to-NDT.aspx>
- Atkinson-Notland & Associates, Inc. (2017). *Atkinson-Notland & Associates, Inc.* Obtenido de <http://ana-usa.com/whoweare2.htm>
- Avdelidis, N., & Moropoulou, A. (2003). Emissivity considerations in building thermography. *Energy and Buildings*, 35, 663-667.
- Ayala-Cabrera, D., Herrera, M., Izquierdo, J., & Pérez-García, R. (2011). Location of buried plastic pipes using multi-agent support based on GPR images. *Journal of Applied Geophysics*, 75, 679-686.
- Baker, J. (1994). *American House Styles: A Concise Guide*. New York: W.W. Norton.
- Banta, J., Corbin, C., & Diebolt, K. (2004). Direct Digital Input of Facade Survey Data Using Handheld Computing Devices. *Building Facade Maintenance, Repair and Inspection ASTM STP 1444*. West Conshohocken, PA. USA: ASTM International.
- Banta, J., Diebolt, K., & Gilbert, M. (2006). The Development and Use of a Tablet PC Annotation System for Condition Surveys. *APT Bulletin*, 2-3(37), 39-45.

- Barnes, C., & Trottier, J. (2004). Effectiveness of ground penetrating radar in predicting deck repair quantities. *Infrastruct Syst*, 69–76.
- Bazant, Z., & Kaplan, M. (1996). *Concrete at High Temperatures. Material properties and mathematical models*. Concrete Design and Construction Series, Longman.
- Bell, A. (13 de April de 2016). President at GBG New York. (B. d. Miguel, Entrevistador)
- Benítez Herreros, J. (2011). *Estudio de la evolución de la velocidad de ultrasonidos en probetas de hormigón con distintos grados de humedad*. Tesis. Madrid: Universidad Politécnica de Madrid.
- Benson, R., Glaccum, R., & Noel, M. (1984). *Geophysical Techniques for Sensing Buried Wastes and Waste Migration*. US EPA Contract No. 68-03-3053. Las Vegas, Nevada.: Environmental Monitoring Systems Laboratory. Office of R&D. US EPA.
- Berry III, G., & Darling, S. (2003). *Common Clay*. Crystal Lake, IL: TCR Corporation.
- Bethell, S. (25 de September de 2015). Drone files at Westminster, first step in restoration project. *Fulton sun*.
- Binda, L. (2008). *Learning from failure - Long-term Behaviour of Heavy Masonry Structures*. Southampton: WIT Press, Ashurst Lodge.
- Birdseye, C. (1940). Stereoscopic Photopographic Mapping. *Annals of the Association of American Geographers*, 1-24.
- Birks, A., Green, R., & MacIntire, P. (1991). *Nondestructive Testing Handbook: Ultrasonic Testing*. American Society for Nondestructive Testing, American Society for Metals. .
- Bisegna, F. e. (2013). A qualitative method for combining thermal imprints to emerging weak points of ancient wall structures by passive infrared thermography. A case study. *Journal of Cultural Heritage*, <http://dx.doi.org/10.1016/j.culher.2013.03.006>.
- Bodnar, J. e. (2012). Stimulated Infrared Thermography Applied to Help Restoring Mural Paintings. *NDT&E International*, 49, 40-46.
- Boerman, S. (2011). Ten-year remote sensing industry forecast. *The American Society for Photogrammetry and Remote Sensing (ASPRS)*, 77(11).
- Boniger, U., & Tronicke, J. (2010). Improving the interpretability of 3D GPR data using target-specific attributes: application to tomb detection. *Journal of Archaeological Science*, 37, 360-367.
- Boothby, T., & Rosson, B. (1998). Preservation of Historic Thin-Shell Concrete Structures. *Journal of Architectural Engineering*, 4(1).
- Bosiljkov, V. (2010). An Integrated Diagnostic Approach for the Assessment of Historic Masonry Structures. *Journal of Cultural Heritage*, 238-249.
- Bosiljkov, V., & Zarnic, R. (2008). Low vs. high tech diagnosis techniques for the assessment of masonry structures. *HMC 08 1st Historical Mortars Conference*. Lisbon.
- Bouzerdoun, A., Shao, W., & Phung, S. (2013). Sparse representation of GPR Traces with application to signal classification. *IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing*, 51(7).

- Bransby-Zachary, C. (2015). *Non Destructives Evaluations*. Obtenido de E2chem:  
<http://www.e2chem.com/index.php/non-destructive-evaluations-nde>
- Brennan, E., & Hough, I. (2008). Architectural Documentation and Preservation of Havasupai and Navajo Wooden Pole Structures in Grand Canyon National Park. En *Reflections of Grand Canyon Historians: Ideas, Arguments and First Person Accounts* (págs. 81-88). Grand Canyon Association.
- Brown, J. (2005). Duane C. Brown Memorial Address. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 71(6), 677-681.
- Bucur, V. (2006). *Acoustics of Wood*. Nueva York: SpringerVerlag.
- Butnor, J., Doolittle, J., Johnsen, K., Samuelson, L., Stokes, T., & Kress, L. (2003). Utility of ground-penetrating radar as a root biomass survey tool in forest systems. *Soil Science Society of America Journal*, 67(5), 1607-1615.
- Camp, G., & et Al. (2013). Large structures: which solutions for health monitoring. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. XXIV ICIPA Symposium, XL-5/W2*.
- Carcione, J. (1996). Ground-penetrating radar: Wave theory and numerical simulation in lossy anisotropic media. *Geophysics*, 61(6), 1664-1667.
- Carino, N., & Sansalone, M. (April de 1988). Impact Echo Method. *Concrete International*.
- Carlin, B. (1949). *Ultrasonics*. Boston: McGraw-Hill Book Company.
- Carson, J. (2015). Unmanned Aerial Vehicles in the Roofing Industry. *Interface*, 13-18.
- Caselles, O., & et Al. (2010). GPR resolution in Cultural Heritage applications. *International Conference on Ground Penetrating Radar* (págs. 389-393). Lecce, Italy: IEEE.
- Castele, D. (2013). *Unveiling Ancestral Iconography: An Analysis of 13th C AD Earthen Finishes Through Infrared Thermography at Fire Temple, Mesa Verde National Park*. Philadelphia: University of Pennsylvania.
- Cecire, A. (2002). *Nondestructive Evaluation of Historic Structures*. Medford: Tufts University.
- Center for Photogrammetric Training. (2008). History of Photogrammetry. En *History of Photogrammetry*. Obtenido de  
<https://spatial.curtin.edu.au/local/docs/HistoryOfPhotogrammetry.pdf>
- Chen, R., & Scheff, J. (2000). Bridge deck inspection using chain drag and ground penetrating radar. En F. Ansari, *Condition monitoring of materials and structures*. American Society of Civil Engineers.
- Claria, J., Molina, R., & Rinaldi, V. (2008). Procesamiento de Imágenes de Geo-Radar Obtenidas en Escenarios con Múltiples Reflectantes Superficiales. *Procedimientos del IX Congreso Argentino de Mecánica de Suelos e Ingeniería Geotécnica*. La Plata, Argentina: CAMSIG.
- Cole, S. (2014). *Infrared Thermography as an Alternative Method for the Assessment of Moisture Content Readings in a Porous Brick*. Philadelphia, PA.: University of Pennsylvania.

