



UNIVERSIDAD  
POLITECNICA  
DE VALENCIA

**Departamento de Conservación y Restauración  
de Bienes Culturales**

Programa de Doctorado en  
CONSERVACIÓN Y RESTAURACIÓN DEL PATRIMONIO HISTÓRICO  
ARTÍSTICO

Tesis Doctoral

**VALORACIÓN DEL DETERIORO DE LA MADERA Y LA EFECTIVIDAD  
DE SU CONSOLIDACIÓN, MIDIENDO LA FRECUENCIA FUNDA-  
MENTAL DE OSCILACIÓN. Estudio experimental aplicado a la  
tablazón de los artonados de la iglesia de San Francisco, Quito  
Ecuador.**

Julio Enrique Benítez Telles, Doctorando

Dra. María Victoria Vivancos Ramón, Directora  
Dr. José Vicente Grafiá Sales, Director

Valencia, diciembre 2009



A mis papis, ñaños y sobrinos.



## **AGRADECIMIENTOS.**

Se dice que dar las gracias es justo y necesario... yo creo que es mucho más que esto.

Creo que damos las gracias porque sentimos necesidad de exteriorizar un profundo sentimiento de amistad y retribución inmaterial hacia aquella persona que hemos encontrado en nuestras vidas, que confía en nosotros, que nos respeta, que nos ayuda a ser conScientes de nuestros fallos y al mismo tiempo que está junto a nosotros para apoyarnos.

Así pues, pienso que no debo agradecer solo por ser justo o peor aún por ser necesario; yo creo que se da las gracias a quien de una forma muy positiva ha marcado un punto importante en nuestras vidas; para mí, las siguientes personas han marcado ese punto en mi vida:

Mis papis, ñaños y sobrinos que desde el inicio de mi viaje me apoyaron... y aún me apoyan.

María Victoria Vivancos y José Vicente Grafiá, mis directores de tesis, quienes me brindaron todas las facilidades para realizar esta investigación.

Pilar Roig, Directora del Departamento de Conservación y Restauración, y el Programa de Becas de Alto Nivel de la Unión Europea; por su colaboración y reconocimiento.

Carlos Abad y María Jesús Soler, por el contacto en el Instituto Tecnológico de la Madera y el Mueble y José Vicente Oliver, Miguel Ángel Abian, Sales Ibiza, Guillermo Martínez, Efrén Crespo, y Florian Neubert

quienes pusieron a mi disposición las instalaciones de AIDIMA, me orientaron y con quienes hice amistad.

Héctor Vega y Ruth Aguirre porque confiaron en mí para ser parte del equipo consultor encargado de los estudios para la intervención de los artesonados, cubierta y cúpulas de la iglesia de San Francisco... de donde vino la madera para realizar mi tesis.

Andrés Carrión quien me enseñó un poco de estadística... herramienta que ahora disfruto empleando.

Raquel Carreras, Per Hoffmman, Arno Schneiwind por las orientaciones, sugerencias y puntualizaciones.

Y en especial gracias a Ruth por su vida, a Rosana por su ayuda y a Veronika por sus opiniones.

Nagyon köszönöm Veronak a sok nevetést, beszélgetést és sétát, a reggeli gyakorlatokat... köszönet ezerszer is mindenért!

Köszönök mindent kis szépségem, megtiszteltetés, hogy ismerhetlek, és hogy jó és rossz pillanatokát éltünk át együtt; és kívánom hogy soha ne veszítsem el a barátságodat, sem a szeretetedet, sem a nevetésedet, sem a jelenlétedet. Öszintén szeretném, ha mindig a közelemben lennél.

Sok szeretettel Juliotól!

Se agradece a los amigos: gracias a todos, por todo,

## **RESUMEN.**

En el campo de la preservación de bienes muebles, la consolidación de madera es un tratamiento extremo, aplicado cuando ningún otro medio es capaz de garantizar su estabilidad.

En general, los restauradores estiman: el nivel de deterioro, la necesidad de consolidar y el resultado del tratamiento, empíricamente o con la ayuda de imágenes del interior del objeto.

Este proceder se trasluce en estudios de diagnóstico, en reportes de intervención o en publicaciones especializadas, donde se caracteriza el deterioro en términos subjetivos como: ataque severo, avanzado estado de deterioro, mal estado, etc.

En apariencia este hecho puede resultar poco relevante; sin embargo, cuando se desea tomar como referencia los tratamientos de otros profesionales o si la cantidad de madera a intervenir es importante, la valoración del deterioro y del resultado del tratamiento variará. Esto muestra la importancia de contar con un método que evalúe objetivamente el ataque y la consolidación.

En la presente tesis, se abordó este problema y se concluyó que la frecuencia fundamental permite, por un lado, discriminar niveles de deterioro; por otro lado, determinar el efecto de la consolidación con un buen grado de fiabilidad:  $R^2=0,80$ .

Como resultado paralelo, destaca la formulación de una ecuación desarrollada por el autor de esta tesis, para calcular el volumen máximo de solución requerida para consolidar, por inmersión, un volumen determinado de madera.

## **RESUM.**

En el camp de la preservació de béns mobles, la consolidació de fusta és un tractament extrem, aplicat quan cap altre mig és capaç de garantir la seua estabilitat.

En general, els restauradors estimen: el nivell de deteriorament, la necessitat consolidar i el resultat del tractament, empíricament o amb l'ajuda d'imatges de l'interior de l'objecte.

Este procedir es traslluu en estudis de diagnòstic, en reports d'intervenció o en publicacions especialitzades, on es caracteritza el deteriorament en termes subjectius com: atac sever, avançat estat de deteriorament, mal estat, etc.

En aparença este fet pot resultar poc rellevant; no obstant, quan es desitja prendre com a referència els tractaments d'altres professionals o si la quantitat de fusta a intervindre és important, la valoració del deteriorament i del resultat del tractament variarà. Açò mostra la importància de comptar amb un mètode que avalue objectivament l'atac i la consolidació.

En la present tesi, es va abordar este problema i es va concloure que la freqüència fonamental permet, d'una banda, discriminar nivells de deteriorament; d'altra banda, determinar l'efecte de la consolidació amb un bon grau de fiabilitat:  $R^2=0,80$ .

Com resultat paral·lel, destaca la formulació d'una equació desenvolupada per l'autor d'esta tesi, per a calcular el volum màxim de solució requerida per a consolidar, per immersió, un volum determinat de fusta.

## **SUMMARY.**

From the Heritage Preservation point of view, consolidation of degraded wooden objects is an extreme treatment, applied only when no other solution can guarantee the stability of the object.

Usually, conservators establish the degradation level and the result of consolidation, in the basis of their own background and, in few cases, with images from the interior of the object, such as radiographies.

This way to determine the wood degradation level is subjective, and it is usual to read in papers and articles phrases like: wood in poor condition, deteriorated wood; severely degraded wood; significant degradation, etc. when conservators want to characterize the wood condition.

At first sight, this fact could be considered as not relevant. But if we want to use, as reference, the results and conclusions of other conservators, or, if the amount of wood to consolidate is too big, so we will notice the importance to have a non destructive method to establish both: the degradation level and the improvement reached after the consolidation of wood.

This problem was the starting point of this thesis, and we concluded that Eigen frequency let us to divide the degradation level in different groups, as well as to establish the improvement of consolidation treatment ( $R^2=0,80$ ).

It is important to emphasize the fact that during this investigation we developed an equation to figure out the maximum volume of solution (resin-solvent) required to consolidate, by immersion, and specific volume of wood.







## **TABLA DE CONTENIDOS.**

<b>1.</b>	<b>INTRODUCCIÓN.</b>	<b>21</b>
<b>2.</b>	<b>LA IGLESIA DE SAN FRANCISCO Y SUS TECHUMBRES.</b>	<b>37</b>
<b>2.1.</b>	<b>CONSTRUCCIÓN Y RECONSTRUCCIONES.</b>	<b>37</b>
<b>2.2.</b>	<b>DESCRIPCIÓN DE LA IGLESIA Y TECHUMBRES.</b>	<b>41</b>
<b>2.3.</b>	<b>MATERIALES Y TÉCNICAS DE EJECUCIÓN DE LAS TECHUMBRES.</b>	<b>50</b>
<b>2.3.1.</b>	<b>SISTEMA DE CONSTRUCCIÓN DE ARTESONADOS.</b>	<b>50</b>
<b>2.3.2.</b>	<b>SISTEMA DE CONSTRUCCIÓN DEL CIELO RASO.</b>	<b>55</b>
<b>2.3.3.</b>	<b>DECORACIONES Y POLICROMÍAS.</b>	<b>62</b>
<b>3.</b>	<b>ESTUDIO DIAGNÓSTICO DE LAS MADERAS, ESTRUCTURA Y SOPORTE, Y LAS POLICROMÍAS DE LOS ARTESONADOS Y CIELO RASO BARROCO DE LA IGLESIA DE SAN FRANCISCO.</b>	<b>67</b>
<b>3.1.</b>	<b>ESTUDIO DIAGNÓSTICO DE LAS MADERAS.</b>	<b>68</b>
<b>3.1.1.</b>	<b>ALTERACIONES Y FACTORES DE DETERIORO.</b>	<b>68</b>
<b>3.1.2.</b>	<b>NIVEL DE DETERIORO.</b>	<b>77</b>
<b>3.1.3.</b>	<b>NIVEL DE INTEGRIDAD.</b>	<b>79</b>
<b>3.1.4.</b>	<b>RESUMEN DE ALTERACIONES.</b>	<b>81</b>
<b>3.2.</b>	<b>ESTUDIO DIAGNÓSTICO DE POLICROMÍAS.</b>	<b>82</b>
<b>3.2.1.</b>	<b>ALTERACIONES Y FACTORES DE DETERIORO.</b>	<b>82</b>
<b>3.2.2.</b>	<b>NIVEL DE DETERIORO.</b>	<b>87</b>
<b>3.2.3.</b>	<b>NIVEL DE INTEGRIDAD.</b>	<b>88</b>
<b>3.2.4.</b>	<b>RESUMEN DE ALTERACIONES.</b>	<b>90</b>

<b>3.3.</b>	<b>CONDICIONES MICROCLIMÁTICAS DEL LUGAR DE EMPLAZAMIENTO. HUMEDAD RELATIVA, TEMPERATURA .....</b>	<b>91</b>
<b>4.</b>	<b>REVISIÓN CRÍTICA DE LOS SISTEMAS NO DESTRUCTIVOS EMPLEADOS PARA EVALUAR EL DETERIORO DE LA MADERA EN EL CAMPO DE LA CONSERVACIÓN Y RESTAURACIÓN DE BIENES CULTURALES. ....</b>	<b>95</b>
<b>4.1.</b>	<b>SISTEMA DE EVALUACIÓN VISUAL. ....</b>	<b>99</b>
<b>4.2.</b>	<b>SISTEMAS DE EVALUACIÓN INSTRUMENTAL.....</b>	<b>101</b>
<b>4.2.1.</b>	<b>TÉCNICAS ACÚSTICAS.....</b>	<b>103</b>
<b>4.2.2.</b>	<b>TÉCNICAS ELECTROMAGNÉTICAS. ....</b>	<b>111</b>
<b>4.2.3.</b>	<b>TÉCNICAS FÍSICO MECÁNICAS. ....</b>	<b>119</b>
<b>4.2.4.</b>	<b>TÉCNICAS NUCLEARES. ....</b>	<b>126</b>
<b>4.2.5.</b>	<b>DISCUSIÓN.....</b>	<b>132</b>
<b>5.</b>	<b>FUNDAMENTO TEÓRICO DE LOS SISTEMAS EMPLEADOS EN ESTA INVESTIGACIÓN.....</b>	<b>139</b>
<b>5.1.</b>	<b>DENSIDAD. ....</b>	<b>140</b>
<b>5.2.</b>	<b>FRECUENCIA FUNDAMENTAL. ....</b>	<b>142</b>
<b>5.3.</b>	<b>IMPREGNACIÓN – CONSOLIDACIÓN.....</b>	<b>148</b>
<b>5.3.1.</b>	<b>CARACTERÍSTICAS DE LA MADERA. ....</b>	<b>149</b>
<b>5.3.2.</b>	<b>CARACTERÍSTICAS DE LAS SOLUCIONES RESINA – SOLVENTE.....</b>	<b>157</b>
<b>5.3.3.</b>	<b>SISTEMA DE APLICACIÓN.....</b>	<b>159</b>
<b>5.3.4.</b>	<b>EVAPORACIÓN Y DISTRIBUCIÓN.....</b>	<b>163</b>
<b>5.4.</b>	<b>MÓDULO DE ELASTICIDAD .....</b>	<b>164</b>
<b>5.4.1.</b>	<b>MÓDULO DE ELASTICIDAD, PROCEDIMIENTO DINÁMICO .....</b>	<b>166</b>

5.4.2.	<b>MÓDULO DE ELASTICIDAD, PROCEDIMIENTO ESTÁTICO.</b>	168
5.5.	<b>RESINAS Y SOLVENTES EN LA CONSOLIDACIÓN DE MADERA.</b>	170
5.5.1.	<b>RESINAS.</b>	170
5.5.2.	<b>SOLVENTES.</b>	185
6.	<b>DESARROLLO DE LA EXPERIMENTACIÓN.</b>	191
6.1.	<b>PRIMERA ETAPA.</b>	193
6.1.1.	<b>SELECCIÓN, IMPORTACIÓN Y DETERMINACIÓN DE LA ESPECIE DE LA MADERA Y SUS CARACTERÍSTICAS.</b>	193
6.1.2.	<b>PREPARACIÓN, ACLIMATACIÓN Y OBTENCIÓN DE LAS PROBETAS NECESARIAS PARA EFECTUAR LOS ENSAYOS. (DIMENSIONES Y CODIFICACIÓN)</b>	207
6.1.3.	<b>ANÁLISIS VISUAL DE LAS PROBETAS (CLASIFICACIÓN A PRIORI)</b>	211
6.1.4.	<b>CLASIFICACIÓN DE LAS PROBETAS EN BASE A SU DENSIDAD Y ESCALA DE TRABAJO.</b>	211
6.1.5.	<b>CLASIFICACIÓN DE LAS PROBETA EN BASE A SU FRECUENCIA FUNDAMENTAL DE VIBRACIÓN.</b>	218
6.1.6.	<b>RESULTADO GENERAL SOBRE EL POSIBLE EMPLEO DE ESTA FRECUENCIA PARA ESTABLECER NIVELES DE DETERIORO.</b>	237
6.2.	<b>SEGUNDA ETAPA.</b>	238
6.2.1.	<b>FACTORES EN ESTUDIO.</b>	239
6.2.2.	<b>TRATAMIENTOS</b>	245
6.2.3.	<b>DISEÑO EXPERIMENTAL.</b>	247
6.2.4.	<b>MEDICIÓN DE FRECUENCIA FUNDAMENTAL Y CÁLCULO DE MÓDULO DE ELASTICIDAD DINÁMICO...</b>	253
6.2.5.	<b>ENSAYO A FLEXIÓN ESTÁTICA Y COMPARACIÓN ENTRE LOS VALORES DE MÓDULO DE ELASTICIDAD DINÁMICO (CALCULADO) Y ESTÁTICO (REAL).</b>	261

<b>7.</b>	<b>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.</b> .....	269
<b>7.1.</b>	<b>MÉTODOS DE EVALUACIÓN NO DESTRUCTIVOS APLICABLES A TABLAS Y TABLAZONES.</b> .....	269
<b>7.2.</b>	<b>FIABILIDAD DE ESTA TÉCNICA PARA CARACTERIZAR EL ATAQUE PROVOCADO POR INSECTOS XILÓFAGOS Y DISCRIMINAR DIFERENTES GRUPOS DE DETERIORO.</b> .....	270
<b>7.3.</b>	<b>SOBRE LA FIABILIDAD DE ESTA TÉCNICA PARA EVALUAR LOS TRATAMIENTOS DE CONSOLIDACIÓN.</b> ..	271
<b>7.4.</b>	<b>POSIBLES LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN QUE SE PUEDEN DESARROLLAR A PARTIR DE ESTA INVESTIGACIÓN.</b> .....	273
<b>7.5.</b>	<b>RECOMENDACIONES.</b> .....	274
<b>8.</b>	<b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.</b> .....	279
<b>9.</b>	<b>ANEXO 1.</b> .....	313









## **1. INTRODUCCIÓN.**

GENERALIDADES, PROBLEMA IDENTIFICADO, OBJETIVOS E HIPÓTESIS DE ESTUDIO.

La consolidación de madera deteriorada plantea al conservador – restaurador dos interesantes cuestiones; por un lado la dificultad que se tiene en el momento de caracterizar de forma objetiva el deterioro de este material y justificar así su consolidación; y por otro lado la necesidad de conocer la efectividad de dicho tratamiento.

De forma extendida, la gran mayoría de los profesionales recurren a procedimientos organolépticos, básicamente visuales, tanto para cualificar el daño o afectación que los insectos xilófagos han provocado en la madera, como para establecer, de forma más o menos precisa, los tratamientos, productos y tiempos necesarios para efectuar la conservación – restauración de la madera.

El sistema visual es en realidad el más antiguo de todos los métodos de evaluación no destructivos y se fundamenta en la evaluación del ataque provocado por insectos xilófagos en base al conocimiento adquirido de forma empírica. (Basterra, A. et al, 2005; Casado, M. et al, 2005). Sin embargo, este sistema encuentra constantemente diferencias, algunas veces significativas, entre los estudios realizados sobre un mismo objeto debido a que:

- Es un procedimiento subjetivo en el que se subestima por igual a la madera como al ataque xilófago.
- Se compara, de forma intuitiva, el estado de deterioro del objeto con referentes empíricos adquiridos a lo largo de la actividad profesional.

Esta limitación, no invalida al método de evaluación visual, porque es una herramienta muy útil para recabar información primaria sobre las zonas deterioradas o para orientar sobre la naturaleza del deterioro; pero si el interés es determinar de forma objetiva las características de una madera deteriorada es necesario recurrir, ya sea a los métodos de evaluación destructivos, o a aquellos métodos no destructivos.

Si bien es cierto que los métodos destructivos establecen de forma real y directa el estado de la madera, su empleo en un objeto patrimonial es inadmisibles ya que no se puede poner en peligro la integridad de un bien dotado de una singularidad especial otorgada por nuestra sociedad.

En consecuencia, es necesario recurrir a los procedimientos de evaluación no destructivos, y calcular así el estado en que se encuentra la madera. Estos sistemas indirectos no son exactos y es necesario desarrollar metodologías específicas para mejorar su eficacia y obtener niveles significativos de exactitud.

Precisamente, en los últimos años se han venido realizando estudios que intentan medir el nivel de deterioro y las propiedades físicas de la madera atacada; para lo cual se ha recurrido a dos sistemas diferentes, por un lado el modelado matemático que debido a la enorme cantidad de variables que intervienen en los procesos de deterioro hacen imposible su utilización; y por otro lado el empleo de técnicas no destructivas, cuya información es más precisa, como paso previo a la determinación del producto y procedimiento de aplicación.

La importancia de poder establecer el nivel y la extensión del deterioro es fundamental porque permite entre otras cosas: planificar la

intervención, establecer los procedimientos de intervención, determinar los materiales a emplear o estimar los tiempos de ejecución.

Dicha importancia es poco apreciable en obras pequeñas e individuales, sin embargo, cuando se trabaja con un volumen de obra considerable, pequeños errores en la estimación del deterioro implica: alteraciones en los planes de trabajo, modificaciones de los procedimientos de intervención, cambio de materiales y de sus características y retrasos en los cronogramas previstos; lo que redundará en incrementos de los costos, tiempos de intervención y en especial, la sobre exposición a los solventes empleados para disolver las resinas.

Así pues, resulta de suma importancia establecer o caracterizar el estado de deterioro en que se encuentra la madera porque los tratamientos se realizarían en base a parámetros susceptibles de ser medidos, evitando así la sub o sobre valoración del daño y sobre todo porque al prever el comportamiento del objeto, se puede tomar medidas correctivas que permitan preservar el objeto por mayor tiempo invirtiendo la menor cantidad de recursos, sometiendo al objeto a tensiones innecesarias y evitando exponer al profesional a los vapores generados durante los tratamientos de consolidación.

Para conseguir este fin, es necesario establecer métodos que evalúen fielmente el estado en que se encuentra la madera sin provocar en ésta ninguna alteración; este primer paso posibilitaría formar grupos de deterioro que relacionen la cantidad de materia perdida, por acción xilófaga, con la reducción de las propiedades físicas; y permitiría evaluar tanto las propiedades mecánicas del compuesto madera-resina como también su resistencia a nuevos procesos de deterioro. (Feller, R. 1994; Yildiz, U. et al, 2005)

Un ejemplo real que muestra la necesidad de contar con un sistema que establezca el nivel de ataque presente en las maderas lo constituye el caso de las tablazones y tablas de forro de los artesonados y cielo raso barroco de la iglesia de San Francisco ubicado la ciudad de Quito, capital de la República del Ecuador.



ILUSTRACIÓN 1: Artesonado.  
Vista general desde el crucero.  
Fotografía: Luis Subía (2004)



ILUSTRACIÓN 2: Cielo raso.  
Vista general desde la nave central.  
Fotografía: Luis Subía (2004)

Los referidos artesonados, tres en total, y el cielo raso barroco, fueron estudiados entre marzo de 2003 y junio de 2004, con un doble objetivo, por un lado, determinar su estado de conservación; y por otro, establecer las bases precontractuales y las especificaciones técnicas para su restauración y consolidación<sup>1</sup>.

Los tres artesonados, cuya superficie total rebatida es de 237,5m<sup>2</sup>, cubren el transepto de la iglesia, uno en el extremo sur, otro en el crucero y el tercero en el extremo norte del mismo; y fueron

---

<sup>1</sup> Esta investigación, denominada oficialmente: ESTUDIOS PARA LA "RESTAURACIÓN Y CONSOLIDACIÓN DEL ARTESONADO, CUBIERTA Y CÚPULAS DE LA IGLESIA DE SAN FRANCISCO" fue contratada por el FONSAL y ejecutada por el siguiente equipo consultor: Héctor Vega, coordinador; Julio Benítez, conservador restaurador; Pedro Freile, Ingeniero eléctrico; Guillermo Gómez, ingeniero civil; Patricio Guerra, historiador; Ramón Rodríguez, ingeniero hidrosanitario; Diego Santander, arquitecto restaurador.

confeccionados entre 1573 y 1581<sup>2</sup>; mientras que el cielo raso barroco, cuya superficie rebatida es de 245,2m<sup>2</sup>, cubre la nave central y fue construido en 1775, después que el terremoto del 26 de abril de 1755<sup>3</sup> destruyera el artesonado y cubierta originales.

En términos generales, el indicado estudio analizó los siguientes puntos de los artesonados y cielo raso barroco:

- Estructuras.
- Tablas y tablazones.
- Elementos ornamentales volumétricos como molduras, rosetas, pinjantes, tallas y esculturas.
- Policromías, incluyendo láminas de oro y plata.

De estos cuatro acápite: el primero, referido a las estructuras, involucraba una elevada responsabilidad en el momento de determinar su estado de conservación y establecer las acciones a tomar con dichos

---

<sup>2</sup> Del estudio histórico realizado por Guerra, P. (2004), se desprende que la iglesia, como actualmente se la conoce y sus artesonados fueron terminados de construir entre 1573 y 1581.

Estas fechas corresponden a dos documentos independientes que describen a la iglesia; así, el primero indica que en 1573 aún se realizaban misas en una iglesia pequeña, que estaría ubicada en el lado izquierdo de la actual, que en aquella época se hallaba en construcción.

El segundo documento corresponde a una descripción realizada por Toribio de Ortiguera indicando que hacia 1581 la iglesia, actual, estaba totalmente construida.

Hacia 1647, el Padre Fernando de Socar describe a la iglesia completamente terminada, incluyendo los artesonados.

<sup>3</sup> Se sabe que el terremoto de 1755 afectó seriamente a todo el convento; de los daños causados, probablemente el más importante fue la destrucción total de la cubierta y el artesonado de la nave central. (Guerra, P. 2004)

elementos, porque de su estabilidad depende la permanencia del conjunto.

De hecho, como se observa en la información escrita y fotográfica del referido estudio, muchos elementos estructurales ya habían colapsado, poniendo en serio peligro la integridad de las personas que asisten a la iglesia de San Francisco.



ILUSTRACIONES 3 y 4: Colapso estructural del Cielo raso barroco.  
Fotografía: Luis Subía (2004)

Sin embargo, considerando que las tablas y tablazones:

- Cubren casi toda la superficie visible de los artesonados y cielo raso barroco.
- Son el soporte de la gran mayoría de molduras y otros ornamentos.
- Cubren los espacios vacíos entre la estructura pero únicamente están fijas por su perímetro.
- Las tablas del cielo raso se anclan desde el interior.
- Su espesor está comprendido entre 20 y 30mm.

- Las caras superiores de tablas y tablazones son amplias superficies expuestas a los agentes de deterioro.

Resultaba igual de delicado determinar su estado de conservación porque su colapso significaba la caída de tablas y / o elementos decorativos desde una altura superior<sup>4</sup> a 13,26m directamente sobre los fieles que acuden a la Iglesia<sup>5</sup> como efectivamente ocurrió con algunas tablas del cielo raso barroco y de los artesonados, afortunadamente sin daños personales.



ILUSTRACIÓN 5: Cielo raso barroco.  
Zona de desprendimiento (intradós).  
Fotografía: Luis Subía (2004)



ILUSTRACIÓN 6: Cielo raso barroco.  
Zona de desprendimiento (intradós).  
Fotografía: Luis Subía (2004)

En el caso de las estructuras, el procedimiento seguido para establecer su estado de conservación se basó en establecer la resistencia que cada elemento presentaba a la penetración de un punzón; y, por perforaciones puntuales para extraer pequeños cilindros que indicaran la profundidad del deterioro, considerando para los cálculos de resistencia las secciones libres de ataque. De esta forma se estableció que, debido al avanzado estado de deterioro, los elementos estructurales del cielo

---

<sup>4</sup> La altura de 13,26m corresponde a la menor distancia perpendicular que existe entre el suelo de la iglesia y el cielo raso barroco; la altura hasta los artesonados es aún mayor.

<sup>5</sup> La iglesia abre ocho horas al día de lunes a domingo entre las 7h00 y las 18h00.

raso barroco debían ser reemplazados, mientras que en los artesonados bastaba con colocar elementos de acompañamiento en zonas puntuales.

Pero en el caso de las tablas y tablazones no tenía sentido efectuar la prueba con el punzón ya que su poco espesor en relación a su superficie facilitó la penetración de insectos xilófagos que digirieron por igual todo el espesor de las tablas. En este caso, únicamente se empleó el sistema visual para determinar el nivel del deterioro y se concluyó que del total de las tablas que conforman el cielo raso barroco y la tablazón de los artesonados, un 39,7% se encontraban en buen estado, mientras que un 33,3% en estado regular y el restante 27,0% en mal estado.

En base a los resultados del referido estudio, se elaboraron las bases precontractuales del proyecto para la conservación y restauración de los artesonados y cielo raso barroco; así como también los detalles y especificaciones técnicas de cada etapa de la intervención. Cada uno de los rubros previstos<sup>6</sup> precisaban los siguientes aspectos: explicación descripción; unidad de medida; procedimiento de ejecución y posibles alternativas; características físicas y químicas de los materiales a emplear; características de los equipos y de las herramientas; y, equipos y procedimientos de seguridad. Adicionalmente, se estableció un análisis de precios unitarios y la planificación total del proyecto, determinando tiempos y costos, tanto etapa por etapa, como totales.

Con toda esta información se redactaron las bases precontractuales con las que se convocó a licitación pública la intervención de los artesonados y cielo raso barroco de la iglesia de San Francisco.

---

<sup>6</sup> Las especificaciones técnicas contenidas en las bases precontractuales consideraron 75 rubros relacionados a la intervención directa de los artesonados y cielo raso barroco; a parte de los cuales se detallaron otros vinculados a las partes arquitectónica e ingeniería del estudio.

Sin embargo, al momento de ejecutar la intervención, algunos de los rubros previstos en las bases precontractuales incrementaron su volumen, aumentando en consecuencia los costos y tiempos de la intervención.

De aquellos rubros que experimentaron variaciones significativas destacaron los siguientes:

- Colocación de elementos estructurales nuevos.
- Confección de injertos de tablas.
- Confección de elementos estructurales nuevos.
- Consolidación maderas por impregnación.
- Consolidación maderas por inmersión.
- Desbaste de elementos estructurales para ensamblaje.
- Desinsectación de madera antigua por impregnación.
- Desinsectación de madera antigua por inmersión.
- Liberación de elementos de madera en mal estado.
- Preservación de madera nueva por inmersión.
- Reintegración de color sobre estucos de intervención.
- Reintegración de estuco en lagunas y piezas nuevas.
- Reintegración molduras o imaginería.
- Solventes tipo III.
- Taponado de madera en lagunas y piezas nuevas.

Como se puede observar, todas estas acciones están relacionadas con la madera de los artesonados y cielo raso barroco; y las variaciones experimentadas se explicarían probablemente a diferencias en los criterios de evaluación que aplicaron tanto el equipo consultor y el equipo ejecutor.

Con este ejemplo, se manifiesta un problema científico:

- La carencia de una metodología que posibilite evaluar el estado en que se encuentran tablas y tablazones de cielo raso y artesonados, antes y después de su consolidación.

Este problema científico se refleja en dos problemas técnicos:

- El primero, la imposibilidad de discriminar de forma objetiva diferentes grados de ataque de insectos xilófagos;
- El segundo, la dificultad de efectuar el seguimiento o la fiscalización de los trabajos de consolidación.

Estos problemas son comunes en la mayoría de las intervenciones donde se ejecutan tratamientos de consolidación, y la necesidad de solventarlos se ve reflejado en los planteamientos de recientes publicaciones de divulgación científica (Acuña, R. et al 2007; Álvarez, L. et al 2005; Basterra, A. et al 2005; Esteban, M. et al 2007; Giachi, G. 2003; Popescu, C. 2005).

Precisamente, la inexactitud indicada, fue el motivo principal para desarrollar este trabajo de investigación con el objetivo general de identificar un método de evaluación no destructivo que permitiese, de forma objetiva y fiable, determinar por un lado diferentes niveles de

deterioro, y por otro lado, establecer la efectividad real de la consolidación.

Para alcanzar este objetivo general, se plantearon los siguientes objetivos específicos:

- Conocer con exactitud los métodos de evaluación no destructivos existentes y aplicables en el campo de la conservación – restauración del patrimonio cultural, en especial a tablas y tablazonas.
- Determinar la fiabilidad de esta técnica de evaluación no destructiva para caracterizar el ataque de insectos xilófagos discriminando por grupos o niveles de ataque.
- Establecer la efectividad de la consolidación empleando esta técnica de evaluación no destructiva.
- Determinar la fiabilidad de esta técnica de evaluación no destructiva para evaluar el resultado del tratamiento de consolidación.
- Señalar las posibles líneas de investigación que se pueden seguir como resultado de este trabajo de investigación.

La metodología seguida para cumplir con el objetivo general se estructuró sobre los siguientes supuestos hipotéticos:

- Es factible establecer niveles de deterioro de madera por métodos de evaluación no destructivos.

- Estos métodos evalúan fielmente los tratamientos de consolidación.

El impacto esperado con la realización de esta investigación se resume en los siguientes puntos:

- Se dispondría de datos objetivos sobre el estado de la madera para establecer anteproyectos y presupuestos de intervención bastante más cercanos a la realidad.
- Sería factible separar por niveles de afectación los daños provocados por insectos xilófagos, justificando para cada caso un proceso de intervención específico.
- Se reduciría costes y tiempos de ejecución.
- Se restringiría someter la pieza a tensiones producidas por el tratamiento.
- Se limitaría el período de exposición personal a productos tóxicos.
- Sería posible calcular el efecto alcanzado con la consolidación, facilitando así los trabajos de seguimiento y fiscalización.
- Se podría realizar inspecciones periódicas e identificar nuevos procesos de deterioro, antes de que estos sean visualmente perceptibles.

- Se podría establecer protocolos de control de elementos, con o sin tratamiento de consolidación, para tomar medidas preventivas o curativas de forma más eficaz.
- Se podría contar con un referente objetivo que permita comprender los trabajos realizados en diferentes laboratorios y proyectos de conservación – restauración para así replicar los ensayos, divulgar el conocimiento y tener un referente de intervención.

Es importante resaltar el hecho de que este estudio es experimental, cuya intención final fue determinar el posible método de evaluación no destructivo a emplear y establecer su fiabilidad tanto en la identificación de niveles de deterioro como en la evaluación de la consolidación. A partir de los resultados de este estudio se puede determinar la fiabilidad del método estudiado para aplicarlo a casos reales.

Debido a la característica exploratoria de esta tesis, todos los ensayos se realizaron con probetas de similares dimensiones y geometría, extraídas de un mismo bloque de madera perteneciente al cielo raso de la iglesia de San Francisco, contando así con un grupo de estudio con similares características, causas y procesos de deterioro, reduciendo así variables que complicarían la solución a los objetivos planteados.







## **2. LA IGLESIA DE SAN FRANCISCO Y SUS TECHUMBRES.**

En este apartado se expone de forma resumida aquellos aspectos relacionados con el proceso de edificación de la iglesia y sus sucesivas reconstrucciones así como el montaje y las características de sus techumbres.

### **2.1. CONSTRUCCIÓN Y RECONSTRUCCIONES.**

La orden mendicante de los franciscanos fundaron su casa en la ciudad de Quito el día 25 de enero de 1535, día de conmemoración de la conversión de San Pablo. Por este motivo, el convento construido por los frailes fundadores, Jodoco Rique y Pedro Gocial, lo dedicaron al santo converso. Sin embargo, la población se refiere al conjunto monacal como: convento de San Francisco. (Benítez, J. 1999; Guerra, P. 2004)

Guerra (2004) indica que el día 31 de abril de 1537 el cabildo concedió unos terrenos en el lado este de la ciudad, para que en ellos se construyera la casa franciscana y que hacia finales de 1538 se incorporaron los últimos terrenos que completaron la superficie del convento; espacio que se corresponde con el actual.



ILUSTRACIÓN 7: Croquis de la Ciudad de Quito.  
Superficie definitiva hacia 1538 del Convento de San Pablo; zona sombreada.  
Basado en Plano de la ciudad, 1914.

Los trabajos de construcción del convento se iniciaron poco tiempo después de la adquisición de los terrenos; del estudio histórico de Guerra (2004), se desprende que entre 1540 y 1545 se construyó la planta baja del claustro sur; sin embargo, la iglesia de hoy en día se comenzó a construir desde abril de 1551, fecha en que se realizaron los trabajos de cimentación de la iglesia.

No se conoce la fecha exacta de finalización, pero de la documentación histórica recabada por Guerra (2004), se desprende que este hecho se debió producir entre 1573 y 1581; fechas de dos crónicas que relatan la iglesia aún en construcción (1573) y como terminada y ornamentada con artesonados (1581).



ILUSTRACIÓN 8: Fachada principal del Convento de San Francisco.  
Fotografía: Museo Franciscano Fray Pedro Gocial. En Santander, D. 2004.

De estos artesonados, que se construyeron para cubrir el coro, la nave central y el transepto, aquel emplazado en la nave central, se destruyó, al igual que la cubierta de la misma nave, la parte alta de las dos torres de la fachada de la iglesia y varias dependencias del convento, durante el terremoto del 26 de abril de 1755<sup>7</sup>. (Guerra, P. 2004; Santander, D. 2004)

Los trabajos de reparación se iniciaron en agosto de 1755 y se terminaron en junio de 1756, pero no se reconstruyó el artesonado destruido. Varios años después, entre 1769 y 1770, se colocó un tumbado o cielo raso de estilo barroco en lugar del artesonado, propio del estilo mudéjar, destruido durante el terremoto del 55. (Guerra, P. 2004; Santander, D. 2004)

---

<sup>7</sup> Como lo indica Gómez (2004), éste no fue el primer movimiento sísmico que soportó el convento pero sí el primero con intensidad importante; de hecho, la primera actividad sísmica que debieron soportar las estructuras franciscanas data de 1539, poco después de iniciados los trabajos de construcción. El número de fenómenos sísmicos sentidos en Quito entre los indicados de 1539 y 1755 es elevado; aquellos reportados datan de los años: 1566, 1587, 1627, 1645, 1656, 1660, 1662, 1668, 1704 y 1736.

De las referencias aportadas por Guerra (2004) sabemos que la madera empleada en la fabricación del cielo raso fue arrastrada por yuntas de bueyes desde zonas ubicadas entre 8 y 12 días de viaje; la reseña más concreta señala que se compraron a las madres carmelitas quinientas cincuenta vigas de madera proveniente de terrenos que ellas poseían en las montañas de Calacalí, población ubicada al noroeste de la provincia Pichincha.

Un nuevo movimiento telúrico de importancia acaecido el 22 de marzo de 1859<sup>8</sup>, provocó daños tanto en la iglesia como en el convento, pero los trabajos de reconstrucción y reparación de daños no se terminaron porque el 16 de agosto de 1868 un terremoto afectó seriamente la iglesia. Al parecer los trabajos de reconstrucción se terminaron hacia 1899, con la aplicación de una capa de pintura a todo el cielo raso. (Guerra, P. 2004)

Otro seísmo de consideración, y que afectó a las techumbres de la iglesia, se produjo el 16 de diciembre de 1923<sup>9</sup>; y las refacciones acometidas en los artesonados se terminaron en 1926. Finalmente el 5 de marzo de 1987<sup>10</sup> un fuerte seísmo afectó nuevamente a la iglesia y

---

<sup>8</sup> Desde el terremoto de 1755 hasta este de 1859 se produjeron otros movimientos sísmicos de los que no se tiene constancia de daños en el convento en los años 1760, 1768, 1797 y 1855. (Gómez, G. 2004)

<sup>9</sup> En 1877, 1896, 1911 y 1914 se produjo nueva actividad sísmica pero sin causar daños. (Gómez, G. 2004)

<sup>10</sup> Otros sismos de importancia que se sintieron en Quito pero que no afectaron al convento se produjeron en 1929, 1938 y 1949; éste último se produjo en Pelileo, provincia de Tungurahua, y afectó seriamente varias poblaciones de esta misma provincia así como a otras de las provincias de Cotopaxi, Chimborazo y Bolívar. Se produjeron cambios en la orografía e hidrografía de la zona. La población de Pelileo fue completamente destruida, y la actual se construyó a varios kilómetros de la anterior, conocida ahora como Pelileo Viejo. Se estima que murieron unas 6000 personas y la destrucción, en porcentaje, de algunas ciudades de las provincias afectadas varió entre el 75 y 100%. (Gómez, G. 2004)

sus techos, y se realizaron amarres de emergencia para evitar la caída del cielo raso. (Guerra, P. 2004; Santander, D. 2004)

El resultado de este proceso de destrucción – reconstrucción que se ha venido produciendo desde el momento mismo de construcción de la iglesia, es la actual combinación de estilos renacentista, manierista, mudéjar, barroco y rococó. Otro factor que definió la mezcla de estilos es que los trabajos se realizaban según se contaba con recursos económicos necesarios, para emprender estas tareas. Las formas más usadas para recabar dinero fueron, por un lado, los censos aplicados a las propiedades de particulares, y por otro lado las donaciones, ya sean en metálico o en especie y la mano de obra de peones de haciendas cercanas. (Guerra, P. 2004; Santander, D. 2004)

## **2.2. DESCRIPCIÓN DE LA IGLESIA Y TECHUMBRES.**

El conjunto conventual, del cual forma parte la iglesia de San Francisco, ocupa un área aproximada de 35.000m<sup>2</sup> y está ubicado en el lado este del centro histórico de Quito, a 2.830msnm<sup>11</sup> en las laderas orientales del volcán Pichincha.

Los límites del convento son ortogonales, conforme el trazado original de la ciudad; siendo sus linderos norte, este y sur, sendas calles,

---

El terremoto del 6 de marzo de 1987 se produjo en la zona de la cuenca alta del Amazonas, siendo sus efectos destructivos menores que el del 49; sin embargo los daños en Quito y en el patrimonio cultural fueron importantes.

Después de este terremoto se creó la Ley de Fondo de Salvamento, según la cual, un porcentaje de las recaudaciones fiscales de cada provincia sería destinado a acciones de preservación del patrimonio cultural.

<sup>11</sup> Altitud de la pileta central del convento, expresada en metros sobre el nivel del mar (Rodríguez, R. 2004).

mientras que el frente del convento, orientado hacia el oeste, colinda con la plaza de San Francisco, y se divide espacialmente de ésta con un atrio que recorre todo el costado de la plaza.

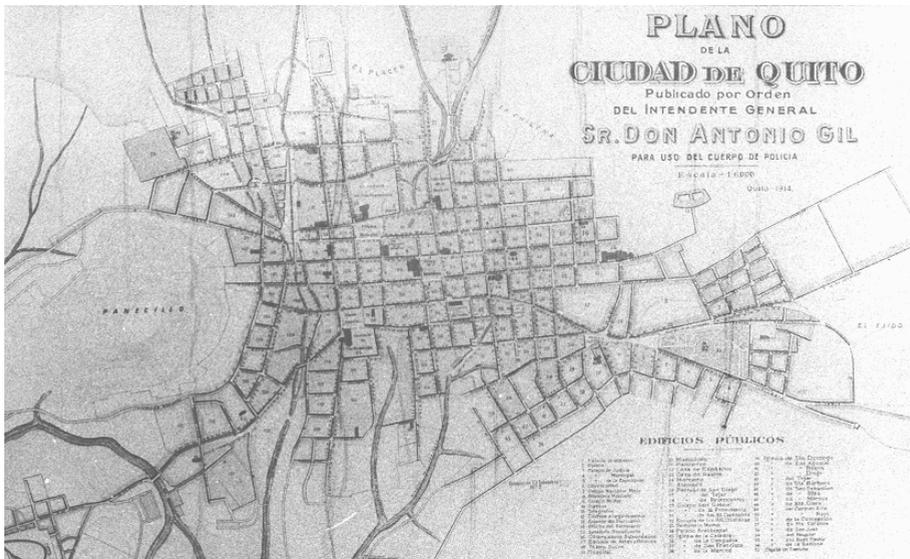


ILUSTRACIÓN 9: Plano de la ciudad de Quito, 1914. Documento en base al cual se delimitó el área del centro histórico de esta ciudad. Biblioteca Aurelio Espinoza Pólit. En Benítez, J. 1999.

El desnivel existente entre la plaza y el atrio se salva con tres escalinatas: dos rectas, cada una construida en los extremos norte y sur del atrio, y la tercera, de planta circular, en el centro del atrio y justo frente a la entrada principal y fachada de la iglesia, la cual, al ser de piedra destaca sobre los blancos muros del convento.

La fachada de la iglesia está construida guardando el plano vertical de los muros y está dividida verticalmente en tres calles, que se corresponden a los espacios internos de las naves, y horizontalmente en dos cuerpos que se corresponden con las alturas de las mismas naves. Sobre las calles laterales del segundo cuerpo se alzan dos torres de un

solo cuerpo cada una, con remates piramidales y coronadas con esculturas en piedra de los santos Francisco y Pablo.

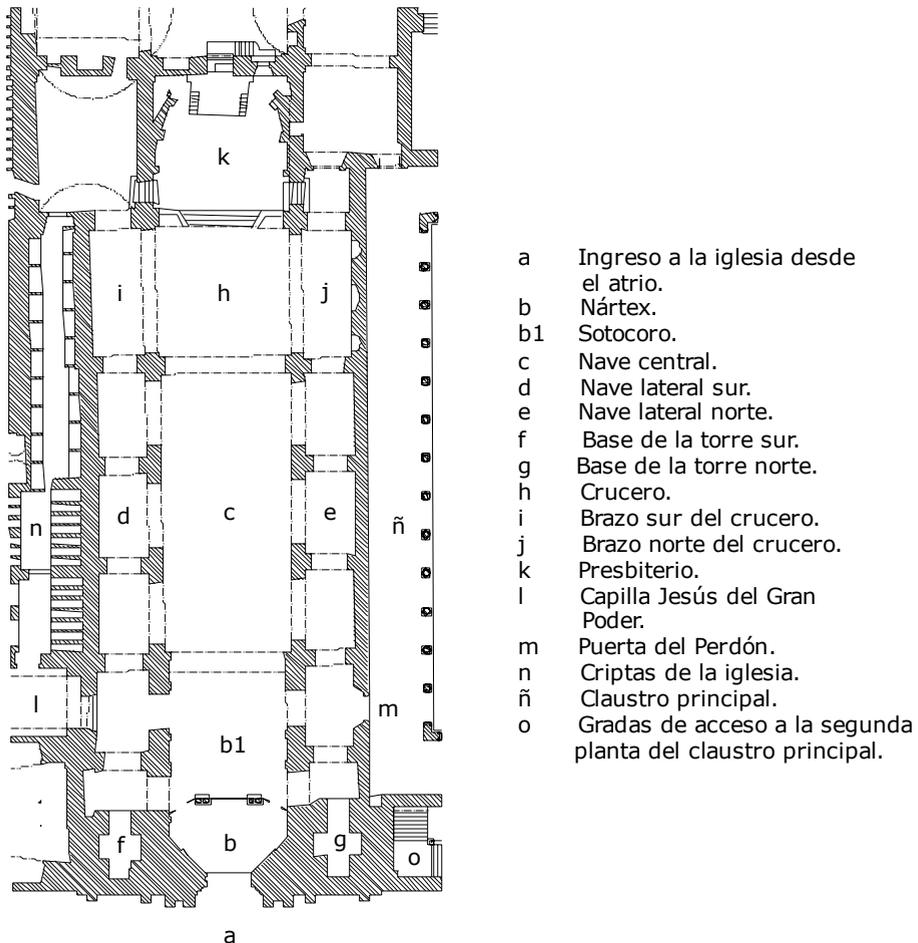


ILUSTRACIÓN 10: Planta general de la iglesia y espacios.  
Basado en Arias, J. En Vega, H. 2004.

Interiormente, la iglesia está compuesta por tres naves longitudinales (c, d, e), un transepto (h, i, j) y presbiterio (k). Al pie de la nave central se encuentran el nártex (b) y sotocoro (b1), sobre los cuales se halla el coro; mientras que a los pies de las naves laterales se ubican las bases de las torres (f, g).

Los espacios de las tres naves están delimitados por arcos de medio punto; el cruce de la nave central y el transepto está limitado por arcos apuntados; y el presbiterio se separa de la zona de crucero por escalinatas rectas. Ambas naves laterales se subdividen con arcos de medio punto formando así tres capillas por nave.

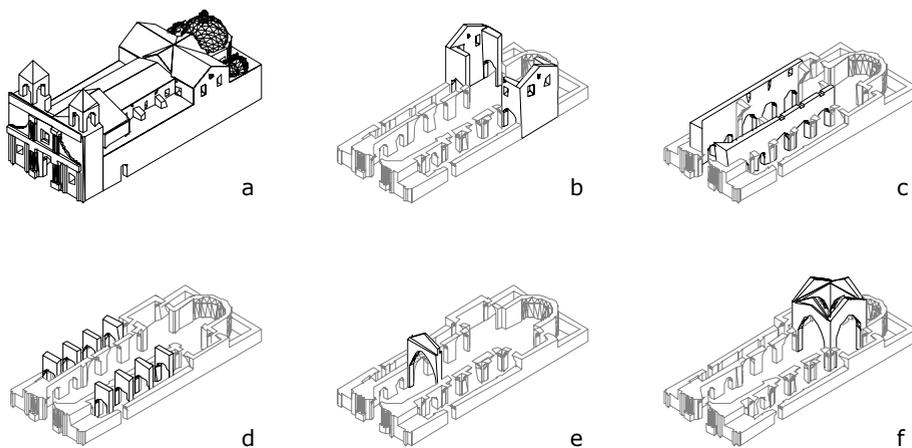


ILUSTRACIÓN 11: Isometría general de la iglesia (a) y cortes isométricos (b – f). Muros testeros y laterales del transepto (b). Muros de la nave central (c). Arcos de medio punto dividiendo las naves laterales (d). Arco apuntado, límite entre el coro y la nave central (e). Arcos torales apuntados en el crucero. Sus prolongaciones inclinadas se corresponden con las inclinaciones de los artesonados y cubiertas (f).

Cada uno de los espacios arriba indicados están cubiertos de diferente manera, así: el coro y transepto (crucero y extremos del transepto) con artesonados; la nave central con una tablazón suspendida o cielo raso plano con apliques decorativos; cada subdivisión de las naves laterales, con cúpulas rebajadas; y el presbiterio con una cúpula.

El transepto de la iglesia está cubierto con tres artesonados, uno por cada área, crucero, y extremos, norte y sur, del transepto.

El área total de los cuerpos del artesonado del crucero es de 142m<sup>2</sup>. El centro del almizate se encuentra a 18,20m sobre la perpendicular proyectada al piso de la iglesia, y el arranque de los faldones a 16,28m.

El área total de los cuerpos del artesonado en el transepto sur es de 62,37m<sup>2</sup>, mientras que el transepto norte cubre un área de 58,24m<sup>2</sup>. El centro del almizate en ambos se encuentra aproximadamente a 15,80m sobre la perpendicular proyectada al piso de la iglesia, y el arranque de los faldones a 13,50m aproximadamente.

El artesonado del crucero inicia con una franja de 48 tallas de santos franciscanos sobre el nivel de los arcos que separan por el norte y por el sur los extremos del transepto, por el este de la nave central y por el oeste del presbiterio. Los artesonados de los extremos del transepto inician con tallas de 10 santos franciscanos por cada lado, excepto en las paredes norte y sur donde se encuentran los remates de los respectivos retablos. En algunas de las tallas se encontró evidencia de esgrafiados bajo la capa actual de pintura.

Como elementos decorativos los artesonados presentan lacería, 30 querubines de un total de 36 que deberían haber en los artesonados de crucero y transeptos distribuidos como sigue: 12 en harneruelo, 12 en los extremos norte del transepto y 15 en el extremo sur, once pinjantes, 4 colocados en las esquinas del mocárabe de la nave central, tres piñas en los límites del harneruelo y cuatro más en las bases de las pechinas. En los dos extremos del transepto existen dos pinjantes por cada extremo. En el interior del mocárabe central existen conjuntamente con el decorado barroco 8 atlantes.



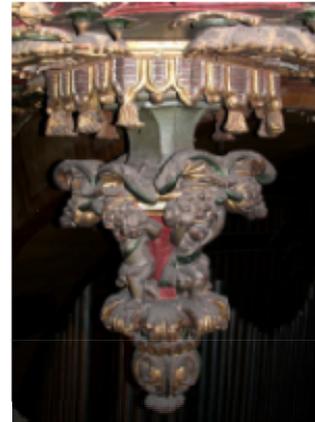
ILUSTRACIÓN 12: Artesonado crucero. ILUSTRACIÓN 13: Artesonado crucero.  
Detalle del inicio, santos franciscanos. Detalle del mocárabe y pinjantes.  
Fotografía: Luis Subía (2004) Fotografía: Luis Subía (2004)

La nave central está cubierta con un cielo raso de estilo barroco de forma rectangular, compuesto de tres cuerpos igualmente rectangulares, uno central horizontal y dos laterales, sur y norte, inclinados; los tres, emplazados en sentido longitudinal, paralelos a la nave central de la iglesia.

El área total que cubren los tres cuerpos de este artesonado es de 245,21m<sup>2</sup>. El cuerpo central se encuentra a 14,70m sobre la perpendicular proyectada al piso de la iglesia, y los laterales se unen a los muros a 13,26m.

Los tres cuerpos arrancan desde el arco ojival que separa el área correspondiente al coro y termina en el siguiente arco ojival que separa la nave del crucero. Justo debajo de los cuerpos laterales se encuentran seis ventanas que permiten el ingreso de luz solar durante el día e iluminan toda la superficie del cielo raso.

Como elementos decorativos contiene: molduras curvas de bordes tallados; tallas de ángeles, arcángeles y escudos; esculturas de atlantes y pinjantes. Todos estos elementos fueron policromados.



ILUSTRACIONES 14 y 15: Cielo raso de la nave central.  
Vista rasante de molduras decorativas y detalle de pinjantes.  
Fotografía: Luis Subía (2004)

En total existen doce pinjantes, cuatro mayores colocados en el cuerpo central con representaciones de atlantes sosteniendo el remate del pinjante y ocho menores distribuidos dos por cada cuerpo lateral y cuatro en el central.

Junto a la torre norte se ubica la escalera que comunica las plantas baja y primera del claustro principal, desde donde se ingresa al coro de la iglesia; si se continua subiendo por la misma torre norte, se llega a las cubiertas, donde se ubican cuatro aberturas de algo más de medio metro cuadrado cada una, por las cuales se accede al extradós de los artesonados y cielo raso.

Dos de estas aberturas se encuentran en la prolongación del muro de separación entre las naves central y lateral norte; una tercera se ubica sobre el costado este del extremo norte del transepto y la última abertura está situada sobre el lado oeste del extremo sur del transepto.

Al atravesar cualquiera de las dos aberturas orientadas hacia el norte, se accede al espacio comprendido entre el cielo raso y la cubierta de la

nave central; desde donde se puede pasar, por dos pequeñas aberturas, cada una sobre los extremos de la nave central, ya sea al artesonado del coro, o al artesonado del crucero. Volviendo a salir a las cubiertas y penetrando por la abertura orientada hacia el este se accede al artesonado del extremo norte del transepto mientras que si se ingresa por aquella dirigida al oeste, se accede al artesonado del extremo sur del transepto.

Ingresando nuevamente al espacio existente entre la cubierta y el cielo raso barroco se observan, de arriba hacia abajo, las siguientes tres estructuras: la primera (A), una armadura de par y nudillo, que soporta la cubierta de teja cuya cumbrera descansa sobre los vértices de unión entre pares; los nudillos se ensamblan con los pares en el primer tercio de la longitud de éstos; finalmente, los extremos inferiores de los pares se asientan sobre canes, y éstos a su vez sobre una solera embutida en los muros de prolongación de arcos que dividen las naves laterales de la central. En algunos puntos de esta armazón se amarra, por medio de cabestros, el cielo raso.

A un nivel más bajo, se observa la segunda estructura (B), también de par y nudillo que habría sido la armadura de una antigua cubierta, ahora desaparecida y probablemente instalada después del terremoto de 1755. Existe una gran cantidad de anclajes que desde esta armazón sujetan al cielo raso, ya sea por medio de clavos de forja (cuando la estructura y el cielo raso se besan) o por medio de cabestros (cuando ambos elementos no se tocan).

Una tercera estructura (C), de forma trapezoidal, besa completamente al cielo raso y lo sujeta por medio de clavos de forja.

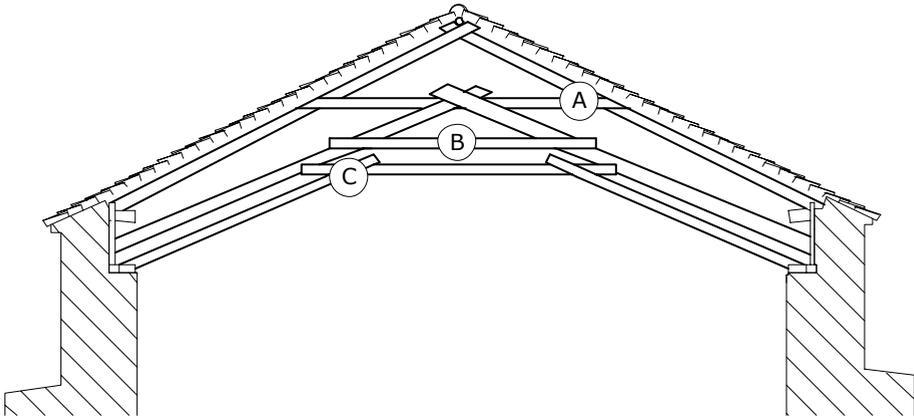


ILUSTRACIÓN 16: Sección de la nave central a la altura del cielo raso y cubierta. Estructuras A, B y C desde las que pende el cielo raso. Basado en Arias, J. En Vega, H., 2004.

El cielo raso, está conformado por una serie de módulos rectangulares, de estructura reticular (R), en los que se encajan las tablas de fondo para formar una sola superficie plana hacia la cual se clavaron todos los elementos decorativos propios del estilo barroco.

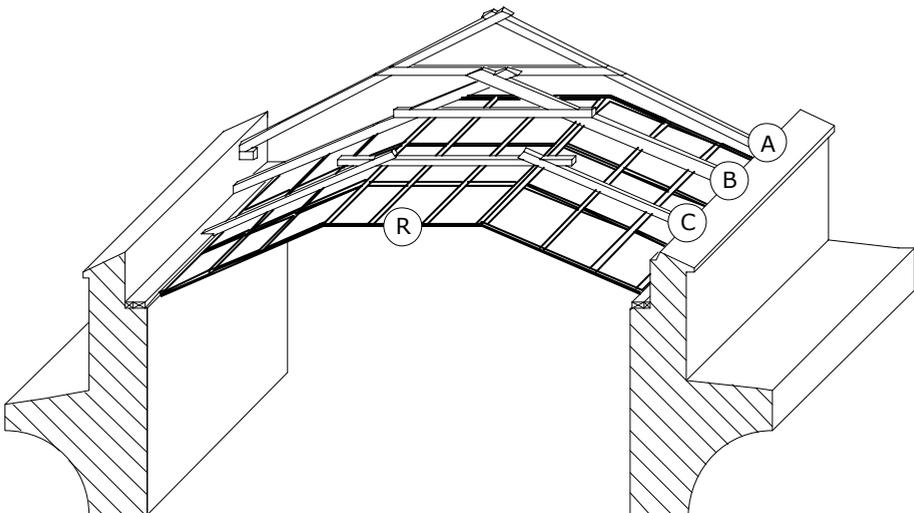


ILUSTRACIÓN 17: Sección en perspectiva de nave central y cubierta. Estructuras A, B y C desde las que pende el cielo raso, y retícula (R).

