

# CONSOLIDACIÓN MATERIAL PARA ARQUITECTURA PATRIMONIAL DE TIERRA

## APLICACIÓN DEL FCC COMO POSIBLE MATERIAL CONSOLIDANTE

Presentado por María Barros Magdalena  
Directores: Dra. Camilla Mileto  
Dr. Fernando Vegas López-Manzanares  
Cotutor: José M<sup>a</sup> Monzó Balbuena

Escuela Técnica superior de Arquitectura  
Máster en Conservación del Patrimonio Arquitectónico  
2018- 2019



UNIVERSITAT  
POLITÈCNICA  
DE VALÈNCIA



ESCUELA TÉCNICA  
SUPERIOR DE  
ARQUITECTURA



MASTER OFICIAL EN  
CONSERVACIÓN DEL  
PATRIMONIO ARQ.

Quiero agradecer en primer lugar a las personas que estuvieron presentes diariamente durante este último año. A mis padres por haberme dado esta oportunidad. Gracias por su apoyo y la confianza para poder finalizar esta etapa.

Gracias a todos los que hicieron posible la realización de este trabajo. A mi tutora D<sup>a</sup>. Camilla Mileto por la dirección del proyecto. A D. José Monzó, por su asesoramiento en la elección del FCC y por haber facilitado dicho material para la realización del estudio. A D<sup>a</sup> Lidia García, D. Javier Gómez-Patrocínio y D<sup>a</sup> Laura Villacampa, por qué las aportaciones de sus estudios doctorales han estado en la concepción de este trabajo. A D<sup>a</sup> Laura Osete por haberme aconsejado acerca de los ensayos adecuados a realizar en la parte experimental del trabajo. A D. Rafael Calabuig y a D. Jesús Martínez Sanz por su paciencia y tolerancia durante el proceso de producción de las probetas y por su ayuda en la realización de las pruebas físico-mecánicas. A D. Rafael Molina por su implicación y por el tiempo dedicado en la realización de una gran parte de los ensayos. A D. Joan Romero sin el cual no hubiera sido posible la realización del ensayo SAET. A D<sup>a</sup> Ana Torres Barchino por su ayuda en el ensayo de colorimetría sin la cual no hubiera sido posible su realización.

## INDICE

I. Resumen	xi
II. Descripción del objetivo y viabilidad de la investigación	xii
III. Razón de la investigación	xii
IV. Objetivos de la investigación	xiii
V. Justificación	xiii
VI. Metodología	xiv
VII. Introducción	xvi
<b>B1. ARQUITECTURA DE TIERRA</b>	<b>01</b>
01. Contextualización de la situación actual.	02
I. Caracterización de la arquitectura de tierra.	02
II. Pautas de intervención sobre patrimonio arquitectónico.	05
III. Estado de conservación de la arquitectura.	08
02. Tapia	11
I. Arquitectura vernácula de tierra en la península.	11
II. Técnica constructiva.	13
a. Proceso constructivo.	14
b. Principales variantes constructivas.	15
c. Tierra como material de construcción.	16
d. Principales agentes de deterioro y causas de alteración y patología.	18
e. Principales operaciones sobre arquitectura de tierra.	25

<b>B2. MÉTODOS DE INTERVENCIÓN</b>	<b>29</b>
03. Criterios de intervención material	30
04. Conservación	31
I. Consolidación superficial.	31
a. Disolvente	32
1. Disolventes más empleados	33
b. Solute	34
1. Clasificación según naturaleza	34
II. Métodos de aplicación	39
a. Formas de aplicación	39
b. Metodología de aplicación	40
III. Alteraciones identificadas tras el tratamiento de consolidación	40
05. Reintegración	42
I. Perdida de sección	43
II. Faltas de revestimiento	44
III. Aplicación nueva protección	44
06. Reconstrucción	45
I. Tratamientos en profundidad. Morteros de inyección	45
a. Método de actuación	47
b. Morteros más empleados en consolidación estructural	48
c. Metodología de aplicación	48
<b>B3. METODOS DE INTERVENCIÓN PROPUESTOS. FASE EXPERIMENTAL</b>	<b>51</b>
07. MATERIALES A EMPLEAR	53
I. Tierra estabilizada	53
II. FCC	54
I. Introducción al material	54
a. Proceso catalítico de lecho fluido	54
b. Estado de la cuestión. Grupos investigadores	56
1. Grupo investigador de B. Pacewska y co.	56
2. Grupo investigador de Kung-Chung Su	57
3. Grupo investigador Giquima	58
4. Conclusiones	60
III. Composición	61
IV. Estudio morfológico	62
V. Distribución granulométrica	63
VI. Reactividad puzolánica	64
a. Cinética reacción puzolánica	64
b. Cinética de reacción de FCC	65
VII. Justificación de la elección del FCC como material de ensayo	67
VIII. Características esperadas de los morteros	68

08. PARTE EXPERIMENTAL	69
I. Introducción fase experimental	69
II. Planteamiento fase experimental	69
a. Desarrollo como mortero de tierra	70
b. Desarrollo como mortero de intervención	70
c. Desarrollo como consolidante superficial	71
III. Materiales empleados	72
IV. Probetas	73
a. Proceso de producción	73
b. Dosificaciones	73
1. Probetas de referencia	74
2. Probetas de ensayo	74
3. Justificación dosificaciones seleccionadas	75
c. Número de probetas	77
d. Tiempos de ensayo	77
V. Procedimiento experimental	78
a. Proceso de amasado	78
b. Proceso aplicación superficial	78
VI. Ensayos	79
I. Justificación ensayos	79
II. Desarrollo ensayos	82
1. Técnicas de análisis y determinación	82
a. Estudio granulométrico	82
b. Ensayo retracción lineal	82
c. Microscopía electrónica de barrido (SEM)	83
d. Ensayo colorimetría	84
2. Ensayos físico-mecánicos	84
a. Ensayo compresión	84
c. Determinación dureza Shore C	85
d. Ensayo de erosión acelerada de Swinburne (SAET)	85
e. Ensayo cíclico de humectación-heladicidad y secado	86
f. Ensayo de determinación de absorción de agua por capilaridad	87
g. Ensayo de determinación de la permeabilidad al vapor de agua	89
VII. Resultados	90
VIII. Conclusiones	115



## RESUMEN

El objetivo de esta investigación es el estudio y evaluación de la aplicación del catalizador gastado de craqueo catalítico (FCC) como posible material de intervención en edificios patrimoniales de tierra.

Cuando esta arquitectura es sometida a un proceso de intervención se debe priorizar la estabilización material y recuperación de las propiedades originales, tratando de buscar la máxima efectividad, durabilidad e integración de la intervención planteada. El proceso de consolidación y reposición del material dañado, permiten la devolución de las propiedades y configuración pérdidas, considerándose por ello como tratamientos clave en intervenciones sobre el patrimonio actual.

Con el fin de ampliar mejoras y nuevos métodos sobre este proceso, la investigación sobre materiales aplicados y de nuevo desarrollo se cree fundamental. El estudio realizado trata de probar y evaluar las características de tres posibles materiales de intervención, los cuales presentan adición de FCC, y determinar su viabilidad en las metodologías de intervención más comunes. En la actualidad este producto procedente de la industria petroquímica, tiene la consideración de residuo inerte el cual carece de utilidad, por lo que desde hace unos años se ha profundizado en su estudio.

Esta investigación ha tomado como base el estudio realizado por Piles et al. (2005), donde se destaca la posibilidad de emplear el FCC en morteros de restauración. Al partir de esta conclusión, el estudio que se presenta se centrará en concretar las propiedades aportadas por el FCC en dichos materiales y concluir en las posibilidades de empleo de este en intervenciones.

## PALABRAS CLAVE

ARQUITECTURA DE TIERRA PATRIMONIAL | DEGRADACIÓN MATERIAL | TIERRA | CONSOLIDACIÓN | FCC

xi

## ABSTRACT

The overall aim of this research is the study an evaluation of the application of the Fluid Catalytic Cracking (FCC) as a possible consolidating soil in heritage buildings.

When this architecture is subjected to an intervention process, the stabilization of the damaged material must be prioritized, with the aim of producing greater durability and integration with the proposed intervention. The consolidation process is undertaken so as to return the building to its original state, which is deemed to be a key process in interventions in current heritage.

In order to broaden improvements and new methods regarding this process, the research upon applied materials and new developments are believed to be fundamental. The goal of the carried out study is so as to determine the structural properties which confirm FCC as being a possible consolidating material, evaluating a range of its applications, whilst testing its viability during these processes. This product is currently considered to be inert waste coming from the petrochemical industry, which serves no purpose, therefore research in this field has deepend in recent years.

This investigation is in part based on the study carried out by Piles et al. (2005), which confirms the possibility of applying the FCC in mortar restoration. Based on this conclusion, the research presented will focus on specifying the properties contributed and the alterations that its use can entail, with the aim of allowing a greater characterization.

## KEYWORDS

SOIL HERITAGE ARCHITECTURE | MATERIAL DEGRADATION | SOIL | CONSOLIDATION | FCC

## **DESCRIPCION DEL OBJETIVO Y VIABILIDAD DE LA INVESTIGACIÓN**

Con el paso del tiempo y de forma inevitable, los materiales tienden a sufrir una degradación natural y constante. La propia fragilidad de los materiales constituyentes, junto con la acción de agentes externos asociados principalmente a agentes medioambientales, son los principales factores que provocarán la inestabilidad material.

En arquitectura, como medio para combatir este deterioro material, se han aplicado de forma tradicional capas de protección que adquieren la función de piel, permitiendo mayor protección ante el intemperie. Una vez que el material se encuentra en estado alterado, en mayor o menor medida, el único método que permite devolver las propiedades y configuración perdidas es la intervención material.

A lo largo de la historia, las intervenciones han ido evolucionando a partir de ensayos y errores en su aplicación, determinando su idoneidad respecto a los tratamientos y materiales aplicados. Para dichos procesos se han empleado materiales de diversa naturaleza y origen, no obteniendo en muchos casos los resultados esperados al derivar en la aparición de alteraciones. Así, a lo largo de la historia de la disciplina se han ido descartando productos, o limitando su uso en unas condiciones determinadas y con una forma de aplicación concreta.

Para determinar las propiedades que presentan los productos consolidantes de nuevo desarrollo, deberán probarse mediante un exhaustivo estudio en laboratorio, obteniendo resultados que respalden su viabilidad de utilización en el campo patrimonial. Este estudio controlado proporciona información preliminar sobre sus propiedades, debiendo tomarse únicamente como material de referencia, ya que no es hasta su aplicación y exposición a condiciones reales, cuando se determine realmente su idoneidad.

Esta investigación surge como respuesta a la inquietud por la búsqueda de materiales de nueva aplicación que compartan naturaleza con el original, aportando a la disciplina de la restauración una nueva posibilidad. Así, este estudio se basará en la caracterización del FCC con la finalidad de poder incluirlo como posible material de intervención en elementos de tierra. El objetivo por tanto, no solo será probar su efectividad, sino determinar sus propiedades y unas pautas óptimas para su aplicación, relacionándose con el porcentaje y las posibles modificaciones que puede presentar a lo largo de la vida del material.

xii

## **RAZÓN DE LA INVESTIGACION**

El interés por este estudio surge a partir de las asignaturas de “Legislación, Economía y Ejecución de las obras de conservación” “Tecnología avanzada aplicada a la conservación del Patrimonio arquitectónico” y “Ensayos y técnicas no destructivas aplicadas en la diagnosis de las construcciones históricas” impartidas en el Máster de Conservación del Patrimonio arquitectónico (UPV), donde se desarrollaron temas en relación con los métodos de intervención en inmuebles patrimoniales.

Estas se basaron en la experiencia del profesorado para exponer pautas generales a tener en cuenta a lo largo de una intervención aportando perspectiva multidisciplinar acerca de los diferentes campos que confluyen en la conservación-restauración del patrimonio. Así, se abordaron temas concretos, siendo los relacionados con la química de los materiales aplicados en intervención y el porqué de su empleo, los temas que despertaron un interés personal. Esta situación, sumada a los conocimientos previos sobre la materia, será la razón de iniciar esta investigación.

Además, las ponencias de profesionales invitados, permitieron conocer en mayor profundidad cómo ha de plantearse una intervención sobre este tipo de patrimonio no solo en relación con los métodos y formas de intervención, sino con las dificultades que han de tenerse en cuenta durante el proceso de ejecución y cómo han de afrontarse. Así, se confirmó la necesidad general de realizar trabajos relacionados con la consolidación, reintegración y reconstrucción de las estructuras patrimoniales. Esta situación permitió ampliar conocimientos acerca de dichos procesos, siendo junto con el interés personal sobre materiales de reciente desarrollo y aplicación, las líneas que delimiten esta investigación.



## OBJETIVOS DE LA INVESTIGACION

La investigación presentada toma como referencia el estudio realizado por Piles y co. (2005), donde se determinó la posibilidad de emplear la adición de FCC en morteros de cal con un fin destinado a la restauración. Esta conclusión se basa en el aumento de la resistencia obtenida por los morteros adicionados en comparación con los morteros de cal empleados de forma general en intervenciones patrimoniales. Este mismo estudio concluye además un aumento de la durabilidad de dichos morteros ante ciclos de hielo-deshielo y medios agresivos, presentándolo como material con mayor estabilidad respecto a morteros sin adición.

Tomando como punto de partida los datos aportados por las tesis doctorales consultadas, el trabajo que se presenta se centrará en determinar la viabilidad del empleo del FCC como posible material a tener en cuenta en las intervenciones más habituales sobre patrimonio construido con tierra. Los objetivos planteados tratan de evaluar las propiedades que aporta el residuo en relación con tres métodos de aplicación expresados en los siguientes puntos;

- Determinar las propiedades de los morteros de cal con adición del FCC con el fin de poder considerarlo entre los materiales a tener en cuenta en intervenciones de carácter estructural. De él se evaluará el aporte de propiedades en comparación con los morteros de cal y de base cementicia, siendo dos materiales ampliamente usados en esta clase de intervenciones. A partir de los resultados obtenidos se propondrá como material sustituto de los morteros de cemento, ampliamente usados durante el pasado siglo debido a sus propiedades, pero cuya aplicación ha provocado la aparición de patologías en inmuebles patrimoniales debido a la incompatibilidad entre materiales.
- Estudiar la posibilidad de adición del residuo como estabilizante en morteros de tierra, empleados en procesos de restitución del material perdido. Esta aplicación se ha pensado conveniente al ser un tratamiento común en intervenciones donde el material original ha perdido sección. De esta forma se evaluará el aporte de resistencia y durabilidad ante agentes atmosféricos, en comparación con mezclas sin adición. El objetivo de ensayar esta forma de aplicación pretende estudiar la viabilidad de dicha mezcla como posible material de acabado en inmuebles de tierra castigados por los agentes climáticos.
- Estudiar la posibilidad de aplicarlo de forma superficial en combinación con Nanocal. Esta aplicación se ha creído de interés por la necesidad de dar consistencia al material deteriorado como paso previo a la reconstrucción material. Este objetivo se justifica por la necesidad de aportar cohesión al material sobre el que se asentará el añadido en intervenciones de reintegración superficial. Además, esta aplicación se cree viable al suponer que tras su aplicación aumentará el nivel de cohesión entre la zona tratada y el material añadido, al tratarse de un material altamente reactivo en combinación con hidróxido de calcio.

xiii

## JUSTIFICACIÓN

La evolución tecnológica y de los sistemas de información permiten una constante ampliación de conocimientos y aplicación de nuevos productos, aportándose ininterrumpidamente nueva información sobre la renovación de los mismos. A su vez, la aplicación de estos conocimientos no se limita a la disciplina donde se han desarrollado sino que, la evolución de los diferentes campos de investigación se basa en el reaprovechamiento de conocimientos útiles, contribuyendo al crecimiento global.

En la disciplina de restauración, la investigación sobre materiales se encuentra en constante desarrollo. La ampliación de conocimiento acerca de nuevos productos y métodos permiten dar solución a las limitaciones actuales, perfeccionando con cada avance las técnicas de restauración conocidas.

El bagaje de conocimientos sobre los materiales empleados, tanto en el pasado como en la actualidad, permite determinar las preferencias y características buscadas en el desarrollo de nuevos productos. Hasta el momento, los inorgánicos e organosilíceos han sido los que mejores resultados han mostrado con el paso del tiempo. Esto se debe a que su acción se basa en reacciones naturales con la materia, como la precipitación, carbonatación o la acción puzolánica, quedando enlazados de forma química en el interior de la red porosa.

Gran parte de las cenizas procedentes de la incineración de residuos tienen un carácter puzolánico muy activo, pudiendo ser una cualidad buscada en intervención material. Tras una amplia búsqueda entre productos de esta clase, descartando numerosos al no poseer unas características mínimas, se optó por el estudio del FCC como material de ensayo. Este producto, inerte y de apariencia pardo-blancuzca, presenta propiedades puzolánicas muy activas, por lo que a priori muestra unas características idóneas.

En los datos aportados por las investigaciones realizadas por el Departamento de Ingeniería de la Construcción de la Universitat Politècnica de València y la Universidad Nacional de Colombia (Sede Medellín), muestran el empleo de esta ceniza como adición al cemento Portland y como material en prueba para la consolidación de suelos. Hasta el momento se han obtenido resultados propicios, apoyando la idea de presentarlo como posible material susceptible de ser empleado en el ámbito patrimonial. De esta forma, esta investigación toma como referencia los estudios ya realizados, donde se establecen sus características y su comportamiento, para fundamentar la investigación propuesta.

Además del óptimo comportamiento documentado, otra de las razones de la elección de dicho producto, es su valor medioambiental al considerarse la reutilización del mismo. Actualmente el FCC es un residuo inerte procedente de la industria petroquímica, del cual no se conoce utilidad salvo las mencionadas investigaciones y como producto de relleno de pavimentos de tierra. En un mundo donde los productos derivados del petróleo se usan de forma tan abundante, la producción de este es extremadamente alta, conllevando con ello la generación de residuos. De esta forma, la visión de reutilización se considera entre otras como una característica a tener en cuenta en la aplicación de este.

xiv

## **METODOLOGÍA**

La elaboración de esta investigación se desarrolló en tres fases ordenadas; siendo una primera de aproximación y recopilación bibliográfica, una segunda fase de análisis y organización de la información recogida y una última fase de ensayo y elaboración de conclusiones.

Así pues, la primera etapa de la investigación se centró en la búsqueda y recopilación de la bibliografía necesaria, pretendiendo abarcar la totalidad de los temas vinculados con el estudio. Esta primera etapa se entendió como la recolección de información sobre la que basar la investigación, tomándose como referencia grandes publicaciones de temática general, que permitieron establecer el estado del arte sobre arquitectura de tierra. Este proceso se inició por medio de los títulos disponibles en la biblioteca y repositorio de la Universitat Politècnica de València. Tras su lectura, y a partir de los trabajos doctorales tomados como referencia para dicho trabajo, comenzó una búsqueda más específica tratando de profundizar en el tema concreto de estudio.

La organización de esta información permitió su síntesis en tres bloques diferenciados, abordando la materia desde una perspectiva global, hasta los puntos de interés concretos del trabajo que se presenta. Este planteamiento trató de facilitar una mejor comprensión de los bloques finales, siendo los que recojan documentación concreta sobre el tema de estudio. Se creyó que esta distribución permitiría relacionar la información aportada en cada uno de ellos con mayor facilidad. A continuación se hará una relación de los bloques con su temática relacionada.

### **BLOQUE I. ARQUITECTURA DE TIERRA**

### **BLOQUE II. MÉTODOS DE INTERVENCIÓN**

### **BLOQUE III. MÉTODOS DE INTERVENCIÓN PROPUESTOS. FASE EXPERIMENTAL**

En el primer bloque se planteó una contextualización acerca de los criterios y valores a tener en cuenta durante una intervención, realizando a su vez una aproximación sobre las diferentes tipologías arquitectónicas de tierra, identificando de ellas el estado en el que suelen hallarse. Esto permitió relacionar dicho estado con las partes más vulnerables de esta arquitectura, posibilitando el estudio de las patologías más comunes que presenta este tipo de inmuebles.

La organización de esta información ha pretendido proporcionar una visión del estado actual y del devenir de inmuebles patrimoniales construidos con tierra en sus diversas variantes. A su vez, esta perspectiva aporta unos criterios y valores que han de considerarse para una adecuada intervención. Así, el planteamiento del bloque se pretende explicar el por qué de dicha degradación a través del estudio de la tierra como material de construcción y de los principales fenómenos relacionados con su degradación. Con el fin de dar una explicación consecuente, estas nuevas conclusiones se volverán a relacionar con las patologías anteriormente identificadas, examinando en este caso los procesos físico-químicos implicados en el deterioro material.

Esta recopilación permitirá una mayor comprensión del por qué del estado en el que se encuentran numerosos ejemplos de arquitectura de tierra. Tomando como base estas conclusiones y a partir de proyectos consultados, se determinará una relación de metodologías de actuación más habituales, de las que destacan tres; esto es, consolidación superficial, reintegración y reconstrucción. Dichos procedimientos se explicarán de forma breve a lo largo del bloque II, identificándose los materiales y procedimientos con los que habitualmente se trata este tipo de patrimonio. Al mismo tiempo se relacionará con la problemática asociada con algunas intervenciones, con el fin de concienciar sobre los riesgos relacionados con la aplicación de productos desde el desconocimiento. El conocimiento de esta información permitirá introducir a los materiales experimentales propuestos, determinando la idoneidad de su aplicación y extrayendo conclusiones acerca de las posibles ventajas y desventajas de su uso.

El último de los bloques recoge la información aportada por los ensayos realizados. Estas pruebas tienen la finalidad de determinar la viabilidad de su aplicación en relación a las tres metodologías de intervención comentadas. Los ensayos realizados se centrarán en la caracterización físico-mecánica, aportando datos sobre las propiedades de dichos materiales y el comportamiento de estos ante la acción del agua, al ser el principal fenómeno de degradación.

Este estudio se concibió como una primera aproximación acerca de la introducción del catalizador gastado de craqueo catalítico como posible material a tener en cuenta en procesos de restauración. De él, se quiere determinar su viabilidad en relación a la aportación de propiedades, por lo que este estudio se debe tomar como el inicio de un campo de estudio. Lo que se pretende con las conclusiones aportadas es proporcionar una base que permita continuar el estudio en mayor profundidad.

## INTRODUCCIÓN AL TRABAJO

La incidencia constante de agentes atmosféricos sobre la arquitectura genera el debilitamiento de los materiales presentes con carácter acumulativo, por lo que de forma tradicional se han desarrollado métodos de protección que permiten asegurar la estabilidad de las partes y del conjunto. De forma general estas tareas consisten en el mantenimiento y refuerzo de las partes más vulnerables, siendo la base y coronación, además de la aplicación periódica de capas de protección.

Al realizarse de forma continua y sistemática, estos tratamientos aseguran su estabilidad, permitiendo una mayor durabilidad y pervivencia en el tiempo. Si por el contrario se interrumpen, el carácter acumulativo de los efectos degradantes derivaría en la aparición de patologías, que acabarían afectando a la integridad estructural del inmueble. Ante esta situación, durante el proceso de restauración se debe priorizar la devolución de las propiedades perdidas, ya que por el contrario la intervención sobre un material inestable, podría generar un daño mayor sobre la preexistencia.

Esta investigación se basará en las conclusiones aportadas por las tesis doctorales tomadas como referencia, "Arquitectura tradicional de tierra en España. Caracterización constructiva, fenómenos de degradación y dinámicas de intervención" "La restauración y la rehabilitación de la arquitectura tradicional de tierra. El caso de Aragón" y "La restauración de la arquitectura de tapia de 1980 a la actualidad a través de los fondos del Ministerio de Cultura y del Ministerio de Fomento del Gobierno de España. Criterios, técnicas y resultados", donde se realizó un estudio acerca de las patologías e intervenciones tomadas como más frecuentes. Esta información permite concluir en una serie de acciones y tratamientos presentados como los más efectivos y acordes a los criterios de intervención. En base a esta información se estudiará cada metodología de intervención, relacionando cada tratamiento con el material de intervención óptimo. Esta situación permitirá plantear los tres materiales de intervención propuestos, siendo los más respetuosos tanto con el inmueble como con una adecuada intervención

xvi

La alteración del material se relaciona con la pérdida de cohesión, derivando en una pérdida de las propiedades que presentaba el material en el momento de su puesta en obra. Esta debilidad material presenta un carácter acumulativo, por lo que de forma general se puede asociar con la merma de sección de la fábrica patrimonial. Como se reflejará a lo largo del texto, los tratamientos que tienen la finalidad de restituir y recuperar tanto la configuración como las propiedades y valores del inmueble, relacionándose con los tratamientos de consolidación, reintegración y reconstrucción.

El trabajo que se presenta tiene la finalidad de evaluar tres materiales, siendo estos un mortero de tierra estabilizada, un mortero de cal con adición puzolánica y un consolidante superficial, tratando de determinar como el empleo del FCC influye en las propiedades finales. Además se debe evaluar su evolución y rendimiento con respecto al tiempo de curado, ya que es determinante conocer las posibles modificaciones que pueden tener lugar en los materiales de reciente desarrollo. Esto se debe a que los procesos mencionados tienen connotaciones de irreversibilidad, por lo que contar con registros acerca de su comportamiento a largo plazo es imprescindible para asegurar que su aplicación no genere futuras alteraciones o patologías.

El catalizador gastado de craqueo catalítico es un residuo procedente de la industria petroquímica empleado en el proceso de refinamiento del crudo. En dicho proceso, el craqueo (material virgen) es utilizado para separar los diferentes compuestos, y finalizada su vida útil, se almacena como residuo inerte. La producción constante de las refinerías genera globalmente al año un total de 400.000 toneladas de este residuo, existiendo pocas aplicaciones conocidas.

Al presentar en su composición química óxidos de silicio y aluminio, se considera un material de carácter puzolánico muy activo, presentando una alta capacidad de reaccionar con el hidróxido de calcio  $\text{Ca(OH)}_2$ . Como resultado de esta interacción, el producto resultante adquiere mayor resistencia a la compresión y la mejora en relación con su durabilidad. Hasta el momento ha sido empleado sustituyendo parcialmente al cemento portland, incrementando la resistencia a la compresión entre el 10 y 26% (Chen et al., 2004; Paya et al., 2009; Tseng et al., 2005). En los últimos años se ha comenzado a probar como consolidante de suelos dando también buenos resultados. Por otra parte, estudios recientes sobre la materia, determinaron la posibilidad de sustitución del FCC por el cemento Portland en morteros o pastas, actuando este como adición puzolánica (Payá y col. (2009,2011), siendo estos datos los que faciliten la presente investigación.

Este bagaje y las propiedades que presenta el material hacen que se pueda considerar como material viable en procesos de consolidación. Por ello esta investigación tiene como finalidad la caracterización de su comportamiento sobre elementos arquitectónicos elaborados con tierra, evaluando las propiedades que puede llegar a aportar a dicho material y evaluar su estabilidad con el tiempo.



# B1. ARQUITECTURA DE TIERRA 01

## 01. Contextualización de la situación actual.

### Arquitectura de tierra

- i. Caracterización de la arquitectura de tierra.
- ii. Pautas de intervención sobre patrimonio arquitectónico.
- iii. Estado de conservación de la arquitectura.

## 02. Tapia

- i. Arquitectura vernácula de tierra en la península
- ii. Técnica constructiva
  - a. Proceso constructivo
  - b. Principales variantes constructivas
  - c. Tierra como material de construcción.
  - d. Principales agentes de deterioro y causas de alteración y patología.
  - e. Principales operaciones sobre arquitectura de tierra

## 01. Contextualización de la situación actual. Arquitectura de tierra.

El creciente interés durante el siglo anterior por la conservación de la arquitectura vernácula, permite poner en valor una de las tipologías constructivas populares más olvidada y frágil. Esta arquitectura debe ser entendida como la expresión de identidad cultural de una comunidad en relación a su evolución y adaptación al medio en unas condiciones históricas y socioeconómicas concretas<sup>1</sup>. Según el Plan Nacional de Arquitectura, se debe considerar como un referente de identidad de la comunidad que la ha generado, resultado de experiencias y conocimientos compartidos, transmitidos y enriquecidos de una generación a otra, formando por ello parte de la memoria colectiva<sup>2</sup>.

Según la Carta de Cracovia<sup>3</sup>, cada elemento particular transmite unos valores que la singularizan y definen, considerándose como testimonios documentales únicos del modo de hacer tradicional, en muchos casos olvidado. Así se deben entender como ejemplos de representación tangibles de una tradición constructiva propia, debiendo por ello luchar por su salvaguarda. Su conservación permite velar y proteger los valores que representa, no solo relacionándose con su materialidad sino con su tradición constructiva local, siendo el resultado de la adaptación del sistema a las necesidades y recursos locales

El tiempo, la falta de mantenimiento y desuso de esta arquitectura, han influido en su deterioro, resultado en muchos casos de su estado de conservación en riesgo, disminuyendo por ello los ejemplos conservados. Así, tal como pone de manifiesto el Plan Nacional de Arquitectura Tradicional; *“la arquitectura tradicional lleva muchas décadas de abandono, transformación y desaparición, sin que la sociedad acometa un esfuerzo colectivo por la salvaguardia de estos testimonios de la vida de un pueblo”*<sup>4</sup>. Esta situación, sumada a la carencia de herramientas de divulgación y catalogación, acentúan su olvido.

De esta forma, la arquitectura debe ser constante objeto de estudio, como única vía de posibilitar un mejor entendimiento que permita luchar por su protección. El análisis de esta arquitectura olvidada, permite no solo evaluar su estado, sino identificar las principales patologías que afectan a su estabilidad, pudiendo establecer unas pautas de intervención más efectivas que permitan la mejora de su conservación.

02

### i. Caracterización y valores de la arquitectura de tierra. Riesgos asociados a su conservación.

El término arquitectura de tierra, fue adoptado en 1980 durante la Conferencia Internacional sobre Construcciones con Tierra<sup>5</sup>, en base a su importancia como material de construcción a lo largo de la historia de la civilización. La tierra ha permitido la configuración de un amplio abanico de técnicas de constructivas, además de múltiples variantes regionales, extendidas de forma global, considerándose por ello como uno de los principales materiales de construcción tradicionales<sup>6</sup>.

Bajo el término de Arquitectura Tradicional se recoge una amplia variedad de tipologías constructivas que surgen de forma natural con el asentamiento de una comunidad en un territorio<sup>7</sup>. Cada una de las variantes de un sistema, responden a la una necesidad de adaptación al medio, donde sirviéndose de recursos naturales inmediatos, se da solución a las exigencias de cada zona. De esta forma la climatología, el terreno y la funcionalidad, darán como resultado un modelo arquitectónico concreto, definiéndose este como parte de la expresión e identidad de un colectivo<sup>8</sup>.

1 VV.AA. Carta del Patrimonio vernáculo construido. Consejo internacional de monumentos y sitios (1999)

2 VV.AA. Plan Nacional de Conservación de Arquitectura Tradicional. (2014). Consejo de Patrimonio Histórico. Ministerio de Educación, Cultura y Deporte.

3 Carta de Cracovia (2000) Conferencia Internacional Cracovia 2000". " ...Cada comunidad, teniendo en cuenta su memoria colectiva y consciente de su pasado, es responsable de la identificación, así como de la gestión de su patrimonio. Los elementos individuales de este patrimonio son portadores de muchos valores, los cuales pueden cambiar en el tiempo."

4 VV.AA. Plan Nacional de Arquitectura tradicional. (2015). Ministerio de Educación, Cultura y Deporte.

5 M. A. RODRÍGUEZ, I. MONTEAGUDO, B. SAROZA, P. NOLASCO, Y. CASTRO. (2011). Aproximación a la patología presentada en las construcciones de tierra. Algunas recomendaciones de intervención. Informes de la Construcción Vol. 63, 523, 97-106, julio-septiembre.

6 ROCHA, M. y JOVÉ, F. (2015). Técnicas de construcción con tierra. Introducción. Cuadernos de construcción con tierra. Editorial Argumennum

7 AA.VV. (2017). Proyecto Coremans. Criterios de intervención en la arquitectura de tierra. Ministerio de educación, cultura y deporte.

8 VV.AA. (2016). Estudio de buenas prácticas en las intervenciones sobre arquitectura tradicional española. Instituto Universitario de Restauración del



Para poder realizar una caracterización de la arquitectura tradicional no solo se deben tener en cuenta la materialidad y ubicación de esta, sino la evolución de los modelos, y el porqué de estas modificaciones. La arquitectura tradicional se basa en modelos abiertos<sup>9</sup> en base a necesidades funcionales y de adaptación concretas, los cuales han sufrido variaciones generacionales. La evolución de estos modelos responde a su vez a la influencia de procesos históricos y socioeconómicos que conforman los valores materiales e inmateriales de cada colectivo, constituyendo las señas de identidad cultural.