- Collier, O. (2002). The Impact on Topographic Mapping of Developments in Land and Air Survey: 1900-1939. *Cartography and Geographic Information Science*, 155-174.
- Conyers, L. (2004). *Ground-penetrating radar for archaeology*. (L. Conyers, Ed.) Walnut Creek (CA), USA: Alta Mira Press.
- Coon, J., Fowler, J., & Schafers, C. (1981). Experimental uses of short pulse radar in coal seams. *Geophysics*, 46(8), 1163–1168.
- Cragoe, C. (2008). *How to Read Buildings: A Crash Course in Architectural Styles*. New York: Rizzoli International Publications.
- Csaper, D., & Kung, K. (1996). Simulation of ground-penetrating radar waves in a 2D soil model. *Geophysics*, 61(4), 1034-1049.
- Cui, Y., Wang, L., & Xiao, J. (2010). Automatic feature recognition for GPR image processing. *World Academy of Science, Engineering and Technology*, 61, 176-179.
- Cultural Heritage Imaging. (2015). *Photogrammetry*. Obtenido de chi: <http://culturalheritageimaging.org/Technologies/Photogrammetry/>
- Cusidó, J., Devant, M., & Riba, J. (1996). Thermography and spectroradiometry applications in the study of the deterioration of our national architectural heritage. *Informes de la Construcción*, 48(443), 16-25.
- Daniels, D. (2004). Ground Penetrating Radar. En *IEE Radar, Sonar, Navigation and Avionics Series* (Second ed.). Peter Peregrinus Ltd.
- Davis, J., Annan, A., Black, G., & Leggatt, C. (1985). Geological sounding with low frequency radar. *55th Annual International Meeting of the Society of Exploration Geophysics*. Washington, D.C.
- de Miguel Alcalá, B. (Abril de 2014). : Bóvedas Españolas en la Edad de Oro de los Estados Unidos. *Revista Carta de España*, 703, págs. 22-24.
- de Miguel Alcalá, B., & Pardo Redondo, G. (2015). Non-Destructive Techniques in the Conservation Field in the USA, ISSN 1136-758-X. *Loggia*, 28, 118-129.
- de Miguel Alcalá, B., & Pardo Redondo, G. (2015). People's Perception of the Tower Building – New York. *Proceedings of the 5th International Congress on Construction History*. Chicago (USA): CHSA.
- de Miguel Alcalá, B., Pardo Redondo, G., & Diebolt, K. (2014). Guastavino Vaulting Adaptation of Spanish Vernacular Architecture. *International Conference on Vernacular Heritage, Sustainability and Earthen Architecture: VerSus 2014 | 2nd MEDITERRA | 2nd ResTAPIA*. Valencia.
- Di Capua, & et Al. (2008). GPR survey to study the restoration of a Roman monument. *Journal of Cultural Heritage*, 9, 89-96.
- Di Donato, L. e. (2009). An application of digital infrared thermography on historical cultural heritage damaged in the l'alquila earthquake. *4th International Congress on Science and Technology*. El Cairo.