## **2.3. MATERIALES Y TÉCNICAS DE EJECUCIÓN DE LAS TECHUMBRES.**

En este apartado, se explican aspectos relativos a los procedimientos seguidos para la confección de las techumbres y sus acabados decorativos. Toda la información a continuación presentada fue recabada por el mismo autor de esta tesis observación y medición directa, con la colaboración de Mario Rosero y Juan Arias, en el mismo lugar de emplazamiento de las techumbres; los análisis químicos de los estratos pictóricos fueron realizados por la empresa Restauraquim S.A.

### **2.3.1. SISTEMA DE CONSTRUCCIÓN DE ARTESONADOS.**

Los artesonados emplazados en el transepto, están compuestos por los mismos elementos básicos: pares, nudillos, travesaños y tablas decorativas; pero su conclusión es diferente en función del formato del proyecto inicial. Para facilidad de la lectura, se explicará primero la forma de construcción de los artesonados ubicados en los extremos del transepto, de formato rectangular, y después se abordará aquel del crucero, de planta octogonal.

#### **ARTESONADOS DE AMBOS EXTREMOS DEL TRANSEPTO.**

Las techumbres ubicadas en los extremos norte y sur del transepto fueron construidos de forma similar y en base únicamente a la sucesión de armaduras de par y nudillo. Los pares asientan sus extremos inferiores sobre soleras ubicadas en los muros laterales, y apoyan sus extremos superiores contra una hilera embutida en el muro testero y la prolongación del arco toral que separa el crucero del extremo del

transepto. Cada nudillo se une a sus correspondientes pares a un tercio de la longitud de éstos. Separando cada armadura de par y nudillo se encuentran travesaños horizontales. Por último, las tablas decorativas cubren los espacios existentes entre los pares y están clavadas directamente sobre estos sin ningún encastre.

Para el armado de estos artesonados, los trabajadores iniciarían colocando la hilera (a), apoyada en el muro testero (b) y la prolongación del arco toral del crucero y las soleras (c) en los muros este y oeste (d). A continuación colocaron los dos primeros pares (e) o alfardas con su nudillo común (f).

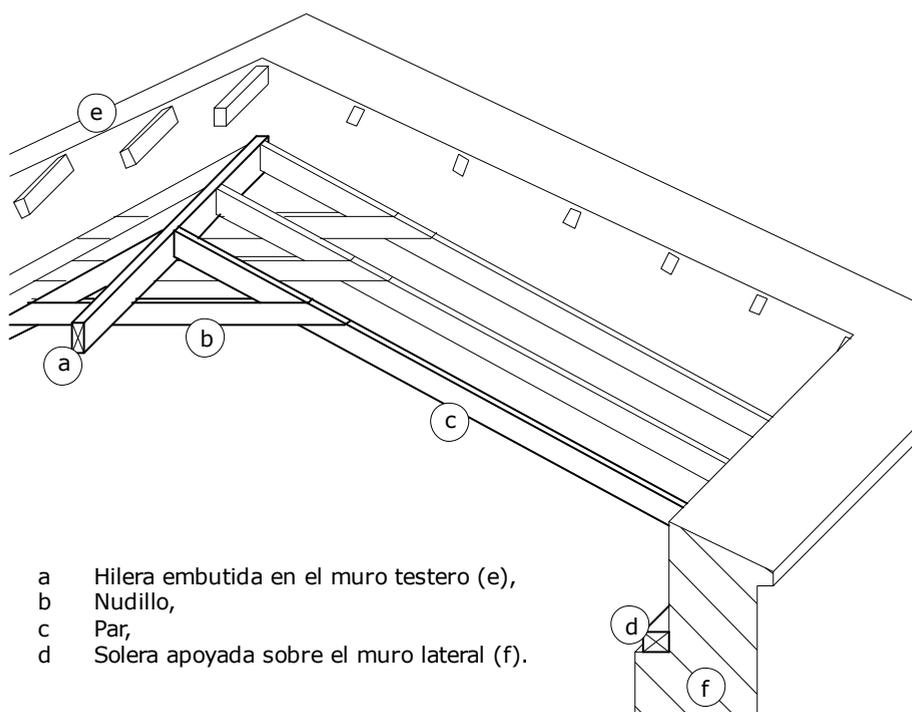
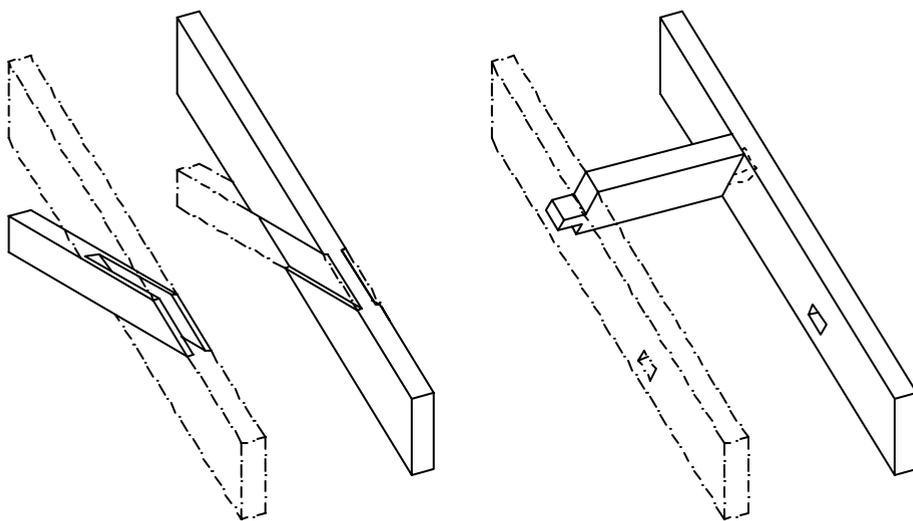


ILUSTRACIÓN 18: Detalle en perspectiva de la estructura de par y nudillo de los artesonados del transepto.

Los extremos inferiores de los pares fueron desbastados para formar la barbilla que se asienta sobre la solera, mientras que los extremos superiores de cada par se une a la hilera a tope recto; ambas uniones están reforzadas con clavos de forja.

Cada nudillo se une a sus pares a la altura del tercio superior de los segundos con un ensamble de horquilla. El nudillo forma la horquilla, donde cada cornezuelo mide  $1/5$  el ancho del nudillo, y cada par forma la garganta, que mide  $3/5$  el ancho del par. Hay que recordar que tanto el par como el nudillo tienen el mismo ancho, variando únicamente su espesor. Aparentemente este ensamble, se complementa con una barbilla y espera al interior de la unión.



ILUSTRACIONES 19 y 20: Detalles de ensambles de horquilla, entre par y nudillo, y, de espiga desplazada, entre pares y travesaños.

Después de colocada esta primera armadura, se encastraban los travesaños en los pares y nudillo con ensambles a espiga desplazada; a continuación se colocaba la siguiente armadura de par y nudillo, y se repetía la secuencia hasta terminar con la armadura número 13 en el

extremo sur del transepto y en la armadura número 12 en el extremo norte del transepto.

De esta manera, los pares forman los faldones, es decir, los planos inclinados del artesonado, mientras que los nudillos forman el almizate, plano horizontal.

#### ARTESONADO DEL CRUCERO.

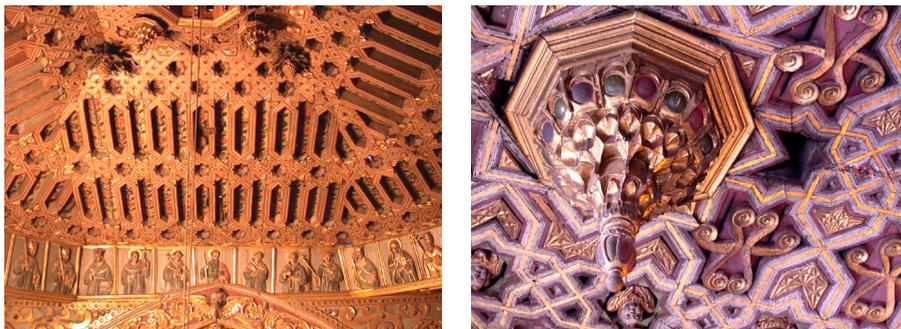
Para la construcción del artesonado del crucero, los trabajadores primero armaron los faldones norte y sur, aplicando la misma secuencia explicada para los artesonados del transepto; fijando así 8 armaduras de par y nudillo apoyadas sobre soleras ubicadas en los arcos torales norte y sur.

Después montaron los faldones orientados a oriente y occidente con pares asentados en soleras colocadas en los arcos torales este y oeste. La longitud de los pares es la justa necesaria para alcanzar el nivel de los nudillos que unen los faldones sur y norte. El método de unión entre estos pares y los nudillos es a tope recto, y están alineados con los travesaños que unen los nudillos de las armaduras anteriormente colocadas. El resultado es una estructura plana, cuadrada y reticular en cuyo centro colocaron la caja del mocárabe. Esta caja se arma contra un perímetro octogonal de madera formado por 4 elementos (cerrando el cuadrado límite), en el interior colocaron 4 cuadrantes (en la actualidad solo existen 3) formando escuadras de 45° que dan la forma ochavada de la caja; contra esta estructura perimetral se colocaron tablas de respaldo para recibir las piezas del mocárabe.

Los espacios no cubiertos por estos cuatro faldones se cerraron con igual número de armaduras de limas, donde los elementos longitudinales,

correspondientes a los pares, apoyados en el cuadrado y manteniendo la perpendicularidad con éste, se proyectan hasta alcanzar el par más próximo.

Finalmente, los espacios existentes entre los cuadrado de apoyo a las armaduras de limas y los arcos torales fueron completados con cuatro pechinas horizontales. Dos armadas de forma reticular donde los largueros se colocaron perpendicularmente a la proyección del cuadrado correspondiente. Y las otras dos armadas con largueros paralelos a la proyección del cuadrado correspondiente.



ILUSTRACIONES 21 y 22: Artesonados del crucero y transepto.  
Detalle de lacerías.  
Fotografía: Subía, L. (2004).

Por la cara inferior, los pares, nudillos y travesaños de los tres artesonados, forman la lacería decorativa; los artesanos desbastaron las zonas de los pares donde se cruzan los lazos para formar las estrellas. Procedieron luego a labrar con un acanalador<sup>12</sup> las ranuras de las lacerías en las zonas no desbastadas de los pares. Paralelamente habrían preparado molduras planas con el mismo acanalado de los pares, para colocarlas en los desbastes, para formar los lazos, igualando

---

<sup>12</sup> Herramienta de desbaste que permite realizar molduras iguales, paralelas y en gran cantidad, la hoja de metal que trabaja la madera, tiene la forma de la moldura que se deseaba realizar: media caña.

así el nivel de la lacería. Estas molduras fueron sujetadas con clavos de forja.

Todos los artesonados mantienen una estructura prácticamente independiente de la cubierta, solamente el harneruelo del crucero y los pares de los transeptos a la altura del nudillo se encuentran amarrados hacia la estructura de cubierta o hacia lo que fueron vigas de una cubierta anterior.

### **2.3.2. SISTEMA DE CONSTRUCCIÓN DEL CIELO RASO.**

Como se indicó en la descripción del cielo raso, la estructura reticular que conforma la tablazón plana de la techumbre, pende de tres estructuras que enumeradas desde el extradós hacia el intradós son: la actual armadura de cubierta, denominada A; una segunda estructura, B, en un nivel más bajo, que habría formado una antigua armadura de cubierta; y, la tercera estructura, C, que besa y da forma a los cuerpos inclinados laterales y el horizontal central del cielo raso.

De estas tres estructuras superiores, la estructura A no está considerada como parte del cielo raso, porque su función es la de soportar el tejado de la nave central, aunque en determinados puntos esta armadura soporte al cielo raso.

Sin embargo, las estructuras B y C, al no soportar cargas superiores, y destinadas exclusivamente a sujetar el cielo raso, si se consideran como estructuras de esta techumbre, y se las describe a continuación:

La estructura B de par y nudillo, que posiblemente formó una antigua armadura de cubierta, sin elementos que la arriostren, en número de 13 contados desde el coro hacia el crucero. Los encuentros entre cada elemento es a media madera, reforzado con clavos forjados y en algunos casos están atados con cabestros.

La estructura C, pegada al cielo raso y manteniendo la forma de éste, está compuesta de tres elementos correspondientes a las tres superficies del cielo raso. Existen 6 en total, 5 colocadas hacia el coro y la sexta colocada hacia el crucero. Los puntos de unión de cada elemento están resueltos a media madera y reforzados con clavos de forja.

Con relación a la estructura reticular que, de forma modular, compone la superficie plana del cielo raso, se establecieron tres formatos diferentes que se repiten en las tres superficies del cielo raso.

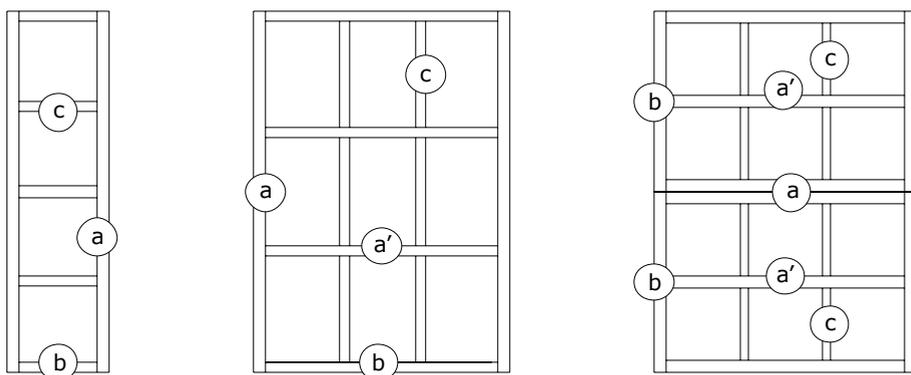
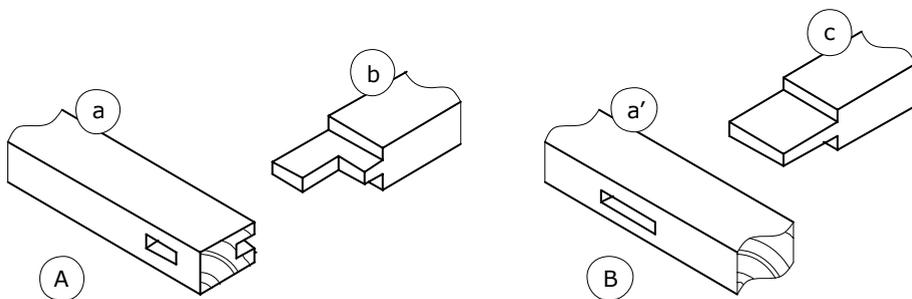


ILUSTRACIÓN 23: Tipos de módulos de la estructura reticular.  
Basado en Arias, J. En Vega, H., 2004.

Estos formatos, todos rectangulares, están conformados por dos largueros principales (a) y dos cabezales (b) que delimitan cada módulo.

La diferencia entre cada tamaño radica únicamente por el número de largueros secundarios (a') y travesaños (c).

Los ensambles de los elementos perimetrales: largueros (a) y cabezales (b) son espigas rebajadas (A); mientras que aquellos de los elementos interiores: travesaños (c) y largueros secundarios (a') son espigas simples pasantes (B).



ILUSTRACIONES 24 y 25: Ensamblaje de la estructura reticular: espiga rebajada (A) y espiga simple pasante (B).

Las tablas de fondo están encajadas y aseguradas con clavos forjados en los batidos practicados en los cabezales, largueros principales y secundarios de cada módulo. Los travesaños (que no tienen batido) están besados a la cara superior de las tablas de fondo. Todos los clavos se dirigen desde el intradós hacia los elementos que forman la estructura reticular.

Contra la superficie plana de las tablas de fondo, se sujetaron con clavos y clavijas las molduras y tallas decorativas de estilo barroco.

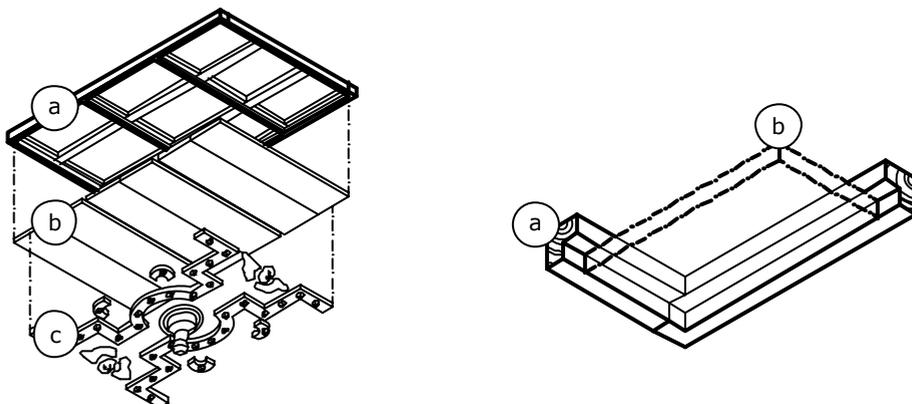


ILUSTRACIÓN 26 y 27: Armado de módulos y detalle de batido para recibir las tablas decorativas. Estructura reticular (a), tablas de fondo (b) y aplique decorativo (c).

Como se indicó, los módulos se sujetan con cabestros a las estructuras superiores A y B, y con clavos de forja a la estructura C.

La manera en que los cabestros agarran a los módulos son dos: la primera, amarrándolos en las secciones desbastadas a  $\frac{1}{2}$  madera en travesaños y largueros; se contabilizaron 203 de estas sujeciones. Mediante el entorchado de los cabestros, se habría controlado el nivel de la tablazón.

Y la segunda, sujetando desde el intradós por medio de una varilla metálica cuyos extremos forman dos aros en los extremos, en el aro inferior se colocó un pasador metálico que sujeta los tableros, y en el aro superior se amarra el cabestro; este tipo de sujeción sumaron 74 unidades.

En el caso de la sujeción a la estructura C, emplearon clavos de forja, los cuales penetran desde el intradós hacia la estructura C; una vez que la punta del mismo ha atravesado la cara superior de la estructura C, se

doblaba la punta y en algunos casos redireccionado hacia los paneles a manera de grapa.

Las juntas entre los módulos están realizadas a media madera en todo el canto de los largueros, y están reforzados con clavos. Estos clavos, tres por unión, fueron introducidos desde abajo hacia arriba, ingresando por el larguero que presenta mayor superficie para salir por aquel que igualmente presenta mayor superficie. Las puntas de los clavos son dobladas en la parte superior del módulo.

Los cuerpos inclinados se juntan con el central por contacto simple, sin un ensamble específico (tope recto); la unión es efectiva por medio de clavos forjados, colocados todos con dirección y sentido desde el extradós hacia el intradós.



ILUSTRACIONES 28 y 29: Cielo raso.  
Detalle de pinjante y sistema de sujeción superior.  
Fotografía: Subía, L. (2004).

Los elementos colgantes suman 16, de los cuales 12 menores, se sujetan a los tableros mediante una espiga con llave de cuña. Los cuatro elementos restantes, y mucho mayores que los anteriores, presentan el mismo sistema de espiga con llave de cuña, pero los tres mas cercanos

al crucero están reforzados con cabestros que se sujetan en la estructura de cubierta.

El trabajo de confección de los módulos se realizó en tierra, donde los elementos de la retícula: largueros principales, cabezales y largueros secundarios y travesaños eran armados en seco<sup>13</sup> con cajas espigas pasantes, excepto en las uniones de largueros principales con cabezales donde se realizaron espigas escalonadas para evitar la separación de los elementos. Se emplearon clavijas en las espigas escalonadas y posiblemente cuñas en las espigas pasantes como refuerzos de estas ensambladuras al momento del armado definitivo.

Desarmados los módulos, se trazaba con punzón y gramil<sup>14</sup> las líneas para las cajas, batidos y espigas. Con guillame<sup>15</sup> se realizaban los batidos para los tableros. Las cajas de las espigas se desbastaron con formones y las espigas con sierra y formón. Las tablas eran cortadas con tronizador<sup>16</sup>; el espesor se obtenía cortando tablas con san José<sup>17</sup> o planeadas con azuela<sup>18</sup>. Sin embargo, las caras que serían pintadas y algunas de las que quedaron hacia la estructura debieron ser trabajadas y pulidas con garlopas<sup>19</sup> y cepillos, y pulidas finalmente con rasquetas<sup>20</sup>. Comprobado en seco que todo encajaba y cerraba bien, se procedió al

---

<sup>13</sup> Armado previo sin empleo de adhesivo. Al momento del armado definitivo ya se puede emplear adhesivo.

<sup>14</sup> Herramienta para trazar líneas paralelas.

<sup>15</sup> Herramienta para desbaste similar al cepillo de carpintero, no tiene guardas a los lados.

<sup>16</sup> Herramienta para corte, hoja metálica dentada con empuñadura en los dos extremos.

<sup>17</sup> Herramienta para corte, hoja metálica dentada delgada, tensada por el entorchado de una piola.

<sup>18</sup> Herramienta para desbaste similar a un azadón pero de menor tamaño.

<sup>19</sup> Herramienta para desbaste similar al cepillo de carpintero.

<sup>20</sup> Hoja metálica gruesa empleada para pulir en vez de lijas.

armado definitivo empleando adhesivo y realizando los orificios de las clavijas o tarugos con barrenas<sup>21</sup>.

Posteriormente se colocaron las molduras planas que forman la lacería curva, asegurándolas con clavos y clavijas. Algunos de estos lazos son continuos mientras que otros presentan corte en los bordes de los paneles lo que hace pensar que éstos últimos fueron colocados en tierra.

Los elementos que fueron colocados por último y una vez montado el cielo raso son las tallas de escudos, querubines, algunas decoraciones florales y las molduras curvas que se montan en la unión de los módulos.

Aparentemente no existe lógica en la colocación de los cabestros, pero al observar la distribución de las diferentes formas en que éstos unen la estructura modular a las estructuras A (de la cubierta actual), B y C, se puede plantear de forma hipotética que:

- Inicialmente los cabestros fueron colocados en la estructura reticular, en los desbastes efectuados al mismo nivel de las tablas de fondo dejando únicamente entre 2,5 y 3cm se espesor en la cara superior de la retícula.
- En un segundo momento, después de haberse producido la rotura de algunos elementos, en especial travesaños, realizando nuevos desbastes en la madera de los elementos adyacentes para colocar más cabestros.
- Un tercer momento fue necesario para que las sujeciones fueran colocadas desde las tablas de fondo con pasadores metálicos ya que los

---

<sup>21</sup> Herramienta para perforación.

sistemas anteriores no cumplían su cometido. Los puntos seleccionados para estas sujeciones, coinciden con las zonas de mayor deterioro y peso. Las perforaciones para los pasadores metálicos se realizaron tanto en los lugares donde anteriormente hubo desbaste a  $\frac{1}{2}$  madera, como en las uniones entre módulos ya que así se sujetan dos estructuras reticulares de forma simultánea.

- Durante una cuarta intervención, realizada en la primera mitad del siglo XX, se sujetaron nuevos cabestros pero en esta ocasión al no existir elementos sanos para desbastar y amarrar los cabestros, se vieron obligados a clavarlos.

El resultado de estas intervenciones es la gran cantidad de cabestros y la aparente falta de sentido en su colocación.

Independientemente del punto de sujeción de los cabestros, éstos fueron anclados en diferentes puntos de las estructuras A, B y C, y en viguetas apoyadas entre estas mismas estructuras.

### **2.3.3. DECORACIONES Y POLICROMÍAS.**

A continuación se detallan los materiales y técnicas empleadas tanto en el cielo raso como en los artesonados. La explicación que sigue a continuación se basó en las observaciones directas realizadas por el autor de esta tesis y los análisis químicos efectuados por la empresa Restauraquim S.A.; según dichos análisis, se puede afirmar que casi todos los materiales y técnicas pictóricas existentes tanto en el cielo raso como en los artesonados, poseen similares características.

### **2.3.3.1. SOPORTE.**

Tablas de madera vista (por las caras superiores) y policromadas (por las caras inferiores). Éstas debieron ser cortadas, planeadas<sup>22</sup>, pulidas. Las caras inferiores debieron ser imprimadas con una solución de cola orgánica – agua, conforme la técnica que aún hoy es empleada por artesanos, previo el estucado.

#### ARTESONADOS.

Las tablas fueron aseguradas con clavos y clavijas hacia la estructura de pares inferior. Algunas juntas entre tablas decorativas y pares fueron cubiertas con tela policromada.

#### CIELO RASO.

Las tablas están sujetas desde el intradós con clavos metálicos hacia la estructura reticular. Cintas de tela cubren las juntas entre cada módulo reticular.

### **2.3.3.2. BASE DE PREPARACIÓN.**

De los análisis químicos<sup>23</sup> realizados a muestras extraídas de diferentes puntos de los artesonados y cielo raso, se dedujo que todas las superficies policromadas presentan una base de preparación porosa de color blanco y espesor considerable compuesta por una carga inerte, sulfato de calcio, y aglutinada con materia proteínica, muy probablemente cola animal o cola fuerte.

---

<sup>22</sup> Procedimiento que permite obtener una cara horizontal en la pieza de madera.

<sup>23</sup> Análisis realizados por la empresa Restauraquim S.A. y firmados por Lourdes Cevallos, Doctora en Ciencias Químicas y Farmacia.

### **2.3.3.3. POLICROMÍA.**

Capa pictórica opaca y cubriente en las tablas decorativas (diseño floral), caras inferiores de las estructuras de artesonados y reticular de cielo raso, como fondo de santos franciscanos (en el artesonado del crucero). El color es muy parecido en todos los elementos policromados. Los santos franciscanos poseen encarne brillante, algunos poseen vestimentas con corlas sobre lámina metálica.

De los análisis químicos realizados se han establecido dos técnicas de capa pictórica, una lipófila y otra hidrófila. Ambas técnicas se repiten tanto en los artesonados como en el cielo raso, manteniendo los mismos componentes, variando únicamente los colores empleados.

La primera técnica indicada, óleos, está aplicada en las tablas de fondo, molduras, encarnes y vestimentas. Está conformada por pigmentos opacos y cubrientes aglutinados con aceites secantes. La naturaleza de los pigmentos no fue determinada. Probablemente el aglutinante empleado fue aceite de linaza.

En el caso de la segunda técnica, corlas, están aplicadas en elementos florales, frutales y algunas vestimentas. Se trata de tintes o colorantes no cubrientes aplicados sobre lámina metálica. El aglutinante empleado podría ser de tipo proteínico fibrilar o globular.

No se encontró evidencia de una capa de protección.





### **3. ESTUDIO DIAGNÓSTICO DE LAS MADERAS, ESTRUCTURA Y SOPORTE, Y LAS POLICROMÍAS DE LOS ARTESONADOS Y CIELO RASO BARROCO DE LA IGLESIA DE SAN FRANCISCO.**

En este apartado se describe, de forma condensada, el estado en que se encontraban las maderas y las policromías de los artesonados y cielo raso barroco de la iglesia de San Francisco<sup>24</sup>.

La información se presenta en orden jerárquico, desde el extradós (estructura y soporte) hacia el intradós (base de preparación y policromías); y cronológico, artesonados – cielo raso.

En cada una de las secciones se indican los siguientes aspectos:

- Alteraciones y factores de deterioro: relación de los daños observados y de agentes considerados como causantes de tales alteraciones.
- Nivel de deterioro: cualidad valorada en tres niveles: bueno, regular y malo; y expresada en porcentaje de la relación entre el valor mensurado y el total.
- Nivel de integridad: cualidad valorada como completo, fragmentado y faltantes, en el caso de la estructura y tablas; y como completo, craquelado y pérdida, en el caso de las policromías. En ambos casos, la estimación está expresada en porcentaje de la relación entre el valor mensurado y el total.

---

<sup>24</sup> Toda la información que a continuación se expone fue recabada por el autor de la presente tesis doctoral como consultor responsable del área de conservación y restauración de las maderas y policromías de los artesonados y cielo raso de la iglesia de San Francisco.

### **3.1. ESTUDIO DIAGNÓSTICO DE LAS MADERAS.**

#### ESTRUCTURA Y SOPORTE.

#### **3.1.1. ALTERACIONES Y FACTORES DE DETERIORO.**

En general, las alteraciones observadas tanto en las estructuras como en las tablas decorativas de los artesonados y del cielo raso, son similares; siendo el alcance de este deterioro diferente en cada caso. Dichas alteraciones son:

- Alabeos o deformaciones pronunciadas.
- Ataque de hongos e insectos xilófagos.
- Desplome y / o pérdida del nivel de los elementos, módulos, faldones o harnueruelos.
- Hollín<sup>25</sup>, polvo, excrementos u otro tipo de materia depositada o adherida a los elementos analizados.
- Mermas, fisuras y grietas de los elementos de las techumbres.
- Ondulación general de la superficie del cielo raso.
- Rajaduras, fracturas u otro tipo de discontinuidad en algún tramo de la longitud del elemento.

Como se comprenderá, estos deterioros son el resultado de la acción de uno o más agentes de deterioro de naturaleza intrínseca o extrínseca ya sea a los materiales empleados o a las técnicas de confección o

---

<sup>25</sup> Hollí: Sustancia crasa y negra depositada por el humo sobre una superficie.

ejecución; y se consideró como necesario determinar la naturaleza de dichas alteraciones para comprender su origen y así establecer tratamientos y procedimientos específicos.

### **3.1.1.1. FACTORES INTRÍNSECOS.**

Como factores intrínsecos vinculados a los deterioros observados, están: las características de la madera y el sistema constructivo.

#### **LA MADERA EMPLEADA.**

Las fuentes bibliográficas estudiadas por Guerra (2004), indican que la madera empleada en la construcción de los artesonados y cielo raso fue el cedro (*Cedrela spp*); sin embargo, ésta no fue la única especie empleada, ya que durante el estudio diagnóstico realizado se identificó las características macroscópicas del sisin (*Podocarpus spp*). A estas dos especies hay que añadir el aliso (*Alnus spp*), identificado durante la elaboración de esta tesis doctoral<sup>26</sup>.

Las especies de maderas indicadas poseen diferentes niveles de resistencia al ataque de organismos xilófagos, diferente comportamiento frente a los cambios microclimáticos y diferente reacción a las fuerzas que intentan deformarlas y son estas tres cualidades las que permiten comprender los niveles de deterioro e integridad observados y mensurados en el apartado anterior; en especial la referida al nivel de deterioro de las estructuras.

---

<sup>26</sup> Procedimiento explicado en la Primera etapa del apartado destinado al Desarrollo experimental.

### Características de las maderas encontradas

	<i>Cedrela spp</i>	<i>Podocarpus spp</i>	<i>Alnus spp</i>
<i>Durabilidad natural</i>	Durable frente a hongos; resistente a insectos; medianamente durable a las termitas.	Poco o moderadamente durable.	No durable frente a la acción de hongos; sensible a los anobios, hespherophanes y termitas.
<i>Densidad (g/cm<sup>3</sup>)</i>	0,45 – 0,60	0,48 – 0,55	0,50 – 0,55
<i>Contracción</i>	Medianamente nerviosa	Poco nerviosa	Poco nerviosa
<i>Módulo de elasticidad (N/mm<sup>2</sup>)</i>	7.420 – 7.930	9.500	7.500 – 1.500
<i>Elementos confeccionados con cada especie.</i>	Estructura de artesonados  Tablazón de artesonados	Estructura de cielo raso  Tablazón de artesonados y cielo raso	Estructura de cielo raso  Tablazón de artesonados y cielo raso

Basado en AITIM (1997); INEFAN, s/f; Tobar, G. 2008

## SISTEMA CONSTRUCTIVO DE LOS ARTESONADOS.

La estructura principal de los artesonados, compuesta por pares, nudillos y travesaños, es autoportante y presenta un sistema coherente de transmisión de cargas hacia los muros sin mostrar daños debidos a una inadecuada construcción.

Sin embargo, en el extremo sur del transepto, siete extremos de los pares no tienen la longitud necesaria para apoyarse en la cumbrera

manteniendo su posición por la sujeción con cabestros hacia la viga de la cubierta antigua. El motivo de que los pares de este artesonado no alcancen a la cumbrera se desconoce.

El harneruelo del crucero, presenta en su lado norte, una separación considerable de la posición original. La separación menor se encuentra en el nudillo 1 (extremo noreste del harneruelo) midiendo en el momento del estudio 3cm, y aumentando a 10cm en los nudillos 2, 3 y 4. En el nudillo 5 la separación es de 13cm, y la máxima separación (18cm) se midió en el nudillo 6. El nudillo 7 disminuye a 16 cm de separación y el nudillo 8 (extremo noroeste del harneruelo) se encuentra empatado correctamente y sin separación de su respectivo par. Según Gómez (2004) este deslizamiento se habría producido durante uno de los movimientos sísmicos que soportó la edificación.

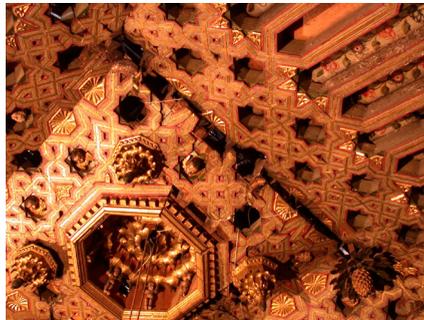


ILUSTRACIÓN 30: Harneruelo, artesonado del crucero.  
Zona desplazamiento entre el harneruelo y faldón norte.  
Fotografía: Subía, L. (2004).

## SISTEMA CONSTRUCTIVO DEL CIELO RASO BARROCO.

A diferencia de los artesonados, el sistema constructivo del cielo raso no es autoportante y pende, por medio de cabestros, de tres estructuras superiores; los puntos de anclaje practicados en la estructura reticular mermaron la resistencia de dicha estructura y las variaciones de

humedad del ambiente y en especial de agua lluvia filtrada desde la cubierta aumentaban y disminuían la tensión de los cabestros.

Estas falencias, en combinación con la baja resistencia natural de la madera, frente al ataque de organismos xilófagos, han perjudicado la conservación de esta techumbre, instalada al final del siglo XVIII, en comparación con la de los artesonados, emplazados durante el último cuarto del siglo XVI.

Probablemente, los daños actuales de este cielo raso habrían sido mayores si presentarían una estructura rígida, porque durante un movimiento sísmico, rompería por los puntos más débiles (puntos de anclaje); sin embargo la construcción por módulos suspendidos por elementos flexibles (cabestros) permite la ondulación de la techumbre frente a movimientos de esta naturaleza.

El daño más importante del cielo raso es desplome de dos módulos ubicados en la zona este del faldón sur, y que afecta también a sus correspondientes módulos del cuerpo central. Esta alteración se habría producido por la baja resistencia de los travesaños y otros elementos estructurales que fueron severamente atacados por organismos xilófagos. Para evitar la caída de estos módulos, al igual que de otros elementos, en el año 2000 se colocaron tensores de alambre para evitar la caída del cielo raso.



ILUSTRACIONES 31 y 32: Faldón sur del cielo raso. Detalle del desplome de módulos; vista desde el intradós y desde el extradós. Fotografía: Subía, L. (2004).

### 3.1.1.2. FACTORES EXTRÍNSECOS.

Los factores o agentes extrínsecos que habrían aportado en el proceso de degradación de las estructuras y tablazones de las techumbres de la iglesia San Francisco, se agruparon en tres grupos en función de su naturaleza, en: abióticos, bióticos y aquellos generados por la actividad humana<sup>27</sup>.

#### AGENTES ABIÓTICOS.

Tanto en los artesonados como en el cielo raso, se encontraron indicios de la presencia de agua lluvia filtrada desde la cubierta: muros con marcas de agua y tablas abarquilladas.

Una vez sobre la superficie de la tablazón y por efecto gravitacional, el agua correría por los faldones hacia los puntos más bajos, deteniéndose en los elementos horizontales o llegando a las cabezas de los pares, soleras y muros. La alta concentración de humedad en los puntos

---

<sup>27</sup> Los productos derivados de actividades propias del ser humano se las ha separado del grupo de los agentes bióticos, ya estos últimos degradan, digieren y descomponen la madera por ser ésta su función en la naturaleza; mientras que los primeros, resultado de una acción voluntaria y racional, afectan a la madera sin ser ésta una función natural.

indicados habría favorecido el crecimiento de hongos e insectos xilófagos, explicando así el avanzado proceso de deterioro que se evidenció en las cabezas de pares, soleras y travesaños.



ILUSTRACIONES 33 y 34: Artesonado del extremo sur del transepto.  
Detalle de deterioros provocados por el agua filtrada desde la cubierta.  
Fotografía: Subía, L. (2004).

Los mayores daños se observaron en el extremo sur del transepto, donde las cabezas de pares se encontraban considerablemente atacadas por insectos y hongos xilófagos, llegando a estar completamente destruidas las cabezas de 5 pares, 3 en el faldón oeste y 2 en el faldón este. Para evitar que se cayeran completamente, se colocaron de emergencia sendos rollizos atados con cabestros.

#### AGENTES BIÓTICOS.

La gran mayoría de alteraciones de la madera se debieron a la presencia de hongos e insectos que se alimentan de los elementos constitutivos de la misma; el resultado de esta acción digestiva son las perforaciones y galerías con diámetros comprendidos entre 2 y 3mm; deyecciones finas y granulosas; y la rotura, en forma prismática, de la fibra leñosa. Ambos ataques mermaron la resistencia de la madera, y en zonas con exceso humedad, se observó un ataque más acuciado, llegando a romper la tablazón y elementos estructurales de los artesonados y cielo raso.

A partir de los restos dejados por los insectos: orificios circulares con diámetros menores a 3mm y las deyecciones finas y granulosas, se llegó a la conclusión, casi con total seguridad, de que se trata del coleóptero *Anobium punctatum*. Mientras que la rotura de la fibra leñosa en formas prismáticas de color marrón, se corresponde con las alteraciones provocada por hongos responsables de la pudrición parda.

Además de la presencia de estos organismos xilófagos, se encontró gran cantidad de excrementos de aves, los cuales, en combinación con el agua filtrada desde la cubierta, habrían aportado un medio ácido en las zonas bajas de los faldones, favoreciendo de esta forma el avance del deterioro; de hecho, las tablas decorativas de estas zonas se encuentran en peor estado que aquellas ubicadas en las partes altas de los faldones.



ILUSTRACIÓN 35: Avanzado estado de deterioro de la tablazón ubicada en los extremos bajos del faldón oeste del transepto norte. ILUSTRACIÓN 36: Presencia de organismos xilófagos (insectos y hongos) en los elementos estructurales y de sujeción del cielo raso.

Fotografía: Subía, L. (2004).

#### AGENTES DERIVADOS DE LA ACTIVIDAD HUMANA.

Fue notoria la presencia de contaminación atmosférica originada por la actividad humana; básicamente se observaron: hollín y polvo, ambos generados por la gran cantidad de velas que se prenden diariamente en la iglesia.

Ambos residuos están presentes tanto en el intradós como en extradós de las techumbres, siendo la cara inferior la que más acumulación de estos agentes presentes por estar directamente expuestas hacia las velas. La presencia de estos mismos agentes en el extradós, se deduce por las marcas de hollín existentes en varias zonas donde la tablazón está incompleta.

Otros contaminantes atmosféricos producidos por el hombre, y que muy probablemente están presentes, son: el dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) y el dióxido de azufre ( $\text{SO}_2$ ). Ambos gases reaccionarían con la humedad del ambiente creando soluciones ácidas en toda la superficie policromada de los artesonados y cielo raso.

El primero, es fruto de la combustión incompleta de velas y la respiración de quienes asisten a la iglesia durante aproximadamente 10 horas diarias y todos los días del año.

El segundo gas, provocado por la emanación de los automotores de gasolina y diesel y otros procesos industriales, entraría al interior de la nave por las ventanas de gran formato que se distribuyen tanto en la nave central como en el transepto y justo debajo de las techumbres, o por la puerta principal, debido a un efecto chimenea<sup>28</sup>.

En general, la cantidad de hollín y polvo acumulada en la superficie los artesonados es menor que aquella depositada en la superficie del cielo raso, donde esta capa llega a medir hasta 6mm de espesor; esta diferencia en la concentración de los mencionados polulantes, se comprende porque los fieles que asisten a la iglesia se ubican en la nave

---

<sup>28</sup> Efecto chimenea, ingreso de aire fresco por la base de un área determinada, ocasionado por la succión originada en la circulación de aire (viento) en la parte superior de la mencionada área.

central, espacio donde se colocan de forma mayoritaria las velas encendidas.

Las zonas de la tablazón con grietas, fracturas y faltantes, han permitido el paso de estos gases desde el intradós hacia el extradós. Esta migración ha dejado las marcas de su paso en los elementos estructurales adyacentes a las zonas de deterioro.

A pesar de no haberse realizado mediciones sobre las cantidades de dióxido de carbono y dióxido de azufre, su distribución sería algo similar a las anteriores productos, es decir, habría mayor presencia de ambos gases en el cielo raso de la nave central, algo menor en los artesonados del transepto, mientras que las mínimas cantidades de estos gases se encontrarían en el extradós de ambas techumbres.



ILUSTRACIONES 37 y 38: Depósitos de hollín y polvo sobre los elementos decorativos; y marca dejada por los mismos compuestos, al pasar hacia el extradós. Fotografía: Subía, L. (2004).

### 3.1.2. NIVEL DE DETERIORO.

Para establecer los niveles de deterioro de las maderas de estructura y soporte de las techumbres, se evaluó en alcance de las alteraciones en

cada uno de los elementos constitutivos de los artesonados y cielo raso conforme los criterios de bueno<sup>29</sup>, regular<sup>30</sup> y malo<sup>31</sup>.

Esta evaluación se realizó sobre los peinaños o travesaños, en el caso de los artesonados, y sobre la estructura reticular, en el caso del cielo raso barroco.

---

<sup>29</sup> Bueno.

- Elemento completo.
- No presenta rajaduras, fracturas, pérdidas ni pudrición.
- Muestra pocos orificios de insectos en la superficie o puede no presentarlos.
- En zonas atacadas, la penetración de un punzón metálico de 5mm de diámetro, presionado con la fuerza de una mano, no debe ser mayor a 1cm por cada lado del elemento. La sección residual del elemento se estimó como sana y suficiente para soportar al elemento.
- El sonido producido al golpear con los dedos corresponde a la madera seca no atacada.
- No presenta alabeos.

<sup>30</sup> Regular.

- Elemento completo.
- No presenta rajaduras, fracturas ni pérdidas.
- Muestra orificios de insectos y / o pudrición leve en la superficie.
- Pieza cohesionada que no se disgrega.
- Presenta alguna resistencia a la penetración de un punzón presionado con la mano. En caso de la estructura, el ingreso aceptado estaba comprendido entre 1 y 2cm por cada lado de la pieza; la sección residual realiza el trabajo.
- Factibilidad de que al ser reforzado in situ puede volver a trabajar sin esfuerzos mayores.
- Ensamble completo.
- Alabeo mínimo.

<sup>31</sup> Malo:

- Elemento incompleto.
- Presenta en algún tramo de su longitud rajaduras, fracturas o pérdidas.
- Ataque considerable de insectos u hongos xilófagos, pudrición
- Pieza en estado de disgregación, no tiene cohesión interna suficiente.
- No presenta resistencia a la penetración de un punzón presionado con la mano. En caso de la estructura, cuando la penetración es mayor a 2cm por cada lado. Algunas observaciones determinaron que los ataques eran totales.
- Imposibilidad de devolver resistencia necesaria para que trabaje por sí mismo.
- Presenta un alabeo pronunciado.

**Nivel de deterioro de las estructuras**

	<i>Artesonados</i> (%)	<i>Cielo raso</i> (%)
<i>Bueno</i>	57,20	24,30
<i>Regular</i>	15,40	20,60
<i>Malo</i>	27,40	55,10

Valores aproximados.

La tablazón de los artesonados y cielo barroco, como soporte de las policromías, presentaron los siguientes niveles de deterioro.

**Nivel de deterioro de las tablas decorativas**

	<i>Artesonados</i> (%)	<i>Cielo raso</i> (%)
<i>Bueno</i>	40,00	39,34
<i>Regular</i>	28,40	40,33
<i>Malo</i>	31,70	20,33

Valores aproximados.

**3.1.3. NIVEL DE INTEGRIDAD.**

Al igual que en el caso anterior, se consideraron como elementos estructurales a los peñazos o travesaños, en el caso de los artesonados, y a la estructura reticular, en el caso del cielo raso barroco.

Los porcentajes valorados para las estructuras y la tablazón se resumen en los siguientes cuadros.

**Nivel de integridad de las estructuras**

	<i>Artesonados (%)</i>	<i>Cielo raso (%)</i>
<i>Completo</i>	90,00	92,46
<i>Fragmentado</i>	7,00	6,00
<i>Faltantes</i>	3,00	1,54

Valores aproximados.

**Nivel de integridad de las tablas decorativas**

	<i>Artesonados (%)</i>	<i>Cielo raso (%)</i>
<i>Completo</i>	90,00	95,00
<i>Fragmentado</i>	6,00	4,00
<i>Faltantes</i>	4,00	1,00

Valores aproximados.

### 3.1.4. RESUMEN DE ALTERACIONES.

**Cuadro de Resumen de las alteraciones en estructura y soporte**

Alteración, deterioro	Causa o factor de deterioro
Acidez de la superficie	Acción del hombre, generación de gases CO <sub>2</sub> y SO <sub>2</sub>
Acidez del soporte	Fauna, defecaciones de aves
Desplome de módulos	Probablemente debido a la combinación de mal estado, severo ataque de organismos xilófagos, rotura de puntos de sujeción y el propio peso del cielo raso
Fracturas	Debilitamiento de la sección rectangular de travesaños colocada horizontalmente, desbaste a media madera para colocar los cabestros de sujeción
Galerías de insectos, diámetro < 3mm	Fauna, insectos xilófagos. No existe evidencia de preservantes aplicados por el hombre. Alto contenido de humedad y baja circulación de aire
Hollín	Velas encendidas en la iglesia durante todo el día
Mermas, fisuras, grietas, rajaduras y alabeos	Fuerzas internas ocasionadas por el proceso natural de secado o por defectos en el crecimiento o errores en la tala, troceo y cortes
Ondulación general de las superficies del cielo raso	Movimientos de la estructura general de la iglesia, de la cubierta, contracción y dilatación de los cabestros, sujeciones posteriores
Pudrición	Flora, colonias de hongos xilófagos. Condiciones micro climáticas propicias
Separación de harnetuelo	Movimientos sísmicos.

### **3.2. ESTUDIO DIAGNÓSTICO DE POLICROMÍAS.**

BASE DE PREPARACIÓN, CAPA PICTÓRICA Y DORADOS.

#### **3.2.1. ALTERACIONES Y FACTORES DE DETERIORO.**

A pesar de que los artesonados fueron confeccionados y policromados hacia finales del siglo XVI, y que el cielo raso fue construido y pintado dos siglos después, es decir a finales del siglo XVIII, los deterioros y las alteraciones observadas en estas techumbres son básicamente las mismas; siendo diferente el nivel del deterioro y el estrato afectado.

Así, la base de preparación, presentó las siguientes alteraciones: craqueladuras, desprendimientos de estrato, hollín, polvo acumulado y adherido a la superficie de este estrato, pulverulencia, y separaciones de este estrato.

En la capa pictórica se observaron los siguientes problemas: craquelado, aconchado y separación de zonas corladas; iridiscencia de las zonas policromadas con aceites secantes; oxidación de aglutinante, en el caso de corladuras; separación y desprendimiento de capa pictórica al óleo; repintes de los santos franciscanos.

Finalmente, las técnicas con lámina metálica, mayoritariamente oro visto) y en menor cantidad plata (corlas), mostraban estos deterioros: craqueladuras, pulverulencia, separaciones y desprendimientos de este estrato, oscurecimiento de la plata.

Todas estas alteraciones en los diferentes estratos de las policromías son el resultado de la acción combinada de varios agentes de deterioro:

- Humedad condensada en la superficie de las policromías, que facilitaría los procesos de oxidación de los elementos metálicos como clavos de forja, bridas, etc.
- Agua lluvia filtrada desde la cubierta, que aportaría la humedad suficiente para el desarrollo de hongos xilófagos y lixiviaría los adhesivos.
- Polulantes producidos por la actividad humana, hollín, polvo, dióxido de azufre, dióxido de carbono, que provocarían ,entre otros daños, un ataque ácido a los pigmentos, sulfuración de las láminas de plata, la oxidación de los barnices y la alteración de las corlas.
- Movimientos propios de la madera y de la estructura, que generan grietas y desprendimientos de la superficie pictórica.
- Aconchados, cazoletas, craquelados, pulverulencia y separación de estratos.
- Mala calidad en la ejecución de las técnicas de policromía.

Estas alteraciones son propias o ajenas a los materiales y técnicas pictóricas empleadas (naturaleza intrínseca o extrínseca respectivamente).

### **3.2.1.1. FACTORES INTRÍNSECOS.**

#### LOS MATERIALES EMPLEADOS.

Como se indicó en la sección referida a los Materiales y técnicas de ejecución de las techumbres, en base a los análisis químicos realizados a varias muestras, tanto los artesonados, como del cielo raso, se puede afirmar que todas las techumbres presentan los mismos estratos, similares técnicas artesanales de ejecución y las mismas composiciones internas: así; la base de preparación está compuesta por sulfato de calcio aglutinado con adhesivo proteínico; la capa pictórica por pigmentos aglutinados con aceite secante (técnica lipófila) o tintes aglutinados con adhesivo proteínico (técnica hidrófila); y los dorados, constituidos por bol, adhesivo proteínico y lámina metálica.

Ninguno de estos materiales estaría relacionado con los craquelados, desprendimientos, pulverulencia y separación de estratos observados en las techumbres. Sin embargo, los adhesivos usados en contacto constante con humedad explican la presencia de material vegetal, probablemente hongos en algunas zonas de las techumbres, ya que al tratarse de cadenas de aminoácidos, servirían de alimento para hongos u otro organismo.

#### TÉCNICA DE EJECUCIÓN.

Los procedimientos empleados por los artesanos policromadores y doradores son, términos generales, adecuada; lo que ha permitido que los estratos se conserven en buen estado.

No obstante, las representaciones de uvas (corlas sobre lámina metálica), que forman parte de la decoración del cielo raso, se

encontraban en avanzado proceso de deterioro, caracterizado por craquelados y aconchados que se desprendían con demasiada facilidad.

Este hecho se explicaría por un exceso de aglutinante durante la aplicación del color; posiblemente la intención del artesano fue dar mayor transparencia y brillo al color.

Considerando que este problema es puntual y no se repite en el resto del cielo raso ni en los artesonados, permite plantear hipotéticamente que:

1.- El artesano dominaría la técnica de la corla; pero al no contar con un tinte adecuado, habría tomado como alternativa aumentar el aglutinante y el solvente, reduciendo la concentración de pigmento, para que al aplicarlo, el efecto fuese similar al de una corla.

2.- El artesano no dominaría la técnica de la corla y habría preparado el pigmento con abundante adhesivo y solvente para que el color aplicado fuera transparente como un tinte.

### **3.2.1.2. FACTORES EXTRÍNSECOS.**

Los agentes ajenos a los materiales y a las técnicas de ejecución, y por cuyo efecto se han producido alteraciones de los diferentes estratos, se consideraron: agua, hongos y partículas y contaminantes atmosféricos producto de la actividad humana.

La presencia de agua en el intradós de las techumbres habría causado pulverulencia, craquelados, separaciones y desprendimientos de los diferentes estratos. El origen de este líquido es el agua lluvia filtrada desde el extradós, o como agua formada por condensación en la

superficie del intradós. El caso del agua filtrada desde el extradós, por ser corriente, lixivió el adhesivo de los estratos, dejándolos pulverulentos; mientras que en el caso del agua condensada, por ser estática probablemente favoreció la formación de acochados y cazoletas.

Otra alteración provocada por la presencia de agua es el proceso de oxidación activa y mineralización superficial de los clavos; fenómeno que, provoca el aumento de volumen del metal y el correspondiente empuje de la capa pictórica hasta desprenderla.

Algunas zonas con humedad elevada habría favorecido el crecimiento de organismos (probablemente hongos) que se alimentan del material proteínico de los aglutinantes.



ILUSTRACIONES 39 y 40: Detalle de zonas lixiviadas y zonas con posible presencia de hongos sobre el estrato pictórico.  
Fotografía: Subía, L. (2004).

Como se indicó en el apartado referido a los Factores de deterioro de la estructura y soporte de las techumbres, la totalidad de la superficie de los artesonados y cielo raso están recubiertas de polvo y hollín producidos por la combustión de velas en el interior de la iglesia. Y se presume la existencia de dióxido de carbono y dióxido de azufre; ambos compuestos podrían haber reaccionado con la humedad ambiental y haberse depositado en la superficie pictórica, generando así un medio

ácido que afectaría las cadenas de aceites (en el caso de los óleos) o a las cadenas de aminoácidos (en el caso de los corlas) favoreciendo su deterioro.

Toda la tablazón del cielo raso presenta un efecto iridiscente; este fenómeno se habría producido porque la existencia de un medio ácido en la superficie facilitaría la penetración de moléculas de agua en el interior de la capa pictórica, las cuales, descomponen los rayos de luz incidentes y devuelven rayos de longitudes de onda específicos. Este efecto no fue detectado al microscopio.

### **3.2.2. NIVEL DE DETERIORO.**

Los tres estratos identificados como parte de la superficie policroma, base de preparación, capa pictórica y dorados, tanto de los artesonados como del cielo raso, fueron evaluados según los criterios de bueno<sup>32</sup>, regular<sup>33</sup> y malo<sup>34</sup>; esta valoración se realizó en base al alcance de las alteraciones observadas en cada estrato.

---

<sup>32</sup> Bueno.

- Estrato que no presenta pérdida o disminución en su cohesión interna, ni de adhesión con los estratos adyacentes.
- No presenta aconchados, craqueladuras, descomposición, lixiviación, ni pérdidas.

<sup>33</sup> Regular.

- Estrato que presenta desprendimientos y disminución incipiente en su cohesión interna, o de adhesión con los estratos adyacentes, sin llegar a su disgregación.
- En caso de aconchados, craquelados, descomposición y lixiviación, no deben estar en el límite de desprendimiento.

<sup>34</sup> Malo:

- Estrato con importante pérdida o disminución en su cohesión interna, ni de adhesión con los estratos adyacentes; o en estado de pulverulencia.
- En el caso de aconchados, craquelados, descomposición y lixiviación, los estratos se desprenden y/o disgregan con facilidad.

El orden seguido para explicar el estado en que se encontraban las policromías es el mismo empleado en el apartado referido al Estudio diagnóstico de la estructura y soporte, esto es: primero se hace referencia a los artesonados y después al cielo raso.

Los valores están expresados en porcentaje de la relación entre el valor medido y el total del estrato analizado.

#### Nivel de deterioro de las policromías

		<i>Artesonados</i> (%)	<i>Cielo raso</i> (%)
<i>Base de preparación</i>	<i>Bueno</i>	80,00	85,00
	<i>Regular</i>	8,00	7,00
	<i>Malo</i>	12,00	8,00
<i>Capa pictórica</i>	<i>Bueno</i>	70,00	70,00
	<i>Regular</i>	10,00	10,00
	<i>Malo</i>	20,00	20,00
<i>Dorados</i>	<i>Bueno</i>	85,00	80,00
	<i>Regular</i>	8,00	10,00
	<i>Malo</i>	7,00	10,00

Valores aproximados.

### 3.2.3. NIVEL DE INTEGRIDAD.

Cada uno de los tres estratos identificados fueron medidos para valorar su integridad como: completo, craquelado o pérdida.

En el caso de pérdida de base preparación, se entenderá que también hay pérdida de capa pictórica; no así en los casos de pérdida de capa pictórica porque la base de preparación aún se conservaba.

Como ya se indicó anteriormente, los valores están expresados en porcentaje sobre la relación entre el valor mensurado y el total del estrato analizado.

#### Nivel de integridad de las policromías

		<i>Artesonados</i> (%)	<i>Cielo raso</i> (%)
<i>Base de preparación</i>	<i>Completo</i>	80,00	68,00
	<i>Craquelado</i>	13,00	20,00
	<i>Pérdida</i>	7,00	12,00
<i>Capa pictórica</i>	<i>Completo</i>	75,00	85,00
	<i>Craquelado</i>	10,00	10,00
	<i>Pérdida</i>	15,00	5,00
<i>Dorados</i>	<i>Completo</i>	80,00	70,00
	<i>Craquelado</i>	13,00	15,00
	<i>Pérdida</i>	7,00	10,00

Valores aproximados.

### 3.2.4. RESUMEN DE ALTERACIONES.

**Cuadro de Resumen de alteraciones en policromías.**

Estrato.	Alteración, deterioro.	Causa o factor de deterioro.
Base de preparación	Pulverulencia, craquelados, separaciones y desprendimientos	Lixiviación del adhesivo, movimientos del artesonado y módulos
Colonia de hongos	Colonia de hongos	Exceso y acumulación de humedad; Caldo de cultivo.
Craquelados, separaciones y desprendimientos	Craquelados, separaciones y desprendimientos	Lixiviación del adhesivo, movimientos del artesonado.
Capa pictórica	Craquelado y aconchado (uvas)	Exceso de aglutinante y solvente, al secarse se contrae.
Oxidación de aglutinante protéinico uvas	Oxidación de aglutinante protéinico uvas	Reacción de la cadena protéinica frente a agentes externos.
Craqueladuras, separaciones y desprendimientos dorados	Craqueladuras, separaciones y desprendimientos dorados	Lixiviación, agua filtrada. Degradación proteínas, colonia de hongos que se alimenten de este material.
Efecto iridiscente en el color de las tablas de fondo	Efecto iridiscente en el color de las tablas de fondo	Capa superficial producida por la existencia de moléculas de agua en el interior de la capa pictórica, las cuales descomponen el rayo de luz incidente en varios. Efecto no detectado al microscopio.
Desprendimientos capa pictórica que recubre cabeza de clavos.	Desprendimientos capa pictórica que recubre cabeza de clavos.	Corrosión activa y mineralización de cabezas de clavos, agua filtrada, humedad superficial, condensación de humedad.
Craquelado	Craquelado	Movimientos del artesonado.
Dorados	Pulverulencia, craqueladuras, separaciones y desprendimientos dorados	Lixiviación, humedad filtrada desde la cara superior de las tablas hacia la policromía.