ICOMOS<sup>10</sup> aporta en “La Carta del patrimonio vernáculo construido”<sup>11</sup> una serie de pautas para facilitar el reconocimiento de este tipo de arquitectura:

- Un modo de construir emanado de la propia comunidad.
- Un reconocible carácter local o regional ligado al territorio.
- Coherencia de estilo, forma y apariencia, así como el uso de tipos arquitectónicos tradicionalmente establecidos.
- Sabiduría tradicional en el diseño y en la construcción, que es transmitida de manera informal.
- Una respuesta directa a los requerimientos funcionales, sociales y ambientales.
- La aplicación de sistemas, oficios y técnicas tradicionales de construcción.

A su vez, es necesario analizar el objeto arquitectónico conservado como el resultado de la superposición de estratos, y añadidos realizados a lo largo del tiempo. Borrar fases históricas de interés con la pretensión de llegar a su aspecto original, se debe considerar un error, al conllevar un riesgo de falso histórico, ya que en su mayoría, no se corresponde con la imagen pasada. Los procesos de eliminación, supone además una amenaza para la materialidad del bien, ya que pueden implicar un elevado grado de destrucción material, suponiendo una pérdida irreversible.

La arquitectura tradicional presenta unos valores que la definen y diferencian como tal, pudiendo relacionarse tanto con su materialidad, como con los valores inmateriales que esta representa. Entre estos últimos destacan como principales su valor histórico y cultural, valor monumental y de originalidad, el valor artístico, estético, de autenticidad, el simbólico y social<sup>12</sup>. Se trata de una arquitectura funcional que surge como respuesta a las necesidades cotidianas, empleando para las diferentes soluciones constructivas recursos y materiales disponibles de forma natural en la zona. Esta adaptación al entorno establece una integración con el medio para la que fue concebida, generando una visión de conjunto y formando parte del paisaje. Esta serie de valores son propios de cada comunidad, dotándola de una personalidad arquitectónica propia y reflejando en su conjunto una gran riqueza y variedad cultural.

Cada región desarrolla una tipología característica, basada en la transmisión de conocimientos. Las figuras asociadas con la transmisión de este legado son el maestro de obra y los artesanos locales, encargados de la planificación y proceso constructivo, resultando en una forma de hacer única, que se refleja en la arquitectura resultante. Tradicionalmente, debido a la competencia gremial, los conocimientos constructivos y mejoras de los sistemas se transmitían de forma oral de maestro-aprendiz<sup>13</sup>. La falta de registros documentales y el olvido de la técnica, hace que el único método de estudio de dichas técnicas sea a través del examen y análisis de la arquitectura conservada. Así, en la materialidad del bien residen todos los valores que la arquitectura tradicional transmite, por lo que su conservación debe tratarse como uno de los principales objetivos de un proyecto de intervención.

---

patrimonio. Universitat Politècnica de Valencia

9 W.AA. (2016). Estudio de buenas prácticas en las intervenciones sobre arquitectura tradicional española. Instituto universitario de restauración del patrimonio. Universitat Politècnica de Valencia

10 Consejo internacional de monumentos y sitios

11 W.AA. Carta del patrimonio vernáculo construido. Consejo internacional de monumentos y sitios (1999)

12 W.AA. (2016). Estudio de buenas prácticas en las intervenciones sobre arquitectura tradicional española. Instituto universitario de restauración del patrimonio. Universitat Politècnica de Valencia

13 GÓMEZ-PATROCINIO, F.J. (2018) Arquitectura tradicional de tierra en España. Caracterización constructiva, fenómenos de degradación y dinámicas de intervención. Tesis Doctoral. Directores: Dra. Camilla Mileto, Dr. Fernando Vegas López-Manzanares y Dra. Lidia García Soriano. Universitat Politècnica de València. pág. 67

Los edificios vernáculos se deben considerar como una arquitectura dinámica, relacionada de forma constante con el ser humano y su historia. A lo largo de esta, la arquitectura tiende a adaptarse a las necesidades, pudiendo llegar a modificar su configuración en base al cambio de función. Estas modificaciones forman parte de la evolución e historia popular, por lo que su eliminación debe justificarse en la carencia de interés del añadido.

A modo de simplificación los valores de la arquitectura tradicional se pueden reflejar de una forma más clara en los siguientes puntos,

- Constituye una parte sustancial del Patrimonio Cultural
- Está relacionada con el Patrimonio Cultural inmaterial
- Se trata de una de las principales señas de identidad de los colectivos que la han creado
- Está vinculada al modo de vida y a la organización social de un colectivo
- Creada y adaptada a los condicionantes naturales del territorio, responde a un clima determinado, está constituida por materiales del entorno y se adapta al emplazamiento.
- Forma parte de un paisaje.
- Se caracteriza por ser dinámica.
- Se trata de obras anónimas y su creación se relaciona con un colectivo.
- Las técnicas constructivas presentes son de carácter tradicional.
- La reutilización de materiales está presente en la mayoría de los ejemplos.
- Se muestra como una arquitectura sostenible.

### Principales riesgos asociados a su conservación

04

A lo largo de lo expuesto anteriormente quedan patentes los valores e importancia de la arquitectura vernácula. De la misma forma, su devaluación como arquitectura en base al menosprecio por los sistemas constructivos y materiales tradicionales, ha puesto en riesgo su conservación. Esta falta de valor e interés por parte de la sociedad se debe relacionar con los factores actuales culturales, sociales y económicos<sup>14</sup>

Ante esta situación, el Plan Nacional de Arquitectura Tradicional, identifica los principales riesgos relacionados con su conservación con el fin de concienciar sobre la deriva de la arquitectura vernácula.

**Globalización y uniformidad de los valores culturales.** La producción contemporánea se caracteriza por la estandarización, buscando una reducción de aspectos económicos y tiempos de producción. Estos modelos provocan el menosprecio por las técnicas de producción tradicionales, las cuales requieren de tiempos de ejecución más meticulosos, condenándolas a un segundo plano.

**Pérdida de funciones y conocimientos.** La arquitectura tradicional busca dar solución a una necesidad o función. Así, la progresiva desaparición y pérdida de las formas de vida tradicionales relacionada con la despoblación rural, ha llevado al abandono tanto de la arquitectura como de la técnica constructiva propia, debido a las dificultades de transmisión de los conocimientos.

**Falta de valoración y sensibilización.** En base a los cambios socioeconómicos, el abandono del medio rural ha provocado un abandono progresivo de la arquitectura tradicional y por ello la devaluación de su valor patrimonial. Ante la falta de sensibilización de las manifestaciones arquitectónicas vernaculares se debe luchar por la difusión de sus valores<sup>15</sup>, tratando de transmitir y fomentar su reconocimiento. Según el plan de buenas prácticas, “La voluntad de conservación de un determinado objeto arquitectónico está directamente relacionada con el valor que se le otorga”.

14 VV.AA. (2016). Estudio de buenas prácticas en las intervenciones sobre arquitectura tradicional española. Instituto Universitario de Restauración del patrimonio. Universitat Politècnica de Valencia

15 Desarrollados en pág. 03, 04

**Carencia de medidas, normativa y difusión.** La insuficiencia de medidas destinadas al estudio, mantenimiento, conservación y rehabilitación de la arquitectura tradicional provocan la desprotección de esta, condenándola a su pérdida. Esta falta de herramientas ralentiza su reconocimiento y puesta en valor de este patrimonio, impidiendo progresar en su preservación y difusión.

Una de las herramientas fundamentales para su salvaguarda es la creación de catálogos que permitan una mejor comprensión acerca del conocimiento histórico, morfológico, técnico y cultural relacionado con la su tradición constructiva<sup>16</sup>. La falta de catalogación de la arquitectura vernácula impide la defensa de sus valores, al plantearse intervenciones que no presentan unas prioridades adecuadas de intervención.

**Criterios de intervención inadecuados.** La falta de sensibilidad ante esta arquitectura y el desconocimiento por las técnicas tradicionales por parte de los profesionales, ha provocado la pérdida de sus valores tradicionales. El empleo de materiales y técnicas contemporáneas en intervenciones ha contribuido a desvirtuar el edificio intervenido, modificando su interpretación y significado original. Además, la introducción de materiales como el cemento y el acero, pueden suponer, en contacto con los materiales tradicionales como la tierra, una fuente de incompatibilidades.

**Factores de riesgo ambientales.** La arquitectura se concibe para convivir con un entorno caracterizado por unas condiciones climáticas concretas. El cambio climático y el abandono del entorno, son causas de alteración acumulativas, que se suman en su deterioro.

## ii. Pautas de intervención sobre patrimonio arquitectónico

A lo largo de la historia de la disciplina de conservación y restauración, se han ido estableciendo conceptos hoy en día considerados como fundamentales. A lo largo del tiempo, la sucesión de reuniones, cumbres internacionales y conferencias, han ido conformando el carácter de los criterios y pautas de intervención que tratan de velar por la transmisión de los valores que representa la arquitectura tradicional.

Dichos criterios básicos, son el resultado de un profundo análisis tanto de aspectos éticos como materiales, por lo que se consideran de obligado cumplimiento con el fin de plantear una adecuada intervención. En el pasado, estas pautas no estaban consolidadas, empleándose por ello una serie de criterios de intervención inadecuados, dando lugar a alteraciones que ponen nuevamente en riesgo el inmueble tratado. Así, y con el fin de proporcionar un tratamiento eficaz y duradero, se deben tener en cuenta los principios a desarrollar, con el objetivo de plantear una intervención respetuosa.

Antes de definir estos criterios se debe señalar la singularidad de cada proyecto, ya que cada edificio representa unos valores únicos que deben estudiarse y tratarse de forma individual. Una intervención debe tratar de preservar el bien tanto desde un punto de vista material como inmaterial, por lo que debe existir un estudio previo, donde se reflejen los valores con el objetivo de velar por ellos. Así, se configura una idea clara de lo que este representa culturalmente, permitiendo conformar una base para la toma de decisiones, tanto durante el proceso de redacción del proyecto como en su puesta en obra.

### Mínima intervención

Se considera como uno de los principios fundamentales de la restauración al tratar de asegurar la transmisión de valores, velando por la materia original. Así, se concibe como la actuación con el menor impacto, al intervenir únicamente sobre lo necesario tratando de no modificar la materialidad de las construcciones<sup>17</sup>. Este criterio pretende velar por su conservación integral, ciñéndose en dar solución tanto a las causas de deterioro, eliminándolas, como a los procesos de alteración material<sup>18</sup>.

16 VV.AA. (2016). Estudio de buenas prácticas en las intervenciones sobre arquitectura tradicional española. Instituto Universitario de Restauración del patrimonio. Universitat Politècnica de Valencia. Pág. 90

17 VV.AA. Plan Nacional de Arquitectura tradicional. (2015). Ministerio de Educación, Cultura y Deporte

18 VV.AA. (2016). Estudio de buenas prácticas en las intervenciones sobre arquitectura tradicional

El incumplimiento de este principio supondría extralimitarse en la toma de decisiones, pudiendo ocasionar sobre el bien modificaciones que supongan la pérdida de los valores.

### Respeto a la originalidad del inmueble

Como se ha insistido hasta el momento, cada ejemplo arquitectónico representa unos valores intrínsecos únicos, siendo este testimonio histórico el que constituya su interés cultural. Así, la modificación de su carácter supondría la pérdida irreparable de sus valores tradicionales singulares.

Esta pauta busca también un respeto por la historicidad del inmueble<sup>19</sup>, debiendo por ello respetar las distintas etapas constructivas con interés, al formar parte de su evolución.

### Reversibilidad

Se trata de uno de los criterios de intervención básicos, planteado como una garantía en caso de que el tratamiento supusiera la alteración del edificio preexistente<sup>20</sup>. Así, los productos aplicados deben poseer un carácter reversible con el fin de poder proceder a su retirada. Con el paso del tiempo, muchos de los materiales empleados en restauración adquieren un carácter irreversible, relacionándose principalmente con su carácter insoluble.

Alcanzar la reversibilidad total puede conllevar la destrucción de la materia original al no poderse eliminar en su totalidad sin provocar pérdida material.

### Compatibilidad

Este concepto busca una buena relación entre materiales de intervención con los presentes en el edificio. Así, en base a este criterio se deben tener en cuenta los materiales que presenten una composición y propiedades similares al preexistente. La incompatibilidad se pone de manifiesto con la alteración de la materia original por la incorporación de materiales industriales de forma general<sup>21</sup>. Según el plan de buenas prácticas<sup>22</sup>, una intervención se considera compatible “...cuando los materiales aportados por la intervención, en su conjunto, no generan patologías derivadas de sus características químicas o físicas en el elemento arquitectónico intervenido.”

Así, los materiales que se presentan como similares y próximos a las propiedades del original son los materiales ya presentes en los bienes. Este criterio defiende el uso de las técnicas y materiales tradicionales correspondientes con la arquitectura preexistente, como forma de asegurar una mayor integración entre el edificio y la intervención a realizar al presentar las mismas características<sup>23</sup>.

Como ventajas de los materiales tradicionales frente a los de nueva producción se debe destacar<sup>24</sup>:

- Compatibilidad con las propiedades de los materiales presentes en el inmueble a intervenir, tales como resistencia, coeficientes de dilatación, y durabilidad.
- Composición química similar.
- Homogeneidad en el comportamiento entre ambos
- Mismas características y cualidades, tales como texturas, color y acabado

19 TERÁN BONILLA, J.A. (2004). Consideraciones que se deben tener en cuenta para la restauración arquitectónica. Revista conserva N°8

20 VV.AA. (2016). Estudio de buenas prácticas en las intervenciones sobre arquitectura tradicional española. Instituto universitario de restauración del patrimonio. Universitat Politècnica de Valencia pag. 729

21 VV.AA. (2016). Estudio de buenas prácticas en las intervenciones sobre arquitectura tradicional española. Instituto universitario de restauración del patrimonio. Universitat Politècnica de Valencia pag.720 “...dos materiales se consideran incompatibles cuando uno, generalmente el de nueva incorporación, puede ser fuente de patologías que afectan al material existente. Esto pasa con frecuencia en el caso de emplear materiales industriales como son fundamentalmente el cemento, el acero, las resinas y otros productos químicos para la consolidación, que en varios casos, han demostrado ser incompatibles con algunas construcciones y materiales tradicionales”

22 VV.AA. (2016). Estudio de buenas prácticas en las intervenciones sobre arquitectura tradicional española. Instituto universitario de restauración del patrimonio. Universitat Politècnica de Valencia pag. 730

23 ROCHA, M. y JOVE, F. (2015). Técnicas de construcción con tierra. Introducción. Cuadernos de construcción con tierra. Editorial Argumennum

24 TERÁN BONILLA, J.A. (2004). Consideraciones que se deben tener en cuenta para la restauración arquitectónica. Revista conserva N°8

## **Integración**

Este criterio tiene la finalidad de preservar el carácter estético de la intervención, con la finalidad de mantener una lectura continua, permitiendo una mejor comprensión de los valores a transmitir. El ojo tiene la capacidad de configurar una imagen de conjunto más rápida, cuantas menos distorsiones visuales existan. Así, el término de integración recoge la correlación entre materiales, texturas, colores y escalas, aportando cordura al conjunto al basarse en un diseño que permita el dialogo entre lo antiguo y lo nuevo. Tomando como referencia el art. 13 de la Carta de Venecia<sup>25</sup>, en el cual destaca que una intervención debe respetar todas las partes interesantes del edificio, su trazado tradicional, el equilibrio de su composición y sus relaciones con el medio ambiente.

Dicha relación entre los nuevos volúmenes debe basarse en un carácter discreto con el fin de no crear distorsiones visuales, siendo a su vez discernible con el fin de no inducir al falso histórico.

## **Legibilidad**

Este criterio basa su importancia en la distinguibilidad entre la intervención y la obra original, tratando de evitar que la intervención se aproxime a un falseamiento histórico. Esta situación se encuentra referenciada en la Carta de Venecia;

Art. 12. “Los elementos destinados a reemplazar las partes inexistentes deben integrarse armoniosamente en el conjunto, distinguiéndose claramente de las originales, a fin de que la restauración no falsifique el documento artístico o histórico”

## **Conservación y transmisión de los oficios tradicionales**

Este criterio trata de poner en valor el método constructivo tradicional, en base a la inclinación actual del uso de técnicas contemporáneas en restauración<sup>26</sup>. El desplazamiento de las técnicas tradicionales a causa de su devaluación y desconocimiento contribuyen a su olvido. Este criterio se debe relacionar con el empleo y fomento de las técnicas y materiales tradicionales durante la intervención, siendo por si los que presentan una mayor compatibilidad e integración con la arquitectura original<sup>27</sup>.

Se cree fundamental fomentar el impulso y concienciación de la recuperación de los oficios y técnicas tradicionales, asegurando la continuidad de la transmisión de sus valores.

## **Sostenibilidad**

Tras este principio se pone de manifiesto las ventajas que representa la arquitectura tradicional ante la construcción y producción de materiales moderna. De esta manera, los materiales tradicionales, elaborados de forma sencilla, son extraídos y empleados mediante técnicas tradicionales o semi-tradicionales, tratándose de materiales sostenibles con el medio. Del mismo modo, su extracción se produce en entorno local, favoreciendo el impulso de la economía local, al relacionarse con pequeñas empresas regionales.

A su vez, este concepto se relaciona con la sostenibilidad propia de la construcción, ya que el empleo de técnicas y materiales tradicionales fomentan una arquitectura con un equilibrio óptimo para su habitabilidad en relación de temperatura, humedad, ventilación y radiación solar, sin la inclusión de materiales contemporáneos, que puedan elevar el coste total.

25 VV.AA. Carta de Venecia (1964). Consejo internacional de monumentos y sitios. Artículo 13

26 VV.AA. (2016). Estudio de buenas prácticas en las intervenciones sobre arquitectura tradicional española. Instituto universitario de restauración del patrimonio. Universitat Politècnica de Valencia

27 VV.AA. Plan Nacional de Arquitectura tradicional. (2015). Ministerio de Educación, Cultura y Deporte. pág. 29. “La coherencia de las intervenciones y de las posibles incorporaciones contemporáneas se basará preferentemente en la utilización de los materiales, técnicas, oficios y saberes artesanos propios de esa arquitectura y el marco territorial y cultural”

### iii. Estado de conservación de la arquitectura. Principales estrategias de conservación.

Como se ha puesto de manifiesto, son múltiples los ejemplos arquitectónicos en un estado catalogable de mala conservación, el cual se relaciona con su abandono y por ello, falta de supervisión.

Con el fin de abordar una intervención adecuada a las necesidades, se debe considerar la realización de un estudio previo del estado de conservación, al tener por objetivo la identificación de las causas y patologías incidentes. Esta descripción permite la planificación de un proyecto acorde a los riesgos identificados, al ser en la clasificación de su gravedad donde se estimen las prioridades de las medidas a tomar. La forma genérica de clasificación responde a los siguientes niveles; buen estado de conservación, estado mejorable, mal estado de conservación y en ruina<sup>28</sup>.

Con la intención de considerar un método de evaluación más riguroso, se ha tomado como referencia el modelo de evaluación propuesto por la norma UNE-EN 19096. *Conservación del patrimonio cultural. Inspección del estado e informe del patrimonio cultural*. En el que tras la descripción y análisis del estado de conservación, se procede a la clasificación y evaluación de los síntomas presentes en la construcción. Así, dependiendo de la gravedad y la urgencia de actuación se establecerán las medidas oportunas. El estado del inmueble se deberá clasificar en función del grado de estabilidad estructural como: ligeramente deteriorada, amenazada de ruina y derruida, ya sea total o parcial<sup>29</sup>. Respecto a cada estado de conservación, existen de forma genérica unas medidas estandarizadas, que siguen los criterios de intervención comentados anteriormente. Estas medidas se expondrán con posterioridad en el apartado 02. II. e.

#### Edificaciones ligeramente deterioradas

Su estado de conservación se relaciona con la degradación del material constructivo. Este deterioro puede afectar a varios niveles, pudiendo abarcar desde los más superficiales hasta alcanzar la sección completa del muro/fabrica. Dichas alteraciones no suponen un riesgo estructural, considerándose como síntomas menores según la norma comentada<sup>30</sup>. El origen de estas patologías se atribuye de forma general a agentes de degradación natural y antrópicos, destacando dentro de estos últimos la falta de mantenimiento como ejemplo concreto.

La arquitectura de tierra necesita de inspecciones periódicas que permitan la identificación prematura de alteraciones, como forma de asegurar la aseguren un estado de conservación estable. Este proceso preventivo se debe realizar en base a la facilidad de degradación de los materiales constructivos presentes en arquitectura de tierra. De esta forma si las capas superficiales de protección presentan afecciones tales como grietas y desconchados, la incidencia de los agentes provocaría un aumento de la velocidad de degradación.

De esta forma, la norma tomada como referencia plantea una serie de recomendaciones de actuación para estos casos, siendo como decimos, la planificación de acciones de mantenimiento o conservación preventiva. Estas medidas con secundadas de forma general por el Plan Nacional y Documento de Buenas Prácticas, donde se afirma que “Las intervenciones sobre la arquitectura tradicional priorizarán el mantenimiento y la conservación de los bienes por encima de la rehabilitación”<sup>31</sup>.

Estas, consisten en un conjunto de acciones mínimas con el objetivo de prevención y control de los procesos de degradación a fin de anticipar las futuras necesidades del inmueble. Así, las inspecciones continuas y metodológicas, tienen como fin la identificación y eliminación de la causa de deterioro, como forma de prevenir futuras intervenciones de mayor dimensión. Se entienden como acciones preventivas inspecciones y limpiezas rutinarias y aplicación de acabados de protección y recubrimientos con el objeto de retardar la aparición de alteraciones o patologías<sup>32</sup> dirigidas a asegurar la integridad de los bienes

28 TEJERA, P. y ÁLVAREZ, O. (2012) Patología de las Construcciones. La Habana: Félix Varela,

29 ROCHA, M. y JOVE, F. (2015). Técnicas de construcción con tierra. Introducción. Cuadernos de construcción con tierra. Editorial Argumennum.

30 UNE-EN 19096. Conservación del patrimonio cultural. Inspección del estado e informe del patrimonio cultural

31 VV.AA. Plan Nacional de Arquitectura tradicional. (2015). Ministerio de Educación, Cultura y Deporte. Pág. 43

32 TERÁN BONILLA, J.A. (2004). Consideraciones que se deben tener en cuenta para la restauración arquitectónica. Revista conserva N°8. Arquitecto

## Edificaciones con riesgo de colapso

Se consideran en esta situación las construcciones que presentan un alto nivel de deterioro, afectando tanto a su materialidad como a su función estructural, pudiendo considerarlos en estado de riesgo. Dicho estado de conservación se debe a la falta de una identificación prematura de las alteraciones y patologías durante las labores de mantenimiento. Su detección a tiempo hubiera puesto solución a dicho proceso, reduciéndose por ello la gravedad asociada a la estabilidad de la estructura.

El riesgo de la situación estructural, puede responder a dos posibles causas; el carácter acumulativo de las alteraciones y degradaciones materiales que ha afectado a la totalidad de la sección así como los elementos de cimentación<sup>33</sup>, o relacionándose a su vez con una segunda por la falta de estabilización o movimientos del terreno, suponiendo la insuficiencia de capacidad portante provocada por asientos diferenciales<sup>34</sup>.

Tras una evaluación de la patología estructural y la identificación de los factores que han llevado a esta situación, los trabajos a realizar tienen por objetivo de erradicar y corregir las causas que han contribuido a dicho estado de riesgo. Manteniendo como referencia las medidas recomendadas por la normativa mencionada<sup>35</sup>, se deben plantear acciones de “reparación moderada”, las cuales en base a la gravedad de alteraciones y patologías, pueden diferenciarse en dos grados de actuación, siendo la restauración y la reintegración<sup>36</sup>.

Este tipo de acciones se deben entender como el conjunto de operaciones que tienen por objetivo dar solución a los problemas relacionados con el debilitamiento material y estructural<sup>37</sup>. Dentro de las acciones de restauración (acciones directas), destaca de especial importancia los tratamientos de consolidación, considerándose como el único tratamiento que permite la devolución de las condiciones de estabilidad pérdidas, que garantizando por ello la pervivencia de la estructura arquitectónica<sup>38</sup>.

Estas medidas tratan de aportar las propiedades resistentes pérdidas, tanto a nivel material como estructural. Así, dentro de este tipo de intervención se contemplan las tareas de recolocación y apuntalamiento correcto de muros y cubiertas, inyección de grietas y fisuras, restitución de los morteros y materiales perdidos en muros y consolidación superficial -aplicación de un consolidante- entre otras<sup>39</sup>.

En relación a las acciones de reintegración<sup>40</sup>, tienen por objeto la devolución de la unidad de conjunto a los elementos arquitectónicos un estado de deterioro y descontextualización avanzados. Dentro de estas acciones debe tener especial consideración las acciones de recomposición de los elementos originales y faltas presentes con los mismos materiales. Este método conocido como anastilosis<sup>41</sup> se debe considerar como la mínima reintegración<sup>42</sup> a realizar, debiendo basarse en documentación y nunca desde un punto de vista hipotético o conjetural.

---

de la Dirección de Estudios Históricos del INAH.

33 HERRERA CARDENETE, E. Departamento de construcciones arquitectónicas de la universidad de granada.

34 HERRERA CARDENETE, E. Departamento de construcciones arquitectónicas de la universidad de granada.

35 UNE-EN 19096. Conservación del patrimonio cultural. Inspección del estado e informe del patrimonio cultural.

36 TERÁN BONILLA, J.A. (2004). Consideraciones que se deben tener en cuenta para la restauración arquitectónica. Revista conserva N°8

37 ROCHA, M. y JOVE, F. (2015). Técnicas de construcción con tierra. Introducción. Cuadernos de construcción con tierra. Editorial Argumentum.

38 CHANFÓN OLMOS, C. (1979). Problemas Teóricos en la Restauración. México, Escuela Nacional de Conservación, Restauración y Museografía “Manuel del Castillo Negrete” INAH, 1979. p. 2.

39 ROCHA, M. y JOVE, F. (2015). Técnicas de construcción con tierra. Introducción. Cuadernos de construcción con tierra. Editorial Argumentum

40 ROCHA, M. y JOVE, F. (2015). Técnicas de construcción con tierra. Introducción. Cuadernos de construcción con tierra. Editorial Argumentum

41 CORREIA, M. (2007). De la teoría de la restauración a su aplicación al patrimonio en tierra. Apuntes vol. 20. Núm. 2. Pág. 202-219. Def. Anastilosis: ... “se entienden como operaciones de recomposición en estilo, de los edificios cuyos materiales originales se encuentran caídos y dispersos alrededor del edificio”

42 LARIOS VILLALTA, C. R. MANUAL DE CRITERIOS DE RESTAURACIÓN PARA LA ARQUITECTURA PREHISPÁNICA. Consultor de restauración. Programa de Desarrollo de Petén para la Conservación de la Reserva de la Biósfera Maya

## Edificaciones en ruinas

La definición del concepto de ruina se define según el Código Civil como;

*“El derrumbamiento o desprendimiento de parte o todo un edificio a consecuencia de no existir reparaciones necesarias del mismo por parte de los propietarios o en su caso el estado”<sup>43</sup>.*

Así, se debe entender como una situación extrema, al considerarse como la degradación avanzada de los elementos constituyentes, que impiden la continuidad de la función estructural de dicho edificio. Los métodos de intervención en estos casos se basan en la recomposición del conjunto, mediante la incorporación de materiales y técnicas, buscando que el conjunto vuelva a funcionar de forma homogénea. Estas operaciones requieren la inclusión de materiales, por lo que en base a los criterios de restauración, la selección de estos debe realizarse buscando la máxima compatibilidad, primando por ello los materiales de uso tradicional.

Tomando de nuevo las recomendaciones de referencia aportadas por la norma comentada<sup>44</sup>, en este caso se plantean acciones de reconstrucción y rehabilitación. Estas medidas se entienden como las acciones técnicas necesarias de recomposición y reposición de parte o la totalidad de los elementos que se encuentran destruidos o en riesgo, tratando de devolverle la función útil<sup>45</sup>. Este tipo de intervenciones buscan por lo general adaptar el edificio a un nuevo uso o a lograr el cumplimiento de las normas vigentes<sup>46</sup>.

43 TOLEDANO MARTÍNEZ, I. M. (2018) Comparativa de la legislación de ruina en España. Aplicación a un inmueble.tfg. Isabel María. Universidad politécnica de Madrid.

44 UNE-EN 19096. Conservación del patrimonio cultural. Inspección del estado e informe del patrimonio cultural.

45 TERÁN BONILLA, J. A. (2004). Consideraciones que se deben tener en cuenta para la restauración arquitectónica. Revista conserva Nº8

46 TERÁN BONILLA, J. A. (2004). Consideraciones que se deben tener en cuenta para la restauración arquitectónica. Revista conserva Nº8



## 02. Tapia

### i. Arquitectura vernácula de tierra en la península.

El empleo de la tierra como material de construcción ha estado ligado con la arquitectura de forma histórica desde el inicio del asentamiento humano<sup>1</sup>. Destacan como testigos de esta afirmación las numerosas ruinas arqueológicas correspondientes a diferentes culturas - persa, asiria, egipcia, babilónica, griega o romana-<sup>2</sup> donde empleaban dicho material para levantar sus construcciones.

En la península, la arquitectura de tierra presenta una máxima difusión durante el imperio romano, siendo el caso concreto de la tapia como la técnica más extendida. Los restos conservados se corresponden en su mayoría con edificios de carácter monumental<sup>3</sup>. Este tipo de arquitectura consta como la más extendida durante el asentamiento romano, continuando durante la Edad media aunque con menor presencia, siendo con el inicio de la revolución industrial, en base a la inclusión de nuevos materiales de construcción, cuando comience la decadencia de este tipo de sistemas constructivos<sup>4</sup>.

No será hasta la década de los 70 (1973-1979), cuando comience la revalorización de las técnicas tradicionales debido a la crisis económica y del petróleo. Esta situación favoreció la recuperación de los sistemas tradicionales, al primar de nuevo aspectos de sostenibilidad medioambiental<sup>5</sup>.

El carácter inagotable y su facilidad de acceso, ha fomentado su uso de forma global, resultando en un amplio número de variantes de los sistemas constructivos en base a la heterogeneidad de materiales y combinación entre ellas<sup>6</sup>. La primera identificación de los principales sistemas constructivos con tierra y las variantes de estos se realizó en 1984 por Hugo Houben y Hubert Guillaud, en función de la configuración de los muros. Así, los sistemas constructivos se diferencian en sistemas monolíticos, sistemas de fábrica de tierra cruda y en sistemas mixtos como material de relleno en forma de fábrica y como relleno<sup>7</sup>:

#### Tierra cruda bajo forma monolítica y portante

Este grupo se caracteriza por el carácter masivo, compacto y homogéneo de los muros<sup>8</sup>. Dentro de este grupo, las formas tradicionales de construcción se pueden relacionar con tres metodologías de manipulación del material; por sustracción, por medio del empleo de encofrados o mediante su manipulación y colocación apilada.

Dentro de los sistemas de sustracción, destaca la arquitectura excavada, la cual se basa en el reaprovechamiento y vaciado de los espacios naturales, dando como resultado la formación de espacios subterráneos<sup>9</sup>.

1 La tierra como material de construcción ha sido empleada durante once milenios, según CRATerre. <http://craterre.org/>

2 GÓMEZ- PATROCINIO, F.J. (2018) Arquitectura tradicional de tierra en España. Caracterización constructiva, fenómenos de degradación y dinámicas de intervención. Tesis Doctoral. Directores; Dra. Camilla Mileto, Dr. Fernando Vegas López-Manzanares y Dra. Lidia García Soriano.

3 NEVES, C., BORGES FARIA, O. (2011) Técnicas de construcción con tierra. Bauru: FEB-UNESP / PROTERRA. RED IBEROAMERICANA PROTERRA.

4 GÓMEZ- PATROCINIO, F.J. (2018) Arquitectura tradicional de tierra en España. Caracterización constructiva, fenómenos de degradación y dinámicas de intervención. Tesis Doctoral. Directores; Dra. Camilla Mileto, Dr. Fernando Vegas López-Manzanares y Dra. Lidia García Soriano.

5 GARCÍA SORIANO, L. (2015). La restauración de la arquitectura de tapia de 1980 a la actualidad a través de los fondos del ministerio de cultura y del ministerio de fomento del gobierno de España. Criterios, técnicas y resultados. Directores. Dra. Camilla Mileto y Dr. Fernando Vegas López-Manzanares(2015) Universitat Politècnica de valencia

6 ROCHA, M. y JOVÉ, F. (2015). Técnicas de construcción con tierra. Introducción. Cuadernos de construcción con tierra. Editorial Argumenum

7 ROCHA, M. y JOVÉ, F. (2015). Técnicas de construcción con tierra. Introducción. Cuadernos de construcción con tierra. Editorial Argumenum

8 GÓMEZ- PATROCINIO, F.J. (2018) Arquitectura tradicional de tierra en España. Caracterización constructiva, fenómenos de degradación y dinámicas de intervención. Tesis Doctoral. Directores; Dra. Camilla Mileto, Dr. Fernando Vegas López-Manzanares y Dra. Lidia García Soriano

9 ROCHA, M. y JOVÉ, F. (2015). Técnicas de construcción con tierra. Introducción. Cuadernos de construcción con tierra. Editorial Argumenum

Respecto a las tipologías que emplean sistemas de encofrado destacan las técnicas de tierra apisonada, y tierra vertida. Dentro del primer grupo, se debe considerar la tapia como la técnica de construcción de tierra más difundida en la península<sup>10</sup>. En este sistema, la tierra es dispuesta en sucesivas tongadas compactadas mediante un pisón. Respecto al método constructivo relacionado con muros de tierra vertida, comparten metodología con el sistema anterior, pero en este caso prescindiendo del proceso de apisonado<sup>11</sup>.