- Diamanti, N., & Redman, R. (2012). Field observations and numerical models of GPR response from vertical pavement cracks. *Journal of Applied Geophysics*, 81, 106–116.
- Dolphin, L. (December de 1978). Radar Probing of Victorio Peak, New Mexico. *Geophysics*, 43(7), 1441–1448.
- Doolittle, J., & Asmussen, L. (1992). Ten years of applications of ground penetrating radar by United States Department of Agriculture. *Proceedings of the Fourth International Conference on Ground Penetrating Radar, Geological Survey of Finland*, 16, págs. 139–147. Rovaniemi, Finland.
- Doyle, F. (1964). The Historical Development of Analytical Photogrammetry. *Photogrammetric Engineering*, 259-265.
- Duffy, K. (15 de Marzo de 2015). *Sullivan Engineering LLC*. Obtenido de History of Local Law 11/98: <http://www.sullivanengineeringllc.com/newsletters/history-of-local-law-1198>
- Embury II, A. (1917). *Asher Benjamin*. (A. Embury 11, Ed.) New York, NY, USA: The Architectural Book Publishing Company. Obtenido de <https://archive.org/details/reprintofcountry00benj>
- Endora, P. (Productor), & Vizcarra, E. (Dirección). (2015). *El Arquitecto de Nueva York* [Película]. España-Estados Unidos. Obtenido de <http://www.rtve.es/alicarta/videos/imprescindibles/imprescindibles-arquitecto-nueva-york-rafael-guastavino/3571098/>
- Engineering Tool Box*. (2016). Recuperado el April de 2016, de [http://www.engineeringtoolbox.com/emissivity-coefficients-d\\_447.html](http://www.engineeringtoolbox.com/emissivity-coefficients-d_447.html)
- Ennis, M., & Silman, R. (1993). *Non-destructive evaluation to document historic structures*. New York: IABSE reports.
- Ercolani, G., Ortega, N., & Señas, L. (2007). Empleo de Ultrasonidos y Esclerometría en el diagnóstico de estructuras de hormigón afectadas por elevadas temperaturas. *IV Conferencia Panamericana de END*. Buenos Aires: AAENDE.
- Federal Aviation Administration. (2016). *BE4UFLY*. Obtenido de Federal Aviation Administration: [https://www.faa.gov/uas/where\\_to\\_fly/b4ufly/](https://www.faa.gov/uas/where_to_fly/b4ufly/)
- Federal Aviation Administration. (12 de 2016). *No Drone Zone*. Obtenido de Federal Aviation Administration: [https://www.faa.gov/uas/where\\_to\\_fly/no\\_drone\\_zone/media/2015-FAA-193\\_UAS\\_Toolkit\\_sd02.pdf](https://www.faa.gov/uas/where_to_fly/no_drone_zone/media/2015-FAA-193_UAS_Toolkit_sd02.pdf)
- Fernandes, F., Lourenço, P., Ortega, J., & Vasconcelos, G. (2015). *Relatório de Inspeção e Diagnóstico no Convento de S. Francisco, Braga*. Minho: Universidade do Minho.
- Finzi, E., Francese, R., & Morelli, G. (2009). 3–D high–resolution multi–channel radar investigation of a Roman village in Northern Italy. *Journal of Applied Geophysics*, 67(1), 41–51.
- Flink, L. (6 de Noviembre de 2013). World War One: The Birth of Submarine Warfare. *DailyKos*. Obtenido de <http://www.dailykos.com/stories/2013/11/6/1253332/-World-War-One-The-Birth-of-Submarine-Warfare>
- Fluke*. (s.f.). Recuperado el 05 de 2016, de <http://en-us.fluke.com/products/contests-and-promotions/thank-you-ti-5-reasons.html>



- Fortea Luna, M., & López Bernal, V. (1998). *Bóvedas extremeñas: Proceso constructivo y análisis estructural de bóvedas de arista*. . Badajoz: Colegio Oficial de Arquitectos de Extremadura, Delegación de Badajoz.
- Foster, N. (14 de May de 2014). *From Guastavino to the moon*. (N. Foster, Intérprete) AIA New York, Nueva York, Estados Unidos.
- Fowler, O. (1853). *The Octagon House: A Home for All*. Mineola, New York: Dover Publications, Inc.
- Francke, J. (2010). Applications of GPR in mineral resource evaluations. *13th International Conference Ground Penetrating Radar*, (págs. 1-5). Lecce, Italy.
- Franklin , Q., Steele, P., & Shmulsky, R. (1994). Locating Knots in Wood with an Infrared Detector System. *Forest Products Journal*, 48(10), 80-84.
- French Army Kite Aerial Photography Unit. WWI (1917)*. [Película]. Obtenido de <https://www.youtube.com/watch?v=O5dJ9Twalt4&feature=youtu.be>
- Friedman, D. (1995). *Historical Buildings Construction: Design, Materials & Technology*. New York: W.W. Norton.
- Friedman, D. (2000). *The Investigacion of buildings: A Guide for Architects, Engineers and Owners*. New York: Norton Professional Books.
- Friedman, D., & Pardo, G. (2017). Preservation Engineering. *Loggia*.
- Fryer, W. (1887). Laws relating to buildings in the city of New York. En *The Record and Guide* (pág. 447). New York.
- Garza Sáenz, A. (2012). *Estimación del Amortiguamiento del Fémur Proximal por Medios Ópticos*. Morelos, México: Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico.
- Gaudette, P., & Slaton, D. (2007). *Preservation of Historic Concrete*. Chicago, Illinois: National Park Service U.S. Department of the Interior.
- Gaussorgues, G. (1989). *La Thermographie Infrarouge (3 ed.)*. Paris: Technique et Documentation.
- GB Geotechnics. (2015). *GB Geotechnics Ultrasound*. Recuperado el June de 2016, de GB Geotechnics: <http://www.gbg.co.uk/?page=strupv>
- GB Geotechnics USA, Inc. (2004). *GB Geotechnics USA, Inc*. Obtenido de GBG: [http://www.gbg-us.com/#!\\_\\_home](http://www.gbg-us.com/#!__home)
- Ghasemi, F., & Abrishamian, M. (2007). A novel method for FDTD numerical GPR imaging of arbitrary shapes based on Fourier transform. *NDT & E International*, 40, 140-146.
- Giaccio, G., Tobes, J., Torrijos, M., & Zerbino, R. (2005). Comportamiento Mecánico de Hormigones Dañados por Temperatura. *Proceeding VIII Congreso Latinoamericano de Patología de la Construcción CONPAT* (págs. 17-24). CONPAT.
- Gilberg, M., Riegel, C., & Leonard, J. (2003). Detecting subterranean termite activity with Infrared thermography: A case study. *Association of Preservation Technology International*, 34(2/3).
- Gilett, J. (2015). Advancing Technology for Roof and Buidling Measurement. *Interface*, 8-10.
- Giordano, R. (2012). *The Architectural Ideology of Thomas Jefferson*. New York: McFarland.