### 3.3. CONDICIONES MICROCLIMÁTICAS DEL LUGAR DE EMPLAZAMIENTO. HUMEDAD RELATIVA, TEMPERATURA

#### Características del lugar de emplazamiento

		Artesonados	Cielo raso
<i>Condiciones en el extradós</i>	<i>Humedad relativa (%)</i>	62,0	67,0
	<i>Temperatura (°C)</i>	16,5	18,0
<i>Condiciones en el intradós</i>	<i>Humedad relativa (%)</i>	55,7	51,1
	<i>Temperatura (°C)</i>	19,0	19,8

De las mediciones de temperatura y humedad relativa realizadas en el extradós y en el intradós de las techumbres estudiadas, se observa que las condiciones micro climáticas existentes en el intradós son similares. Este hecho se entiende porque las áreas que cubren estos elementos arquitectónicos son amplias y se comunican entre sí sin limitaciones físicas entre ellas.

Sin embargo, al analizar las condiciones en el extradós, estas varían; siendo en el cielo raso donde mayor humedad relativa se concentra mientras que en los artesonados la media es menor. Esta diferencia se explica porque el cielo raso está muy próximo a la cubierta y apenas existe circulación de aire, concentrando así humedad; mientras que el espacio existente entre los artesonados sus cubiertas es mayor y la circulación de aire es considerablemente mayor que en el cielo raso, reduciendo así la humedad relativa.

Al comparar las temperaturas del intradós con las del extradós, se observa que las primeras son mayores; probablemente se deba a que la presencia de las personas, velas y lámparas calientan el interior de la

iglesia más que los espacios comprendidos entre las cubiertas y artesonados – cielo raso.

En las condiciones de temperatura y humedad relativa arriba indicadas, pueden ser consideradas como las adecuadas para conservar la madera sin mayores problemas; así pues, la presencia de las alteraciones como ataque de hongos, alabeos, etc. se debería principalmente al agua lluvia filtrada desde las cubiertas.





#### **4. REVISIÓN CRÍTICA DE LOS SISTEMAS NO DESTRUCTIVOS EMPLEADOS PARA EVALUAR EL DETERIORO DE LA MADERA EN EL CAMPO DE LA CONSERVACIÓN Y RESTAURACIÓN DE BIENES CULTURALES.**

##### INTRODUCCIÓN.

A manera de síntesis, se puede decir que los métodos de evaluación no destructivos son ensayos o pruebas a las cuales un objeto es sometido para: determinar sus características físicas y mecánicas, verificar su calidad, inspeccionar y determinar el estado en que se encuentra, y para encontrar fallos, defectos o deterioros; sin llegar a afectar o alterar los estados físicos y químicos en que se encontraba dicho objeto inmediatamente antes de realizar el estudio. Todas estas pruebas se basan en la medición del comportamiento o cambio producido en alguna variable mensurable y relacionada con las características o parámetro físico del objeto que se pretende evaluar. (Candelas, P. 2003; Czichos, H. et al 2006; Iñiguez, G. et al 2007)

Casi todos los métodos de evaluación no destructivos se desarrollaron hacia la tercera década del siglo XX y en base a los conocimientos científicos de los materiales y de algunos fenómenos físicos, como los rayos X, los ultrasonidos, etc., que habían sido descubiertos con anterioridad. (Czichos, H. et al 2006). Solamente a mediados del mismo siglo se formaron los primeros grupos de estudio y divulgación a nivel internacional sobre estos métodos de evaluación.

Originalmente, estos sistemas fueron concebidos para la caracterización de los materiales homogéneos e isótropos empleados en la industria bélica, en especial metales como aceros o aluminio. Paulatinamente se fue ampliando su uso en el ámbito civil y estudiando su aplicación en

materiales heterogéneos y anisótropos como la madera. De hecho, su aplicación en la industria maderera, se inició durante la sexta década del siglo XX, cuando se vincularon los conocimientos recabados hasta entonces sobre las propiedades físicas y mecánicas de la madera con algunos fenómenos o características relacionados con su calidad. (Ramón, G. et al, 2005)

De esta forma, se iniciaron una serie de estudios para mejorar y desarrollar técnicas de evaluación no destructivas que complementasen los análisis visuales de la madera y mejorar así la predicción de sus propiedades mecánicas o para detectar defectos presentes en su interior. (Esteban, M. et al 2007)

A raíz de estos estudios ha sido posible identificar de forma indirecta alteraciones, discontinuidades y propiedades mecánicas de la madera, ya sea en pie (árboles y arbustos), como producto semielaborado (trozas o rollizos), como producto elaborado (control de calidad) o en servicio (monitoreo) midiendo aquellos factores que influyen en las propiedades elásticas y mecánicas de la madera. (Basterra, A., 2005; Czichos, H. et al 2006; Esteban, M. et al 2007; O'Neill, H., 2004; Ramón, G., 2005)

En el campo de la conservación y restauración de bienes culturales y específicamente tablas, los métodos de evaluación no destructiva se comenzaron a utilizar a partir de la última década del siglo XX, adaptando las metodologías ya existentes y desarrolladas en y para otros campos. En este sentido, existen muchos estudios sobre el empleo de rayos X y de la tomografía axial computarizada para determinar por ejemplo: zonas de deterioro en pintura sobre tabla, penetración y distribución de resinas al interior de las tablas, o el proceso de

consolidación. (Basterra, A. 2005; Czichos, H. et al 2006, Bustinduy, M. 1997)

#### DETERMINACIÓN DEL GRADO DE AFECTACIÓN DE UNA MADERA.

Cada especie de madera está clasificada según su resistencia a la deformación por efecto de una carga; esta resistencia está relacionada con las características anatómicas de cada especie y con algunas singularidades o defectos, tales como nudos, fendas, acebolladuras y ataques de organismos xilófagos, etc. (Ramón, G., 2005)

En el caso de maderas atacadas por insectos xilófagos, la única forma para obtener valores reales de la resistencia de dichas maderas es someterlas a ensayos estáticos a flexión. Sin embargo, éstos son destructivos y en consecuencia es inviable su aplicación en la conservación – restauración de bienes culturales. Una alternativa podrían ser modelos matemáticos pero resulta difícil determinar el comportamiento de una madera atacada ya que interactúan simultáneamente muchos factores. Así pues, la posible utilización de métodos de evaluación no destructiva ofrecería alternativas validas que deben ser estudiadas. (Czichos, H. et al 2006)

Aunque los datos que se obtienen con los métodos de evaluación no destructivos son predicciones calculadas y siempre difieren, en mayor o menor grado, de los datos reales es factible determinar su fiabilidad y las condiciones para su empleo comparando los resultados obtenidos por estos métodos con aquellos reales obtenidos con métodos destructivos y estableciendo metodologías de corrección.

## DETERMINACIÓN DEL GRADO DE AFECTACIÓN DE UNA MADERA EMPLEANDO TÉCNICAS NO DESTRUCTIVAS.

El procedimiento que se sigue para establecer la discontinuidad de la madera y determinar su resistencia empleando métodos de evaluación no destructivos es estudiar en probetas de madera el comportamiento del fenómeno físico que se pretende emplear; luego, estas mismas probetas se someten a ensayos reales a flexión y se comparan ambos resultados para determinar el grado de correlación (expresado como coeficiente de correlación<sup>35</sup> -  $R$ ) y el nivel de fiabilidad (coeficiente de determinación<sup>36</sup> -  $R^2$ ) entre estos valores.

Las técnicas que se han venido estudiando para determinar niveles y extensión de ataque de organismos xilófagos de la madera, se basan en la medición de alguno de los siguientes fenómenos: la velocidad de propagación de ultrasonidos, la resistencia al barrenado o el análisis de los modos de vibración natural mediante vibraciones inducidas, entre otras. Las variaciones en la medida, por lo general reducción del fenómeno medido, está relacionado con las cualidades de la madera y permiten hacernos una idea de las propiedades mecánicas de la madera y de su estado interno.

---

<sup>35</sup> Coeficiente de correlación ( $R$ ): (Williams, F. 1982) es un índice que indica, por un lado, el grado o la magnitud en que dos variables relacionadas varían juntas, y por otro, si dicha variación es directa o inversa.

Este coeficiente puede tomar valores de 0 a 1 y de 0 a -1; cuando es 0, la relación es nula, mientras que al ser 1 o -1, la relación es perfecta (directa si es positiva o inversa si es negativa).

Hay que indicar que este coeficiente no indica nada sobre la proporción de la relación, es decir, no se debe considerar como una escala de medida real.

Para conocer la proporción existente en la relación de las variables se recurre al coeficiente de determinación ( $R^2$ )

<sup>36</sup> Coeficiente de determinación ( $R^2$ ): (Williams, F. 1982) es índice que indica la proporción de la variancia que tienen en común dos medias; es decir, este coeficiente señala el porcentaje en que las variables están relacionadas.

## CLASIFICACIÓN DE LOS MÉTODOS DE EVALUACIÓN NO DESTRUCTIVOS.

Los ensayos o pruebas de evaluación no destructivos se podrían clasificar en dos grupos dependiendo de la forma de evaluar el deterioro; por un lado está aquel sensorial que estima el daño (apreciación subjetiva) y por otro lado aquellos que miden factores o variables relacionadas con las capacidades de resistencia de la madera con los cuales se calcula el daño (valor pronosticado). (Capuz, R., 2008)

### **4.1. SISTEMA DE EVALUACIÓN VISUAL.**

El procedimiento sensorial usualmente empleado en el campo de la conservación – restauración de bienes patrimoniales confeccionados con madera es básicamente visual. Este método consiste en identificar indicios de alteraciones que no se encontrarían en la misma libre de daños.

Además de que este método de evaluación no destructivo es el más antiguo, es también el más económico y por ende es el de uso más extendido, la velocidad en la evaluación depende de la destreza del profesional que lo realiza y permite identificar, entre otros aspectos, los siguientes:

- El ataque de insectos u hongos xilófagos.
- Problemas de torceduras.
- Presencia de grietas, fisuras.

- Alteraciones provocadas por agentes externos como radiaciones solares o fuego.
- Cualquier otra alteración perceptible.

Con este método se puede obtener dos tipos de información: una general y otra selectiva. La primera se realiza de forma directa, con luz natural o artificial y sin ayuda de artefactos ópticos y otorga información básica como ubicación de las zonas que presentan alteración y una primera orientación sobre el origen del deterioro. Mientras que el segundo tipo de información, que es selectiva, especifica la naturaleza del deterioro; para esto, la evaluación se realiza de forma indirecta con la ayuda de lentes: lupas, microscopios ópticos, cámaras fotográficas, etc. y por lo general con luz artificial. (Basterra, A. 2005; Czichos H, et al, 2006:832, 833)

Esta técnica resulta útil para la descripción del daño, pero no para identificarlo en estados tempranos, es decir, antes de que sea visible el resultado de la alteración, y también es poco fiable para cuantificar el daño; y su exactitud depende más bien de la destreza, experiencia y conocimiento empírico del profesional que la lleva a cabo. (Basterra, A. et al, 2005; Casado, M. et al, 2005)

Varios estudios se han realizado con el objetivo de establecer el nivel de coincidencias entre los resultados obtenidos por métodos visuales, con aquellos obtenidos por procedimientos estáticos de éstos, se destacan los de Mitchell, P. et al (2003) donde el porcentaje de coincidencia estuvo comprendido entre 46 y 51%. Un porcentaje parecido 50% y 53% de los casos, según Fernández-Golfín, J. et al 2007 y Acuña, L.

(s/f) respectivamente. Mientras que Capuz, R. (2003), observó una efectividad del 40%.

Como se observa, el bajo nivel de acierto que se alcanza con los procedimientos visuales indicaría que se subestima ya sea el estado de la madera o el nivel del ataque presente. Concluyendo que no es factible determinar de forma objetiva el estado de la madera, teniendo como base la apreciación de sus alteraciones visibles.

En vista de esta importante inexactitud, se desestima basar la clasificación del ataque de las maderas por medio de procedimientos organolépticos.

#### **4.2. SISTEMAS DE EVALUACIÓN INSTRUMENTAL.**

El segundo grupo de técnicas no destructivas establece las características mecánicas de la madera de forma indirecta midiendo una variable relacionada con los cambios en las propiedades y en el comportamiento elástico de la madera, pudiendo emplearse estos valores para crear rangos de clasificación del deterioro de la madera. Algunos de los sistemas más conocidos miden por ejemplo el nivel de absorción de radiaciones ionizantes, la resistencia al barrenado o la atenuación de ultrasonidos. Sin embargo, es necesario interpretar adecuadamente la información recabada con estos medios para tener una idea clara sobre el estado de la madera. (Capuz, R., 2003; Capuz, R. 2008; Esteban, M. et al, 2007; Grundström, F. 1998; Kaiserlik, J. 1978; Machek et al, 2001; Rodríguez, J. et al, 1989)

De forma generalizada, se clasifica a las técnicas de evaluación no destructivas instrumental en función la naturaleza física de los fenómenos mensurados durante los ensayos o pruebas; estos grupos son:

- Métodos acústicos.
- Métodos electromagnéticos.
- Métodos mecánicos.
- Métodos nucleares.

Dentro del primer grupo de técnicas no destructivas, las acústicas, se agrupan: emisión acústica, frecuencia fundamental de vibración y ultrasonidos.

El segundo grupo, basado en impulsos electromagnéticos, congrega los siguientes métodos: el radar y la termografía.

Los métodos mecánicos que se reúnen en el tercer grupo son: determinación de la densidad, resistencia al arranque de tornillos, resistencia al barrenado y flexión (sin rotura).

Finalmente, el cuarto grupo engloba los siguientes métodos nucleares: absorción de radiaciones ionizantes (X y gamma) y resonancia magnética; con ambos métodos se puede generar imágenes del interior del objeto conocidas como tomografías.

Cabe indicar que muchas veces se piensa en la tomografía como una técnica por sí misma, cuando en realidad se refiere a la creación de

imágenes del interior (a manera de corte) del objeto Para obtener la información interna del objeto en estudio se aplica sobre este ya sean: rayos X, ultrasonidos, positrones o resonancia magnética.

#### **4.2.1. TÉCNICAS ACÚSTICAS.**

Estas técnicas se caracterizan porque miden la velocidad, o la frecuencia con que las ondas mecánicas comprendidas en el rango acústico se propagan en la madera de. En este grupo se conocen los siguientes procedimientos: emisión acústica, frecuencia fundamental de vibración y ultrasonidos.

##### **4.2.1.1. EMISIÓN ACÚSTICA.**

(Candelas, P., 2003; Livingstone, R. 2001)

Con este procedimiento se recoge y evalúa las emisiones sonoras que los materiales producen cuando son sometidos a tensiones. Dichas emisiones son detectadas por un sensor piezoeléctrico, que convierte las ondas elásticas (emisión acústica) en una señal eléctrica. La gama de frecuencias usualmente recibidas por esta técnica comprende desde los 20kHz hasta el 1MHz.

No se encontró referencias sobre la aplicación de esta técnica para estudiar objetos confeccionados con madera y menos aún sobre su aplicación en el campo de la conservación – restauración. En principio, este método no sería aplicable a los objetos patrimoniales porque los somete a tensiones que pondrían en riesgo su integridad.

#### **4.2.1.2. FRECUENCIA FUNDAMENTAL DE VIBRACIÓN.**

(Baettig, R., 2001; Bucur, V., 1995; Candelas, P., 2003; Capuz, R., 2003; Fernández-Golfín, J. et al 2007; Görlacher, 1984; Grundström, 1998; Iñiguez, G. et al 2007; Machek, L. et al, 2001; Norma EN 13477-1:2001)

Las técnicas basadas en la vibración de ondas se desarrollaron hacia la década de 1950 originalmente para determinar las constantes elásticas de materiales isótropos a partir de sus propiedades vibratorias y en 1961 Spinner, S. y W.E. Tefft publicaron en detalle las ecuaciones para el cálculo de las propiedades elásticas de un cuerpo a partir de la frecuencia fundamental de vibración.

Posteriormente, estas técnicas se emplearon en materiales anisótropos para determinar otras características como: la calidad de la madera sana a emplear en mangos de herramientas; la unión efectiva de tableros laminados; gradientes de humedad; etc. siendo más bien reciente su propuesta como sistema de evaluación del ataque de organismos xilófagos, concretamente hongos.

Todos los estudios consultados coinciden en señalar que esta técnica acústica es muy exacta y sencilla de aplicar, especialmente adecuada para la caracterización de materiales y para el desarrollo, diseño y control de calidad de objetos. Posiblemente es debido a esta alta fiabilidad que se han desarrollado varios equipos que emplean esta técnica en la determinación de las propiedades elásticas de materiales homogéneos e isótropos.

Como se comprenderá, la mayor parte de la información bibliográfica se refiere al uso industrial de esta técnica. Los escasos datos encontrados

sobre su empleo para detectar ataque biológico (hongos xilófagos) datan de finales del siglo pasado e inicio del actual: Machek, L. et al, (1998 y 2001). Referencias concretas sobre la aplicación de esta técnica en la detección de ataques por insectos xilófagos no se encontraron.

#### FIABILIDAD, VENTAJAS Y DESVENTAJAS Y EQUIPOS BASADOS EN LA FRECUENCIA FUNDAMENTAL.

Como se indicó anteriormente, existen pocas referencias en publicaciones de divulgación científica sobre el empleo de esta técnica para determinar las propiedades elásticas de la madera atacada por organismos xilófagos; de hecho, los únicos reportes encontrados se refieren maderas atacadas por hongos xilófagos (Machek et al, 1998, 2001) pero ninguna para evaluar el ataque de insectos xilófagos.

De forma general, es importante indicar que de los estudios revisados, se deduce que esta técnica puede ser una alternativa válida para aplicar al caso en estudio ya que el coeficiente de determinación entre el MOE dinámico obtenido por este método y el MOE estático, obtenido por flexión, es bastante alto y varía entre  $R^2 = 0,76$  (Grundström, 1998) y  $R^2 = 0,98$  (Görlacher, 1984)

Como principales ventajas de este sistema se menciona su sensibilidad para detectar estados tempranos de deterioro causado por hongos xilófagos, incluso antes de que éste sea apreciable por gravimetría<sup>37</sup>; otra ventaja interesante de este método es que no requiere de calibrado para su uso, tampoco es necesario que el ensayo se realice en condiciones especiales de temperatura y humedad relativa; igualmente

---

<sup>37</sup> Gravimetría: análisis cualitativo de una sustancia a través de su peso, este método es de uso extendido a nivel de laboratorio.

es interesante el hecho de que tanto la energía cinética aplicada en el momento de dar el impulso a la madera, así como la energía acústica recibida por el equipo son completamente inocuas para la madera y para el operador, por lo cual no se precisan de equipos de protección específicos para su uso.

Como principal inconveniente de este sistema destaca que para realizar el ensayo, la pieza debe encontrarse completamente libre para que la vibración no se vea afectada.

Equipos que miden la frecuencia fundamental para establecer el MOE se puede nombrar por ejemplo: Bing, Dynagrade, Grindosonic, Impulse-Hammer, Metriguard 239A Metriguard 340E-Computer, Timbergrade, etc.

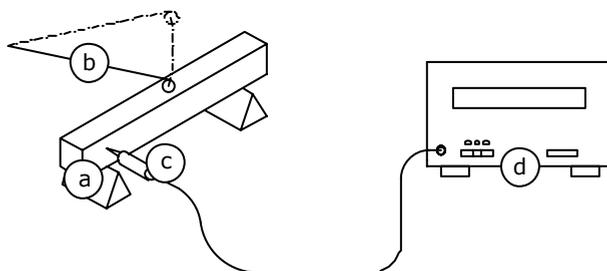


ILUSTRACIÓN 41: Esquema del dispositivo para medir la frecuencia fundamental.  
a: probeta sobre apoyos; b: aplicación del impulso; c: sensor piezoeléctrico;  
d: equipo de recepción de la onda.

#### 4.2.1.3. ULTRASONIDOS.

(Acuña, L. s/f; Baettig, R., 2001; Candelas, P., 2003; Capuz, R., 2003; Conde, M. et al, 2007; Czichos H, et al, 2006:833 - 841; Fernández-Golfín, J. et al 2007; Hermoso, E. et al 2007; Iñiguez, G. 2007; Kaiserlik, J. 1978; Krautkrämer, J. et al, 1990; Kuttruff,

H. 1991; Norma Española UNE-EN 583-1, 1999; O'Neill, H. 2004; Ramón, G. et al 2005)

Los ultrasonidos son ondas acústicas cuya frecuencia es superior al umbral máximo de audición humana, aproximadamente sobre los 20.000Hz; estas ondas se transmiten tanto en medios sólidos, líquidos o gaseosos a una velocidad que depende de las propiedades mecánicas del material.

En el caso de un sólido como la madera, la velocidad de transmisión de los ultrasonidos dependerá de diferentes factores como: la densidad, el contenido de humedad, la presencia de fendas, nudos, zonas con ataque de organismos xilófagos, etc., aunque la propagación de los ultrasonidos en el material testado produce la vibración mecánica de sus partículas, dichas vibraciones son tan bajas que no provocan alteraciones al objeto.

Específicamente esta técnica mide la velocidad de propagación de una onda ultrasónica en la madera, es decir, la relación entre la distancia recorrida por dicha onda, desde su emisión hasta su recepción, y el tiempo invertido por la onda en recorrer esta distancia. La velocidad será mayor cuanto más húmeda, densa y compacta sea la madera; y menor cuanto mayor sea la discontinuidad del tejido leñoso.

Dichas discontinuidades, en las que se incluyen aspectos evidentes como: nudos, fendas o zonas atacadas por organismos xilófagos, y otros aparentemente sin importancia como la diferente orientación en las que se disponen las fibras de celulosa en las paredes celulares, o la ordenación y orientación de las células, entre otras características morfológicas, interactúan con las ondas ultrasónicas y las reflejan,

dispersan y amortiguan o atenúan; provocando en definitiva un mayor tiempo de transmisión y mayor reducción en la intensidad de la onda.

Adicionalmente, estas mismas diferencias morfológicas existentes en un único bloque de madera son las responsables de que la velocidad de propagación sea diferente en cada una de las tres direcciones de la madera.

Conociendo entonces que estas características de la madera influyen en la velocidad de propagación y atenuación de la onda ultrasónica y midiendo dicha velocidad es factible determinar el módulo de elasticidad dinámico (MOE din) con el que se deduce el valor de MOE estático de la madera estudiada.

Tanto el emisor como el receptor de las ondas ultrasónicas son dispositivos especiales denominados transductores ultrasónicos o sondas ultrasónicas que basan su funcionamiento en el efecto piezoeléctrico<sup>38</sup> de algunos materiales como los cristales de cuarzo o cerámicas especiales.

Existen dos métodos de utilización diferentes: por transmisión y por reflexión (pulso - eco); ambos miden la velocidad de propagación de la

---

<sup>38</sup> Los materiales piezoeléctricos tienen la característica de que, si son deformados por una presión mecánica externa se producen cargas eléctricas en su superficie. Esta propiedad de ciertos materiales (tales como los cristales de cuarzo o las actuales cerámicas en combinación con titanio de boro, BaTiO<sub>3</sub> o plomo zirconio titanio, PbZrO<sub>3</sub> - PbTiO<sub>3</sub>, entre otros) se conoce como fenómeno piezoeléctrico directo, y es empleado para la recepción y medida de la onda ultrasónica. (Czichos H, et al, 2006:833 - 836)

Por el contrario, si un material piezoeléctrico es colocado en medio de dos electrodos y es sometido a un potencial eléctrico, dicho material cambiará su forma. Este fenómeno, que es inverso al descrito en el párrafo anterior se conoce como fenómeno piezoeléctrico inverso y se lo emplea para la emisión de la onda ultrasónica. (Czichos H, et al, 2006:833 - 836)

La mayoría de los transductores empleados en los equipos destinados a la evaluación de materiales por procedimientos no destructivos se basan en los fenómenos descritos.

onda, y se diferencian únicamente en la ubicación de los transductores piezoeléctricos, emisor y receptor. En el primer caso, los transductores se colocan enfrentados, mientras que en el segundo, los transductores de emisión y recepción están colocados uno junto al otro o un único sensor hace las veces de emisor y receptor.

De estos dos métodos, el primero, por transmisión es empleado para detectar discontinuidades en el tejido leñoso. Del segundo método, por reflexión, no se encontraron referencias bibliográficas sobre su aplicación en madera.

Como ya se indicó, la medición de la velocidad de transmisión del pulso ultrasónico por el método de transmisión, es necesario colocar los transductores enfrentados en ambas testas de la madera consiguiendo que el pulso se propague longitudinalmente. Cuando no es factible colocar los transductores en las testas, se pueden colocar en las caras enfrentadas laterales con un ángulo menor o igual a 30° (Domingo, J. En Martínez, G. 2009) para que la onda atraviese la pieza reflejándose en sus caras.

Una vez medida la velocidad de propagación y conociendo la densidad de la especie, el contenido de humedad y su geometría es posible calcular el Módulo de elasticidad dinámico (MOE din) según la siguiente ecuación:

$$E = \delta v^2$$

Donde,

$E$  : Módulo de elasticidad dinámico (MOE din),

$\delta$  : densidad de la madera en estudio.

$v$  : velocidad de propagación de los ultrasonidos.

La frecuencia de trabajo se encuentra entre 20 y 500kHz y la atenuación para una madera sana ronda los 400dB/m, valor muy elevado en comparación a la atenuación producida en materiales homogéneos e isotrópicos con los metales, porcelana o vidrio donde su valor no supera los 10dB/m.

#### FIABILIDAD, VENTAJAS Y DESVENTAJAS Y EQUIPOS BASADOS EN EL MÉTODO ULTRASÓNICO.

Existen muchos estudios sobre la aplicación de esta técnica para determinar el estado y la calidad de la madera y en la gran mayoría el coeficiente de determinación que existe entre los valores de MOE dinámico, obtenido con este método, y MOE estático, obtenido con ensayo a flexión, es elevado: mayor al 70% ( $R^2 = 0,68$ , Hermoso, E. et al 2007;  $R^2 = 0,71$ , Conde, M. et al, 2007;  $R^2 = 0,72$ , Acuña L. (s/f);  $R^2 = 0,74$ , Iñiguez, G. 2007;  $R^2 = 0,873$ , Kaiserlik, J. 1978)

Se podría decir que es una de las técnicas de evaluación no destructivas más empleadas porque posee cuatro características determinantes: elevada fiabilidad, no requiere interpretación o recalcular los resultados, facilidad de aplicación y posibilidad de utilizarlo in situ.

Como desventajas hay que resaltar el hecho de que para la colocación de los transductores, emisor y receptor, es necesario perforar el elemento porque debe existir un excelente contacto entre la sonda y la madera para aplicar el ultrasonido; adicionalmente, su uso para madera

deteriorada se encuentra aún es estudio, justamente algunos de estos estudios se han desarrollado recientemente en la Universidad Politécnica de Valencia. (Domingo, J. 2008)

Como ejemplo de equipos que emplean esta tecnología se citan: Impulse-Hammer, James-V-Meter, Metriguard-239A, Pundit (Portable Ultrasonic Non destructive Digital Tester), Sylvatest, etc.

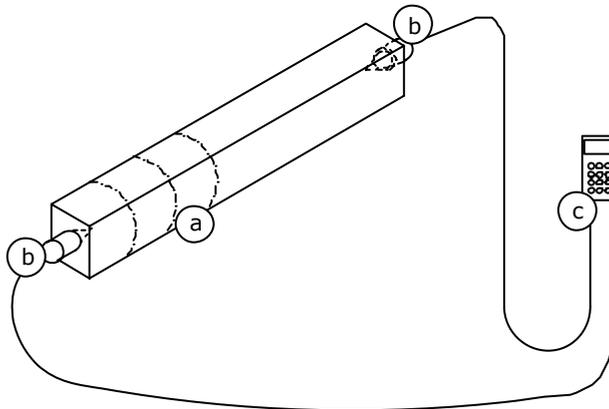


ILUSTRACIÓN 42: Esquema del dispositivo de ultrasonidos.

a: propagación de ondas en una probeta; b: sensores piezoeléctricos; c: equipo de recepción de la onda.

#### 4.2.2. TÉCNICAS ELECTROMAGNÉTICAS.

(Baettig, R., 2001; Pérez, E., 2006)

En el caso de la madera, la propagación de las ondas electromagnéticas permite inferir el estado interno de ésta y predecir algunas de sus propiedades físicas.

Existen tres técnicas para determinar la existencia de daños en el interior de la madera: la primera, trabaja con el espectro de ondas de

radio de Ultra Alta Frecuencia (acrónimo utilizado *U(ltra) H(i) F(requency)*) y microondas, ambas, fundamento de los radares. La segunda emplea el espectro electromagnético de los infrarrojos, fundamento de la termografía. Y la tercera técnica usa las ondas electromagnéticas correspondientes a los rayos X, fundamento de la radiografía.

En este apartado únicamente se explicarán las dos primeras técnicas. La tercera, a pesar de tratarse de ondas electromagnéticas, será explicada en el apartado correspondiente a las técnicas nucleares ya que comparte con éstas la misma banda del espectro electromagnético y su empleo exige condiciones especiales de seguridad.

#### **4.2.2.1. RADAR<sup>39</sup> GEOLÓGICO O SUBTERRÁNEO**

(Burnside, C. D., 1991; Candelas, P., 2003; Gómez, R., 2008; Pérez, M., 2001; Ulaby, F. 2007)

Esta técnica, idéntica a aquella de un radar de impulso convencional, se basa en la emisión, propagación, reflexión y recepción de ondas de radio (radiaciones electromagnéticas de corta duración y frecuencia comprendida entre 200 y 1000MHz; bandas del espectro de radio correspondientes a la fracción baja de microondas y la totalidad de la Ultra Alta Frecuencia) para determinar la ubicación y dimensiones del objeto causantes de la reflexión.

---

<sup>39</sup> Radar: acrónimo en inglés de ra(dio) d(etecting) a(nd) r(anging), detección y localización por radio.

La diferencia principal entre el radar convencional de impulso con un radar geológico radica en el medio de propagación de las radiaciones. En un radar convencional, las ondas se propagan en el aire, mientras que en un radar geológico, el medio es por lo general la superficie terrestre o como en el caso que nos interesa: la madera.

La onda radiante empleada es generada por un pulso electromagnético; esta onda se caracteriza por ser de corta duración pero de elevada frecuencia, motivo por el cual se denomina también como radiación transitoria. Una vez generado el impulso electromagnético y aplicado sobre la madera, su energía se propaga en el medio, donde se producen una serie de fenómenos físicos, de los cuales cabe explicar los siguientes: transmisión, atenuación, y reflexión – refracción.

El primero, transmisión, se refiere a la difusión de la onda en el medio en estudio. La energía radiada se expande geoméricamente en el medio y lo atraviesa dependiendo de sus características electromagnéticas.

El siguiente fenómeno es la atenuación o reducción de la intensidad del impulso electromagnético emitido debido a que la madera absorbe parte de la energía conforme el pulso radiado se transmite en el interior de la madera. A mayor densidad de la madera, se produce una elevada reducción de la velocidad de propagación, lo que ocasiona un desplazamiento hacia frecuencias más bajas y el estrechamiento del ancho de banda del pulso con respecto a aquellas que poseía el pulso originalmente lo que aumenta la atenuación de la energía.

El tercer fenómeno, reflexión – refracción, se produce cuando el impulso electromagnético cambia de medio de propagación; una parte del

impulso es reflejado mientras que otra parte es refractada en el nuevo medio, transmitiéndose en este.

Estos fenómenos están regidos por las propiedades electromagnéticas de los materiales que interactúan con las ondas empleadas; que cada material absorberá y permitirá la transmisión de la radiación en función de sus características electromagnéticas de: permitividad dieléctrica (constante dieléctrica), permeabilidad magnética (absoluta o relativa) y conductividad eléctrica; siendo estas características las que determinan la velocidad de transmisión y atenuación de la onda que atraviesa la madera.

El equipo de radar geológico está compuesto por dos antenas, una emisora y otra receptora, que pueden estar montadas, en un mismo dispositivo o por separado. Si van por separado, la distancia entre ellas puede variar en función de las facilidades para ejecutar el estudio, por lo general se coloca una inmediatamente detrás de la otra, cuando se cuenta solo con una cara para estudiar la pieza o enfrentadas cuando se puede acceder a dos caras opuestas del mismo objeto o elemento.

La información recogida genera una imagen en dos dimensiones (tomografía) sobre el interior de la madera y la combinación de varias tomografías tomadas desde diferentes zonas permite generar imágenes tridimensionales, identificando así la profundidad desde la superficie a la que se encuentra la discontinuidad, sus dimensiones y su extensión.

#### FIABILIDAD, VENTAJAS Y DESVENTAJAS Y EQUIPOS.

Esta técnica fue probada en varios campos de la conservación – restauración del patrimonio cultural. Los principales estudios se refieren a:

- Prospección y caracterización arqueológica como aquellos realizados en los subsuelos de las siguientes edificaciones: la Catedral de Valencia, Iglesia y convento de San Jorge de Alcántara y en la fortaleza romana de esta misma ciudad.
- Identificación de daños estructurales en los siguientes edificios: la Catedral de Valencia, iglesia de San Jorge en Paiporta.
- Control de las intervenciones del teatro romano de Sagunto y de los puentes góticos sobre el río Turia en Valencia.

Esta técnica permite identificar discontinuidades del tejido leñoso tales como huecos o fendas; sin embargo, son pocos los estudios realizados para determinar su aplicación en bienes patrimoniales de madera. (Abian, M., 2009; Pérez E. 2006)

Una ventaja interesante de este sistema es que permite crear imágenes tridimensionales de la madera en estudio sin recurrir a otro tipo de radiaciones, como X o gamma, que son las usualmente empleadas para obtener imágenes en tres dimensiones del interior del elemento estudiado.

Se identificaron tres desventajas principales; en primer lugar, , la información recabada es una imagen y como tal no aporta información sobre las características físicas de elasticidad, plasticidad y densidad que se busca como elemento que justifique la aplicación de resinas; en segundo lugar, la resolución de las imágenes es mas bien pobre. Y en tercer lugar, está el hecho de emplear radiaciones cuya elevada frecuencia (en especial si trabaja con el rango de las microondas) pueden afectar al operador si no se emplean con una formación y preparación previa.

De la bibliografía consultada, el equipo radar de penetración más mencionado, es el Georadar, Ramac/GPR.

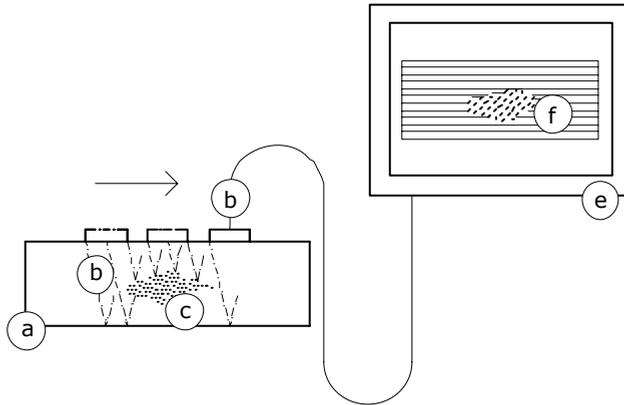


ILUSTRACIÓN 43: Esquema del dispositivo de radio frecuencia.

a: probeta; b: sensor (emisor - receptor); c: zona deteriorada;  
d: ondas de radio, transmisión y reflexión de las ondas; e: monitor;  
f: sombra de ubicación del área con deterioro.

#### 4.2.2.2. TERMOGRAFÍA.

(Burnside, C. D., 1991; Candelas, P., 2003; Ramón, G. et al 2005; Tanaka, T. et al 2001)

Con esta técnica es factible determinar la temperatura superficial de objetos en función de la radiación infrarroja emanada por dicho objeto

Esta técnica se basa en el principio de que la conductividad térmica de los materiales depende de su densidad; es decir, zonas de la madera con menor densidad (debido a la pérdida de materia digerida por los insectos xilófagos) tendrá menor valor conductividad térmica.

Las propiedades térmicas de la madera que se analizan por termografía son tres: el calor específico, la conductividad térmica y la difusión térmica.

El calor específico ( $c$ ) de un material se define como:

$$c = Q/m(\tau_2 - \tau_1)$$

Donde,  $Q$  (en kJ) es la energía térmica necesaria para cambiar la temperatura de un cuerpo de masa  $m$  (en g) desde la temperatura  $\tau_1$  a la temperatura  $\tau_2$  (ambas en °C)

En el caso de la madera, el calor específico  $c$  es independiente de la especie de madera y de su densidad; sin embargo, el  $c$  varía debido al contenido de humedad.

Si se trabaja con madera seca (estado anhidro), el valor de  $c$  está determinado por la siguiente relación:

$$c_o = 1,114 + 0,0046\tau(Q/m\tau)$$

Lo usual es trabajar con madera con algún grado de humedad; en este caso, el calor específico se establece con la siguiente relación:

$$c_u = [(4,19u + 1,114 + 0,0046\tau)/(1 + u)] \cdot [Q/(m\tau)]$$

Donde  $u$  es el contenido de humedad expresado en porcentaje.

La conductividad térmica ( $\lambda$ ) es la capacidad que poseen los materiales para transmitir el calor; su valor representa pérdida de energía térmica

$Q$  acontecida cuando esta energía penetra una distancia  $s$  de una superficie determinada  $A$  por unidad de tiempo  $t$  conforme la siguiente ecuación:

$$\lambda = (Qs) / At(\tau_2 - \tau_1)$$

#### FIABILIDAD, VENTAJAS Y DESVENTAJAS Y EQUIPOS

Un estudio interesante realizado con este método concluye que con esta técnica es posible analizar la densidad de la madera en función de la difusión térmica que se produce en la superficie del objeto. Igualmente se indica la existencia de 0,7°C de diferencia entre la temperatura de una madera sana con aquella de una madera deteriorada (ambas con las mismas condiciones micro climáticas). Los autores del mismo estudio observaron una diferencia de temperatura entre la superficie de un nudo y la superficie de la madera que rodea al nudo. Para simular zonas de pérdida de materia provocada por insectos xilófagos, se realizaron perforaciones a 3, 7,5 y 15mm y la diferencia de temperatura de la superficie estuvo ubicada entre 2 y 9°C. (Tanaka, T. et al 2001)

De las pruebas realizadas por Ramón, G. et al (2005) concluyen que esta técnica permite inspeccionar zonas amplias. Y coinciden con Tanaka, T. et al (2001) en señalar la necesidad de realizar estudios más amplios con esta técnica.

Como inconvenientes se debe indicar que los equipos necesarios para aplicar esta técnica son costosos y que en determinadas condiciones habría que calentar el objeto (Candelas, P., 2003) y la resolución de las imágenes obtenidas con esta técnica es baja (Abian, M., 2009)

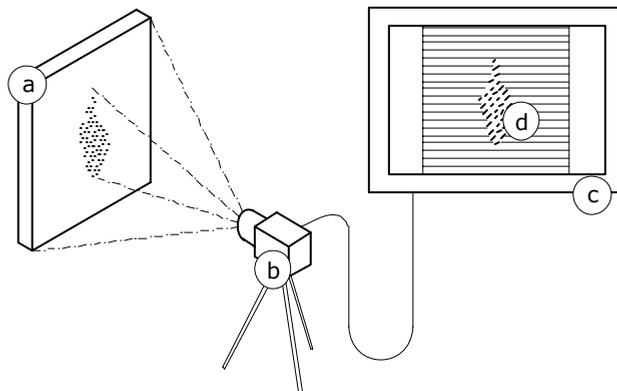


ILUSTRACIÓN 44: Esquema del dispositivo termográfico.

a: probeta con deterioro; b: cámara de radiación infrarroja; c: monitor; d: imagen de zona atada.

### 4.2.3. TÉCNICAS FÍSICO MECÁNICAS.

El rasgo que identifica a estas técnicas es que calculan la calidad de la madera, o el nivel de ataque de insectos xilófagos en función de una magnitud o comportamiento físico o mecánico.

En cierto sentido, se podría considerar a estas técnicas de evaluación no destructivas e instrumentales como las más simples. Las magnitudes y comportamientos que se miden con mayor frecuencia son: densidad, resistencia al arranque de tornillos y resistencia al barrenado.

#### 4.2.3.1. DETERMINACIÓN DE LA DENSIDAD.

(ASTM D 3345-74; Machek, M. et al. 2001)

La variable medida en cada una de las técnicas antes descritas se relaciona con la densidad de la madera en estudio para poder determinar el valor de MOE. Con estos procedimientos es factible

determinar cuanto ha disminuido la resistencia de la madera debido al ataque de organismos xilófagos.

Cabe indicar que el valor de la densidad, por sí mismo, es un referente para saber la cantidad de madera digerida por los organismos xilófagos al compararla con los valores iniciales o teóricos. Efectivamente, una disminución en la masa indica que el tejido leñoso ha sido digerido por algún organismo xilófago, reduciendo también la densidad del objeto y por lo tanto sus características o propiedades mecánicas. La diferencia entre la masa inicial de la probeta y la masa final, luego de someterla a la acción del agente de deterioro.

Este procedimiento no es factible emplearlo con objetos patrimoniales porque no se conocen las masas originales de los objetos o porque en algunos casos los elementos forman volúmenes difíciles de establecer y/o estructuras complejas.

#### **4.2.3.2. RESISTENCIA AL ARRANQUE DE TORNILLO.**

(Bobadilla, I. et al, 2007; Casado, M. et al, 2005; Iñiguez, G. 2007; Ramón, G. 2005)

Este procedimiento se basa en determinar la fuerza requerida para arrancar un tornillo especial, previamente introducido en la madera a ser estudiada.

A la máxima fuerza de arranque le corresponde una de igual magnitud pero de sentido contrario, denominada resistencia al arranque. A su vez la resistencia al arranque está relacionada con la densidad de la madera y su módulo de elasticidad.

Una madera poco densa, como el pino o maderas atacadas por organismos xilófagos, presentará menor resistencia al arranque; mientras que, cuanto más densa sea la madera, como el bongossi (*Lophira alata*), mayor será la resistencia que ésta ofrezca al arranque del tornillo.

Los parámetros que influyen en la resistencia al arranque de tornillos son muy variados, por lo que antes de realizar las mediciones es necesario identificar aspectos como:

- Diámetro del tornillo: 4mm.
- Longitud de tornillo que debe introducirse: 18, 28 y 38mm.
- Definición de las zonas donde se deben realizar las mediciones.
- Número de extracciones que deben hacerse por muestra.

La información recabada con esta técnica es puntual y superficial ya que se restringe a la zona inmediatamente adyacente al cuerpo o vástago del tornillo y a una profundidad nunca mayor a 40mm ya que a mayor profundidad, la fuerza necesaria para la extracción del tornillo excede la resistencia a tracción del mismo provocando la rotura del tornillo. Debido a que la información recabada es puntual, es necesario realizar varios arranques con el objetivo de tener una idea del estado general de la pieza en estudio.

#### FIABILIDAD, VENTAJAS Y DESVENTAJAS Y EQUIPOS

Según las fuentes bibliográficas consultadas, esta técnica es poco empleada en España, sin embargo, en otros países ha sido estudiada y

probada con unos resultados que se pueden considerar medianamente importantes. En estos estudios indican que la fuerza empleada para arrancar el tornillo posee una correlación estadísticamente significativa ( $R = 0,80$ ) con el módulo de elasticidad estático; sin embargo, el coeficiente de determinación es bajo ( $R^2 = 0,57$  como promedio de los coeficientes encontrados en la bibliografía consultada, y un máximo de  $R^2 = 0,65$ ).

Un estudio realizado por Iñiguez, G. (2007), comparando los valores de la fuerza empleada para el arranque del tornillo con los valores de densidad de las maderas testadas, indica un coeficiente de determinación de  $R^2 = 0,64$

A pesar de ser una técnica sencilla, barata y con un moderado nivel de exactitud, su utilización en conservación – restauración no es viable porque destruye la zona circundante del tornillo.

Uno de los nombres comerciales de los equipos que emplean esta tecnología es el Screw Withdrawal Resistance Meter de la empresa Fakopp. El equipo consta de tres partes:

- Dispositivo de sujeción del tornillo.
- Un transductor que registra la fuerza máxima del arranque.
- Un husillo para extraer el tornillo.

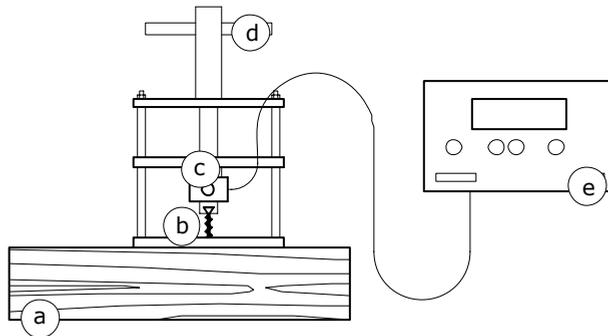


ILUSTRACIÓN 45: Esquema del dispositivo para arranque de tornillos.  
a: probeta; b: tornillo; c: transductor; d: husillo; e: lector de fuerza.

#### 4.2.3.3. RESISTENCIA AL BARRENADO.

(Álvarez, L. et al 2005; Basterra, A. 2005; Capuz, R., 2003; Iñiguez, G. 2007; Martínez, G., 2009; Ramón, G. et al, 2005)

Esta técnica se basa en la resistencia que presenta la madera a ser perforada por una barrena (broca de labios planos), en función de la potencia consumida durante la perforación; cuanto mayor sea la densidad mayor será la potencia requerida y viceversa. De esta forma, es factible estimar la densidad de la madera, la cual variará según las zonas con ataque de insectos y zonas sanas.

La información proporcionada por el equipo se presenta en un gráfico del perfil de la zona barrenada que indica la cantidad y calidad de la madera en el punto de perforación como valores relativos de la potencia perdida por el equipo. Este gráfico es impreso en escala 1:1 simultáneamente con la perforación; al mismo tiempo, una copia digital del gráfico (denominado resistograma), es archivado en la memoria del equipo para su futuro análisis.

Los resistogramas obtenidos son gráficas sobre dos coordenadas: en el eje Y, de las ordenadas, se indica la potencia que el equipo requiere para el barrenado expresado en porcentajes (valores relativos); mientras que el eje de las abscisas, eje X, se indica la distancia recorrida por la barrena.

Los picos del gráfico corresponden a aquellas zonas donde el equipo perdió más potencia, es decir: áreas de la pieza con mayor densidad, como por ejemplo: la madera tardía de los anillos de crecimiento, o la región del duramen. Por el contrario, los valles del gráfico indican las áreas donde el equipo perdió menos potencia para perforar la madera estudiada, como por ejemplo: las franjas de madera temprana de los anillos de crecimiento, o la región de albura o las zonas con ataque de hongos o insectos xilófagos.

Al ser un valor relativo, los resultados deben necesariamente combinarse con aquellos de densidad para tener una idea del estado del tejido leñoso en el interior del elemento.

#### FIABILIDAD, VENTAJAS Y DESVENTAJAS, Y EQUIPOS BASADOS EN ESTA TÉCNICA.

Esta técnica ha sido probada en varios estudios como muy útil para determinar el estado interno de la madera, especialmente en vigas, columnas, postes o árboles en pie.

Álvarez, L. et al (2005), realizaron un estudio para comparar los gráficos obtenidos con un equipo basado en esta técnica con los valores reales de MOE estático obtenidos con ensayo de flexión hasta la rotura de las probetas. Indican que este sistema proporciona información sobre la densidad de la madera y sobre las zonas de ataque tanto de hongos

como de insectos xilófagos, y lo consideran como óptimo para recabar la información necesaria para respaldar intervenciones de conservación restauración, en especial de estructuras en madera del patrimonio cultural porque se puede estimar con bastante exactitud el estado interior de la madera.

Sin embargo, Ramón, G. (2005) sostiene que si bien es cierto que se pueden detectar las zonas internas que han sido atacadas, resulta difícil establecer con exactitud el daño real porque a pesar de que se encontró una buena correlación lineal entre los valores medios de resistencia con aquellos de densidad media de la madera estudiada, no existe una diferencia estadísticamente significativa entre los valores obtenidos en madera sana con aquellos de las zonas de ataque.

Varios autores coinciden en señalar como principal ventaja de esta técnica su idoneidad para indagar sobre el estado interno de aquellas zonas no visibles del objeto, ya sea porque se encuentran ocultas o porque están empotradas en muros.

Teniendo en cuenta que la información recabada con este procedimiento da luces sobre la madera en el punto de la perforación, es imprescindible la realización de más perforaciones y obtener así una idea del estado general de la pieza.

Aunque esta técnica está considerada como no destructiva, es necesario perforar la pieza para efectuar la estimación de la calidad interna de la madera; característica que descarta su aplicación en bienes patrimoniales muebles.

El equipo mencionado en todos los artículos consultados es un Resistógrafo (variando únicamente el modelo) y consta de dos elementos principales:

- Un cuerpo cilíndrico, que opera de forma similar a un taladro, y pone a girar la barrena mientras la empuja con velocidad constante.
- Una central de mando y almacenamiento de la información que incluye la impresora y las baterías.

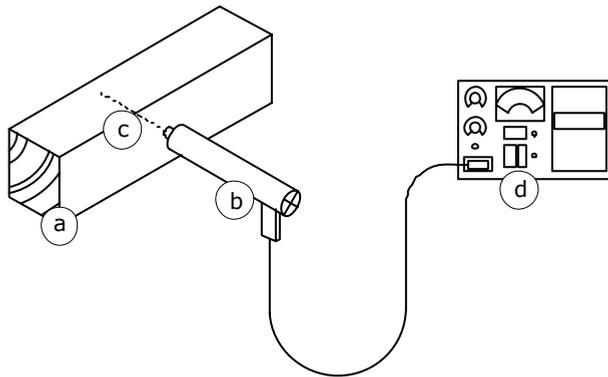


ILUSTRACIÓN 46: Esquema de un resistógrafo.

a: probeta; b: cuerpo cilíndrico; c: barrena; d: equipo de recepción e impresión.

#### 4.2.4. TÉCNICAS NUCLEARES.

Estas técnicas se refieren a aquellos procedimientos que permiten recuperar imágenes del interior del objeto de madera empleando para esto dos principios diferentes: por un lado las propiedades de los cuerpos de absorber las radiaciones electromagnéticas de la banda de

los rayos X o gamma (radiaciones ionizantes<sup>40</sup>) y por otro lado las propiedades mecánico - cuánticas de la resonancia magnética (explicada más adelante).

Como se indicó en la introducción del apartado referido a las técnicas electromagnéticas, los rayos X serán tratados en el grupo de las técnicas nucleares porque aunque su origen sea una carga eléctrica, su elevada energía y frecuencia, se corresponde con aquellas energías y frecuencias propias de la radiación gamma y originados por emisiones nucleares<sup>41</sup>. De hecho, tanto los rayos X como los gamma, son el mismo tipo de energía electromagnética (fotones) y se pueden explicar bajo las mismas leyes; siendo sus únicas diferencias su fuente de generación y su fecha de descubrimiento.

Un segundo motivo para incluir los rayos X en el grupo de técnicas nucleares se debe a que ambas radiaciones son capaces de atravesar cuerpos opacos y alterar la estructura eléctrica de los átomos; es decir, son ondas capaces de ionizar la materia. Siendo en consecuencia, técnicas que requieren cuidados especiales de manipulación y aplicación<sup>42</sup>.

---

<sup>40</sup> Radiación ionizante: son aquellas radiaciones que poseen una elevada energía, capaz de penetrar cuerpos opacos, de interactuar con la materia de dicho cuerpo y de extraer electrones de sus estados ligados al átomo, alterando la su estructura eléctrica.

<sup>41</sup> Rayos gamma: son fotones de elevada energía emitidas por núcleos atómicos decadentes, siendo el más empleado en Cobalto-60 (Co-60). (Holmes-Siedle, A, et al, 2006)

<sup>42</sup> Los rayos gamma y los rayos X fueron descubiertos en diferente época. Ambos rayos son radiaciones de pequeña longitud de onda pero elevada frecuencia, lo que las hace muy energéticas, ambas se ubican contiguamente en el mismo rango del espectro electromagnético. El primer tipo de rayos se originan por interacciones nucleares, mientras que el segundo se origina por fenómenos eléctricos. (Holmes-Siedle, et al 2006)

#### **4.2.4.1. ABSORCIÓN DE RADIACIONES IONIZANTES.**

(Baettig, R., 2001; Candelas, P. 2003; Capuz, R., 2003; de la Rosa, R, 2002; Fernández-Golfín, J. et al 2007; Holmes-Siedle, A. et al 2002)

Esta técnica se desarrolló fundamentándose en la propiedad que tienen los cuerpos para absorber estas radiaciones, variando considerablemente el nivel de absorción entre un material y otro. Según la Ley de Lambert, un cuerpo es capaz de atenuar estas radiaciones conforme la siguiente relación:

$$A = \mu\delta h$$

Donde:

$A$  : es la absorbancia del material constitutivo del cuerpo que será atravesado por las radiaciones.

$\mu$  : es el coeficiente de absorción de energía del cuerpo.

$\delta$  : es la densidad del cuerpo.

$h$  : es el espesor del cuerpo o la longitud que atravesarán las radiaciones.

Esta absorción provoca que la intensidad del rayo residual sea mayor a aquella del rayo incidente; la relación entre ambas intensidades es un valor logarítmico definido como:

$$I_2/I_1 = 10^{-A} .$$

Donde:

$I_1$  e  $I_2$ : son la intensidad de la radiación incidente y la intensidad de la radiación luego a atravesar el cuerpo.

Esto quiere decir que: la medida de la absorción es directamente proporcional con la densidad de la madera, es decir: cuanto más densa, compacta y libre de defectos sea la madera, mayor será la atenuación de la radiación empleada, y por el contrario, cuanto menos densa, compacta y con defectos, alteraciones o discontinuidades de su estructura, menor será la atenuación de la radiación empleada. De esta forma se detectan defectos en el interior de la madera.

La información recabada por estos procedimientos son imágenes en dos dimensiones, donde se visualiza un perfil plano del objeto con diferentes intensidades de absorción, o, imágenes en tres dimensiones, que permiten tener vistas de secciones del objeto conocidas como tomografías.

FIABILIDAD, VENTAJAS Y DESVENTAJAS Y EQUIPOS BASADOS EN ESTA TÉCNICA.

Estas técnicas han sido ampliamente estudiadas y empleadas, desde su descubrimiento, como un método de evaluación no destructivo que brinda información detallada del estado interno del objeto estudiado, revelando defectos o alteraciones internas no "observables" con otros métodos, siendo ésta la principal ventaja de esta técnica.

Una ventaja adicional, y de interés en el campo de la conservación – restauración del patrimonio cultural, radica en el hecho de que para obtener las imágenes, no es necesario que los equipos entren en contacto con el objeto.

Sin embargo, debido a lo delicado de su utilización, la gran mayoría de los equipos existentes requieren instalaciones y zonas especialmente habilitadas para su aplicación, debiendo trasladar el objeto a dichos locales, acción compleja y en algunos casos imposibles. Existen sin embargo, aparatos portátiles que se han desarrollado para aplicar esta técnica in situ y de forma específica como tuberías, estructuras de acero, etc.

De la bibliografía consultada se mencionan, como ejemplo, los siguientes equipos: X-ray Lumber Gauge (XLG) de CAE-Newnes; Finnograder, etc.

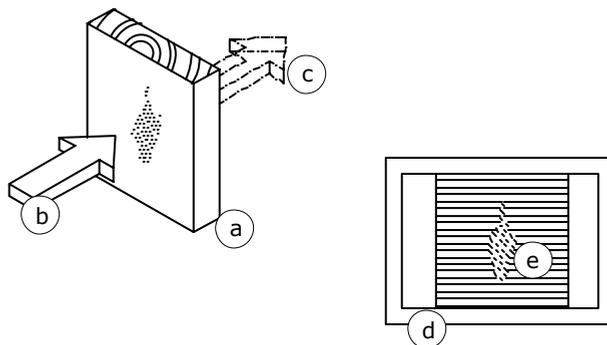


ILUSTRACIÓN 47: Esquema explicativo de la Ley de Lambert.

a: probeta con deterioro; b: radiación incidente; c: radiación residual;  
d: monitor; e: imagen de la zona afectada.

#### **4.2.4.2. RESONANCIA MAGNÉTICA.**

Esta técnica, al igual que las de absorción de radiaciones ionizantes, permite obtener imágenes tridimensionales del interior de un cuerpo; pero a diferencia de aquellas, la resonancia magnética se basa en la interacción entre un campo magnético generado alrededor del objeto en estudio y los núcleos atómicos de dicho objeto.

Básicamente, el sistema genera un campo magnético alrededor del objeto, induciendo a sus núcleos atómicos a alinearse paralelamente al campo generado. Una vez cesa la acción de dicho campo, los núcleos se desaxitan (relajan) y vuelven a sus posiciones originales devolviendo la energía magnética recibida en forma de ondas de radio. Estas ondas resultantes son recogidas para generar la imagen del interior del objeto.