Por su parte, las técnicas relacionadas con los muros de tierra apilada se relacionan con la acumulación deliberada de tierra sin el empleo de medios auxiliares para el levantamiento del muro<sup>12</sup>. Según la metodología se puede diferenciar entre muros de tierra apilada y muros de tierra modelada.

Los primeros se basan en la disposición sobre un zócalo de hiladas horizontales de bolas o panes de barro, dando lugar a la formación de paredes gruesas. Las bolas de tierra se colocan siguiendo un patrón de mampostería sin material de unión, ya que la tierra presenta un carácter plástico que permite su cohesión<sup>13</sup>. La técnica de tierra apilada es conocida de forma tradicional por pared de mano.

En el caso de la tierra moldeada, conocida como pared de montón<sup>14</sup>, se basa en la misma metodología de colocación en hiladas pero trabajando la tierra directamente, dando como resultado en este caso paredes de poco espesor. Para posibilidad la trabajabilidad de la tierra, esta debe encontrarse en un estado plástico que permita su maleabilidad y manipulación<sup>15</sup>.

### **Tierra cruda bajo forma de albañilería portante o de piezas.**

Esta clasificación recoge las técnicas de construcción que se basan en el empleo de piezas individuales para la construcción de los muros aparejados de fábrica, pudiendo encontrarse múltiples variantes relacionadas con el tipo de aparejo.

Mediante el sistema de producción de dichas piezas las técnicas se pueden diferenciar en; tierra apisonada mediante maquinas de prensado manuales o mecánicas (BTC), tierra cortada, extrayendo la tierra directamente del terreno tepes o terrones, tierra extruida, derivada del la industria de producción del ladrillo y la producción mediante moldes, relacionándose con la técnica del adobe<sup>16</sup>.

Esta última, se identifica como la forma de arquitectura de tierra de fábrica más representativa en la península ibérica<sup>17</sup>. El proceso de producción es sencillo, basándose en la utilización de moldes individuales o agrupados. La masa empleada para dicha producción, presenta por lo general una carga de arena para equilibrar la proporción de porcentajes de conglomerantes y aglomerantes. A su vez puede presentar cal añadida para aportar resistencia ante el agua y fibras vegetales, con el fin de evitar daños por retracción durante el proceso de secado<sup>18</sup>. Según el proceso de producción se puede diferenciar entre adobes manuales, moldados o mecánicos.

10 GÓMEZ- PATROCINIO, F.J. (2018) Arquitectura tradicional de tierra en España. Caracterización constructiva, fenómenos de degradación y dinámicas de intervención. Tesis Doctoral. Directores; Dra. Camilla Mileto, Dr. Fernando Vegas López-Manzanares y Dra. Lidia García Soriano. pág. 71

11 ROCHA, M. y JOVÉ, F. (2015). Técnicas de construcción con tierra. Introducción. Cuadernos de construcción con tierra. Editorial Argumenum

12 ROCHA, M. y JOVÉ, F. (2015). Técnicas de construcción con tierra. Introducción. Cuadernos de construcción con tierra. Editorial Argumenum. pág. 97

13 GATTI, F. (2012). Arquitectura y construcción en tierra. Estudio comparativo de las técnicas contemporáneas en tierra. Tesina. Director: Dr. Jaume Avellaneda Díaz-Grande. Universidad Politécnica de Catalunya

14 GÓMEZ- PATROCINIO, F.J. (2018) Arquitectura tradicional de tierra en España. Caracterización constructiva, fenómenos de degradación y dinámicas de intervención. Tesis Doctoral. Directores; Dra. Camilla Mileto, Dr. Fernando Vegas López-Manzanares y Dra. Lidia García Soriano

15 GATTI, F. (2012). Arquitectura y construcción en tierra. Estudio comparativo de las técnicas contemporáneas en tierra. Tesina. Director: Dr. Jaume Avellaneda Díaz-Grande. Universidad Politécnica de Catalunya

16 ROCHA, M. y JOVÉ, F. (2015). Técnicas de construcción con tierra. Introducción. Cuadernos de construcción con tierra. Editorial Argumenum

17 GÓMEZ- PATROCINIO, F.J. (2018) Arquitectura tradicional de tierra en España. Caracterización constructiva, fenómenos de degradación y dinámicas de intervención. Tesis Doctoral. Directores; Dra. Camilla Mileto, Dr. Fernando Vegas López-Manzanares y Dra. Lidia García Soriano

18 Con el fin de que esta adición no suponga el aporte de materia orgánica a la masa, volviéndola inestable, las fibras deben someterse a un proceso de secado previo.

## Tierra cruda como relleno de una estructura o armazón realizado con otro material

Dentro de esta familia se recoge el amplio abanico de variantes denominado como técnicas mixtas, en las que entran en combinación diferentes materiales que adquieren funciones específicas en función de sus características propias<sup>19</sup>.

Dentro de la clasificación aportada por el grupo CRATerre<sup>20</sup> se pueden diferenciar entre tierra de recubrimiento, aplicada sobre un soporte ligero, tierra de relleno, empleada para el relleno de elementos huecos que constituyen el revestimiento, pudiendo ser este estructural o no, y tierra paja.

Los ejemplos más representativos de esta clase de sistema mixto en la península, se pueden agrupar en entramados con relleno de tierra y paredes tejidas<sup>21</sup>.

Como se ha insistido con anterioridad, cada variante constructiva es característica de cada región, relacionándose con la adaptación del sistema constructivo a unas necesidades propias y a los recursos disponibles en cada una de ellas. Rocha y Jové<sup>22</sup> concluyen la presencia de siete técnicas tradicionales de construcción en la tierra como más habituales en la península, siendo el adobe, la tapia, la pared a mano, la tierra vertida, el encestado, la tierra en cubierta y la tierra excavada.

En una primera aproximación<sup>23</sup> a la arquitectura vernácula de tierra en la península, realizada por el grupo investigador “Investigación, restauración y difusión del patrimonio arquitectónico” en colaboración con otros investigadores y colaboradores científicos, concluyen una primera clasificación acerca de las variantes más frecuentes, destacando la tapia como la técnica constructiva más abundante y extendida en la península<sup>24</sup>.

Esta conclusión se tomará como referencia con el fin de contextualizar la materia de interés, radicando en la posterior contextualización de las principales patologías y los métodos de intervención material más empleados, con la final de basar la metodología experimental en casos de aplicación reales.

## ii. Técnica constructiva

Se trata del método constructivo con tierra cruda mas empleado en arquitectura patrimonial<sup>25</sup>, apreciando dentro de este una amplia cantidad de variantes. El elevado número de ejemplos conservados y su estudio a lo largo de los años, han permitido no solo caracterizarla, sino estudiar el comportamiento de su estructura y materialidad.

Son diversas las publicaciones que identifican los principales agentes de degradación y patología, así como investigaciones acerca de las intervenciones más frecuentes, siendo esta información sobre la que se base el trabajo a presentar. El conocimiento acerca del estado de conservación y el procedimiento metodológico de intervención permitieron definir la propuesta realizada y defendida por este trabajo.

En la península, los primeros ejemplos de tapia conservados como restos arqueológicos, se corresponden con el periodo de ocupación de la edad de bronce y el periodo ibero-romano, siendo en este último donde la tapia cuenta con gran difusión en base al fomento del uso como encofrado<sup>26</sup>.

19 GÓMEZ- PATROCINIO, F.J. (2018) Arquitectura tradicional de tierra en España. Caracterización constructiva, fenómenos de degradación y dinámicas de intervención. Tesis Doctoral. Directores; Dra. Camilla Mileto, Dr. Fernando Vegas López-Manzanares y Dra. Lidia García Soriano.

20 Grupo CRATerre

21 GÓMEZ- PATROCINIO, F.J. (2018) Arquitectura tradicional de tierra en España. Caracterización constructiva, fenómenos de degradación y dinámicas de intervención. Tesis Doctoral. Directores; Dra. Camilla Mileto, Dr. Fernando Vegas López-Manzanares y Dra. Lidia García Soriano

22 ROCHA, M. y JOVÉ, F. (2015). Técnicas de construcción con tierra. Introducción. Cuadernos de construcción con tierra. Editorial Argumennum

23 C. MILETO, F. VEGAS, L. GARCÍA, L. VILLACAMPA, F. J. GÓMEZ. Primera aproximación a la variedad constructiva de la arquitectura vernácula de tierra en la Península Ibérica.

24 C. MILETO, F. VEGAS, L. GARCÍA, L. VILLACAMPA, F. J. GÓMEZ. Primera aproximación a la variedad constructiva de la arquitectura vernácula de tierra en la Península Ibérica. “...Esta clasificación ha permitido determinar que la tapia es la técnica constructiva más abundante y a más extendida en el territorio de la Península Ibérica, ocupando casi la totalidad del mismo a excepción del corredor cantábrico...”

25 ROCHA, M. y JOVÉ, F. (2015). Técnicas de construcción con tierra. Introducción. Cuadernos de construcción con tierra. Editorial Argumennum

26 GARCÍA SORIANO, L. (2015). La restauración de la arquitectura de tapia de 1980 a la actualidad a través de los fondos del ministerio de cultura y del ministerio de fomento del gobierno de España. Criterios, técnicas y resultados. Directores. Dra. Camilla Mileto y Dr. Fernando Vegas López-Manzanares

Se trata de una técnica constructiva con carácter monolítico y modular, dentro de la clasificación de técnicas de tierra compactada. Las propiedades masivas y homogéneas permiten que los muros trabajen como una unidad, pese a que el proceso de construcción se relacione con módulos. Dentro de la misma técnica se puede apreciar un alto número de variantes en función de su metodología, agregados y acabados<sup>27</sup>. Las principales, identificadas en la península son: la tapia simple, tapia con suplemento en los paramentos, tapia suplementada en juntas y tapia mixta<sup>28</sup>.

## a. Proceso constructivo

La estructura monolítica se eleva sobre una cimentación de entre 60 y 80 cm aproximadamente, realizada en mampostería en seco o recibida con morteros de cal<sup>29</sup>, presentando por lo general una altura de entre 0.5 m y 1 m con respecto al suelo<sup>30</sup>. La incorporación de este zócalo permite reducir la ascensión capilar. Se debe destacar la carencia de zócalo en construcciones de tierra secundarias como cercados o establos.

Sobre este, a una altura de entre 20 y 50cm.<sup>31</sup> respecto al suelo, comienza el montaje de los encofrados. Por lo general con la finalidad de regularizar las tongadas, se dispone una hilada de ladrillos entre el zócalo y la propia tapia.

La tierra se aplica en capas regulares –tongadas- de entre 10 y 20 cm de espesor, compactándose de forma manual por medio de un pisón, previamente a la posterior aplicación, siguiendo este método hasta alcanzar el nivel superior del molde. Una vez cubierto, el encofrado se desmonta y vuelve a montar en un nivel superior, conformando así hiladas sucesivas aparejadas a matajunta<sup>32</sup>. El encofrado se compone de dos frentes (y dos costeros) que se fijan con ayuda de agujas, codales y costales, los cuales varían en dimensión respecto a la región.

La modulación de estas fábricas se corresponde con el tamaño del encofrado empleado cuyas dimensiones de nuevo respecto a la región, pudiendo establecer unas medidas aproximadas de entre 1.50 m y 2.5 m de largo y 80 cm hasta 90 cm de altura, y sobre 45 cm de espesor<sup>33</sup>. La sección de las paredes varía en función de la configuración del edificio, pudiendo variar entre 60 cm para construcciones de una planta, hasta 90 cm -en la base- en caso de mayor elevación.

De forma tradicional, durante el proceso constructivo se reforzaban las zonas más vulnerables, como las esquinas, debido a su baja resistencia ante impactos y erosiones. Así, es común encontrar esquinas reforzadas con sillería, mampostería, ladrillo, yeso y adobe.

Otra de las zonas consideradas como susceptibles de una mayor degradación, es la superficie exterior del muro, por lo que de forma tradicional se disponían unas capas de protección, con el fin de evitar la incidencia directa de los agentes de deterioro. Así, en función de la variante constructiva, los revestimientos podían realizarse durante el proceso de ejecución, como de forma posterior. De forma tradicional, estos últimos se realizaban tras un periodo de un año, tras dejar pasar los periodos de lluvia, que lavaban superficialmente el material, permitiendo un mayor agarre del enlucido, y los periodos de calor, que facilitaban el completo secado de la masa<sup>34</sup>.

Estos revestimientos tradicionales suelen realizarse por medio de encalados, o mediante la aplicación de morteros de barro empleando tierra arcillosa con el fin de conferir un mayor grado de impermeabilidad.

(2015) Universitat Politècnica de valencia. Pág. 64

27 ROCHA, M. y JOVÉ, F. (2015). Técnicas de construcción con tierra. Introducción. Cuadernos de construcción con tierra. Editorial Argumenum

28 VILLACAMPA CRESPO, L. (2018). La restauración y la rehabilitación de la arquitectura tradicional de tierra. El caso de Aragón. Tesis Doctoral. Directores Dra. Camilla Mileto, Dr. Fernando Vegas López-Manzanares y Dra. Lidia García Soriano. Universitat Politècnica de Valencia

29 VILLACAMPA CRESPO, L. (2018). La restauración y la rehabilitación de la arquitectura tradicional de tierra. El caso de Aragón. Tesis Doctoral. Directores Dra. Camilla Mileto, Dr. Fernando Vegas López-Manzanares y Dra. Lidia García Soriano. Universitat Politècnica de Valencia

30 ROCHA, M. y JOVÉ, F. (2015). Técnicas de construcción con tierra. Introducción. Cuadernos de construcción con tierra. Editorial Argumenum

31 ROCHA, M. y JOVÉ, F. (2015). Técnicas de construcción con tierra. Introducción. Cuadernos de construcción con tierra. Editorial Argumenum

32 ROCHA, M. y JOVÉ, F. (2015). Técnicas de construcción con tierra. Introducción. Cuadernos de construcción con tierra. Editorial Argumenum

33 W.AA. (2016). Estudio de buenas prácticas en las intervenciones sobre arquitectura tradicional española. Instituto universitario de restauración del patrimonio. Universitat Politècnica de Valencia

34 ROCHA, M. y JOVÉ, F. (2015). Técnicas de construcción con tierra. Introducción. Cuadernos de construcción con tierra. Editorial Argumenum

## b. Principales variantes constructivas

Como se ha comentado, en función de la metodología del proceso de construcción, pueden diferenciarse cuatro variantes principales en la península, correspondiéndose a la tapia simple, tapia con suplemento en los paramentos y tapia suplementada en masa<sup>35</sup>. Así, se desarrollaran de forma breve con la finalidad de poner en relevancia sus principales diferencias.

### Tapia simple

Se trata del método de tapia que no cuenta con la incorporación de elementos individuales en la masa. De forma general la argamasa está compuesta principalmente por tierra, o presentar la adición de cal, confiriéndole a la masa una mayor capacidad mecánica<sup>36</sup>. Esta adicción a la mezcla oscila entre el 0 y 15%<sup>37</sup>.

### Tapias con suplemento en el paramento

Como se ha destacado, la tierra es un material susceptible de degradación ante la exposición a agentes atmosféricos, en concreto la lluvia y erosión. De forma tradicional y con la finalidad de mejora, se han aplicado modificaciones a la técnica con el objetivo de reforzar puntos débiles, tales como la superficie de los paramentos o las esquinas, pretendiendo aportar mayor durabilidad. Así, estas protecciones superficiales pueden aplicarse durante el propio proceso constructivo, o de forma posterior, mediante aplicación de enlucidos en su cara exterior<sup>38</sup>

- **Tapia calicostrada.** Se trata de una de las variantes de la tapia, que incorporan durante el proceso de fabricación, morteros de cal o yeso<sup>39</sup>. El mortero se vierte de forma previa a cada tongada contra el encofrado, y posteriormente la tierra de la correspondiente tongada, quedando ambos materiales integrados. Una vez desencofrado quedan localizados en la cara superficial.
- **Tapia suplementada en juntas.** Son aquellas que presentan elementos entre los cajones durante el proceso de construcción. Estos, pueden estar dispuestos en la cara exterior, como en toda la sección del muro<sup>40</sup>.

### Tapia suplementada con elementos en la masa

Se entienden como las variantes que emplean la combinación de tierra apisonada con un aparejo de fábrica de mampuestos, pudiendo ser ladrillo, piedra o adobe.

La metodología es próxima a la tapia calicostrada, donde tras la aplicación del mortero, se disponen los ladrillos colocados de forma más o menos regular en hiladas. Estos pueden disponerse en ambas caras de los paramentos, tanto de forma vertical -esquinas y machones- como horizontal -verdugadas, que facilitan el asiento de las hiladas<sup>41</sup>. Durante el proceso de compactación el mortero embebe las piezas, quedando integradas en masa.

Esta tipología puede recibir diferentes nombres según el material añadido, pudiendo diferenciarlas entre tapia mixta, tapia encajonada, tapia encadenada, tapia entremachos o machones con o sin verdugadas, tapia de fraga, etc.

35 VV.AA. (2016). Estudio de buenas prácticas en las intervenciones sobre arquitectura tradicional española. Instituto universitario de restauración del patrimonio. Universitat Politècnica de Valencia

36 VILLACAMPA CRESPO, L. (2018). La restauración y la rehabilitación de la arquitectura tradicional de tierra. El caso de Aragón. Tesis Doctoral. Directores Dra. Camilla Mileto, Dr. Fernando Vegas López-Manzanares y Dra. Lidia García Soriano. Universitat Politècnica de Valencia

37 VV.AA. (2016). Estudio de buenas prácticas en las intervenciones sobre arquitectura tradicional española. Instituto universitario de restauración del patrimonio. Universitat Politècnica de Valencia

38 VILLACAMPA CRESPO, L. (2018). La restauración y la rehabilitación de la arquitectura tradicional de tierra. El caso de Aragón. Tesis Doctoral. Directores Dra. Camilla Mileto, Dr. Fernando Vegas López-Manzanares y Dra. Lidia García Soriano. Universitat Politècnica de Valencia

39 VILLACAMPA CRESPO, L. (2018). La restauración y la rehabilitación de la arquitectura tradicional de tierra. El caso de Aragón. Tesis Doctoral. Directores Dra. Camilla Mileto, Dr. Fernando Vegas López-Manzanares y Dra. Lidia García Soriano. Universitat Politècnica de Valencia

40 VILLACAMPA CRESPO, L. (2018). La restauración y la rehabilitación de la arquitectura tradicional de tierra. El caso de Aragón. Tesis Doctoral. Directores Dra. Camilla Mileto, Dr. Fernando Vegas López-Manzanares y Dra. Lidia García Soriano. Universitat Politècnica de Valencia

41 VILLACAMPA CRESPO, L. (2018). La restauración y la rehabilitación de la arquitectura tradicional de tierra. El caso de Aragón. Tesis Doctoral. Directores Dra. Camilla Mileto, Dr. Fernando Vegas López-Manzanares y Dra. Lidia García Soriano. Universitat Politècnica de Valencia

## C. Tierra como material de construcción. Composición y propiedades.

### Composición

La tierra empleada de forma tradicional en construcción es extraída a nivel local, por lo que la composición que presente se corresponderá con el punto de sustracción, variando sus propiedades respecto a esta.

El suelo, de forma está formado por horizontes o capas estratigráficas que presentan una clara diferenciación de composición, textura, estructura y color. Estas, se pueden diferenciar entre; horizonte < O, < A, < E, < B, < C<sup>42</sup>.

< O (parte materia orgánica, vegetación) porción inferior compuesta por materia orgánica parcialmente descompuesta (humus) y vida microscópica

< A (materia mineral), Juntos, los horizontes O y A constituyen lo que se denomina la capa superficial del suelo.

< E (donde la eluviación y la lixiviación extraen los componentes finos y los constituyentes solubles del suelo)

< B (o capa sub-superficial del suelo, al que se hace referencia a menudo como la zona de acumulación)

< C (la roca madre parcialmente alterada)

Así, y en relación a la tierra empleada en construcción, se deben desechar los primeros 40 cm de suelo, correspondiéndose con el horizonte O, al presentar un alto porcentaje en materia orgánica. Esta se debe evitar, pues su presencia podría desencadenar mecanismos de pudrición en el interior de la fábrica.

La tierra como material constructivo se extrae del horizonte A, rico en minerales y con una granulometría variada<sup>43</sup>, cuya forma de extracción óptima, debe realizarse por encima del nivel freático<sup>44</sup>. Este horizonte, presenta humedad de forma natural (10%), en concreto en los periodos estivales de primavera y otoño. Así, tradicionalmente se recomendaba la construcción durante estas épocas<sup>45</sup>, pues no era necesario añadir agua a la masa<sup>46</sup>, empleándola de esta forma sin ningún tipo de manipulación, directamente del terreno<sup>47</sup>.

La composición y distribución granulométrica variarán en función del punto de extracción y profundidad, por lo que únicamente se puede aproximar un porcentaje específico de cada componente con un fin constructivo <sup>48</sup> Así, destaca la presencia de arcillas, con un diámetro inferior a 0.002 mm, limos, con un diámetro entre 0.06 y 0.002 mm, arena, entre 2 y 0.06, gravas, entre 2-20 mm y guijarros, con un diámetro mayor a 20 mm. Se considera de especial importancia la presencia de áridos de todos los tamaños, al influir de forma directa en su compactación y aporte de resistencia<sup>49</sup>.

Se puede aproximar un porcentaje de estos componentes con la finalidad de que sea viable para el uso constructivo de entre el 5 y 25% de arcilla, entre 10 y 30% de limo, entre el 40 al 50% de arena y el 0 y el 15% de grava.

42 MINKE, G. (1994). Manual de construcción en tierra. La tierra como material de construcción y su aplicación en la arquitectura actual. Editorial. Fin de siglo.

43 GARCÍA SORIANO, L. (2015). La restauración de la arquitectura de tapia de 1980 a la actualidad a través de los fondos del ministerio de cultura y del ministerio de fomento del gobierno de España. Criterios, técnicas y resultados. . Directores. Dra. Camilla Mileto y Dr. Fernando Vegas López-Manzanares (2015) Universitat Politècnica de valencia.

44 VILLACAMPA CRESPO, L. (2018). La restauración y la rehabilitación de la arquitectura tradicional de tierra. El caso de Aragón. Tesis Doctoral. Directores Dra. Camilla Mileto, Dr. Fernando Vegas López-Manzanares y Dra. Lidia García Soriano. Universitat Politècnica de Valencia. Pág. 64 (en base a Jaquin y Augarde, 2012)

45 GARCÍA SORIANO, L. (2015). La restauración de la arquitectura de tapia de 1980 a la actualidad a través de los fondos del ministerio de cultura y del ministerio de fomento del gobierno de España. Criterios, técnicas y resultados. . Directores. Dra. Camilla Mileto y Dr. Fernando Vegas López-Manzanares(2015) Universitat Politècnica de valencia

46 ROCHA, M. y JOVÉ, F. (2015). Técnicas de construcción con tierra. Introducción. Cuadernos de construcción con tierra. Editorial Argumenum

47 GARCÍA SORIANO, L. (2015). La restauración de la arquitectura de tapia de 1980 a la actualidad a través de los fondos del ministerio de cultura y del ministerio de fomento del gobierno de España. Criterios, técnicas y resultados. . Directores. Dra. Camilla Mileto y Dr. Fernando Vegas López-Manzanares (2015) Universitat Politècnica de valencia.

48 MINKE, G. (1994). Manual de construcción en tierra. La tierra como material de construcción y su aplicación en la arquitectura actual. Editorial. Fin de siglo. Pág. 23

49 ROCHA, M. y JOVÉ, F. (2015). Técnicas de construcción con tierra. Introducción. Cuadernos de construcción con tierra. Editorial Argumenum

En relación a dicha distribución, es importante destacar que el porcentaje de arcilla no debe superar el 25% pues podría suponer la inestabilidad estructural, debido sus propiedades intrínsecas. De la misma forma, se debe evitar la arcilla de carácter expansivo, al tratarse de un material altamente higroscópico, que tiende a aumentar su volumen en presencia de agua, por lo que su uso puede conllevar graves problemas de retracción.

Respecto a la variante constructiva, la composición de la mezcla puede variar presentando adiciones estabilizantes como la cal, que además de acelerar el proceso de secado, aporta resistencia a la masa, o fibras vegetales, que aligeran peso y ayudan a homogeneizar el secado en la superficie, además de la presencia de piezas individuales como ladrillos que actúan como refuerzo de la masa.

La resistencia de la tapia variará de esta forma en función de la composición y la presencia de aditivos, aunque de forma general se debe relacionar con el grado de compactación de las tongadas<sup>50</sup>. De esta forma se pueden asociar unos valores de resistencia a compresión de entre 5 y 25 Kg/cm<sup>2</sup><sup>51</sup>.

### Propiedades

Cada componente, presenta una función específica, pudiendo asociarlos principalmente con el papel de conglomerante de la mezcla o el aporte de carga. Así, los guijarros, grava y arena, componentes inertes que carecen de fuerza de cohesión, representan la segunda función respectivamente, cuya distribución de tamaños permite reducir la presencia de huecos en la masa.

Por otra parte, la arcilla en mayor medida y el limo en menor, representan el papel conglomerante de la mezcla, cuya granulometría permite rellenar huecos mayores, permitiendo crear una masa homogénea. Así pues, con una distribución homogénea, tras el proceso de apisonado los espacios intergranulares están rellenos, resultando en menor volumen y mayor densidad, dando por ello una resistencia a la compresión mayor.

La arcilla es el componente que más propiedades confiere a la masa, y es el que aporta cohesión a la masa. Esta propiedad se debe relacionar con la plasticidad<sup>52</sup>, permitiendo cambiar de estado sólido a plástico en función de la capacidad de agua. Este cambio únicamente se da con agua en estado líquido, ya que por el contrario, la captación de humedad no supone cambios ni modificaciones, manteniendo su rigidez. A su vez, esta característica se debe asociar con el carácter higroscópico de la arcilla.

Otras de las propiedades de la arcilla, relacionadas con la función conglomerante, son la cohesividad y compacidad, siendo su combinación, además de la distribución que presente la mezcla, la que definirán la resistencia de la tierra. La primera de ellas se relaciona con la capacidad de mantener unidas partículas, las cuales, tras un proceso mecánico de compactación, hace que se reduzca el espacio intergranular, reduciendo por ello su volumen y aumentando su densidad.

50 GARCÍA SORIANO, L. (2015). La restauración de la arquitectura de tapia de 1980 a la actualidad a través de los fondos del ministerio de cultura y del ministerio de fomento del gobierno de España. Criterios, técnicas y resultados. . Directores. Dra. Camilla Mileto y Dr. Fernando Vegas López-Manzanares (2015) Universitat Politècnica de valencia. "Tras el apisonado es posible aproximar una disminución del volumen inicialen un 40%"

51 GARCÍA SORIANO, L. (2015). La restauración de la arquitectura de tapia de 1980 a la actualidad a través de los fondos del ministerio de cultura y del ministerio de fomento del gobierno de España. Criterios, técnicas y resultados. . Directores. Dra. Camilla Mileto y Dr. Fernando Vegas López-Manzanares (2015) Universitat Politècnica de valencia. pag.103

52 MINKE, G. (1994). Manual de construcción en tierra. La tierra como material de construcción y su aplicación en la arquitectura actual. Editorial. Fin de siglo.

## d. Principales agentes de deterioro y causas de alteración y patología.

Como se ha insistido a lo largo de esta introducción, la falta de mantenimiento es la principal causa de deterioro de la arquitectura. En concreto en los casos de tierra, esta situación supone un agravante en relación a la rápida degradación que sufren sus materiales en condiciones de exposición directa.

El proceso asociado al deterioro de los materiales, se debe considerar como un proceso natural de estabilización con el entorno<sup>53</sup>, determinando una serie de transformaciones tanto físicas como químicas que dependen intrínsecamente del material que constituye la arquitectura.

Las principales causas de deterioro de un muro de tierra se relacionan con la contante exposición ante agentes atmosféricos, así como eventuales deficiencias estructurales<sup>54</sup>. Respecto a las primeras, consideradas como el principal agente de degradación, presentan un carácter incontrolable, cuya única medida de protección es el mantenimiento de una protección adecuada. Siempre que la arquitectura mantenga dicha protección en las zonas consideradas más vulnerables, siendo la base y coronación, y posibles puntos de entrada de agua y focos de degradación<sup>55</sup>, podrá conservarse sin que dichos procesos afecten a su estabilidad.

Con el fin de contextualizar, la propuesta de los tres materiales de intervención planteados en este trabajo, se cree de interés analizar los principales fenómenos de degradación y patologías encontradas en construcciones de tapia en la península, con el fin de poder identificar las intervenciones más habituales, basando en estas la parte experimental del trabajo que se presenta.

## Fenómenos de degradación

### Acción directa del agua

Se trata del principal agente de degradación material de la tierra como material de construcción. El contacto directo del agua con la tierra, provoca el lavado superficial del material, devolviéndola a su estado natural de disgregación. De esta forma, dependiendo de la cohesión entre los granos, el material presentará mayor resistencia ante su acción degradante. De forma general, la disgregación se puede relacionar con la descohesión entre las partículas presentes en el material, dotando al material resultante de un carácter pulverulento. Lo que se entiende como disgregación como decimos es la pérdida de la capacidad aglutinante. En dicho estado, la erosión superficial provoca un proceso gradual de pérdida material, y causando por ello una degradación acumulativa.

La presencia y proporción de arcilla en la tierra empleada, también suponen un factor a tener en cuenta. Las propiedades higroscópicas de la arcilla, implica en presencia de agua, un aumento de su plasticidad, además del aumento de volumen de dichas partículas<sup>56</sup>. Los movimientos de expansión en presencia de agua y retracción durante el proceso de secado, puede dar lugar a la aparición de fisuras de secado<sup>57</sup>, pudiendo llegar a afectar a las juntas entre cajones<sup>58</sup>. Esta situación puede suponer un punto susceptible de degradación, pudiendo llegar a provocar desprendimientos de los fragmento más superficiales, suponiendo en la pérdida de la sección útil del muro<sup>59</sup>.

53 PLAZA SANTIAGO, R., GARCÍA SANDOVAL, J. y FERNÁNDEZ DÍAZ, A. Recuperación, extracción y consolidación en yacimientos arqueológicos: El caso práctico de la villa romana de la quintilla, Lorca (Murcia)

54 AA.VV. (2017). Proyecto Coremans. Criterios de intervención en la arquitectura de tierra. Ministerio de educación, cultura y deporte. Pág.79

55 AA.VV. (2017). Proyecto Coremans. Criterios de intervención en la arquitectura de tierra. Ministerio de educación, cultura y deporte. pág. 79

56 La plasticidad se considera como la capacidad de deformación cuando se encuentra sometido por encima de su límite elástico.

57 AA.VV. (2017). Proyecto Coremans. Criterios de intervención en la arquitectura de tierra. Ministerio de educación, cultura y deporte.

58 MALDONADO RAMOS, L. y CASTILLA PASCUAL, F.J., VELA COSSIO, F. La técnica del tapial en la comunidad autónoma de Madrid. Aplicación de nuevos materiales para la consolidación de muros de tapia, Arqueólogo Dpto. de Construcción y Tecnología Arquitectónicas (U.P.M.) Madrid

59 AA.VV. (2017). Proyecto Coremans. Criterios de intervención en la arquitectura de tierra. Ministerio de educación, cultura y deporte.



La presencia de agua, sumada a la acción de la temperatura, puede llegar a suponer procesos de hielo-deshielo en el interior del paramento. El paso de estado líquido a sólido del agua conlleva un aumento de su volumen, que al localizarse en el interior de la red porosa puede suponer presiones internas. Estas tensiones pueden suponer rupturas internas en el material, que si se dan de forma localizada puede suponer el desconchado o la desplazación del muro, perdiendo sección.

De forma natural, el origen del agua puede responder a diversos fuetes, siendo las principales el agua de lluvia, ascensión capilar, agua de condensación o infiltraciones debidas a un fallo en el material como grietas.

#### **Agua de ascensión capilar.**

El fenómeno de capilaridad está relacionado con la ascensión de los líquidos a través de la red porosa presente en el material. Esta condición es directamente proporcional a la cantidad y diámetro de los poros, de forma que cuanto menor densidad, mayor será la altura que alcance en el interior del material. Así, el agua asciende por la red porosa desde la base, hasta que la gravedad equilibra el impulso ascensional del agua, momento en el que el agua comienza su proceso de evaporación. Esto se puede relacionar con el grado de compactación de la masa, puesto que un mayor grado de compactación reduce la cantidad y diámetro de los poros<sup>60</sup>.