- Goldberger, P. (1985). *The Skyscraper*. New York: Alfred A. Knopf.
- Goodman, D. (1994). Ground-penetrating radar simulation in engineering and archaeology. *Geophysics*, 59, 224-232.
- Goodman, D., & Nishimura, Y. (1993). Ground radar view of Japanese burial mounds. *Antiquity* 67, 255, 349–354.
- Goudrea, G., & Hallquist, J. (1982). Recent Developments in Large-Scale Finite Element Lagrangian Hydrocode Technology. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 33, 725-757.
- Gowda, H. (2014). *Introduction to Ultrasonic Testing*. LinkedIn.
- Grasmueck, M. (1996). 3-D ground-penetrating radar applied to fracture imaging in Gneiss. *Geophysics*, 61, 1050–1064.
- Gray, C. (14 de Abril de 2014). A Law and the Face of the City. *The New York Times*, pág. RE8. Obtenido de [https://www.nytimes.com/2014/04/27/realestate/a-law-and-the-face-of-the-city.html?\\_r=0](https://www.nytimes.com/2014/04/27/realestate/a-law-and-the-face-of-the-city.html?_r=0)
- Greaves, R., Lesmes, D., Lee, J., & Toksoz, M. (May-June de 1996). Velocity variation and water content estimated from multi-offset, ground penetrating radar. *Geophysics*, 61(3), 683–695.
- Green, A., & Lehmann, F. (1999). *Semiautomated Georadar Data Acquisition in Three-Dimensions*.
- Grinzato, E., Vavilov, V., & Kauppinen, T. (1998). Quantitative infrared thermography in buildings. *Energy and Buildings*, 29, 1-9.
- Gruner, H. (1971). Reinhard Hegershoff. *Photogrammetric Engineering*, 939-947.
- Gruner, H. (1977). Photogrammetry: 1776-1976. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 569-574.
- GSA. (2016). *GSA Find A Building*. Obtenido de GSA: <http://www.gsa.gov/portal/ext/html/site/hb/category/25431/actionParameter/exploreByBuilding/buildingId/1225>
- GSSI. (2016). *Our Past, Present and Future: GPR Antennas*. Obtenido de GSSI: <http://www.geophysical.com/antennas>
- Guastavino Moreno, R. (1890). Cohesive construction. Applications, industrial sections. *The American Architect and Building News*, 123–129.
- Guastavino Moreno, R. (1892). *Essay on the theory and history of cohesive construction, applied especially to the timber vault*. Boston: Ticknor and Co.
- Hagrey, S. (2007). Geophysical imaging of root-zone, trunk, and moisture heterogeneity. *Journal of Experimental Botany*, 58(4), 839-854.
- Halsey, E. (13 de 08 de 2013). *Rope Access International*. Obtenido de Rope Access Vs Scaffolding: <http://ropeaccessinternational.blogspot.com/>
- Harrimen, L. (2014). Moisture Investigations Using Thermal Cameras.” Seeing (Infra)Red in Building Enclosures. *Journal of the National Institute of Building Sciences*, 2, 12-14.

- Harris, S. (2001). *Building Pathology: Deterioration, Diagnostics, and Intervention*. John Wiley & Sons.
- Hauck, G. (1883). Neue Constructionen der Perspective und Photogrametrie. *Journal für reine und angewandte Mathematik*(95).
- Hodson, H. (2014). Air-chaeological drones search for ancient treasures. *New Scientist Live*(2988).
- Hoffman, M., & Puchalski, W. (2004). The Impact of a Technology on Society: From 1865 - 1960. Obtenido de <http://www.autotechl.com/ReadingsForEssays/TecnoPaper.pdf>
- Holser, W., Brown, R., & Roberts, F. (1972). Radar logging of a salt dome. *Geophysics*, 37, 889–906.
- Holst, G. (2000). *Common Sense Approach to Thermal Imaging*. Winter Park, FL: JCD Publishing.
- Holt, F., & Eckrose, R. (1989). The application of GPR and Infrared Thermography. ASTM STP 1026. *American Society of Testing Materials*. , 105-115.
- Huerta, S. (2001). *Las bóvedas de Guastavino en América. Madrid*. Madrid: Instituto Juan de Herrera, CEHOPU, COAC, UPV, Avery Library.
- Huerta, S. (2004). *Construcción de bóvedas tabicadas, Madrid*. Madrid: Instituto Juan de Herrera.
- Hugenschmidt, J., & Loser, R. (2008). Detection of chlorides and moisture in concrete with ground penetrating radar. *Materials and Structures*, 41, 785-792.
- Hugenschmidt, J., & Mastrangelo, R. (2007). The inspection of large retaining walls using GPR. *Proceedings of the fourth international workshop on advanced ground penetrating radar 27–29 June 2007*, (págs. 267–271). Naples, Italy.
- Hugenschmidt, J., Kalogeropoulos, A., Prisco, G., & Soldovieri, F. (2010). Processing strategies for high-resolution GPR concrete inspections. *NDT&E International*, 43, 334-342.
- Hugenschmidt, J., Prisco, G., & Soldovieri, F. (2009). Microwave tomography for GPR diagnostics of reinforced concrete. *Proceedings of the European microwave week 2009, September 28–October 2*. Rome, Italy.
- Hum-Hartley, S. (1978). Nondestructive testing for heritage structures. *APT Bulletin*, 10(3), 4-20.
- Humphrey, D. (Spring de 2016). Getting Started with UAS. *esri.com*, 30-32.
- Ialand, J. (2010-2016). *Sonar and underwater acoustics*. Obtenido de Traktoria.org: [http://traktoria.org/files/sonar/passive\\_materials/acoustic\\_impedace\\_of\\_some\\_solids.htm](http://traktoria.org/files/sonar/passive_materials/acoustic_impedace_of_some_solids.htm)
- Ibarra, B. (2016). Are we doing better than our ancestors? The conundrum of digital technologies in the conservation of cultural heritage. *Preserving heritage with tomorrow's technologies. APTI 2016 San Antonio*. San Antonio, TX: APTI.
- Igel, I. (2013). Hands-on Activity: Measuring Distnace with Sound Waves. New York: Polytechnic Institute of New York University.
- InspectAPedia. (2017). *Building Framing Methods - A Guide to estimating building age*. Obtenido de InspectAPedia. Free encyclopedia of building & environmental inspection, testing, diagnosis, repair: [http://inspectapedia.com/structure/Age\\_of\\_Framing\\_Methods.php](http://inspectapedia.com/structure/Age_of_Framing_Methods.php)