FIABILIDAD, VENTAJAS Y DESVENTAJAS Y EQUIPOS BASADOS EN ESTA TÉCNICA.

En la actualidad esta técnica está siendo utilizada por diferentes centros para estudiar los procesos físicos que ocurren durante los tratamientos de consolidación de la madera. Su principal utilidad radica en la obtención gráfica de muy buena calidad de cualquier parte del objeto estudiado sin recurrir a las radiaciones ionizantes.

Recientemente se están probando equipos portátiles para la aplicación de esta técnica in situ, siendo los resultados obtenidos hasta el momento satisfactorios.

A pesar de estas ventajas, la información obtenida únicamente permite estimar el efecto de las alteraciones de la madera, dependiendo del

profesional que interpreta las imágenes se determina el estado de la madera.

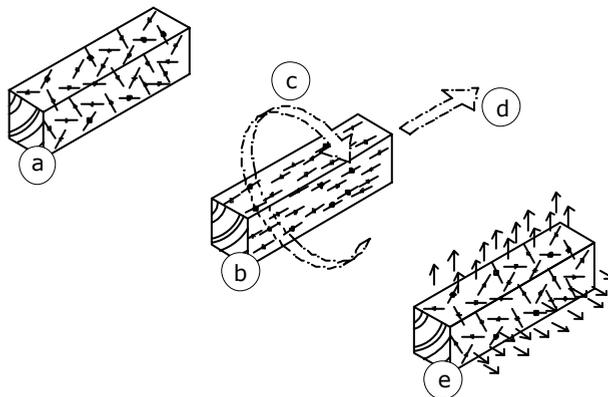


ILUSTRACIÓN 48: Esquema explicativo del principio de la resonancia magnética.

a: orientación de los núcleos atómicos de la probeta en estado normal;  
b: orientación de los núcleos atómicos al ser sometidos al campo magnético (c); c: campo magnético; d: dirección del campo magnético;  
e: desexcitación de los núcleos atómicos y liberación de ondas de radio.

#### 4.2.5. DISCUSIÓN.

En principio todas las técnicas aquí analizadas están clasificadas como métodos de evaluación no destructivos, y en consecuencia, serían aplicables a tablas y tablazones de artesonados, cielos rasos u otro elemento similar. Sin embargo, algunos de ellos como la técnica basada en el arranque de tornillos, afectan la integridad del bien y se descartan inmediatamente. Otros, como los ultrasonidos, podrían ser empleados si se desarrollara transductores aplicables directamente sobre la superficie sin necesidad de perforar la madera o de emplear un medio, por lo general un gel, que transmita la onda a la madera. Otro grupo de métodos emplean radiaciones peligrosas, como los rayos X, lo que implica un riesgo a la salud de una persona en favor de un objeto.

Así pues, para seleccionar un método adecuado que, cumpliendo los objetivos de esta investigación, no afecte al operador ni al objeto, se elaboró una tabla de contingencia que resume las cualidades de cada sistema y facilitó la tarea de establecer el método más conveniente a utilizar en el resto de la investigación.

Esta tabla permitió evaluar varias cualidades de cada método de forma individual, a la vez que facilitó la comparación entre métodos. Los aspectos analizados fueron:

- Valor del coeficiente de determinación.
- Calidad de devolver información cuantitativa.
- Calidad de detectar estados tempranos de deterioro.
- Relación coste – beneficio expresado como economía de trabajo.
- Posibilidad de aplicación in situ.
- Seguro para el operario.
- Seguro para el objeto.

Cada uno de estos puntos, excepto el primero, fueron evaluados en base a una escala cualitativa y ordinal de tres niveles, cada nivel se representó con uno de los siguientes gráficos:  $\blacktriangle$ ,  $\blacklozenge$ ,  $\blacktriangledown$ .

Donde:

- $\blacktriangle$  : Indica una valoración positiva.
- $\blacklozenge$  : Expresa equidad en la valoración.
- $\blacktriangledown$  : Quiere decir que el método no satisface el requerimiento.

**Tabla de contingencia para la evaluación de métodos de evaluación no destructivos.**

<i>Método</i>	<i>Variable medurada</i>	<i>Variable relacionada</i>	<i>R<sup>2</sup></i>	<i>Valoración cuantitativa</i>	<i>Detección temprana de daños</i>	<i>Económico</i>	<i>Aplicación in situ</i>	<i>Seguro para el operador</i>	<i>Seguro para el objeto</i>	<i>valoraciones positivas</i>	<i>Índice de estudios x método de evaluación</i>
visual	comparación empírica entre las alteraciones visibles y un estado ideal		40 - 53%	▼	▼	▲	▲	▲	▲	4	13,0%
emisión acústica	ondas sonoras	elasticidad dinámica		▼	▲	▲	▲	▲	▼		3,7%
frecuencia fundamental	frecuencia fundamental	elasticidad dinámica	76 - 98%	▲	▲	◆	▲	▲	▲	5	13,0%
ultrasonidos	velocidad y atenuación	elasticidad dinámica	68 - 92%	▲	◆	◆	▲	▲	▼	3	22,2%
Reflexometría de radio y microondas	tiempo de retor- no e intensidad	discontinuidad del tejido leñoso		◆	◆	◆	▲	◆	◆	1	11,1%
radiación infrarroja	ondas infrarrojas radiadas por el objeto	variación de densidad y cont de humedad		▼	▲	◆	▲	▲	◆	3	5,6%
resistencia a extracción de tornillo	fuerza de arranque	densidad	57 - 65%	▼	▼	◆	▲	▲	▼	2	7,4%
resistencia al barranado	reducción de potencia de barranado	densidad	59%	▼	◆	◆	▲	▲	▼	2	9,3%
radiaciones ionizantes	atenuación de ondas empleadas	densidad		▼	▲	▼	◆	▼	▲	1	11,1%
resonancia magnética	tiempo de devolución de energía radiante			▼	▲	▼	▼	◆	▲	2	3,7%

En base a la información recabada durante este estudio se dedujo que el método más adecuado para emplearlo durante los ensayos es aquel basado en la frecuencia fundamental de vibración porque:

- 1.- Tanto la energía cinética aplicada al momento de dar el impulso a la madera, como la energía acústica recibida por el equipo son completamente inocuas para el operador y no requiere el uso de equipos de protección específicos.
- 2.- De la misma forma, la energía empleada, no altera ninguna de las características y propiedades que el objeto posee inmediatamente antes de realizar el ensayo.
- 3.- Al efectuar estudios o investigaciones con probetas, las mismas pueden ser empleadas para otros ensayos, por lo general destructivos.
- 4.- No requiere de sistemas de calibrado.
- 5.- Se puede aplicar in-situ, sin necesidad de instalaciones especiales como en el caso de los ensayos estáticos.
- 6.- Puede aplicarse tanto a cuerpos de geometrías regulares (prismas, cilindros o discos) como irregulares, en este último caso, serviría como sistema de control.
- 7.- Al ser capaz de detectar estados tempranos de deterioro se dedujo que sería lo bastante sensible como para establecer objetivamente varios niveles de deterioro.

8.- Considerando que para su funcionamiento requiere únicamente energía eléctrica convencional, su costo de operación es muy bajo.

9.- Su aplicación es factible indistintamente de la temperatura y humedad relativa del espacio donde se desarrollará el estudio,

Como se indicó en el apartado referido a esta técnica, se encontró bastante información sobre la aplicación de esta técnica en madera sana para determinar su calidad; las referencias consultadas señalan los altos coeficientes de determinación existentes entre los valores de Módulo de elasticidad: dinámico, calculado con esta técnica, y estático, obtenido por métodos estáticos.

Igualmente altos fueron los coeficientes de determinación en los dos estudios consultados sobre la aplicabilidad de esta técnica para identificar estados tempranos de deterioro en maderas atacadas por hongos xilófagos; resaltando la particularidad de este sistema, es más sensible para detectar estadios tempranos de deterioro que la técnica usualmente empleada basada en la pérdida de masa.

Sin embargo, al no contar con información sobre la factibilidad de emplearlo para determinar niveles de deterioro en maderas atacadas por insectos xilófagos, ni para evaluar el resultado de la consolidación, fue necesario plantear una metodología que permitiera determinar si este método alcanzaría el fin propuesto.

Con estos antecedentes, se consideró que este mismo sistema podría estimar niveles de deterioro en madera atacada por insectos xilófagos. Iniciando por niveles bajos hasta estados avanzados, con la posibilidad de establecer límites entre cada estado o nivel de degradación.





## **5. FUNDAMENTO TEÓRICO DE LOS SISTEMAS EMPLEADOS EN ESTA INVESTIGACIÓN.**

Para saber si sería posible emplear la técnica de evaluación no destructiva basada en la frecuencia fundamental para distinguir niveles de deterioro y determinar la mejora real de la consolidación, se debía comparar los valores de frecuencia fundamental y módulo dinámico de cada probeta con sus respectivos densidad y módulo de elasticidad estático. Al comparar los valores de frecuencia fundamental con la densidad se establecerían niveles de deterioro y al comparar los módulos de elasticidad dinámico y estático se establecería la mejora obtenida después de la consolidación de las probetas.

Teniendo en cuenta lo ya expuesto, en este apartado se explicarán los fundamentos de:

- Densidad.
- Frecuencia fundamental de vibración.
- Impregnación – consolidación.
- Módulo de elasticidad, método dinámico.
- Módulo de elasticidad, método estático.

### **5.1. DENSIDAD.**

(ASTM D 2395 – 93; Fengel, D. et al 2003; Kollmann, F. et Côtè, W., 1968; Rochette, 1964)

La densidad ( $\delta$ ) de la madera es una propiedad física de ésta que indica la relación existente entre su masa y su volumen. Es decir, es la cantidad de sustancia existente en un volumen dado de este material.

Hasta cierto punto, se puede considerar a la densidad como una propiedad característica de cada especie maderable y existe una fuerte correlación entre la densidad y las propiedades mecánicas de la madera; por este motivo se considera a la densidad como un factor importante para establecer diferentes niveles de deterioro y de resistencia.

Sin embargo, el valor de la densidad puede variar entre árboles de la misma especie e incluso en el interior del mismo árbol debido a diferentes factores entre los cuales destacan los siguientes:

- Los cambios en el tamaño, distribución y ordenación de las células que conforman el tejido leñoso y la cantidad de sustancias extractivas, minerales u otras materias, ubicadas en el interior o en el exterior de las células.
- Diferencia en las dimensiones de la pared celular y diámetro de cada célula; si se trata de madera temprana o madera tardía o en función de la zona geográfica de extracción (por ejemplo, zonas favorables a un crecimiento rápido o no).
- Diferencia entre albura y duramen; ambas diferenciadas básicamente por el trabajo que desempeña en el vegetal, transporte de líquidos y estructura soportante respectivamente.

- Contenido de humedad, es la cantidad de agua contenida en la madera, usualmente se expresa en porcentaje.

Teniendo en cuenta que la densidad de la madera está fuertemente influenciada por la cantidad de humedad contenida, es importante que todas las relaciones o comparaciones de la densidad sean efectuadas a un mismo valor de contenido de humedad.

La norma ASTM D 2395 – 93 indica siete procedimientos diferentes para determinar la densidad de un cuerpo; considerando la naturaleza de esta investigación y teniendo en cuenta que las probetas con que se trabajó eran prismas regulares y ortogonales, se optó por emplear el Método A de la norma ASTM ya señalada. Así pues, se determinó la densidad de las probetas mediante la relación masa – volumen:

$$\delta = m / V$$

La masa se determinó por gravimetría y el volumen por estereometría.

Hay que indicar que en el presente estudio, la densidad relaciona la masa de la probeta después de haber sido atacada por organismos xilófagos y el volumen de la probeta, que se considera constante, es decir sería el mismo volumen en un estado libre de ataque anterior y no real. En consecuencia, el valor de la densidad actual de cada probeta será necesariamente más bajo que aquel teórico de la especie (madera libre de defectos), y no será considerado como propio de la especie. Sin embargo, este valor es útil para clasificar a las probetas por categorías y crear así una escala de trabajo. El procedimiento seguido se explica más adelante en el apartado de la Fase experimental.

## 5.2. FRECUENCIA FUNDAMENTAL.

(ASTM E 1876-07; ASTM C 1259-08; Czichos et al, 2006; Fletcher, N. et al 1998; Gembloux Station de Technologie Forestière, s/f; Grindosonic manual, s/f; Grundström, F., 1998; Kaiserlik, J.,1978; Kinsler, 1982; Randall, 2005)

Se conoce como frecuencia fundamental, natural, Eigen o primera armónica ( $f_1$ ) a aquella más baja con que un cuerpo elástico<sup>43</sup> oscila luego de excitarlo mecánicamente. En el caso de este estudio, se comprende como cuerpo elástico a cada una de las probetas empleadas para los ensayos con esta técnica.

La excitación mecánica transmitida a la probeta genera, en el interior de la misma, una serie de ondas elásticas que la atraviesan tanto longitudinal como transversalmente.

El primer tipo de ondas, longitudinales, son infrecuentes y se generan cuando un impulso es aplicado exactamente sobre el eje longitudinal; mínúsculas variaciones en el punto de impacto produce, además de ondas longitudinales, ondas trasversales.

---

<sup>43</sup> Cuerpo elástico: se denominan así a aquellos sólidos que pueden vibrar, es decir deformarse y regresar a su estado original sin mostrar alteración alguna, luego de recibir una excitación. Hay que diferenciar entre cuerdas y barras o platos; las primeras vibran longitudinalmente mientras que las segundas lo hacen es sentido transversal.

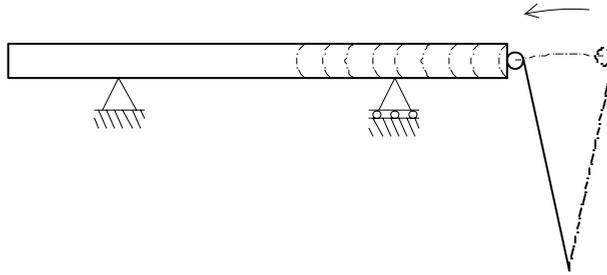


ILUSTRACIÓN 49: Generación de ondas longitudinales

Este tipo de ondas vibran con frecuencias determinadas por:

$$f_n = n \frac{\sqrt{E/\delta}}{2L}, n = 1, 2, 3, \dots,$$

El segundo tipo de ondas elásticas (transversales) se producen cuando el impulso es aplicado en otro punto diferente al eje axial, en especial cuando se aplica de forma perpendicular a dicho eje.

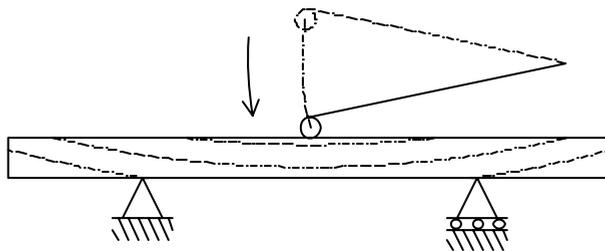


ILUSTRACIÓN 50: Generación de ondas transversales.

El mencionado impulso transmite una fuerza minúscula que simula la flexión de la probeta; así, la cara donde se aplica la fuerza se comporta a compresión, mientras que la cara opuesta se comporta a tracción, generando las fuerzas restauradoras necesarias para "devolver" a la probeta a su estado original generándose así las ondas transversales.

La frecuencia de oscilación de estas ondas están determinadas por:

$$f_n = \frac{\pi K}{8L^2} \sqrt{\frac{E}{\delta}} [3, 011^2, 5^2, 7^2, \dots, (2n+1)^2], n = 1, 2, 3, \dots,$$

Tanto las ondas longitudinales como las transversales, en el momento de llegar a los bordes del cuerpo, experimentan dos fenómenos físicos: una parte de dichas ondas son reflejadas y otra parte es refractada. La porción refractada pone a vibrar las partículas de aire que rodea al cuerpo produciendo un sonido<sup>44</sup> característico. Mientras que la porción reflejada, vuelve a transmitirse en el interior produciendo una serie de ondas estacionarias.

De estas dos formas de vibración que se pueden generar, aquellas más sencillas de obtener son las trasversales, ya que es más fácil "deformar" la probeta en esta dirección que en dirección longitudinal o paralela.

Aunque ambos tipos de ondas permiten establecer los valores de ( $f_1$ ) y de MOE dinámico, son las ondas transversales las usualmente empleadas porque, como ya se indicó anteriormente, son generadas con mayor frecuencia que aquellas longitudinales. Por este motivo, tanto la explicación del fenómeno de ( $f_1$ ), como su relación con los valores de MOE dinámico, se realiza a partir de las ondas transversales.

---

<sup>44</sup> El término sonido debe emplearse únicamente con los fenómenos acústicos que el oído humano puede percibir (entre 30 - 15.000 ciclos/segundo). Estos fenómenos se originan por la vibración de cuerpos elásticos y se transmiten en el aire. Todos los demás fenómenos acústicos relacionados con la vibración de cuerpos que están fuera del rango de vibraciones percibidas por el oído humano o que se transmiten en otro medio que no sea el aire (y que por lo general no son percibidos por el oído) se deben llamar ondas. (Randall R. 1951)

Para comprender este fenómeno y el trabajo realizado experimentalmente, considérese como referente una barra ideal<sup>45</sup> de madera cuyos extremos pueden vibrar libremente.

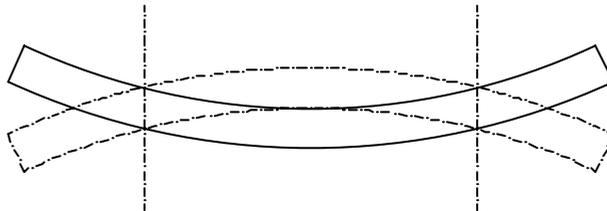


ILUSTRACIÓN 51: Vibración libre de una barra ideal simplemente apoyada.

Las barras son sistemas de vibración unidimensional que, a continuación de recibir un impulso, producen vibraciones cuyas frecuencias son específicas y múltiplos de aquella fundamental ( $f_1$ ).

Estas vibraciones, múltiplos de la natural y denominadas como sobretonos ( $f_{2,3,4,etc}$ ) son amortiguadas rápidamente debido a la fricción interna de la madera y porque los nodos para  $f_1$  no coinciden con aquellos para  $f_{2,3,4,etc}$ , por lo que la barra termina vibrando con su frecuencia fundamental. (Grundström, F. 1998; Kinsler, L., et al, 1980)

Para  $f_1$ , los nodos están ubicados a  $x = 0,224L$  y  $x = 0,776L$ ; y poseen una longitud de onda de  $\lambda = 1,330L$ ; en los tres casos,  $L$ , es la longitud

<sup>45</sup> Barra ideal, se denominó así a un prisma imaginario de madera, libre de defectos y cuyas dimensiones son idénticas a las probetas con que se trabajó en esta investigación: 300mm de longitud y una sección cuadrangular de 20x20mm, uniforme en toda la longitud de la barra.

de la barra; y es en los nodos donde se deben colocar los apoyos que permitan la vibración libre de la probeta.  $x = 0,224L$

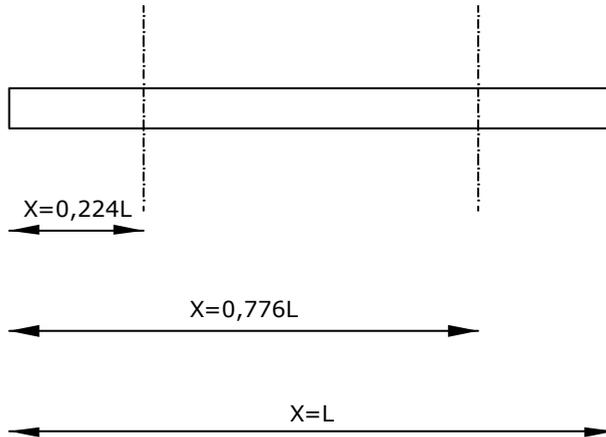


ILUSTRACIÓN 52: Nodos para frecuencia fundamental.

Un apoyo ideal debe poseer los bordes filis a manera de cuchillo que coincidan en el nodo y evitar la disipación de energía que se produce cuando el apoyo está fuera de la línea nodal; sin embargo, es posible emplear apoyos de superficie plana que permitan cierta desatención en la ubicación del apoyo, siempre y cuando el material a emplear sea altamente elástico y poroso como las esponjas.

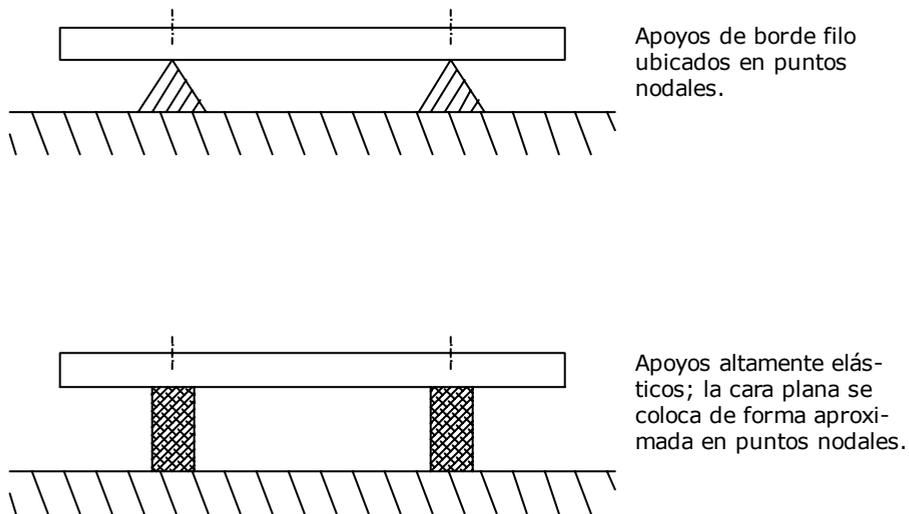


ILUSTRACIÓN 53: Apoyos para ensayos de frecuencia fundamental.

El valor de  $f_1$  depende de varios factores propios del material constitutivo del objeto: su masa, sus dimensiones, su geometría, su sección, sus propiedades elásticas, su rigidez, y su módulo de elasticidad dinámico; es decir, cada barra de madera tendrá su propio valor de frecuencia fundamental.

La peculiaridad que esta frecuencia sea propia de cada probeta, permite plantear a  $f_1$  como un valor constante, y cualquier variación del mismo indicaría algún tipo de alteración o modificación en la estructura interna de la madera, probablemente ocasionada por un ataque de organismos xilófagos o por cambios en el contenido de humedad.

Teniendo en cuenta que en este modo de vibración los cuerpos no están sometidos a fuerzas de torsión ni cizalladura, la frecuencia de vibración de la primera armónica está dado por:

$$f_1 = 3,5607K / L^2 \sqrt{E/\delta}$$

Donde,

$K$  : Constante, radio de giro  $K = h/\sqrt{12}$ ;  $h$  : altura de la probeta.

$L$  : longitud de la probeta.

$E$  : módulo de elasticidad.

$\delta$  : densidad de la probeta.

Este valor se empleó como método alternativo a la densidad para clasificar las probetas en niveles de deterioro. El proceso seguido se explica más adelante en el apartado referido a la fase experimental.

### **5.3. IMPREGNACIÓN – CONSOLIDACIÓN.**

(Carreras, R. 2003; Rodríguez, J. 1998; Schniewind, A. 1995)

La consolidación de la madera implica la introducción de una solución de resina determinada en el interior de la estructura porosa del leño; dicha estructura al estar formada por células interconectadas tanto en sentido longitudinal como transversal, es capaz de ejercer sobre el fluido con el cual entra en contacto, una atracción tal que las moléculas de este fluido penetren en el interior de la madera. Este flujo desde el exterior hacia el interior de la madera es en realidad un fenómeno de impregnación y se trata de un proceso determinado por la interacción de los siguientes factores:

- Las características de la madera.
- Las características de los productos a ser empleados.
- El sistema de aplicación de los productos.

Estos tres factores explican la introducción en la madera de una resina disuelta, sin embargo, no explican otro fenómeno igualmente importante durante la consolidación:

- la distribución de la resina y la evaporación de solventes.

### **5.3.1. CARACTERÍSTICAS DE LA MADERA.**

Las características de la madera que influyen en su impregnación y que deberían tenerse en cuenta antes de iniciar la consolidación, podrían agruparse según su naturaleza en: físicas y químicas. Las primeras, se refieren a la porosidad, permeabilidad, contenido de humedad y nivel de deterioro; mientras que las segundas se refieren a la naturaleza química de los productos extractivos contenidos en el interior de la madera.

#### **5.3.1.1. LA POROSIDAD.**

(Carreras, R. 2003; Picard, M. 1994; Rodríguez, J, 1998; Schniewind, A. 1995)

La porosidad de la madera indica la relación entre los orificios propios del tejido leñoso como vasos, fibras, canales, etc. (volumen de

oquedades) en un volumen determinado de madera (volumen total del cuerpo en estudio).

Esta cualidad varía entre las diferentes especies porque cada una posee una disposición, dimensiones, interconexión y espacios de, y, entre sus células propias, y en consecuencia cada especie posee mayor o menor nivel de absorción de los fluidos<sup>46</sup>.

Así, maderas muy porosas como la balsa (*Ochroma pyramidale*) son fácilmente impregnables, mientras que otras poco porosas como el guayacán (*Guaiacum officinalis*) son prácticamente impermeables aún cuando la aplicación se realiza con sistemas de vacío – presión.

Sin embargo esta propiedad es característica de cada especie forestal, el valor puede variar dentro de una misma especie o incluso al interior de un mismo árbol ya que las dimensiones y distribución de las células son diferentes entre zonas de madera temprana y tardía, o, entre zonas de madera de albura y duramen; resultando diferente el valor de la porosidad.

Adicionalmente, el deterioro causado por agentes biológicos provoca un incremento sustancial de la permeabilidad de la madera, en especial si los organismos destruyen las membranas de intercomunicación entre las células del vegetal.

La porosidad es inversamente proporcional a la densidad. La densidad indica la cantidad de madera existente en unidad de volumen; mientras

---

<sup>46</sup> En física, se conoce como fluido a aquellas sustancias que a temperatura ambiente sus estados pueden ser líquidos o gaseosos; en el caso de esta tesis, se entenderá como líquido.

que la porosidad indica la cantidad de espacio vacío existente en el mismo volumen de madera.

### **5.3.1.2. LA PERMEABILIDAD.**

(Carreras, R. 2003; Rodríguez, J. 1998; Schniewind, A. 1995)

Se entiende como permeabilidad ( $k$ ) de la madera a la cualidad que ésta posee para permitir la penetración de un fluido en su interior. Este valor es característico y considerado constante para cada especie forestal siempre que la madera no presente defectos y se relaciona directamente con la porosidad. Su valor se puede obtener experimentalmente con la ayuda de un porosímetro de mercurio.

La constante de permeabilidad,  $k$ , depende de la especie de madera, de la zona del árbol estudiada, y al grado de interconexión entre los diferentes elementos celulares del tejido leñoso. Teniendo en cuenta que la gran mayoría de las células del vegetal están dispuestas paralelamente al eje longitudinal de este, se concluye que la permeabilidad de la madera es mayor en sentido longitudinal, es decir, los fluidos circulan más fácilmente en esta dirección, que en los sentidos radial y transversal.

Además de esta diferencia en la dirección de la penetración, la permeabilidad de la madera cambia mucho de una especie a otra. Como referencia, la permeabilidad longitudinal de coníferas varía entre 500 y 80.000 en coníferas y de 30.000 a más de 100.000.000 en latifoliadas.

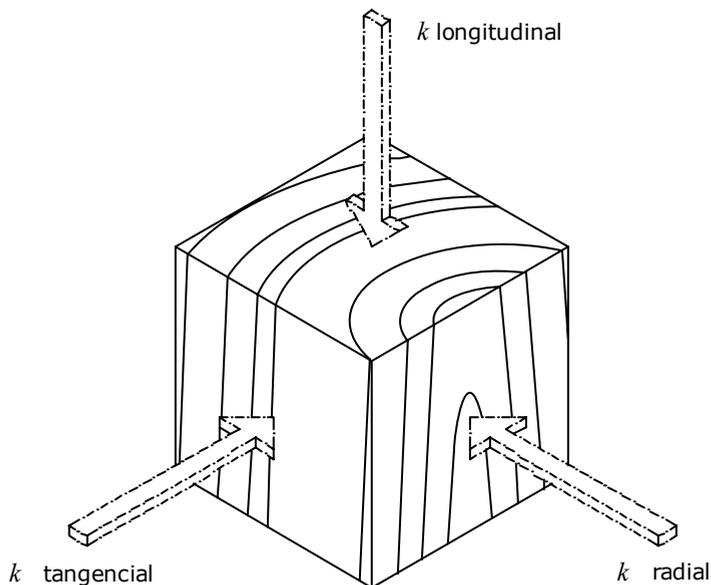


ILUSTRACIÓN 54: Permeabilidad ( $k$ ) de la madera.  
 $k$  long >  $k$  rad >  $k$  tng

En principio se puede afirmar que cuanto mayor sea la penetración mejor será el resultado obtenido con la consolidación; y aunque se trata de un proceso complejo, se puede explicar el fenómeno de la impregnación con tres diferentes modelos diferentes: ley de Darcy, capilaridad – ley de Poiseuille o el modelo de Siau; los dos primeros modelos explican el flujo del líquido únicamente desde una cara (superficie) del cuerpo que se pretende impregnar, mientras que el último modelo es más realista porque no considera la impregnación desde una superficie en concreto sino el total de espacio vacío capaz de ser impregnado.

- Según la ley de Darcy:

flujo = permeabilidad \* gradiente de presión

$$\frac{Q}{A} = \frac{k}{\eta} * \frac{\Delta P}{L}$$

Donde:

$Q$ : cantidad de fluido ( $m^3/s$ ).

$A$ : sección transversal de la pieza, perpendicular a la dirección del flujo ( $m^2$ ).

$k$ : permeabilidad específica del material ( $m^3/m$ ).

$\eta$ : viscosidad del fluido ( $N*s/m^2$ ).

$\Delta P$ : diferencia de presión en los extremos de la pieza ( $N/m^2$ ).

$L$ : distancia entre los extremos donde se mide (m).

Al observar las variables que intervienen en este modelo, las únicas susceptibles de controlar o modificar con el objetivo de conseguir una mayor penetración son:  $\eta$  y  $\Delta P$  ya que las demás ( $A$ ,  $k$  y  $L$ ) son propias del objeto que se pretende impregnar y se mantienen constantes.

Analizando en el modelo de Darcy, la viscosidad del fluido ( $\eta$ ) es inversamente proporcional flujo de la solución, es decir, a menor viscosidad mayor será la penetración del fluido y viceversa. Y por el

contrario, el diferencial de presión ( $\Delta P$ ) es directamente proporcional al flujo lo que indica que una diferencia elevada de la presión, resulta en una elevada penetración y viceversa.

- Considerando el segundo modelo, el flujo de la solución se explica como un fenómeno de capilaridad, aplicando una variante de la ley de Poiseuille:

$$Q = \frac{nr^4 \Delta P}{8\eta L}$$

Donde:

$n$ : es el número de capilares.

$r$ : es el diámetro medio capilar (m). Las demás variables se corresponden a las anteriormente explicadas.

Al estudiar el modelo se aprecia que nuevamente las variables manipulables son  $\Delta P$  y  $\eta$ , y al igual que en el primer modelo,  $Q$  es directamente proporcional a  $\Delta P$ , e inversamente proporcional a  $\eta$ .

- Finalmente, el tercer modelo, de Siau, establece que la retención de fluido al interior de un cuerpo prismático se define con la siguiente ecuación:

$$F_{vl} = \frac{2}{L} \cdot \left( \frac{2k\Delta Pt}{V_a \eta} \right)^{1/2}$$

Donde:

$F_{vl}$  volumen de retención ( $m^3/m^3$ ).

$t$  tiempo empleado en el proceso (s).

$V_a$  porosidad de la madera, volumen del poro sobre volumen total ( $m^3/m^3$ ). Las demás variables se corresponden a las anteriormente indicadas.

Analizando este modelo se observa que también aquí las únicas variables que se pueden modificar para alcanzar una adecuada penetración, o como en este caso, un adecuado volumen de retención, son la viscosidad del fluido y la diferencia de presión al momento de aplicar el producto.

Como se aprecia en los tres modelos, para obtener una adecuada penetración solamente se puede modificar la viscosidad del líquido o la presión a la que éste se aplica. De estas dos variables, la segunda no es recomendada si se trabaja en cámaras de vacío ya que no se controla directamente el vertido de la solución.

Métodos alternativos, se puede recurrir a aquellos que emplean una fuerza capaz de generar un gradiente de presión, como las fuerzas de gravedad o la fuerza de la tensión superficial involucrada en el mojado y la acción capilar.

Con lo arriba indicado, se descarta la posibilidad de controlar la variable Presión; quedando la variable Viscosidad del fluido seleccionado como factor clave a controlar con el fin de obtener resultados satisfactorios; en consecuencia, una alta viscosidad de la solución implica un bajo índice de penetración y viceversa. Así pues, es necesario buscar un adecuado equilibrio entre viscosidad y nivel de penetración.

### **5.3.1.3. CONTENIDO DE HUMEDAD.**

(Rodríguez, 1998; Schniewind, A. 1995)

La humedad en el interior de la madera, ya sea como agua libre (ubicada en los espacios intercelulares y en el lumen celular) o como agua de constitución (aquella ubicada en el interior de la pared celular) influye en el momento de la impregnación. La humedad existente evita que soluciones no polares (que son generalmente empleadas porque no hinchan la madera) penetren en la pieza y que entren en contacto con la superficie de la pared celular.

### **5.3.1.4. NIVEL O GRADO DE DETERIORO.**

(Schniewind, A. 1995)

En una madera atacada por cualquier organismo xilófago, la constante de permeabilidad varía debido a que la acción xilófaga facilita la penetración del fluido en especial si estos organismos destruyen las membranas celulares.

### **5.3.1.5. LA NATURALEZA DE LOS PRODUCTOS EXTRACTIVOS.**

(Fengel, D. et al 2003)

A pesar que la cantidad de sustancias extractivas representa un porcentaje pequeño del total de la masa de la madera, su presencia influye notablemente en la impregnación de la madera.

Dichas sustancias, que pueden ser compuestos aromáticos, terpenos, ácidos alifáticos, alcoholes o varios compuestos inorgánicos, se ubican junto a la pared celular e impiden la penetración y fijación del producto.

### **5.3.2. CARACTERÍSTICAS DE LAS SOLUCIONES RESINA – SOLVENTE.**

(Horie, C., 2000; Schniewind, A., 1995)

Para seleccionar un solvente adecuado para disolver y aplicar las resinas termoplásticas se debe recordar que:

1.- influye en el grado de penetración de la resina en el interior de la madera; esto se debe a dos factores: por un lado el grado de polaridad del solvente y por otro lado porque varía la viscosidad de la solución solvente – resina. Es decir, una misma resina disuelta a una misma concentración pero con diferente solvente da como resultado una solución con diferente viscosidad.

Los solventes polares aún teniendo buena afinidad con la madera, tienen una limitada penetración en comparación con los solventes no polares, debido a que las moléculas del solvente polar serán absorbidas y retenidas en el interior de la capa externa de madera reduciendo la movilidad del líquido. Los no polares por el contrario no alcanzan mayor profundidad.

Los solventes, cuanto más aumentan su polaridad, más tienden a hinchar la madera. Tomando como unidad de referencia la hinchazón producida por el agua, el tolueno hincha la madera en

un porcentaje de 1,6%, la acetona un 63%, el etanol un 83% y el metanol un 95%.

2.- Las propiedades mecánicas de la resina (una vez aplicada y fijada en la madera) pueden variar significativamente en función del solvente empleado. Son preferibles los solventes con puntos de ebullición bajos porque dejan menor cantidad de vapores residuales ya que éstos pueden alterar el comportamiento futuro de la resina al interior de la madera.

3.- La polaridad del solvente empleado, no afecta significativamente a la distribución de la solución resina - solvente en el interior de la madera.

4.- La cualidad adhesiva<sup>47</sup> de un polímero es afectada por la polaridad del solvente empleado; los solventes no polares reducen la capacidad de adhesión de la resina.

5.- La volatilidad y el punto de ebullición del solvente son características a tener en cuenta. Por un lado, de ambos dependerá el tiempo en que el solvente permanezca en el interior de la madera (cuanto más volátil, menos tiempo permanece) interactuando por más tiempo con los estratos del objeto. Y por otro, será más fácilmente reversible el polímero disuelto con solventes volátiles de bajo punto de ebullición, que empleando un solvente menos volátil y de elevado punto de ebullición.

---

<sup>47</sup> La diferencia principal entre un polímero para adherir o para consolidar radica en su formulación. Los primeros se usan a elevada viscosidad para que el producto quede en la superficie de unión, mientras que el segundo se aplica a baja viscosidad para que penetre en la madera y otorgue resistencia. (Schniewind, A., 1995)

6.- Los solventes retenidos reducen el punto de transición vítrea del polímero, tornándolo menos efectivo; este efecto se puede minimizar empleando solventes de bajo punto de ebullición.

### **5.3.3. SISTEMA DE APLICACIÓN.**

(Barclay, R. 2004; Rodríguez, 1998; Schniewind, A., 1995)

Independientemente del sistema de aplicación y con cualquier resina soluble, hay que evitar el contacto de la solución resina – solvente con base de preparación, capa pictórica o capas de diferentes materiales aplicados como parte del objeto.

La decisión de optar por un sistema u otro de aplicación, depende del profesional o profesionales responsables de la intervención ya que no existen normas para la aplicación de los productos, siendo en consecuencia muy importante estudiar los requerimientos de cada objeto y así determinar el sistema más adecuado.

Una vez se ha optado por aplicar una resina en el objeto, hay que establecer si la solución se aplica de forma gaseosa o líquida; siendo el estado líquido el usualmente empleado ya que aparentemente la aplicación en forma gaseosa no llega a penetrar la cantidad necesaria para reforzar la madera deteriorada, pudiendo ser insuficiente un tratamiento así ejecutado.

Se conocen siete métodos para consolidar maderas empleando cualquier tipo de resinas solubles, esos métodos son:

- Aspersión (atomizado o pulverizado de la solución).

- Pincelado (aplicación con pincel o brocha).
- Goteo.
- Inyección.
- Inmersión.
- Controlando la presión (solo vacío o combinación de vacío y presión).
- Capilaridad (la solución se eleva al interior del objeto que reposa sobre el primero).

a.- La aplicación por aspersion no llega a penetrar la cantidad necesaria para reforzar la madera deteriorada, pudiendo ser insuficiente un tratamiento con este método.

b.- El sistema de aplicación por pincelado es efectivo únicamente en casos donde se pretende consolidar las capas externas del objeto. De lo contrario, cuando se desea un ingreso más profundo, este sistema es poco efectivo; en especial si se emplean resinas de curado por catálisis (ya sean termoestables o de polimerización in situ) porque no es factible realizar más de una aplicación. El empleo de solventes volátiles dan buenos resultados cuando son aplicados con brocha controlando la evaporación para alcanzar mayor penetración. Conforme va evaporando el solvente, la resistencia del conjunto madera – polímero va incrementándose.

Si se opta por este método de aplicación, los mejores resultados se consiguen con aplicaciones sucesivas de solución a baja concentración como por ejemplo un tratamiento de maderas deterioradas realizado por Barclay, empleando Butvar B98 al 5% en etanol y aplicado con brocha observándose buenos resultados). Si se eleva la concentración de la solución se puede correr el riesgo de que el producto encostre en las zonas inmediatamente cercanas a la superficie formando una capa rígida.

c.- Por goteo, debe mantenerse una frecuencia adecuada de aplicación a fin de mantener el objeto empapado de solución.

d.- Inyección, es un proceso selectivo y puntual.

e.- Inmersión. Este sistema mantiene el objeto mojado y en contacto con la solución resina solvente evitando el proceso de evaporación de los solventes. Sin embargo, este método puede resultar costoso, inseguro para la integridad de objetos grandes porque aumenta sustancialmente el peso tornándolo frágil durante su manipulación, y perjudicial para los profesionales porque se exponen.

Una alternativa a la inmersión es aplicación del producto en un proceso continuo o intermitente de un sistema de recirculación de la solución en espacios o cámaras cerradas<sup>48</sup>.

f.- Presión (generando vacío). El último método y el más efectivo para alcanzar la máxima penetración es alterando la presión (al vacío),

---

<sup>48</sup> Ejemplo de la consolidación con PVA al 13% de una canoa, consiguiendo la completa penetración del producto. Sin embargo no menciona como estableció la condición original de la canoa, tampoco la condición después de la intervención ni como estableció la cantidad de PVA que ingresó en la madera. (Schniewind, A., 1995)

forzando a la solución resina – solvente a penetrar por diferencia de presión. Este es un método práctico, excepto con objetos grandes. La forma más fácil de llevar a cabo este método es sumergir el objeto en la solución y entonces generar el vacío al interior de la cámara. Se mantiene el vacío hasta que la mayor parte del aire contenido en la madera haya sido extraído. Solo entonces el vacío es suspendido y la presión atmosférica fuerza a que el líquido penetre en la estructura porosa de la madera.

Este método se puede mejorar si el vacío es producido antes de aplicar el producto, entonces se introduce la solución resina – solvente, hasta cubrir el objeto. Con este procedimiento, el líquido no impide la extracción del aire del interior del objeto. Este sistema requiere de equipo especial, usualmente denominado como autoclave y su empleo no se podría justificar en la mayoría de los casos.

Se han obtenido buenos resultados con soluciones de Butvar B90 al 20% en etanol, que siendo una concentración elevada, y por ende de poca penetración empleando los métodos anteriormente explicados, por efecto del vacío creado, se alcanzó suficiente penetración.

Es necesario recordar que al interior del objeto hay aire retenido que evita la penetración de la solución, y para eliminar este aire, se crea vacío al interior del objeto, lo que permite que el tejido leñoso absorba con mayor facilidad los productos. Una vez que el producto ha cubierto la madera, se vuelve a la presión atmosférica normal que fuerzan aún más la penetración.

g.- Capilaridad. Consiste en colocar el objeto sobre un recipiente con la solución resina – solvente; únicamente la cara inferior del objeto entra

en contacto con la solución que resulta succionada por efecto capilar. La condición para que se produzca este efecto es que el radio del capilar sea menor a 1mm, con radios superiores no se produce dicho fenómeno.

#### **5.3.4. EVAPORACIÓN Y DISTRIBUCIÓN.**

(Barclay, R. 2004; Schniewind, A., 1995)

Al emplearse solventes para introducir el polímero en el interior de la madera deteriorada, existe la probabilidad de que durante la evaporación o eliminación del solvente se produzca el fenómeno de migración inversa (por arrastre) del polímero hacia la superficie del objeto.

La evaporación del solvente, puede abrir vacío en el interior de la resina, restando continuidad a la matriz formada y en consecuencia reduciendo la resistencia mecánica.

En el caso de que el solvente se emplee para mejorar la penetración de resinas termoestables, la migración inversa de la resina puede ser reducida o eliminada si se retrasa la evaporación del solvente hasta cuando la resina haya curado y se haya fijado al interior del objeto.

Algunos estudios demuestran que las probetas que han sido sometidas a una evaporación de solventes lenta, presentaron menor resistencia al pando, en comparación con aquellas probetas secadas rápidamente en aire abierto.

## VELOCIDAD DE EVAPORACIÓN.

(Barclay, R. 2004; Schniewind, A., 1995)

Los tratamientos con Butvar B98 y Paraloid B72 secadas al aire abierto fueron examinadas para determinar la distribución del de estas resinas. Los resultados indican que el producto se concentra en mayor medida cerca de la superficie que en el centro. Se confirma el fenómeno de la migración inversa basándose en el hecho de que las probetas fueron completamente saturadas con la solución resina - solvente y que se observó mayor presencia de resina en las zonas cercanas a la superficie que en el interior.

Por el contrario, probetas secadas lentamente presentaron menor resistencia al pandeo, concluyéndose que se produjo menor migración inversa debido a una lenta evaporación de los solventes. Se concluye que la resistencia al pandeo de las probetas dependerá de la concentración de resina en las zonas cercanas a las caras exteriores más que la cantidad depositada en el centro.

### 5.4. MÓDULO DE ELASTICIDAD

Se conoce como módulo de elasticidad o módulo de Young ( $E$ ) a la relación existente entre la presión ( $\sigma$ ) que flexiona<sup>49</sup> un cuerpo elástico y la deformación ( $\varepsilon$ ) experimentada por dicho cuerpo.

$$E = \sigma / \varepsilon$$

---

<sup>49</sup> La flexión es el encorvamiento transitorio que experimenta un sólido por la acción de una fuerza que lo deforma elásticamente.

Este valor permite caracterizar el comportamiento del material y he indica la propiedad del cuerpo para recobrar su geometría original en el momento que deja de actuar la carga.

La aplicación de este módulo al caso de estudio radica en el hecho que la madera es un material elástico y que tablas de los artesonados y cielo raso barroco al estar colocadas tanto de forma horizontal como inclinada, y debido a su propio peso, están sometidas a flexión y considerando que no deben soportar ninguna carga, su deformación sería elástica; sin embargo, el ataque de insectos xilófagos, provoca una reducción de la elasticidad de la madera, tornándola frágil y quebradiza, la comparación entre los valores teóricos del módulo de elasticidad de la madera sana con la deteriorada permite tener una idea del nivel de afectación provocado por la presencia de insectos pero más importante aún, permite comparar el efecto de la consolidación como una recuperación de sus cualidades elásticas.

Se puede determinar el valor de este módulo ya sea con ensayos de evaluación no destructivos (métodos dinámicos) o con ensayo de evaluación destructivo (método estático). Los procedimientos dinámicos miden alguna variable relacionada con las propiedades elásticas del cuerpo testado, para entonces calcular indirectamente el valor del módulo de elasticidad; el método dinámico probado en esta investigación se basa en el valor de la frecuencia fundamental; y para corroborar los valores encontrados por este sistema, es necesario compararlos con aquellos obtenidos por el procedimiento estático. El método estático por su parte es real, porque relaciona el valor de la fuerza aplicada con la distancia longitudinal unitaria resultante de la acción de dicha fuerza. Debido a que es un valor real, es el referente de comparación de los métodos dinámicos.

Aunque las normas indican que esta técnica es adecuada para materiales homogéneos e isotrópos, varios estudios indican que se puede emplear para evaluar la calidad de material heterogéneo e anisótropo como la madera sana, dichos estudios establecen una buena correlación entre los valores MOE dinámico obtenidos con este sistema y el convencional de flexión estática MOE estático.

A continuación se explican ambos procedimientos.

#### **5.4.1. MÓDULO DE ELASTICIDAD, PROCEDIMIENTO DINÁMICO**

(ASTM E1876-07; ASTM C1259-08; Baettig, R. 2001; Bucur, V. 1995; Czichos H. et al, 2006; Gembloux Station de Technologie Forestière, s/f; Machek et al 1998 y 2001: 467; Grindosonic manual, s/f; Gembloux Station de Technologie Forestière s/f.; Grundström, F., 1998; Kaiserlik, J. 1978; Spinner, S. y W.E. Tefft 1961)

Calcular el valor del módulo de elasticidad empleando el procedimiento dinámico en función de  $f_1$  se explica porque la frecuencia fundamental con que vibra una barra depende de su geometría, de su masa y de sus propiedades elásticas. Esto quiere decir que existe una relación entre las propiedades acústicas y elásticas del cuerpo, las cuales a su vez permiten caracterizar el comportamiento mecánico y determinar el módulo de elasticidad del cuerpo en cuestión.

La fórmula general para calcular el módulo de elasticidad dinámico en función de  $f_1$  esta determinado por la siguiente ecuación:

$$E = 0,9465 \cdot (f_1^2 mL^3) \cdot (h^3 b)^{-1}$$

Donde:

$E$  : módulo de Young o de elasticidad dinámico expresado en Pa.

$f_1$  : frecuencia fundamental de la barra en flexión (onda transversal) en Hz.

$m$  : masa de la barra expresada en g.

$L$  : longitud de la barra, mm.

$h$  : espesor de la barra expresada en mm.

$b$  : ancho de la barra en mm.

$T_1$  : factor de corrección.

El procedimiento consiste en medir la frecuencia con la que vibra el cuerpo después de recibir un impulso o excitación mecánica. Esta vibración depende de la masa del objeto, de su rigidez, su forma, dimensiones y el módulo de elasticidad dinámico del material.

En los casos de objetos de geometría irregular se establece un rango de frecuencias aceptables para un determinado espécimen con una particular geometría y masa.

### **5.4.2. MÓDULO DE ELASTICIDAD, PROCEDIMIENTO ESTÁTICO.**

(Capuz, 2008; Coca, et al, J. 2003; Czichos, et al, 2006)

Para explicar mejor este procedimiento, considérese una barra de madera ideal (sin defectos ni alteraciones) y geometría uniforme simplemente apoyada por sus extremos y recibe una carga en su centro, que la deforma, al retirar la carga, la probeta recupera su forma original.

La deformación que presenta una barra de madera es directamente proporcional a la fuerza aplicada para deformarla, es decir, que a mayor fuerza, mayor deformación. Este fenómeno, se debe al hecho de que la madera es un material elástico y por ende susceptible de modificar su forma cuando se le aplica una fuerza que intenta deformarla; al cesar esta fuerza, la madera vuelve a su estado original. Esta etapa de la deformación se conoce como fase elástica.

Cuando la carga aplicada sobrepasa la fase plástica, la deformación es irreversible pero la pieza aún no llega a romperse, esta fase se denomina plástica.

Pero cuando la fuerza sobrepasa esta segunda fase, se produce la rotura; momento en que algunas fibras (las necesarias) de la zona de compresión de la probeta fallan.

El módulo de elasticidad a flexión se calcula en la fase elástica del material testado, intervalo en el cual la relación presión / deformación cumple con la ley de Hooke.

$$E = \sigma / \varepsilon$$

La presión aplicada sobre una probeta será mayor o menor dependiendo de la resistencia que dicha probeta presente a ser flexionada; este valor se calcula con la siguiente fórmula:

$$\sigma = (3pL)/(2bh^2), \text{ donde:}$$

$p$  : carga de rotura medida en Kg.

$L$  : longitud entre apoyos medida en cm.

$b$  : base, medida en centímetros de la cara en dirección radial.

$h$  : espesor, medida en centímetros de la cara en dirección tangencial.

Al reemplazar  $\sigma$  en  $E = \sigma / \varepsilon$ , se obtiene:

$$E = \frac{L^3}{4bh} * \frac{P}{F}, \text{ donde:}$$

$E$  : módulo de elasticidad o módulo de Young.

$L$  : longitud entre apoyos.

$b$  : ancho de la pieza de madera.

$h$  : altura de la pieza de madera.

$P$  : fuerza aplicada al centro.

$F$  : flecha real o desplazamiento.

## **5.5. RESINAS Y SOLVENTES EN LA CONSOLIDACIÓN DE MADERA.**

### **5.5.1. RESINAS.**

(Barclay, R. 2004; Bustinduy, M., 1997; Carreras, R. 2003:44; Horie, C. V., 2000; Matteini, M. et Moles A., 2001:302; Schniewind, A. 1995)

Aunque el término resina se refiere a aquellas sustancias muy viscosas exudadas por diferentes plantas, su uso se ha generalizado como sinónimo de polímero; es decir, un compuesto químico sólido, ya sea de origen natural o sintético, formado por una reacción química (polimerización) en la que dos o más moléculas iguales<sup>50</sup> (unidades estructurales o monómeros, que inmediatamente antes de esta reacción se encontraban en estado líquido) se combinan para formar una mayor en la que se repiten sucesivamente las unidades estructurales primitivas. Precisamente esta propiedad de pasar de estado líquido a sólido por polimerización, conjuntamente con su poder de cohesión y adhesión, caracterizan a los polímeros.

En principio, una resina (polímero o copolímero) puede ser empleada ya sea para consolidar, adherir o para formar un film de protección sobre la superficie del objeto; diferenciándose cada uso en función de la concentración y de las sustancias añadidas, tales como plastificantes. Para el caso de esta investigación, se consideró a las resinas desde la perspectiva de la consolidación de maderas atacadas por insectos xilófagos.

---

<sup>50</sup> Cuando los monómeros que intervienen en la reacción son diferentes, entonces el sólido formado luego del fenómeno polimérico se denomina copolímero; el prefijo co denota agrupación, en este caso, reunión de diferentes monómeros.

El rol que desempeñan las resinas en la consolidación de maderas es el de reforzar a nivel estructural un objeto que ha perdido cohesión interna; para esto, la resina deberá estar íntimamente ligada a la madera; resultado de lo cual no solo altera la resistencia sino también otras propiedades como su color, su peso, su higroscopicidad, etc.

Dicho reforzamiento se alcanza ya sea por reacción entre los componentes de la madera y de la resina, o porque ésta última rellena los espacios del tejido leñoso. En el primer caso se altera la estructura molecular de la madera porque se forman enlaces químicos con los grupos hidroxilos<sup>51</sup> de las unidades estructurales celulósicas. Su eficacia depende de la reactividad y distribución que tenga el grupo hidroxilo de la madera a tratar.

Mientras que en el segundo caso no se produce ninguna reacción química, sino que las sustancias neutrales y no volátiles de la resina se depositan en los lúmenes celulares formando una red tridimensional.

#### **5.5.1.1. TIPO DE RESINAS EMPLEADAS.**

Sabemos que la idea de consolidar la madera atacada por insectos xilófagos es muy antigua; y que es amplia la variedad de productos que han sido los empleados para alcanzar tal fin con mejores o peores resultados; algunos de los productos empleados han sido el almidón, cera de abeja, colas, parafina, resinas ya sean naturales o sintéticas, entre otros.

---

<sup>51</sup> El grupo funcional hidroxilo es más abundante de la madera. (Carreras, R. 2003)

Todos estos productos son polímeros y comparten una característica común: penetran en estado líquido y luego polimerizan, tornándose sólidos a la vez que cohesionan y refuerzan el tejido leñoso. Lo que los diferencia es la forma en que se produce el cambio de fase de estado líquido (necesario para penetrar en la madera) a sólido (necesario para otorgar la mejora buscada).

Teniendo en cuenta el mecanismo del cambio de fase, es posible clasificar los productos en tres grupos o sistemas diferentes: polímero - solvente, polímero reactivo - catalizador; y colada caliente. Se adoptó este sistema de clasificación, en vez de tradicional<sup>52</sup> que separa entre termoplásticas, termoestables y elastómeros, porque lo importante es la forma en que la resina pasa a estado sólido luego de haber penetrado en la madera.

#### SISTEMA POLÍMERO – SOLVENTE.

(Barclay, R. 2004; Horie, C. V., 2000; Schniewind, A., 1995)

Los polímeros de este tipo se encuentran polimerizados antes de su aplicación, siendo necesario disolverlos o hincharlos lo suficiente para aplicarlos en estado líquido. Luego de aplicada esta solución, el solvente empleado inicia su evaporación y el polímero vuelve a solidificar; es decir, polimeriza por evaporación del solvente.

---

<sup>52</sup> El sistema tradicional para clasificar los productos empleados en consolidación agrupa a los compuestos en termoplásticos, termoestables y elastómeros. Aunque este sistema de clasificación es empleado por diferentes autores para identificar aquellos polímeros recomendados en conservación - restauración (Horie, 1995; Petronio, 1966; Rayner, 1978; Salomon, 1978), se optó el sistema de Barclay (2004) porque considera la forma de penetrar las soluciones en el interior de la madera.

Como principales desventajas de este método se puede indicar que la evaporación del solvente empleado requiere una considerable cantidad de tiempo durante el cual la resina puede migrar a la superficie y en algunos casos concentrarse en determinadas zonas reduciendo la efectividad del tratamiento. Adicionalmente, una concentración elevada en el exterior impide la penetración de una segunda etapa de tratamiento.

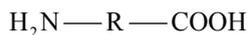
A este grupo pertenecen todos aquellos polímeros catalogados de la forma tradicional como termoplásticos y los más empleados han sido: las colas, las resinas naturales, los polímeros y copolímeros sintéticos termoplásticos y las resinas de formaldehído.

#### LAS COLAS Y GELATINAS TÉCNICAS.

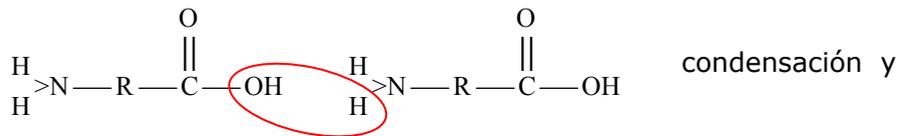
(Barclay, R. 2004; Horie, C. V., 2000; Schniewind, A., 1995)

Son compuestos proteínicos, de origen animal obtenidos de la cocción de diferentes partes de estos seres. Su principal componente es el colágeno y en menor concentración queratina, condrina y elastina.

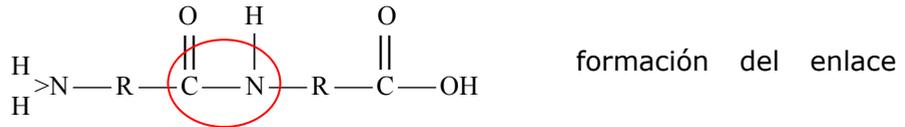
Estas proteínas son copolímeros cuyos monómeros son aminoácidos diferentes y fórmula general es la siguiente:



La polimerización se produce por condensación, cuando el grupo amino de un monómero ( $\text{H}_2\text{N}$ ) reacciona con el grupo ácido ( $\text{COOH}$ ) del siguiente, liberando una molécula de agua y formando un enlace peptídico que une los dos monómeros.



liberación de agua,



peptídico.