El origen de esta agua se relaciona con la presencia del agua del terreno, como el agua absorbida de las lluvias, y retenida en un primer estrato debido a la capa impermeabilizante del terreno<sup>61</sup>, presencia de bolsas subterráneas (acuífero, niveles freáticos...) y agua derivada de acciones antrópicas, como el riego de las plantas.

#### **Agua de infiltración**

Al igual que el caso anterior, el origen de este tipo de agua se relaciona generalmente con la lluvia. Este agua tiende a introducirse por los puntos débiles del paramento como grietas o fisuras, o fallos en la coronación<sup>62</sup>. Así, y en base a la profundidad de estas vulnerabilidades, su acción erosiva y de lavado puede llegar a afectar a la totalidad de la sección. Falta de estanqueidad de la cubierta, problemas en las juntas de unión entre materiales

19

#### **Agua de salpicadura o escorrentía**

Al igual que en el caso anterior, el agua de lluvia puede suponer de nuevo una causa de alteración en suma con debilidades en la coronación y canalizaciones, así como un alero insuficiente.

Esta situación puede provocar que el agua de evacuación impacte o se escurra por la superficie, induciendo en el proceso, la erosión de la superficie. Esta situación provoca del lavado en la superficie del material de forma localizada puesto que el agua tiende a escurrir sobre zonas bajo nivel, por lo que la erosión no es homogénea. La incidencia constante sobre zonas localizadas, como juntas entre materiales, supone la pérdida de sección de estas zonas. El efecto combinado del agua de escorrentía y el viento, golpea los materiales pudiendo provocar erosión de los materiales, sobre todo en las partes de la coronación y aristas laterales.

Otro de las causas de degradación es la salpicadura del impacto de las gotas desde las canalizaciones contra el pavimento<sup>63</sup>. Con la fuerza del impacto, las salpicaduras se proyectan sobre la base de la coronación, incidiendo de forma mecánica, erosionando la zona y aportando humedad a esta.

60 GÓMEZ-PATROCINIO, F.J. (2018) Arquitectura tradicional de tierra en España. Caracterización constructiva, fenómenos de degradación y dinámicas de intervención. Tesis Doctoral. Directores: Dra. Camilla Mileto, Dr. Fernando Vegas López-Manzanares y Dra. Lidia García Soriano. Universitat Politècnica de València.

61 VV.AA. (2016). Estudio de buenas prácticas en las intervenciones sobre arquitectura tradicional española. Instituto universitario de restauración del patrimonio. Universitat Politècnica de Valencia

62 Como cubiertas defectuosas o en mal estado, canalizaciones obstruidas, o la presencia de fisuras, grietas o uniones, o la unión entre diferentes materiales, permitiendo la entrada directa al interior del edificio.

63 GÓMEZ-PATROCINIO, F.J. (2018) Arquitectura tradicional de tierra en España. Caracterización constructiva, fenómenos de degradación y dinámicas de intervención. Tesis Doctoral. Directores: Dra. Camilla Mileto, Dr. Fernando Vegas López-Manzanares y Dra. Lidia García Soriano. Universitat Politècnica de València.

## Acción de la humedad

Éste es uno de los problemas más frecuentes de los muros de tierra, debido a la poca impermeabilidad y a la gran higroscopicidad del material. En función de la fuente de procedencia se puede diferenciar entre humedad de capilaridad, de filtración o de condensación<sup>64</sup>.

Las primeras se relacionan con el proceso de evaporación del agua capilar, manifestándose por ello en la franja baja de la construcción. Las segundas, como su nombre indican, procede de la infiltración del agua por fallos en la cubierta o en el enlucido.

Las humedades de condensación se relacionan con cambios fluctuaciones de las condiciones higrométricas. Temperatura y humedad son aspectos muy relacionados, de forma que si la temperatura descendiese de forma brusca, provoca un aumento de la HR en el interior del edificio, generando la condensación del vapor de agua disperso en el aire<sup>65</sup>. Esta situación de HR alta puede suponer además la aparición de mohos y microorganismos, al crear las condiciones óptimas para su proliferación.

A su vez se debe destacar que las fuentes de humedad pueden estar ocasionadas por acciones antrópicas tales como el asfaltado ya que tiende a impermeabilizar la zona, de forma que la única salida se da por el interior de muros<sup>66</sup>.

## Sales

La procedencia de estas es amplia, pudiendo estar relacionada con los materiales empleados en construcción, procesos internos de reacción entre materiales, además de contaminación, el propio terreno o restauraciones anteriores. Se trata de un agente de deterioro muy relacionado con la presencia de agua, ya que por lo general son solubles en este medio.

El agente de difusión de estas se relaciona principalmente con el agua de ascensión capilar, transportándose por el interior del paramento, disolviendo a su paso los elementos solubles. Así, las sales disueltas ascienden hasta que se inicia el proceso de evaporación. Durante dicho proceso, las sales tienden a migrar hacia la superficie arrastradas por el proceso de evaporación y cristalizando.

Dependiendo del nivel estratigráfico donde se de dicho proceso, se puede hablar de criptoeflorescencias o subeflorescencias, cristalizando en el interior, o eflorescencias, localizándose de forma superficial. Cuando dicho proceso de da a nivel interno, el aumento de volumen durante la cristalización pueden suponer tensiones internas, derivando en la ruptura interna del material.

Por el contrario, a nivel superficial no supone la producción de tensiones, sino que su alteración se relaciona con procesos de arenización, pulverulencia y disgregación, por la solubilización de elementos constituyentes del paramento y con una alteración visual de blanqueamiento de la superficie por la cristalización de estas. A su vez, se debe destacar que cuando estas presentan un carácter más insoluble, pueden dar lugar a la formación de costras que reciben el nombre de concreciones.

## Acción erosiva del viento

La resistencia superficial de la tierra como material de construcción es muy baja ante impactos y erosión. De forma tradicional, la fábrica de tierra contaba con un revestimiento superficial que servía de protección contra estas acciones.

64 MALDONADO RAMOS, L. y CASTILLA PASCUAL, F.J., VELA COSSIO, F. La técnica del tapial en la comunidad autónoma de Madrid. Aplicación de nuevos materiales para la consolidación de muros de tapia, Arqueólogo Dpto. de Construcción y Tecnología Arquitectónicas (U.P.M.) Madrid

65 VV.AA. (2016). Estudio de buenas prácticas en las intervenciones sobre arquitectura tradicional española. Instituto universitario de restauración del patrimonio. Universitat Politècnica de Valencia pág. 99

66 GÓMEZ-PATROCINIO, F.J. (2018) Arquitectura tradicional de tierra en España. Caracterización constructiva, fenómenos de degradación y dinámicas de intervención. Tesis Doctoral. Directores: Dra. Camilla Mileto, Dr. Fernando Vegas López-Manzanares y Dra. Lidia García Soriano. Universitat Politècnica de València.

Dentro de los procesos de erosión, cobra especial importancia el propio estado de la fábrica, puesto que las masas de aire pueden presentarse con mayor o menor intensidad o con partículas en suspensión, provocando un mayor impacto sobre los muros y materia disgregada de forma superficial<sup>67</sup>. Además en zonas muy expuestas, las corrientes de aire tienden a presentarse con mayor fuerza, impactando contra la superficie con mayor fuerza.

### **Biodeterioro**

Dentro de este agente, se entienden las alteraciones y patologías relacionadas con la presencia de organismos tanto animales como vegetales. Según el tipo de organismo presente, diferenciamos entre microorganismo, planta superior o animales.

Respecto a los primeros, su proliferación se basa en la presencia de unas condiciones estables de humedad y temperatura, además de localizarse en zonas protegidas de la radiación, ya que favorecen a crear unas condiciones óptimas para la vida de estos.

Estos microorganismos se consideran autótrofos, por su capacidad de segregar sustancias descomponedoras que les permite extraer los nutrientes del sustrato sobre el que se asientan, provocando alteración del material constructivo. Dichos microorganismos afectan especialmente a materiales calcáreos y morteros, provocando su disgregación y pulverulencia. Dentro de este grupo se pueden distinguir como más frecuentes líquenes, hongos, musgos y algas.

Respecto a las plantas superiores, pueden localizarse en cualquier punto de la arquitectura. Su presencia implica de por sí alteración, en base a la acción mecánica de las raíces sobre el sustrato. Estas, van profundizando en el paramento provocando tensiones internas, dando lugar a la aparición de grietas y fisuras. Estas discontinuidades crean puntos de entrada de agua, pudiendo dar lugar en una causa de alteración derivada. Además el crecimiento de estas puede suponer un aumento de peso sobre la estructura.

Otro de los factores relacionados con el biodeterioro es la presencia de pequeños y medianos animales que buscan cobijo en la arquitectura. La plaga que afecta en mayor medida a la arquitectura son las aves, cuyas secreciones contienen compuestos ácidos, que al entrar en contacto con la materia, pueden provocar alteraciones químicas sobre el material. Este proceso químico deshace la materia y provoca una erosión profunda en estos materiales estructurales y revestimientos.

### **Causas antrópicas**

Se trata de las causas de deterioro que presentan un carácter controlable, al estar relacionadas por lo general con el mantenimiento. La incidencia de este tipo de acciones se puede clasificar como formas de alteración directas, como acciones incorrectas como actos vandálicos o intervenciones mal concebidas, o indirectas, relacionadas con la falta de mantenimiento y abandono de estas instalaciones.

Además se debe destacar la contaminación como una causa de deterioro antrópica. Esta afecta especialmente a los materiales que contienen en su composición material calcáreo. El contacto del dióxido de carbono con el agua disminuye el pH de esta, haciéndola más ácida y provocando la disolución de la caliza. Esta reacción puede dar lugar a la aparición de un subproducto de clase bicarbonato, siendo un material muy soluble. Cuando dicha agua se evapora, cristaliza de nuevo en forma de caliza, resultando en una costra que recibe el nombre de caolín, tendiendo a adquirir un color negro en caso de localizarse próxima a ambientes industriales. El principal problema atribuido a esta costra es que impide la transpiración de humedad, derivando en tensiones internas, provocando la destrucción de la piedra a medio plazo.

67 GÓMEZ-PATROCINIO, F.J. (2018) Arquitectura tradicional de tierra en España. Caracterización constructiva, fenómenos de degradación y dinámicas de intervención. Tesis Doctoral. Directores: Dra. Camilla Mileto, Dr. Fernando Vegas López-Manzanares y Dra. Lidia García Soriano. Universitat Politècnica de València.

## Principales patologías

La arquitectura de tierra es muy resistente siempre que esté protegida en su base y en su coronación, siendo estos los puntos más vulnerables en relación a los focos de degradación.

Como hemos comentado a lo largo de este apartado, las causas principales de degradación de un muro de tierra son principalmente la exposición directa y constante a los agentes atmosféricos, así como las deficiencias estructurales y agentes antrópicas.

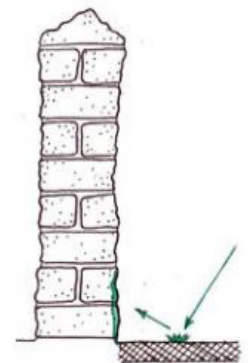
A lo largo del punto anterior se expuso los principales agentes de degradación, relacionándose de forma principal con la presencia de agua, humedad y erosión, como origen de múltiples patologías. En este punto se tratarán de concretar cuáles son las principales causas de alteración en función de su localización en el edificio. Esta información permitirá introducir al segundo bloque de este trabajo, siendo las medidas de intervención más frecuentes y los materiales empleados para este fin.

Así, patologías suelen localizarse en la base del muro, coronación y superficie mural, así como en la estructura. El objetivo de este trabajo es la propuesta de materiales de intervención, relacionándose con las tres primeras zonas comentadas, excluyendo las intervenciones de carácter estructural al presentar un carácter más particular e individual, dependiendo de la casuística de cada edificio.

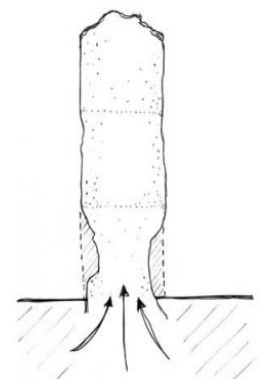
### Degradación en la base del muro

Se trata de una de las principales zonas afectadas, cuya alteración se asocia principalmente a la acción del agua por ascensión capilar. Como se ha comentado, la tierra en presencia de agua pierde la capacidad de cohesión entre granos, induciéndola a su estado natural de disgregación. Esta situación de debilitamiento material supone que, en caso de daño localizado (como ser la zona de revote del agua de las canalizaciones) podría llegar a suponer la pérdida de sección con mayor facilidad. Así, de forma tradicional la arquitectura se construía sobre zócalos de mampostería o fábrica, al poseer una mayor resistencia frente a la acción del agua.

La presencia de humedad, derivada por lo general del proceso de ascensión capilar, se puede localizar en la zona de evaporación de dicho agua. La alteración cromática de la zona se corresponde con la modificación de las condiciones higrométricas del material, encontrándose en estado de saturación<sup>68</sup>. Estas manchas marcan la zona de evaporación y pueden llegar a alcanzar una altura de 3 m. Además de manifestarse en forma de alteración cromática, una de las alteraciones más frecuentes es el desprendimiento del revoco al ganar peso con la captación de humedad, suponiendo una pérdida de la capacidad de cohesión con la fábrica<sup>69</sup>. Además, su presencia crea las condiciones óptimas para la proliferación de organismos por lo general menores. A su vez cabe destacar la presencia de sales en dicha zona en base a la presencia de agua capilar. Como se ha comentado, dependiendo del nivel de cristalización, se puede diferenciar entre criptoeflorescencias y eflorescencias. Así, en función de su naturaleza presentarán una u otra alteración, correspondiéndose con tensiones internas en base a la cristalización y la creación de velos blanquecinos o concreciones superficiales respectivamente.



Pérdida de sección por impacto  
FUENTE F. Javier Gómez-Patrocino



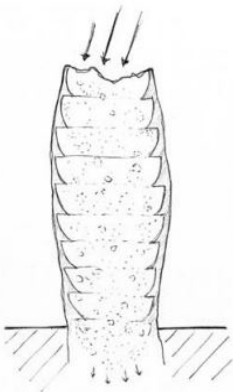
Pérdida de sección por ascensión capilar  
FUENTE Lidia García Soriano

68 GÓMEZ-PATROCINIO, F.J. (2018) Arquitectura tradicional de tierra en España. Caracterización constructiva, fenómenos de degradación y dinámicas de intervención. Tesis Doctoral. Directores: Dra. Camilla Mileto, Dr. Fernando Vegas López-Manzanares y Dra. Lidia García Soriano. Universitat Politècnica de València. Pág. 167

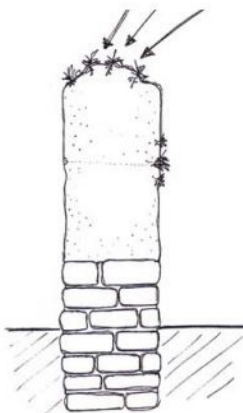
69 MALDONADO RAMOS, L. y CASTILLA PASCUAL, F.J., VELA COSSIO, F. La técnica del tapial en la comunidad autónoma de Madrid. Aplicación de nuevos materiales para la consolidación de muros de tapia, Arqueólogo Dpto. de Construcción y Tecnología Arquitectónicas (U.P.M.) Madrid



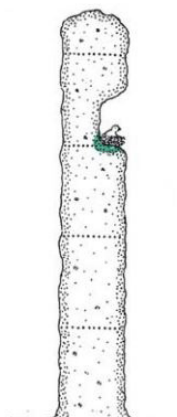
Lavado del núcleo  
FUENTE F. Javier Gómez-Patrocino



Abombamiento y lavado del núcleo  
FUENTE Lidia García Soriano



Proliferación de vegetación  
FUENTE Lidia García Soriano



Asentamiento de animales.  
FUENTE F. Javier Gómez-Patrocino

### Degradación en la coronación del muro.

Este punto de la arquitectura se considera como el más sensible, al presentarse como la zona más expuesta a la incidencia directa los agentes atmosféricos. En base al estado de conservación en el que se encuentre (presencia o no de cubierta, o en caso de muros exentos, la protección o no de estos) los procesos de degradación presentarán un mayor daño.

En caso de presencia de cubierta, el punto con mayor vulnerabilidad se relaciona con el apoyo de esta sobre la estructura. Estos puntos de apoyo pueden presentar grietas relacionadas con el debilitamiento del material o por la acción del agua de infiltración. Esta situación se vería agravada por la incidencia de agentes de deterioro como el agua, pudiendo suponer riesgos de desplome<sup>70</sup>. La cubierta puede presentar a su vez deficiencias en las canalizaciones y conductos de desagüe, suponiendo en este caso la incidencia directa de agua sobre el muro<sup>71</sup>. Esta situación provoca una erosión localizada, cuyo carácter acumulativo podría poner en riesgo la sección total del muro.

En casos de falta de cubierta, la coronación queda totalmente expuesta ante la acción de los agentes atmosféricos, siendo en concreto la acción del agua el principal agente de degradación. Esta incidencia se asocia con el lavado interno del material, donde el flujo de agua arrastra las partículas más finas, que tienden depositándose en el interior del paramento. Esta situación se debe relacionar con procesos de abombamientos en la base de la construcción. Además, este proceso también puede darse a nivel superficial, donde las partículas encontradas en estado de disgregación son arrastradas. Esta situación, puede darse en combinación con la acción del viento, donde la acción erosiva supondría un mayor daño.

La desprotección de la coronación, sumado a la presencia de agua en esta zona, puede facilitar la proliferación de organismos biológicos, al encontrar sobre el muro las condiciones óptimas para la vida (sustrato, condiciones humedad y presencia de agua). Estos organismos se corresponden con líquenes y algas, cuya alteración se asocia con la disgregación superficial, además de casos de vegetación mayor, causando un daño mecánico por la acción de las raíces.

Otra de las alteraciones a comentar, relacionada tanto con la presencia de agua o vegetación superior en la coronación, es la ganancia de peso, que en los casos en los que el muro presente debilidades materiales, puede suponer riesgo de desprendimientos.

### Degradación en la masa y superficie del muro

Las degradaciones localizadas en la parte central del muro, son por lo general consecuencia directa de los procesos de degradación localizados en la base y coronación, que han alcanzado dicha zona debido a la gravedad de la situación por el carácter acumulativo. De nuevo, se trata de alteraciones causadas por la acción del agua y presencia de vegetación, que afectan a la totalidad de la superficie. La incidencia de estos factores, supone un agravante a su estabilidad, como se ha venido insistiendo en los puntos anteriores. De esta forma, si la construcción presenta debilidades relacionadas con el proceso de ejecución, como juntas, en caso de tapia, oquedades correspondientes con las agujas, la presencia de fisuras y grietas, serán zonas más susceptibles de deterioro.

70 AA.VV. (2017). Proyecto Coremans. Criterios de intervención en la arquitectura de tierra. Ministerio de educación, cultura y deporte. Pág. 82

71 AA.VV. (2017). Proyecto Coremans. Criterios de intervención en la arquitectura de tierra. Ministerio de educación, cultura y deporte. Pág. 82

De nuevo, esta situación sumada a la acción del viento, contra las grandes superficies verticales, favorece a la erosión del material. Las zonas más vulnerables ante las corrientes de aire suelen ser las esquinas y zonas más expuestas de la arquitectura. A su vez se deben destacar defectos del proceso de ejecución como zonas susceptibles de deterioro, como las tongadas menos apisonadas o defectuosas, suponiendo una degradación horizontal de la superficie<sup>72</sup>.

A su vez, se debe insistir de nuevo en el abombamiento como otra de las patologías más comunes, por la migración de los finos de la zona superior. Este aumento de volumen en zonas específicas puede provocar la ruptura de los elementos protectores, acelerando así los procesos de degradación.

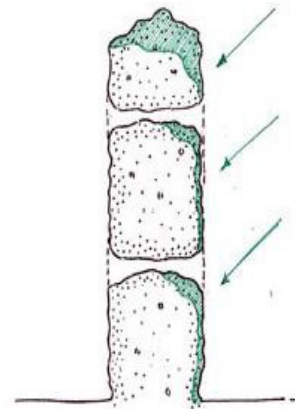
### Degradación por causas antrópicas

Como se ha indicado en el apartado de causas de degradación, la acción del hombre, tanto directa como indirecta puede acarrear sobre la arquitectura consecuencias de degradación material. A priori se pueden destacar fallos relacionados con una mala praxis durante el proceso de construcción, como la presencia de oquedades internas, el empleo de materiales defectuosos, que presentan impurezas en la masa, como sales, suponiendo debilidades intrínsecas en esta arquitectura.

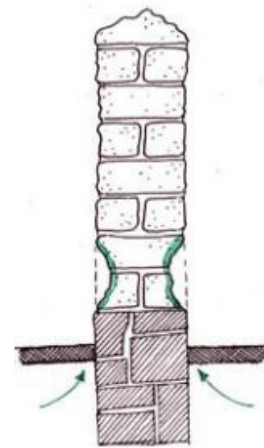
Seguidamente se puede destacar los problemas de incompatibilidad material, entre los materiales empleados en antiguas intervenciones, con los presentes en la construcción. La inclusión de materiales contemporáneos como el cemento en intervenciones sobre arquitectura tradicional puede conllevar la aparición de incompatibilidades a nivel material. Esta situación se debe a que ambos materiales presentan al poseer propiedades muy dispares, como la resistencia o el coeficiente de dilatación material, resultando en tensiones de carácter interno, pudiendo ocasionar la pérdida de sección del muro, llevándolo incluso al colapso parcial o total de la estructura<sup>73</sup>.

Otra de las incompatibilidades relacionadas con los materiales de intervención es la modificación de la transpirabilidad de los materiales. La inclusión de materiales contemporáneos puede suponer problemas relacionados con impermeabilizaciones, suponiendo la creación de una barrera, que dificulte el proceso de evaporación. Esta situación provoca que el agua quede retenida en el interior del muro, suponiendo de nuevo problemas relacionados con la solubilización de sales, y condensaciones en el interior.

Además se debe destacar que el empleo de productos químicos relacionados con estos procesos de restauración, pudiendo derivar en la aparición de subproductos químicos como sales o alteración cromática o incompatibilidad material.



Erosión superficial de los mechinales.  
FUENTE F. Javier Gómez-Patrocínio



Ascensión capilar por lavado.  
FUENTE F. Javier Gómez-Patrocínio

72 MALDONADO RAMOS, L. y CASTILLA PASCUAL, F.J., VELA COSSIO, F. La técnica del tapial en la comunidad autónoma de Madrid. Aplicación de nuevos materiales para la consolidación de muros de tapia, Arqueólogo Dpto. de Construcción y Tecnología Arquitectónicas (U.P.M.) Madrid

73 AA.VV. (2017). Proyecto Coremans. Criterios de intervención en la arquitectura de tierra. Ministerio de educación, cultura y deporte. Pág. 86

## Degradación estructural

Aún no siendo objeto de estudio para el trabajo que se presenta, se deben destacar este tipo de patologías en base a ser la primera causa de deformación de las estructuras, al afectar al sistema de distribución de las cargas<sup>74</sup>. Estas debilidades se ven agravadas por la incidencia de agentes de deterioro suponiendo la pérdida de propiedades, afectando a la materialidad y por ello a su estabilidad

Las afecciones relacionadas con las patologías estructurales, pueden estar originadas por la propia degradación material, como con una deformación estructural relacionada con la propia configuración de la estructura<sup>75</sup>.

En un contexto general, estas se relacionan con la aparición de grietas y fisuras, pérdidas del material, pérdida de aplomo y abombamientos, pudiendo llegar a situaciones de desplome<sup>76</sup>. Estas circunstancias intrínsecas, en suma con el debilitamiento que el propio material puede sufrir, pueden suponer un elevado riesgo para la estabilidad de la estructura.

En relación con las patologías estructurales, se pueden diferenciar dos grandes grupos; las causadas en consecuencia de la acción antrópica o una mala concepción inicial del edificio, o por causas externas como movimientos del terreno.

Dentro de las consideradas como consecuencias de la acción antrópica, destacan como principal afección la modificación de distribución de las cargas, causada por obras de ampliación o aperturas de huecos. Estas se relacionan con un mal replanteo de la distribución de las cargas o el sobredimensionado. Esta sobrecarga supone el agotamiento de la sección en la base, pudiendo incluso provocar su desplazamiento de los cimientos<sup>77</sup>. Las principales patologías identificadas con esta situación se corresponden con la aparición de gios por empujes y el colapso de las estructuras.

Se debe destacar, nuevamente, las alteraciones provocadas con la inclusión de materiales contemporáneos, los cuales presentan un comportamiento y características diferentes, como la rigidez o comportamiento térmico, pudiendo dar lugar a la aparición de fisuras vinculadas a movimientos de dilatación o deformaciones diferenciales en zonas de encuentro, afectando al esquema de distribución de las cargas.

## e. Principales operaciones sobre arquitectura de tierra

En base a lo comentado, las principales patologías relacionadas con las construcciones de tapia pueden localizarse en cuatro niveles diferentes. Como se ha expuesto, el origen de estas se relaciona de forma principal con la incidencia de agentes atmosféricos.

74 GÓMEZ-PATROCINIO, F.J. (2018) Arquitectura tradicional de tierra en España. Caracterización constructiva, fenómenos de degradación y dinámicas de intervención. Tesis Doctoral. Directores: Dra. Camilla Mileto, Dr. Fernando Vegas López-Manzanares y Dra. Lidia García Soriano. Universitat Politècnica de València. Pág. 181

75 GÓMEZ-PATROCINIO, F.J. (2018) Arquitectura tradicional de tierra en España. Caracterización constructiva, fenómenos de degradación y dinámicas de intervención. Tesis Doctoral. Directores: Dra. Camilla Mileto, Dr. Fernando Vegas López-Manzanares y Dra. Lidia García Soriano. Universitat Politècnica de València. Pág. 102

76 GARCÍA SORIANO, L. (2015). La restauración de la arquitectura de tapia de 1980 a la actualidad a través de los fondos del ministerio de cultura y del ministerio de fomento del gobierno de España. Criterios, técnicas y resultados. Directores. Dra. Camilla Mileto y Dr. Fernando Vegas López-Manzanares (2015) Universitat Politècnica de valencia.

77 GÓMEZ-PATROCINIO, F.J. (2018) Arquitectura tradicional de tierra en España. Caracterización constructiva, fenómenos de degradación y dinámicas de intervención. Tesis Doctoral. Directores: Dra. Camilla Mileto, Dr. Fernando Vegas López-Manzanares y Dra. Lidia García Soriano. Universitat Politècnica de València. pág186

Con el fin de analizar los principales métodos de intervención material, se cree conveniente señalar las principales operaciones de restauración en este tipo de arquitectura. Este análisis pretenderá contextualizar la fase experimental, basándose en el desarrollo de tres materiales experimentales que podrían tener lugar en las operaciones comentadas.

Para el análisis de los principales métodos de intervención, se tomo como referencia el estudio doctoral realizado por Lidia García Soriano “La restauración de la arquitectura de tapia de 1980 a la actualidad a través de los fondos del ministerio de cultura y del ministerio de fomento del gobierno de España. Criterios, técnicas y resultados”<sup>78</sup>. Este se basa en el estudio de las patologías e intervenciones más comunes sobre tapia, desde los años 80 hasta el presente. La propia autora concluye en una serie de metodologías de intervención más comunes, en base a los criterios de restauración.

Como se ha expuesto, las patologías que se relacionan con la degradación de la tapia, se pueden localizar en 4 zonas diferenciadas; en la base del muro, coronación y superficie mural y en la estructura, siendo las tres primeras las clasificadas como más frecuentes<sup>79</sup>.

### Base del muro

Las patologías localizadas en la zona responden a la acción degradante del agua, tanto en forma capilar como de salpicaduras por lluvia. Esta situación deriva en la pérdida de sección de la zona, pudiendo llegar a suponer el descalce de la cimentación<sup>80</sup>. Esta vulnerabilidad en la parte baja del muro, puede poner en riesgo la estabilidad estructural, llegando a asociarlo en casos extremos con desplomes.

26

Ante esta situación y en base a las conclusiones recogidas por la autora, la reconstrucción parcial de la zona es la técnica de intervención más extendida, aunque en muchos de los casos no se plantea intervención sobre dicha zona. Estas operaciones suelen recurrir al empleo de técnicas y materiales tradicionales con el fin de lograr una mayor integración y compatibilidad, aunque generalmente con algún aditivo que aporte una ligera resistencia.

En los casos intervencionistas, las labores se diferencian entre reintegraciones, tanto de las faltas de revestimiento, como de la masa pérdida, y la reconstrucción de la cimentación, por lo general con recalces<sup>81</sup>.

### Superficies de los muros

De nuevo, recurriendo a lo comentado, las principales afecciones que se pueden asociar al elemento son causadas por la acción del agua, y en este caso del viento. Así, las patologías que se relacionan con las superficies murales se asocian con el lavado del material, dotándolo de un carácter disgregado, pérdida del revestimiento, desprendimientos, desconchados por la acción del agua y humedad y la presencia de manchas correspondientes tanto a la humedad como presencia de sales.

78 GARCÍA SORIANO, L. (2015). La restauración de la arquitectura de tapia de 1980 a la actualidad a través de los fondos del ministerio de cultura y del ministerio de fomento del gobierno de España. Criterios, técnicas y resultados. . Directores. Dra. Camilla Mileto y Dr. Fernando Vegas López-Manzanares(2015) Universitat Politècnica de valencia

79 GARCÍA SORIANO, L. (2015). La restauración de la arquitectura de tapia de 1980 a la actualidad a través de los fondos del ministerio de cultura y del ministerio de fomento del gobierno de España. Criterios, técnicas y resultados. . Directores. Dra. Camilla Mileto y Dr. Fernando Vegas López-Manzanares (2015) Universitat Politècnica de valencia. Pág. 153

80 GARCÍA SORIANO, L. (2015). La restauración de la arquitectura de tapia de 1980 a la actualidad a través de los fondos del ministerio de cultura y del ministerio de fomento del gobierno de España. Criterios, técnicas y resultados. . Directores. Dra. Camilla Mileto y Dr. Fernando Vegas López-Manzanares (2015) Universitat Politècnica de valencia. Pág. 153

81 GARCÍA SORIANO, L. (2015). La restauración de la arquitectura de tapia de 1980 a la actualidad a través de los fondos del ministerio de cultura y del ministerio de fomento del gobierno de España. Criterios, técnicas y resultados. . Directores. Dra. Camilla Mileto y Dr. Fernando Vegas López-Manzanares (2015) Universitat Politècnica de valencia. Pág. 179



Dentro de las intervenciones más comunes sobre la zona se pueden identificar actuaciones de limpieza y consolidación de las superficies y reintegraciones de reposición de morteros<sup>82</sup>. En relación al último caso, también puede darse la situación de reconstrucciones parciales del muro en su cara superficial.

### Coronación

Se trata de uno de los puntos más vulnerables en condiciones de exposición directa, y ante las acciones degradantes del agua y viento, además de la presencia de plantas, superiores así como menores.

Las principales patologías se relacionan con la erosión y por tanto pérdida de la cubrición, lavado y pérdida del material, suponiendo deficiencias estructurales, por la migración de finos hacia la base, dando lugar a su vez en abolsados. La degradación de esta puede suponer a medio largo plazo, la degradación acumulativa de la estructura, al llegar a afectar al núcleo de la fábrica.

Las principales técnicas de intervención se relacionan con los procesos de limpieza, consolidación y la aplicación de una nueva protección<sup>83</sup>. Además destacan como comunes la reconstrucción de volúmenes, pudiendo estas ser mínimas, mediante la aplicación de una capa de protección con el fin de limitar la acción del agua sobre la zona, parciales, relacionándose completando los volúmenes o faltas, o totales, reconstruyendo hasta la cota original e incluso reproduciendo elementos perdidos<sup>84</sup>.

### Estructurales

En las patologías estructurales confluyen las afecciones relacionada con el estado material como debilidades estructurales. La principal patología se relaciona con la pérdida de sección del material a causa del lavado del material. Esta situación da lugar a la aparición de abolsados, y la presencia de grietas y fisuras, resultando en la presencia de lagunas y desconexión estructural, pudiendo existir riesgo de desplome, a causa de la inestabilidad<sup>85</sup>

Los criterios de intervención más comunes contemplan en primer lugar las intervenciones de limpieza, consolidación y reintegración de lagunas<sup>86</sup>. Tienen también lugar las reconstrucciones parciales, centrándose en el recalce de la cimentación o en la reconstrucción de la base del muro. Respecto a las intervenciones de recalce, es habitual la intervención con nuevos materiales y estructuras con el fin de mejorar las condiciones estructurales.