- IRATA. (2014). *WASA Report IRATA Work and Safety Analysis 2014*. UK: IRATA. Obtenido de <http://www.irata.org/pdf%20downloads/IRATA%20Work%20and%20Safety%20Analysis%202014.pdf>
- Jacob, J. (1996). *GMAA, V-12, report JHD to GMA, 3/21/96 and GEGR #460*. New York.
- Jol , H. (2008). *Ground penetrating radar theory and applications*. Amsterdam, The Netherlands.: Elsevier.
- Jol, H. (1996). Digital ground penetrating radar (GPR): a new geophysical tool for coastal barrier research (examples from the Atlantic, Gulf and Pacific Coasts, U.S.A.). *Coastal Research, Fall*.
- Jones, B. (1912). *Cassell's Cyclopaedia of Photography*. New York: Cassell and Company, LTD.
- Kaplan, H. (2007). *Practical Applications of Infrared Thermal Sensing and Imaging Equipment* . Washington : Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers.
- Kaufman, M. (1969). *Father of Skyscrapers: A Biography of Louis Sullivan*. Boston: Little, Brown and Company.
- Kite Aerial Photography*. (24 de September de 2010). Obtenido de WOKOPI: <http://www.wokopi.com/decouverte/aerialpicture.html>
- Klein, M., & Fogle, D. (1986). *Clues to American Architecture*. Nueva York: Starrhill Press.
- Konecny, G. (1985). The International Society for Photogrammetry and Remote Sensing - 75 Years Old or 75 Years Young. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, (págs. 919-933).
- Lamilla, R. (2016). *Slide Share*. Obtenido de Tablas de Conversión de Unidades: <https://www.slideshare.net/RobertoLamilla/tabla-de-unidadesfisicas-53708401>
- Lampe, B., & Holliger, K. (2000). Finite-difference modelling of ground-penetrating radar antenna radiation. *Proceedings of the 8th International Conference on Ground Penetrating Radar*, (pág. 556 bis 560). Gold Coast, Australia.
- Langenberg, K., Marklein, R., & Mayer, K. (2006). Nondestructive testing of concrete with electromagnetic and elastic waves; modeling and imaging. *Cement & Concrete Composites*, 28, 370–383.
- Laussedat, C. (1891). Notice sur l'histoire des applications de la perspective a la Topographie et a la Cartographie. En Zannier, *Storia e tecnica della fotografia* (págs. 99-100). Roma: Laterza.
- Lenox. (2016). *History of Lenox Instrument Company*. Obtenido de Lenoxinst: [http://www.lenoxinst.com/About\\_History\\_4\\_Borescopes.html](http://www.lenoxinst.com/About_History_4_Borescopes.html)
- Library of Congress. (2016). *Historic American Buildings Survey/Historic American Engineering Record/Historic American Landscapes Survey*. Obtenido de Library of Congress: <http://www.loc.gov/pictures/collection/hh/>
- Ling, Y., Tian, M., & Wu, J. (2009). Feature extraction and recognition of landmine. En Y. Zhang (Ed.), *5th International Conference on Wireless Communications, Networking and Mobile Computing*, (págs. 1-4). Beijing, China.
- Liu, B. (06 de 11 de 2016). *PLUTO data*. Obtenido de Pure Information LLC: <http://pureinformation.net/building-age-nyc/#14/40.6817/-73.9707>

- Liu, C., & Shen, L. (1991). Numerical simulation of subsurface radar for detecting buried pipes. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 29(5), 795-798.
- Liu, L., & et. Al. (2013). An automatic recognition algorithm for GPR images of RC structure voids. *Journal of Applied Geophysics*, 99, 125-134.
- Lombillo, I., Villegas, L., & Al., e. (2007). Evaluación no destructiva del patrimonio construido. *Congresso Construção 2007*, (págs. 8-15). Coimbra, Portugal.
- Loren, M. (2009). *Texturas y Pliegues de una Nación*. Valencia: General de Ediciones de Arquitectura.
- Matthews, N. (2008). *Aerial and Close-Range Photogrammetric Technology: Providing Resource Documentation, Interpretation, and Preservation*. Denver, Colorado: Bureau of Land Management National Operators Center .
- Matzkanin, G. (2006). Selecting a Nondestructive Testing Method: Visual Inspection. *Ammitiac Quarterly*, 7-10. Obtenido de <https://app.aws.org/itrends/2007/04/it200704/it0407-15.pdf>
- Mc. Mechan, G. (1995). Ray-based synthesis of bistatic ground-penetrating radar profiles. *Geophysics*, 60, 87-96.
- McMechan, G., & Xu, T. (1997). GPR attenuation and its numerical simulation in 2.5 dimensions. *Geophysics*, 62(2), 403-414.
- Meinlschmidt, P. (2005). Thermographic Detection of Defects in Wood and Wood-Based Materials. *14th International Symposium of nondestructive testing of wood*. Hannover , Germany.
- Meyer, R. (1987). 100 Years of Architectural Photogrammetry. *Akademische Verlagsgesellschaft*, 183-200.
- MIDIT Inc. (2003-2016). *Pipe Cameras*. Obtenido de MIDIT Inc.: <http://www.meditinc.com/industrial/pipe-inspection.html>
- Mileto, C., & Vegas López-Manzanares, F. (2007). Rafael Guastavino: una historia de la arquitectura entre bambalinas. *Loggia. Arquitectura & Restauración*, 20, 24-27.
- Mileto, C., & Vegas López-Manzanares, F. (2011). Necesario, útil o conveniente: difusión de la investigación en la restauración arquitectónica. *IV Jornadas Internacionales sobre Investigación en Arquitectura y Urbanismo* (págs. 1-11). Valencia, España: Universitat Politècnica de València.
- Mileto, C., & Vegas López-Manzanares, F. (2015). Conservation of earthen architecture in the United States of America: some case studies” en. *Earthen Architecture: Past, Present and Future. VerSus2014/2nd Mediterra/2nd ResTAPIA. International Conference on Vernacular Heritage, Sustainability and Earthen Architecture* (págs. 269-275). Reino Unido: CRC Press Balkema – Taylor&Francis.
- Mileto, C., & Vegas Lopez-Manzanares, F. (2016). Preserving Heritage With Tomorrow's Technologies: Trials, Errors, and Criteria for Choosing Future Technologies. *APTi 2016. Preserving Heritage with Tomorrow's Technologies*. San Antonio, TX, USA: APTi.
- Mileto, C., & Vegas, F. (2012). Guastavino in India. *Construction History Society of America, 3rd Biennial Meeting. Guastavino Vaulting: Past, Present, and Future*. Boston: MIT (Massachusetts Institute of Technology). Obtenido de