Su peso molecular varía en función de la fuente de obtención del colágeno o en función del grado de refinamiento al que ha sido sometida la cola; así, puede variar entre 20.000 y 250.000umas. los mayores pesos moleculares presenta la cola fuerte, obtenida de pieles, tejido conjuntivo, o huesos de animales grandes; le siguen la cola de conejo, obtenida a partir de animales de menor tamaño como el conejo, y las gelatinas técnicas; finalmente la cola pez extraída de las vejigas natatorias del esturión.

Todas las colas y gelatinas se caracterizan porque penetran poco en la estructura de la madera; hinchan o deshinchan como consecuencia de cambios en la humedad ambiental; no son resistentes a la humedad; y, se vuelven quebradizos con el transcurso del tiempo. Características éstas que hacen poco recomendado el empleo de las gelatinas y colas para consolidar madera.

## RESINAS NATURALES.

(Barclay, R. 2004; Horie, C. V., 2000; Schniewind, A., 1995)

Las resinas, propiamente dichas, son polímeros correspondientes a la parte sólida de los exudados de algunas coníferas y algunas leguminosas; tanto la parte sólida como la líquida segregadas por el vegetal son sustancias de naturaleza terpénica cuya molécula básica es

el isopreno: 
$$\begin{array}{c} \text{H} \quad \text{CH}_3 \\ | \quad | \\ \text{H} > \text{C} = \text{C} - \text{C} = \text{C} < \text{H} \\ | \quad | \\ \text{H} \quad \text{H} \end{array}$$
, y, en función del número de

moléculas básicas y del orden en que se agrupan aparecen diferentes productos cuyas características físicas y químicas difieren de uno a otro; correspondiendo a la parte sólida las agrupaciones de 4 y 6 moléculas de isopreno, denominadas respectivamente: diterpeno y triterpeno.

De las referencias bibliográficas, se sabe que la colofonia (resina diterpénica) y el damar (resina triterpénica) han sido empleadas con frecuencia para consolidar madera; pero los resultados obtenidos son moderados y con el paso del tiempo estas resinas se tornan rígidas y quebradizas.

## LOS POLÍMEROS Y COPOLÍMEROS SINTÉTICOS.

(Barclay, R. 2004; Horie, C.V., 2000; San Andrés, M., 1990; Schniewind, A., 1995:92)

De la amplia gama de productos sintéticos, aquellos que pudiéndose emplear en la consolidación de madera atacada por insectos xilófagos, y que se aplican disolviendo la resina, destacan las resinas vinílicas (en especial acetato de polivinilo, PVAC; el poli vinil butiral, PVB y el cloruro

de polivinilo, PVC) y las resinas acrílicas (especialmente el poli etil metacrilato / metilacrilato, P(EMA/MA)).

En principio todos estos polímeros son susceptibles de volver a disolver (a menos que se haya añadido agentes que formen enlaces cruzados), esto no significa que sea un tratamiento reversible. Pero esta propiedad de la resina de ser disuelta debe tenerse en cuenta porque permite realizar la limpieza de los excesos que pueden haber quedado (siempre que la superficie esté en condiciones de soportar esta limpieza). Una ventaja adicional de estas resinas es el hecho de que pueden perdurar durante bastante tiempo sin evidente alteración y tienen buena compatibilidad con otros materiales.

A pesar de que como material, estos productos son estables y casi inalterables en condiciones normales, poseen características negativas que deben tenerse en cuenta, algunos de estos puntos negativos son:

- Elevada toxicidad, ya sea del monómero, como el caso del cloruro de polivinilo, PVC; o de los solvente empleados para la disolución de las resinas como el caso de las acrílicas.
- Los solvente empleados para disolver la resina provocan el hinchamiento de la madera.
- El refuerzo que otorgan a la madera no es tan efectivo como el obtenido con resinas del grupo polímero reactivo - catalizador.

Estas desventajas pueden ser controladas si se realiza una correcta selección de la resina, su concentración, el solvente, el método de aplicación y controlando el proceso de evaporación del solvente.

## SISTEMAS POLÍMERO REACTIVO – CATALIZADOR.

(Horie, C.V., 2000; Schniewind, A., 1995:91)

Este grupo de resinas se caracterizan porque polimerizan in situ, es decir, penetran en la madera en forma de monómeros, (estado líquido) y una vez dentro del tejido leñoso, se activa su polimerización se produce por reacción química ya sea por la acción de un agente catalizador (añadido a la resina inmediatamente antes de la impregnación) o por acción de radiaciones que inicien el proceso de polimerización, evitando así el uso de solventes como en el sistema anterior (polímero – solvente).

Una característica importante de las resinas de este grupo es que al no contener solventes, la penetración y distribución que alcanzan no se alteran durante el proceso de polimerización; además, la totalidad del producto aplicado son sólidos a diferencia del sistema polímero – solvente, donde un porcentaje no mayor al 20% de la solución son sólidos.

Dentro de este grupo destacan las resinas epoxi, sistema monómero – catalizador, porque han demostrado ser las más adecuadas en el reforzamiento estructural; poseen una excelente durabilidad; gran poder adherente, elevada resistencia y no encoge durante el polimerizado. Pero debido a su elevada viscosidad presentan poca penetración. El empleo de resinas epoxi en conservación restauración de bienes culturales es conveniente únicamente si la madera está severamente deteriorada.

Con referencia a las resinas que polimerizan por acción de una energía radiante, destacan algunos monómeros o pre polímeros acrílicos. Éstas, a diferencia de las epoxi, poseen una baja viscosidad y aunque esta

característica sea positiva, en tanto y en cuanto ofrecen un elevado nivel de penetración, es negativa porque si no se controla la penetración podría interactuar con las capas de preparación y pictórica. Sopesando este riesgo, los objetos tratados con estas resinas y procedimiento evidencian buenos resultados.

Como desventajas comunes se mencionan:

- Quedan permanentemente fijas en el interior de la madera sin posibilidad de volver a disolverlas.
- Producen calor en el momento de polimerizar.
- Alteran considerablemente la apariencia superficial del objeto.
- No se tiene control sobre la reacción química; una vez iniciada ésta, no hay forma de corregir o detener el proceso.

#### SISTEMAS DE COLADA CALIENTE.

(Barclay, R. 2004; Schniewind, A., 1995)

Los productos de este grupo son pocos y corresponden a las ceras; aquellas empleadas para consolidar madera deteriorada, ya sean solas o combinadas con otras resinas, han sido: la cera de abeja, de origen natural; y, la parafina y las ceras poli etilénicas, ambas obtenidas por destilación del petróleo.

A diferencia de los productos de los sistemas polímero - resina y polímero reactivo - catalizador, éstos, son susceptibles de licuar

aumentando su temperatura, momento en el que son aplicados en la madera; una vez dentro, y por enfriamiento vuelven a solidificar.

Tanto la parafina como la ceras poli etilénicas son polímeros cuya unidad fundamental es el etileno; su diferencia radica en el número de monómeros que intervienen en la formación de la cadena polimérica y en el tipo de cadena que forman, así, la parafina posee un cadena lineal, mientras que las ceras poli etilénicas forman cadenas extremadamente ramificadas e irregulares.

Cuanto más uniforme y regular es la cadena, éstas se juntan y forman cristales, característica que a su vez torna quebradiza al polímero; por este motivo, la parafina es más deleznable que las ceras poli etilénicas.

Las principales desventajas de estos productos para consolidar maderas, son:

- Los objetos tratados adquieren una apariencia grasosa.
- La superficie atrae y retiene polvo y otras partículas sólidas suspendidas en el aire con facilidad.
- Oscurecen con el paso del tiempo.
- La resistencia que otorgan a la madera es mínima.
- Son difíciles de remover y los residuos interfieren con tratamientos posteriores.
- Poco control durante la aplicación.

### **5.5.1.2. CARACTERÍSTICAS DESEADAS EN LOS POLÍMEROS EMPLEADOS PARA CONSOLIDAR MADERAS.**

Como características básicas deseables, varios autores coinciden en señalar que un polímero debería:

- Poseer adecuadas propiedades elásticas y de dureza, para reforzar de forma efectiva el objeto y dotarlo de la estabilidad necesaria para permitir su limpieza y manipulación.
- Ser susceptible de trabajar, tratar o remover totalmente a corto o largo plazo sin causar daño el objeto ni afectar la salud del operador.
- Ser compatible con otros materiales, tanto con aquellos que son parte del objeto, capas de preparación y pictórica) como aquellos que serían aplicados en futuros tratamientos.
- Conservar estables sus propiedades mecánicas, ópticas y químicas a lo largo del tiempo a fin de que el producto se deteriore más lentamente que el objeto.
- Ser lo menos tóxico posible.
- Ser barato, comercialmente conocido y de fácil y segura aplicación.
- No debería alterar ninguna característica química, óptica ni física (excepto aquellas que se pretende mejorar) ni química de la madera, ya sea durante el tratamiento o después de éste.

- No debería crear ni transmitir estrés al objeto tanto en la fase de impregnación como en la fase de polimerización porque se producirían, es casos extremos, rupturas internas del tejido leñoso.

Sin embargo, ningún producto cumple con todos estos requisitos, por lo que estas exigencias son consideradas como características ideales; así que antes de seleccionar tal o cual producto es necesario recordar que:

- La intención de este tratamiento es dotar de cohesión interna a una madera que ha sufrido un ataque de tal proporción que su simple manipulación pone en riesgo su integridad.
- Debido a esta enorme fragilidad, el intentar retirar o eliminar el polímero implica someter al objeto a un proceso durante el cual partes del objeto podrían ser eliminados.
- Esto implica que el tratamiento de consolidación es irreversible, aunque los productos deberán ser, al menos en principio, susceptibles de ser eliminados.

### **5.5.1.3. PRODUCTOS EMPLEADOS EN LA ACTUALIDAD.**

Como se indicó, no existe un único producto ideal aplicable a todos los casos y condiciones, por lo que durante buena parte del siglo pasado se realizaron múltiples pruebas de consolidación, llegándose a la conclusión que los productos que mejores resultados ofrecen, con menor afectación a la madera, son: (poli) vinil acetato, (poli) vinil butiral, y el (poli) etil metacrilato / metilacrilato.

(POLI) VINIL ACETATO; PVAC.

(Barclay, 2004; Horie, 1999)

Estos productos son polímeros termoplásticos del grupo de los polímeros vinílicos y se emplean en conservación – restauración desde 1932; son comercializados ya polimerizados (fase sólida) formando dispersiones, suspensiones, emulsiones, o soluciones acuosas con diferente peso molecular aunque las cadenas que se forman en todos los casos son ligeramente ramificadas.

Al tratarse de dispersiones donde la fase sólida ya se encuentra polimerizada, su curado se produce cuando el líquido empleado en la dispersión evapora produciéndose la coalescencia<sup>53</sup> de las cadenas poliméricas.

Su aplicación es sencilla y segura, no son solubles en etanol y el agua las hincha formando una sustancia gelatinosa de color lechoso.

Como características interesantes se menciona que estos polímeros son estables a largo plazo, presentan una aceptable resistencia a los efectos de la luz, pueden darse pequeños cambios como ligera oxidación, no se evidencia proceso de enlace cruzado, pueden dejar rastros de brillo en la superficie.

Estos productos no son capaces de otorgar refuerzo estructural al tejido leñoso, sino únicamente, cohesionan el material disgregado.

Algunos de los nombres comerciales mencionados en la bibliografía consultada son:

---

<sup>53</sup> Coalescencia, Propiedad que poseen las cosas de unirse o fundirse.

Mowilith (distintivos 20, 25, 30, 40, 50, 60, 70)

Rhodopas (distintivos BB, B, 30, H, HH, HV1)

Vinac (distintivos B-7, B-15, B-25, B-100, B-800)

Vynlite (distintivos AYAC, AYAA, AYAF, AYAT)

(POLI) VINIL BUTIRAL; PVB.

(Barclay, 2004; Horie, 2000)

Al igual que PVAC, los polímeros de PVB son resinas sintéticas termoplásticas pertenecientes al grupo de los polímeros vinílicos y se han usado en conservación – restauración desde 1956.

Todas las presentaciones de PVB, se comercializan en estado sólido; cada presentación está relacionada con el peso molecular de la resina y con la cantidad de muchos grupos –OH libres. Las cadenas poliméricas son lineales.

Teniendo en cuenta que esta resina se encuentra pre polimerizada, es decir en estado sólido, es necesario disolverla para impregnar la madera. Debido a que esta resina debe ser disuelta para su aplicación, el proceso de curado se produce cuando el solvente evapora.

Es factible reducir la viscosidad de la solución empleando combinaciones de solventes, la misma casa productora señala como ideal una combinación de etanol y tolueno. Siendo el etanol el solvente menos tóxico para esta resina

En comparación con las resinas de PVAC, los polímeros de PVB, tienen mejor estabilidad; pero sobre todo buena resistencia mecánica, característica por la cual se ha recomendado ampliamente como polímero para consolidar maderas.

Estas resinas podrían llegar a formar enlaces cruzados si llegaran a intervenir ácidos y calor durante su curado; su exposición a radiaciones ultravioletas provoca ligera oxidación de la resina.

Las diferentes presentaciones de esta resina se comercializan con alguno de los siguientes nombres:

Butvar (distintivos B-73, B-74, B-76, B-79, B-90, B-98)

Mowital (distintivos B20H, B30H, B30T, B60H, B60HH)

Rhovinal (distintivos B7/20, B10/20, B20/20, B50/20)

Como adhesivos presentan un inadecuado desempeño, posiblemente debido a que poseen una elevada temperatura de transición vítrea.

POLI ETIL METACRILATO / METIL ACRILATO; P(EMA/MA)

(Barclay, 2004; Horie, 2000)

Estas resinas, provienen de las dos principales familias de monómeros empleados en conservación – restauración, por un lado los metacrilatos, que derivan del ácido metacrílico y del ácido acrílico.

En general, las resinas de poli etil metacrilato / metil acrilato son bastante estables frente a la degradación por calor o por efectos de la luz ultravioleta en conjunto con el oxígeno, presenta una gran

estabilidad a largo plazo; justamente debido a estas características, estas resinas son unas de las más empleadas en consolidación de madera deteriorada.

### **5.5.2. SOLVENTES.**

(Schniewind, A., 1995)

Cada resina tiene sus propias propiedades químicas, y al entrar en contacto con el solvente adecuado, se alteran las fuerzas intermoleculares del polímero, produciéndose así su disolución. Pero no existe un único solvente para una misma resina, de hecho se puede contar con varias alternativas de disolventes o combinaciones de éstos, según los casos.

De forma generalizada, se han clasificado a los solventes entre polares y no polares; los solventes polares aún teniendo buena afinidad con la madera, tienen una limitada penetración en comparación con los solventes no polares, debido a que las moléculas del solvente polar serán absorbidas y retenidas en el interior de la capa externa de madera reduciendo la movilidad del líquido.

Los solventes cuanto más aumentan su valor o el grado de polaridad, más tienden a hinchar la madera; de forma comparativa con el agua; se asume que la hinchazón producida por este líquido como unidad de referencia, se señala que el tolueno hincha la madera en un porcentaje de 1,6%, la acetona un 63%, el etanol un 83% y el metanol un 95%.

Son preferibles los solventes con puntos de ebullición bajos porque dejan menor cantidad de vapores residuales, los vapores pueden alterar el comportamiento futuro de la resina en el interior de la madera.

Cuando se establece la solución a aplicar en la madera, se debe encontrar un punto de equilibrio entre una buena penetrabilidad (para lo cual se reduce la concentración de la resina y en consecuencia la viscosidad de la solución) y la cantidad adecuada de resina que se fija al interior de la madera para reforzarla. A menor concentración de resina, menor viscosidad y en consecuencia mayor penetración, pero poca cantidad de polímero será retenida. Por el contrario, una elevada concentración, dará como resultado una pobre penetración pero buena concentración. Un mismo nivel de penetración permite aumentar la cantidad de resina en la solución.

La selección del solvente para disolver y aplicar las resinas termoplásticas puede afectar varios aspectos del proceso de consolidación.

Primero, influye en el grado de penetración de la resina al interior de la madera. Esto se debe a dos factores: ya sea debido al grado de polaridad del solvente o por la viscosidad de la solución solvente – resina.

Segundo, las propiedades mecánicas de la resina (una vez aplicada y fijada en la madera) pueden variar significativamente en función del solvente empleado. Mostrando en general que el empleo de solventes polares en vez de no polares, mejora el niveles de endurecimiento.

Tercero, la polaridad del solvente empleado, no afecta significativamente a la distribución de la solución resina – solvente en el interior de la madera.

Cuarto, la cualidad adhesiva de un polímero es afectada por la polaridad del solvente empleado; los solventes no polares reducen la capacidad de adhesión de la resina. pero no llegan a ser tan efectivos como una resina formulada para ser empleada como adhesivo.

Quinto, la volatilidad y el punto de ebullición del solvente son características a tener en cuenta. Por un lado, de ambos dependerá el tiempo en que el solvente permanezca en el interior de la madera (cuanto más volátil, menos tiempo permanece) interactuando por más tiempo con los estratos del objeto. Y por otro, será más fácilmente reversible el polímero disuelto con solventes volátiles de bajo punto de ebullición, que empleando un solvente menos volátil y de elevado punto de ebullición.

Sexto, los solventes retenidos reducen el punto de transición vítrea del polímero, tornándolo menos efectivo; el mismo autor indica que este efecto se puede minimizar empleando solventes de bajo punto de ebullición. El empleo de solventes volátiles dan buenos resultados cuando son aplicados con brocha controlando la evaporación para alcanzar mayor penetración. Conforme va evaporando el solvente, la resistencia del conjunto madera - polímero va incrementándose.







## **6. DESARROLLO DE LA EXPERIMENTACIÓN.**

Los ensayos programados, y que se detallan según su secuencia lógica en este apartado, se estructuraron en dos etapas generales: la primera enfocada a establecer la factibilidad de emplear el método no destructivo basado en la medición de la frecuencia fundamental de vibración como herramienta para establecer varios niveles de deterioro; y la segunda destinada a determinar la mejora alcanzada con los tratamientos de consolidación con resinas termoplásticas a partir del módulo de elasticidad dinámico calculado en base de los valores de frecuencia fundamental.

La primera etapa, se subdividió en los siguientes subapartados:

- Selección, importación y determinación de la especie de la madera.
- Preparación, aclimatación y obtención de las probetas necesarias para efectuar los ensayos.
- Análisis visual de las probetas (clasificación a priori).
- Clasificación de las probetas según su densidad y elaboración de una escala arbitraria de trabajo.
- Clasificación de las probeta en base a su frecuencia fundamental de vibración.
- Comparación de las clasificaciones basadas en la densidad y frecuencia fundamental.

- Resultados.

La segunda etapa comprendió los siguientes subapartados:

- Elaboración del diseño experimental.
- Determinación de las resinas, solventes y sistema de aplicación a emplear.
- Elaboración de una cámara experimental de vacío.
- Determinación del volumen máximo de solución a emplear.
- Consolidación de las probetas.
- Evaporación de solventes.
- Medición de la frecuencia fundamental y cálculo del módulo de Young dinámico.
- Realización de ensayo a flexión para determinar el módulo de Young estático.
- Comparación entre los valores de módulo de Young dinámico (calculado) y estático (real).
- Resultados.

## **6.1. PRIMERA ETAPA.**

### **6.1.1. SELECCIÓN, IMPORTACIÓN Y DETERMINACIÓN DE LA ESPECIE DE LA MADERA Y SUS CARACTERÍSTICAS.**

Para la realización de los ensayos, se importó desde la República del Ecuador material lignario proveniente del cielo raso barroco de la iglesia de San Francisco; esta opción se tomó ya que los ensayos se realizarían sobre madera de la misma especie y con similares alteraciones, por lo que los resultados obtenidos podrían ser directamente aplicables a los trabajos de conservación y restauración de los artesonados y cielo raso barrocos de la misma iglesia.

Las probetas empleadas en el estudio se extrajeron de una única pieza de madera que se encontraba colocada de canto y apoyado sobre el estribo en el muro norte de la nave central y a 5,46m, desde su eje, del arco toral que separa la nave central del crucero. Al ser probetas de una misma pieza de madera se puede reducir de forma considerable variaciones en alguna de las características de la madera como la densidad y el módulo de elasticidad, que intervienen en el presente estudio.

Este elemento constituyó parte de la cubierta instalada entre 1755 y 1756 durante las obras de reconstrucción de la iglesia y convento franciscanos, destruidos parcialmente durante el terremoto del 26 de abril de 1755. Esta deducción se planteó porque dicho elemento, y 32 más, estaban colocados a un mismo nivel sobre los dos muros longitudinales de la iglesia e inmediatamente debajo de la cubierta de 1869 y sobre el cielo raso de 1770. (Guerra, P., 2004:8, 9, 20; Santander, D., 2004:25)

El elemento indicado tenía una longitud de 850mm y una sección rectangular de 110 x 240mm, más o menos uniforme a lo largo de la pieza.

La extracción del mencionado elemento fue autorizada por los Coordinadores Técnicos del FONSAL<sup>54</sup>, Arquitectos Héctor Vega y Jesús Loor. Y fue dirigida por el Coordinador del Proyecto de Conservación y restauración de los artesonados y cúpulas de la iglesia de San Francisco, Arquitecto Héctor Vega.

La salida de esta pieza al igual que otros elementos leñosos destinados para esta investigación, fue autorizada por el Instituto Nacional de Patrimonio Cultural (Ecuador) después de identificarlos como objetos susceptibles de salir del país con fines de estudio e investigación conforme los estipulan las Leyes de Patrimonio Cultural y de Aduanas (de Ecuador).

Previo la exportación de la República de Ecuador, estas piezas fueron sometidas a los tratamientos pertinentes de protección fitosanitaria exigidos por la Corporación Aduanera Ecuatoriana y el Servicio Ecuatoriano de Sanidad Agropecuaria, según la Norma Internacional NIMF N°15 y la Resolución N°12 para la aplicación de tratamientos de embalajes de madera para comercio exterior.

Antes de iniciar las acciones programadas para los ensayos fue necesario establecer la especie de madera importada porque era fundamental conocer la especie de madera con que se trabajó, no solo desde el punto de vista histórico de la construcción o del uso de las

---

<sup>54</sup> FONSAL: Fondo de Salvamento, organismo municipal creado con el objetivo de gestionar fondos municipales para invertirlos en la conservación y restauración de bienes culturales (muebles e inmuebles) del cantón de su jurisdicción.

especies forestales en el pasado, sino porque esta variable influye de forma importante en cualquier tratamiento que se efectúe, así por ejemplo, si se trabaja con una especie fácilmente impregnable, los productos penetrarán más rápido que en otra especie poco impregnable.

El proceso seguido para la identificación de la especie fue el siguiente:

a.- Revisión bibliográfica sobre la construcción de cielo raso y cubierta de la iglesia de San Francisco efectuada entre 1775 y 1776 y determinación de las posibles especies forestales que habrían correspondido a la flora de uso estructural y ubicada en las zonas de posible extracción indicados en las referencias históricas.

b.- Obtención de cortes histológicos de la madera importada, descripción anatómica y comparación con referencias y verificación con las especies que por geografía se corresponderían en las zonas de extracción de la madera.

a.- Revisión bibliográfica sobre la construcción de cielo raso y cubierta de la iglesia de San Francisco

De la información bibliográfica, se sabe que después del terremoto de abril de 1755<sup>55</sup>, se destinaron fondos para adquirir madera y construir la cubierta de la iglesia, habilitar el tejatillo, contratar albañiles y peones, y realizar varias reparaciones de emergencia entre agosto del mismo año del terremoto y junio de 1756. Entre 1756 y 1780, se procuraron recursos económicos para adquirir el material para la ejecución de los

---

<sup>55</sup> Guerra (2004) indica que el 7 de octubre de 1755, Juan Vivas, alarife de la ciudad realizó la evaluación de los daños y fijó el monto necesario para la reconstrucción.

trabajos más importantes y que requerían de mayor inversión; durante este período se construyó el cielo raso barroco.

Para ambos casos, la madera empleada en los trabajos de reconstrucción del convento fue acarreada empleando yuntas de bueyes desde zonas ubicadas a unos 8 o 12 días de viaje. La referencia más concreta indica que se compraron quinientas cincuenta vigas de madera proveniente de terrenos que las madres carmelitas poseían en las montañas de Calacalí (población del noroeste de la provincia Pichincha), Se estimó que las distancias indicadas en días, se corresponden a las zonas de los valles interandinos donde la altura mínima es de 2.000msnm<sup>56</sup> y las vertientes internas de las cordilleras oriental y occidental hasta una altura máxima que bordea los 5.000msnm.

Para la zona de la provincia de Pichincha, los tipos de vegetación que se encuentran en este rango de alturas son:

- Bosque de neblina montano, entre los 2000 y 3000msnm (equivalente a "*Selvas submesotérmicas subandina y andina de la cordillera oriental*" de Acosta-Solís, 1.966; "*Bosques húmedo y muy húmedo montanos bajos*" y "*Bosque pluvial montano y montano bajo*" de Cañadas, 1.983; y, "*Bosque nublado*" de Harling, 1.979).
- Bosque siempre verde montano alto, entre los 3000 y 3500msnm (equivale a "*Ceja andina*" de Acosta-Solís, 1.966; "*Bosques húmedo y muy húmedo montanos*" y "*Bosque pluvial montano*" de Cañadas, 1.983; y, "*Bosque nublado*" de Harling 1.979).
- Páramo herbáceo, desde los 3500msnm hasta las cumbres montañosas. (equivalente a "*Microtermia higrófila de la cordillera*

---

<sup>56</sup> msnm; acrónimo en español de m(etros) s(obre) el n(ivel) del m(ar).

*oriental*" de Acosta-Solís 1.966; "Bosques muy húmedos montano y subalpino" y "Bosque pluvial subalpino" de Cañadas 1.983; y, "Páramos herbáceo y arbustivo-almohadillas" de Harling 1.979).

De estos tres tipos, únicamente los dos primeros son adecuados para el crecimiento de árboles, es decir, entre las alturas de 2000 y 3600msnm. Entre los 2000 y 3000 crecen árboles con alturas que van de 10 a 25 m troncos gruesos, copas densas y compactas. Entre los 3000 y 3500, los árboles miden entre 6 y 9 m de alto, presentan troncos muy ramificados desde la base y tienden a crecer irregularmente en forma inclinada.

Las actuales especies leñosas que se puede encontrar en estos dos sistemas son las siguientes (Fernández et al 2000; INEFAN et al 1998; L. de la Torre et al 2006)

*Aeghiphila panamensis*

*Alnus acuminata*

*Brachyotum ledifolium*

*Buddleja incana*

*Clusiaceae*

*Cunoniaceae*

*Cytharexylum montanum*

*Escallonia myrtilloides*

*Gaiadendron punctatum*

*Hedyosmum cumbalense*

*Juglandaceae*

*Juglans neotropica*

*Lauraceae*

*Ilex colombiana*

*Meliaceae*

*Myrcianthes rhopaloides*

*Myrtaceae*

*Nectandra membranacea*

*Ocotea oblonga*

*Persea sp.*

*Podocarpus spp*

*Vismia baccifera*

*Weinmannia brachystachya*

b.- Obtención de cortes histológicos de la madera importada, determinación de la especie.

El proceso seguido para conseguir los cortes para análisis histológico y para la toma y análisis de fotografías fue el siguiente:

1.- Preparación de la muestra.

- De un área poco afectada de la pieza de madera, se extrajo un prisma de 30cm<sup>3</sup>,aproximadamente.
- Se pulió una de las testas (corte transversal) de este prisma para orientar los cortes según las direcciones longitudinal, radial y tangencial.

- Una vez identificadas las direcciones en que se debían realizar los cortes, se seccionó el prisma para obtener un cubo de  $1\text{cm}^3$ , de tal forma que sus lados coincidan con las tres direcciones identificadas del prisma.
- Este cubo se hirvió en agua destilada. Se estimó un tiempo adecuado cuando la pieza se sumergió en el líquido. Este tiempo fue más corto del indicado en la bibliografía, probablemente debido a que la madera por estar atacada podía ser impregnada con mayor rapidez que una completamente sana.

## 2.- Obtención de cortes.

- El cubo hervido, se montó en un micrótopo convencional (Casa Álvarez) para cortes histológicos de espesor mínimo de  $5\mu$ .



ILUSTRACIÓN 55: Obtención de cortes histológicos.

- Obtención de láminas finas, éstas variaron entre  $20$  y  $50\mu$ , en los cortes transversales se consiguieron los más finos, entre  $20$  y  $30\mu$ ; los radiales entre  $30$  y  $40\mu$  y los tangenciales entre  $40$  y

50 $\mu$ . En los dos últimos fue difícil reducir los espesores debido al mal estado de la madera debilitó demasiado las paredes celulares.

- Las láminas obtenidas se colocaron en agua destilada para evitar su secado y deformación.

### 3.- Tinción de cortes con zafranina.

- De las láminas obtenidas se seleccionaron aquellas más planas y completas. Tres por cada una de las caras de orientación.

- Se retiró las láminas del recipiente con agua destilada y se las colocó en otro con una solución de zafranina durante 2 minutos con el objeto de teñir el tejido leñoso.

- Terminado el tiempo indicado, se colocaron los cortes en agua destilada durante 2 minutos para interrumpir la tinción.

- Luego se realizó una segunda inmersión en agua destilada para eliminar los residuos de zafranina.

- Para eliminar el agua del interior del tejido, se trataron las láminas por inmersión en tres soluciones sucesivas de etanol químicamente puro. La primera al 50% en agua destilada durante 2 minutos; la segunda al 80% en agua destilada durante el mismo tiempo; y la última en etanol al 100% por igual período. En total tres pasos.

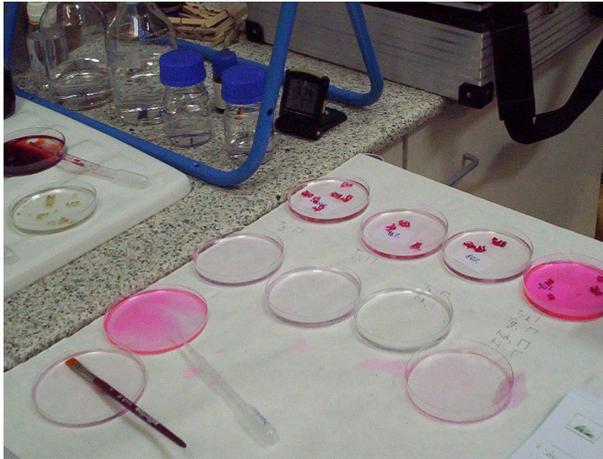


ILUSTRACIÓN 56: Tinción de cortes histológicos.

#### 4.- Montaje en placas de vidrio.

- Las láminas se montaron sobre porta muestras de vidrio convencionales.
- La bibliografía indica que se deben fijar al porta muestras con bálsamo de Canadá, sin embargo se empleó resina de poli vinil butiral como alternativa menos viscosa con el objetivo de reducir al máximo las burbujas que se pueden formar.
- Sobre los cortes se colocó cubre objetos convencionales de vidrio.

#### 5.- Observación – comparación de tejidos obtenidos.

- Para identificar características macroscópicas (ordenación y distribución de las células, tipos de células, etc.) se empleó una lupa binocular Motic SMZ-168 con luz transmitida a aumentos de 20x y 50x; y una lupa binocular Wild M3Z con luz incidente a aumentos de 60X.
- Para analizar las características microscópicas se emplearon los siguientes equipos:

Microscopio binocular Nikon Microphoto de luz transmitida, aumentos de 100x, 200x y 400x; y un microscopio convencional monocular de luz transmitida, aumento de 600x.

#### 6.- Captura de fotografías.

- Para lupa binocular Motic SMZ-168, (20x y 50x): cámara Q Imaging MicroPublisher 3.3 RTV y programa Q CapturePro.
- Para microscopio binocular Nikon Microphoto de, (100x, 200x y 400x): cámara Q Imaging MicroPublisher 3.3 RTV y programa Q CapturePro.
- Para microscopio convencional monocular, (600x): cámara y programa Kodak CX6200.

Las características histológicas observadas fueron:

- Anillos de crecimiento débilmente definidos (Ilustración 7).
- Carencia de un patrón de distribución de los elementos vasculares vinculado a anillos de crecimiento; porosidad difusa (Ilustración 7).
- Agrupación de vasos, aproximadamente la mitad solitarios y la otra mitad agrupados entre dos y seis (mayoritariamente dos), pocos conglomerados (Ilustración 7).
- Todos los vasos agrupados estaban alineados de forma radial y aparentemente distribuidos de forma oblicua (Ilustración 7).

- Diámetros de vasos aproximadamente similares; bordes vasales mayoritariamente ovales, pocos circulares (Ilustración 8).
- Placas perforadas escaleriformes, aproximadamente 20 barras (Ilustración 9).
- Punteaduras intervasculares mayormente escaleriforme a opuesta; en menor medida alternas (Ilustraciones 15 y 16).
- Perforaciones entre vaso y radio escaleriforme a opuesta, aproximadamente tres perforaciones en cada unión de elemento (Ilustración 10).
- Fibras de pared celular fina; lumen mayoritariamente mayor a tres veces el espesor de la doble pared celular (Ilustraciones 11 y 12).
- Radios heterogéneos, mayoritariamente uniseriados, pocos biseriados, células de parénquima de radios erectas y/o cuadradas (Ilustración 7).

Con base a estas características, se dedujo que se trata de un *Alnus sp*, probablemente *Alnus jorullensis*, conocido comúnmente en la zona como Aliso. (Carreras, R. 2007; Tobar, G. 2008)

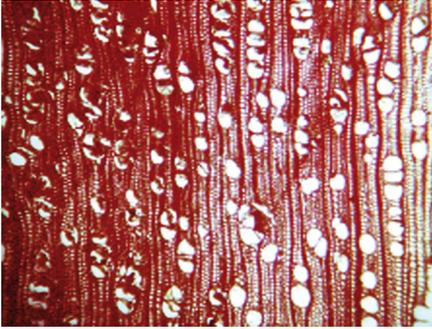


ILUSTRACIÓN 57: Corte transversal.  
Distribución de elementos vasculares.

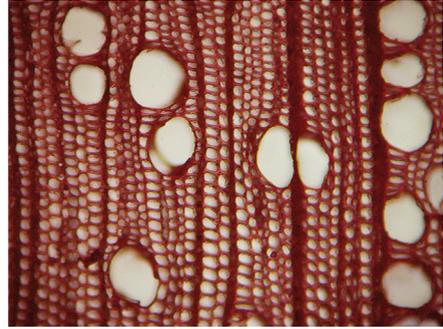


ILUSTRACIÓN 58: Corte transversal.  
Ø vasales similares, bordes ovales.

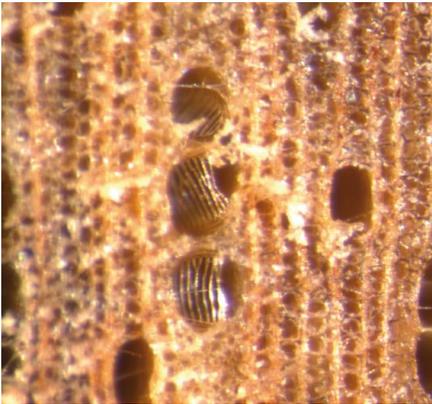


ILUSTRACIÓN 59: Corte transversal.  
Placa escaleriforme intervascular.

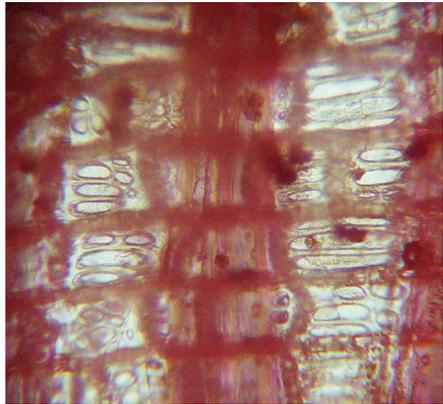


ILUSTRACIÓN 60: Corte radial.  
Unión entre vado y radio.

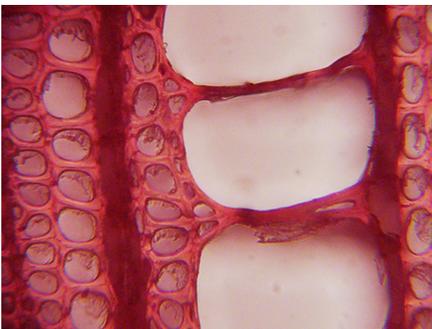


ILUSTRACIÓN 61: Corte transversal.  
Relación lumen - pared celular.

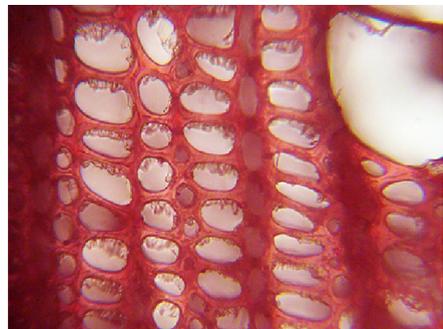


ILUSTRACIÓN 62: Corte transversal.  
Relación lumen - pared celular.



ILUSTRACIÓN 63: Corte tangencial.  
Radios heterogéneos uniseriados.

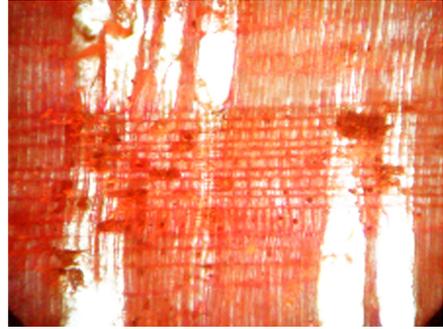


ILUSTRACIÓN 64: Corte radial.  
Células de parénquima erectas.



ILUSTRACIÓN 65: Corte tangencial.  
Punteadura intervascular.



ILUSTRACIÓN 66: Corte tangencial.  
Punteadura intervascular.

Esta especie posee las siguientes características y propiedades físicas:

<i>Características de Alnus sp.</i>	
Velocidad de crecimiento	Rápido
Diferencia entre albura y duramen	No existe diferencia
Impregnabilidad	
<i>(Alnus glutinosa y Alnus incana)</i>	<i>Clase 1</i> (según norma EN 350-2:1994) Madera impregnable tanto en albura como en duramen
Anchura de albura	
<i>(Alnus glutinosa y Alnus incana)</i>	<i>Clase X</i> (según norma EN 350-2:1994) Madera sin distinción clara entre albura y duramen
Clase de penetración	<i>Clase P8</i> (según norma EN 351-1:1995) Penetración total del producto en albura; cuando no se diferencia albura de duramen, el producto penetra también en el duramen.

Basado en AITIM (1997) y normas EN 350-2:1995; EN 351-1:1996

<i>Propiedades físicas de Alnus jorullensis</i>		
Densidad	(g/cm <sup>3</sup> )	0,47
Flexión estática	(Kg/cm <sup>2</sup> )	354,6
Módulo de elasticidad	(MPa)	10.600

Basado en INEFAN, s/f; Tobar, G. 2008.

### **6.1.2. PREPARACIÓN, ACLIMATACIÓN Y OBTENCIÓN DE LAS PROBETAS NECESARIAS PARA EFECTUAR LOS ENSAYOS. (DIMENSIONES Y CODIFICACIÓN)**

Todas las probetas empleadas en los ensayos debían cumplir los siguientes requisitos: poseer las mismas dimensiones, no presentar defectos y un determinado contenido de humedad.

#### **6.1.2.1. DIMENSIONES.**

De los ensayos realizados, el único que requería dimensiones específicas corresponde a los ensayos de flexión estática. Por este motivo, todas las probetas se cortaron conforme lo estipula la norma UNE 56-537-79 (Determinación de la resistencia a la flexión estática), sección, perpendicular a la dirección axial, de 20 x 20mm y una longitud mínima de 300mm.

El error máximo aceptado para estos ensayos indicado por ASTM D 2395 es de  $\pm 0,3\%$ . Sin embargo, la media alcanzada fue un 2,6% más que la norma, en el espesor de las probetas y un 3,8% más que la misma norma, en el ancho de las probetas. Esta diferencia se produjo porque para optimizar material se empleó un equipo mecánico de corte más fino pero menos preciso.

El proceso de maquinado desde la pieza importada hasta la obtención de las probetas fue el siguiente:

Primero se cepilló dos caras longitudinales y adyacentes, que teniendo como referencia la posición original del elemento, corresponden a las caras superior (más angosta) y lateral (más ancha) orientada hacia en transepto.

Luego se cortó la pieza de forma transversal para obtener cuatro bloques: el primero, correspondiente al extremo apoyado sobre el estribo; los dos siguientes, procedentes de la zona media de la pieza importada, de donde se extrajeron las probetas; y, el cuarto bloque que corresponde al extremo libre de la pieza.

Finalmente, se realizaron cortes ortogonales sucesivos para obtener las probetas.



ILUSTRACIÓN 67: Probetas obtenidas.

La medida media de las probetas fue:

	<i>Medidas según Norma UNE 56-537-79 (mm)</i>	<i>Media de probetas ensayadas. (mm)</i>
Largo	300	307,08
Ancho	20	20,76
Espesor	20	20,51

### **6.1.2.2. CODIFICACIÓN.**

Las probetas obtenidas de los bloques "2" y "3" se codificaron empleando tres dígitos en base a la siguiente lógica:

El primer dígito indica el número de bloque del que procede la probeta, puede ser "2", que se corresponde al bloque más cercano al estribo; o, "3", que indica la pertenencia al bloque más alejado del estribo.

El segundo y tercer dígitos señalan la ubicación por ejes cartesianos de la probeta dentro del bloque del que se la extrajo. Así, el segundo dígito corresponde al eje de las abscisas, eje menor, y el tercer dígito para el eje de las coordenadas, eje mayor.

### **6.1.2.3. SELECCIÓN DE PROBETAS.**

Las probetas se escogieron según la norma ASTM D 5536-94 (Standard Practice for Sampling Forest Trees for Determination of Clear Wood Properties) aquellas probetas que no presentaron fisuras, grietas, nudos u otro defecto se consideraron adecuadas para los ensayos.

Es necesario indicar que el deterioro causado por los insectos no fue tomado en cuenta para la selección por la misma naturaleza de la investigación.

#### 6.1.2.4. CONTENIDO DE HUMEDAD.

El contenido de humedad de las probetas se estimó empleando las tablas para acondicionamiento de maderas indicados por ASTM D 4933-91 y Kollmann, F. et Côté, W., (1961)

<i>Condiciones promedios en:</i>	<i>Temperatura</i> (°C)	<i>Hum. relativa</i> (%)	<i>CHE*</i> (%)
Iglesia San Francisco, Quito**	18	67	12,0 – 13,0
UPV.	18,8	58,3	10,1 – 11,0
AIDIMA	21,6	46,6	8,5 – 9,2
Indicados para ensayos***	23	50	9

\* Contenido de Humedad de Equilibrio, estimado según tablas de acondicionamiento para madera sólida: ASTM D 4933-91; Kollmann, et al 1961.

\*\* Mediciones tomadas cerca del punto de donde se extrajo la pieza. Mínimos y máximos de: temperatura 13°C y 21°C; humedad relativa 55% y 77%. (Benítez, J. 2004)

\*\*\* Temperatura y humedad relativa: 20 ± 2°C de 65% ± 5%. UNE

Por requerimiento de las normas de los ensayos realizados y para evitar torceduras<sup>57</sup> provocadas durante el maquinado, la pieza de madera se dejó estabilizar hasta alcanzar el contenido de humedad de equilibrio correspondiente a las condiciones requeridas en los ensayos. La pieza fue colocada de canto y sobre dos apoyos de material inerte (poli

<sup>57</sup> Torceduras: (Viscarra, S. 1998) se conoce con este término a aquellas deformaciones de las piezas de madera que se producen durante el proceso de secado de la madera las siguientes:

- Acanaladura o abarquillado, curvatura desarrollada a lo ancho de una tabla y desarrollada a lo largo de una tabla.
- Combadura o arqueado, curvatura de la cara de una tabla que se desarrollada a lo largo de ésta.
- Encorvadura, curvatura producida en el canto de una tabla.
- Revirado, distorsión del plano de una tabla a largo de ésta.

estireno expandido) dejando una separación de 200mm entre la pieza y las paredes más próximas.

### **6.1.3. ANÁLISIS VISUAL DE LAS PROBETAS (CLASIFICACIÓN A PRIORI).**

Se analizaron las probetas con el procedimiento Visual, para identificar a priori de los posibles grupos que se podrían formar y nombrar a cada uno de ellos.

Con este procedimiento, se identificó al menos tres grupos de probetas:

- Un primer grupo (G1) correspondiente a las probetas con nivel leve (L) de ataque.
- Un segundo grupo (G2) con las probetas con niveles medio (M) de ataque.
- Y un último grupo (G3) para las probetas con ataque severo (S).

Estas tres categorías son excluyentes entre sí, pero mantienen orden de sucesión, es decir una escala ordinal.

### **6.1.4. CLASIFICACIÓN DE LAS PROBETAS EN BASE A SU DENSIDAD Y ESCALA DE TRABAJO.**

Como se indicó en el apartado referido al Análisis crítico de los sistemas de evaluación no destructivos, el procedimiento basado en la pérdida de

masa o en la densidad es el usualmente empleado a nivel de laboratorio para establecer el nivel de ataque de organismos xilófagos en las maderas testadas. En el presente caso, no se aplican directamente las normas para seguir este procedimiento debido a que no se conocen las masas originales de las probetas; sin embargo, según la referencia a emplear, la densidad permite trabajar con la relación materia / volumen, siendo posible entonces trabajar con la densidad como base para la creación de una escala ordinal arbitraria de trabajo.

El procedimiento seguido involucró:

- Cálculo de la densidad de cada probeta.
- Reescalado, agrupación natural y escala de trabajo.
- Análisis estadístico de la clasificación.

#### **6.1.4.1. DENSIDAD; MASA Y VOLUMEN.**

Conforme lo indicado en el apartado referido a los fundamentos teóricos de esta tesis, el cálculo de la densidad ( $\delta$ ) se realizó con la relación:

$$\delta = m/V ;$$

Donde  $m$  es la masa de la probeta expresada en gramos (g) y  $V$  es el volumen de la misma probeta expresado en  $\text{cm}^3$ . La unidad empleada fue gramo/centímetro cúbico,  $\text{g}/\text{cm}^3$ .

El valor de la masa de las probetas se determinó por gravimetría y empleando una balanza de precisión (0,01g) conforme la norma ASTM D 2395 (Standard Test Methods for Specific Gravity of Wood and Wood-Based Materials); el margen de error aceptado fue de  $\pm 0,2\%$ .

El volumen se determinó por estereometría y se usó un pie de rey de precisión (0,01mm) según la misma norma ASTM D 2395; el error aceptado fue de  $\pm 0,3\%$ .

**Equipos y condiciones del ensayo**

<i>Equipos</i>	<i>Marca</i>	<i>Modelo</i>	<i>Condiciones de ensayo</i>
Balanza electrónica	A.N.D.	FX-2000, d=0,01g	
Pie de rey electrónico	Taschen	Digital Messschieber, d=0,01mm	23°C y 50%HR

Teniendo en cuenta que la especie en estudio *Alnus jorullensis* posee densidad media similar tanto para albura como para duramen (Tobar, 2009) el valor inicial de la densidad sería una constante a todas las probetas, siendo un factor que no afectaría en el resultado.

#### **6.1.4.2. REESCALADO, AGRUPACIÓN NATURAL Y ESCALA DE TRABAJO.**

Debido a que los valores de densidad obtenidos son escalares, fue necesario agruparlos jerárquicamente<sup>58</sup> y conformar así grupos

<sup>58</sup> Agrupación jerárquica (Conglomerados jerárquicos): por este procedimiento es factible formar grupos homogéneos dentro de una población heterogénea, para facilitar el análisis estadístico, centrando las observaciones en los grupos formados y no en los

homogéneos en una escala ordinal. Para efectuar este procedimiento se aplicó el método de Ward<sup>59</sup> en base a las distancias Euclídeas<sup>60</sup> al cuadrado de los valores obtenidos.

Esta ordenación mostró la existencia de dos grandes grupos homogéneos que a su vez se subdividen en dos subgrupos. Dos de estos subgrupos (uno por cada subdivisión) formaron dos nuevos subgrupos. En total se formaron seis grupos homogéneos.

Aunque el análisis Visual (clasificación a priori) de las probetas hacía suponer la existencia de tres grupos, la ordenación natural en base a la densidad indicó que dos son los grupos con marcada diferencia, y con éstos se trabajó.

El primer grupo, compuesto por 25 probetas con un nivel de ataque entre leve y medio (en términos del análisis Visual), y el segundo compuesto por 26 probetas con nivel medio a severo (igualmente en términos del análisis Visual).

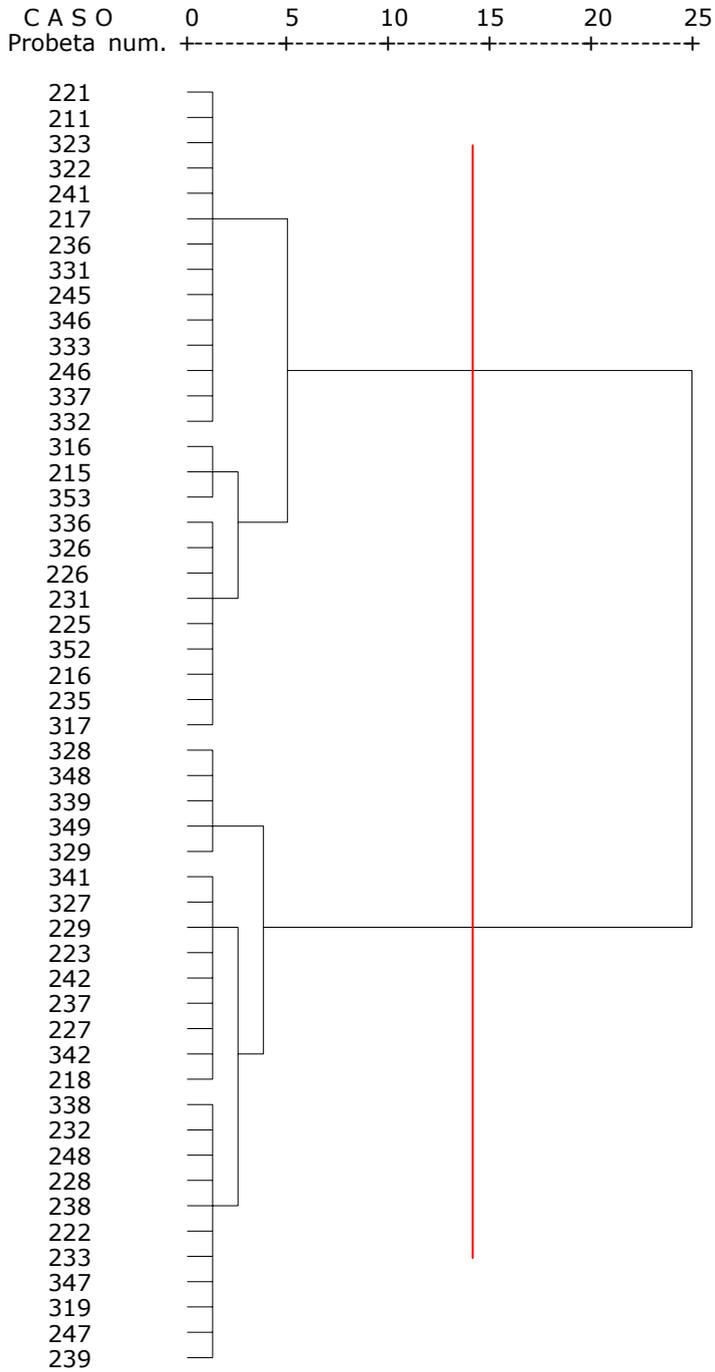
---

individuos. Esta ordenación es válida únicamente para la muestra de la población con la que se está trabajando.

El método empleado en esta investigación para formar los grupos fue el de Ward.

<sup>59</sup> Método de Ward: método que agrupa cada caso o individuo del estudio teniendo en cuenta las distancias mínimas existentes entre los individuos. Se optó por este método para que los grupos sean lo más equilibrados o homogéneos posible.

<sup>60</sup> Distancia Euclídea al cuadrado: es una unidad de medida de la distancia entre dos casos y pretende juntar a los individuos de tal forma que al tratarlos como uno, la información que se pierde sea mínima.



---

*Escala de trabajo en base a la densidad de las probetas*

---

	Número de probetas por grupo
<i>Grupo 1 (G1): ataque leve – medio (L-M):</i>	25
<i>Grupo 2 (G2): ataque medio – severo (M-S):</i>	26

---

Por lo tanto se empleó esta clasificación para los ensayos y análisis programados.

#### **6.1.4.3. ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE LA CLASIFICACIÓN POR DENSIDAD.**

Con la clasificación realizada se tomaron los valores medios de densidad para los dos grupos.

**Estadísticos de grupo**

---

<i>Grupos jerárquicos</i>	<i>N</i>	<i>Media (g/cm<sup>3</sup>)</i>	<i>Desviación típica</i>	<i>Error típico de la media</i>
1	25	0,379	0,018	0,003
2	26	0,320	0,022	0,004

---

Para verificar que los grupos formados son homogéneos y que las medias de cada uno son diferentes entre sí, se realizó una prueba de Levene<sup>61</sup> con igualdad de varianzas y luego una prueba t<sup>62</sup> para muestras independientes (diferencia de medias).

---

<sup>61</sup> Prueba de Levene: esta prueba permite considerar si las varianzas son, o no, iguales; y optar así por la alternativa correcta en una prueba t para muestras independientes.

---

**Prueba de Levene para la igualdad de varianzas**


---

<i>F</i>	1,115
<i>Sig.</i>	0,296

---

La primera parte del análisis (prueba de Levene) indica que las varianzas de los dos grupos son iguales; ya que el valor de  $F=1,115$  y la probabilidad  $p=0,296$ , mayor al nivel de significación  $\alpha=0,05$ , esto indica que para la siguiente prueba se debe considerar varianzas iguales entre los dos grupos.

---

**Prueba T de muestras independientes**


---

	<i>Densidad*</i>
<i>t</i>	10,509
<i>gl</i>	49
<i>Sig.</i> (bilateral)	0,000
Diferencia de medias	0,059
Error típ. de la diferencia	0,005
<hr/>	
95% Intervalo de confianza para la diferencia	
Inferior	0,047
Superior	0,070

---

\* Se han asumido varianzas iguales, conforme prueba de Levene.  
 $t(49)=10,509$   $p \leq 0,000$ .

Esta segunda parte del análisis, indica que la prueba *t* identifica una diferencia muy significativa ( $p \leq 0,000$ ) entre las medias de las densidades de cada uno de los dos grupos.

---

<sup>62</sup> Prueba *t*: (Williams, F. 1982) determina la significación de las diferencias entre la media de dos muestras independientes, teniendo en cuenta tanto las medias como las distribuciones muestrales de cada una.

Por lo tanto, se puede afirmar que en el interior de cada grupo los valores de densidad son similares, y que los valores medios de la densidad de los dos grupos son significativamente diferentes entre sí. Concluyéndose que efectivamente, los dos grupos formados son homogéneos internamente y diferentes entre sí de forma significativa.

Así se agrupó a las probetas en estudio en dos grupos:

- El primer formado por aquellas probetas cuyo nivel de ataque puede corresponder a lo que visualmente se clasifican como nivel leve a medio de ataque.
- El segundo grupo engloba las probetas que de forma visual se podría denominar ataque medio a severo.

#### **6.1.5. CLASIFICACIÓN DE LAS PROBETA EN BASE A SU FRECUENCIA FUNDAMENTAL DE VIBRACIÓN.**

La metodología seguida para emplear los valores de la frecuencia fundamental de vibración como factor que permita clasificar a las probetas estudiadas en grupos diferentes entre sí, pero homogéneos al interior de cada uno, según el nivel de ataque que presentaban, parte de la siguiente hipótesis de investigación.

*Es factible establecer niveles de deterioro de madera en base a la frecuencia fundamental.*

Los referentes teóricos que permiten plantear esta certidumbre como válida son los estudios publicados por Machek et al (1998 y 2001),

donde indican que el empleo de la frecuencia fundamental puede detectar estados tempranos de deterioro en probetas de laboratorio atacadas por hongos. Con este referente, se planteó la posibilidad de medir la frecuencia fundamental con el fin de determinar niveles de deterioro.

Sin embargo, los valores de frecuencia fundamental por sí mismos no indican niveles de deterioro en la madera, ya que son propios de un material en función de su densidad y continuidad interior (homogeneidad); para poder aplicar esta técnica fue necesario equiparar la escala de trabajo empleada en esta investigación con los valores correspondientes a la frecuencia de todas las probetas en estudio.

El procedimiento seguido para crear una escala a partir de los valores de frecuencia fundamental fue el siguiente:

- Medición de la frecuencia fundamental de cada probeta.
- Reescalado, agrupación natural y escala alternativa.
- Análisis estadístico de la clasificación.

#### **6.1.5.1. MEDICIÓN DE LA FRECUENCIA FUNDAMENTAL.**

El procedimiento consiste en medir la frecuencia con la que vibra el cuerpo después de recibir un impulso mecánico (excitación). Las normas ASTM señalan que para efectuar estos ensayos los prismas de sección cuadrangular deben cumplir con la siguiente relación:

$$25 > l/e > 5$$

Donde:

$l$ : es la longitud de la probeta (300mm).

$e$ : es la menor medida de la sección transversal de la probeta (20mm).

El resultado de la relación es 15 y por lo tanto se cumple el requisito de la norma.