82 GARCÍA SORIANO, L. (2015). La restauración de la arquitectura de tapia de 1980 a la actualidad a través de los fondos del ministerio de cultura y del ministerio de fomento del gobierno de España. Criterios, técnicas y resultados. . Directores. Dra. Camilla Mileto y Dr. Fernando Vegas López-Manzanares (2015) Universitat Politècnica de valencia. Pág. 181

83 GARCÍA SORIANO, L. (2015). La restauración de la arquitectura de tapia de 1980 a la actualidad a través de los fondos del ministerio de cultura y del ministerio de fomento del gobierno de España. Criterios, técnicas y resultados. . Directores. Dra. Camilla Mileto y Dr. Fernando Vegas López-Manzanares (2015) Universitat Politècnica de valencia. Pág. 182

84 GARCÍA SORIANO, L. (2015). La restauración de la arquitectura de tapia de 1980 a la actualidad a través de los fondos del ministerio de cultura y del ministerio de fomento del gobierno de España. Criterios, técnicas y resultados. . Directores. Dra. Camilla Mileto y Dr. Fernando Vegas López-Manzanares (2015) Universitat Politècnica de valencia. Pág. 183

85 GARCÍA SORIANO, L. (2015). La restauración de la arquitectura de tapia de 1980 a la actualidad a través de los fondos del ministerio de cultura y del ministerio de fomento del gobierno de España. Criterios, técnicas y resultados. . Directores. Dra. Camilla Mileto y Dr. Fernando Vegas López-Manzanares (2015) Universitat Politècnica de valencia. Pág. 154

86 GARCÍA SORIANO, L. (2015). La restauración de la arquitectura de tapia de 1980 a la actualidad a través de los fondos del ministerio de cultura y del ministerio de fomento del gobierno de España. Criterios, técnicas y resultados. . Directores. Dra. Camilla Mileto y Dr. Fernando Vegas López-Manzanares (2015) Universitat Politècnica de valencia. Pág. 180



## B2. MÉTODOS DE INTERVENCIÓN

29

### 03. Criterios de intervención material

### 04. Conservación

#### i. Consolidación superficial. Consolidantes

##### a. Disolvente

##### 1. Propiedades de los disolventes

##### 2. Acción disolvente

##### b. Solute

##### 1. Clasificación según naturaleza

#### ii. Métodos de aplicación

##### a. Formas de aplicación

##### b. Metodología de aplicación

##### c. Consolidantes mas empleados

### 05. Reintegración

#### i. Pérdida de sección

#### ii. Faltas de revestimiento

#### iii. Aplicación nueva protección

### 06. Reconstrucción

#### i. Tratamientos en profundidad. Morteros de inyección

##### a. Método de actuación

##### b. Morteros más empleados en consolidación estructural

##### c. Metodología de aplicación

### 03. Criterios de intervención material

Los productos empleados en operaciones de conservación, deben presentar unas características mínimas con el objetivo de reducir la producción de daños. Estas pautas se exponen de la siguiente forma:

- **Compatibilidad química con la materia original.** Hace referencia a la interacción entre el producto aplicado y el material preexistente, debiendo ser estable con el tiempo y evitar la aparición de subproductos.
- **Compatibilidad física con el material original.** Los procesos de consolidación se consideran como irreversibles, por lo que los materiales añadidos deben presentar unas propiedades acordes y respetar las características de la fábrica, con el fin de que su aplicación no produzca modificaciones en esta. En la búsqueda del material idóneo se deben priorizar los materiales con una naturaleza similar, al presentar unas propiedades acordes en base a su composición. Además, sus propiedades deben mantenerse estables ante posibles agentes de degradación y fluctuaciones ambientales.
- **Comportamiento material similar.** La compatibilidad no solo debe relacionarse con aspectos físicos y químicos, sino por el respeto del sistema constructivo original. De esta forma, el producto aplicado debe respetar la transpirabilidad de los materiales originales y no provocar modificaciones de la red porosa del material, pues la saturación de esta podría derivar en la aparición de condensaciones o cristalización interna de las sales. Además debe ser acorde a los posibles movimientos que se den en la fábrica, tratando de evitar que su aplicación provoque tensiones internas.
- **Adecuada capacidad de penetración.** La efectividad del proceso de consolidación se basa en la penetración del producto a través de la red porosa del material. Por ello, el producto empleado debe ser adecuado para la fábrica concreta sobre la que se aplica, con el fin de que circule por el interior sin obstruir las vías capilares, ni quede retenido en superficie.
- **Envejecimiento adecuado.** Este criterio tiene relación con la compatibilidad físico-química entre ambos materiales, debiendo considerarse estable a largo plazo. Para evitar una situación de alteración prematura, se deben estudiar las condiciones a las que estará expuesto, previniendo la aplicación de productos incompatibles con dichas condiciones.
- **No producir interferencias estéticas.** El material aplicado debe ser respetuoso con la estética del conjunto, evitando generar interferencias visuales. Así, el material debe presentar una colorimetría similar y no aportar brillos sobre las superficies tratadas. En este sentido deben presentar una apariencia estable con el tiempo y ante la exposición prolongada a ambientes agresivos, ya que estas situaciones pueden llegar a derivar en el amarilleamiento o la opacidad de las superficies.
- **Mínima toxicidad.** Se trata de un criterio general que se relaciona con todos los procesos de intervención. Este criterio trata de velar por la salud del operario que se encuentra en contacto con los productos de restauración, pudiendo afectar de forma acumulativa en tiempos de exposición prolongados. Además el uso de esta clase de productos también puede tener consecuencias medioambientales.
- **Permitir tratamientos posteriores.** Las intervenciones patrimoniales tienen la finalidad de prolongar su estabilidad a lo largo del tiempo. A lo largo de su vida, estos bienes pueden ser intervenidos en múltiples ocasiones, como forma de dar solución a las alteraciones que presenta. En este punto es fundamental el conocimiento sobre los tratamientos y productos aplicados con anterioridad, como forma de evitar reacciones poco deseadas entre los productos existentes y los de nueva aplicación. Además, se debe ser consciente de que la intervención planteada no será definitiva, por lo que los productos aplicados deben permitir futura aplicación de otro. En este sentido la intervención debe documentarse como forma de dejar un testimonio sobre los trabajos realizados.

## 04. Conservación

Se consideran las medidas necesarias para la preservación de la construcción original, con el fin de velar por su permanencia. Así, por conservación se deben entender todas las acciones cuya finalidad es la de detener los mecanismos de degradación y dar solución a las afecciones que presenta el material.

Desde un punto de vista material, el tratamiento que trata de velar por la restitución de las propiedades perdidas, que como ha ido ha expuesto se relacionan principalmente con la pérdida de resistencia y cohesión material, es el proceso de consolidación. Este, es el único método que permite asegurar la estabilidad material a la vez que conservarlo al reforzarlo, aportando una mayor integración y durabilidad de la arquitectura preexistente.

### i. Consolicación superficial. Consolidantes

El proceso de consolidación, es considerado según el Getty Conservation Institute (GCI) como un proceso activo en la conservación patrimonial, el cual lo define:

*“La operación consistente en impregnar los materiales deteriorados con sustancias químicas penetrantes a fin de restablecer la cohesión, resistencia y firmeza que con el tiempo y los factores ambientales, se han ido perdiendo entre las partículas constituyentes de dichos materiales”<sup>1</sup>.*

Un material que se encuentra en un estado de conservación frágil carece de fuerza para mantener unidos los granos que lo conforman, dotando al material de un carácter pulverulento y quebradizo. Este debilitamiento puede alcanzar varios niveles de profundidad, por lo que la selección de la metodología a emplear, dependerá del grado que alcance el daño. Cuando la degradación presenta un estado de deterioro avanzado, la inestabilidad material puede afectar a toda la sección del muro. Esta situación se relaciona con presencia de grietas, que suponen un punto de entrada de los agentes de degradación, pudiendo conllevar un lavado interno del material, y zonas más susceptibles de degradación, como mechinales.

El proceso de consolidación se relaciona con tratamientos de estabilización de las capas más superficiales de la fábrica, las cuales se encuentran expuestas a la incidencia de los agentes atmosféricos. El efecto degradante sobre las fábricas es constante, afectando de forma acumulativa a la materialidad de la estructura, resultando en pulverulencia y falta de cohesión de las capas más superficiales de las fábricas.

En el caso de la consolidación superficial la efectividad del proceso se relaciona con una máxima penetración del producto, lo que permite alcanzar una mayor profundidad de consolidación. La profundidad media alcanzada en estos procesos suele limitarse a los 2-4 cm más superficiales<sup>2</sup>. Así, los consolidantes deben presentar unas características intrínsecas que faciliten esta penetración a través de la red porosa.

Los productos empleados en esta clase de procesos se componen de un soluto y un disolvente<sup>3</sup>. El soluto o principio activo es en sí el material que permite la devolución de las propiedades comentadas. Generalmente se encuentra en estado disperso o disuelto en un disolvente compatible, que proporciona al producto un carácter fluido, adquiriendo la función de vehículo del principio activo hacia el interior de la red porosa.

1 <http://www.getty.edu/index.html>

2 En caso de materiales que presentan una mayor densidad, como el caso de los pétreos, la su acción se limita a los 25 mm más superficiales (PRINCE, C. A., 1975) De MEDINA LORENTE, O. M. (2011). Estudio sobre la eficiencia de consolidantes organosilíceos para la conservación in situ de pavimentos cerámicos realizados a baja cocción. Tesis de Máster. Director Carrascosa Moliner, María Begoña. Universitat Politècnica de Valencia

3 La primera vez que se empleo el término "Consolidante" fue en la primera mitad del siglo XIX (Camaiti et al., 1988). De MEDINA LORENTE, O. M. (2011). Estudio sobre la eficiencia de consolidantes organosilíceos para la conservación in situ de pavimentos cerámicos realizados a baja cocción. Tesis de Máster. Director Carrascosa Moliner, María Begoña. Universitat Politècnica de Valencia

La selección del consolidante se realizará en función de la composición y propiedades que presenta el material a tratar. Además, se cree fundamental un estudio de las condiciones ambientales a las que estará expuesto, con el fin de confirmar su estabilidad ante ellos. Cada uno de los productos consolidantes presenta unas propiedades específicas, de forma que según la naturaleza que presente, los procesos internos variarán, resultando en un fundamento específico de actuación. En base a su composición, pueden presentar diversas naturalezas, pudiendo diferenciarlos entre orgánicos, inorgánicos, organosilíceos o sintéticos.

Tras la elección del soluto más apropiado para el tratamiento se procederá a selección del disolvente. Por lo general, cada soluto acepta una clase de disolventes específica –polares, apolares-, presentando cada uno de ellos unas propiedades concretas. Por ello su selección, se debe basar en la identificación de las necesidades que se deban cubrir. De esta forma, se podrá jugar con la viscosidad, y volatilidad para conseguir un grado u otro de penetración.

Una vez que el disolvente haya finalizado su proceso de evaporación, el componente activo iniciará una serie de procesos y transformaciones internas que permitan el fin consolidante. Estos procesos internos dependerán, como se ha comentado de la naturaleza del soluto aplicado, pudiendo diferenciarlos a grandes rasgos entre reticulación<sup>4</sup> y precipitación<sup>5</sup>. Durante estos procesos, el producto queda retenido en el interior de la red del material, rellenando los huecos presentes y envolviendo los granos descohesionados. De esta forma, el aporte de las propiedades pérdidas se dará cuando el producto finalice las transformaciones comentadas.

## a. Disolvente

Como solventes se entienden todas las sustancias que tienen la capacidad de disolver, distribuir o diluir sustancias. En el ámbito que nos ocupa, estas ejercen un papel disolvente del soluto, dando como resultado las dispersiones, disoluciones o emulsiones empleadas en esta clase de procesos. Estos productos se caracterizan por su versatilidad, pues variando sus proporciones pueden ser empleados en una amplia gama de procesos, como los ya comentados de consolidación y adhesión.

Cuando las moléculas que conforman los disolventes entran en contacto y envuelven a las del soluto, se inician una serie de interacciones que permitirán la obtención del producto consolidante. Esta interacción se basa en la solvatación del soluto, donde el disolvente vence a las fuerzas intermoleculares que mantienen unido el principio activo. Con la interacción entre ambos componentes, se inicia la solubilización de las moléculas, proceso que depende de la polaridad de los enlaces. Así podemos diferenciar entre disolventes polares, presentando un polo negativo y otro positivo, separados de forma diferenciada, y apolares, los cuales no presentan cargas en su estructura. De esta forma, la solubilización se dará cuando las moléculas de ambos componentes presenten la misma distribución de cargas, resultando en la disolución de iguales al establecerse interacciones electrostáticas entre los dipolos.

La penetración del producto no puede tomarse como un proceso homogéneo, puesto que depende directamente de la distribución porosa del material, y del tamaño de partícula que presente el producto consolidante. Así, la eficiencia de estos métodos no depende exclusivamente de la composición química, sino también de propiedades como la textura<sup>6</sup>.

Los productos destinados a esta clase de procedimientos deben presentar unas propiedades mínimas para que el proceso sea efectivo<sup>7</sup>. Estas se relacionan con la viscosidad y el tiempo de trabajabilidad. Así, los materiales deben presentar;

4 Se relaciona con los solutos de carácter orgánico, al estar basados en sustancias poliméricas

5 En este caso, se relaciona con solutos de carácter inorgánico, al hidratarse y posteriormente precipitar, entrando en contacto con el material

6 ÍÑIGO, A. C., VICENTE-TAVERA, S., RIVES, V. (2006). Diseño estadístico aplicado a las propiedades hídricas como control de tratamientos de consolidación y/o hidrofugación sobre granitos. *Materiales de Construcción*. Vol. 56, 281, 19-30

7 DE ROSARIO AMADO, I. (2017). Eficacia de consolidantes e hidrofugantes de nueva síntesis en rocas graníticas: optimización de métodos de evaluación. Tesis Doctoral. Tecnología de la Conservación. Universidad de Vigo.

- **Baja viscosidad** relacionándose de este concepto con un bajo peso molecular y una tensión superficial moderada. Estos factores son los que favorecen la penetración en el elemento a tratar. La viscosidad se define como la resistencia que ejerce un líquido a fluir de forma libre a una temperatura determinada<sup>8</sup>. El esfuerzo necesario para que este líquido fluya, se relaciona con el tamaño de las moléculas y las fuerzas de atracción entre ellas<sup>9</sup>. De esta forma, cuanto mayor tamaño presenten sus moléculas, el disolvente presentará un carácter menos fluido, ofreciendo más resistencia ante el escurrimiento. De igual forma sucede con las fuerzas moleculares, cuando más fuertes sean, el disolvente adquirirá un carácter más viscoso a causa de las fuerzas de atracción entre las moléculas. Otro de los factores que influyen en esta propiedad es la temperatura y la presión. Cuando ambas magnitudes son altas, menor viscosidad tendrá el disolvente<sup>10</sup>.

- **Volatilidad.** Esta propiedad se relaciona con un adecuado tiempo de trabajabilidad. El uso de disolventes conlleva por lo general tiempos de aplicación muy reducidos, debido al carácter volátil que presentan. Esta característica se relaciona con la velocidad de evaporación de un solvente, dependiendo esta de factores como las fuerzas intermoleculares, el tamaño que presentan de molécula y el carácter viscoso del disolvente. Cuando el disolvente presenta un carácter muy volátil, conlleva la evaporación acelerada, existiendo por ello riesgos de migración del producto a la superficie al ser arrastrado. Este retroceso se relaciona con el bajo peso molecular que presentan algunos materiales, por lo que se deberá seleccionar un disolvente menos volátil con el fin de evitar esta situación.

## i. Disolventes mas empleados

La selección del disolvente adecuado permite dotar al producto aplicado de unas características determinadas. Como se ha desarrollado en el apartado 04.I.a. , su selección debe basarse en las características comentadas. Así, el disolvente seleccionado puede ser clasificado según su carácter volátil (volátiles, semivolátiles y de alta retención), o según su solubilidad (polar o apolar).

El grupo de los disolventes polares es el más empleado para procesos como el de consolidación. Su carácter de baja tensión superficial y baja viscosidad, permiten que alcance una mayor profundidad de penetración. Estos últimos se caracterizan por permitir una combinación con otros disolventes de la misma clase sin provocar cambios químicos en su estructura, lo que los hace óptimos para la disolución de los agentes activos. Durante el proceso de evaporación, este tipo de disolventes liberan una serie de compuestos orgánicos volátiles (COV), generando que el proceso de evaporación sea rápido. Como ejemplos de este tipo de disolventes se pueden destacar el metanol, etanol, acetona, cloroformo, tolueno o el xileno, entre otros.

En los procesos de consolidación, destaca el uso preferente de soluciones alcohólicas. El inconveniente relacionado con este grupo, es su carácter volátil, pudiendo provocar que el principio activo no disponga de tiempo para precipitar/polimerizar en profundidad<sup>11</sup>. Esto se debe relacionar con que el soluto, durante la evaporación del disolvente, sea arrastrado hacia la superficie de evaporación, limitando y concentrando su acción en superficie.

Otra de las carencias relacionadas con el empleo de disolventes volátiles, es la diferencia en la distribución interna del producto, ya que la cantidad de producto retenido en el interior del poro depende del tamaño de este<sup>12</sup>. Esto se debe a que en capilares de menor diámetro, el disolvente tiende a evaporarse de una forma más lenta, debido a la tensión capilar, favoreciendo la polimerización o precipitación de una mayor cantidad de producto. Por el contrario, en poros de mayor tamaño, la evaporación es más rápida, impidiendo que precipite la totalidad del soluto

8 DÍAZ RAMOS, I. (2016). La piel de la arquitectura de tierra. Sustancias naturales al servicio de la restauración de superficies del patrimonio vernáculo edificado. Tesis Doctoral. Universidad de Las Palmas de Gran Canaria

9 Documentación aportada en docencia Grado Conservación Restauración de Bienes Culturales.

10 DÍAZ RAMOS, I. (2016). La piel de la arquitectura de tierra. Sustancias naturales al servicio de la restauración de superficies del patrimonio vernáculo edificado. Tesis Doctoral. Universidad de Las Palmas de Gran Canaria

11 DE ROSARIO AMADO, I. (2017). Eficacia de consolidantes e hidrofugantes de nueva síntesis en rocas graníticas: optimización de métodos de evaluación. Tesis Doctoral. Tecnología de la Conservación. Universidad de Vigo.

12 DE ROSARIO AMADO, I. (2017). Eficacia de consolidantes e hidrofugantes de nueva síntesis en rocas graníticas: optimización de métodos de evaluación. Tesis Doctoral. Tecnología de la Conservación. Universidad de Vigo.

## b. Solutos

Se trata de la parte activa de la disolución. Según su naturaleza, se deben diferenciar entre orgánicos, inorgánicos, organosilíceos y sintéticos. Dependiendo de esta, el fundamento de actuación involucrando variara según los diferentes procesos. La diferencia entre ambas clases de productos radica no solo en su composición, sino en las reacciones que presentan tras la evaporación del disolvente. En relación a los inorgánicos y organosilíceos, se dan reacciones de precipitación del principio y carbonatación, permitiendo que la materia a tratar quede integrada.

En el caso de productos sintéticos, su reacción se basa en que con la evaporación del disolvente, la resina retorna a su estado original sólido, envolviendo a la materia disgregada que se encuentre en contacto con esta.

Los procesos de consolidación suelen relacionarse con la intervención sobre materiales de naturaleza inorgánica. En base a los criterios de compatibilidad físico-química, los productos que más se aproximan a las propiedades que presentan las fábricas serán los que compartan composición con ella. En concreto en casos de intervención sobre tierra, los productos que más se emplean con este fin presentan una naturaleza inorgánica u organosilíceas.

## i. Clasificación según naturaleza

### a. Naturaleza Inorgánica

El uso de materiales de base inorgánica alcanzo su máximo desarrollo en el siglo XIX, donde el hidróxido de bario (1869), agua de cal, silicatos álcalis (1918) comenzaron a ser utilizados por su afinidad química con los materiales presentes en la arquitectura tradicional<sup>13</sup>.

La base de actuación de esta tipología de productos se basa en la precipitación de moléculas inorgánicas poco solubles en el interior del volumen poroso. Esta reacción mantiene unidos los granos sueltos tras reaccionar con el CO<sub>2</sub> atmosférico o con la humedad presente en el material<sup>14</sup>. Esta interacción proporciona un poder consolidante a la mezcla, actuando como relleno del material la interacción con la materia debilitado. De forma general este tipo de productos carecen de propiedades adhesivas, sino que es la que desencadena dicha función.

La principal ventaja de esta clase de productos es su estabilidad química, por lo que su aplicación se relaciona con un comportamiento similar y una mayor durabilidad de la intervención. Al compartir propiedades similares, los productos inorgánicos respetan la porosidad y la transpiración del material original, evitando la creación de barreras superficiales. Su acción de relleno de los granos disgregados provoca que la porosidad del material se vea ligeramente reducida, pero nunca generando saturaciones en la red interna.

Por el contrario, existen una serie de desventajas que se relacionan con su carácter irreversible debido a su precipitación en forma de moléculas inorgánicas poco solubles.

Otra de las problemáticas más asociadas con la aplicación de productos inorgánicos es la variación en la concentración de las disoluciones y la capacidad de penetración de estas. Los productos inorgánicos se caracterizan por ser insolubles, por lo que se trata de productos en dispersión. Cuando los tamaños de las partículas de estos son mayores a las admisibles por el diámetro de los poros el producto quedara retenido en superficie, provocando la obstrucción del conducto. Esta situación hace que el producto actúe únicamente en las capas más superficiales, pudiendo provocar la aparición de velos blanquecinos, correspondiendo al producto activo que ha precipitado en la superficie. Si se da este caso, se pueden llegar a presentar alteraciones relacionadas con el desprendimiento de la superficie consolidada de la que continua en estado alterado, debido a la diferencia de comportamientos y durezas.

Por último destacar que se trata de productos con un índice de elasticidad muy bajo, por lo que se consideran

<sup>13</sup> DE ROSARIO AMADO, I. (2017). Eficacia de consolidantes e hidrofugantes de nueva síntesis en rocas graníticas: optimización de métodos de evaluación. Tesis Doctoral. Tecnología de la Conservación. Universidad de Vigo.

<sup>14</sup> (Esbert et al., 2003; Lazzarini y Tabasso, 1986) De DÍAZ RAMOS, I. (2016). La piel de la arquitectura de tierra. Sustancias naturales al servicio de la restauración de superficies del patrimonio vernáculo edificado. Tesis Doctoral. Universidad de Las Palmas de Gran Canaria



materiales frágiles ante los movimientos internos<sup>15</sup>. Además se debe destacar la posibilidad de aparición de subproductos de carácter insoluble<sup>16</sup>.

El empleo de este tipo de productos ha disminuido en los últimos años, debido a la aparición de productos que requieren menos tiempo de actuación. Por lo general, la aplicación de inorgánicos se realiza en múltiples repeticiones, requiriendo dejar secar entre aplicación y aplicación. En consolidación superficial con esta clase de materiales, son necesarias varias aplicaciones entre las que el material a tratar debe estar seco. Al tratarse de partículas en suspensión para alcanzar la máxima eficacia durante el proceso, se deberán aplicar capas sucesivas, permitiendo la evaporación del agua entre ellas.

### **Hidroxido de Calcio**

Una de las primeras referencias de la aplicación de soluciones saturadas de hidróxido de calcio en agua son recogidas por autores como Vitruvius en 1970 y Clifton y Frohnsdorff en 1982<sup>17</sup>. El grupo de consolidantes basados en el hidróxido de calcio es amplio. Estos pueden presentar múltiples formas de aplicación, diferenciándose entre ellas por la concentración de hidróxido, por lo que todos comparten composición. Tradicionalmente, el hidróxido de calcio se aplicaba en solución acuosa pudiendo según su concentración distinguirse entre diluida y saturada. De esta forma, el mecanismo de actuación se basa en la carbonatación del hidróxido de calcio, dando lugar a carbonato calcio de carácter insoluble.

### **Agua de cal**

Se trata de la solución acuosa saturada de hidróxido de calcio. El agua de cal es considerada como un consolidante empleado de forma tradicional por lo que su uso es extendido. La obtención de este producto se debe relacionar con el proceso de apagado de la cal<sup>18</sup>.

Tras la decantación de las partículas formadas de hidróxido, se obtiene una solución limpia que se corresponde con el agua de cal. Este producto no se comercializa al presentar en su composición un 99,83% de agua, debido a la baja solubilidad<sup>19</sup> que presenta el hidróxido<sup>20</sup>.

En la actualidad el uso de este tipo de productos ha disminuido, debido a la aparición de nuevos productos que suplen sus limitaciones. Estas, se relacionan con la escasa capacidad de penetración, limitando su acción a los dos primeros milímetros. Esta situación hace que para poder apreciar los resultados de su aplicación sea necesaria la aplicación de más de 40 capas, sin dejar secar la superficie.

El elevado aporte de agua que su aplicación conlleva, puede provocar sobre las fabricas tradicionales alteraciones relacionadas con la solubilización y cristalización de sales, por lo que su uso se desaconseja sobre materiales susceptibles.

15 DE ROSARIO AMADO, I. (2017). Eficacia de consolidantes e hidrofugantes de nueva síntesis en rocas graníticas: optimización de métodos de evaluación. Tesis Doctoral. Tecnología de la Conservación. Universidad de Vigo.

16 (Hansen et al., 2004) De DÍAZ RAMOS, I. (2016). La piel de la arquitectura de tierra. Sustancias naturales al servicio de la restauración de superficies del patrimonio vernáculo edificado. Tesis Doctoral. Universidad de Las Palmas de Gran Canaria

17 DE ROSARIO AMADO, I. (2017). Eficacia de consolidantes e hidrofugantes de nueva síntesis en rocas graníticas: optimización de métodos de evaluación. Tesis Doctoral. Tecnología de la Conservación. Universidad de Vigo.

18 Para la obtención del hidróxido de calcio es necesario un proceso de transformación de la caliza (base de carbonato cálcico) que se encuentra de forma natural. Para ello, esta se debe someter a un primer proceso de calcinación, resultando en la transformación de óxido de calcio (cal viva). Tras esta calcinación, el óxido de calcio se somete un proceso de hidratación, que da como resultado la obtención del hidróxido de calcio. Este proceso de hidratación se conoce como el apagado de la cal viva. <https://www.ctseurope.com/es/dettaglio-news.php?id=249>

19 Solubilidad del hidróxido de calcio 1,7g/L a 20°C

20 "...pero se prepara añadiendo a un litro de agua desmineralizada aproximadamente 50 gramos de "grassello de cal", es decir un fuerte exceso de Ca(OH)<sub>2</sub>. Después de agitar vigorosamente se deja decantar la solución, para obtener una solución limpia con un cuerpo de fondo." <https://www.ctseurope.com/es/dettaglio-news.php?id=249>

**Lechada de cal**

Se trata de una dispersión de partículas de hidróxido de calcio en agua. En este caso no existe una proporción de cal fija, ya que esta varía dependiendo de la cantidad añadida durante el proceso de apagado de la cal. El aspecto de este material es lechoso debido a la suspensión de partículas.

La aplicación de este producto se debe relacionar con consolidaciones de carácter superficial, ante la limitación comentada de penetración.

**Hidroxido de bario**

Se trata de una disolución de hidróxido de bario, que precipita por carbonatación formando carbonato de Bario, siendo un mineral muy estable a nivel químico.

Al igual que el mineral anterior presenta un carácter insoluble, presenta una mayor solubilidad respecto a la cal. Estas características intrínsecas junto con un mayor grado de reversibilidad, hicieron que se convirtiera en una alternativa viable como sustituto al agua de cal.

Las ventajas que se relacionan con este tratamiento, se basan en la similitud química con el material de la fábrica (calizas) y en el respeto y compatibilidad de propiedades como la elasticidad.

Por el contrario el empleo de estos productos puede conllevar riesgos relacionados con la falta de penetración quedando retenido en superficie. Esta situación deriva en la aparición de velos blanquecinos por la precipitación de carbonato de bario. De esta forma, existe riesgo de exfoliaciones y desprendimientos, debido a la diferencia de resistencia entre la zona consolidada y la zona aun alterada.

A su vez, existen riesgos de aplicar este producto sobre fábricas con presencia de sales. El hidróxido de bario reacciona con nitratos y cloruros, por lo que su interacción puede desencadenar la aparición de subproductos nocivos.

**b. Consolidantes Organosilíceos**

Esta tipología de consolidantes surge como solución a la problemática relacionada con la aplicación de productos inorgánicos, y su tendencia a formar subproductos. Esta nueva clase de consolidantes surge en los años 30, y se caracterizan por presentar una naturaleza mixta, siendo orgánica e inorgánica<sup>21</sup>.

Su formación deriva de los silicatos inorgánicos alcalinos, sustituyendo en ellos los radicales metálicos por radicales orgánicos<sup>22</sup>. Se trata de un producto a medio camino entre los productos orgánicos, los cuales se caracterizan por polimerizar, y los inorgánicos, que tienden a precipitar en forma de sílice. Así, tras finalizar dichas reacciones, posee un comportamiento similar con la materia<sup>23</sup>. De esta forma, se obtienen productos compatibles con los componentes inorgánicos, debido a que su fundamento consolidante se basa en la precipitación de una estructura reticular similar a la del sílice<sup>24</sup>. El polímero que resulta presenta una gran estabilidad térmica y flexibilidad, además de resistencia ante procesos de oxidación y radiación ultravioleta.

Dentro de esta tipología de productos, existe una amplia clasificación en función del tipo de enlace con el Si que presenta, pudiendo diferenciarlos en silicatos de etilo y sodio, fluorsilicatos, alquilsilanos, alcoxisilanos, alquilalcoxisilanos, siliconatos, polialquilalcoxisilanos, alquilarilpolisiloxanos<sup>25</sup>. Dentro de esta clasificación, los productos que han presentado mayor eficacia en la consolidación de adobes han sido los alcoxisilanos<sup>26</sup>.

21 (Laurie, 1926; Arnold y Price, 1976; Lewin y Wheeler, 1981) De DE ROSARIO AMADO, I. (2017). Eficacia de consolidantes e hidrofugantes de nueva síntesis en rocas graníticas: optimización de métodos de evaluación. Tesis Doctoral. Tecnología de la Conservación. Universidad de Vigo.

22 ALEJANDRE SÁNCHEZ, F. J. (2002). Historia, caracterización y restauración de morteros. Sevilla: Universidad de Sevilla, Secretariado de Publicaciones, Instituto Universitario de Ciencias de la Construcción.

23 Documentación aportada en docencia Grado Conservación Restauración de Bienes Culturales.

24 ALEJANDRE SÁNCHEZ, F. J. (2002). Historia, caracterización y restauración de morteros. Sevilla: Universidad de Sevilla, Secretariado de Publicaciones, Instituto Universitario de Ciencias de la Construcción.

25 (Fort, 2007; Rivas, 1997) De DE ROSARIO AMADO, I. (2017). Eficacia de consolidantes e hidrofugantes de nueva síntesis en rocas graníticas: optimización de métodos de evaluación. Tesis Doctoral. Tecnología de la Conservación. Universidad de Vigo.

26 MEDINA LORENTE, O. M. (2011). Estudio sobre la eficiencia de consolidantes organosilíceos para la conservación in situ de pavimentos cerámicos

## Alcoxisilanos

En relación a los alcoxisilanos más empleados durante los procesos de consolidación son el Tetrametoxisilano (TMEOS), Metiltrimetoxisilano (MTMOS), Metiltrietoxisilano (MTEOS) y Tetraetoxisilano (TEOS). Esto se debe a que son los únicos que tras el proceso de polimerización presenta la formación de una red tridimensional, siendo la formación de esta la que define la eficacia del proceso.

### Tetraetoxisilano (TEOS) O Silicato De Etilo

El aporte de propiedades de este grupo de productos se relaciona con los procesos de polimerización de estos monómeros inorgánicos en solución acuosa, conocido como proceso sol-gel. De esta forma, en un primer momento los monómeros reaccionan entre sí, formando partículas coloidales (sol) con dimensiones entre 1 nm y 1  $\mu\text{m}$ <sup>27</sup>. Posteriormente estas tienden a agregarse mediante la formación de enlaces, quedando en suspensión en el medio acuoso. Tras estas reacciones comienza el proceso de gelificación, provocando la formación de redes interconectadas que acaban condensándose, uniéndose en forma de red tridimensional. Este último proceso aumenta de forma drástica la viscosidad del producto, que al encontrarse en el interior de la red porosa del material se ajusta al espacio presente.

Durante este proceso de polimerización, esta clase de productos tienen la capacidad de reaccionar con el agua presente en la superficie a tratar, dando lugar a la formación de enlaces Si-O, haciendo que queden integrados durante el proceso de gelificación. El polímero que resulta después de esta serie de procesos presenta una estructura similar a un vidrio amorfo (enlaces Si-O)<sup>28</sup>.

Tras el amplio uso que ha tenido este producto en esta clase de procesos, se han podido identificar ventajas y desventajas relacionadas con su uso. Respecto las ventajas destacan como las principales la buena capacidad de penetración debido a su bajo peso molecular, baja tensión superficial y escasa viscosidad, permitiendo alcanzar una mayor profundidad<sup>29</sup>. Además su aplicación respeta el aspecto original del paramento sin provocar modificaciones del color superficial. Respecto a su aplicación sobre materiales de tierra cruda, este tipo de tratamientos ha dado buenos resultados, alcanzando unas profundidades de entre 1 y 3 cm, duplicando el aporte de resistencia sin provocar modificaciones en la estructura porosa ni en el comportamiento hídrico del material<sup>30</sup>.