- <http://web.mit.edu/cron/Backup/project/guastavino/www/VegasMiletoGUASTAVINOININDIA.pdf>
- Miller, B. (1977). The feasibility of Using Thermography to Detect Subsurface Voids in Painted Wooden Panels. *Journal of the American Institute for Conservation*, 16, 2.
- Monteagudo V., S. (2010). *Análisis estructural de muros de fábrica mediante ensayos no destructivos*. Madrid: Universidad Politécnica de Madrid. Escuela técnica superior de ingenieros de caminos, canales y puertos. .
- Morey, R. (1974). Continuous subsurface profiling by impulse radar” Proceedings of Engineering Foundations Conference on Subsurface Exploration for Underground Excavations and Heavy Construction. (págs. 213–232). Henniker, N. H.
- Moropoulou, A., & et Al. (2013). Non-destructive techniques as a tool for the protection of built cultural heritage. *Construction and Building Materials*, 48, 1226.
- Moyer, C. (5 de Noviembre de 2015). Drones Used To Inspect Laura Street Trio. *WJCT*.
- National Park Service. (2016). *National historic Preservation Act*. Obtenido de National Park Service: <https://www.nps.gov/subjects/historicpreservation/national-historic-preservation-act.htm>
- National Science Foundation. (2014). *NDT Resource Center: Ultrasound*. Recuperado el 05 de 2016, de NDT Resource Center: <https://www.nde-ed.org/EducationResources/CommunityCollege/Ultrasonics/EquipmentTrans/DataPres.htm>
- NDT Education Resource Center. (2001-2014). *NDT Resource Center*. (The Collaboration for NDT Education, Iowa State University, [www.ndt-ed.org](http://www.ndt-ed.org).) Recuperado el 2016, de NDT Resource Center: <https://www.nde-ed.org/EducationResources/CommunityCollege/Ultrasonics/Introduction/description.htm>
- Neville, A. (1995). *1995 Properties of concrete*. (4th, Ed.) Essex, UK: Longman.
- NYC Landmarks Preservation Commission. (2016). *Discover NYC Landmarks*. Obtenido de NYC Landmarks Preservation Commission: <http://nyclpc.maps.arcgis.com/apps/webappviewer/index.html?id=93a88691cace4067828b1eede432022b>
- Ochsendorf, J. (2010 ). *Guastavino Vaulting. The Art of Structural Tile*. New York: Princeton.
- Ochsendorf, J. (2010). *Guastavino Vaulting; The Art of Strocutral Tile*. New York: Princeton Architectural Press.
- Ochsendorf, J. (2013). *Guastavino Vaulting: The Art of Structural Tile*. New York: Princeton Architectural Material.
- O'Connor, J., & Robertson, E. (2002). Light through the ages: Ancient Greece to Maxwell. *University of St. Andrews School of History*.
- Olhoft, G. (1975). *The electrical properties of permafrost, Ph.D. Thesis*. Toronto: University of Toronto.
- Olhoft, G. (1987). Electrical properties from 10–3 to 10+9 Hz—physics and chemistry. *Proceedings of the 2nd International Symposium on the Physics and Chemistry of Porous Media*. 154, págs. 281–298. American Institute of Physics Conference Proceedings.

- Olson, K., & Streeter, K. (Summer de 2016). 3D Models take off with Drone Technology. *Swrionline*(38).
- Olsson, O., Falk, L., Forslund, O., & Sandberg, E. (1987). *Crosshole Investigations—Results from Borehole Radar Investigations. Stripa Project TR 87-11*. Stockholm, Sweden.: SKB.
- Olympus. (2016). *Olympus*. Obtenido de Ultrasonic Testing: <http://www.olympus-ims.com/en/knowledge/ultrasound/applications/ultrasonic-faq/>
- Olympus. (2016). *Olympus NDT Instruments: Contact*. Recuperado el 2016, de Olympus, Your vision, our future.: <http://www.olympus-ims.com/en/ultrasonic-transducers/contact-transducers/>
- Paoletti, D. e. (2013). Preventive thermographic diagnosis of historical buildings for consolidation. *Journal of Cultural Heritage*, 14, 116-121.
- Parks, J. (1999). Documenting the work of the R. Guastavino Company: Sources and suggestions. *APT Bulletin*, 30(4), 21–25.
- Parks, J., & Alan, G. (1996). *The Old world builds the New. The Guastavino Company and the technology of the catalan vault, 1885-1962*. . New York: Avery Architectural Library and the Miriam and Ira D. Wallach Art Gallery, Columbia University.
- Parks, J., & Allan, G. (1996). *The Old world builds the New. The Guastavino Company and the technology of the catalan vault, 1885-1962*. New York: Avery Architectural Library and the Miriam and Ira D. Wallach Art Gallery, Columbia University.
- Pasolli, E., Melgani, F., & Donelli, M. (2009). A pattern recognition system for extracting buried object characteristics in GPR images. *Proc. of International Geoscience and Remote Sensing Symposium, IV-430-IV-433*, págs. 430-433. Cape Town, South Africa.
- Pasolli, E., Melgani, F., & Donelli, M. (2009). Automatic analysis of GPR images: a pattern recognition approach. *Geoscience and Remote Sensing*, 47(7), 2206–2217.
- Pellicer Llopis, V. (2012). *Ensayos no destructivos en hormigón. Geo radar y ultrasonidos*. Valencia: UPV.
- Peterson, C. (1976). *Building Early America*. Philadelphia: Carpenter's Company .
- Phelan, M. (1993). A Synopsis of the Laws Protecting Our Cultural Heritage. *New England Law Review*, 63, 67-68.
- Public Domain for Pictures*. (s.f.). Recuperado el April de 2016, de <http://pd4pictures.com/pages/w/william-herschel-infrared/>
- Queen, A. (1975). Proffessor Earl Church. *Photogrammetric Engineering*, 595-601.
- Quigley, P. (2015). Launching Drones. *ASM Standarization News*, 13-17.
- Quill, S. (2003). *Ruskin's Venice. The stones revised*. Burglington: Lund Humphries.
- Reynolds, J. (1996). *An Introduction to Applied and Environmental Geophysics*. New York, USA: Wiley.
- Rhiel, T., & Pope-Sussman, R. (2014). *Block by Block, Brooklyn's Past and Present*. Obtenido de BKLYNR: <http://bklynr.com/block-by-block-brooklyns-past-and-present/>