Los apoyos se ubicaron en los puntos nodales de la probeta, conforme lo indica la norma ASTM E 1876 – 07; como apoyos se emplearon prismas rectangulares de esponja suave, de sección cuadrangular 50 x 50 x 25mm colocados de canto. (Ver Ilustraciones 52 y 53 del apartado 5.2. Frecuencia fundamental, pgs. 144 y 145)

Los puntos de excitación y recogida de datos variaron de una probeta a otra; sin embargo, se cuidó que ambos permanecieran dentro de las zonas indicadas por la misma norma y en aquellos lugares sin perforación y que poseían una superficie rígida para recibir el impulso y colocar el receptor.

Considerando que no se contó con referencias bibliográficas sobre esta metodología y su aplicación para usarla con madera deteriorada, se tomaron como referencia los siguientes valores de MOE dinámico:

### Valores referenciales de algunas especies

Madera	Densidad $\delta$ (g/cm <sup>3</sup> )	Módulo de Young $E$ (N/m <sup>2</sup> )	
		al grano $\times 10^{10}$	⊥ al grano $\times 10^9$
Palo rosa ( <i>Dalbergia spp</i> )	0,830	1,6	2,8
Rosewood ( <i>Pterocarpus indicus</i> )	0,740	1,2	1,7
European maple ( <i>Acer campestris</i> )	0,640	1,0	2,2
Redwood ( <i>Sequoiadendron giganteum</i> )	0,380	0,95	0,96

Basado en Fletcher N. et al (1998)

### Materiales, equipos y condiciones de ensayo

Equipos	Marca	Modelo	Condiciones de ensayo
Medidor de frecuencias.	Grindosonic	MK5	23°C y 50%HR



ILUSTRACIÓN 68: Medición de frecuencia fundamental.

### 6.1.5.2. AGRUPACIÓN NATURAL, ESCALA EN BASE A $f_1$ .

La agrupación de las probetas de forma natural, se efectuó según el procedimiento de conglomerados jerárquico en base al método de Ward con distancias euclídeas al cuadrado y siguiendo el siguiente procedimiento:

Se tomaron las 51 probetas, sin tener en cuenta la clasificación realizada en base a la densidad de las probetas.

1.- Se midieron un total de 14 veces la frecuencia fundamental de cada una de las probetas. Se estimó procedente realizar este número de lecturas por dos motivos, el primero por no contar con referentes teóricos sobre el empleo de esta técnica en maderas con ataques de insectos, y segundo, porque los valores de la frecuencia fundamental presentaban mucha variación.

2.- Luego se eliminaron los valores mayores y menores a tres desviaciones estándar<sup>63</sup> (+/-3s) por ser valores posiblemente originados por la suma o resta de ondas o por interferencia de ondas. Este ejercicio se realizó tres veces hasta que los valores de cada probeta se encontraron dentro de estos límites.

3.- Con los valores tomados como válidos, se calculó la media de  $f_1$  de cada probeta y se los ordenó obteniendo así una serie ordenada con intervalos iguales y sin un cero absoluto (escala de intervalo).

---

<sup>63</sup> Desviación estándar (Hernández, C. et al 2006): también llamada Desviación típica, "es el promedio de las puntuaciones con respecto a la media, esta medida se expresa en las unidades originales de medición de la distribución."

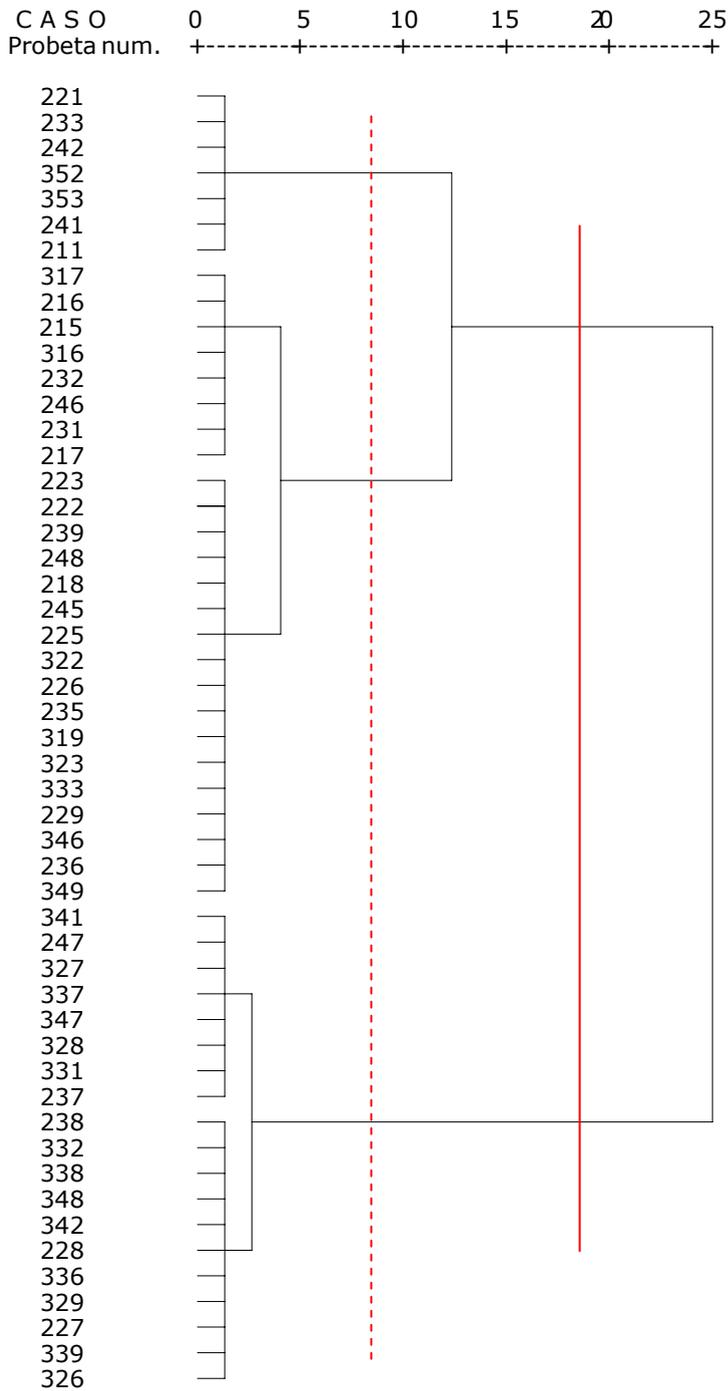
4.- A partir de los valores de frecuencia tomados, se conformó grupos homogéneos jerárquicos con método de Ward; se realizó un análisis de la varianza<sup>64</sup> para los valores medios de frecuencia en cada grupo para corroborar su homogeneidad interna y su diferencia con otros grupos.

La formación de conglomerados jerárquicos mostró la existencia de cinco grupos.

La ordenación jerárquica mostró que el primer gran grupo podía ser subdivido a su vez en dos subgrupos. A su vez, la segunda sub clasificación se dividió en dos sub grupos menores. Por el contrario, el segundo gran grupo se subdividió una sola vez y a poca distancia de los casos individuales. Aunque fueron cinco el total de grupos formados se trabajó únicamente con los dos mayores.

---

<sup>64</sup> Análisis de la varianza o variancia: (Williams, F. 1982) determina la diferencia entre varias medias, se diferencia con una prueba t, en que se aplica a más de dos medias. Requiere de pruebas posteriores como Tukey para verificar las diferencias entre cada par de medias que intervienen.



### 6.1.5.3. ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE LA CLASIFICACIÓN POR FRECUENCIA FUNDAMENTAL.

Con el fin de comparar los grupos formados a partir de la frecuencia fundamental con la escala de trabajo, basada en la densidad de las probetas, se tomaron los dos grupos principales de la ordenación jerárquica:

<b>Estadísticos de grupo</b>				
<i>Grupos jerárquicos</i>	<i>N</i>	<i>Media (Hz)</i>	<i>Desviación típica.</i>	<i>Error típico de la media</i>
1	19	951,05	53,935	12,374
2	32	714,1256	118,675	20,979

La verificación de que ambos grupos son homogéneos y que las medias de cada uno difieren entre sí, se consiguió mediante una prueba de Levene al 5% para igualdad de varianzas y luego una prueba t para muestras independientes.

<b>Prueba de Levene para la igualdad de varianzas</b>	
<i>F</i>	12,944
<i>Sig.</i>	0,001

En esta primera parte, la prueba de Levene señala que se debe asumir varianzas distintas en la siguiente prueba, ya que  $F=12,944$  y  $p=0,001 < 0,05$  (nivel de significación)

**Prueba T de muestras independientes**

		<i>Frecuencia fundamental*</i>
	t	9,727
	gl	46,606
	Sig. (bilateral)	0,000
	Diferencia de medias	236,922
	Error típ. de la diferencia	24,356
95% Intervalo de confianza para la diferencia	Inferior	187,913
	Superior	285,932

\* No se han asumido varianzas iguales, conforme prueba de Levene.  
 $t(47)=9,727$   $p \leq 0,000$ .

La prueba t indica una diferencia significativa entre ambas medias:  $0,000 < 0,05$ ; por lo tanto los dos grupos formados se consideraron homogéneos internamente y diferentes entre sí de forma significativa.

Así se agruparon las probetas en estudio en dos grupos, en función de sus densidades:

- El primero formado por aquellas probetas cuyo nivel de ataque puede corresponder a lo que a priori se clasificó como nivel leve a medio de ataque.
- El segundo grupo engloba las probetas que de forma visual se podría denominar ataque medio a severo.

#### **6.1.5.4. ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE LA EQUIPARACIÓN ENTRE ESCALAS.**

Con el fin evaluar el nivel de aciertos en la clasificación formada con el sistema de  $f_1$  con la clasificación de trabajo, basada en la densidad de las probetas, se elaboró una tabla de contingencia y se aplicó el estadístico Chi<sup>65</sup> cuadrado.

Finalmente, se comparó los grupos formados con  $f_1$  con aquellos formados por el sistema Visual y aquellos creados a partir de Densidad y ver si agrupan las probetas de forma similar o no.

#### **EQUIPARACIÓN CON ESCALA DE TRABAJO (DENSIDAD).**

Teniendo en cuenta que se trabajó con las mismas probetas, la diferencia entre las dos clasificaciones (Densidad y  $f_1$ ) se explica por uno de los siguientes motivos:

- a.- Dichas diferencias se deben a errores en la metodología de clasificación.
- b.- Cada uno de los métodos empleados toman como factor de discriminación una variable que difiere en valor de una probeta a otra.

---

<sup>65</sup> Chi cuadrado: (Williams, F. 1982) prueba no paramétrica para verificar diferencias entre medias, esta prueba trabaja con variables categóricas. Se la puede aplicar para determinar la distribución de los sujetos en un grupo de categorías.

Para determinar cual de estas dos posibilidades afecta a la clasificación y separar en grupos las probetas se trabajó con el estadístico Chi cuadrado ( $\chi^2$ ).

Según este estadístico, si las diferencias entre las clasificaciones se consideraban no significativas, entonces se asumiría que los dos métodos empleados servirán por igual y que las diferencias se deberían a errores propios de cada método.

Por el contrario, si las diferencias se consideraban significativas, se entendería que cada método clasifica de forma diferente las probetas, respaldando la decisión de trabajar únicamente con la escala de trabajo que tomó como referencia los valores de densidad de las probetas estudiadas.

Teniendo como base este razonamiento, se planteó como hipótesis nula ( $h_0$ ) que:

*Los dos métodos son independientes,*

(esto implica que ambos sistemas no clasifican de igual modo a las probetas en estudio).

La opción lógica a  $h_0$  es la hipótesis alternativa ( $h_1$ ):

*Los dos métodos no son independientes,*

(es decir, éstos clasifican de forma similar a las probetas estudiadas).

**Resumen del procesamiento de los casos**

	Casos					
	Válidos		Perdidos		Total	
	N	(%)	N	(%)	N	(%)
2 Grupos $\delta$ vs 2 Grupos $f_1$	51	100,0	0	0,0	51	100,0

**Tabla de contingencia 2 grupos  $\delta$  vs 2 grupos  $f_1$**

Recuento		2 Grupos $f_1$		Total
		1	2	
2 Grupos $\delta$	1	14	11	25
	2	5	21	26
Total		19	32	51

En la tabla de contingencia se observa que la distribución de los recuentos observados es coherente para ambas escalas, es decir, en principio tanto la escala de trabajo (densidad) como la propuesta ( $f_1$ ) clasifican de forma similar a las probetas.

**Pruebas de Chi-cuadrado  $\chi^2$**

	Valor	gl	Sig. Asintótica (bilateral)	Sig. Exacta (bilateral)	Sig. Exacta (unilateral)
$\chi^2$ de Pearson	7,371 <sup>a</sup>	1	0,007		
Corrección por continuidad <sup>b</sup>	5,882	1	0,015		
Razón de verosimi- litudes	7,597	1	0,006		
Estadístico exacto de Fisher				0,009	0,007
Asociación lineal por lineal	7,227	1	0,007		
N de casos válidos	51				

a. 0 casillas (,0%) tienen una frecuencia esperada inferior a 5. La frecuencia mínima esperada es 9,31.

b. Calculado sólo para una tabla de 2x2.

Partiendo del supuesto que los dos métodos clasifican por igual, el calculo que adopta  $\chi^2$ , por ser menor que el nivel de significación  $\alpha=0,005$ , indica que se acepta la igualdad en la clasificación entre las escalas Densidad (escala de trabajo) y Frecuencia fundamental (testada en esta investigación).

## EQUIPARACIÓN CON ESCALA A PRIORI (VISUAL).

En este caso, se tomaron en cuenta las tres agrupaciones con mayor distancia para que coincidan con los tres niveles establecidos a priori.

Con el fin de verificar que los grupos formados son homogéneos y que las medias de cada grupo son diferentes entre sí, se realizó un análisis unifactorial de la variancia y luego una prueba de Tukey a un nivel de significación de 0,05.

**Análisis de la varianza**

<i>Frecuencia fundamental ( <math>f_1</math> )</i>				
	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>gl</i>	<i>Media cuadrática</i>	<i>F</i>
<i>Inter-grupos</i>	978292,523	2	489146,261	130,548 **
<i>Intra-grupos</i>	179849,269	48	3746,860	
<i>Total</i>	1158141,791	50		

\*\* altamente significativo

Este análisis señala que los tres grupos tomados en cuenta son significativamente diferentes entre sí; es decir, considerar la existencia de tres grupos, partiendo de los valores de frecuencia fundamental, es perfectamente válido.

Con el fin de establecer diferencias de dos en dos grupos, se realizó una prueba de comparaciones múltiples.

### Comparaciones múltiples

Tres grupos, en base a Frecuencia fundamental ( $f_1$ )

HSD de Tukey

Grupo (I)	Grupo (J)	Diferencia de medias (I-J)	Error típico	Intervalo de confianza al 95%	
				Límite inferior	Límite superior
1	2	184,9155**	18,63002	139,8590	229,9720
	3	422,6608**	27,06416	357,2064	488,1151
2	1	-184,9155**	18,63002	-229,9720	-139,8590
	3	237,7453**	26,17518	174,4409	301,0496
3	1	-422,6607**	27,06416	-488,1151	-357,2064
	2	-237,7453**	26,17518	-301,0496	-174,4409

\*\* La diferencia de medias es significativa al nivel 0,05.

De esta prueba se desprende que considerando combinaciones pareadas, los grupos efectivamente son diferentes entre sí; finalmente, para confirmar esta conclusión se realizó una prueba de significación de Tukey al 5%.

Con la prueba de Tukey (al 5%), se confirmó que:

- Los tres grupos formados en base a los valores de frecuencia fundamental son homogéneos internamente.
- Los valores medios de frecuencia para cada grupo son significativamente diferentes entre sí.

**Frecuencia fundamental ( $f_1$ )**

*HSD de Tukey<sup>a,b</sup>*

Grupo	N	Media (Hz)	Subconjunto para $\alpha=,05$		
			1	2	3
3	7	528,387	a		
2	25	766,132		b	
1	19	951,048			c
Sig.			1,000	1,000	1,000

Se muestran las medias para los grupos en los subconjuntos homogéneos.

a. Usa el tamaño muestral de la media armónica = 12,739.

b. Los tamaños de los grupos no son iguales. Se utilizará la media armónica de los tamaños de los grupos. Los niveles de error de tipo I no están garantizados.

Esto indica que para el presente estudio, una clasificación empleando los valores de la frecuencia fundamental, permite la formación de tres grupos (posiblemente correspondientes a los ataques leve, medio y severo de las probetas y establecidos a priori y de forma visual), a diferencia de la clasificación basada en la densidad donde se formaron únicamente dos grupos (ataque leve a medio y medio a severo, niveles establecidos visualmente).

Para formar una escala con estos valores y determinar los rangos de cada uno de los tres grupos, se realizó un análisis descriptivo de los grupos formados.

### Descriptivos 3 Grupos $f_1$

Frecuencia fundamental ( $f_1$ )								
G	N	Media	Desv. típica	Error típico	Intervalo de confianza para la media al 95%		Mínimo	Máximo
					Lím. Inf.	Lím. Sup.		
1	19	951,05	53,93	12,37	925,05	977,04	872,79	1056,17
2	25	766,13	68,78	13,76	737,74	794,52	629,85	853,24
3	7	528,39	48,23	18,23	483,78	572,99	466,14	580,84
<i>Total</i>	51	802,39	152,19	21,31	759,59	845,20	466,14	1056,17

Con los valores máximos y mínimos de cada grupo se elaboró la siguiente escala aplicable al caso en estudio:

### Escala basada en la frecuencia fundamental ( $f_1$ )

<i>Rangos de <math>f_1</math> (Hz)</i>	
<i>Ataque leve (G1)</i>	1056,17 872,79
<i>Ataque medio (G2)</i>	853,24 629,85
<i>Ataque severo (G3)</i>	580,84 466,14

El número de probetas en cada uno de estos grupos, tanto para la clasificación a priori (método visual) como para la frecuencia fundamental, se resumen en el siguiente cuadro:

	<i>escala Visual</i> <i>(clasificación a priori)</i>	<i>escala Frecuencia</i> <i>fundamental</i>
<i>Ataque leve (G1)</i>	16	19
<i>Ataque medio (G2)</i>	24	25
<i>Ataque severo (G3)</i>	11	7

Para determinar si ambas escalas clasifican de igual forma las probetas según el nivel de degradación se aplicó el estadístico Chi cuadrado ( $\chi^2$ ), y se planteó como hipótesis nula ( $h_0$ ) que:

*Los dos métodos son independientes,*

(es decir, ambos sistemas no clasifican de igual modo a las probetas en estudio).

La opción lógica a  $h_0$  es la hipótesis alternativa ( $h_1$ ):

*Los dos métodos no son independientes,*

(es decir, éstos clasifican de forma similar a las probetas estudiadas).

### Resumen del procesamiento de los casos

	Casos					
	Válidos		Perdidos		Total	
	N	(%)	N	(%)	N	(%)
3 Grupos Visual vs 3 Grupos $f_1$	51	100,0	0	0,0	51	100,0

### Tabla de contingencia: 3 grupos Visual vs 3 grupos $f_1$

Recuento		3 Grupos $f_1$			Total
		1	2	3	
3 Grupos Visual	1	13	3	0	16
	2	6	17	1	24
	3	0	5	6	11
Total		19	25	7	51

### Pruebas de Chi-cuadrado

	Valor	gl
$\chi^2$ de Pearson	35,875 <sup>a</sup> **	4
Razón de verosimilitudes	35,654 **	4
Asociación lineal por lineal	25,853 **	1
N de casos válidos	51	

a. 4 casillas (44,4%) tienen una frecuencia esperada inferior a 5. La frecuencia mínima esperada es 1,51.

\*\* altamente significativo

La distribución de los recuentos observados en la tabla de contingencia son coherentes en ambas escalas y el valor de  $\chi^2$  al ser menor que el nivel de confianza recomendado (95%), se podría aceptar la igualdad en la clasificación entre las escalas Visual (establecida a priori) y frecuencia fundamental (probada en esta investigación).

#### **6.1.6. RESULTADO GENERAL SOBRE EL POSIBLE EMPLEO DE ESTA FRECUENCIA PARA ESTABLECER NIVELES DE DETERIORO.**

Tras analizar estadísticamente los resultados y de confirmar que los grupos formados son significativamente diferentes entre sí, tanto si se toma en cuenta la agrupación a dos niveles (según escala de trabajo basada en la densidad), como si se toma en cuenta la agrupación a tres niveles (según la escala a priori) se concluye que este procedimiento, basado en la medición de la frecuencia fundamental de vibración, es válido para determinar niveles de deterioro.

## 6.2. SEGUNDA ETAPA.

El trabajo desarrollado durante la segunda etapa tuvo como objetivo determinar la efectividad de dos resinas termoplásticas usualmente empleadas en la consolidación de madera con diferentes niveles de ataque de insectos xilófagos. Para esto, se diseñó un experimento que permitiría comparar el módulo de elasticidad dinámico de las probetas consolidadas con el módulo de aquellas que no recibieron el tratamiento de consolidación.

Partiendo del hecho de que varios estudios validan el cálculo de MOE dinámico para establecer, de forma indirecta, la resistencia de la madera, se estimó que serviría por igual como herramienta en la determinación de la mejora alcanzada con los tratamientos de consolidación.

De esta forma, se planteó como hipótesis de trabajo que:

*El módulo de elasticidad dinámico, calculado a partir del valor de frecuencia fundamental, evalúa fielmente el tratamiento de consolidación.*

La metodología seguida para contrastar esta hipótesis comprendió los siguientes puntos:

- Determinación de los factores en estudio; niveles de deterioro, resinas y solventes y sistemas de aplicación.
- Determinación de los tratamientos aplicados.

- Elaboración del diseño experimental; construcción de una cámara de vacío, volumen máximo de solución, disolución de resinas, proceso de consolidación y evaporación de solventes.
- Medición de la frecuencia fundamental de las probetas y cálculo de sus MOE dinámico; análisis estadístico de los resultados según tratamiento.
- Ensayos estáticos; análisis estadístico para determinar la fiabilidad del método,
- Resultado general sobre el uso de MOE dinámico como herramienta para evaluar los tratamientos de consolidación.

### **6.2.1. FACTORES EN ESTUDIO.**

Como se explicó en el apartado "Fundamento teórico", dado un mismo objeto, las únicas variables manipulables que permitan una adecuada penetración son la viscosidad y la presión de aplicación; la viscosidad como se indicó está relacionada con la concentración de soluto y puede ser modificada empleando diferente solvente como el caso de PVB donde dos soluciones a la misma concentración, pueden tener diferente viscosidad si se disuelve en etanol o en una mezcla etanol – tolueno. Así pues, en esta fase experimental se consideró las mismas dos variables pero denominándolas "resina" empelada y "presión" aplicada durante la consolidación.

Adicionalmente, se consideró como factores a "nivel de deterioro" y grupo "testigo", que aunque no son por sí mismos factores (variable

independiente) influyen al momento de analizar los tratamientos tanto en el interior de cada grupo como entre grupos.

### **6.2.1.1. RESINA EMPLEADA.**

Esta variable podía tomar dos valores:

R1: P(EMA/MA), poli etil metacrilato / metilacrilato.

R2: PVB, poli vinil butiral.

Los solventes y concentración de las soluciones no son factores que intervengan en el estudio ya que son propios para cada resina, es decir se las consideró como constantes; sin embargo esta consideración de tipo metodológico, en el apartado disolución de resinas se detallan tanto los solventes empleados como las proporciones de trabajo.

Ambas resinas sintéticas termoplásticas<sup>66</sup> de naturaleza orgánica han sido indicadas por Schniewind (1995) como las más apropiadas para la consolidación de madera atacada por organismos xilófagos.

---

<sup>66</sup> Polímeros orgánicos sintéticos termoplásticos, pertenecen al primer grupo de adhesivos tanto en la clasificación tradicional, como en la empleada en esta investigación.

Estas se caracterizan porque al aplicar calor reblandecen o funden, y al enfriarse vuelven a endurecer, sin experimentar cambios químicos, siempre que la temperatura no sobrepase el punto de fusión. Sobre este nivel, se producen transformaciones químicas irreversibles como la despolimerización o la degradación oxidativa.

Según Rayner (1978) los polímeros termoplásticos activados por disolvente se pueden clasificar dentro de cinco clases químicas: los plásticos celulósicos, los polímeros vinílicos, los polímeros acrílicos, los cauchos sintéticos y las poliamidas

Son aplicados en forma de solución, dispersión o sólidos fundidos, y por lo general endurecen por medios puramente físicos. Al ser aplicados en solución o en dispersión, la fijación o adhesión del polímero a las superficies o partículas de madera a ser cohesionada se produce en el momento en que el solvente migra al exterior de la madera, etapa previa a la evaporación del solvente. Cuando se aplica sólidos fundidos, la fijación o adhesión del producto se produce cuando inicia el proceso de enfriamiento. (Rayner, 1978)

La primera resina es un copolímero de etil metacrilato y metil acrilato – P(EMA/MA), en esta investigación se empleó Paraloid B72, producida por Rhom & Hass. Mientras que la segunda resina, de nombre comercial Butvar B98, es un polímero de vinil butiral – PVB, producida por Solutia.

De una pesquisa realizada al inicio de esta investigación a 51 organismos encargados de la conservación de objetos confeccionados con madera, en su mayoría museos, se observó una marcada tendencia<sup>67</sup> a emplear Paraloid B72 como resina para consolidación de madera atacada por organismos xilófagos; el 71,4% de las respuestas indicaron que usan esta resina en tratamientos de consolidación, mientras que el restante 28,6% emplean otro tipo de resina. Sin embargo Butvar B98 no fue nombrada en ninguna de las instituciones, la causa no se ha determinado pero podría deberse a falta de conocimiento del producto o inexistencia en el mercado.

a.- (POLI) ETIL METACRILATO / METIL ACRILATO – P(EMA/MA).

Copolímero compuesto por monómeros polimerizados de etil metacrilato, derivado del ácido metacrílico, y de metil acrilato, derivado del ácido acrílico, en relación 70:30. (Horie, 2000:103-107)

Este copolímero al igual que otras resinas acrílicas se emplean en conservación / restauración porque son por lo general bastante estables frente a la degradación por calor o por efectos de foto oxidación<sup>68</sup>,

---

Las resinas empleadas en esta investigación corresponden a las clases químicas de los polímeros vinílicos, polímeros acrílicos.

<sup>67</sup> Solo se indica como marcada tendencia a emplear Paraloid B72 porque únicamente el 13,7% de las instituciones respondieron.

<sup>68</sup> Foto oxidación, fenómeno que combina la acción de la radiación ultravioleta con el oxígeno, la reacción se produce entre el oxígeno y los radicales que se forman en

De hecho, el copolímero de EMA/MA ha sido sugerido por Feller (in Horie, 2000:45-46, 106) como estándar para la *clase A* de estabilidad frente a la acción de radiaciones lumínicas, indicando que este copolímero no se torna soluble o no se degrada considerablemente bajo condiciones normales de exposición.

### **Poli etil metacrilato / metil acrilato**

<i>Información general de la resina</i>	
Abreviación	P(EMA/MA)
nombre IUPAC	P(EMA), poli[1-(ethoxycarbonil)-1-metil etileno
	P(MA), poli[1-(methoxycarbonil)-etileno
composición de monómeros	EMA 70% y MA 30%
nombres comerciales	Acryloid
	Paraloid (B44, B67, B72)
temperatura de transición vítrea	40°C
estabilidad, escala Feller	A (A > 100 años)
solventes (soluciones al 10%)	acetona, 1,1,1-tricloroetano, tolueno
introducción en conservación	1950, como protección para plata

Basado en Horie, C.V. (2000)

puntos reactivos o imperfecciones en la molécula del polímero, produciendo radicales libres que en contacto con el oxígeno forma peróxidos e hidroperóxidos que rompen la cadena polimérica principal, en unos casos, o juntan lateralmente a cadenas adyacentes. Como resultado final de la foto oxidación, la resina incrementa su polaridad y su peso conforme el oxígeno es absorbido; o reduce su peso al degradar el polímero. (Horie, 2000:34-35, 108)

## b.- (POLI) VINIL BUTIRAL, PVB.

Polímero vinílico formado a partir del poli vinil acetal. Del grupo de polímeros derivados del PVAcetal, el PVB es el polímero más empleado en conservación y restauración. (Horie, 2000:100; Rayner, 1978)

**Poli vinil butiral**

<i>Información general de la resina</i>	
Abreviación	PVB
nombre IUPAC	Poli[(2-propil-1,3-dioxano-4,6-dil)metileno]
peso molecular	30 000 – 34 000uma
nombres comerciales	Butvar (B73, B74, B76, B79, B90, B98)
	Mowital (B20H, B30H, B30T, B60H, B60HH)
	Rhovinal (B 7/20, B 10/20, B 20/20, B 50/20)
temperatura de transición vítrea	72 y 78°C
densidad*	1,100 g/cm <sup>3</sup> (ASTM D792-50)
viscosidad**	200 – 400 Cp (Viscosímetro de Brookfield)
módulo de elasticidad aparente	2100 3,1 – 3,2 x 10 <sup>5</sup> Psi
Estabilidad, escala Feller	B (100 años > B > 20 años)
Solventes	ácido acético glacial, butanol, ciclohexanona, cloruro de metileno, diacetona, dimetilformamida, dimetilsulfóxido, etanol, etilacetato, etrahidrofuran, isopropanol, metanol, tolueno / etanol.
introducción en conservación	1956

\* Determinado a 23°C.

\*\* Determinada a 25°C en solución al 15% p/p en solución tolueno – etanol (60:40).

Basado en Butvar (s/f); Horie, C.V. (2000).

Este polímero es sensible a la foto oxidación. En condiciones atmosféricas normales, la radiación ultravioleta produce cierta oxidación, pero cuando las condiciones son severas, se genera una considerable cantidad de enlaces cruzados. Como resultado de este proceso, el PVB pierde masa. (Horie, 2000:34, 100)

#### **6.2.1.2. PRESIÓN DE APLICACIÓN.**

Aunque ya se indicó en el apartado "Fundamento teórico", esta variable no es una opción real de aplicación en bienes culturales; sino únicamente para observar variaciones en el MOE dinámico; los valores de presión y tiempo se determinaron a partir de aquellos indicados por Yildiz (2005); en esta investigación los siguientes:

P1: 0,5Atm, durante 45 minutos.

P2: 1,0Atm, durante 24 horas.

En ambos casos se trabajó por inmersión.

#### **6.2.1.3. NIVEL DE DETERIORO.**

Esta variable podía tomar tres valores que se correspondían con los niveles de ataque establecidos en la primera parte de la fase experimental esto es:

G1: nivel Leve de ataque,

G2: nivel de ataque Medio, y,

G3: ataque Severo.

Estos tres grupos se establecieron en la primera etapa de la fase experimental.

#### **6.2.1.4. GRUPO TESTIGO.**

Un grupo preseleccionado de probetas no fue sometido a cambios de presión como tampoco a ningún tratamiento con resinas con la intención de que sirvieran de parámetro de comparación:

Tg: testigo.

#### **6.2.2. TRATAMIENTOS**

Como modelo básico se consideró como tratamientos a:

- 1.- Las interacciones entre los factores (variables independientes) resina y presión.
- 2.- Al grupo de testigos.

Resultando en cinco tratamientos:

<b>Tratamientos realizados</b>		
<i>Tratamiento</i>	<i>Nomenclatura</i>	<i>Interacción de factores según tratamiento</i>
1	T1	R1*P1: P(EMA/MA) aplicado a 0,5Atm
2	T2	R1*P2: P(EMA/MA) aplicado a 1,0Atm
3	T3	R2*P1: PVB aplicado a 0,5Atm
4	T4	R2*P2: PVB aplicado 1,0Atm
5	T5	Tg: testigo (no recibieron resina ni presión)

**Tratamientos realizados por nivel de deterioro**

<i>Tratamiento - nivel de ataque</i>	<i>Nomenclatura</i>	<i>Interacción de tratamientos según nivel de ataque</i>
T1 –en ataque Leve	T11	R1*P1*G1: P(EMA/MA) a 0,5Atm en ataque Leve
T1 – en ataque Medio	T12	R1*P1*G2: P(EMA/MA) a 0,5Atm en ataque Medio
T1 – en ataque Severo	T13	R1*P1*G3: P(EMA/MA) a 0,5Atm en ataque Severo
T2 – en ataque Leve	T21	R1*P2*G1: P(EMA/MA) a 1,0Atm en ataque Leve
T2 – en ataque Medio	T22	R1*P2*G2: P(EMA/MA) a 1,0Atm en ataque Medio
T2 – en ataque Severo	T23	R1*P2*G3: P(EMA/MA) a 1,0Atm en ataque Severo
T3 – en ataque Leve	T31	R2*P1*G1: PVB a 0,5Atm en ataque Leve
T3 – en ataque Medio	T32	R2*P1*G2: PVB a 0,5Atm en ataque Medio
T3 – en ataque Severo	T33	R2*P1*G3: PVB a 0,5Atm en ataque Severo
T4 – en ataque Leve	T41	R2*P2*G1: PVB a 1,0Atm en ataque Leve
T4 – en ataque Medio	T42	R2*P2*G2: PVB a 1,0Atm en ataque Medio
T4 – en ataque Severo	T43	R2*P2*G3: PVB a 1,0Atm en ataque Severo
T5 – en ataque Leve	T51	Tg*G1: grupo de testigos con ataque Leve
T5 – en ataque Medio	T52	Tg*G2: grupo de testigos con ataque Medio
T5 – en ataque Severo	T53	Tg*G3: grupo de testigos con ataque Severo

Con fines de análisis estadístico, se tomaron en cuenta los tres niveles de deterioro de las probetas como otro factor, formando 15 combinaciones posibles entre los cinco tratamientos y los tres niveles de deterioro.

### **6.2.3. DISEÑO EXPERIMENTAL.**

Debido a que se trabajó con diferentes niveles de ataque, el diseño experimental adecuado fue por bloques completos al azar con tres repeticiones, conforme el siguiente proceso:

Se agruparon las probetas en función de los tres niveles de ataque y seguidamente se las distribuyó de forma aleatoria en los diferentes bloques de tratamientos.

El número total de probetas empleadas se calculó de la siguiente manera:

$2 \text{ resinas} \times 2 \text{ presiones} \times 3 \text{ niveles de deterioro} + 3 \text{ testigos} \times 3 \text{ repeticiones} = 45 \text{ probetas.}$

#### **6.2.3.1. CÁMARA DE VACÍO.**

La impregnación con vacío de las probetas se efectuó en una cámara experimental con características específicas para las probetas con que se trabajó.

Se trabajó a media atmósfera de presión constante durante un período de 45 minutos. Este tiempo se determinó en base al trabajo de Yildiz (2005) con probetas de similares dimensiones.

### **6.2.3.2. VOLUMEN MÁXIMO DE SOLUCIÓN.**

El empleo de una cámara de vacío en la que no se podía visualizar si la solución introducida después de generar el vacío y evitar así el derramamiento de la solución al interior de la cámara, obligó al autor de esta investigación a calcular un volumen máximo admisible y que correspondería al volumen de solución que entraría en la cámara para cubrir completamente las probetas pero sin derramarse fuera de las tinas contenedoras.

Este volumen máximo admisible se calculó de la siguiente forma:

$$V_s = V_c - V_p + V_d \quad (1)$$

Donde:

$V_s$  : volumen máximo de solución a emplear.

$V_c$  : volumen del contenedor.

$V_p$  : volumen de la probeta.

$V_d$  : volumen de madera digerida por los insectos xilófagos.

El valor de  $V_d$  se calculó de la siguiente forma:

$$V_d = V_p - V_r \quad (2)$$

Donde  $V_r$  indica el volumen residual de madera que no ha sido atacada y por lo tanto se consideró su densidad similar a la teórica de la especie. Teniendo en cuenta que la masa residual de la probeta es susceptible de mensurar, el cálculo del volumen residual se realizó a partir de la relación masa residual de la probeta / densidad teórica de la especie:

$$V_r = m_p / D \quad (3)$$

Reemplazando (3) en (2) tenemos:

$$V_d = V_p - \frac{m_p}{D} \quad (4)$$

Finalmente reemplazando (4) en (1) tenemos:

$$V_s = V_c - \frac{m_p}{D}$$

### **6.2.3.3. DISOLUCIÓN DE RESINAS.**

Las resinas se disolvieron en los solventes indicados por las respectivas casas productoras:

P(EMA/MA) en acetona químicamente pura.

PVB en una solución de tolueno – etanol (60-40).

Las concentraciones de cada resina fueron diferentes y se establecieron de forma experimental<sup>69</sup> teniendo como referente los valores indicados por Schniewind, A. (1995) como los más adecuados. Así, P(EMA/MA) al 20% (p/p) y PVB al 16,75% (p/p).

La cantidad de resina retenida en el interior de cada una de las probetas se determinó por gravimetría (método y norma ASTM ya indicadas).

#### **6.2.3.4. CONSOLIDACIÓN Y EVAPORACIÓN DE SOLVENTES.**

Las soluciones de consolidación se aplicaron por inmersión, tanto con presión atmosférica normal (1,0Atm) como con vacío (0,5Atm); después del tiempo estimado para cada tratamiento, las probetas se las dejó en posición horizontal hasta la total evaporación de los solventes.

A continuación se explican los procedimientos ejecutados en cada caso.

##### **PROCESO DE CONSOLIDACIÓN POR INMERSIÓN A 0,5Atm DE PRESIÓN.**

En esta etapa de la investigación, la aplicación de las dos resinas se realizó después de generar vacío de media atmósfera; de esta forma se forzó la penetración de las soluciones. El proceso seguido fue el siguiente:

---

<sup>69</sup> El procedimiento seguido para determinar estos valores se describe en el Anexo 1.

- Las probetas se introdujeron en recipientes adecuados a su tamaño con pesos metálicos sobre ellas para evitar su flotación después de permitir el ingreso de las soluciones en la cámara de consolidación.
- Se generó vacío en el interior de la cámara hasta alcanzar 0,5Atm y se mantuvo esta presión durante 45 minutos.
- Al cronometrar los 45 minutos y manteniendo la misma presión, se abrió el paso de las soluciones de consolidación. Es importante señalar que la tubería empleada para conducir las soluciones desde sus contenedores hasta el interior de la cámara de vacío, tuvieron diferente diámetro con cada resina: así, la solución de PVB al ser más viscosa requirió una manguera de  $\varnothing 5,0\text{mm}$ , mientras que para la solución de P(EMA/MA) bastó con  $\varnothing 2,5\text{mm}$ .
- Una vez se completó el vertido de las soluciones y entonces abrir las compuertas, se cerró primero el paso de las mangueras, luego se aumentó progresivamente la presión al interior de la cámara hasta igualar a la presión atmosférica normal, finalmente, se abrieron las compuertas y se retiraron los contenedores con las probetas inmersas en las respectivas soluciones.

#### PROCESO DE CONSOLIDACIÓN POR INMERSIÓN A 1,0Atm DE PRESIÓN.

El procedimiento practicado para la aplicación de las resinas a presión atmosférica normal fue el siguiente:

- Las probetas se introdujeron en recipientes adecuados a su tamaño, con pesos metálicos sobre ellas y evitar su flotación, luego de permitir el ingreso de las soluciones en la cámara de consolidación.

- Se vertieron las soluciones en el interior de los contenedores hasta cubrir por completo a las probetas.
- Se envolvieron los contenedores con láminas finas de aluminio de uso doméstico con el objetivo de evitar la evaporación de los solventes y se dejó reposar durante 24 horas.
- Al cabo de este tiempo se retiraron las probetas de los contenedores, se eliminó el exceso de solución y fueron pesadas para registrar el incremento de peso.

#### PROCESO DE EVAPORACIÓN DE SOLVENTES.

Tanto en el caso de las probetas tratadas bajo presión como en aquellas tratadas a una atmósfera, el orden seguido fue:

- Después de pesadas las probetas, éstas se colocaron en recipientes adecuados que permitieran la evaporación de los solventes.
- Debajo de todas las probetas se colocaron alzas cilíndricas de 5mm de diámetro, y evitar así que las probetas quedaran en contacto directo con la superficie de los recipientes de secado.
- Cada día se pesaron las probetas para documentar el proceso de evaporación de los solventes.
- Se consideró como punto final (o estable) de evaporación de solventes cuando la diferencia de masa de la probeta entre 2 pesadas sucesivas con un intervalo de 3 horas entre ellas, la masa perdida fue igual o menor al doble de la sensibilidad indicada en la determinación de la masa por gravimetría. (ASTM D 4442)

#### **6.2.4. MEDICIÓN DE FRECUENCIA FUNDAMENTAL Y CÁLCULO DE MÓDULO DE ELASTICIDAD DINÁMICO.**

En esta etapa fueron tomadas en cuenta todas las probetas consideradas en el diseño experimental, independientemente del tratamiento que recibieron. El ejercicio siguió el siguiente procedimiento:

- Se constató que los solventes empleados en las soluciones de consolidación se habían evaporado.
- Medición la frecuencia fundamental de las probetas que intervinieron en el ensayo, 14 mediciones por probeta.
- Eliminación los valores mayores y menores a tres desviaciones estándar (+/-3s) porque podrían haberse originado por la suma, resta o interferencia de ondas. Esta acción se realizó tres veces hasta que los valores de cada probeta se encontraron dentro de estos límites.
- Se calculó la media de  $f_1$  de cada probeta y se ordenaron dichos valores para obtener una escala de intervalo (serie ordenada con intervalos iguales y sin un cero absoluto).
- Con los valores de  $f_1$  se determinó el MOE dinámico de cada probeta.
- Comparación de las medias de MOE dinámico de las probetas consolidadas con el MOE dinámico de las probetas testigo para establecer la mejora alcanzada con el tratamiento de consolidación.
- Se cotejaron los valores de MOE dinámico y estático para determinar el nivel de correlación entre los valores calculados (MOE dinámico) y los

reales (MOE estático) y fijar así la fiabilidad de esta tecnología en el caso de maderas atacadas por organismos xilófagos.

#### **6.2.4.1. ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE LOS RESULTADOS DE TRATAMIENTOS.**

Con el fin de alcanzar el tercer objetivo específico de esta investigación (*Establecer la efectividad de la consolidación empleando esta técnica de evaluación no destructiva*), se examinaron estadísticamente todos los datos recabados en el siguiente orden:

1.- Se realizó un análisis de la varianza con prueba de significación de Tukey<sup>70</sup> al 5% y establecer así la diferencia entre los tratamientos aplicados y entre éstos con las probetas testigo.

2.- Para determinar el grado de fiabilidad de la metodología empleada, basada en la frecuencia fundamental de oscilación, se realizó una correlación y regresión entre los valores de MOE dinámico y estático. El primero (MOE din) se consideró como variable independiente o predictoria, mientras que el segundo (MOE est) se consideró como variable dependiente o criterio.

3.- El grado de ajuste en la correlación entre las variables, se fijó con el coeficiente de correlación de Pearson ( $r$ ).

---

<sup>70</sup> Prueba de Tukey: (Williams, F. 1982) esta prueba pertenece al grupo de pruebas post-hoc o de averiguación que se realiza para determinar cuales son las medias diferentes luego de realizar un análisis de la varianza. Por lo general se toma como nivel de significación el 5%.

4.- Finalmente, la bondad de ajuste del método empleado, se determinó por medio del coeficiente de determinación corregido ( $R^2$  corregido).

#### DIFERENCIAS ENTRE TRATAMIENTOS APLICADOS, Y ENTRE ÉSTOS CON LOS TESTIGOS.

Después de conformados los grupos del diseño experimental y de realizados los tratamientos previstos, se evaluaron las diferentes combinaciones de variables independientes: resina, presión, con los tres niveles de ataque y los testigos, sobre la variable dependiente: MOE dinámico mediante un análisis de la varianza con pruebas de Tukey al 5%.

Como se observa en este análisis, existen diferencias altamente significativas tanto entre los tratamientos realizados, como entre los tres grupos: Leve, Medio y Severo

También se aprecia que dentro del grupo 1 hay diferencias significativas entre las presiones aplicadas y en la interacción resina – presión; mas para la variable resina, la diferencia no es significativa.

En el resto de grupos las diferencias no son significativas. Es decir, ambas resinas, ambas presiones y la interacción entre ambas se las puede considerar similares.

### Análisis de la varianza

<i>Variable dependiente: MOE dinámico (después de consolidación)</i>				
<i>Origen</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>gl</i>	<i>Media cuadrática</i>	<i>F</i>
<i>Total</i>	125287617,69	44		
<i>Tratamientos</i>	88461142,22	14	6318653,016	10,850 **
<i>Entre grupos</i>	15156352,25	2	7578176,126	88,990 **
<i>Dentro G1</i>	4818705,210	4	1204676,302	6,870 *
<i>Resinas (R)</i>	197464,932	1	197464,932	0,846 ns
<i>Presiones (P)</i>	2229438,425	1	2229438,425	9,553 *
<i>R x P</i>	2362894,214	1	2362894,214	10,125 *
<i>Tg vs resto</i>	28907,639	1	28907,639	0,049 ns
<i>Dentro G2</i>	2658691,240	4	664672,810	3,060 ns
<i>Resinas (R)</i>	206449,673	1	206449,673	1,434 ns
<i>Presiones (P)</i>	219921,711	1	219921,711	1,528 ns
<i>R x P</i>	48520,665	1	48520,665	0,337 ns
<i>Tg vs resto</i>	2183799,191	1	2183799,191	3,748 ns
<i>Dentro G3</i>	5201976,840	4	1300494,211	0,910 ns
<i>Resinas (R)</i>	4751122,635	1	4751122,635	3,496 ns
<i>Presiones (P)</i>	22932,107	1	22932,107	0,016 ns
<i>R x P</i>	65190,486	1	65190,486	0,048 ns
<i>Tg vs resto</i>	362731,612	1	362731,612	0,622 ns
<i>Error</i>	16312155,80	28	582576,993	

Media = 4946,640 MPa

Coefficiente de variación = 15,43 %

\*\* = altamente significativo

\* = significativo

ns = no significativo

Como siguiente paso del análisis se realizó la prueba de Tukey al 5 % de la variable MOE din en cada origen de la varianza que mostró diferencias significativas (Tratamientos, Entre grupos y tratamientos dentro del grupo 1) y una prueba de diferencia mínima significativa para la presión como origen de la varianza dentro del grupo 1.

**Módulo de elasticidad dinámico MOE din**

*HSD de Tukey*

	<i>Tratamiento</i>	<i>Media (MPa)</i>	<i>Rango</i>
T21	(R1P2G1)	7541,756	a
T51	(TgG1)	6428,956	a b
T31	(R2P1G1)	6423,140	a b
T41	(R2P2G1)	6397,713	a b c
T11	(R1P1G1)	5792,211	a b c d
T12	(R1P1G2)	5505,356	a b c d
T32	(R2P1G2)	5115,852	b c d e
T22	(R1P2G2)	5107,428	b c d e
T42	(R2P2G2)	4972,274	b c d e f
T52	(TgG2)	4221,332	b c d e f
T43	(R2P2G3)	4075,685	c d e f
T33	(R2P1G3)	4015,703	d e f
T53	(TgG3)	3027,702	e f
T13	(R1P1G3)	2904,660	e f
T23	(R1P2G3)	2669,819	f

Como se aprecia, existen seis rangos de significación entre los tratamientos; en el primer rango (a) se agrupan básicamente todos los tratamientos realizados al grupo 1 (ataque leve); en el segundo rango (b) se encuentran casi todos los tratamientos aplicados al grupo 2 (ataque medio); mientras que los rangos c, d, e y f corresponden al grupo de probetas con ataque severo (grupo 3).

Es interesante observar como las probetas del grupo 2 que recibieron tratamiento con P(EMA/MA) a 0,5Atm forman parte del primer rango; lo cual indicaría que esta resina aplicada en vacío mejoraría la resistencia de una madera con un nivel medio de ataque. El resto del grupo 2 y sus tratamientos formaron la totalidad del segundo rango.

Finalmente, las mayores diferencias según el tratamiento aplicado se advierte en el tercer grupo (probetas con ataque severo), ya que prácticamente cada tratamiento conforma por sí mismo un rango donde la resistencia de las probetas son diferentes de forma significativa en función de la resina y presión aplicadas.

Como se advierte, existe una marcada influencia del nivel de ataque en la conformación de los rangos por tratamiento.

#### Módulo de elasticidad dinámico (MOE din)

<i>HSD de Tukey</i>					
Grupo	N	Media (MPa)	Subconjunto para $\alpha = ,05$		
			1	2	3
1	15	6516,766	a		
2	15	4984,449		b	
3	15	3338,714			c
Sig.			1,000	1,000	1,000

Aplicada la prueba de Tukey para esta variable después de aplicados los tratamientos se observa que cada uno de los tres grupos ocupa un rango diferente demostrando que son significativamente diferentes. El estado de deterioro leve tiene un mayor valor de MOE din con un promedio de 6516,7558 (MPa), y el menor valor fue para el estado severo de deterioro con un promedio de 3338,7143 MPa.

Esto indicaría que la mejora en la resistencia, después de aplicar una de las dos resinas consideradas en este estudio, es relativa al nivel de deterioro que presenta la madera; es decir, esta mejora será únicamente dentro del propio nivel de ataque y no se alcanzarían reforzamientos tales que igualen la resistencia de un nivel de ataque con aquella del nivel inmediatamente superior.

#### Tratamientos dentro de Grupo 1 para variable MOE din

*HSD de Tukey*

Tratamiento	Media (MPa)	Subconjunto para $\alpha =,05$	
		1	2
T31 R2P1	7541,756	a	
T51 TgG1	6428,956	a	b
T21 R1P2	6423,140	a	b
T41 R2P2	6397,713	a	b
T11 R1P1	5792,211		b

En este caso se observan dos rangos de significación, en el primero se ubicó el tratamiento R2P1 (PVB a 0,5Atm) con un valor de 7541,756 MPa mientras que en el último lugar se encuentra el tratamiento R1P1 (P(EMA/MA) a 0,5Atm) con un promedio de 5792,211 MPa.

Este hecho se explicaría porque la resina 2 (PVB) aplicada a media atmósfera de presión, habría formado en el interior de las probetas una matriz con mayor cantidad de sólidos que en los otros tratamientos dentro de este mismo grupo; dicha matriz otorgaría mayor continuidad a las probetas, permitiendo mejor propagación de las ondas en consecuencia mayor frecuencia fundamental y mayor MOE dinámico.

**Presiones dentro de Grupo 1 para MOE din**

<i>DMS</i>			
<i>Presión</i>	<i>Media (MPa)</i>	<i>Subconjunto para <math>\alpha = ,05</math></i>	
		<i>1</i>	<i>2</i>
P2	6969,735	a	
P1	6107,676		b

La prueba de Diferencia Mínima Significativa<sup>71</sup> al 5% presenta en el primer rango a la aplicación de 1,0Atm de presión en tanto que en segundo rango se ubicó la aplicación de 0,5Atm de presión con un valor de 6107,68MPa.

Este hecho indicaría que una madera fácilmente impregnable que reciba un tratamiento de consolidación por inmersión, a presión atmosférica, durante 24 horas y con una de las resinas empleadas en este estudio; aumentaría más su resistencia a la flexión que una madera de las mismas condiciones a la cual se ha aplicado, también por inmersión, las mismas resinas pero impregnadas a media atmósfera de presión.

<sup>71</sup> Diferencia mínima significativa: al igual que la prueba Tukey, determina cuales son las medias diferentes; se diferencian entre sí por el procedimiento estadístico seguido.

### **6.2.5. ENSAYO A FLEXIÓN ESTÁTICA Y COMPARACIÓN ENTRE LOS VALORES DE MÓDULO DE ELASTICIDAD DINÁMICO (CALCULADO) Y ESTÁTICO (REAL).**

Conforme indica Capuz, R. (2008), es necesario confirmar que las variables mensuradas efectivamente pueden predecir las características de la madera; para lo cual se compararon los valores de MOE dinámico (calculado) con aquellos de MOE estático (real) y establecer así el grado de relación entre ambos valores y la variación que existe entre éstos y determinar así la fiabilidad del equipo para el caso de maderas atacadas por organismos xilófagos.

#### **6.2.5.1. ENSAYO A FLEXIÓN ESTÁTICA, PROCEDIMIENTO.**

Según la norma UNE 56-537-79, las probetas deben medir 20 x 20 x 300mm, fibras paralelas a la dirección de la fibra, la cara radial de la probeta se coloca hacia arriba (cara que recibirá el cilindro horizontal que transmite la presión).

La probeta se coloca sobre dos apoyos y se aplica una carga concentrada en el centro de la misma que aumenta de forma constante en intervalos de tiempo constantes hasta provocar la rotura de la probeta, de esta forma se establece los módulos de elasticidad y rotura; para el caso de este estudio se tomaron únicamente los primeros (MOE).

**Equipos y condiciones**

<i>Equipos</i>	<i>Marca</i>	<i>Modelo</i>	<i>Condiciones de ensayo</i>
Máquina universal electrónica de ensayos	Instron	5500R	23°C y 50%HR

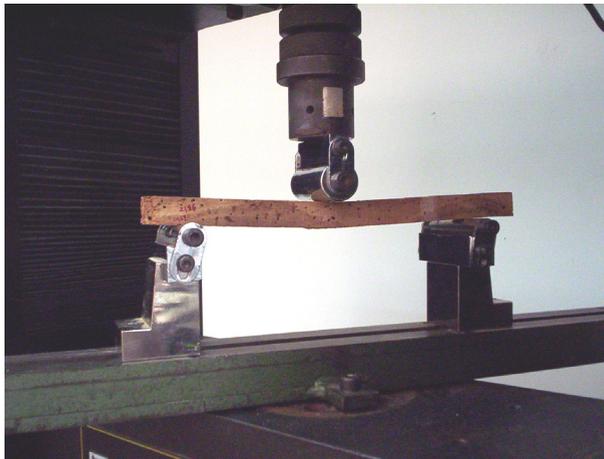


ILUSTRACIÓN 69: Ensayo a flexión estática.

**6.2.5.2. COMPARACIÓN ENTRE LOS VALORES DE MÓDULO DE ELASTICIDAD DINÁMICO (CALCULADO) Y ESTÁTICO (REAL).**

Después de obtener los valores de MOE estático se realizó la comparación entre ambos MOE; para esto, se buscó el coeficiente de correlación de Pearson ( $r$ ) y el coeficiente de determinación  $R^2$  de la relación MOE dinámico vs MOE estático.

**Correlaciones**

		<i>MOE din</i>	<i>MOE est</i>
<i>Correlación de Pearson</i>	MOE din	1,000	0,899
	MOE est	0,899	1,000
<i>Sig. (unilateral)</i>	MOE din	.	0,000
	MOE est	0,000	.
<i>N</i>	MOE din	45	45
	MOE est	45	45

El valor que toma  $r$  es de 0,899, lo cual indica una relación positiva bastante cercana a 1,00 (que expresa una correlación lineal perfecta). Aun siendo alto este coeficiente, es necesario aclarar que no se trata de una relación de causalidad sino únicamente una correlación entre valores que miden el módulo elástico de la madera.

A pesar de no existir causa – efecto, ambos indican por igual el comportamiento elástico de las probetas. En este sentido, se puede considerar al módulo de elasticidad dinámico como un valor teórico que se compara con el valor real del ensayo estático a flexión.

Para cuantificar el grado de la relación entre ambos MOE, se realizaron: un análisis de regresión lineal y obtener así el coeficiente de determinación ( $R^2$ ), el nivel de significación de la varianza y los coeficientes para establecer la fórmula lineal que relacione ambos MOE.

**Resumen del modelo<sup>b</sup>**

Modelo	R	R cuadrado	R cuadrado corregida	Error típ. de la estimación
1	0,899 <sup>a</sup>	0,808	0,804	540,631

a. Variables predictorias: (Constante), MOE din

b. Variable dependiente: MOE est

El valor del coeficiente de determinación  $R^2$  corregido (0,804) indica un elevado grado de ajuste entre los valores de MOE dinámico y estático; este valor indica que en más de un 80% de los casos de MOE dinámico se corresponden a aquellos de MOE estático.

El grado de ajuste que se encontró en esta investigación se corrobora con los valores de otros estudios sobre la aplicación de esta técnica en el calculo de MOE para madera; así, en el centro Gembloux (s/f) se estableció un valor medio de  $R^2$  de varias especies forestales de 0,92; Görlacher (1984) por su parte encontró un  $R^2 = 0,98$  para dos especies diferentes; Grundström (1998)  $R^2 = 0,82$  en tableros contrachapados; o, Machek et al (2001) observaron un coeficiente de determinación  $R^2$  igual a 0,82 en el caso de maderas atacadas por hongos.

Para establecer la ecuación que mejor se ajuste a la correlación entre ambos MOE se realizó primeo un análisis de la variancia y después un análisis de coeficientes.