Por otra parte se han identificado una serie de desventajas respecto al proceso de polimerización de estos materiales pudiendo sufrir una degradación prematura. Esta situación se relaciona con la ausencia de agua, necesaria para el proceso de gelificación<sup>31</sup> característico de estos materiales, dando lugar a microfracturaciones y en casos extremos pulverulencia<sup>32</sup>.

Otra de las desventajas a destacar es la reacción de este producto con sales o humedades que puedan estar presentes en el paramento. Esto se debe al carácter hidrófobo que presenta el silicato de etilo a edades tempranas, por lo que durante este periodo el transporte de vapor de agua y la migración de sales puede verse dificultado, pudiendo conllevar una cristalización interna<sup>33</sup>.

Además, según las condiciones de temperatura y humedad, la reactividad del producto varía, por lo que no existe un tiempo estipulado de reacción, variando entre 6 y 8 semanas<sup>34</sup>.

realizados a baja cocción. Tesis de Máster. Director Carrascosa Moliner, María Begoña. Universitat Politècnica de Valencia

27 DEL HIERRO, I., PÉREZ, Y. (2017). Alcoxisilanos en la consolidación de materiales pétreos. Revista JAS Arqueología S.L.U. Nº1

28 DEL HIERRO, I., PÉREZ, Y. (2017). Alcoxisilanos en la consolidación de materiales pétreos. Revista JAS Arqueología S.L.U. Nº1

29 DE ROSARIO AMADO, I. (2017). Eficacia de consolidantes e hidrofugantes de nueva síntesis en rocas graníticas: optimización de métodos de evaluación. Tesis Doctoral. Tecnología de la Conservación. Universidad de Vigo.

30 MEDINA LORENTE, O. M. (2011). Estudio sobre la eficiencia de consolidantes organosilíceos para la conservación in situ de pavimentos cerámicos realizados a baja cocción. Tesis de Máster. Director Carrascosa Moliner, María Begoña. Universitat Politècnica de Valencia

31 ALEJANDRE SÁNCHEZ, F. J. (2002). Historia, caracterización y restauración de morteros. Sevilla: Universidad de Sevilla, Secretariado de Publicaciones, Instituto Universitario de Ciencias de la Construcción.

32 MEDINA LORENTE, O. M. (2011). Estudio sobre la eficiencia de consolidantes organosilíceos para la conservación in situ de pavimentos cerámicos realizados a baja cocción. Tesis de Máster. Director Carrascosa Moliner, María Begoña. Universitat Politècnica de Valencia

33 MEDINA LORENTE, O. M. (2011). Estudio sobre la eficiencia de consolidantes organosilíceos para la conservación in situ de pavimentos cerámicos realizados a baja cocción. Tesis de Máster. Director Carrascosa Moliner, María Begoña. Universitat Politècnica de Valencia

34 (Grissom y Weiss, 1981) (Scherer y Wheeler, 2009; Naidu et al., 2014) De DE ROSARIO AMADO, I. (2017). Eficacia de consolidantes e hidrofugantes de nueva

### C. Nanoconsolidantes

A lo largo de la historia se han estudiado las debilidades y posibles alteraciones relacionadas con la aplicación de productos. Muchos de los inconvenientes están relacionados con la penetración, han sido solventados a partir de nanotecnología, basándose en el empleo de sistemas simples basados en la utilización de nanopartículas o mediante PMC's. Estas partículas presentan un tamaño medio de <100 nanómetros<sup>35</sup>.

El fundamento de la efectividad de los procesos con nanoconsolidantes se basa en el tamaño nanométrico el cual presenta mayor superficie específica que partículas de mayor dimensión<sup>36</sup>, provocando que la capacidad y velocidad de reacción aumente.

En procesos de consolidación se están empleando hidróxido y nanohidróxidos de diferentes elementos químicos, debido a su estructura cristalina de redes típicas de estos materiales. Los más comunes son los hidróxidos de calcio, sílice, magnesio y estroncio.

#### Nanocal

Destaca entre los nanoprodutos mas empleados. Se trata de una dispersión de nanopartículas coloidales de hidróxido de calcio en solución alcohólica<sup>37</sup>. Su tamaño de partícula respecto al resto de productos de su misma naturaleza facilita su penetración, solventando la problemática relacionada con este factor. Al igual que los productos que comparten su composición, el fundamento de actuación se basa en la carbonatación.

Entre las ventajas que se relacionan con su aplicación destacan el aumento en la velocidad de reacción y una mayor capacidad de penetración –por el tamaño reducido de partícula- respecto al resto de productos basado en el hidróxido de calcio<sup>38</sup>, además de una mayor concentración final del producto<sup>39</sup>.

Entre los productos más empleados, y de los que se tomaran como referencia para la presente investigación destacan; Nanorestore©, desarrollado en la Universidad de Florencia (CSGI Consortium) (Dei y Salvadori, 2006) y CaLoSil©, desarrollado por el Instituto Alemán IBZ-Freiberg (Alemania), (Ziegenbalg, 2008)

#### Nanosílice

Comercializada generalmente en forma de dispersión coloidal en solución acuosa. El tamaño de las partículas presentes en esta clase de productos varían entre 10 a 20 nm.

La principal ventaja que se relaciona con este producto es la posibilidad de ser empleado en presencia de humedad y a bajas temperaturas (inferiores a 10°C). Además, presenta un menor tiempo de secado respecto al anterior producto comentado, reduciéndose de 5-7 días a 3-4 días. La efectividad de su aplicación se basa a que tras la evaporación del agua de la solución, las nanopartículas de sílice comienzan a agregarse formando una matriz de sílice<sup>40</sup>.

Aunque son pocos los trabajos realizados con nanopartículas de SiO<sub>2</sub> se debe destacar su efectividad sobre calizas<sup>41</sup>,

síntesis en rocas graníticas: optimización de métodos de evaluación. Tesis Doctoral. Tecnología de la Conservación. Universidad de Vigo

35 (Dei y Salvadori, 2006; Daniele et al., 2008)(Kim et al., 2008; Manoudis et al., 2007). Miranda, 2006; Berlanga Mora, 2013; Ozin y Arsenault, 2005) De DÍAZ RAMOS, I. (2016). La piel de la arquitectura de tierra. Sustancias naturales al servicio de la restauración de superficies del patrimonio vernáculo edificado. Tesis Doctoral. Universidad de Las Palmas de Gran Canaria

36 (Gómez-Villalba (2010)) De BARREDA USO, G. (2016). Consolidantes para soportes pétreos con manifestaciones de Arte Rupestre en la Comunidad Valenciana. Análisis práctico en Cova Remígia (Barranc de Gassulla-Ares del Maestre) [Tesis doctoral no publicada]. Universitat Politècnica de València

37 <http://www.csgi.unifi.it/products/plus.html>

38 BARREDA USO, G. (2016). Consolidantes para soportes pétreos con manifestaciones de Arte Rupestre en la Comunidad Valenciana. Análisis práctico en Cova Remígia (Barranc de Gassulla-Ares del Maestre) [Tesis doctoral no publicada]. Universitat Politècnica de València

39 (Chelazzi et al., 2013; Ziegenbalg, 2010) De DE ROSARIO AMADO, I. (2017). Eficacia de consolidantes e hidrofugantes de nueva síntesis en rocas graníticas: optimización de métodos de evaluación. Tesis Doctoral. Tecnología de la Conservación. Universidad de Vigo.

40 (De Ferri et al., 2011) De DE ROSARIO AMADO, I. (2017). Eficacia de consolidantes e hidrofugantes de nueva síntesis en rocas graníticas: optimización de métodos de evaluación. Tesis Doctoral. Tecnología de la Conservación. Universidad de Vigo.

41 (Zornoza-Indart et al., 2016) De BARREDA USO, G. (2016). Consolidantes para soportes pétreos con manifestaciones de Arte Rupestre en la Comunidad Valenciana. Análisis práctico en Cova Remígia (Barranc de Gassulla-Ares del Maestre) [Tesis doctoral no publicada]. Universitat Politècnica de València

calcarenitas<sup>42</sup>, yacimientos arqueológicos<sup>43</sup>, incluso en hormigones<sup>44</sup>. Estos resultados se obtienen en comparación con las nanocales, determinando un aumento en la efectividad del proceso.

## ii. Métodos de aplicación

### a. Formas de aplicación

El tratamiento de consolidación no se considera viable sin la penetración del producto a través de la red porosa del material. Con el fin de permitir dicha penetración, el consolidante debe encontrarse disuelto, en dispersión u emulsión, para que tras su aplicación los productos adquieran propiedades coloidales que permitan esta función. La determinación de una u otra forma de aplicación, se relaciona con la capacidad de disolución del soluto en el disolvente.

#### Disolución

Por disolución se entiende una mezcla homogénea entre dos o más sustancias a nivel molecular, donde la proporción de la mezcla se mantiene en todas sus partes. La mezcla se caracteriza por presentar un aspecto líquido claro o transparente homogéneo, donde no se aprecia la sedimentación del soluto. Se da cuando el soluto es soluble en el solvente, quedando totalmente diluido, sin provocar ningún tipo de alteración química. Esta adición por el contrario si provoca cambios físicos sobre el disolvente, apreciándose principalmente en los cambios de estado (Gómez, 1998: 107-108)

Según la proporción de los componentes presente en la mezcla, pueden diferenciarse entre diluida, concentrada y saturada, siendo esta última la que mayor cantidad de soluto permite.

#### Dispersión Coloidal

También conocida como suspensión coloidal. Se trata de un sistema formado por dos o más fases, una con carácter fluido y las otras dispersas al tratarse de partículas solidas de pequeño tamaño. La principal diferencia entre las dispersiones y las suspensiones es el tamaño de partícula, siendo menor en las primeras, por lo general entre 1 nm y 1 µm. Mientras que en las suspensiones las partículas tienen un tamaño mayor de 1 µm, lo que en estado de reposo provoca la separación de las fases.

De esta forma, las dispersiones no se pueden clasificar como sistemas homogéneos, al mantener separado solvente y soluto. Su apariencia es de líquido lechoso, aunque a simple vista no se diferencien las fases. En caso de suspensión, al tratarse de partículas de mayor tamaño si podrían ser apreciables sin la ayuda de un apoyo óptico.

#### Emulsión

Se trata de un tipo de dispersión coloidal, conformada por dos líquidos insolubles de una forma más o menos homogénea. Al igual que en la formación anterior, en las emulsiones también existe la diferenciación entre fase dispersa y fase dispersante.

Las emulsiones son sustancias más inestables que las dispersiones o suspensiones, y ambas fases tienen a separarse. Con el fin de evitar dicha separación, suelen añadirse un emulsionante o tensoactivo, actuando como cohesionador de la mezcla, manteniendo su unión a largo plazo.

42 (Calia et al., 2012; Licchelli et al., 2014; Zornoza-Indart et al., 2016) De BARREDA USO, G. (2016). Consolidantes para soportes pétreos con manifestaciones de Arte Rupestre en la Comunidad Valenciana. Análisis práctico en Cova Remígia (Barranc de Gassulla-Ares del Maestre) [Tesis doctoral no publicada]. Universitat Politècnica de València

43 (Pittaluga et al., 2012) De BARREDA USO, G. (2016). Consolidantes para soportes pétreos con manifestaciones de Arte Rupestre en la Comunidad Valenciana. Análisis práctico en Cova Remígia (Barranc de Gassulla-Ares del Maestre) [Tesis doctoral no publicada]. Universitat Politècnica de València

44 (Li et al., 2004; Li et al., 2006) De BARREDA USO, G. (2016). Consolidantes para soportes pétreos con manifestaciones de Arte Rupestre en la Comunidad Valenciana. Análisis práctico en Cova Remígia (Barranc de Gassulla-Ares del Maestre) [Tesis doctoral no publicada]. Universitat Politècnica de València

## b. Metodología de aplicación superficial

El éxito del proceso de consolidación depende a su vez la profundidad de penetración dependiendo directamente de la composición y características del producto, como la concentración y su distribución en el interior de la red porosa del material. Así, respecto a la metodología, el producto es aplicado sobre la superficie de diversas formas:

### Impregnación

Se trata del método de aplicación más usado<sup>45</sup>. Se trata de una técnica simple y de carácter superficial, donde el producto se aplica mediante pincel o brocha suave. Esta aplicación debe ser realizada de forma lenta, y homogénea, con el fin de aplicar la misma cantidad de producto sobre todas las zonas del paramento.

### Pulverización.

Se trata de un método de aplicación del producto sin ningún tipo de contacto con la materia a tratar, por lo que se recomienda en casos de extrema fragilidad. El procedimiento se realiza a partir de una pistola de presión o pistola manual, la cual crea una nebulosa de microgotas que se depositan sobre la superficie. Debido a la falta de contacto, y al tamaño de las gotas, la profundidad de penetración es limitada. Se trata de un método reservado a situaciones delicadas, generalmente relacionadas con decoraciones pictóricas.

### Nuevas Metodologías De Aplicación. Consolidación Electrocinética

En si no se trata de un método de aplicación, ya que no es una forma de aplicar el producto sobre el soporte. Este método se incluye en este apartado por la posibilidad de complementarlo con los vistos anteriormente, ya que previamente debe aplicarse el producto consolidante.

El método de la consolidación electrocinética, genera un campo eléctrico que provoca la movilización de los iones del consolidante por el interior de la red porosa (Feijoo et al., 2015)<sup>46</sup>. De esta forma se consigue la precipitación del principio activo a diferentes niveles de profundidad.

## c. Alteraciones identificadas de consolidantes superficiales

### Problemática relacionada con la aplicación de productos sintéticos

Como se ha comentado en el apartado anterior, la diferencia entre las naturalezas de los materiales presentes y la de los productos consolidantes aplicados puede dar lugar a la aparición de unas patologías concretas.

Estos materiales presentan una capacidad adhesiva, no cohesiva, siendo esta característica una de las causas principales de las alteraciones que se relacionan con su uso. Este carácter adhesivo es proporcionado por el carácter orgánico y el proceso de polimerización de esta clase de productos. Sumando a esta situación, la penetración de esta clase de productos es reducida, por lo que su zona de actuación se ve reducida a las capas superficiales. Esto se debe a que el disolvente no es capaz de transportar el principio activo de la resina hacia el interior. Este carácter superficial y el proceso de reticulación del producto, suele conllevar la creación de películas que provoquen la modificación del sistema poroso. El carácter plástico e hidrófobo de estas barreras que obstaculizan la libre circulación de aire, agua y sales por el interior, pudiendo desencadenar en la aparición de microcondensaciones.

La presencia de humedad y agua en el interior facilita la solubilización de sales presentes en la masa,

45 (Ferreira y Delgado Rodrigues, 2008; Wheeler, 2005). DÍAZ RAMOS, I. (2016). La piel de la arquitectura de tierra. Sustancias naturales al servicio de la restauración de superficies del patrimonio vernáculo edificado. Tesis Doctoral. Universidad de Las Palmas de Gran Canaria

46 DE ROSARIO AMADO, I. (2017). Eficacia de consolidantes e hidrofugantes de nueva síntesis en rocas graníticas: optimización de métodos de evaluación. Tesis Doctoral. Tecnología de la Conservación. Universidad de Vigo.

que tienden a migrar a la superficie para su cristalización. Estos movimientos de migración, provocan que la masa quede en un estado descohesionado y de carácter pulverulento<sup>47</sup>. Por otra parte, la barrera creada con el material impide que las sales cristalicen en superficie, obligándolas a recrystalizar en el interior de la fábrica. Durante este proceso, la sal aumenta de tamaño, provocando tensiones en los capilares en los que se localizan, lo que derivará en la separación de estratos con el paso del tiempo. Cuando estos estratos superficiales carecen de resistencia tienden a desprenderse en bloque ante la incapacidad de mantenerse unidos.

Otro de los factores que suelen llevar a la alteración de este tipo de productos se relaciona con la inestabilidad ante el paso del tiempo y la exposición a radiación UV. Esta clase de producto tiende de forma progresiva a la pérdida de propiedades resistentes y estéticas, lo que los hace poco recomendables para este tipo de procesos.

### **Problemática asociada con la aplicación de productos inorgánicos**

Al contrario que los productos anteriores, los de naturaleza inorgánica se caracterizan por presentar una composición similar, por lo que el comportamiento será más próximo al de la fábrica a tratar. Además, su estructura inorgánica los hace más estables ante la acción del tiempo y las fluctuaciones ambientales. Aun siendo más respetuosos con el material a tratar, su empleo conlleva la gran desventaja de la irreversibilidad, al precipitar en forma de productos de baja solubilidad.

El método de actuación de estos materiales se basa en la precipitación del compuesto en el interior de la estructura porosa del material<sup>48</sup>. Esta precipitación puede dar lugar a la formación de compuestos a causa de la reacción entre los componentes con los presentes en el soporte. Por lo general, estos subproductos se corresponden con sales de carácter soluble, derivando nuevamente en problemáticas relacionadas con la cristalización interna.

Debido a estos mecanismos, la porosimetría del material se ve ligeramente reducida, pero de forma más respetuosa que los materiales anteriores. Además la aplicación de inorgánicos no produce impermeabilizaciones, evitando de esta forma problemas relacionados con condensaciones internas.

Los inconvenientes que se pueden apreciar con la aplicación de estos productos se relacionan por lo general con los tiempos de aplicación. Esto se debe a que tras la precipitación del producto, se inician reacciones de carácter lento, siendo necesario un tiempo de curado para poder observar el aumento de las propiedades resistentes y cohesionadoras. Un ejemplo es el proceso de carbonatación de la cal, no siendo hasta pasado un periodo mínimo de 28 días, cuando se comienzan a apreciar el aumento de sus propiedades resistentes.

Otra de las alteraciones que puede producirse con el uso incorrecto de esta clase de productos, es la aparición de velos blanquecinos en superficie. Estos se dan cuando el disolvente empleado se volatiliza a gran velocidad, arrastrando parte del producto activo a la superficie. Esta clase de velos suele tener un carácter insoluble, por lo que se considera un gran riesgo en presencia de decoraciones murales.

<sup>47</sup> BARREDA USO, G. (2016). Consolidantes para soportes pétreos con manifestaciones de Arte Rupestre en la Comunidad Valenciana. Análisis práctico en Cova Remígia (Barranc de Gassulla-Ares del Maestre) [Tesis doctoral no publicada]. Universitat Politècnica de València

<sup>48</sup> BARREDA USO, G. (2016). Consolidantes para soportes pétreos con manifestaciones de Arte Rupestre en la Comunidad Valenciana. Análisis práctico en Cova Remígia (Barranc de Gassulla-Ares del Maestre) [Tesis doctoral no publicada]. Universitat Politècnica de València

## 05. Reintegración

Esta serie de intervenciones tienen la finalidad de devolver la cohesión y unidad tanto al material como a los elementos arquitectónicos, que a causa de los agentes de degradación han perdido sección. Estas acciones se relacionan con el completamiento de las faltas, además de con un sentido estético, con el fin de protección del núcleo de la fábrica, expuesto a causa de su estado como la pérdida del enlucido<sup>49</sup>. Estas lesiones superficiales suponen una degradación a nivel material, las cuales en su mayoría no afectan a nivel estructural, aunque en muchas ocasiones el carácter acumulativo de la degradación acaba amenazando su estabilidad<sup>50</sup>.

Al considerarse tratamientos superficiales, en muchos casos la sección del material a aplicar es reducida, por lo que no es necesario el uso de conectores que faciliten dicha unión<sup>51</sup>. Si por el contrario se precisase de este apoyo para asegurar la estabilidad de la reintegración, se recomienda el uso de la madera como tal pues, además de tratarse del material tradicional, es el que ha presentado mejores resultados con el tiempo<sup>52</sup>. El empleo de conectores metálicos en intervenciones pasadas ha sido común, derivando en patologías actuales relacionadas con el proceso de oxidación de estos. Estos elementos, pese a estar protegidos y aislados en el interior del muro, son muy sensibles a la presencia de agua, tendiendo a oxidarse, y por ello aumentar de volumen, creando tensiones internas.

Respecto a los materiales de intervención, en restauraciones de tapia prima el empleo del material tradicional, siendo morteros de tierra y en su caso presentar alguna adición en relación a la composición de la fábrica –cal, yeso- con la finalidad de proporcionarle una mayor resistencia final<sup>53</sup>. De esta forma ambos materiales trabajan en conjunto, al presentar la misma naturaleza. Por el contrario, como en el caso de la adición de cemento, podría provocar la aparición de alteraciones –humedad y- causadas por su carácter impermeabilizante, obstaculizando la superficie de evaporación.

De forma previa a la aplicación de los morteros de reposición, la superficie debe ser tratada con la finalidad de que ambos materiales funcionen de forma estable. La superficie lavada del material se asocia con la disgregación de las capas más superficiales, por lo que previamente se debe considerar su consolidación, permitiendo una mejor adhesión entre la el material preexistente y el aplicado. Si el grado de deterioro alcanza cierta profundidad, el material deberá ser rebajado de forma irregular hasta llegar a un núcleo más estable.

Las metodologías de aplicación se pueden diferenciar según del grado afección material entre pérdida de sección, falta de revestimiento, y la aplicación de un nuevo enlucido.

49 VV.AA. (2016). Estudio de buenas prácticas en las intervenciones sobre arquitectura tradicional española. Instituto universitario de restauración del patrimonio. Universitat Politècnica de Valencia. Pag.113

50 VILLACAMPA CRESPO, L. (2018). La restauración y la rehabilitación de la arquitectura tradicional de tierra. El caso de Aragón. Tesis Doctoral. Directores Dra. Camilla Mileto, Dr. Fernando Vegas López-Manzanares y Dra. Lidia García Soriano. Universitat Politècnica de Valencia. Pag 219

51 VV.AA. (2016). Estudio de buenas prácticas en las intervenciones sobre arquitectura tradicional española. Instituto universitario de restauración del patrimonio. Universitat Politècnica de Valencia

52 GARCIA SORIANO, L. (2015). La restauración de la arquitectura de tapia de 1980 a la actualidad a través de los fondos del ministerio de cultura y del ministerio de fomento del gobierno de España. Criterios, técnicas y resultados. . Directores. Dra. Camilla Mileto y Dr. Fernando Vegas López-Manzanares(2015) Universitat Politècnica de Valencia

53 VV.AA. (2016). Estudio de buenas prácticas en las intervenciones sobre arquitectura tradicional española. Instituto universitario de restauración del patrimonio. Universitat Politècnica de Valencia



## i. Pérdida de sección

La operación consiste en la reposición del material perdido, respetando la materialidad del original, por lo que el muro condicionará el material de intervención, en casos en los que se presenten adiciones. En casos de tapia simple el material de intervención predominante es el mortero de tierra, presentando este cal como adición de forma general.

En relación a la metodología de intervención, esta debe seguir y respetar el sistema constructivo, así el sistema de encofrado es el método más propuesto de intervención, siguiendo la disposición y modulación preexistente<sup>54</sup>. Ante esta situación es común la intervención con encofrados a una cara, respetando la disposición de las agujas originales, realizándose –encofrado y agujas- con madera al tratarse del material original<sup>55</sup>.

Respecto a la preparación de la superficie, además de los procesos de limpieza y consolidación comentados, es conveniente regularizar la superficie, con el objetivo de que la zona de reintegración presente un mejor asiento<sup>56</sup>. Además, en base a la dimensión de la sección a reintegrar, y con el objetivo de mejorar la adhesión entre estratos, es recomendable la intervención en capas sucesivas presentando cada una de ellas una dosificación, respetando del mismo modo la disposición de los materiales originales<sup>57</sup>. Así, se recomienda la aplicación de un mortero de tierra –por lo general con adiciones- siendo el material que este en contacto directo con el muro, y posteriormente una segunda aplicación correspondiéndose a la capa de protección que presenta el edificio original, por lo general un enlucido de cal o yeso.

En situaciones en la que la pérdida de sección es importante, la metodología más frecuente de intervención es la ejecución de nuevas tapias adosadas a la preexistencia<sup>58</sup>. Estas tapias de reintegración basan en la reconstrucción superficial del muro con el objetivo no solo de regularizar la superficie, sino de aportar una protección al núcleo desprotegido, limitando la acción de los agentes de degradación. Esta clase de intervenciones cuestionan el criterio de reversibilidad de las intervenciones, por lo que durante la ejecución tienden a disponerse telas o mallas que, además de cumplir una función de agarre, permiten delimitar la arquitectura preexistente con los nuevos materiales incorporados, de forma que si se tuviera que revertir la operación funcionaría como indicativo. La unión en estos casos, y como se ha presentado, se realizará con listones de madera, siendo el material tradicional<sup>59</sup>.

54 GARCIA SORIANO, L. (2015). La restauración de la arquitectura de tapia de 1980 a la actualidad a través de los fondos del ministerio de cultura y del ministerio de fomento del gobierno de España. Criterios, técnicas y resultados. Directores. Dra. Camilla Mileto y Dr. Fernando Vegas López-Manzanares(2015) Universitat Politècnica de Valencia

55 VILLACAMPA CRESPO, L. (2018). La restauración y la rehabilitación de la arquitectura tradicional de tierra. El caso de Aragón. Tesis Doctoral. Directores Dra. Camilla Mileto, Dr. Fernando Vegas López-Manzanares y Dra. Lidia García Soriano. Universitat Politècnica de Valencia

56 W.A.A. (2016). Estudio de buenas prácticas en las intervenciones sobre arquitectura tradicional española. Instituto universitario de restauración del patrimonio. Universitat Politècnica de Valencia. "...una superficie más o menos planas con perfil en C"

57 GARCIA SORIANO, L. (2015). La restauración de la arquitectura de tapia de 1980 a la actualidad a través de los fondos del ministerio de cultura y del ministerio de fomento del gobierno de España. Criterios, técnicas y resultados. Directores. Dra. Camilla Mileto y Dr. Fernando Vegas López-Manzanares(2015) Universitat Politècnica de Valencia

58 GARCIA SORIANO, L. (2015). La restauración de la arquitectura de tapia de 1980 a la actualidad a través de los fondos del ministerio de cultura y del ministerio de fomento del gobierno de España. Criterios, técnicas y resultados. Directores. Dra. Camilla Mileto y Dr. Fernando Vegas López-Manzanares(2015) Universitat Politècnica de Valencia

59 GARCIA SORIANO, L. (2015). La restauración de la arquitectura de tapia de 1980 a la actualidad a través de los fondos del ministerio de cultura y del ministerio de fomento del gobierno de España. Criterios, técnicas y resultados. Directores. Dra. Camilla Mileto y Dr. Fernando Vegas López-Manzanares(2015) Universitat Politècnica de Valencia

## ii. Faltas de revestimiento. Completamiento de lagunas

Esta metodología se relaciona con pérdidas de material de poca sección, no suponiendo en ninguno de los casos afecciones a nivel estructural. La reposición de estos elementos, relacionándose por lo general con los enlucidos y capas más superficiales del paramento, se basa en renovar la protección superficial pérdida como forma de protección del núcleo expuesto, permitiendo a su vez completar la imagen del edificio, dotándola de un aspecto de unidad.

Por el contrario, la tendencia actual en estos casos es la de mínima intervención;

*“Cada vez son más los casos de intervenciones que tratan de conservar la materia original del edificio completando las lagunas sin pretender alcanzar el aspecto unitario y completo de la arquitectura recién construida. Al mismo tiempo, cada vez son más numerosos los esfuerzos por reducir el impacto de la fábrica de nueva construcción.”<sup>60</sup>*

Así, y con el fin de conservar tanto la materia original como de asegurar la estabilidad de la intervención, de forma previa a este tipo de intervenciones, se recomienda la estabilización del material original expuesto, ya que puede presentarse en un estado disgregado y pulverulento debido al lavado. Esta operación previa es fundamental, pues debido al poco espesor que presenta este tipo de reintegraciones, el uso de conectores es injustificado en base al criterio de mínima intervención. Por ello, el estrato sobre el que se asiente dicha reposición debe presentar un carácter estable con la finalidad de recibir el nuevo material.

Los materiales empleados en éstas operaciones son los tradicionales, tanto en la ejecución de la masa –morteros de tierra- y en caso de presentar revestimiento de forma tradicional morteros de cal.

Respecto a la metodología de aplicación, en estos casos no tienden a emplearse medios auxiliares como los encofrados a una cara, sino que la reposición se realiza de forma manual, pudiendo enrasar el acabado hasta el nivel original o quedando rehundidos con el objetivo de diferenciar la intervención. Esta aplicación de morteros de tierra se realiza en sucesivas capas verticales, compactándolas de forma horizontal, de forma previa a la siguiente aplicación<sup>61</sup>.

Respecto a los materiales de acabado, existe el uso predominante de la cal hidráulica, con adiciones de pigmentos o incorporación de áridos que faciliten una posterior identificación<sup>62</sup>.

## iii. Aplicación de una nueva protección

Consiste en la intervención sobre las superficies de acabado, limitándose a la reposición del enfoscado o a la costra superficial. Así se trata de las operaciones de reintegración que menos sección presentan. Según la propuesta a realizar, puede tratarse de la reposición general o localizada de la superficie de protección.

Los materiales de reposición, como en los casos anteriores siguen la disposición de los materiales originales, destacando en estos casos el uso de morteros de cal, pudiendo ser tanto natural como mezclas –cal hidráulica-. En casos de carencia de enlucido, esta operación se realizara con morteros de tierra. Ambos materiales han sido los que mejores resultados han obtenido con el tiempo, basándose de nuevo en la compatibilidad entre ambos.

Dentro de las operaciones de aplicación de una nueva protección se deben destacar además las intervenciones sobre las coronaciones. En estas se opta por la aplicación de una capa protectora, respetando el perfil de los restos existentes, en lugar de la reconstrucción parcial. De nuevo, se propone de forma previa la consolidación de la superficie, además de la disposición de elementos de agarre, como mallas de reparto de fibra de vidrio o telas de gallinero. Los materiales aplicados en estas, son los mismos que la protección original, siendo morteros de cal. en este tipo de intervenciones se debe destacar que la erosión de los materiales deja vista la malla comentada, pudiendo en caso de que sea metálica, provocar su oxidación al quedar expuesta<sup>63</sup>.

60 GARCIA SORIANO, L. (2015). La restauración de la arquitectura de tapia de 1980 a la actualidad a través de los fondos del ministerio de cultura y del ministerio de fomento del gobierno de España. Criterios, técnicas y resultados. . Directores. Dra. Camilla Mileto y Dr. Fernando Vegas López-Manzanares(2015) Universitat Politècnica de valencia

61 GARCIA SORIANO, L. (2015). La restauración de la arquitectura de tapia de 1980 a la actualidad a través de los fondos del ministerio de cultura y del ministerio de fomento del gobierno de España. Criterios, técnicas y resultados. . Directores. Dra. Camilla Mileto y Dr. Fernando Vegas López-Manzanares(2015) Universitat Politècnica de Valencia. De caso 2007 en la Torre de las Eras

62 Texto extraído de la memoria de proyecto. Expediente B0200650E21BC del archivo de la Consejería de Cultura de la Junta de Andalucía. De GARCIA SORIANO, L. (2015). La restauración de la arquitectura de tapia de 1980 a la actualidad a través de los fondos del ministerio de cultura y del ministerio de fomento del gobierno de España. Criterios, técnicas y resultados. . Directores. Dra. Camilla Mileto y Dr. Fernando Vegas López-Manzanares(2015) Universitat Politècnica de valencia

63 W.AA. (2016). Estudio de buenas prácticas en las intervenciones sobre arquitectura tradicional española. Instituto universitario de restauración del patrimonio.

## 06. Reconstrucción

### i. Tratamientos en profundidad. Morteros de inyección

Se trata de las intervenciones que tienen el objetivo de devolver el carácter de unidad, tanto a secciones pérdidas como a otros elementos, que presentan estado de descontextualización. Los criterios actuales de reconstrucción se basan en la intervención parcial, sin pretender llegar a la reinstauración de la edificación, con el objetivo de devolverle una coherencia estética que facilite la interpretación del conjunto.

De forma general tratan de dar solución a la discontinuidad material de la fábrica, relacionándose con la pérdida de volumen, presencia de lagunas, presencia de grietas -desconexión estructural, inestabilidad estructural<sup>64</sup>. Así, de forma previa a operaciones de reintegración, deben primar los tratamientos de refuerzo estructural, ya que por el contrario, la patología persistiría provocando a su vez la ineficacia de la intervención.

Respecto a las más comunes se considera la presencia de grietas y fisuras, provocando dicha descohesión – discontinuidad-, a causa de una patología en la estructura. Entre las operaciones más comunes asociadas con su intervención destacan el cosido de las grietas, mediante la disposición de grapas que unen ambas artes del muro. El material de unión debe trabajar de una forma solidaria con el muro, como madera.

De esta forma, además de las acciones de ejecución de una nueva tapia adosada al edificio original, entre las acciones de reconstrucción se da especial importancia al sellado de grietas y fisuras, al suponer un punto de entrada del agua de infiltración. Esta situación, sumada a degradación del material, puede suponer la aparición de fisuras internas, que pueden llegar a alcanzar la sección completa, suponiendo un punto de vulnerabilidad de la estabilidad de la fábrica. Por lo general la intervención se asocia con el cosido y relleno de morteros. Así, la metodología de actuación se relaciona con la inyección o colada de morteros de relleno, cuyo carácter fluido permita alcanzar la totalidad de la dimensión de la grieta<sup>65</sup>.