- Rimoldi, C., & Mundo, L. (2012). *Ensayo no destructivo por medio de ultrasonido*. La Plata, Argentina: U.N.L.P.
- Rinaldi, V. (2002). Límites y Potenciales Aplicaciones Del Georradar (GPR). En *Limos Lessicos Colapsables. XXI Reunión Científica de la Asociación Argentina de Geofísicos y Geodestas*. Rosario.
- Roberts, G. (2002). *Use of ground penetrating radar to delineate bridge deck repair areas. Report Nr. FHWA-NH-RD-12323S*. Concord, NH, USA.: New Hampshire Department of Transportation.
- Rodríguez Abad, I. (2009). *Tesis doctoral Evaluación de la técnica no destructiva del georadar para la inspección, diagnóstico y análisis resistente de la madera*. Valencia: UPV (unpublished).
- Rosenbloom, S. (06 de 09 de 2015). Invasion of the Vacation Snatchers. *The New York Times*, pág. TR1. Obtenido de [http://www.nytimes.com/2015/09/06/travel/selfie-camera-drones.html?\\_r=0](http://www.nytimes.com/2015/09/06/travel/selfie-camera-drones.html?_r=0)
- Rosina, E., & Spodek, J. (2003). Using Infrared Thermography to detect moisture in historic masonry: A case study in Indiana. *APT Bulletin*, 11.
- Royer, M., Thomson, J., & Wang, L. (2009). *State of technology review report on condition assessment of ferrous water transmission and distribution systems, EPA/600/R-09/055*. . New York: EPA United States Environmental Protection Agency.
- Sadoh, T., & Murata, K. (1994). Detection of Knots in Hinoki and Karamatsu Lumber by Thermography. *Mokuzai Gakkaishi*, 39(1).
- Sansalone, M. (1986). *Flaw Detection in Concrete Using Transient Stress Waves. Ph.D. Dissertation*. Ithaca, NY, U.S.A: Cornell University.
- Sansalone, M., & Carino, N. (1986). *Impact-Echo: A Method of Flaw Detection in Concrete Using Transient Stress Waves*. Gaithersburg, MD: NBSIR 86-3452, National Bureau of Standards.
- Sansalone, M., & Streett, W. (1997). *Impact-Echo. Nondestructive Evaluation of Concrete and Masonry*. Ithaca, NY: Bullbrier Press.
- Schuller, M., & Superenant, B. (1994). *Nondestructive Evaluation & Testing of Masonry Structures*. New York: Aberdeen Group.
- Schwab, D.-I. R. (Dirección). (2014). *Ultrasonic Testing - Ultrasonic Examination* [Película]. Obtenido de <https://www.youtube.com/watch?v=UM6XKvXWVFA>
- Sears Homes. (1908-1914). Catálogo de Sears Homes. *Sears Homes Brochure*. United States. Obtenido de <http://www.searsarchives.com/homes/1908-1914.htm>
- Seguin Texas Government. (2016). *Seguin Texas*. Obtenido de Sebastopol House: [http://www.seguintexas.gov/departments/parks\\_and\\_recreation/sebastopol\\_house.php](http://www.seguintexas.gov/departments/parks_and_recreation/sebastopol_house.php)
- Shoriak, M. (2012). *Nondestructive Monitoring of Wooden Native American Pyramidal Structures*. Philadelphia, PA: University of Pennsylvania.
- Simmons, G., Strangway, D., Annan, A., Baker, R., Bannister, L., Brown, R., . . . Watts, R. (1973). *Surface Electrical Properties Experiment. Apollo 17: Preliminary Science Report*. Washington D.C.: Scientific and Technical Office NASA.