**Análisis de la varianza<sup>b</sup>**

<i>Modelo</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>gl</i>	<i>Media cuadrática</i>	<i>F</i>
Regresión	5,305E7	1	5,305E7	181,487 <sup>a **</sup>
1 Residual	1,257E7	43	292281,527	
Total	6,561E7	44		

a. Variables predictoras: (Constante), MOE din\_2

b. Variable dependiente: MOE est

\*\* altamente significativo

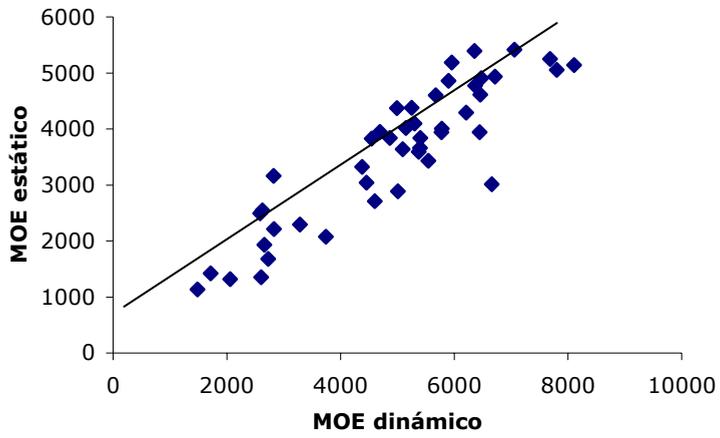
**Coefficientes**

<i>Modelo</i>	<i>Coefficientes no estandarizados</i>		<i>Coefficientes tipificados</i>	<i>t</i>
	<i>B</i>	<i>Error típ.</i>	<i>Beta</i>	
1 (Constante)	371,253	252,149		1,472 ns
MOE din	0,651	0,048	0,899	13,472 **

ns no significativo

\*\* altamente significativo

El estadístico F indica que existe una relación lineal significativa entre los dos MOE ( $p < 0,001$ ); lo cual indica que la ecuación que se extrae del análisis de coeficientes de la regresión, ofrece un buen ajuste a la nube de puntos.



$$\text{MOE}_{\text{est}} = 371,253 + 0,651 \text{MOE}_{\text{din}}$$





## **7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.**

El orden de este apartado se corresponde con aquel de los objetivos planteados al inicio de esta investigación.

### **7.1. MÉTODOS DE EVALUACIÓN NO DESTRUCTIVOS APLICABLES A TABLAS Y TABLAZONES.**

El estudio y análisis de los diferentes métodos de evaluación no destructiva que permitan obtener una valoración objetiva del estado de la madera y de la mejora obtenida tras la consolidación, permitió identificar cuatro conclusiones importantes:

- Algunos métodos de evaluación que son considerados como no destructivos, no son aplicables en el campo de la conservación – restauración, porque generan un daño que en otras áreas se considera despreciable; tal es el caso de las técnicas físico mecánicas de resistencia al arranque de tornillo o de resistencia a barrenado; o aquella acústica de ultrasonidos donde los transductores se acoplan en interior de unos orificios especialmente taladrados en la madera.
- Los métodos capaces de generar imágenes del interior recurren a energías extremadamente altas (radiaciones ionizantes y resonancia magnética) que alteran la estructura electrónica de los átomos que conforman la materia y son en consecuencia delicadas de emplear. Sin embargo, estas técnicas, son muy útiles para detectar con exactitud la ubicación y extensión del deterioro, o para establecer el nivel de penetración y distribución de los polímeros aplicados a la madera; pero requieren de interpretación por parte del técnico, es decir se regresa al punto de partida de esta investigación: carencia de un método que

determine objetivamente el estado de la madera y discrimine diferentes estados de ataque.

- El método que se consideró como idóneo para aplicar al caso de tablas y tablazones se fundamenta en medir la frecuencia fundamental de oscilación, por que esta técnica no implica ningún riesgo ni para el operador ni para el objeto ya que como se indicó, la energía aplicada durante el ensayo y aquella recibida inmediatamente después del ensayo, es extremadamente mínima.

- Finalmente, de las pruebas realizadas con probetas, y dentro de las condiciones del ensayo, se plantea como viable la aplicación de esta técnica a tablas y tablazones; sin embargo, es necesario verificar los resultados probando el método con tablas de tamaño real y verificar así el grado de fiabilidad con tablas de diferentes dimensiones y geometrías.

## **7.2. FIABILIDAD DE ESTA TÉCNICA PARA CARACTERIZAR EL ATAQUE PROVOCADO POR INSECTOS XILÓFAGOS Y DISCRIMINAR DIFERENTES GRUPOS DE DETERIORO.**

A pesar de tener como única referencia dos estudios donde se manifestaba la idoneidad para emplear esta técnica en la detección de estados tempranos de degradación provocada por hongos xilófagos para comparar con los resultados de este estudio, se puede afirmar que:

- En base a los resultados obtenidos en la fase experimental, se indica que esta técnica permite por un lado determinar la calidad de la madera atacada con un elevado nivel de fiabilidad ( $R^2$  corregido = 0,804) y por

otro lado permite clasificar diferentes niveles de deterioro incluso mejor que teniendo como referencia los valores de densidad, corroborando así los estudios de Machek et al (1998 y 2001) referidos a la misma técnica pero aplicada al ataque de hongos xilófagos.

- De los ensayos realizados, se observó que teniendo como referencia los valores de frecuencia fundamental, era factible la identificación de cinco niveles (grupos homogéneos) cuyos valores medios son significativamente diferentes entre sí; este hecho puede ser un indicio de que esta tecnología permite identificar y de forma objetiva, más niveles de deterioro que el procedimiento visual. Por lo tanto, se sugiere el uso de este sistema para caracterizar diferentes niveles de ataque de la madera en objetos patrimoniales como tablazones de artesonados.

- Aunque los resultados validan la fiabilidad de esta técnica no destructiva, hay que recordar que se trabajó a nivel de laboratorio donde las diferentes variables están controladas; una vez se realicen pruebas con tablas de dimensiones reales se podrá contar con un parámetro más unido a la realidad y muy probablemente sea necesario aplicar factores de corrección que ajusten los posibles modelos que se planteen.

### **7.3. SOBRE LA FIABILIDAD DE ESTA TÉCNICA PARA EVALUAR LOS TRATAMIENTOS DE CONSOLIDACIÓN.**

En base a los datos recabados durante los ensayos se puede considerar que esta técnica es altamente fiable; los valores de MOE dinámico obtenidos se correlacionan en más del 80% de los casos con los valores de MOE estático, y permite sugerir el empleo de esta técnica como

herramienta para evaluar el resultado de un tratamiento de consolidación.

Sin embargo haber establecido este resultado, destacó el hecho de que los tratamientos de consolidación con resinas termoplásticas no mejoran de forma significativa la calidad de la madera estudiada, tal como lo indica Schniewind, A. (1995), sin embargo se pudo establecer que el grupo de probetas con mayor daño son al mismo tiempo las que mejores resultados consiguen tras su consolidación. Únicamente el grupo de probetas muy deterioradas presentaron una mejora significativa frente al grupo de testigos empleando PVB.

Algo interesante de resaltar es el hecho de que las dos resinas empleadas mejoran por igual la madera; sin embargo; siendo PVB la resina que menos peso aporta aunque su concentración en la disolución fue mayor que P(EMA/MA); además, la primera resina aparentemente otorga mayor flexibilidad que la segunda. Ambos aspectos resultan interesantes si se considera que las tablas de artesonados o cielos rasos se encuentran horizontalmente ubicadas y si las dos resinas en principio mejoran por igual la madera, se debería emplear aquella que otorgue menor peso y permita mayor flexibilidad.

A la luz de los resultados, se puede decir que, si la mejora alcanzada tras la consolidación con P(EMA/MA) y PVB es similar en ambos casos, se puede optar por una u otra resina en función de los siguientes factores: nivel de toxicidad del solvente, el peso total (madera / resina) después del tratamiento, la flexibilidad de la resina, o el tiempo de evaporación del solvente, entre otros.

La mejora real alcanzada con el resto de tratamientos no difiere significativamente del grupo de testigos. Esta peculiaridad hace suponer que no sería necesaria la exposición del restaurador a productos tóxicos, reduciendo también el estrés de la madera al tratarla.

En general se puede decir que en este caso, la consolidación, otorga cierta mejora del módulo de elasticidad; sin embargo, la diferencia con una probeta sin consolidar no es significativamente diferente.

#### **7.4. POSIBLES LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN QUE SE PUEDEN DESARROLLAR A PARTIR DE ESTA INVESTIGACIÓN.**

Considerando los resultados obtenidos, se estima viable extender el estudio de esta técnica para su aplicación en tablas y tablazones reales, con geometrías y dimensiones diferentes y con distintos niveles de deterioro; aunque evidentemente los valores de efectividad se podrían ver levemente reducidos.

Probablemente la mejor aplicación de esta técnica en objetos reales independiente de su geometría sea el control y monitoreo del estado en que se encuentran dicho objetos, como se indicó en el apartado que describe el funcionamiento de esta técnica, las fluctuaciones en el valor de la frecuencia fundamental indican un cambio en la estructura interna del objeto, este cambio puede ser debido a factores como la humedad, pero también debido al ataque de organismos xilófagos; si se toma en consideración que esta técnica detecta niveles tempranos de deterioro, entonces sería posible tomar las acciones pertinentes antes de que el deterioro llegue a ser sensorialmente visible.

La aplicación de esta técnica en objetos patrimoniales, que son en su gran mayoría de geometría irregular, aún no está definida. Sin embargo, de las observaciones efectuadas y de las referencias bibliográficas, se estima factible el uso de esta técnica para establecer un rango de frecuencias en las que el objeto conserva determinadas propiedades que nos interesan, cuando sobrepasa estos límites se entiende que algún fenómeno se está manifestando ocasionado por cambios en el interior del objeto, como pérdida de masa provocada por acción de organismos xilófagos, o, incremento de masa por absorción de humedad que sobrepasa el límite establecido.

#### **7.5. RECOMENDACIONES.**

Finalmente, se aconseja dos vertientes de investigación diferentes pero que se complementan.

Por un lado, se sugiere ampliar este estudio a un mayor número de especies y niveles de deterioro porque se podrían establecer valores referenciales para diferentes maderas.

Un estudio más amplio podría servir de base para la creación de una escala apropiada para calificar diferentes niveles de deterioro e indicar aquellos valores críticos donde sí se necesita la consolidación con resinas termoplásticas.

Y por otro lado, se recomienda el desarrollo de sistemas que permitan aplicar esta tecnología por sensores remotos, lo que permitiría tomar las medidas con mayor rapidez y seguridad en zonas de difícil acceso.

Esto implicaría estudios sobre sistemas de soporte para las tablas donde los anclajes no alteren su vibración; sistemas emisor de impulsos y receptor de frecuencias controlado a distancia.







## **8. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.**

ABIAN, Miguel (2009) comunicación personal.

ACOSTA, Misael (1960); *Maderas económicas del Ecuador y sus usos*; Editorial de la Casa de la Cultura Ecuatoriana; Quito, Ecuador.

ACOSTA, Washington (1987) *Evaluación de cinco fungicidas para el control de la roya (Uromyces caryophyllinus, Wint) en el clavel (Dianthus caryophyllus, L.)*. Tesis de grado, Universidad Técnica de Ambato, Facultad de Ingeniería Agronómica. Ambato, Ecuador.

ACUÑA Luis; Rafael DÍEZ, Milagros CASADO, Alfonso BASTERRA, Enrique RELEA (2007) *La técnica de transmisión ultra sónica aplicada a la madera estructural*. En 11º Congreso Español de END Gijón, 4, 5, y 6 de julio de 2007.

AGUILAR, Miguel (2001) *Bioelectromagnetismo: campos eléctricos y magnéticos y seres vivos*. Consejo Superior de Investigaciones Científicas. Madrid, España.

AITIM (1994) *Guía de la madera para la construcción, el diseño y la decoración*. AITIM, Asociación de Investigación Técnica de las Industrias de la Madera y el Corcho. Madrid, España.

AITIM (1997) *Especies de maderas para carpintería, construcción y mobiliario*. AITIM, Asociación de Investigación Técnica de las Industrias de la Madera y el Corcho. Madrid, España.

ÁLVAREZ, Laura; Alfonso BASTERRA; Milagros CASADO (2005) *Aplicación del Resistógrafo al diagnóstico de elementos singulares*

*en estructura de madera*. En I Jornadas de investigación en construcción, Actas de las Jornadas, Tomo I. Instituto de Ciencias de la Construcción "Eduardo Torroja", Consejo Superior de Investigaciones Científicas. España.

AMERICAN SOCIETY FOR METALS (1989) *ASM Metals Handbook: Nondesrtuctive Evaluation and Quality Control*, Volume 17. USA.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (1999) *Standard Methods of Testing Small Clear Specimens of Timber*. ASTM D 0143-94. En American Society for Testing and Materials: Wood Vol. 4.10. Philadelphia, USA.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (1999) *Standard Practice for Sampling Forest Trees for Determination of Clear Wood Properties*. ASTM D 5536-94. En American Society for Testing and Materials: Wood Vol. 4.10. Philadelphia, USA.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (1999) *Standard Terminology Relating to Wood*. ASTM D 0009-87 (Reapproved 1992). En American Society for Testing and Materials: Wood Vol. 4.10. Philadelphia, USA.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (1999) *Standard Test Method for Dynamic Young's Modulus, Shear Modulus, and Poisson's Ratio by Impulse Excitation of Vibration*. ASTM C 1259-08. En American Society for Testing and Materials: Wood Vol. 4.10. Philadelphia, USA.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (1999) *Standard Test Methods for Specific Gravity of Wood-Based Materials*. ASTM

D 2395-93 (Reapproved 1997). En American Society for Testing and Materials: Wood Vol. 4.10. Philadelphia, USA.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (1999) *Standard Test Methods for Establishing Clear Wood Strength Values*. ASTM D 2555-98. En American Society for Testing and Materials: Wood Vol. 4.10. Philadelphia, USA.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (1999) *Standard Test Method for Laboratory Evaluation of Wood and Other Cellulosic Materials for Resistance to Termites*. ASTM D 3345-74. En American Society for Testing and Materials: Wood Vol. 4.10. Philadelphia, USA.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (1999) *Standard Test Methods for Direct Moisture Content Measurement of Wood and Wood-Based Materials*. ASTM D 4442-92 (Reapproved 1997). En American Society for Testing and Materials: Wood Vol. 4.10. Philadelphia, USA.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (1999) *Standard Test Method for Dynamic Young's Modulus, Shear Modulus, and Poisson's Ratio for Advanced Ceramics by Impulse Excitation of Vibration*. ASTM E 1876-07. En American Society for Testing and Materials: Wood Vol. 4.10. Philadelphia, USA.

APPELBAUM, Barbara (1987) *Criteria for Treatment: Reversibility*. En Journal of The American Institute for Conservation, Vol. 26, No. 2 (Autumn, 1987), pp. 65-73, The American Institute for Conservation of Historic & Artistic Works.

- APPELBAUM, Barbara (2007) *Conservation treatment methodology*. Elsevier Ltd.Oxford. United Kingdom.
- ARIZA, Iñigo (2002) *El nuevo enfoque en los ensayos mecánicos de la madera aserrada para uso estructural en la normativa europea*. En *Madera y Bosques*, 8(2), 2002:3-16.
- ARRIAGA, Francisco; F. PERAZA; Miguel ESTEBAN; Ignacio BOBADILLA; F. GARCÍA (2002) *Intervención en estructuras de madera*. AiTiM. Madrid, España.
- ARRIAGA, Francisco; Guillermo ÍÑIGUEZ; Miguel ESTEBAN; Ignacio BOBADILLA (2007) *Madera aserrada de gran escuadría para uso estructural y sus particularidades*. En *Informes de la Construcción* Vol. 59, 506, 29-41 abril-junio 2007.
- ASOCIACIÓN ESPAÑOLA DE NORMALIZACIÓN Y CERTIFICACIÓN (1977) *Determinación del peso específico* UNE 56-531-77 Características físico-mecánicas de la madera. Asociación Española de Normalización y Certificación AENOR. Madrid, España.
- ASOCIACIÓN ESPAÑOLA DE NORMALIZACIÓN Y CERTIFICACIÓN (1977) *Determinación de las contracciones lineal y volumétrica* UNE 56-533-77 Características físico-mecánicas de la madera. Asociación Española de Normalización y Certificación AENOR. Madrid, España.
- ASOCIACIÓN ESPAÑOLA DE NORMALIZACIÓN Y CERTIFICACIÓN (1977) *Determinación de la resistencia a la compresión axial* UNE 56-535-77 Características físico-mecánicas de la madera. Asociación

Española de Normalización y Certificación AENOR. Madrid, España.

ASOCIACIÓN ESPAÑOLA DE NORMALIZACIÓN Y CERTIFICACIÓN (1978)  
*Preparación de probetas para ensayos UNE 56-528-78*  
Características físico-mecánicas de la madera. Asociación Española de Normalización y Certificación AENOR. Madrid, España.

ASOCIACIÓN ESPAÑOLA DE NORMALIZACIÓN Y CERTIFICACIÓN (1979)  
*Determinación de la resistencia a la flexión estática UNE 56-537-79*  
Características físico-mecánicas de la madera. Asociación Española de Normalización y Certificación AENOR. Madrid, España.

ASOCIACIÓN ESPAÑOLA DE NORMALIZACIÓN Y CERTIFICACIÓN (1995)  
*Durabilidad natural de la madera maciza. Parte 2: guía de la durabilidad natural y de la impregnabilidad de especies de madera seleccionadas por su importancia en Europa UNE-EN 350-2:1995, Norma Española.* Asociación Española de Normalización y Certificación, AENOR. Madrid, España.

ASOCIACIÓN ESPAÑOLA DE NORMALIZACIÓN Y CERTIFICACIÓN (1995)  
*Madera estructural. Clases resistentes UNE-EN 338:1995, Norma Española.* Asociación Española de Normalización y Certificación, AENOR. Madrid, España.

ASOCIACIÓN ESPAÑOLA DE NORMALIZACIÓN Y CERTIFICACIÓN (1996)  
*Durabilidad de la madera y de los productos derivados de la madera. Madera maciza tratada con productos protectores. Parte 1: Clasificación de las penetraciones y retenciones de los*

*productos protectores* UNE-EN 351-1:1996, Norma Española. Asociación Española de Normalización y Certificación, AENOR. Madrid, España.

ASOCIACIÓN ESPAÑOLA DE NORMALIZACIÓN Y CERTIFICACIÓN (1997)  
*Ensayos no destructivos. Ensayo por ultrasonidos. Parte 3: Técnica de transmisión* UNE-EN 583-3:1997. Asociación Española de Normalización y Certificación, AENOR. Madrid, España.

ASOCIACIÓN ESPAÑOLA DE NORMALIZACIÓN Y CERTIFICACIÓN (1999)  
*Ensayos no destructivos. Terminología. Parte 1: Lista de términos generales* UNE-EN 1330-1:1999. Asociación Española de Normalización y Certificación, AENOR. Madrid, España.

ASOCIACIÓN ESPAÑOLA DE NORMALIZACIÓN Y CERTIFICACIÓN (1999)  
*Ensayos no destructivos. Terminología. Parte 2: Términos comunes a los métodos de ensayos no destructivos* UNE-EN 1330-2:1999. Asociación Española de Normalización y Certificación, AENOR. Madrid, España.

ASOCIACIÓN ESPAÑOLA DE NORMALIZACIÓN Y CERTIFICACIÓN (1999)  
*Ensayos no destructivos. Ensayo por ultrasonidos. Parte 1: Principios generales* UNE-EN 583-1:1999. Asociación Española de Normalización y Certificación, AENOR. Madrid, España.

ASOCIACIÓN ESPAÑOLA DE NORMALIZACIÓN Y CERTIFICACIÓN (2000)  
*Ensayos no destructivos. Terminología. Parte 4: Términos utilizados en ensayos por ultrasonidos* UNE-EN 1330-4:2000. Asociación Española de Normalización y Certificación, AENOR. Madrid, España.

ASOCIACIÓN ESPAÑOLA DE NORMALIZACIÓN Y CERTIFICACIÓN (2000)  
*Ensayos no destructivos. Terminología. Parte 9: Términos utilizados en ensayos por emisión acústica* UNE-EN 1330-9:2000. Asociación Española de Normalización y Certificación, AENOR. Madrid, España.

ASOCIACIÓN ESPAÑOLA DE NORMALIZACIÓN Y CERTIFICACIÓN (2001)  
*Ensayos no destructivos. Caracterización y verificación del equipo de examen por ultrasonidos. Parte 1: Aparatos* UNE-EN 12668-1:2001. Asociación Española de Normalización y Certificación AENOR. Madrid, España.

ASOCIACIÓN ESPAÑOLA DE NORMALIZACIÓN Y CERTIFICACIÓN (2001)  
*Ensayos no destructivos. Caracterización y verificación del equipo de examen por ultrasonidos. Parte 3: Equipo completo* UNE-EN 12668-3:2001. Asociación Española de Normalización y Certificación, AENOR. Madrid, España.

ASOCIACIÓN ESPAÑOLA DE NORMALIZACIÓN Y CERTIFICACIÓN (2001)  
*Ensayos no destructivos. Emisión acústica. Caracterización del equipo. Parte 1: Descripción del equipo* UNE-EN 13477-1:2001. Asociación Española de Normalización y Certificación, AENOR. Madrid, España.

ASOCIACIÓN ESPAÑOLA DE NORMALIZACIÓN Y CERTIFICACIÓN (2001)  
*Ensayos no destructivos. Emisión acústica. Caracterización del equipo. Parte 2: Verificación de las características de funcionamiento* UNE-EN 13477-2:2001. Asociación Española de Normalización y Certificación, AENOR. Madrid, España.

ASOCIACIÓN ESPAÑOLA DE NORMALIZACIÓN Y CERTIFICACIÓN (2001)  
*Ensayos no destructivos. Ensayo por ultrasonidos. Parte 5: Caracterización y dimensionamiento de discontinuidades UNE-EN 583-5:2001.* Asociación Española de Normalización y Certificación, AENOR. Madrid, España.

ASOCIACIÓN ESPAÑOLA DE NORMALIZACIÓN Y CERTIFICACIÓN (2002)  
*Ensayos no destructivos. Caracterización y verificación del equipo de examen por ultrasonidos. Parte 2: Transductores UNE-EN 12668-2:2002.* Asociación Española de Normalización y Certificación, AENOR. Madrid, España.

ASOCIACIÓN ESPAÑOLA DE NORMALIZACIÓN Y CERTIFICACIÓN (2005)  
*Contenido de humedad de una pieza de madera aserrada. Parte 1: Determinación por el método de secado en estufa. UNE EN 13183-1* Asociación Española de Normalización y Certificación AENOR. Madrid, España.

ASOCIACIÓN ESPAÑOLA DE NORMALIZACIÓN Y CERTIFICACIÓN (2005)  
*Estructuras de madera. Madera estructural con sección transversal rectangular clasificada por resistencia. Parte 2 : Aparato de clasificación. Especificaciones adicionales para el ensayo de tipo inicial. EN 14081-2:2005.* Asociación Española de Normalización y Certificación AENOR. Madrid, España.

ASOCIACIÓN ESPAÑOLA DE NORMALIZACIÓN Y CERTIFICACIÓN (2005)  
*Estructuras de madera. Madera estructural con sección transversal rectangular clasificada por resistencia. Parte 2 : Aparato de clasificación. Especificaciones adicionales para el ensayo de tipo inicial. EN 14081-2:2005.* Asociación Española de Normalización y Certificación AENOR. Madrid, España.

- BAETTIG, Ricardo (2001) *Determinación del modulo de elasticidad de la madera mediante vibraciones transversales*. En *Maderas, ciencia, tecnología*. [online] 2001. vol. 3, no. 1-2 [citado 2009-05-11], pp. 44-51. Disponible en: <  
[http://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0718-221X2001000100005&lng=es&nrm=iso](http://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0718-221X2001000100005&lng=es&nrm=iso) >. ISSN 0718-221X.
- BARCLAY, Robert (1981) *Wood Consolidation on an Eighteenth Century English Fire Engine*. En *Studies in Conservation*, Vol. 26, No. 4 (Nov., 1981), pp. 133-139, The American Institute for Conservation of Historic & Artistic Works. USA.
- BARCLAY, Robert; C. Mathias (1989) *An Epoxy/Microballoon Mixture for Gap Filling in Wooden Objects*. En *Journal of the American Institute for Conservation*, Vol. 28, No. 1 (Spring, 1989), pp. 31-42, The American Institute for Conservation of Historic & Artistic Works. USA.
- BAROV, Zdravko; Thomas FREY; Steven HOYT (1992); *Climatological analysis in relation to the conservation of a sixteenth-century spanish polychrome wooden ceiling*. En *Consevation of the Iberian and Latin American Cultural Heritage*. Preprints of the contributions to the IIC Madrid Congress. International Institute for Conservation of Historic and Artstic Works. 6 Buckingham. Londres Reino Unido.
- BASTERRA, Alfonso; Gema RAMÓN; Isabel BARRANCO; Gabriel LÓPEZ; Luis ACUÑA; Milagros CASADO (2005) *Avance de propuesta metodológica para el diagnóstico y análisis de estructuras de madera históricas*. En *Actas del IV Congreso Nacional de Historia*

de la Construcción. Ed. por S. Huerta. Instituto Juan de Herrera, SEHC, COAC, COAATC. Madrid, España.

BENÍTEZ, Julio (1999); *Ensamblados empleados en la construcción de retablos pertenecientes a iglesias patrimoniales de Quito*; Tesis de grado; Universidad Tecnológica Equinoccial; Quito, Ecuador.

BENÍTEZ, Julio (2001) *El rescate del oficio de la carpintería, base para la conservación del patrimonio tangible, intangible y natural. Cuestión dilucidada con la comparación de dos estructuras en madera*. En 5º Congreso Internacional, Patrimonio cultural contexto y conservación. La Habana, Cuba.

BENÍTEZ, Julio (2004) *Diagnóstico y anteproyecto para intervenir las maderas, estructura y soporte, y las policromías de los artesonados y cielo raso barroco de la iglesia de San Francisco*. En Estudios para la restauración y consolidación del artesonado, cubierta y cúpulas de la iglesia de San Francisco. Vega, Héctor (coordinador). Fondo de Salvamento, FONSA. Quito, Ecuador.

BENÍTEZ, Julio (2006); *Estudio de los ensamblados empleados en la construcción de retablos patrimoniales del centro histórico de Quito entre los s. XVII - XVIII*. En La conservación de retablos, catalogación, restauración y difusión. María Dolores Ruíz de la Canal; Mercedes García Pazos (Edas) Actas de los VIII Encuentros de Primavera en el Puerto. Puerto de Santa María.

BENÍTEZ, Julio (2009) *Penetrabilidad y distribución de dos resinas termoplásticas en la consolidación de madera severamente deteriorada; el caso de las tablas y tablazón del cielo raso barroco y artesonados de la iglesia de San Francisco en Quito*;

Tesis de Master; Universidad Politécnica de Valencia; Valencia, España.

BENÍTEZ, Julio; José OLIVER-VILLANUEVA; María IBIZA-PALACIOS; Guillermo MARTÍNEZ-RUÍZ; José GRAFIÁ; María VIVANCOS (2009); *Valoración de los tratamientos de consolidación de madera deteriorada comparando los valores de módulo de elasticidad antes y después de los tratamientos*; Arche. Universida Politécnica de Valenica.

BJORDAL, Charlotte; Thomas NILSSON (2001) *Observations on Microbial Growth During Conservation Treatment of Waterlogged Archaeological Wood*. En *Studies in conservation*, 46 (3): 211-20.

BLANCHETTE, Robert (1995) *A guide to wood deterioration caused by microorganisms and insects*. En *The structural conservation of panel paintings, Proceedings of a Symposium at the John Paul Getty Museum*. Dardes, K.; Rothe A. (Eds). U.S.A.

BLANCHETTE, Robert; John HAIGHT; Robert, KOESTLER (1994) *Assessment of deterioration in archaeological wood from ancient Egypt*. En *Journal of the American Institute for Conservation*, volume 33, number 1, Article 5; U.S.A.

BOBADILLA, Ignacio; Miguel ESTEBAN; Guillermo ÍÑIGUEZ; Francisco ARRIAGA; Daniel BALLARÍN; José PALACIOS (2007) *Estimación de la densidad de la madera aserrada de conífera mediante técnicas no destructivas de arranque de tornillos y penetrómetro y su aplicación en la estimación del módulo de elasticidad*. En *Informes de la Construcción* Vol. 59, 506, 107-116 abril-junio 2007.

- BRATASZ, Lukasz; Roman KOZLOWSKI (2005) *Laser Sensors for Continuous In-Situ Monitoring of the Dimensional Response of Wooden Objects*. En *Studies in conservation* 50 (4): 307-15.
- BUCUR, Voichita (1995) *Acoustics of wood*, CRC Press, Inc. Florida, U.S.A.
- BURNSIDE, Clifford (1991) *Electromagnetic distance measurement*. Third edition, Oxford BSP Professional Books. Londres, Inglaterra.
- BUSTINDUY, María (1997) *Utilización de contrastes radiopacos para el control de la consolidación de la fibra leñosa*. Tesis doctoral, Universidad del País Vasco. España.
- BUTVAR, (s/d) *Poli vinyl butiral Resin, Properties & uses*. Solutia. En: [www.butvar.com](http://www.butvar.com).
- CALVO, Ana (1997) *Conservación y Restauración, Materiales, técnicas y procedimientos de a A a la Z*, Ediciones del Serbal, Barcelona, España.
- CALVO, Félix (1993) *Técnicas estadísticas multivariantes, con resolución de ejercicios prácticos mediante los paquetes estadísticos SPSS y PROGSTAD*. Universidad de Deusto. Bilbao, España.
- CANDELAS, Pilar (2003) *Contribución al ensayo no destructivo de materiales mediante tomografía ultrasónica*. Tesis Doctoral, Universidad Politécnica de Valencia, Valencia 2003.
- CAPUZ, Rafael (2003) *Métodos de ensayos no destructivos para la estimación de las propiedades físicas y mecánicas de las*

- maderas*. Tesis Doctoral, Universidad Politécnica de Valencia. Valencia, España.
- CAPUZ, Rafael (2008) *Materiales orgánicos, maderas*. Universidad Politécnica de Valencia. Valencia, España.
- CARRERAS, Raquel (2003) *Principios científicos de la conservación de la madera*. Unión Nacional de Escritores y Artistas de Cuba; LA Habana Cuba.
- CARRERAS, Raquel (2007) comunicación personal.
- CASADO, Milagros; O. PIZANO; Alfonso BASTERRA; Luis ACUÑA (2005) *Técnicas de ensayo no destructivas en madera estructural mediante la extracción de tornillos*. En IV Congreso Nacional de Protección de la Madera, 16-17 junio 2005. San Sebastián, España.
- CENTRE TECHNIQUE DU BOIS ET DE L'AMEUBLEMENT, CTBA (1984) *Principaux singularités et altérations des bois sur pied ou abattus*. CTBA. París, Francia.
- CHEW, Weng (1995) *Waves and fields in inhomogeneous media*. University of Illinois Urbana-Champaign, The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc. United States of America.
- CIUFFARDI, Verónica (1987) *Evaluación de la susceptibilidad del pepino dulce (Solanum muricatum Ait.) a distintos insecticidas y acaricidas en condiciones de campo*. Tesis de grado, Universidad Católica de Valparaíso, Facultad de Agronomía, Departamento de Horticultura. Quillota, Chile.

- COCA, Pedro; Juan ROSIQUE (2003) *Ciencia de materiales, teoría, ensayos, tratamientos*. Ediciones Pirámide, Grupo Anaya. Madrid, España.
- CONDE GARCÍA, M.; J. I. FERNÁNDEZ-GOLFÍN SECO; E. HERMOSO PRIETO (2007) *Mejora de la predicción de la resistencia y rigidez de la madera estructural con el método de ultrasonidos combinado con parámetros de clasificación visual*. En *Materiales de Construcción* Vol. 57, 288, 49-59 octubre-diciembre 2007.
- COQUILLAT, Fernando (1991) *Estadística Descriptiva, Metodología y cálculo*. Editorial Tebar Flores. Albacete, España.
- COST ACTION E44 – E49 (2006) *Wood resources and panel properties*. En *Conference Proceedings*. Valencia, España.
- CROMER, Alan (1996) *Física para las ciencias de la vida*. Segunda edición, Editorial Reverté, S.A. Barcelona, España.
- CUTLER, David; Ted BOTHA; Dennis STEVENSON (2008) *Plant anatomy an applied approach*. Blackwell. Reino Unido.
- CZICHOS Horst; Saito TETSUYA; Smith LESLIE (Eds.) (2006) *Springer Handbook of Materials Measurement Methods*. Springer. Würzburg, Germany.
- DARREL, Nicholas (Ed) (1973), *Wood deterioration and its preservation by preservative treatments. Vol II*. En *Preservatives and preservation systems*. Syracuse University Press. New York, United States of America.

- DE LA ROSA, Raúl (2002) *Contaminación electromagnética, las radiaciones y sus efectos sobre la salud*. Terapion. Valencia, España.
- DE LA TORRE, L.; P. MURIEL; H. BALSLEV (2006) *Etnobotánica en los Andes del Ecuador*. En Botánica Económica de los Andes Centrales. M. MORAES; B. ØLLGAARD; L. P. KVIST; F. BORCHSENIUS; H. BALSLEV. Universidad Mayor de San Andrés. La Paz, Bolivia. 2006: 246-267.
- DESCAMPS, F. (1994); *La Loma Grande y la Plaza de Santo Domingo*; Proyecto de Cooperación técnica Ecuatoriano - Belga - Ediciones Librimundi; s/l.
- DIEZ, R.; J.I. FERNÁNDEZ-GOLFÍN (1997) "Influencia de diversos factores en la calidad de la madera de uso estructural de *P. sylvestris* L". Sistemas y recursos forestales, volumen 7, No 1-2.
- DÍEZ, R.; M. CONDE; J.I. FERNÁNDEZ-GOLFÍN; S. ROSSKOPF (2000) "Clasificación visual de madera estructural de pino laricio (*Pinus nigra* arn.): comparación de resultados usando las normas UNE 56.544 Y DIN 4074". Sistemas y recursos forestales, volumen 9, No 2.
- DOMINGO, José (2008) "Análisis no destructivo en proyectos de rehabilitación de estructuras de madera". Proyecto fin de carrera Universidad Politécnica de Valencia, Escuela Técnica Superior de Ingenieros Agrónomos. Valencia, España.
- ELLIS, Lisa; Arlen, HEGINBOTHAM (2004) *An Evaluation of Four Barrier-Coating and Epoxy Combinations in the Structural Repair of*

*Wooden Objects*. En Journal of the American Institute for Conservation Vol. 43, No. 1 (Spring, 2004). Published by: The American Institute for Conservation of Historic & Artistic Works.

ESTEBAN, Miguel; Ramón ARGÜELLES; Francisco ARRIAGA; Guillermo ÍÑIGUEZ; Ignacio BOBADILLA (2007) *Estado actual de la investigación sobre madera estructural en España*. En Informes de la Construcción Vol. 59, 506. Abril-junio 2007.

EVERT, Ray (2006) *Esav's plant anatomy, meristems, cells and tissues of the plant body, their structure, function and development*. John Wiley & Sons, Inc. Hoboken, USA.

FELLER, Robert (1994) *Aspects of Chemical Research in Conservation: The Deterioration Process*. The Journal of the American Institute for Conservation, Vol. 33, No. 2. Papers from the Conservation Research and Technical Studies Update Session and the General Session on Collections in Historic Buildings of the 21st Annual Meeting of the American Institute for Conservation of Historic and Artistic Works. Denver, Colorado, May 31-June 6, 1993. The American Institute for Conservation of Historic & Artistic Works.

FENGEL, Dietrich; Gerd WEGENER (2003) *Wood, chemistry, ultra structure, reactions*. Verlag Kessel. München, Alemania.

FERNÁNDEZ, Diana; Piedad VILLACRÉS; Marco CERNA (2000) *Diversidad vegetal del volcán Atacazo*. En La botánica en el nuevo milenio, Resúmenes del Tercer Congreso Ecuatoriano de Botánica. Quito, Octubre 25 al 27 del 2000.

- FERNÁNDEZ-GOLFÍN, Juan, Rafael DÍEZ; Eva HERMOSO (2007) *Análisis y estado del arte de la técnica de clasificación mecánica por máquina de la madera aserrada estructural*. Revisión Laboratorio de Estructuras. CIFOR-INIA. Madrid, España.
- FERNÁNDEZ-GOLFÍN, Juan; Rafael DÍEZ; M. BAONZA; A. GUTIÉRREZ; Eva HERMOSO; M. CONDE; V. VAN DEN EYNDE (1998) *Caracterización de la calidad y las propiedades de la madera de Pino Laricio (Pinus nigra Arn. Salzmannii)*. Centro de Investigación Forestal (CIFOR-INIA). Madrid, España.
- FLETCHER, Neville; Thomas, ROSSING (1998) *The physics of musical instruments*. Springer. United States of America.
- FONT QUER, P. (Ed.) (1973) *Diccionario de botánica*, Editorial Labor, S.A., Barcelona, España.
- FRENCH, Anthony (1988) *Vibraciones y ondas*. Editorial Reverté S.A. Barcelona, España.
- GACETA MUNICIPAL (1984); *Ordenanza municipal N° 2342*; Consejo Municipal de Quito; Quito, Ecuador.
- GARCÍA, Alfonso (2008) *Estadística aplicada: conceptos básicos*. Universidad Nacional de Educación a Distancia. Madrid, España.
- GARCÍA, L.; A. GUINDEO; C. PERAZA; P. DE PALACIOS (2003) *La madera y su anatomía*, Fundación Conde del Valles de Salazar, Ediciones Mundi – Prensa, AiTiM. Madrid, España.
- GEMBLOUX STATION DE TECHNOLOGIE FORESTIÈRE (s/f) *Etude comparative de deux methodes de determination du module*

*d'elasticite du bois et de ses derives*. GEMBLOUX STATION DE TECHNOLOGIE FORESTIÈRE. Francia.

GIACHI, Gianna; Bettazzi FRANCESCA; Stefano CHIMICHI; Giuseppe STACCIOLI (2003) *Chemical characterisation of degraded wood in ships discovered in a recent excavation of the etruscan and roman harbour of Pisa*. En *Journal of cultural heritage*, 4(2), 75-83.

GÓMEZ, L. (2000) *La restauración; examen científico aplicado a la conservación de obras de arte*. Cátedra. Madrid, España.

GÓMEZ, Rafael (2008) *Aplicación del radar de penetración en tierra (Georadar) a la exploración no destructiva de yacimientos arqueológicos*. <http://maxwell.ugr.es/ProyectoRaf/final2-babel-spanish.pdf>

GÖRLACHER, R. (1984) *Ein neues Meßverfahren zur Bestimmung des Elastizitätsmoduls von Holz*. En *European Journal of Wood and Wood Products*. Springer Berlin / Heidelberg. Volume 42, Number 6 / junio de 1984. 219-222

GRAFIÁ José (2005) *"Imaginería de la Semana Santa Marinera de Valencia. El paso de la Crucifixión del Señor"* Tesis doctoral, Universidad Politécnica de Valencia. Valencia, España.

GRATTAN. D., Robert BARCLAY (1988) *A Study of Gap-Fillers for Wooden Objects, Studies in Conservation*, Vol. 33, No. 2 (May, 1988), pp. 71-86, The American Institute for Conservation of Historic & Artistic Works.

- GRUNDSTRÖM, Fredrik (1998) *Non-destructive testing of particleboard with ultra sound and eigen frequency methods*. Master's thesis. Master of Science programme in Mechanical Engineering Wood Technology, Institutionen i Skelleftea / Skelleftea Campus. Finlandia.
- GUERRA, Patricio (2004) *Investigación histórica*. En Estudios para la Restauración y Consolidación del artesanado, cubiertas, y cúpulas de la Iglesia de San Francisco. Trabajo no publicado. Quito, Ecuador.
- HERMOSO, Eva; J. CARBALLO; Juan FERNÁNDEZ (2007) *Caracterización estructural de la maderas de Pinus radiata D. Don del País Vasco (España) acorde a las modificaciones normativas*. En Maderas, ciencia y tecnología, septiembre, año/vol. 9, número 003. Universidad del Bio-Bio. Concepción, Chile.
- HERMOSO, Eva; Juan Fernández-Golfín; Rafael DÍEZ; Rafael MIER PÉREZ (2007) *Aplicación de los ultrasonidos a la evaluación de las propiedades mecánicas de la madera en rollo de pequeño diámetro*. Informes de la Construcción, Vol. 59, 506. Abril-junio 2007.
- HERNÁNDEZ, Roberto; FERNÁNDEZ Lucio; BAPTISTA Pilar (1991) *Metodología de la Investigación*; McGraw-Hill Interamericana de México, S.A. de C.V.; Naucalpán de Juárez, México.
- HOFFMANN, Per (2007) comunicación personal.
- HOFFMANN, Per; Robert BLANCHETTE (1997) *The conservation of a fossil tree trunk*. En Studies in conservation 42 (2): 74-82.

- HOLEMES-SEDLER, Andrew; Len ADAMS (2006) *Handbook of radiation effects*. Second edition. Oxford University Press. Gran Bretaña.
- HORIE, Charles (2000) *Materials for Conservation. Organic consolidants, adhesives and coatings*. Butterworth - Heinemann. Series in conservation and museology. Great Britain.
- INSTITUTO NACIONAL DE INVESTIGACIONES AGRARIAS, INIA-OIMT (1996) *Manual de identificación de especies forestales de la subregión andina*. Proyecto PD150/91 Rev.1 (I) "Identificación y Nomenclatura de las Maderas Tropicales Comerciales en la Subregión Andina" Acuerdo INIA-OIMT, Perú.
- INSTITUTO NACIONAL FORESTAL DE ÁREAS NATURALES Y VIDA SILVESTRE (INEFAN) - FUNDACIÓN ANTISANA Proyecto SUBIR II (USAID/TNC) Proyecto INEFAN/GE (1998) *Plan de manejo de la reserva ecológica Cayambe Coca compilación técnica - científica de los recursos naturales y aspectos socioeconómico de la Recay*. Quito, Ecuador.
- ÍÑIGUEZ, Guillermo (2007) *Clasificación mediante técnicas no destructivas e evaluación de las propiedades mecánicas de la madera aserrada de coníferas de gran escuadría para uso estructural*. Tesis doctoral. Universidad Politécnica de Madrid. Madrid, España.
- ÍÑIGUEZ, Guillermo; Francisco ARRIAGA; Miguel ESTEBAN; Ramón ARGÜELLES (2007) *Los métodos de vibración como herramienta no destructiva para la estimación de las propiedades resistentes de la madera aserrada estructural*. En Informes de la Construcción Vol. 59, 506, 97-105, abril-junio 2007.

- KAISERLIK, J. (1978) *Non-destructive methods to predict effect of degradation on wood: a critical assessment*. En Materials Engineer Forest Products Laboratory. Forest Service U.S. Department of Agriculture, Final Report. United States of America.
- KANDEMIR, Yucel; A. A. TAVUKCUOGLU; E.N. CANER-SALTIK (2007) *In situ assessment of structural timber elements of a historic building by infrared thermography and ultrasonic velocity*. En *Infrared Physics & Technology* 49 (2007) 243–248, [www.elsevier.com/locate/infrared](http://www.elsevier.com/locate/infrared).
- KAYE, Barry; David COLE-HAMILTON; Kathryn MORPHET (2000) *Supercritical drying: a new method for conserving waterlogged archaeological materials*. En *Studies in conservation* 45 (4): 233-52.
- KING, Edmund (1988) *The use of resin (polymer) products in the repair and conservation of buildings*. En *Practical Building Conservation*. English Heritage Technical Handbook, Volume 5, Gower Technical Press, Inglaterra.
- KINSLER, Lawrence; Austin, FREY; Alan, COPPENS; James, SANDERS (1982) *Fundamentals of acoustics*. John Wiley & Sons. United States of America.
- KOLLMAN, F; W. Côté (1968) *Principles of wood science and technology*, Vol. 1 Solid Wood. Springer – Verlag. Berlin, Heidelberg New York.

- KRABBENHOFT, Kristian; Lars DAMKILDE (2004) *Double porosity models for the description of water infiltration in wood*. En *Wood Sci Technol* (2004) 38: 641–659 DOI 10.1007/s00226-004-0253-5 Springer-Verlag 2004.
- KRAUTKRÄMER, Josef; Herbert, KRAUTKRÄMER (1990) *Ultrasonic Testing of Materials*. Springer – Verlag. Berlín, Alemania.
- KUTTRUFF, Heinrich (1991) *Ultrasonics, fundamentals and applications, Elsevier Applied Science*. Reino Unido.
- LARREA, José; Marta CORDERO (2007) *Estadística, 45 problemas útiles*. García Moroto (Eds.). Madrid, España.
- LINETTE, Salvo; Rubén ANANIAS; Alain CLOUTIER. *Influencia de la estructura anatómica en la permeabilidad específica transversal al gas del pino radiata*. En *Maderas, Ciencia, Tecnología*. [online]. 2004, vol.6, no.1 [citado 06 Noviembre 2007], p.33-44. Disponible en la World Wide Web: <[http://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0718-221X2004000100003&lng=es&nrm=iso](http://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0718-221X2004000100003&lng=es&nrm=iso)>. ISSN 0718-221X.
- LIOTTA, Giovanni (2000) “*Los insectos y sus daños en la madera: problemas de restauración*”. Editorial NEREA, S.A. España.
- LIVINGSTON, Richard (2001) “*Non-destructive Testing of Historic Structures*” *Archives and Museum Informatics* 13: 249–271, 1999/2001. © 2001 Kluwer Academic Publishers. Printed in the Netherlands.
- MACARRÓN, Ana (1997) *Historia de la conservación y la restauración*. Tecnos. Madrid, España.

- MACCHIONI, N. (2002) *Physical characteristics of the wood from the excavations of the ancient port of Pisa*. En *The Journal of Cultural Heritage*, Elsevier. [www.elsevier.com/locate/culher](http://www.elsevier.com/locate/culher).
- MACHEK, L.; H.MILITZ; R. SIERRA-ALVAREZ (1998) *A dynamic approach to assess the modulus of elasticity in wood decay testing*. The International Research Group on Wood Preservation, Section 2, 29th Annual Meeting. Maastricht, the Netherlands.
- MACHEK, L.; H.MILITZ; R. SIERRA-ALVAREZ (2001) *The use of an acoustic technique to assess wood decay in laboratory soil-bed tests*. En *Wood Science and Technology* 34 (2001) 467-472. Springer-Verlag.
- MACHUCA, R.; M. Fuentes; A. CAMPOS (2006) *Absorción de soluciones preservantes de nueve especies de maderas, mediante procesos de impregnación a vacío - presión e inmersión*. En *Revista Chapingo. Serie ciencias forestales y del ambiente* [en línea] 2006, 12 (001):[fecha de consulta: 07 de noviembre de 2007] Disponible en: <http://redalyc.uaemex.mx/redalyc/src/inicio/ArtPdfRed.jsp?iCve=62912108> ISSN 0186-3231.
- MARTIN, Jorge (1994) *Applications of science in the analysis, conservation, and interpretation of works of art*. En *Altered States. Conservation, Analysis, and the interpretation of Words of Art*. The trustees of Mount Holyoke Collage.
- MARTÍN, Jorge (2004) *Análisis el subsuelo utilizando técnicas geofísicas; Sistema Georadar Ramac/GPR*. En VIII Congreso Nacional de Topografía y Cartografía TOPCART, Madrid, 19-22 octubre 2004.

MARTÍNEZ, Guillermo (2009) comunicación personal.

MONTESINOS, José (2008) *El Salón Dorado de la Torre Vella del Palau de la Generalitat. Propuesta de técnicas de diagnóstico no destructivas en la madera tallada y policromada del artesanado*. Trabajo de fin de carrera. Recurso electrónico-CD-ROM, Universidad Politécnica de Valencia. Valencia, España.

MORGAN, David (1994) *A handbook for EMC testing and measurement*. Peter Peregrinus Ltd. United Kingdom.

NAKHLA, Shawki (1986) *A comparative study of resins for the consolidation of wooden objects*. En *Studies in conservation*, 31, 38-44.

O'NEILL, Hugo (2004) *Estimación de la calidad de la madera producida en el Uruguay para uso estructural y su evaluación en servicio por métodos no destructivos*. En *Notas Técnicas*, Departamento de Proyectos Forestales, Nota Técnica N°4, Noviembre 2004.

OLIVER-VILLANUEVA, José Vicente (1993) *Holzeigenschaften der Esche (*Fraxinus excelsior* L.) und ihre Variabilität im Hinblick auf Alter und Standraum*. Tesis de grado, Forstliche Fakultät der Georg-August-Universität. Cuvillier Verlag. Göttingen, Germany.

OLIVER-VILLANUEVA, José Vicente (2009) comunicación personal.

PALAIA, Liliana (1998) *Metodología de inspección y diagnóstico de elementos estructurales de madera*. En Seminario "La conservación de la madera en edificios antiguos", Publicación Universidad Politécnica de Valencia. Valencia, España.

- PARDO, Antonio; Miguel RUIZ (2005) *Análisis de datos con SPSS 13 Base*. McGraw-Hill/Interamericana de España S.A.U. Madrid España.
- PÉREZ, Eva (2006) "*Estudio técnico y conservativo del retablo barroco valenciano aplicado al desarrollo de nuevos métodos de desinsectación de la madera*". Tesis doctoral , Universidad Politécnica de Valencia. Valencia, España
- PÉREZ, María de la Vega (2001) *Radar de subsuelo. Evaluación para aplicaciones en arqueología y en patrimonio histórico-artístico*. <http://www.tesisenred.net/TDX-1031101-082820>. Universidad Politécnica de Catalunya, España.
- PETRONIO, M. (1966) *Propiedades, pruebas, especificaciones y diseños de los adhesivos*, En Manual de los adhesivos, Compañía Editorial Continental S.A., México D.F., México.
- PICARD, Miguel (1994) *Contribución al estudio de la propagación sonora en materiales acústicos de estructura elástica fibrosa*. Tesis Universidad Politécnica de Valencia. Valencia, España.
- PIZZO, B; G. RIZZO; P. LAVISCI (2002) "*Comparison of thermal expansion of wood and epoxy adhesives*". Holz als Roh- und Werkstoff, 60(4), 285-290.
- POPESCU, C.M.; Y. SAKATA; M.C. POPESCU; A. OSAKA; C. VASILE (2005) "*Degradation of lime wood painting supports*". e-presevationscience – Morana-rtd.
- QUER, M.; José Vicente OLIVER-VILLANUEVA; F.N. Becker (1995) *Zerstörungsfreies Qualitätskontrollverfahren für die Produktion*

dynamisch beanspruchter. Werkzeugstiele. Holz als Roh- und Werkstoff, 1995 (53) 229 – 235. München, Germany.

RAMÓN, Gemma; Alfonso BASTERRA; Milagros CASADO; Luis ACUÑA (2005) *Análisis de las técnicas de diagnóstico de madera estructural en edificios existentes y propuesta de integración orientada al proyecto*. En I Jornadas de investigación en construcción, Actas de las Jornadas, Tomo I. Instituto de Ciencias de la Construcción "Eduardo Torroja", Consejo Superior de Investigaciones Científicas. España.

RANDALL, Robert (2005) *An introduction to acoustics*. Dover publications. New York, United States of America.

RAYNER, C (1978) *Adhesivos orgánicos sintéticos*. En Adherencia y aditivos, vol. 1, Houwink, R. Salomon, G. Editores, Urmo SA de Ediciones, Barcelona España.

ROCHETTE, P. (1964) "*Le bois, sa structure, ses propriétés, ses utilisations*". Dunod, Paris Francia.

RODRÍGUEZ, José (1998) *Patología de la madera*. Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Montes – Fundación Conde del Valles de Salazar. Ediciones Mundi-Prensa, s/l. España.

RODRÍGUEZ, José; Francisco ARRIAGA (1989) *Rehabilitación, consolidación y tratamiento*. En Curso de construcción en madera, estructuras mixtas, rehabilitación y carpintería. Servicio de publicaciones del Colegio Oficial de Arquitectos de Madrid.

RODRÍGUEZ, Ramón (2004) *Investigación, diagnóstico y anteproyecto de instalaciones hidrosanitarias* En Estudios para la Restauración

y Consolidación del artesanado, cubiertas, y cúpulas de la Iglesia de San Francisco, trabajo no publicado.

ROSSING, Thomas (1990) *The Science of Sound*. Addison-Wesley Publishing Company. United States of America.

RUZIN, Steven (1999) *Plant microtechnique and microscopy*. Oxford University Press, United States of America.

SAKUNO Tomoyasu; Arno P. SCHNIEWIND (1990) "Adhesive Qualities of Consolidants for Deteriorated Wood". En Journal of the American Institute for Conservation, Vol. 29, No. 1 (Spring, 1990), pp. 33-44; The American Institute for Conservation of Historic & Artistic Works; Stable URL: <http://www.jstor.org/stable/3179589>

SALOMON, G., 1978, *Adherencia*, in Adherencia y aditivos, vol. 1, Houwink, R. Salomon, G. Editores, Urmo SA de Ediciones, Barcelona España.

SAN ANDRÉS, Margarita (1990) *Aplicación de resinas sintéticas en la conservación y restauración de obras de arte*, Universidad Complutense de Madrid. Madrid, España.

SANTANDER, Diego (2004) *Investigación Diagnóstico y anteproyecto*. En Estudios para la Restauración y Consolidación del artesanado, cubiertas, y cúpulas de la Iglesia de San Francisco, trabajo no publicado.

SCHNIEWIND, Arno (1995) *Consolidation of Wooden Panels*. En The Structural Conservation of panel paintings. Dardes Kathleen, Rothe Andrea (Eds). Proceedings of a Symposium at the J. Paul Getty Museum, 24- 28 April 1995: 87 – 107, Los Angeles USA.

- SCHNIEWIND, Arno; Peter EASTMAN (1994) *Consolidant distribution in deteriorated wood treated with soluble resins*. En Journal of The American Institute for Conservation, JAIC 1994, Volume 33, Number 3, Article 2 (pp. 247 to 255).
- SEASE, Catherine (1981) THE CASE AGAINST USING SOLUBLE NYLON IN CONSERVATION WORK. En Studies in conservation, 26 (1981) International Institute for Conservation of Historic and Artistic Works. 6 Buckingham St., London WC2N 6BA, United Kingdom.
- SEAVEY, Kevin, Wolfgang GLASSER (2001) *Continuous cellulose fiber-reinforced cellulose ester composites. ii. fiber surface modification and consolidation conditions*. Cellulose, 8(2), 161-169.
- SELLERS, Terry (1985) *Plywood and Adhesives Technology*. Forest Products Utilization Laboratory – Mississippi State University. Marcel Dekker, Inc. New York, United States of America.
- SERVICIO ECUATORIANO DE CAPACITACIÓN PROFESIONAL (s/f) *Manual de tecnología de la carpintería*. Servicio Ecuatoriano de Capacitación Profesional, SECAP. Quito, Ecuador.
- Shawn M. Carlson and Arno P. Schniewind (1990) "Residual Solvents in Wood-Consolidant Composites". En Studies in Conservation, Vol. 35, No. 1 (Feb., 1990), pp. 26-32; International Institute for Conservation of Historic and Artistic Works; Stable URL: <http://www.jstor.org/stable/1506279>
- SOLER, M. (2001) *Mil maderas*. Universidad Politécnica de Valencia. Valencia, España.

- SPANNER, J. C. (1979) *Acoustic Emission - Some Examples of Increasing Industrial Maturity*. En *Acoustic Emission Monitoring of Pressurized Systems*, ASTM STP 697. W.F. Hartman; J.W. McElroy (Eds). American Society for Testing and Materials, pg. 2-34.
- SPIEGEL, Murray (1988) *Estadística*. Segunda edición, McGraw-Hill, Inc. Madrid, España.
- SPIRYDOWICZ, KE; SIMPSON, E; BLANCHETTE, R.A. (2001). *Alvar and butvar: The use of polyvinyl acetal resins for the treatment of the wooden artifacts from Gordion, Turkey*. En *Journal of the American Institute for Conservation*, 40(1), 43-57.
- SPIRYDOWICZ, Krysia E.; Elizabeth SIMPSON; Robert A. BLANCHETTE; Arno P. SCHNIEWIND; Mauray K. TOUTLOFF; Alison MURRAY (2001) "*Alvar and Butvar: The Use of Polyvinyl Acetal Resins for the Treatment of the Wooden Artifacts from Gordion, Turkey*" En *Journal of the American Institute for Conservation*, Vol. 40, No. 1; The American Institute for Conservation of Historic & Artistic Works; Stable URL: <http://www.jstor.org/stable/3180012>
- TALLAND, Valentine. *Historic interiors - conservation, restoration and reconstruction: proceedings, Fifth International Symposium on Wood and Furniture Conservation* [ed. by] Paul van Dun, Dominique van Loosdrecht, David Wheeler. *Journal of the American Institute for Conservation*
- TANAKA, Toshinari; Ferenc DIVÓS (2001) *Wood inspection by thermography*. En *12th International Symposium on Non-*

destructive Testing of Wood, NDT.net – March 2001, Vol. 6, No.03.

THE FOREST PRODUCTS LABORATORY; FOREST SERVICE, U. S.; DEPARTMENT OF AGRICULTURA (1955) *Wood Handbook. Basic information on wood as a material of construction with data for its use in design and specification*. Washington, D.C., U.S.A.

TIITTA, Markku (2006) *Non-destructive methods for characterisation of wood material*. Kuopio University, Publications C. Natural and Environmental Sciences 202. 2006. 70p.

TOBAR, Galo (2008) comunicación personal.

TRIOLA, M. (2004) *Probabilidad y estadística*. Pearson Educación. México D.F., México.

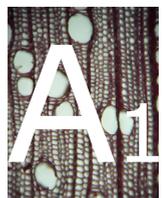
ULABY, Fawwaz (2007) *Fundamentos de aplicaciones en electromagnetismo*. Quinta edición, Pearson Prentice Hall. México.

URTUBEY, Edgardo; Ricardo, SCHIAVA; Guillermo ETSE (2003) *Simulación numérica de la propagación de una onda ultrasónica a través de un sólido elastoplástico – evaluación de daño Mecánica Computacional*. Vol. XXII. Rosales, M.B.; V.H., Cortínez; D.V., Bambill (Eds.). Bahía Blanca, Argentina, Noviembre 2003.

VEGA, Héctor (2004) (Coordinador) *Estudios para la restauración y consolidación del artesanado, cubierta y cúpulas de la iglesia de San Francisco*. FONSAI, Municipio del Distrito Metropolitano de Quito. Quito, Ecuador.