Respecto a los materiales empleados, se insiste de nuevo en la utilización de materiales tradicionales, al permitir una mayor compatibilidad, y por ello respetar las propiedades del material original –resistencia, transpirabilidad-. La tendencia actual relacionada con estas intervenciones es la del empleo de las técnicas y materiales tradicionales, siendo preferente el uso de morteros basados en cal hidráulica o cal aérea, con un apagado mínimo de seis meses<sup>66</sup>.

La inyección de morteros es el método más extendido de intervención en profundidad, al ser la única operación que permite alcanzar y rellenar los huecos interiores. El carácter fluido de este tipo de morteros, junto a los métodos de aplicación relacionados con presión, hacen que el producto actúe como unificador de la masa. Una de las principales debilidades de esta operación es el carácter interno de la operación, impidiendo controlar el proceso. En esta situación, los únicos parámetros controlables son la presión y la fluidez.

El prolongado uso de los morteros en restauración a lo largo del tiempo, han provocado la definición de las características deseables y esperables de ellos. En 1986, Paola Rosi detallaba las propiedades mínimas de un mortero:

*“lo más similar posible al original en cuanto a color y textura, compatibilidad con el material original, igual porosidad o ligeramente superior al original, resistencia a compresión menor o igual a la de la original, trabajabilidad adecuada, elevada compacidad, retracción mínima, contenido mínimo desales solubles,*

---

Universitat Politècnica de Valencia

64 GARCIA SORIANO, L. (2015). La restauración de la arquitectura de tapia de 1980 a la actualidad a través de los fondos del ministerio de cultura y del ministerio de fomento del gobierno de España. Criterios, técnicas y resultados. . Directores. Dra. Camilla Mileto y Dr. Fernando Vegas López-Manzanares(2015) Universitat Politècnica de valencia

65 W.AA. (2016). Estudio de buenas prácticas en las intervenciones sobre arquitectura tradicional española. Instituto universitario de restauración del patrimonio. Universitat Politècnica de Valencia

66 W.AA. (2016). Estudio de buenas prácticas en las intervenciones sobre arquitectura tradicional española. Instituto universitario de restauración del patrimonio. Universitat Politècnica de Valencia

*adecuada adherencia con el soporte, impermeabilidad a los fluidos, permeabilidad al vapor del agua y la durabilidad*<sup>67</sup>.”

Por ello, el material de intervención más compatible son los morteros de cal, al presentar un comportamiento similar y respetar la porosidad y permeabilidad del material original. Algunos autores enumeran sus propiedades<sup>68</sup>;

- Afinidad a nivel químico y mineralógico con los morteros de fabricas antiguas
- Alta elasticidad relativa, necesaria para adaptarse a los movimientos de los inmuebles
- Alta porosidad, evitando la creación de barreras y desplazamiento de humedad, además de soportar bien la cristalización de sales
- Gran estabilidad química inicial que tiende a aumentar con el tiempo
- Carencia de sales solubles, evitando el aporte exterior

Así, los morteros más empleados se componen de cal hidráulica o con algún tipo de aditivo de tipo puzolánico -árido hidráulico-<sup>69</sup>.

Respecto al uso de morteros de cal, también se deben relacionar debilidades en su aplicación. Estas se asocian con el proceso de carbonatación, necesario a partir del cual comienza a adquirir resistencia mecánica. Esta reacción se da cuando el hidróxido de calcio entra en contacto con el dióxido de carbono presente en el aire, dando lugar a la formación de carbonato de calcio.

El interior de las fábricas carece de aireación, por lo que la reacción se produce de forma más lenta, endureciéndose desde el exterior al interior. Esta situación puede dejar un núcleo activo no consolidado, por lo que el aporte de resistencia final es insuficiente<sup>70</sup>. Con el fin de evitar este tipo de situaciones, para tratamientos de este tipo se recomienda el uso de productos hidratados insolubles, como la cal hidráulica o la adición de cargas puzolánicas, que reaccionan de forma activa en contacto con el hidróxido de calcio.

Así, los morteros más empleados en procesos de consolidación estructural son los basados en cal hidráulica natural (sin presencia de aditivos), al permitir el fraguado del mortero en ausencia de CO<sub>2</sub>, la carbonatación en ausencia de aire. En relación a su empleo, es fundamental que no presente en su composición magnesio, y que la proporción de contenido en sodio y potasio sea cuanto más baja, con la finalidad de no aportar compuestos que puedan reaccionar con los presentes en la fábrica.

Las propiedades del material varían según la dosificación agua/arena/ligante, de la granulometría y composición del árido y del tipo de ligante. Como se ha comentado, para que la fluidez de la mezcla sea óptima, el tiempo de fluidez recomendado se estimará entre 7 y 11 segundos, relacionándose con una proporción aproximada de cal agua de 2:1<sup>71</sup>. Los canales de inyección deben presentar una inclinación de entre 15 y 30 grados por encima de la horizontal, facilitando la penetración de la lechada por gravedad. Esto se debe a que una mayor degradación conlleva un mayor número de oquedades, que por lo general están interconectadas.

67 De SEPULCRE AGUILAR, Alberto (2005). Influencia de las adiciones puzolánicas en los morteros de restauración de fábricas de interés histórico-artístico. Tesis Doctoral. E.T.S. Arquitectura (UPM)

68 SEPULCRE AGUILAR, Alberto (2005). Influencia de las adiciones puzolánicas en los morteros de restauración de fábricas de interés histórico-artístico. Tesis Doctoral. E.T.S. Arquitectura (UPM).

69 GISBERT AGUILAR, J., MATEOS ROYO, I. y SOMOVILLA DE MIGUEL, I.A. Morteros de restauración. Colegio Oficial de Aparejadores, Arquitectos Técnicos e Ingenieros de Edificación de Huesca. Revista ZABAGLIA.

70 SEPULCRE AGUILAR, Alberto (2005). Influencia de las adiciones puzolánicas en los morteros de restauración de fábricas de interés histórico-artístico. Tesis Doctoral. E.T.S. Arquitectura (UPM).

71 Según VV.AA (2013). La inyección de cales en la consolidación de fábricas. Investigación aplicada al caso de la Catedral de Santa María de Vitoria-Gasteiz. La adición de agua representara el 51% sobre el peso de la cal

### a. Método de actuación

En relación con los sistemas de inyección, la metodología de introducción del mortero o lechada más adecuada dependerá del estado en el que se encuentre la fábrica. De esta forma, según la presión necesaria para cada método, se puede diferenciar por orden ascendente entre; manual, por gravedad y por bombeado<sup>72</sup>.

Respecto al método manual, consiste en un método de inyección de carácter más superficial que los posteriores. Su aplicación se basa en la inyección por jeringuillas de gran capacidad, donde la presión es controlada en todo momento por el operario, lo que permite mayor precisión. Se debe considerar como un método de inyección complementario, al permitir controlar la inyección durante las etapas finales del proceso.

Otra metodología que no requiere de maquinaria específica –sistemas de presión - es la aplicación del mortero por la acción de la gravedad, por lo que su efectividad está directamente relacionada con la densidad de la lechada<sup>73</sup>. Este método se relaciona con fábricas debilitadas en las que un mínimo aporte de presión durante el proceso puede llevar a provocar deformaciones.

Esta técnica se basa en la colocación de recipientes conectados en la entrada de cada conducto de inyección. La presión ejercida por el recipiente y la inclinación de las perforaciones, hacen que el mortero se introduzca por la acción de la gravedad. Se trata de un método menos efectivo que los anteriores al no alcanzar la totalidad de las oquedades que presenta la fábrica, pero que permite ceñirse a las necesidades propias de esta.

Respecto a la metodología que requieren de un medio auxiliar destaca la aplicación por bombeo. En relación a los primeros consiste en la aplicación del producto a una presión constante, mediante una bomba hidráulica o de aire comprimido<sup>74</sup>. Esta presión permite una mayor difusión del producto por el interior de la fábrica, facilitando que alcance la mayoría de los huecos internos. El estudio y los resultados obtenidos a partir de estos procesos aproximan una presión óptima que oscila entre 1 y 2 bares<sup>75</sup>. El aumento de presión debe ser progresiva, pues una presión excesiva en el inicio del tratamiento podría provocar la obstrucción de los canales. El mismo autor describe que a mayores presiones existe la posibilidad de que el propio mortero obstruya las vías, lo que limita la distribución del producto<sup>76</sup>. Es recomendable una presión por debajo de 0.06 N/mm<sup>2</sup> inicialmente para facilitar una mejor distribución del mortero.

Al contar con el aporte de presión sobre la fábrica, existen recomendaciones sobre el modo de aplicación, debiendo realizarse desde las zonas laterales, continuando hacia el centro, repitiéndose la operación en las capas superiores. Esto permite una mayor distribución de las presiones, intentando repercutir lo mínimo posible sobre la estructura.

### b. Dificultades asociadas con el proceso

Un factor que determina efectividad del proceso es la fluidez que presenta el mortero. Según la proporción de cal y agua empleada el carácter líquido de la mezcla variará y por ello sus propiedades resultantes. Estas, ampliamente estudiadas, establecen que a menor relación agua cal, mayor resistencia y compacidad final tendrá el mortero<sup>77</sup>. A su vez esto supone una disminución de la fluidez, por lo que su inyección no sería posible. Según

72 SEPULCRE AGUILAR, Alberto (2005). Influencia de las adiciones puzolánicas en los morteros de restauración de fábricas de interés histórico-artístico. Tesis Doctoral. E.T.S. Arquitectura (UPM).

73 Respondiendo a la propiedad de escurrimiento, si la mezcla presenta un carácter más líquido, la inyección opondrá menor resistencia, mientras que una mezcla más densa precisará de presión para alcanzar las oquedades interiores

74 Documentación aportada en docencia del Máster de Conservación del Patrimonio Arquitectónico. Presentación Kimia.

75 Según unidades de presión atmosférica (atm) oscila igualmente entre 1 y 2. (1 atm= 1,013bar) (bussi, 1994:6). SEPULCRE AGUILAR, Alberto (2005). Influencia de las adiciones puzolánicas en los morteros de restauración de fábricas de interés histórico-artístico. Tesis Doctoral. E.T.S. Arquitectura (UPM).

76 Sepulcre Aguilar, Alberto (2005). Influencia de las adiciones puzolánicas en los morteros de restauración de fábricas de interés histórico-artístico. Tesis (Doctoral), E.T.S. Arquitectura (UPM). (Binda, Berra et al., 1990: 440)

77 (Labahn y Kohlhaas, 1985: 203; Neville, 1996: 269) de SEPULCRE AGUILAR, Alberto (2005). Influencia de las adiciones puzolánicas en los morteros de restauración de fábricas de interés histórico-artístico. Tesis Doctoral. E.T.S. Arquitectura (UPM).

el caso de estudio de la catedral de Vitoria, el óptimo carácter de fluidez se dará entre 7 y 11 segundos por ensayo del cono Marsh<sup>78</sup>.

La principal dificultad relacionada con la inyección de morteros o lechadas, se basa en la imposibilidad de observar el proceso de aplicación del producto<sup>79</sup>. Esta situación crea incógnitas relacionadas con la falta de relleno de oquedades o la posibilidad de que se den reacciones entre ambos materiales.

Con el fin de evitar ambas situaciones, deben caracterizarse el tamaño de las oquedades y fisuras que presenta el material como forma de proyectar la forma más efectiva de introducir el material. La clave del tratamiento de inyección, es que la distribución de la pasta sea uniforme en el interior de la fábrica. Independientemente del método de inyección planteado, la aplicación de la pasta debe realizarse de forma ascendente, desde la base hasta la coronación. Esta metodología, permite asegurar el relleno interior. Si por el contrario se comenzase desde el nivel superior, existe el riesgo de que la pasta comience el proceso de hidratación a medio camino, obstaculizando el paso del resto del mortero.

A su vez, al tratarse de un método de intervención “a ciegas”, es necesario monitorizar el grado de consolidación alcanzado. Se deben usar métodos de ensayo directos con carácter no destructivo o semidestructivo con el fin de evaluar el aumento de la resistencia mecánica<sup>80</sup>. Entre los ejemplos que el mismo autor cita destaca el micropenetrómetro dinámico o los gatos planos.

### c. Alteraciones identificadas tras el tratamiento de consolidación

El principal factor de alteración que se puede relacionar con la consolidación en profundidad depende del material empleado para el proceso.

Las limitaciones de los morteros de cal, se relacionan con las limitaciones del proceso de carbonatación, por lo que al ser conocedores del problema, se emplean morteros de cal hidráulica o cal aérea puzolánica. Además de esta situación corregible, la principal limitación de este tipo de morteros es la determinación de absorción de agua por parte de la fábrica. La proporción cal-agua proporcionará al mortero de unas propiedades concretas. De esta forma, la absorción por parte del paramento patrimonial, provocará una variación en dicha proporción, reduciendo de igual forma la penetración y las propiedades finales.

A lo largo del tiempo, se han aplicado una gran variedad de productos en tratamientos de consolidación estructural. Entre ellos, se debe destacar como práctica extendida la aplicación de los conocidos como “nuevos morteros de restauración” (morteros de base cementica). El uso de estos se debe relacionar con el rápido aporte de resistencia, haciéndolos idóneos para el tratamiento de inmuebles con un alto grado de inestabilidad y restauraciones de emergencia<sup>81</sup>.

Su aplicación en procesos de consolidación estructural fue ampliamente extendida durante obras realizadas durante el siglo XX, siendo esta situación la que sirva de estudio para determinar y estudiar los efectos que conlleva. Este material presentaba a priori buenos aspectos de compatibilidad y propiedades físico-químicas similares, que permitieron situarlo entre los materiales empleados para este tipo de tratamientos<sup>82</sup>.

Contrariamente a lo que se tomaba como óptimo, se observó que al entrar en contacto con los materiales

78 VV.AA (2013). La inyección de cal en la consolidación de fábricas. Investigación aplicada al caso de la Catedral de Santa María de Vitoria-Gasteiz. Pág 177. Ensayo normalizado de fluidez por el método de cono Marsh. La mezcla (1L) se deposita en un recipiente cónico cerrado por su parte inferior, situando debajo de él una probeta graduada. El ensayo consistirá en cronometrar cuando tiempo tarda la mezcla en pasar del cono a la probeta.

79 SEPULCRE AGUILAR, Alberto (2005). Influencia de las adiciones puzolánicas en los morteros de restauración de fábricas de interés histórico-artístico. Tesis Doctoral. E.T.S. Arquitectura (UPM).

80 SEPULCRE AGUILAR, Alberto (2005). Influencia de las adiciones puzolánicas en los morteros de restauración de fábricas de interés histórico-artístico. Tesis Doctoral. E.T.S. Arquitectura (UPM).

81 GISBERT AGUILAR, J., MATEOS ROYO, I. y SOMOVILLA DE MIGUEL, I.A. Morteros de restauración. Colegio Oficial de Aparejadores, Arquitectos Técnicos e Ingenieros de Edificación de Huesca. Revista ZABAGLIA

82 SEPULCRE AGUILAR, Alberto (2005). Influencia de las adiciones puzolánicas en los morteros de restauración de fábricas de interés histórico-artístico. Tesis Doctoral. E.T.S. Arquitectura (UPM).

patrimoniales genera incompatibilidades de porosidad, permeabilidad y elasticidad y coeficiente de dilatación<sup>83</sup>. La diferencia de comportamientos provoca tensiones internas, a causa de las diferencias de resistencia mecánica donde el cemento tiende a imponerse sobre la materia patrimonial. Esta situación hace del cemento un material a evitar durante estos procesos.

Otra de las múltiples patologías destacables es el elevado aporte de sales procedentes del cemento portland. La Epsomita, mirabilita, ettringita y thawasita son sales que se presentan ligadas al cemento Portland, siendo con la presencia de humedad cuando migran hacia la fábrica patrimonial<sup>84</sup>.

Otra clase de morteros empleados en esta clase de procesos son los morteros con un gran porcentaje de resinas, suponiendo un cambio filosófico respecto a la composición del ligante en el proceso de fraguado. Su uso comenzó a finales del S.XXI, debido a la tendencia del amplio uso de mortero de cemento cada vez más aditivados. Esta situación llevo a la completa sustitución del ligante cementicio por resinas orgánicas, llegando a ser el componente principal. El uso de estos morteros se ha extendido en los últimos 20 años, por lo que aun no se ha podido determinar las consecuencias relacionadas con su empleo. Según Josep Gisbert Aguilar et al. consideran el comportamiento de este material como menos adecuado que el cemento portland en el campo de la restauración.

83 SEPULCRE AGUILAR, Alberto (2005). Influencia de las adiciones puzolánicas en los morteros de restauración de fábricas de interés histórico-artístico. Tesis Doctoral. E.T.S. Arquitectura (UPM).

84 GISBERT AGUILAR, J., MATEOS ROYO, I. y SOMOVILLA DE MIGUEL, I.A. Morteros de restauración. Colegio Oficial de Aparejadores, Arquitectos Técnicos e Ingenieros de Edificación de Huesca. Revista ZABAGLIA. CASO DE LA CATEDRAL DE TUDELA . Durante las restauraciones de 1950 y 1980, se llevaron a cabo tratamientos de consolidación estructural y rejuntado usando morteros de cemento para ambos tratamientos. El aporte de sales como consecuencia del empleo excesivo del cemento, afecto de forma crítica a la caliza campanil, material con el que está construida la catedral en su totalidad. La caliza campanil es altamente sensible a las sales, provocando un rápido y avanzado deterioro debido a la imposibilidad de eliminar dicha intervención. Según Josep Gisbert Aguilar, solo hemos podido proponer medidas para mitigarlo.





# B3. MÉTODOS DE INTERVENCIÓN PROPUESTOS

## PARTE EXPERIMENTAL

### 07. MATERIALES A EMPLEAR

51

- i. Tierra estabilizada
- ii. FCC
  - i. Introducción al material
    - a. Proceso catalítico de lecho fluido
    - b. Estado de la cuestión. Grupos investigadores
      - 1. Grupo investigador de B. Pacewska y co.
      - 2. Grupo investigador de Kung-Chung Su
      - 3. Grupo investigador Giquima
      - 4. Conclusiones
  - iii. Composición
  - iv. Estudio morfológico
  - v. Distribución granulométrica
  - vi. Reactividad puzolánica
    - a. Cinética reacción puzolánica
    - b. Cinética de reacción de FCC
  - vii. Justificación de la elección del FCC como material de ensayo
  - viii. Características esperadas de los morteros
- iii. CAL

### 08. PARTE EXPERIMENTAL

- i. Introducción fase experimental
- ii. Planteamiento fase experimental

- a. Desarrollo como mortero de tierra
- b. Desarrollo como mortero de intervención
- c. Desarrollo como consolidante superficial
- iii. Materiales empleados. Tratamiento previos
- vi. Probetas
  - a. Proceso de producción
  - b. Dosificaciones
    - 1. Probetas de referencia
    - 2. Probetas de ensayo
    - 3. Justificación dosificaciones seleccionadas
  - c. Numero de probetas
  - d. Tiempos de ensayo
- v. Procedimiento experimental
  - a. Proceso de amasado
  - b. Proceso aplicación superficial
- vi. Ensayos
  - i. Justificación ensayos
  - ii. Desarrollo ensayos
    - 1. Técnicas de análisis y determinación
      - a. Estudio granulométrico
      - b. Ensayo retracción lineal
      - c. Microscopia electrónica de barrido (SEM)
      - d. Ensayo colorimetría
    - 2. Ensayos físico-mecánicos
      - a. Ensayo compresión
      - b. Ensayo flexión
      - c. Determinación dureza Shore C
      - d. Ensayo de erosión acelerada de Swinburne (SAET)
      - e. Ensayo cíclico de humectación-heladicidad y secado
      - f. Ensayo de determinación de absorción de agua por capilaridad
      - g. Ensayo de determinación de la permeabilidad al vapor de agua
- vii. Resultados
- viii. Conclusiones

## 07. Materiales a emplear

Tras la recopilación de información realizada, se puede determinar una serie de intervenciones más frecuentes en base a las patologías más usuales de la arquitectura de tapia. Estas se relacionan con reposiciones materiales de secciones o revestimientos perdidos, reconstrucción y reintegración estructural y consolidación superficial. Los materiales de intervención tienden a presentar la misma naturaleza que los presentes en el edificio, siendo por ello los morteros de tierra y de cal, a la vez que consolidantes inorgánicos como la nanocal los de uso más común. El trabajo que se presenta trata de proponer tres materiales susceptibles de ser empleados en esta clase de operaciones.

### i. Tierra estabilizada

Como se ha expuesto hasta el momento, los materiales de intervención material sobre arquitectura de tierra deben presentar unas propiedades acordes a las del material empleado de forma tradicional. Así, los considerados más compatibles con dicha materia, son los que presentan la misma naturaleza, tanto química como física. Los materiales propuestos en intervención, deben tratar de respetar la materialidad existente, por lo que deben ser acordes con la preexistencia.

Si se toma como referencia las conclusiones aportadas con anterioridad, se puede determinar el carácter superficial de las reposiciones materiales, conllevando nuevamente su exposición a agentes de degradación. Ante esta situación se abre una búsqueda de materiales que permitan una intervención compatible a la vez que duradera.

Así, el empleo de aditivos naturales sobre los morteros de uso tradicional se considera una opción cada vez más común entre los materiales de intervención. El uso de esta clase de materiales respecto a los morteros de tierra empleados de forma tradicional, permiten mejorar las propiedades físicas del adobe, aumentando su resistencia, evitando su retracción durante el secado, mejorando su resistencia a la erosión<sup>1</sup>.

De forma tradicional, el estabilizante empleado era la cal, aunque actualmente se tiende a la incorporación de otros aglomerantes como el cemento, con la finalidad de que la acelerar el proceso de fraguado y aporte unas rápidas propiedades<sup>2</sup>. Ante esta situación, se debe exponer nuevamente los efectos adversos que el empleo de este material puede conllevar, relacionándose principalmente con diferencias de dilatación e impermeabilizaciones. Así, y puesto que el empleo de cal como único material estabilizante es insuficiente, debido a la poca reactividad de algunas arcillas con el hidróxido de calcio, se está comenzando a estudiar el uso de mezclas de cal y puzolanas como estabilizantes<sup>3</sup>. Este sistema permite la formación de silicoaluminatos de calcio derivados de la reacción hidratada entre la cal y los materiales puzolánicas agregados adicionalmente a la tierra<sup>4</sup>.

Tomando esta información como referencia se plantea la aplicación del FCC como material de carácter puzolánico, el cual combinado con hidróxido de calcio, permitirá aportar mayor estabilidad al mortero.

1 CARCEDO FERNÁNDEZ, M. (2012) Resistencia a compresión de bloques de tierra comprimida estabilizada con materiales de sílice de diferente tamaño de partícula. TFM. Director Mariano González Cortina. Universidad Politécnica de Madrid. Escuela Universitaria de Arquitectura Técnica.

2 MILETO, C., VEGAS, F., LÓPEZ, J.M. (2011) Criterios y técnicas de intervención en tapia. La restauración de la torre Bofilla de Bétera (Valencia). Informes de la Construcción Vol. 63, 523, 81-96, Julio-Septiembre

3 GUERRERO BACA, L.F., SORIA LÓPEZ, J., (2018) Tierra vertida compactada, estabilizada con cal y puzolanas. Terra LYON 2016. JOFFROY, THIERRY, GUILLAUD, HUBERT, SADOZAI, CHAMSA (dir.)

4 SEPULCRE AGUILAR, Alberto (2005). Influencia de las adiciones puzolánicas en los morteros de restauración de fábricas de interés histórico-artístico. Tesis Doctoral. E.T.S. Arquitectura (UPM).

## ii. FCC

### i. Introducción al material

El craqueo catalítico es un proceso ampliamente usado en la industria petroquímica, también llamado cracking o desintegración. Tiene como fin la modificación de la estructura molecular y la reducción del tamaño de las moléculas de hidrocarburos presentes en el crudo<sup>5</sup>. La reducción de las cadenas de elevado peso molecular se da a partir de la rotura de enlaces carbono- carbono, resultando en la obtención de naftas<sup>6</sup>. Estos productos están destinados principalmente como combustibles para automóviles de calidad extra.

Existen tres tipos de procesos de desintegración; el proceso de pirolisis, proceso de hidrólisis y el de desintegración catalítica en lecho fluido. Este último proceso, introducido durante la segunda guerra mundial, sustituyó a los anteriores que consistían en la pirolisis. En un principio el proceso se realizaba en lecho fijo, siendo paulatinamente sustituido por el de lecho fluido.

La desintegración catalítica se emplea para la fabricación de gasolinas, olefinas e isobutanos por la descomposición selectiva de destilados pesados<sup>7</sup>. El proceso de cracking implica la intervención de un catalizador, siendo el que facilite la separación de cadenas. Estas sustancias, presentan una estructura mineral correspondiente a una Zeolita tipo Y<sup>8</sup>, compuesto principalmente por silicatos modificados de alúmina hidratados<sup>9</sup>. El empleo de estos catalizadores zeolíticos tiene un uso generalizado en la industria petroquímica, llegando a representar una quinta parte de los catalizadores empleados durante estos procesos de separación<sup>10</sup>.

Con cada proceso de separación el catalizador tiende a disminuir el tamaño medio de partícula, provocando la pérdida de propiedades. Tras cada proceso la fracción inservible de catalizador se retira del flujo de circulación, reponiéndose por un porcentaje nuevo de forma periódica. Este constante reemplazo genera grandes cantidades de residuo anuales, causando problemas de desechos, ya que las industrias deben cumplir con la normativa ambiental, obligándolas a eliminar el residuo de forma adecuada. La cantidad anual de catalizador generado anualmente ronda las 400.000 toneladas de este tipo de catalizadores de forma global<sup>11</sup>. Numerosos autores coinciden en la alta producción de este residuo, aportando información clave del aumento de este en los últimos años al pasar en 1994 de 1000 T/día a 3000 T/día en la última década<sup>12</sup>.

#### a. Proceso catalítico de lecho fluido

Las unidades de desintegración catalítica presentan los siguientes dispositivos; reactor, regenerador, fraccionador principal, ventilador o compresor, separador de catalizador gastado, equipo de recuperación de catalizador, incluyendo a su vez centrifugadoras en el interior del reactor y del generador, tanque de sedimentación de suspensiones, precipitador electrostático opcional y la unidad recuperadora de gas<sup>13</sup>.

5 Soriano Martínez, L. (2007). Nuevas aportaciones en el desarrollo de materiales cementantes con residuo de catalizador de craqueo catalítico (FCC). Tesis doctoral. Director; Payá Bernabéu, J. Universitat Politècnica de València

6 Soriano Martínez, L. (2007). Nuevas aportaciones en el desarrollo de materiales cementantes con residuo de catalizador de craqueo catalítico (FCC). Tesis doctoral. Director; Payá Bernabéu, J. Universitat Politècnica de València

7 Soriano Martínez, L. (2007). Nuevas aportaciones en el desarrollo de materiales cementantes con residuo de catalizador de craqueo catalítico (FCC). Tesis doctoral. Director; Payá Bernabéu, J. Universitat Politècnica de València. pg. 13

8 Omoniyi Odjo, A. (2016). Reciclado de polímeros por craqueo catalítico; estudio de la viabilidad de utilización de reactores convencionales de craqueo catalítico en lecho fluidificado. Tesis Doctoral. Universidad de Alicante.

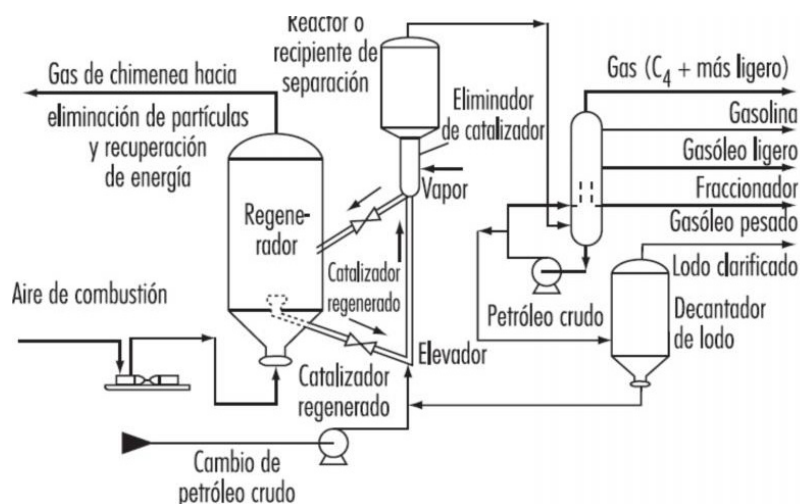
9 Soriano Martínez, L. (2007). Nuevas aportaciones en el desarrollo de materiales cementantes con residuo de catalizador de craqueo catalítico (FCC). Tesis doctoral. Director; Payá Bernabéu, J. Universitat Politècnica de València

10 Zornoza Gómez, E.M., (2007). El papel del catalizador usado de craqueo catalítico (FCC) como material puzolánico en el proceso de corrosión de armaduras de hormigón. Tesis Doctoral. Director; Payá Bernabéu, J. Universitat Politècnica de València

11 Zornoza Gómez, E.M., (2007). El papel del catalizador usado de craqueo catalítico (FCC) como material puzolánico en el proceso de corrosión de armaduras de hormigón. Tesis Doctoral. Director; Payá Bernabéu, J. Universitat Politècnica de València

12 García de Lomas Gómez, M. (2016). Viabilidad científica, técnica y medioambiental del catalizador gastado de craqueo catalítico (FCC) como material puzolánico. Tesis doctoral. Director; Sánchez de Rojas, M.I., Frías Rojas, M. Universidad Autónoma de Madrid

13 Soriano Martínez, L. (2007). Nuevas aportaciones en el desarrollo de materiales cementantes con residuo de catalizador de craqueo catalítico (FCC). Tesis doctoral. Director; Payá Bernabéu, J. Universitat Politècnica de València



El catalizador es mezclado con vapores de petróleo calientes en una corriente controlada que pasa a través del reactor donde tiene lugar la reacción<sup>15</sup>. Tras este proceso, los vapores se fraccionan para la obtención de los diferentes productos y el polvo carbonizado se separa por sedimentación en un separador, donde desciende por gravedad. Para la reutilización del catalizador, este debe ser arrastrado por una corriente de aire a través de la zona de regeneración, tras lo que la parte útil vuelve a introducirse en el proceso.

Con cada proceso de separación el catalizador pierde propiedades, viéndose reflejado en la reducción de la masa del material, perdiéndose hasta un 0.2% del peso del catalizador<sup>16</sup> y el aumento de la proporción de finos<sup>17</sup>. Este aumento de la proporción de partículas de menor tamaño, se debe a la fragmentación de las partículas, las cuales presentan inicialmente un diámetro aproximado de  $60 \mu\text{m}$ <sup>18</sup>, reduciéndose hasta aproximadamente  $6,37 \mu\text{m}$ <sup>19</sup>. La elevada cantidad de residuo generado de forma anual, deriva en el interés por su reutilización, provocando en los últimos años un aumento por la investigación sobre el tema .

### Reutilización del residuo. Segunda vida del material.

En la actualidad, las aplicaciones del catalizador gastado de craqueo catalítico, denominado a partir de ahora como FCC, se reducen a escasas posibilidades. El primer dato de referencia sobre este residuo data de 1995, donde se aportó información sobre su composición química y estructura molecular, confirmando su uso como material puzolánico altamente reactivo.

Este carácter presenta propiedades adecuadas para su utilización en la elaboración de morteros y hormigones, encontrando un amplio interés sobre la aplicación de este en el campo de la construcción.

Además de esta posibilidad relacionada con la elaboración de materiales de construcción, otras de las aplicaciones se relacionan con la fabricación de materiales resistentes al fuego, al soportar temperaturas de hasta  $1759^{\circ}\text{C}$ , como adición en mezclas asfálticas, aumentando su dureza, como materiales de absorción de compuestos volátiles y en la incorporación de cerámicas y derivados del caolín<sup>20</sup>

14 Imagen extraída de <http://craqueocatalitico.blogspot.com/2016/>

15 García de Lomas Gómez, M. (2016). Viabilidad científica, técnica y medioambiental del catalizador gastado de craqueo catalítico (FCC) como material puzolánico. Tesis doctoral. Director; Sánchez de Rojas, M.I., Frías Rojas, M. Universidad Autónoma de Madrid

16 García de Lomas Gómez, M. (2016). Viabilidad científica, técnica y medioambiental del catalizador gastado de craqueo catalítico (FCC) como material puzolánico. Tesis doctoral. Director; Sánchez de Rojas, M.I., Frías Rojas, M. Universidad Autónoma de Madrid

17 Soriano Martínez, L. (2007). Nuevas aportaciones en el desarrollo de materiales cementantes con residuo de catalizador de craqueo catalítico (FCC). Tesis doctoral. Director; Payá Bernabéu, J. Universitat Politècnica de València

18 Soriano Martínez, L. (2007). Nuevas aportaciones en el desarrollo de materiales cementantes con residuo de catalizador de craqueo catalítico (FCC). Tesis doctoral. Director; Payá Bernabéu, J. Universitat Politècnica de València

19 Nan Su, Hung-Yuan Fang, Zong- Hwei Chen, Fu-Shung Liu. (2000). Reuse of waste catalysts from petrochemical industries for cement substitution". Cement and Concrete Research, vol. 30, 1773-1783.