- Sklodowski, M., & Pawlowski, P. (2016). Smartphone aided structural monitoring and measurements. *Structural Analysis of Historical Constructions - Anamnesis, diagnosis, therapy, controls* (págs. 140-144). London: Taylor & Francis Group.
- Skolnik, M. (2008). *Radar Handbook* (3rd ed.). New York, USA: McGraw-Hill.
- Standard Test Method for Pulse Velocity through concrete ASTM C597-83. (1987). *1987 Annual Book of ASTM Standards*.
- Straube, J. (2006). Moisture and Materials. *Building Science Digest*, 138, 1-7.
- Streeter, K. (2011). *Confederation Building Non-Destructive Evaluation Report*. New York.
- Streeter, K. (30 de Abril de 2013). Restore Course: Non-destructive Evaluation. TPAS. (B. d. Miguel, Entrevistador)
- Streeter, K. (2014). *The TPAS Web Portal*. Recuperado el 2016, de TPAS LLC: <https://tpasllc.com/web-portal/>
- Streeter, K., & Diebolt, K. (2012). Ultrasonic Investiacion for the Characterization and Evaluation of Guastavino Tile Vaults: A Pilot Study. *Third Bienal Meeting of the Contruction Society of America*. Cambridge: Massachusetts Insitute of Technology .
- SUAS News. (s.f.). *Swas news* . Obtenido de Kent man jailed for drone drug smuggling: <http://www.suasnews.com/2016/07/kent-man-jailed-drone-drug-smuggling/>
- Taylor, J. (1978). *Jane's pocket book of remotely piloted vehicles*. New York: Nueva York, USA.
- The American Society for Nondestructive Testing. (2016). *Introduction to Nondestructive Testing*. Obtenido de ASNT The American Society for Nondestructive Testing: <https://www.asnt.org/MinorSiteSections/AboutASNT/Intro-to-NDT.aspx>
- The Wall Street Journal (Lucadamo, K.). (21 de 07 de 2014). On the Ropes: Seeing New York City Up Close. *The Wall Street Journal*. Obtenido de <https://www.wsj.com/articles/on-the-ropes-seeing-new-york-city-up-close-1405992220>
- Thierbach, R. (1973). Electromagnetic reflections in salt deposits. *Geophysics*, 40, 633–637.
- TPAS. (2016). *TPAS*. Obtenido de TPASLLC: <https://tpasllc.com/>
- Tripp, A., & Zonghou, X. (1997). Ground-penetrating radar responses of dispersive models. *Geophysics*, 62(4), 1127-1131.
- U.S. Department of the Interior. (2016). *Laws and Regulations*. Obtenido de U.S. Department of the Interior: <https://www.doi.gov/museum/laws-and-regulations>
- U.S. Department of Transportation Federal Administration. (1996). *Visual Inspection Research Project Report on Benchmark Inpections*. Alburquerque, DC: U.S. Department of Transportation Federal Administration. Obtenido de <https://ntl.bts.gov/data/num/9665.pdf>
- U.S. Department of Transportation. John A. Volpe National Transportation Center. (2013). *Unmanned Aircraft System (USA) Service Demand 2015-2035: Literature & Previsions of Futrure Use*. VNTSC-DoD-13-01: DOT.
- Ulriksen, C. (1982). *Application of impulse radar to civil engineering*. Lund, Sweden.: Unpublished Ph.D. Thesis, Dept. of Engr. Geol., U. of Technology.

- UNE-EN583-1 1999. (1999).
- United States Census Bureau. (2016). *1890 Fast Facts*. Obtenido de United States Census Bureau: [https://www.census.gov/history/www/through\\_the\\_decades/fast\\_facts/1890\\_fast\\_facts.html](https://www.census.gov/history/www/through_the_decades/fast_facts/1890_fast_facts.html)
- University of Maryland. (2016). *School of Architecture, Planning & Preservation*. Obtenido de ARCH 445 Visual Analysis of Architecture: <http://www.arch.umd.edu/arch/course/arch-445>
- USGS & NASA. (2012). *Seismic Wave Behavior—Effect on Buildings*. US Geological Survey & National Aeronautics and Spacial Administration.
- Vallejo, M., & et Al. (2001). *Invicta Alfabeto Temático*. Colombia: Norma.
- Vanzetti, R. (1972). *Practical Applications of Infrared Techniques: A New Tool in a New Dimension for Problem Solving*. New York: John Wiley and Sons.
- Vegas López-Manzanares, F., & Mileto, C. (2008). Consistencia de las raíces valencianas en la obra de Guastavino. En G. C. York.. Valencia: Generalitat Valenciana.
- Vegas López-Manzanares, F., & Mileto, C. (2012). Guastavino y el eslabón perdido. En *Construyendo bóvedas tabicadas. Valencia, España* (págs. 133-156). Valencia: Universitat Politècnica de València.
- Vertical Access. (2003-2015). *Vertical Access LLC*. Obtenido de Vertical Access LLC: <http://www.vertical-access.com/>
- Vertical Access LLC. (2017). *Non-destructive Testing and Diagnostics*. Obtenido de Vertical Access LLC: <http://vertical-access.com/services/non-destructive-testing-and-evaluation/>
- Waite, A., & Schmidt, S. (1961). Gross errors in height indication from pulsed radar altimeters operating over thick ice or snow. *IRE International Convention Record*, (págs. Part 5, pp. 38–54).
- Ward, S., Phillips, R., Adams, G., Brown, J., Jackson, P., Jordan, R., . . . Zelenka, J. (1973). *Apollo lunar sounder experiment. Apollo 17: Preliminary Science Report*. Washington: Scientific and Technical Office NASA.
- Watts , R., & England, A. (1976). Radio-echo sounding of temperate glaciers: Ice properties and sounder design criteria. *Journal of Glaciology*, 21(85), 39–48.
- Weiler, M., Missio, A., Gatto, D., & Güths, W. (2013). Nondestructive Evaluation of Wood Decayed by Xylophagous Organisms. *Materials Research*, 16(5), 1203-1208.
- Williams, T., & et. al. (April de 1997). Nondestructive Evaluation of Masonry Structures Using the Impact-Echo Method. *The Masonry Journal*.
- Woo, J. (2008). A short History of the development of Ultrasound in Obstetrics and Gynecology. *e journal de College Francais d'Echographie Foetale*, 1-19.
- Wu, J., Tian, M., & Zhou, H. (2008). Feature extraction and recognition based on SVM. En H. Zhou (Ed.), *Proceedings of 4th International Conference on Wireless Communications, Networking and Mobile Computing*, (págs. 1-4). Dalian, China.
- Yanan, L. (1987). A new technique on true temperature imaging. *SPIE, 780 Thermosense IX*, 234.



- Yarovoy, A., & Harry, M. (2009). Landmine and unexploded ordnance detection and classification with ground penetrating radar. En H. Jol, *Ground Penetrating Radar Theory and Applications* (págs. 445–478). Amsterdam, The Netherlands.: Elsevier.
- Zannier, I. (1991). *Architettura e fotografia*. Roma: Editori Laterza.
- Zifan, A. (2016). *Tallest Buildings of the United States*. Obtenido de <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=41356601>
- Zimmerman, D. (2002). Paul Langevin and the Discovery of Active Sonar or Asdic. *The Northern Mariner/Le marin du nord*, 1(XII), 39-52.