- VIGNOTE, Santiago; Isaac, MARTÍNEZ (2006) *Tecnología de la madera*. Ediciones Mundi-Prensa. Madrid, España.
- VISCARRA, S. (1998) *Guía para el secado de la madera en hornos*. Documento Técnico 69/1998, USAID/Bolivia.
- VIVANCOS, Victoria (1995) *La investigación sobre la obra pictórica de Vicente López: factor fundamental para su conservación y restauración*. Tesis doctoral, Universidad Politécnica de Valencia. Valencia, España.
- VIVANCOS, Victoria (2007); *LA CONSERVCIÓN Y RESTAURACIÓN DE PINTURA SOBRE TABLA, PINTRA SOBRE TABLA*; Tecnos; Madrid, España.
- VIVES, A. (2005) *Acumulation of elements in annual tree rings measured by synchrotron x-ray fluorescence análisis*". En X-Ray Spectrometry; 34:411-416.
- WANG, Y.; Arno SCHNIEWIND (1985) *Consolidation of deteriorated wood with soluble resins*. En Journal of The American Institute for Conservation, JAIC 1985, Volume 24, Number 2, Article 3 (pp. 77 to 91).
- WARD, P. (1986) *La conservación del patrimonio: carrera contra reloj*. The Getty Conservation Institute. Mariana del Rey CA, U.S.A.
- WEINREICH, G. (1995) *Vibration and Radiation of structures with Application to String and Percussion Instruments*. En Mechanics of Musical Instruments. A. Hirschberg, j. Kergomard, G. Weinreich (Eds). Springer – Verlag. New York.

YILDIZ, U. (2005) *Mechanical properties and decay resistance of wood-polymer composites prepared from fast growing species in Turkey*. En *Bioresource Technology*. Elsevier. [www.sciencedirect.com](http://www.sciencedirect.com)





## **9. ANEXO 1.**

PENETRABILIDAD Y DISTRIBUCIÓN DE DOS RESINAS TERMOPLÁSTICAS EMPLEADAS EN LA CONSOLIDACIÓN DE MADERA SEVERAMENTE DETERIORADA; EL CASO DE LAS TABLAS Y TABLAZÓN DEL CIELO RASO BARROCO Y ARTESONADOS DE LA IGLESIA DE SAN FRANCISCO EN QUITO, ECUADOR. (Benítez, J. 2009)

### RESUMEN.

La presente investigación se planteó para solventar el problema que implica establecer el nivel de penetración y la distribución de resinas termoplásticas en maderas severamente deterioradas.

El caso concreto estudiado fue la consolidación de las tablas del cielo raso barroco y tablazón de los artesonados originales de la Iglesia de San Francisco, en Quito, Ecuador.

Se analizó la penetrabilidad y la distribución de dos resinas termoplásticas comercializadas en Ecuador y usualmente empleadas para consolidar madera: a.- (poli) etil metacrilato / metilacrilato, P(EMA/MA); y, b.- (poli) vinil butiral, PVB.

Para determinar las proporciones más adecuadas de aplicación, se importó material lignario perteneciente probablemente al artesonado original de la nave central; esto permitió trabajar con maderas de características similares: especie, período, nivel de deterioro.

La metodología seguida se basó la revisión bibliografía especializada, determinación de variables del estudio y la realización de experimentos específicos para cumplir con los objetivos del estudio.

Tanto para las tablas del cielo raso como para la tablazón de los artesonados indicados, los mejores resultados se obtendrían con proporciones mayores a las usualmente empleadas, al ser mayor el porcentaje, mayor será la cantidad de resina que se fija en la madera y en consecuencia, mejor el resultado del tratamiento.

## 1.- INTRODUCCIÓN.

### GENERALIDADES, PROBLEMA IDENTIFICADO, OBJETIVOS DE ESTUDIO.

La penetración y la difusión son dos fenómenos físicos, íntimamente ligados, que se producen en el momento de impregnar cualquier material poroso con un líquido que sea capaz de mojarlo. Ambos fenómenos también son observados en el campo de la conservación – restauración de bienes patrimoniales, por ejemplo en el momento de efectuar la consolidación de madera severamente deteriorada.

En el caso de bienes muebles patrimoniales, se entiende de forma genérica que la consolidación de la madera pretende cohesionar y otorgar firmeza a material leñoso deteriorado, digerido o degradado, aplicando para esto una resina. Una adecuada cohesión se consigue únicamente cuando la resina penetra en la mayoría de espacios existentes y en cantidad suficiente como para formar un conglomerado con la madera.

Sin embargo, cuanto más compenetrados se encuentren madera y resina, mayor será la incidencia de las propiedades del polímero sobre la madera, llegando a provocar daños irreversibles en el objeto.

Debido a que la resina debe penetrar en la mayor cantidad de espacios posibles y ligarse íntimamente con el tejido leñoso, se considera a la consolidación como un nivel de intervención profundo y de última instancia, que debe ser realizado únicamente cuando el objeto presenta un deterioro tal que ningún otro sistema puede garantizar su estabilidad. De hecho, Schniewind (1995) indica que el deterioro que presenta el objeto es tan severo que el intentar retirar las resinas aplicadas sometería al objeto a un riesgo aún mayor.

En consecuencia, si el tratamiento se realiza sabiendo que la eliminación de la resina provocará mayor daño, resulta que la consolidación es en realidad un tratamiento irreversible.

Por este motivo, después de haber determinado la real necesidad de consolidar un objeto de madera, es necesario plantear la resina y concentración adecuadas para obtener una penetración y una distribución convenientes en función de las características físicas y químicas tanto del objeto como de las posibles resinas a emplear, la metodología, proceso de aplicación y de los requisitos funcionales del objeto.

En vista de esto, cuando se decide realizar la consolidación, ésta debería comprender un único tratamiento, preciso y efectivo para lo cual resulta importante determinar el nivel de penetración y difusión de las soluciones que se puedan emplear.

Así pues, los conservadores - restauradores se encuentran con frecuencia con el problema de establecer la proporción adecuada de resina para que exista una máxima penetración y una máxima cantidad de resina depositada en el interior de la madera, que permita al objeto sustentarse por si mismo y facilite su transporte y manipulación, pero sin llegar a alterarlo de tal modo que sea la resina la causa de su colapso.

Este problema no solo se manifiesta como dilema en cuanto a la proporción más conveniente, sino también como incertidumbre sobre el resultado del tratamiento de consolidación y como variaciones en los presupuestos de intervención.

De hecho, varios casos de consolidación de maderas han sido poco efectivos ya sea porque las concentraciones han sido: o muy altas o muy bajas.

En este sentido, un caso interesante son los artesanados y cielo raso barroco de la iglesia de San Francisco, en Quito, Ecuador, donde la superficie total de elementos no estructurales (tablas y tablazón) que se estimó necesaria su consolidación fue de aproximadamente 250m<sup>2</sup>; tan amplia superficie obligó a:

- Determinar de forma efectiva la penetración de dos resinas termoplásticas.
- Explicar la distribución de las resinas después de la consolidación.
- Establecer las concentraciones de resina más adecuadas para el caso en estudio.

## 2.- DESARROLLO DE LA EXPERIMENTACIÓN.

La fase experimental de esta investigación se desarrolló en torno a las siguientes etapas:

- 1- Selección de la madera e importación.
- 2- Determinación de los factores y tratamientos que conformaron el estudio y diseño experimental.
- 3- Procesos de consolidación de probetas y evaporación de solventes; incremento de masas.
- 4- Análisis estadístico de la variación de masa.
- 5- Análisis estadístico de la distribución de resinas.

### 2.1.- SELECCIÓN E IMPORTACIÓN DE LA MADERA.

Para la realización de los ensayos, se importó desde la República del Ecuador material lignario proveniente del cielo raso barroco de la iglesia de San Francisco. Se tomó esta opción para que los ensayos se realizaran con madera de la misma especie y con similares alteraciones que aquella de los artesonados y cielo raso barroco de la iglesia indicada, por lo que los resultados obtenidos podrían ser directamente aplicables a los trabajos de consolidación de los artesonados y cielo raso barrocos de la misma iglesia.

Las probetas empleadas en el estudio se extrajeron de una única pieza de madera que se encontraba colocada de canto y apoyado sobre el estribo en el muro norte de la nave central y a 5,46m, desde su eje, del arco toral que separa la nave central del crucero. Al ser probetas de una misma pieza de madera se reducen de forma considerable variaciones en alguna de las características de la madera como la densidad y el módulo de elasticidad, que intervienen en el presente estudio.

Este elemento (f) constituyó parte de la cubierta instalada entre 1755 y 1756 durante las obras de reconstrucción de la iglesia y convento franciscanos, destruidos parcialmente durante el terremoto del 26 de abril de 1755. Esta deducción se planteó porque dicho elemento, y 32 más, estaban colocados a un mismo nivel sobre los dos muros longitudinales de la iglesia e inmediatamente debajo de la cubierta

actual colocada en 1869 (c) y sobre el cielo raso (d) de 1770. (Guerra, P., 2004; Santander, D., 2004)

Dicho elemento tenía una longitud de 850mm y una sección rectangular de 110 x 240mm, más o menos uniforme a lo largo de la pieza.

La extracción del mencionado elemento fue autorizada por los Coordinadores Técnicos del FONSA<sup>72</sup>, Arquitectos Héctor Vega y Jesús Loor. Y fue dirigida por el Coordinador del Proyecto de Conservación y restauración de los artesonados y cúpulas de la iglesia de San Francisco, Arquitecto Héctor Vega.

La salida de esta pieza al igual que otros elementos leñosos destinados para esta investigación, fue autorizada por el Instituto Nacional de Patrimonio Cultural (Ecuador) después de identificarlos como objetos susceptibles de salir del país con fines de estudio e investigación conforme los estipulan las Leyes de Patrimonio Cultural y de Aduanas (de Ecuador).

Previo la exportación de la República de Ecuador, estas piezas fueron sometidas a los tratamientos pertinentes de protección fitosanitaria exigidos por la Corporación Aduanera Ecuatoriana y el Servicio Ecuatoriano de Sanidad Agropecuaria, según la Norma Internacional NIMF N°15 y la Resolución N°12 para la aplicación de tratamientos de embalajes de madera para comercio exterior.

## 2.2.- FACTORES EN ESTUDIO, TRATAMIENTOS Y DISEÑO EXPERIMENTAL.

### 2.2.1.- FACTORES EN ESTUDIO.

Los factores o variables independientes que intervinieron en el estudio fueron:

- Resina.
- Concentración de la solución.
- Presión de aplicación.

---

<sup>72</sup> FONSA: Fondo de Salvamento, organismo municipal creado con el objetivo de gestionar fondos municipales para invertirlos en la conservación y restauración de bienes culturales (muebles e inmuebles) del cantón de su jurisdicción.

Otros factores que se debe tener en cuenta son la especie de madera y el nivel de deterioro, sin embargo, como sus valores son constantes para el presente estudio, no se ha tomado en cuenta su efecto.

#### 2.2.1.1.- RESINA EMPLEADA.

Esta variable podía tomar dos valores:

R1: P(EMA/MA), poli etil metacrilato / metilacrilato, y,

R2: PVB, poli vinil butiral.

Ambas resinas sintéticas termoplásticas<sup>73</sup> de naturaleza orgánica han sido indicados por Schniewind (1995) como las más apropiadas para la consolidación de madera atacada por organismos xilófagos.

La primera resina es un copolímero de etil metacrilato y metil acrilato – P(EMA/MA), en esta investigación se empleó Paraloid B72, producida por Rhom & Hass. Mientras que la segunda resina, de nombre comercial Butvar B98, es un polímero de vinil butiral – PVB, producida por Solutia.

#### 2.2.1.2.- CONCENTRACIÓN DE LA SOLUCIÓN.

Las concentraciones de cada resina fueron diferentes y se establecieron a partir de los valores referenciales de 5%, 12,5% y 20% probados por Schniewind, A. (1995); este autor señala que al 5% no se obtienen

---

<sup>73</sup> Polímeros orgánicos sintéticos termoplásticos, pertenecen al primer grupo de adhesivos tanto en la clasificación tradicional, como en la empleada en esta investigación.

Estas se caracterizan porque al aplicar calor reblandecen o funden, y al enfriarse vuelven a endurecer, sin experimentar cambios químicos, siempre que la temperatura no sobrepase el punto de fusión. Sobre este nivel, se producen transformaciones químicas irreversibles como la despolimerización o la degradación oxidativa.

Según Rayner (1978) los polímeros termoplásticos activados por disolvente se pueden clasificar dentro de cinco clases químicas: los plásticos celulósicos, los polímeros vinílicos, los polímeros acrílicos, los cauchos sintéticos y las poliamidas

Son aplicados en forma de solución, dispersión o sólidos fundidos, y por lo general endurecen por medios puramente físicos. Al ser aplicados en solución o en dispersión, la fijación o adhesión del polímero a las superficies o partículas de madera a ser cohesionada se produce en el momento en que el solvente migra al exterior de la madera, etapa previa a la evaporación del solvente. Cuando se aplica sólidos fundidos, la fijación o adhesión del producto se produce cuando inicia el proceso de enfriamiento. (Rayner, 1978)

Las resinas empleadas en esta investigación corresponden a las clases químicas de los polímeros vinílicos, polímeros acrílicos.

resultados importantes con ninguna de las dos resinas, al 12,5% se evidencian diferencias con PVB pero escasa diferencia con P(EMA/MA) y que al 20% la diferencia es significativa para P(EMA/MA) pero a este porcentaje no se puede trabajar con PVB.

En vista de este antecedente se programó establecer un punto intermedio (16,75%) entre 12,5% y 20,0%; de esta forma, se podría aplicar P(EMA/MA) al 16,75% y al 20,00%, y para PVB al 12,50% y al 16,75%

### 2.2.1.3.- PRESIÓN DE APLICACIÓN.

Esta variable no se considera como opción real de aplicación en bienes culturales; se la consideró en este estudio únicamente con la intención de observar variaciones en la penetración de las soluciones.

Las presiones con las que se impregnó por inmersión a las probetas fueron:

P1: 0,5Atm,

P2: 1,0Atm.

### 2.2.2.- TRATAMIENTOS

#### Tratamientos realizados

<i>Tratamiento</i>	<i>Nomenclatura</i>	<i>Interacción de factores según tratamiento</i>
1	T1	R1*C1*P1: P(EMA/MA) – 16,75% – 0,5Atm
2	T2	R1*C1*P2: P(EMA/MA) – 16,75% – 1,0Atm
3	T3	R1*C2*P1: P(EMA/MA) – 20,00% – 0,5Atm
4	T4	R1*C2*P2: P(EMA/MA) – 20,00% – 1,0Atm
5	T5	R2*C1*P1: PVB – 12,50% – 0,5Atm
6	T6	R2*C1*P2: PVB – 12,50% – 1,0Atm
7	T7	R2*C2*P1: PVB – 16,75% – 0,5Atm
8	T8	R2*C2*P2: PVB – 16,75% – 1,0Atm

Se consideraron ocho tratamientos, resultado de las interacciones entre los factores (variables independientes) resina, concentración y presión de aplicación.

### 2.2.3.- DISEÑO EXPERIMENTAL.

El diseño experimental adecuado fue por bloques completos al azar con tres repeticiones. Para lo cual se distribuyeron las probetas de forma aleatoria hasta completar todos los bloques correspondientes a cada tratamiento.

El número total de probetas empleadas se calculó de la siguiente manera:

2 resinas x 2 concentraciones x 2 presiones x 3 repeticiones = 24 probetas.

### 2.3.- CONSOLIDACIÓN Y PESADO DE PROBETAS.

Este proceso comprendió las siguientes etapas: disolución de las resinas en las dos concentraciones preestablecidas para cada una; consolidación de las probetas por inmersión tanto con presión atmosférica normal (1,0Atm) como con vacío (0,5Atm); y, evaporación de solventes.

Se añadió a la solución un tinte de color negro para que colorea las zonas impregnadas con los productos.

#### 2.3.1.- DISOLUCIÓN DE RESINAS.

Las resinas se disolvieron en los solventes indicados por las respectivas casas productoras y en las concentraciones preestablecidas:

P(EMA/MA) en acetona químicamente pura, en dos concentraciones: 16,75% y 20,00%.

PVB en una solución de tolueno – etanol (60-40), así mismo en dos concentraciones: 12,50% y 16,75%.

### 2.3.2.- CONSOLIDACIÓN POR INMERSIÓN A 0,5Atm DE PRESIÓN.

En esta etapa de la investigación, la aplicación de las dos resinas se realizó después de generar vacío de media atmósfera; de esta forma se forzó la penetración de las soluciones. El proceso seguido fue el siguiente:

- Primero, las probetas se introdujeron en recipientes adecuados a su tamaño con pesos metálicos sobre ellas para evitar su flotación después de permitir el ingreso de las soluciones en la cámara de consolidación.
- Segundo, se generó vacío en el interior de la cámara hasta alcanzar 0,5Atm y se mantuvo esta presión durante 45 minutos.
- Después, al cronometrar los 45 minutos y manteniendo la misma presión, se abrió el paso de las soluciones consolidativas. Es importante señalar que la tubería empleada para conducir las soluciones desde sus contenedores hasta el interior de la cámara de vacío, fueron diferentes para cada resina: así, la solución de PVB al ser más viscosa requirió una manguera de  $\varnothing 5,0\text{mm}$ , mientras que para la solución de P(EMA/MA) bastó con  $\varnothing 2,5\text{mm}$ .
- Una vez se completó el vertido de las soluciones consolidativas y para poder abrir las compuertas, se cerró primero el paso de las mangueras, después se aumentó progresivamente la presión en el interior de la cámara hasta igualar a la presión atmosférica normal.
- Finalmente, se abrieron las compuertas y se retiraron los contenedores con las probetas inmersas en las respectivas soluciones.

### EQUIPOS.

Para generar vacío y facilitar así la penetración de las resinas, se trabajó con una cámara y bomba convencional de vacío; la presión se controló con un vacuómetro convencional de glicerina.

**Equipos y condiciones del ensayo**

<i>Equipos</i>	<i>Modelo</i>	<i>Caudal</i>	<i>Vacío final</i>
Unidad convencional de vacío en seco	VTS 20/F	20m <sup>3</sup> /h	700mmHg – 80mBar

**2.3.3.-CONSOLIDACIÓN POR INMERSIÓN A 1,0Atm DE PRESIÓN.**

El procedimiento practicado para la aplicación de las resinas a presión atmosférica normal fue el siguiente:

- En primer lugar se introdujeron las probetas en recipientes adecuados a su tamaño, con pesos metálicos sobre ellas para evitar su flotación, después de permitir el ingreso de las soluciones en la cámara de consolidación.
- Después se vertieron las soluciones consolidativas en el interior de los contenedores hasta cubrir por completo a las probetas.
- Se envolvieron los contenedores con láminas finas de aluminio de uso doméstico para evitar la evaporación de los solventes y se dejó reposar durante 24 horas.
- Al cabo del tiempo establecido, se retiraron las probetas de los contenedores, se eliminó el exceso de solución y fueron pesadas para registrar el incremento de peso.

**UTENSILIOS.**

Para la consolidación de las resinas se emplearon recipientes capaces de contener a las probetas y pesos para que éstas no floten en la solución.

**2.3.4.-EVAPORACIÓN DE SOLVENTES.**

Luego de pesadas las probetas, éstas se colocaron en recipientes adecuados para permitir la evaporación de los solventes. Tanto en el caso de las probetas tratadas bajo presión como en aquellas tratadas a una atmósfera, el orden seguido fue el siguiente:

- Se colocó debajo de todas ellas alzas cilíndricas de 5mm de diámetro, para evitar que las probetas quedaran en contacto directo con la superficie de los recipientes de secado.
- Cada día se pesaron las probetas para documentar el proceso de evaporación de los solventes.
- Se consideró como punto final (o estable) de evaporación de solventes cuando la diferencia de masa de la probeta entre 2 pesadas sucesivas con un intervalo de 3 horas entre ellas, la masa perdida fue igual o menor al doble de la sensibilidad indicada para la determinación de la masa por gravimetría. (ASTM D 4442)

## UTENSILIOS.

Para el proceso de evaporación de solventes se emplearon bandejas plásticas de gran formato.

### 2.3.5.- PESADO

Finalmente, se determinó el incremento de masa experimentado por las probetas sometidas a los tratamientos de consolidación.

Para determinar la cantidad de resina retenida en el interior de las probetas se procedió por gravimetría (método y norma ASTM ya indicadas).

## EQUIPOS.

El valor de la masa de las probetas se determinó por gravimetría y empleando una balanza de precisión (0,01g) conforme la norma ASTM D 2395 (Standard Test Methods for Specific Gravity of Wood and Wood-Based Materials); el margen de error aceptado fue de  $\pm 0,2\%$ .

### Equipos y condiciones del ensayo

<i>Equipos</i>	<i>Marca</i>	<i>Modelo</i>	<i>Condiciones de ensayo</i>
Balanza electrónica	A.N.D.	FX-2000, d=0,01g	23°C y 50%HR

### 3.- RESULTADOS Y DISCUSIÓN.

#### 3.1.- ANÁLISIS SOBRE LA PENETRACIÓN DE LA RESINA.

Para determinar la concentración y presión de aplicación más adecuados para introducir la mayor cantidad de resina en el interior de las probetas, se analizó el incremento relativo de masa, es decir la variación

de la masa indicada en porcentaje:  $\Delta m = \frac{m_2 - m_1}{m_1} * 100\%$ .

Teniendo en cuenta que se trataba de determinar las diferencias entre las medias de los incrementos de varios tratamientos, se realizaron los siguientes procedimientos estadísticos:

- a.- Análisis descriptivo de la variable dependiente (*Incremento relativo de masa*) en función de las independientes (*Concentración de resina y Presión de aplicación*).
- b.- Análisis multifactorial de la varianza para los mismos dos factores.
- c.- Comparaciones múltiples con prueba de Tukey al 5% para el efecto de las resinas (c.1.) y de las presiones (c.2.).

#### a.- ANÁLISIS DESCRIPTIVO DE LA VARIABLE DEPENDIENTE: VARIACIÓN DE MASA EN PORCENTAJE.

Si se considera como válida la hipótesis de que un elevado porcentaje de sólidos introducidos en la madera implica un incremento mayor de las propiedades resistentes de las probetas tratadas; entonces, aquellos tratamientos que han producido mayor incremento de masa se consideraron, en principio, los adecuados para aplicar al caso de las tablas y tablazones de la iglesia de San Francisco.

**Tabla 1; Estadísticos descriptivos.**

Variable dependiente: Variación de masa en porcentaje.

<i>Resina aplicada</i>	<i>Concentración de resina</i>	<i>Presión de aplicación (Atm)</i>	<i>Incremento medio de masa (%)</i>	<i>Desviación típica</i>	<i>N</i>
P(EMA/MA)	16,75%	0,5	28,3	2,87559	3
		1,0	16,8	3,42223	3
	20,00%	0,5	32,2	0,44441	3
		1,0	23,5	4,21762	3
PVB	12,50%	0,5	20,1	0,45081	3
		1,0	18,5	2,93309	3
	16,75%	0,5	31,4	6,87903	3
		1,0	21,5	5,34450	3

La tabla anterior (1) describe los incrementos medios observados en las probetas ensayadas; como se aprecia, el mayor incremento de masa (32,2%) se produjo con P(EMA/MA) al 20,00% y aplicado a 0,5Atm de presión; el segundo tratamiento con mayor valor porcentual en incremento de masa de las probetas fue PVB al 16,75% y aplicado a 0,5Atm de presión (31,4%); en tercer lugar P(EMA/MA) al 16,75% y aplicado a 0,5Atm incrementó en promedio un 28,3% la masa de las probetas tratadas.

Los tres tratamientos arriba indicados, que se podrían considerar como un grupo que otorga similares cantidades de resina, rondan un 30% de incremento y comparten en común el haber sido aplicados a 0,5Atm; lo que indica que el tratamiento donde la variable independiente *Presión* de aplicación es controlada, sería en principio mejor que un tratamiento a presión atmosférica normal.

Se aprecia un segundo grupo de tratamientos que han otorgado un incremento similar entre ellos (alrededor de un 22%): P(EMA/MA) al 20,00% aplicado a 1,0Atm (23,5%); PVB al 16,75% a 1,0Atm (21,5%); y, PVB al 12,50% y aplicado a 0,5Atm (20,1%).

De estos tres tratamientos, los dos primeros corresponden a aquellos realizados a presión atmosférica normal; mientras que el tercero fue efectuado a media atmósfera de presión. Este hecho resulta interesante ya que podría indicar que trabajando a menor concentración (PVB 12,50%) pero aplicando vacío (0,5Atm) se alcanzaría un incremento de masa similar al conseguido con PVB al 16,75% pero aplicado a una atmósfera.

Los dos restantes tratamientos de la tabla, PVB al 12,50% y P(EMA/MA) al 16,75%, ambos aplicados a 1,0Atm, incrementaron la masa de las probetas en un 18%. Estos dos porcentajes son las proporciones más bajas en que se disolvieron las resinas empleadas en este estudio; y al ser aplicadas a presión atmosférica normal, el incremento de masa experimentado por las probetas son los menores de todos los tratamientos estudiados.

A pesar de que todos los tratamientos efectuados en cámara de vacío, aportan mayor cantidad de resina en el interior de las probetas, este tratamiento no permite un control directo del proceso por lo que las tablas de los artesonados y cielo raso barroco no serían susceptibles de consolidar empleando la *Presión* como factor independiente a manipular.

En consecuencia, si la consolidación de las tablas y tablazón a los que se refiere este estudio, se realiza a 1,0Atm de presión, habría que tomar en cuenta el incremento de peso experimentado por las probeta tratadas independientemente de la presión de aplicación. Al observar la tabla, los mayores incrementos (considerando únicamente aquellos aplicados a 1,0Atm) se consiguieron con las concentraciones más elevadas de ambas resinas, esto es: P(EMA/MA) al 20,00% y PVB al 16,75%; cada uno incrementó un 23,5% y un 21,5%, respectivamente.

#### b.- ANÁLISIS DE LA VARIANCA CON DOS FACTORES CONCENTRACIÓN Y PRESIÓN.

Una vez que se establecieron los tratamientos que mayor cantidad de resina aportaban a las probetas tratadas, fue necesario estudiar la incidencia de los factores que intervinieron en la consolidación; para lo cual, se realizó un análisis de la varianza del incremento de masa experimentado por las probetas consolidadas donde los factores independientes fueron: *Concentración* de la resina y *Presión* de aplicación. Es necesario aclarar que si bien es cierto que la variable independiente *Resina* por si misma es un factor, éste forma parte

consustancial del factor *Concentración* de la resina, por lo que únicamente se tomo en consideración ésta última variable, y la variable *Presión* de aplicación.

**Tabla 2; Pruebas de los efectos inter-sujetos.**

Variable dependiente: Variación de masa en porcentaje.

<i>Origen</i>	<i>Suma de cuadrados tipo III</i>	<i>gl</i>	<i>Media cuadrática</i>	<i>F</i>	<i>Sig.</i>
Modelo corregido	736,051 <sup>a</sup>	7	105,150	6,858	0,001
Intersección	13865,311	1	13865,311	904,327	0,000
Concentración	273,350	3	91,117	5,943	0,006
Presión	376,834	1	376,834	24,578	0,000
Presión x Concentración	85,867	3	28,622	1,867	0,176
Error	245,315	16	15,332		
Total	14846,677	24			

a. R cuadrado = 0,750 (R cuadrado corregida = 0,641)

Como se observa en esta tabla (2), los efectos principales que tienen las variables independientes: *Concentración* de resina y *Presión* de aplicación, son altamente significativas,  $p < 0,006$  y  $p < 0,000$  respectivamente; lo que indica que los valores medios de incremento de masa alcanzados son importantes. Esto quiere decir que las concentraciones con las que se trabajó permitieron introducir en el interior de las probetas cantidades de resina estadísticamente significativos.

En primer lugar se analizó el efecto de la *Concentración* de la resina de forma independiente; y en segundo lugar el efecto de la *Presión* de aplicación, igualmente de forma independiente; debido a que el efecto de la interacción *Concentración* de resina \* *Presión* de aplicación no es significativo (0,176; ver Tabla 2) no se analizó este efecto sobre la variable dependiente ( $p > 0,176$ ).

### c.1.- EFECTO DE LA CONCENTRACIÓN DE RESINA SOBRE EL INCREMENTO DE MASA.

Las diferentes concentración de resinas empleadas en el presente estudio incrementaron de forma diferente la masa de las probetas consolidadas; para establecer donde se encontraban las diferencias se realizó una comparación múltiple de las cuatro concentraciones con una prueba post hoc de Tukey al 5%.

**Tabla 3; Comparaciones múltiples.**

Variable dependiente: Variación de masa en porcentaje.

DHS de Tukey

<i>(I)Concentración</i>	<i>(J)Concentración</i>	<i>Diferencia de medias (I-J)</i>	<i>Error típ.</i>	<i>Sig.<sup>a</sup></i>
(EMA/MA) 16,75%	P(EMA/MA) 20,00%	-5,335	2,261	0,126
	PVB 12,50%	3,270	2,261	0,490
	PVB 16,75%	-3,918	2,261	0,340
P(EMA/MA) 20,00%	P(EMA/MA) 16,75%	5,335	2,261	0,126
	PVB 12,50%	8,605*	2,261	0,008
	PVB 16,75%	1,417	2,261	0,922
PVB 12,50%	P(EMA/MA) 16,75%	-3,270	2,261	0,490
	P(EMA/MA) 20,00%	-8,605*	2,261	0,008
	PVB 16,75%	-7,188*	2,261	0,027
PVB 16,75%	P(EMA/MA) 16,75%	3,918	2,261	0,340
	P(EMA/MA) 20,00%	-1,417	2,261	0,922
	PVB 12,50%	7,188*	2,261	0,027

Basadas en las medias marginales estimadas.

\*. La diferencia de medias es significativa al nivel 0,05.

a. Ajuste para comparaciones múltiples: Diferencia menos significativa (equivalente a la ausencia de ajuste).

De este análisis se desprende que las diferencias existentes entre los incrementos de masa, que cada solución provocó en las probetas, son significativas entre:

- P(EMA/MA) al 20,0% y PVB al 12,50%; y,
- PVB al 16,75% y PVB al 12,50%.

Así mismo se puede inferir de la Tabla 3 que los incrementos de masa alcanzados con los tratamientos de P(EMA/MA) al 20,0% y PVB al 16,75% fueron muy similares (nivel de significación de 0,922).

Los subconjuntos homogéneos creados a partir de la misma prueba de Tukey (Tabla 4), determinó claramente la existencia de dos grupos: el primero formado por las soluciones de más baja concentración de cada una de las resinas: PVB al 12,50% y P(EMA/MA) al 16,75%; y el segundo formado por las soluciones de PVB al 16,75% y P(EMA/MA) al 20,00%.

**Tabla 4; Variación de masa en porcentaje.**

DHS de Tukey<sup>a,b</sup>

<i>Concentración de resina</i>	<i>N</i>	<i>Subconjunto</i>	
		<i>1</i>	<i>2</i>
PVB 12,50%	6	19,3	
P(EMA/MA) 16,75%	6	22,5	22,5
PVB 16,75%	6		26,5
P(EMA/MA) 20,00%	6		27,9
Sig.		0,490	0,126

Se muestran las medias de los grupos de subconjuntos homogéneos.

Basadas en las medias observadas.

El término de error es la media cuadrática(Error) = 15,332.

a. Usa el tamaño muestral de la media armónica = 6,000

b. Alfa = 0,05.

### c.2.- EFECTO DE LA PRESIÓN DE APLICACIÓN SOBRE EL INCREMENTO DE MASA.

Considerando la segunda fuente de variación, *Presión* de aplicación, se puede observar en la Tabla 2 que existe una diferencia significativa entre la variación de masa alcanzada con las soluciones aplicadas a 0,5Atm y a 1,0Atm. Para confirmar este resultado se realizó una comparación por pares (Tabla 5)

Con esta Tabla 5, se confirmó que la *Presión* de aplicación de las soluciones consolidativas aumentó de forma significativamente diferente la masa de las probetas utilizadas durante los ensayos. Es decir, el incremento de masa experimentado por las probetas tratadas a 0,5Atm fue significativamente mayor que cuando se aplicaron a presión atmosférica normal.

**Tabla 5; Comparación por pares.**

Variable dependiente: Variación de masa en porcentaje.

(I)Presión de aplicación	(J)Presión de aplicación	Diferencia de medias (I-J)	Error típ.	Sig. <sup>a</sup>
0,5Atm	1,0Atm	7,925*	1,599	0,000
1,0Atm	0,5Atm	-7,925*	1,599	0,000

Basadas en las medias marginales estimadas.

\*. La diferencia de medias es significativa al nivel 0,05.

a. Ajuste para comparaciones múltiples: Diferencia menos significativa (equivalente a la ausencia de ajuste).

### 3.2.- ANÁLISIS SOBRE LA DISTRIBUCIÓN DE LAS RESINAS.

Como se explicó en el apartado referido a la disolución de las resinas, fue necesario añadir un tinte de color negro con el fin de establecer la distribución de las resinas en el interior de las probetas.

Para medir las superficies impregnadas se elaboró una escala arbitraria ordinal compuesta de tres niveles:

- Nula a leve, zona 1.

- Leve a media, zona 2.
- Media a total, zona 3.

Para determinar el rango de cada nivel se contó el número promedio de elementos vasculares y no vasculares (elementos longitudinales tanto parenquimatosos como prosenquimatosos, diferentes a los vasos) impregnados por milímetro cuadrado ( $\text{mm}^2$ ) observados en la sección transversal de las probetas tratadas.

Del rango establecido se observó que la penetración y difusión de las resinas se iniciaba desde los vasos, y cuando la mitad, aproximadamente, de éstos contenían resina, solo entonces se difundía las soluciones por las fibras y otros elementos longitudinales.

**Tabla 6; escala arbitraria de nivel de impregnación.**

<i>Nivel de impregnación</i>	Número de elementos longitudinales impregnados			
	<i>Elementos vasculares</i>		<i>Otros elementos longitudinales</i>	
	<i>mínimo</i>	<i>máximo</i>	<i>mínimo</i>	<i>máximo</i>
Nulo – leve (zona 1)	0	8	0	49
Leve – medio (zona 2)	9	10	50	199
Medio – total (zona 3)	11	16	200	1066

Para contar las células impregnadas, se cortaron las probetas consolidadas por la mitad, se pulieron las caras de corte y a continuación se determinaron las zonas donde se ejecutó el conteo de interés para el estudio; el cómputo se realizó con el programa Image Tool. Mientras que para medir las superficies impregnadas y superficies digeridas por los insectos se empleó el programa informático AutoCAD.

Para determina como influyen los factores estudiados en la distribución de resinas se realizaron los siguientes análisis estadísticos:

- a.- Análisis descriptivo de las variables independientes; como variable dependiente se asumieron las zonas de impregnación leve y total, de forma combinada.
- b.- Análisis de la varianza con prueba de Tukey al 5%.

a.- ANÁLISIS DESCRIPTIVO DE LA VARIABLE DEPENDIENTE: PORCENTAJE DE ZONAS IMPREGNADAS 2 Y 3.

Una vez medidas las superficies impregnadas, se tabularon y ordenaron los valores y se realizó un análisis descriptivo de las variable tomadas en cuenta para el presente estudio, considerando como variable dependiente las zonas impregnadas de forma combinada, es decir, sin distinguir si la impregnación fue media o total y como variables independientes la concentración de las resinas empleadas y la presión de aplicación.

En principio, todos los tratamientos y presiones aplicadas llegaron a impregnar casi la totalidad de la sección de las probetas consolidadas. La mayor impregnación se observó en el tratamiento con P(EMA/MA) a 16,75% a 0,5Atm de presión donde el 95,3% de la sección resultó impregnada; mientras que el menor porcentaje de superficie impregnada se consiguió con PVB al 16,75% a 1,0Atm de presión: 73,0%.

En cualquier caso, se desprende de la Tabla 7 que la distribución de las soluciones consolidativas en el interior de las probetas (porcentaje de superficie impregnada) es en todos los caso bastante elevada.

**Tabla 7; Estadísticos descriptivos.**

Variable dependiente: Porcentaje de zonas impregnadas 2 y 3.

<i>Concentración de resina</i>	<i>Presión de aplicación (Atm)</i>	<i>Superficie media impregnada (%)</i>	<i>Desviación típica</i>	<i>N</i>
P(EMA/MA) 16,75%	0,5	95,3	3,7820	3
	1,0	85,3	8,0139	3
P(EMA/MA) 20,00%	0,5	95,5	5,0302	3
	1,0	88,3	1,6166	3
PVB 12,50%	0,5	88,4	0,5657	3
	1,0	83,9	8,6558	3
PVB 16,75%	0,5	81,3	17,7484	3
	1,0	73,0	8,2777	3

### b.- ANÁLISIS DE LA VARIANZA CON PRUEBA DE TUKEY AL 5%.

Para establecer cual de los dos factores considerados, afectan a la distribución de las resinas se realizó un análisis de la varianza.

De la tabla (8) se desprende que tanto la *Concentración* de las resinas como la Presión de aplicación son efectivamente factores que afectan de forma significativa a la distribución de las resinas en el interior de las probetas (0,032 y 0,040 respectivamente, resaltado en negrita en la Tabla 8). Sin embargo, la interacción entre estos factores no afectó significativamente a la difusión.

**Tabla 8; Pruebas de los efectos inter-sujetos.**

Variable dependiente: Porcentaje de zonas impregnadas 2 y 3.

<i>Origen</i>	<i>Suma de cuadrados III</i>	<i>Gl</i>	<i>Media cuadrática</i>	<i>F</i>	<i>Sig.</i>
Modelo corregido	1118,788 <sup>a</sup>	7	159,827	2,745	0,051
Intersección	159152,656	1	159152,656	2733,581	0,000
Concentración	680,584	3	226,861	3,897	0,032
Presión	298,336	1	298,336	5,124	0,040
Presión x Concentración	21,742	3	7,247	0,124	0,944
Error	815,098	14	58,221		
Total	166595,290	22			
Total corregida	1933,886	21			

a. R cuadrado = 0,579 (R cuadrado corregida = 0,368)

Con el fin de determinar las diferencias entre cada una de las medias alcanzadas con las concentraciones empleadas, se realizó una comparación múltiple con prueba de Tukey al 5%.

**Tabla 9; Comparaciones múltiples**

Variable dependiente: Porcentaje de zonas impregnadas 2 y 3.

<i>(I)Concentración</i>	<i>(J)Concentración</i>	<i>Diferencia de medias (I-J)</i>	<i>Error típ.</i>	<i>Sig.</i>
P(EMA/MA) 16,75%	P(EMA/MA) 20,00%	-1,600	4,4053	0,983
	PVB 12,50%	4,580	4,6204	0,757
	PVB 16,75%	14,000*	4,6204	0,040
P(EMA/MA) 20,00%	P(EMA/MA) 16,75%	1,600	4,4053	0,983
	PVB 12,50%	6,180	4,6204	0,556
	PVB 16,75%	15,600*	4,6204	0,021
PVB 12,50%	P(EMA/MA) 16,75%	-4,580	4,6204	0,757
	P(EMA/MA) 20,00%	-6,180	4,6204	0,556
	PVB 16,75%	9,420	4,8258	0,252
PVB 16,75%	P(EMA/MA) 16,75%	-14,000*	4,6204	0,040
	P(EMA/MA) 20,00%	-15,600*	4,6204	0,021
	PVB 12,50%	-9,042	4,8258	0,252

Basadas en las medias observadas.

El término de error es la media cuadrática(Error) = 58,221.

\*. La diferencia de medias es significativa al nivel 0,05.

De la comparación múltiple efectuada en la Tabla 9, se desprende que existieron diferencias significativas entre el porcentaje de zona impregnada:

- P(EMA/MA) al 16,75% y PVB al mismo porcentaje. Y,
- P(EMA/MA) al 20,00% y PVB al 16,75%.

También se podría considerar como similares la difusión alcanzada por P(EMA/MA) tanto al 16,75% como al 20,00% (0,983)

**Tabla 10: Zonas de impregnación 2 y 3 (%)**

DHS de Tukey<sup>a,,b,,c</sup>

<i>Concentración de resina</i>	<i>N</i>	<i>Subconjunto</i>	
		<i>1</i>	<i>2</i>
PVB 16,75%	6	76,300	
PVB 12,50%	6	85,720	85,720
P(EMA/MA) 16,75%	6		90,300
P(EMA/MA) 20,00%	6		91,900
Sig.		0,221	0,556

Se muestran las medias de los grupos de subconjuntos homogéneos.

Basadas en las medias observadas.

El término de error es la media cuadrática(Error) = 58,221.

a. Usa el tamaño muestral de la media armónica = 5,455

b. Los tamaños de los grupos son distintos. Se empleará la media armónica de los tamaños de los grupos. No se garantizan los niveles de error tipo I.

c. Alfa = 0,05.

Con la prueba de Tukey se observó la existencia de dos grupos homogéneos, el primero formado por las soluciones de PVB y el segundo por aquellas de P(EMA/MA).

#### 4.- CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

Después de haber determinado las proporciones de resina más adecuadas para efectuar la consolidación, y de haber analizado la difusión de las soluciones en el interior de las probetas, se concluye que para el caso de las tablas del cielo raso y la tablazón de los artesonados que motivaron la realización de este estudio, los mayores incrementos de masa se obtendrían con P(EMA/MA) al 20% seguido por la solución de PVB al 16,75%.

A pesar de ser porcentajes algo más elevados de lo usual, el análisis gravimétrico indicó que para el deterioro severo que presentaron las maderas, las cantidades indicadas son capaces de penetrar en la madera sin dificultad.

Con respecto a la distribución de las soluciones, P(EMA/MA) se difunde de mejor manera que PVB. Lo cual se explica considerando que a una misma concentración, PVB es siempre más viscoso que P(EMA/MA).

Sin embargo, esta diferencia en la difusión, podría ser un aspecto importante de PVB frente P(EMA/MA) ya que al concentrarse mayor cantidad de sólidos en las zonas más exteriores, sería mejor el resultado de la consolidación; esto se explica porque las capas más externas son las que realizan el trabajo mecánico mientras que en las internas el trabajo se reduce hasta ser nulo en el eje longitudinal; así pues, el compuesto madera-resina será más resistente en las zonas con mayor cantidad de resina.

Con esta investigación se determinaron cuáles serían las soluciones con mayor cantidad de resina que penetren y se difundan en la madera de los artesonados y cielo raso barroco de la iglesia de San Francisco. Sin embargo, la mejora efectiva que otorgan estos porcentajes y el nivel de penetración y distribución deberían ser sometidos a ensayos mecánicos, especialmente flexión estática.

Se observó tanto en la literatura consultada como durante la selección de las probetas empleadas en la investigación, que no existe un parámetro para indicar niveles de deterioro, únicamente se encuentran referencias que indican un ataque severo o un avanzado nivel de deterioro, mas no se especifica desde que punto se considera avanzado el deterioro.

## 5.- BIBLIOGRAFÍA.

- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (1999) *Standard Practice for Sampling Forest Trees for Determination of Clear Wood Properties*. ASTM D 5536-94. En American Society for Testing and Materials: Wood Vol. 4.10. Philadelphia, USA.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (1999) *Standard Terminology Relating to Wood*. ASTM D 0009-87 (Reapproved 1992). En American Society for Testing and Materials: Wood Vol. 4.10. Philadelphia, USA.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (1999) *Standard Test Methods for Direct Moisture Content Measurement of Wood and Wood-Based Materials*. ASTM D 4442-92 (Reapproved 1997). En American Society for Testing and Materials: Wood Vol. 4.10. Philadelphia, USA.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (1999) *Standard Test Methods for Specific Gravity of Wood-Based Materials*. ASTM D 2395-93 (Reapproved 1997). En American Society for Testing and Materials: Wood Vol. 4.10. Philadelphia, USA.
- APPELBAUM Barbara (1987) *Criteria for Treatment: Reversibility*. En Journal of The American Institute for Conservation, Vol. 26, No. 2 (Autumn, 1987), pp. 65-73, The American Institute for Conservation of Historic & Artistic Works.
- ARRIAGA, Francisco; F. PERAZA; M. ESTEBAN; I. BOBADILLA; F. GARCÍA (2002) *Intervención en estructuras de madera*. AiTiM. Madrid, España.
- ASOCIACIÓN ESPAÑOLA DE NORMALIZACIÓN Y CERTIFICACIÓN (2005) *Contenido de humedad de una pieza de madera aserrada. Parte 1: Determinación por el método de secado en estufa*. UNE EN 13183-1 Asociación Española de Normalización y Certificación AENOR. Madrid, España.
- ASOCIACIÓN ESPAÑOLA DE NORMALIZACIÓN Y CERTIFICACIÓN (2005) *Determinación del peso específico* UNE 56-531-77 Características físico-mecánicas de la madera. Asociación Española de Normalización y Certificación AENOR. Madrid, España.

- ASOCIACIÓN ESPAÑOLA DE NORMALIZACIÓN Y CERTIFICACIÓN (2005) *Preparación de probetas para ensayos UNE 56-528-78 Características físico-mecánicas de la madera.* Asociación Española de Normalización y Certificación AENOR. Madrid, España.
- ASOCIACIÓN ESPAÑOLA DE NORMALIZACIÓN Y CERTIFICACIÓN (2005) UNE 56.544;
- ASOCIACIÓN ESPAÑOLA DE NORMALIZACIÓN Y CERTIFICACIÓN (1995) *Durabilidad natural de la madera maciza. Parte 2: guía de la durabilidad natural y de la impregnabilidad de especies de madera seleccionadas por su importancia en Europa UNE-EN 350-2:1995,* Norma Española. Asociación Española de Normalización y Certificación, AENOR. Madrid, España.
- ASOCIACIÓN ESPAÑOLA DE NORMALIZACIÓN Y CERTIFICACIÓN (1996) *Durabilidad de la madera y de los productos derivados de la madera. Madera maciza tratada con productos protectores. Parte 1: Clasificación de las penetraciones y retenciones de los productos protectores UNE-EN 351-1:1996,* Norma Española. Asociación Española de Normalización y Certificación, AENOR. Madrid, España.
- BARCLAY, Robert (2004) *The preservation and use of historic musical instruments : display case and concert hall.* Earthscan, cop. London, UK.
- BARCLAY, Robert (1981) *Wood Consolidation on an Eighteenth Century English Fire Engine.* En *Studies in Conservation*, Vol. 26, No. 4 (Nov., 1981), pp. 133-139, The American Institute for Conservation of Historic & Artistic Works. USA.
- BENÍTEZ, Julio (1999) *Estudio de los ensambles empleados en la construcción de retablos pertenecientes a iglesias patrimoniales quiteñas.* Tesis de grado, Universidad Tecnológica Equinoccial. Quito, Ecuador.
- BENÍTEZ, Julio (2001) *El rescate del oficio de la carpintería, base para la conservación del patrimonio tangible, intangible y natural. cuestión dilucidada con la comparación de dos estructuras en madera.* En 5º Congreso Internacional, Patrimonio cultural contexto y conservación. La Habana, Cuba.

- BENÍTEZ, Julio (2004) *Diagnóstico y anteproyecto para intervenir las maderas, estructura y soporte, y las policromías de los artesonados y cielo raso barroco de la iglesia de San Francisco*. En Estudios para la restauración y consolidación del artesonado, cubierta y cúpulas de la iglesia de San Francisco. Vega, Héctor (coordinador). Fondo de Salvamento, FONSA. Quito, Ecuador.
- BUSTINDUY, María (1997) *Utilización de contrastes radiopacos para el control de la consolidación de la fibra leñosa*. Tesis doctoral, Universidad del País Vasco. España.
- BUTVAR, (s/d) Poli vinyl butiral Resin, Properties & uses. Solutia. En: [www.butvar.com](http://www.butvar.com).
- CALVO, Ana (1997) *Conservación y Restauración, Materiales, técnicas y procedimientos de a A a la Z*, Ediciones del Serbal, Barcelona, España.
- CALVO, Félix (1993) *Técnicas estadísticas multivariantes, con resolución de ejercicios prácticos mediante los paquetes estadísticos SPSS y PROGSTAD*. Universidad de Deusto. Bilbao, España.
- CARRERAS, Raquel (2003) *Principios científicos de la conservación de la madera*. Unión Nacional de Escritores y Artistas de Cuba; LA Habana Cuba.
- COQUILLAT, Fernando (1991) *Estadística Descriptiva, Metodología y cálculo*. Editorial Tebar Flores. Albacete, España.
- CUTLER, David; Ted BOTHA; Dennis STEVENSON (2008) *Plant anathomy an applied approach*. Blackwell. Reino Unido.
- EVERT, Ray (2006) *Esav's plant anathomy, meristems, cells and tissues of the plant body, their structure, fuction and development*. John Wiley & Sons, Inc. Hoboken, USA.
- FENGEL, Dietrich; Gerd WEGENER (2003) *Wood, chemistry, ultraestructure, reactions*. Verlag Kessel. München, Alemania.
- FONT QUER, P. (Ed) (1973) *Diccionario de botánica*, Editorial Labor, S.A., Barcelona, España.
- GARCÍA, Alfonso (2008) *Estadística aplicada: conceptos básicos*. Universidad Nacional de Educación a Distancia. Madrid, España.

- GARCÍA, L.; A. GUINDEO; C. PERAZA; P. DE PALACIOS (2003) *La madera y su anatomía*, Fundación Conde del Valles de Salazar, Ediciones Mundi – Prensa, AiTiM. Madrid, España.
- GRAFIÁ José (2005) *“Imaginería de la Semana Santa Marinera de Valencia. El paso de la Crucifixión del Señor”* Tesis doctoral, Universidad Politécnica de Valencia. Valencia, España.
- GUERRA, Patricio (2004) *Investigación histórica*. En Estudios para la Restauración y Consolidación del artesanado, cubiertas, y cúpulas de la Iglesia de San Francisco. Trabajo no publicado. Quito, Ecuador.
- HORIE, Charles (2000) *Materials for Coservation. Organic consolidants, adhesives ans coatings*. Butterworth – Heinemann. Series in conservation and museology. Great Britain.
- INSTITUTO NACIONAL DE INVESTIGACIONES AGRARIAS, INIA-OIMT (1996) *Manual de identificación de especies forestales de la subregión andina*. Proyecto PD150/91 Rev.1 (I) “Identificación y Nomenclatura de las Maderas Tropicales Comerciales en la Subregión Andina” Acuerdo INIA-OIMT, Perú.
- KOLLMAN, F; W. Côté (1968) *Principles of wood science and technology*, Vol. 1 Solid Wood. Springer – Verlag. Berlin, Heidelberg New York.
- KRABBENHOFT, Kristian; Lars DAMKILDE (2004) *Double porosity models for the description of water infiltration in wood*. En Wood Sci Technol (2004) 38: 641–659 DOI 10.1007/s00226-004-0253-5 Springer-Verlag 2004.
- LARREA, José; Marta CORDERO (2007) *Estadística, 45 problemas útiles*. García Moroto (Eds). Madrid, España.
- LINETTE, Salvo; Rubén ANANIAS; Alain CLOUTIER. *Influencia de la estructura anatómica en la permeabilidad específica transversal al gas del pino radiata*. En Maderas, Ciencia, Tecnología. [online]. 2004, vol.6, no.1 [citado 06 Noviembre 2007], p.33-44. Disponible en la World Wide Web: <[http://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0718-221X2004000100003&lng=es&nrm=iso](http://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0718-221X2004000100003&lng=es&nrm=iso)>. ISSN 0718-221X.

- LIOTTA, Giovanni (2000) "Los insectos y sus daños en la madera: problemas de restauración". Editorial NEREA, S.A. España.
- MACHUCA, R.; M. Fuentes; A. CAMPOS (2006) *Absorción de soluciones preservantes de nueve especies de maderas, mediante procesos de impregnación a vacío - presión e inmersión*. En Revista Chapingo. Serie ciencias forestales y del ambiente [en línea] 2006, 12 (001):[fecha de consulta: 07 de noviembre de 2007] Disponible en: <<http://redalyc.uaemex.mx/redalyc/src/inicio/ArtPdfRed.jsp?iCve=62912108>> ISSN 0186-3231.
- MARTIN, Jorge (1994) *Applications of science in the análisis, conservation, and interpretation of works of art*. En Altered States. Conservation, Analysis, and the interpretation of Words of Art. The trustees of Mount Holyoke Collage.
- MATTEINI, Mauro; Arcangelo MOLES, (2001) *La química en la restauración : los materiales del arte pictórico*. Editorial NEREA, S.A. España
- NAKHILA, Shawki M. (1986) "A comparative study of resins for the consolidation of wooden objects". En Studies in conservation, 31, 38-44.
- NEWY, Charles (2002) *Adhesives and coatings*. En Series, Science for Conservators III. Routledge [for the] Conservation Unit of the Museum and Galleries Commission. London, U.K.
- PARDO, Antonio; Miguel RUIZ (2005) *Análisis de datos con SPSS 13 Base*. McGraw-Hill/Interamericana de España S.A.U. Madrid España.
- PETRONIO, M. (1966) *Propiedades, pruebas, especificaciones y diseños de los adhesivos*, En Manual de los adhesivos, Compañía Editorial Continental S.A., México D.F., México.
- PICARD, Miguel (1994) *Contribución al estudio de la propagación sonora en materiales acústicos de estructura elástica fibrosa*. Tesis Universidad Politécnica de Valencia. Valencia, España.
- RAYNER, C (1978) *Adhesivos orgánicos sintéticos*. En Adherencia y aditivos, vol 1, Houwink, R. Salomon, G. Editores, Urmo SA de Ediciones, Barcelona España.

- RODRÍGUEZ, José (1998) *Patología de la madera*. Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Montes – Fundación Conde del Valles de Salazar. Ediciones Mundi-Prensa, s/l. España.
- RODRÍGUEZ, José; Francisco ARRIAGA (1989) *Rehabilitación, consolidación y tratamiento*. En Curso de construcción en madera, estructuras mixtas, rehabilitación y carpintería. Servicio de publicaciones del Colegio Oficial de Arquitectos de Madrid.
- RODRÍGUEZ, Ramón (2004) *Investigación, diagnóstico y anteproyecto de instalaciones hidrosanitarias* En Estudios para la Restauración y Consolidación del artesanado, cubiertas, y cúpulas de la Iglesia de San Francisco, trabajo no publicado.
- RUZIN, Steven (1999) *Plant microtechnique and microscopy*. Oxford University Press, United States of America.
- SAKUNO, Tomoyasu; Arno SCHNIEWIND (1990) *Adhesive qualities of consolidants for deteriorated wood*. En Journal of The American Institute for Conservation, JAIC 1990, Volume 29, Number 1, Article 3 (pp. 33 to 44).
- SALOMON, G., (1978) *Adherencia*. En Adherencia y aditivos, vol 1, Houwink, R. Salomon, G. Editores, Urmo SA de Ediciones, Barcelona España.
- SAN ANDRÉS, Margarita (1990) *Aplicación de resinas sintéticas en la conservación y restauración de obras de arte*, Universidad Complutense de Madrid. Madrid, España.
- SANTANDER, Diego (2004) *Investigación Diagnóstico y anteproyecto*. En Estudios para la Restauración y Consolidación del artesanado, cubiertas, y cúpulas de la Iglesia de San Francisco, trabajo no publicado.
- SCHNIEWIND, Arno (1995) *Consolidation of Wooden Panels*. En The Structural Conservation of panel paintings. Dardes Kathleen, Rothe Andrea (Eds). Proceedings of a Symposium at the J. Paul Getty Museum, 24- 28 April 1995: 87 – 107, Los Angeles USA.
- SCHNIEWIND, Arno; Peter EASTMAN (1994) *Consolidant distribution in deteriorated wood treated with soluble resins*. En Journal of The American Institute for Conservation, JAIC 1994, Volume 33, Number 3, Article 2 (pp. 247 to 255).

- SELLERS, Terry (1985) *Plywood and Adhesives Technology*. Forest Products Utilization Laboratory – Mississippi State University. Marcel Dekker, Inc. New York, United States of America.
- SERVICIO ECUATORIANO DE CAPACITACIÓN PROFESIONAL (s/f) *Manual de tecnología de la carpintería*. Servicio Ecuatoriano de Capacitación Profesional, SECAP. Quito, Ecuador.
- SPIEGEL, Murray (1988) *Estadística*. Segunda edición, McGraw-Hill, Inc. Madrid, España.
- SPIRYDOWICZ, KE, Simpson, E, Blanchette, RA (2001) *Alvar and butvar: The use of polyvinyl acetal resins for the treatment of the wooden artifacts from gordion, turkey*. Journal of the American Institute for Conservation, 40(1), 43-57.
- TRIOLA, M. (2004) *Probabilidad y estadística*. Pearson Educación. México D.F., México.
- VEGA, Héctor (2004) (Coordinador) *Estudios para la restauración y consolidación del artesanado, cubierta y cúpulas de la iglesia de San Francisco*. FONSA, Municipio del Distrito Metropolitano de Quito. Quito, Ecuador.
- VIGNOTE, Santiago; Isaac, MARTÍNEZ (2006) *Tecnología de la madera*. Ediciones Mundi-Prensa. Madrid, España.
- VISCARRA, S. (1998) *Guía para el secado de la madera en hornos*. Documento Técnico 69/1998, USAID/Bolivia.
- WANG, Y.; Arno SCHNIEWIND (1985) *Consolidation of deteriorated wood with soluble resins*. En Journal of The American Institute for Conservation, JAIC 1985, Volume 24, Number 2, Article 3 (pp. 77 to 91).
- WARD, P. (1986) *La conservación del patrimonio: carrera contra reloj*. The Getty Conservation Institute. Mariana del Rey CA, U.S.A.