20 Zornoza Gómez, E.M., (2007). El papel del catalizador usado de craqueo catalítico (FCC) como material puzolánico en el proceso de corrosión de armaduras de hormigón. Tesis Doctoral. Director; Payá Bernabéu, J. Universitat Politècnica de València pg. 77

## b. Estado de la cuestión. Grupos investigadores

Las primeras referencias sobre el catalizador gastado de craqueo catalítico son relativamente recientes, datándose de 1995<sup>21</sup>, donde se usó como sustituto del caolín en la elaboración de fritas<sup>22</sup>. En este estudio, el residuo demostró su eficacia al aportar las mismas propiedades que el producto comentado, sentándose la base sobre la aplicación del catalizador.

A partir de estas conclusiones, la investigación se expandió encontrando en la ingeniería de construcción gran interés por este residuo. Los diferentes estudios realizados, se basan en su composición similar al metacaolín, para estudiar la adición o sustitución de este como puzolana a sistemas cementicios. El fundamento de estos estudios se basa en la reacción puzolánica, al reaccionar de forma activa con el hidróxido de calcio presente en el cemento.

El interés por el FCC para esta investigación radica en los estudios realizados sobre la combinación de este con morteros de cal. Los productos hidratados obtenidos durante la reacción cal-puzolana son similares a los que se forman en la hidratación del cemento Portland<sup>23</sup>, por lo que se cree de importancia mostrar los datos aportados por estas investigaciones, como base para la caracterización del residuo.

A continuación se desarrollaran de forma cronológica las conclusiones obtenidas por los diferentes grupos de investigación, destacando las aportaciones que se creen de interés para este trabajo.

### 1. Grupo investigador de B. Pacewska y co.

Pertenecientes al Instituto de Química Plock Branch, de la Universidad Politécnica de Warsaw, Polonia. Sus estudios giran en entorno a la sustitución de parte de cemento o árido por el catalizador en morteros y hormigones. Aun no siendo el material en el que se centra esta investigación se cree conveniente incluirlo al aportar datos que pueden extrapolarse a la sustitución en morteros de cal.

*1998. Título del artículo: "Use of spent catalyst from catalytic cracking in fluidized bed as a new concrete additive"*<sup>24</sup>

Este experimento estudia de forma comparativa la fijación de cal tras la adición de varias puzolanas (catalizador de craqueo catalítico, el humo de sílice y las cenizas volantes) en pastas de cemento con una sustitución del 25%. Este estudio resulta de interés al estudiarse a su vez el tiempo de fraguado y las resistencias mecánicas de las pastas.

Los resultados obtenidos permiten determinar que el porcentaje de cal fijada a los 28 días por el FCC y el humo de sílice es similar, y superior al conseguido por la ceniza volante. En relación a los tiempos de fraguado de las diferentes pastas, la adicionada con FCC presenta mayor velocidad de reacción respecto las puzolanas empleadas.

En relación al aporte de resistencia mecánica, el catalizador muestra mejoras en el aporte de resistencia a partir de los 7 días de curado, aumentando hasta casi el doble en comparación a los 28 días.

*2000. Título del artículo: "Hydration of cement slurry in the presence of spent cracking catalyst"*<sup>25</sup>

21 1995. Escandino y col. (1995). Se trata de la primera referencia de estudio sobre el craqueo. La investigación se basa en el uso del FCC como sustituto del caolín en la producción de fritas de cerámica (Una frita cerámica es una mezcla de sustancias químicas inorgánicas obtenida por enfriamiento rápido de un fundido ( $T^{\circ}$  fusión = 1350- 1550°C), que es una combinación compleja de materiales, convirtiendo las sustancias químicas así elaboradas en compuestos vítreos insolubles. <https://www.anffecc.com/es/fritas>). En esta investigación se concluyó que esta adición no tiene influencia en las propiedades cerámicas ni en los esmaltes obtenidos de ella.

22 A. Escardino, J.L. Amoros, A. Moreno and E. Sánchez. (1995) "Utilizing the used catalyst from refinery FCC units as a substitute for kaolin in formulating ceramic frits". Waste Management and Research, 13, 569-578

23 García de Lomas Gómez, M. (2016). Viabilidad científica, técnica y medioambiental del catalizador gastado de craqueo catalítico (FCC) como material puzolánico. Tesis doctoral. Director; Sánchez de Rojas, M.I., Frias Rojas, M. Universidad Autónoma de Madrid

24 B. Pacewska, I. Wilinska and M. Bukowska. "Use of spent catalyst from catalytic cracking in fluidized bed as a new concrete additive". Thermochemica Acta 322, 1988, 175-181.

25 B. Pacewska, I. Wilinska and M. Bukowska. "Hydration of cement slurry in the presence of spent cracking catalyst". Journal of Thermal

Esta investigación se centró en ensayar la influencia la sustitución de FCC por cemento en diferentes porcentajes (0, 5, 10, 15, 20 y 25%). El interés de este para la presente investigación radica en la caracterización del FCC realizada en la primera parte del artículo.

Se concluyó que la composición del catalizador se basa en  $\text{SiO}_2$  y  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , permitiendo determinar su proximidad al patrón de una zeolita tipo Y, cuya composición es  $\text{Na}_9(\text{AlO}_2)_9(\text{SiO}_2)^{15}\cdot 27\text{H}_2\text{O}$ , con carácter amorfo.

Como conclusión del estudio se determinó que cuanto mayor sea la proporción del FCC sustituido, aumenta de forma proporcional el calor liberado durante el proceso de curado.

El estudio gravimétrico determinó además que a mayor porcentaje de sustitución de FCC, la cantidad de portlandita disminuye, demostrando que actúa como puzolana.

También se determinó que a pequeñas proporciones, entre 5-10%, el catalizador actúa como sustituto del cemento y como acelerador del sistema.

*2000. Título del artículo: "Influence of some aggressive media on corrosion resistance of mortars with spent cracking catalyst"<sup>26</sup>*

Este estudio determinó la resistencia mecánica de pastas de cemento con sustitución del 10 y 20% tras someterlas a un ambiente químico de sulfatos y cloruros.

Este ensayo determinó que las pastas con mayor proporción, el catalizador actuaba como una puzolana muy activa y aportaba características impermeabilizantes además de ser más resistentes a medios agresivos. El contacto con una atmósfera agresiva provocó la disminución de resistencia a compresión, aunque se comprobó un ligero aumento de resistencia a flexotracción.

*2002. Título del artículo: "Effect of waste aluminosilicate material on cement hydration and properties of cement mortars"<sup>27</sup>* 57

En un estudio anterior de este mismo grupo se percibió la importancia del tamaño de partícula en relación con su capacidad de reacción. Este estudio tiene la finalidad de determinar la influencia de esta variación en las propiedades del residuo. Se ensayarán dos tipos de FCC, diferenciándose en su tamaño, correspondiendo a  $34\mu\text{m}$  y  $76\mu\text{m}$  de diámetro.

Los resultados obtenidos por gravimetría muestran que las partículas de menor tamaño fijaban mayor cantidad de cal, acelerando el proceso de hidratación. Por el contrario, los picos de las curvas correspondientes con los de mayor diámetro eran menos intensos. Además se determinó que los morteros realizados con el catalizador de menor diámetro mostraban un tamaño de poro menor y una mayor superficie específica, relacionándose con una mayor reactividad.

Respecto a las resistencias mecánicas no se aportaron nuevos datos relevantes, salvo confirmar que la adicción de esta puzolana mejora la resistencia.

## 2. Grupo investigador de Kung-Chung Su

Grupo perteneciente al Departamento de Química, de la Universidad Nacional de Taipei, Taiwan en colaboración con el grupo de investigación de Nan Su y colaboradores, pertenecientes al Departamento de Ingeniería de la Construcción de la Universidad Nacional de Ciencia y Tecnología de Yunlin, Taiwan.

*2000. Título del artículo: "Reuse of waste catalysts from petrochemical industries for cement substitution"<sup>28</sup>*

Analysis and Calorimetry, Vol. 60, 2000, 71-78.

26 B. Pacewska, M. Bukowska and I. Wilińska. "Influence of some aggressive media on corrosion resistance of mortars with spent cracking catalyst". Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, Vol. 60, 2000, 257-264.

27 B. Pacewska, M. Bukowska, I. Wilińska and W. Nocun-Wczelik. "Effect of waste aluminosilicate material on cement hydration and properties of cement mortars". Cement and Concrete Research, 32, 2002, 1823-1830.

28 Nan Su, Zong- Hwei Chen ,Hung-Yuan Fang. "Reuse of spent catalyst as fine aggregate in cement mortar". Cement and Concrete Composites, 23, 2001, 111-118.

Se trata de un estudio comparativo entre dos fracciones de FCC con diferencia respecto al diámetro de partícula, similar al último título comentado del grupo B. Pacewska y co.

En la primera parte del estudio se realizó un estudio sobre las propiedades de ambos, revelando que presentan una composición de entre 90% y 75% de  $\text{SiO}_2$  y  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . El ensayo de Difracción de rayos X realizado muestra nuevamente una composición próxima a la Faujasita ( $\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 4,7\text{SiO}_2 \cdot x\text{H}_2\text{O}$ )

En este mismo estudio se determinó también las características sobre morteros frescos, determinando que un mayor porcentaje de sustitución del catalizador, disminuía la trabajabilidad como consecuencia de la absorción de agua por parte de estos materiales. También concluyeron que cuando menor diámetro presente la partícula mayor es la demanda de agua por parte del residuo.

Como conclusión del estudio se determinó que los morteros con sustituciones del 5-15% por la partícula de menor tamaño presentaba mayores resistencias mecánicas, debido a que estas presentan una superficie específica mayor, mejorando la matriz del mortero.

#### 2004. "Spent FCC catalyst as a pozzolanic material for high performance mortars"<sup>29</sup>

En este estudio se estudió la adicción en morteros de cal del catalizador con diferentes tamaños de partículas, comparando a su vez con la adicción de humo de sílice.

Como resultado se obtuvo que el FCC de menor tamaño presentaba un mayor porcentaje de cal fijada. Además se determinó que las propiedades aportadas por el catalizador con menor diámetro eran comparables a las propiedades que confiere el HS al mortero, demostrando de nuevo la alta capacidad reactiva de la puzolana.

### 3. Grupo investigador Giquima

GIQUIMA, (grupo de investigación en Química de los Materiales), actualmente formando parte de ICITECH (Instituto de Ciencia y Tecnología del Hormigón). Integrado dentro del Departamento de Ingeniería de la Construcción de la Universidad Politécnica de Valencia, España.

#### 1999. Título del artículo: "Fluid catalytic cracking catalyst residue (FC3R). An excellent mineral by-product for improving early-strength development of cement mixtures"<sup>30</sup>

En la primera parte del estudio se caracterizó la ceniza, concluyendo que se trataba de partículas esféricas irregulares cuyo peso específico revelaba su elevada porosidad. Además se confirmó lo destacado por el grupo de Kung-Chung Su, al determinar que se trata de un material que demanda agua, dato a tener en cuenta al relacionarse con la trabajabilidad del mortero.

Para ensayar la reactividad de las muestras, el FCC se sometió a un proceso de molienda donde las partículas originales (esféricas) se rompían aumentando su finura. Los tiempos de molienda varían entre 5 y 120 minutos. Al comenzar el proceso de elaboración de las probetas se determinó que a partir de la molienda de 40 minutos, la trabajabilidad disminuía al precisar un mayor aporte de agua.

En relación a las resistencias mecánicas aportadas, se apreció que la resistencia no se veía incrementada con un mayor tiempo de molienda, tal y como se esperaba. Se determinó como tiempo de molienda óptimo 20 minutos, al tratarse de la mayor resistencia alcanzada.

En este mismo estudio también se experimentó con la influencia del porcentaje de sustitución. Se ensayó una sustitución del 5, 10, 15, 20, 25, y 30%. Como conclusiones se obtuvo que los porcentajes donde se encontraban mayor ganancia de resistencia se dan entre el 15 y 20%. A mayor porcentaje la trabajabilidad disminuía y

29 Hsiu-Liang Chen, Yun-Sheng Tseng, Kung-Chung Hsu. "Spent FCC catalyst as a pozzolanic material for high-performance mortars". Cement and Concrete Composites, 26, 2004, 657-664.

30 J. Payá, J. Monzó, M.V. Borrachero. "Fluid catalytic cracking catalyst residue (FC3R). An excellent mineral by-product for improving early strength development of cement mixtures". Cement and Concrete Research, 29, 1999, 1773-1779.



presentaban mayor porosidad. Además se concluyó que cuando el catalizador se sustituía por la carga y no por el conglomerante, la resistencia a compresión aumentaba continuamente.

*2001. Título del artículo: "Fluid Catalytic Cracking Residue (FC3R) as a New Pozzolanic Material: Thermal Analysis Monitoring of FC3R/Portland Cement Reactions"<sup>31</sup>*

En este estudio se evalúa comparativamente la actividad puzolánica del FCC con la del humo de sílice y el metacaolín por medio del estudio de cal fijada en pastas de cal y cemento.

En este estudio se concluyó que para pastas de cal, el porcentaje de cal fijada por el FCC a los 28 días de curado era muy similar al obtenido por el metacaolín, al obtenerse mayor cantidad de productos de hidratación de tipo aluminatos cálcicos, encontrándose 5 veces más que en el proceso de hidratación del humo de sílice.

*2004. Título del artículo: "Chemical activation of pozzolanic reaction of fluid catalytic catalyst residue (FC3R) in lime pastes: thermal analysis"<sup>32</sup>*

En esta investigación se realizaron estudios sobre la actividad puzolánica del FCC en combinación con activadores químicos en pastas de cal.

En el primer apartado del estudio se determinó la influencia de los diferentes activadores. Se observó que a una edad temprana, la totalidad de la cal disponible ya había sido fijada, comprobando la aceleración de la reacción por parte de los activadores. Según el orden de fijación se determinó la efectividad de los activadores de la siguiente forma, NaOH < NaOH-yeso < control < CaCl<sub>2</sub> < Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>. De esta forma se determinó que el Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> era el activador que mejores resultados presentaba en relación a la fijación de la cal.

La segunda parte de este estudio se centró en aproximar el porcentaje óptimo de activador para pastas adicionadas con FCC, determinando que un 2% era suficiente para alcanzar la totalidad de cal fijada.

59

*2005. Título del artículo: "Ensayos de envejecimiento acelerado sobre materiales compuestos con base de cal o con base mixta de cal y yeso"<sup>33</sup>*

Este estudio trata de determinar la durabilidad de morteros de cal y morteros de mixtos de cal y yeso adicionados con FCC y meta caolín. Se concluyó que los morteros de cal con presencia de estas puzolanas mejoraba la durabilidad ante ciclos de hielo-deshielo y ante el ataque de con Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>.

Durante el ataque con Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, se observaron mejoras en la resistencia de los morteros con adicción de FCC, conclusiones que hace viable la fabricación de estos materiales como morteros de restauración.

*2007. Título del artículo: "The chemical activation of pozzolanic reaction of fluid catalytic cracking catalyst residue (FC3R) in lime pastes"<sup>34</sup>*

Se trata de una continuación del estudio presentado en 2004. Esta investigación se centró en determinar la resistencia mecánica obtenida por la adición de activadores químicos a pastas de cal/FCC.

Se determinó que el aumento de resistencia se relacionaba con la cantidad de cal fijada, al obtener el mismo resultado que en el estudio de años atrás; NaOH < NaOH-yeso < control < CaCl<sub>2</sub> < Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>.

31 J. Payá, J. Monzó, M.V. Borrachero, E Peris-Mora, S. Velázquez. "Fluid Catalytic Cracking Residue (FC3R) as a New Pozzolanic Material: Thermal Analysis Monitoring of FC3R/Portland Cement Reactions". Seventh CANMET/ACI. International Conference on Fly Ash, Silica Fume, Slag and Natural Pozzolans in Concrete. Supplementary papers. Chennai, India, 22-27 de Julio 2001.

32 J. Payá, J. Monzó, M.V. Borrachero, S. Velázquez. "Chemical activation of pozzolanic reaction of fluid catalytic cracking residue (FC3R) in lime pastes: thermal analysis". Advances in Cement Research, 16, No. 3, 2004, 123-130.

33 V. Piles, M.V. Borrachero, J. Payá, J. Monzó, A. García- Codoñer. "Ensayos de envejecimiento acelerado sobre materiales compuestos con base de cal o con base mixta de cal y yeso". VI Congreso Nacional de Materiales Compuestos. AEMAC 2005. Asociación Española de Materiales Compuestos. Valencia, Junio, 2005, 947-954.

34 J. Payá, J. Monzó, M.V. Borrachero and S. Velázquez. "The chemical activation of pozzolanic reaction of fluid catalytic cracking catalyst residue (FC3R) in lime pastes". Advances in Cement Research, 19, No. 1, 2007, 9-16.

Confirmando que el  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  era el activador más efectivo, se profundizó en la influencia de este en relación con el mortero. Se determinó que a mayor adición del activador se obtenía un aumento continuo de la resistencia a compresión de las pastas.

En este mismo estudio se estableció también la proporción óptima de cal FCC, fijándose en un intervalo de FCC/cal entre 1:1 y 1:2.

*2009. Título del artículo: "Estudio del comportamiento de diversos residuos de catalizadores de craqueo catalítico (FCC) en cemento Portland"<sup>35</sup>*

Este estudio trata de determinar las características físico-químicas y la reactividad de 5 catalizadores de craqueo catalítico de diferente procedencia.

Tras un estudio termogravimétrico de las pastas y morteros y evaluar la evolución de las resistencias mecánicas, se concluyó que no existen diferencias significativas entre los cinco residuos empleados.

*2013.<sup>36</sup>*

En este artículo se realizó una comparativa desde el punto de vista micro-estructural y de resistencias mecánicas en pastas y morteros sustituidos por meta caolín y FCC.

Se observó que a bajas temperaturas (5-10°C), los valores de fijación de cal del meta caolín eran negativos mientras que los FCC resultaron positivos, determinando que este residuo mantenía su actividad puzolánica a bajas temperaturas.

#### 4. Reflexiones

De acuerdo con expuesto, las primeras investigaciones sobre el FCC revelan información sobre su viabilidad como posible material de construcción. Se trata de un residuo de carácter puzolánico que en combinación con el hidróxido de calcio aumenta las resistencias mecánicas, además de presentar buen comportamiento frente a medios agresivos.

Al tratarse de un residuo industrial relacionado con los procesos de separación química del crudo, se han realizado estudios sobre el posible carácter contaminante de este. Nan y col. (2000) y Al-Jabri y col. (2013) realizaron estudios de lixiviación de morteros, llegando a la conclusión de es un desecho industrial no peligroso ni contaminante, al observar que las concentraciones de metales pesados potencialmente peligrosos no excedía los límites legales permitidos por la legislación ambiental<sup>37</sup>. Debido a esto, se considera que el residuo en las proporciones estudiadas (20%) no constituye un problema ambiental, proponiéndose como un material alternativo para el sector de la construcción.

<sup>35</sup> J. Payá, M. V. Borrachero, J. Monzó, L. Soriano. "Estudio del comportamiento de diversos residuos de catalizadores de craqueo catalítico (FCC) en cemento Portland". *Materiales de Construcción*. Vol. 59, 296, 37-52. octubre-diciembre 2009

<sup>36</sup>

<sup>37</sup> Martínez-López, C., Torres-Agredo, J., Mejía-De Gutiérrez, R., Mellado-Romero, A.M., Payá-Bernabeu, J.M., (2013). Uso de test de lixiviación para determinar la migración de contaminantes en morteros de sustitución con residuos de Catalizador de craqueo catalítico (FCC). *Medellín. Dyna*, año 80, nro. 181, pp. 163-170.

### iii. Composición

Según lo expuesto anteriormente, se puede concluir que el 90%<sup>38</sup> de la composición del catalizador se basa en alúmina y sílice. Se presentan además pequeñas cantidades de óxidos de hierro, magnesio, sodio y potasio<sup>39</sup>, sin detectarse la presencia de calcio ni de sulfatos. Debido a esta composición, se puede afirmar que el catalizador presenta un pH ácido<sup>40</sup>. Su composición es similar a la que presenta el metacaolín<sup>41</sup>, por lo que cabe esperar de él un carácter puzolánico muy activo.

En el estudio realizado por J. Payá y co. (2009)<sup>42</sup> se comparan diferentes catalizadores con el fin de comprobar la similitud en la composición de los residuos. Tras su análisis se determinó que no existen diferencias apreciables entre los cinco tipos de residuos. Las únicas variaciones apreciables se relacionan con el SiO<sub>2</sub> que oscila entre 45,46 y 49,60% y el Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> que varía entre 42,73 y 47,47%.

Además se observó la presencia de elementos de la familia de los lantánidos, tratándose de óxidos metálicos típicos, usados para formular las zeolitas presentes en este tipo de catalizador.

Los datos aportados por las tesis doctorales de Walter Leopoldo Roldán Latorre<sup>43 44</sup> y Ariel Rey Villca Pozo<sup>45 46</sup> muestran dos análisis sobre la composición del FCC, proporcionando datos similares, con ligeras variaciones de los compuestos secundarios. Estos resultados se muestran a continuación al creerse de importancia y tratando de aportar datos cuantitativos de referencia sobre la composición del FCC.

SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	SO <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	*PF
48.2	46.0	0.95	<0.01	<0.01	-	<0.01	0.50	1.50

47

SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	SO <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	TiO <sub>2</sub>	Cr	*PF
47.76	49.26	0.6	0.11	0.17	0.02	0.02	0.31	0.01	1.22	-	0.51

48

Si se comparan ambos resultados se llega a la conclusión de la presencia de los compuestos SiO<sub>2</sub> y Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> de entre 94.2 y 97% de su composición, confirmando la naturaleza sílicoaluminosa del residuo.

En estudio comparativo realizado por J. Payá y co. (2009) se realiza una difracción de rayos X de los diferentes residuos. En la gráfica se muestra la presencia de picos correspondientes con la Zeolita tipo Faujasita (Na<sub>2</sub> Al<sub>2</sub> Si<sub>4</sub> O<sub>12</sub> · 8 (H<sub>2</sub>O)), así como la presencia minoritaria de Mullita (Al<sub>6</sub> Si<sub>2</sub> O<sub>13</sub>). El estudio realizado concluye que no existen grandes diferencias respecto a la composición mineralógica.

38 Izquierdo, S. R., Torres-Agredo, J., Mejía- De Gutierrez, R. (2014). Estudio de morteros adicionados con catalizador usado de craqueo catalítico (fcc) bajo el efecto de altas temperaturas. Ingeniería y competitividad, volumen 16, no. 2, p. 297 - 308

39 García de Lomas Gómez, M. (2016). Viabilidad científica, técnica y medioambiental del catalizador gastado de craqueo catalítico (FCC) como material puzolánico. Tesis doctoral. Director; Sánchez de Rojas, M.I., Frías Rojas, M. Universidad Autónoma de Madrid

40 García de Lomas Gómez, M. (2016). Viabilidad científica, técnica y medioambiental del catalizador gastado de craqueo catalítico (FCC) como material puzolánico. Tesis doctoral. Director; Sánchez de Rojas, M.I., Frías Rojas, M. Universidad Autónoma de Madrid

41 Roldán Latorre, W.L., (2011). Materiales puzolánicos para uso en conglomerantes especiales basados en yeso. Tesis doctoral. Director; José María Monzó Balbuena. Universidad politécnica de Valencia

42 Payá, J., Borrachero, M. V., Monzó, J., Soriano, L., (2009). Estudio del comportamiento de diversos residuos de catalizadores de craqueo catalítico (FCC) en cemento Portland. Materiales de Construcción. Vol. 59, 296, 37-52.

43 Roldán Latorre, W.L., (2011). Materiales puzolánicos para uso en conglomerantes especiales basados en yeso. Tesis doctoral. Director; José María Monzó Balbuena. Universidad politécnica de Valencia

44 Suministrado por la empresa BP OIL España S.A. (Castellón). Tesis doctoral suministrado por la empresa BP OIL España S.A. (Castellón)

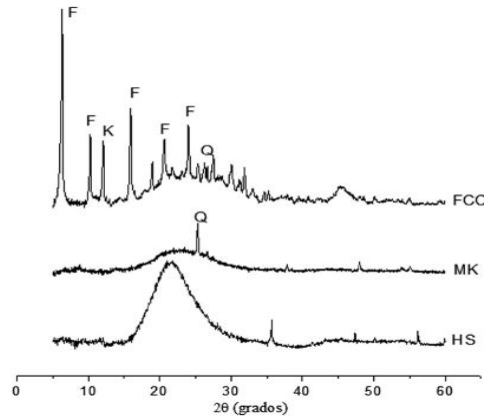
45 Villca Pozo, A. R., (2016). Utilización de cementos activados alcalinamente para la mejora de las propiedades de morteros cal-puzolana. Trabajo de Investigación CST/MIH. Departamento de ingeniería de la construcción. Universitat politècnica de València.

46 En este caso el FCC fue suministrado por la empresa OMYA Clariana S.A. (Tarragona, España).

47 Roldán Latorre, W.L., (2011). Materiales puzolánicos para uso en conglomerantes especiales basados en yeso. Tesis doctoral. Director; José María Monzó Balbuena. Universidad politécnica de Valencia pg.53

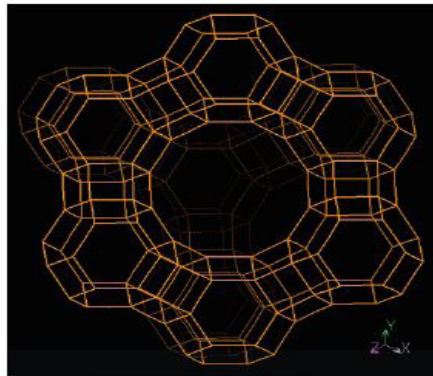
48 Villca Pozo, A. R., (2016). Utilización de cementos activados alcalinamente para la mejora de las propiedades de morteros cal-puzolana. Trabajo de Investigación CST/MIH. Departamento de ingeniería de la construcción. Universitat politècnica de València.

De igual forma, en un ensayo de difracción de rayos X realizado por Silvia R. Izquierdo y co. (2013) , se determina la presencia de una estructura zeolítica similar a la Faujasita . En la grafica que se muestra a continuación, la Faujasita se representa con los picos correspondientes con la fase tipo aluminosilicato sódico hidratado. Además en la grafica también se muestra la presencia de fases cristalinas con un carácter parcialmente amorfo.



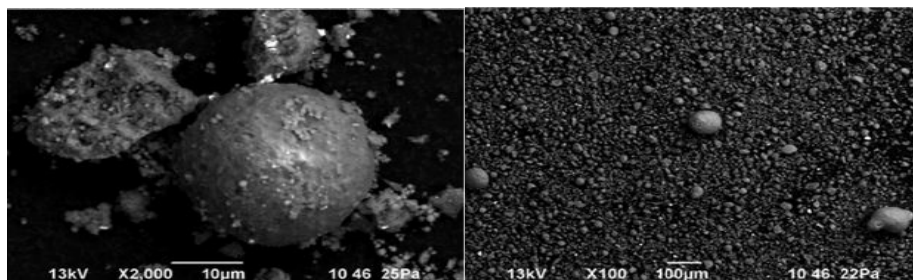
La zeolita tipo Y presenta la estructura del mineral de la Faujasita con una estructura porosa tridimensional . Las estructuras unitarias primarias son tetraedros formados por un átomo de silicio por cuatro de oxígeno y un átomo de aluminio por cuatro de oxígeno. Los tetraedros forman octaedros truncados (Sodalita) que, unidos mediante prismas hexagonales forman Faujasita. Las uniones entre la Sodalita y los prisma hexagonales, alrededor de las aberturas, son átomos de oxígeno. La zeolita tipo Y tiene una fracción de volumen de huecos de 0.48, con una relación Si/Al entre 1 y6. Térmicamente se descompone a 793°C

62



#### iv. Estudio morfológico

En la información aportada por el artículo comentado anteriormente<sup>49</sup>, se muestra una micrografía SEM realizada del catalizador donde se aprecia la apariencia esférica o esferoidal de las partículas de FCC. Esta geometría le confiere una elevada superficie específica, lo que a su vez le confiere el carácter puzolánico tan activo<sup>50</sup>.



49 Omoniyo Odjo, A. (2016). Reciclado de polímeros por craqueo catalítico; estudio de la viabilidad de utilización de reactores convencionales de craqueo catalítico en lecho fluidificado. Tesis Doctoral. Universidad de Alicante.

50 El índice de puzolanidad realizado en este mismo estudio se evaluó a partir de la norma ASTM C618 para materiales puzolánico (75%)

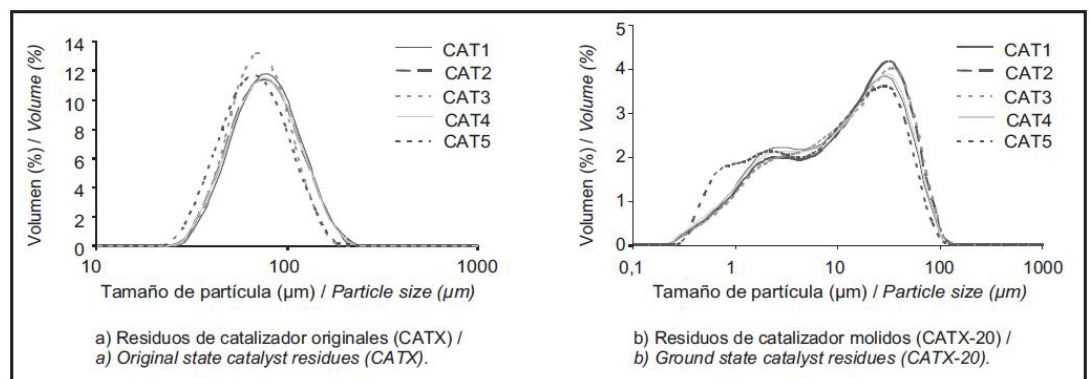
Un estudio morfológico realizado por Macarena García en su trabajo de tesis doctoral<sup>51</sup>, estudia la morfología de dos fracciones de FCC, en estado original y tras una molienda de 20 minutos. Como resultados, la autora concluye que las partículas correspondientes al FCC mostraban una apariencia esférica ó esfenoidal, mientras que las correspondientes al residuo molido presentan una apariencia irregular.

En esta misma tesis se realiza un estudio textural de las partículas, en el cual describe la superficie como rugosa y altamente porosa.

### v. Distribución granulométrica

En el estudio realizado por J. Payá y co. (2009) se muestra una tabla de comparación granulometría de los 5 catalizadores en estado original y tras someterse a una molienda de 20 minutos.

Residuo / Residue	$d_{medio} (\mu m) / d_{mean} (mm)$	$d_{[0.1]} (\mu m) / d_{[0.1]} (\mu m)$	$d_{[0.5]} (\mu m) / d_{[0.5]} (\mu m)$	$d_{[0.9]} (\mu m) / d_{[0.9]} (\mu m)$	% part < 10 $\mu m$ / % part < 10 $\mu m$
CAT1	85.34	47.63	79.36	131.65	0.00
CAT1-20	19.73	1.34	12.15	49.89	45.70
CAT2	73.96	41.03	68.65	114.54	0.00
CAT2-20	17.56	0.96	10.17	45.67	41.57
CAT3	83.73	45.85	77.39	130.60	0.00
CAT3-20	20.26	1.29	12.52	51.19	42.34
CAT4	83.76	45.90	77.30	130.66	0.00
CAT4-20	22.01	1.44	14.65	54.18	45.15
CAT5	77.56	46.39	73.07	115.07	0.00
CAT5-20	22.21	1.50	14.10	55.42	49.65



Se puede observar cómo tras el proceso de molienda el material presenta una distribución granulométrica centrada en dos picos correspondientes con 0,3-0,8  $\mu m$  y 20-50  $\mu m$ . Se aprecia además la ausencia de partículas muy finas de menos de 10  $\mu m$ . Autores<sup>53</sup> muestran como conclusión que tras el proceso de molienda, el tamaño medio de las partículas del residuo es de 16,15  $\mu m$

A partir de estas conclusiones se puede suponer que independientemente del origen del catalizador gastado, tras someterse a un proceso de molienda no produce tamaños diferentes de los expresados

51 García de Lomas Gómez, M. (2016). Viabilidad científica, técnica y medioambiental del catalizador gastado de craqueo catalítico (FCC) como material puzolánico. Tesis doctoral. Director; Sánchez de Rojas, M.I., Frías Rojas, M. Universidad Autónoma de Madrid

52 Payá, J., Borrachero, M. V., Monzó, J., Soriano, L., (2009). Estudio del comportamiento de diversos residuos de catalizadores de craqueo catalítico (FCC) en cemento Portland. Materiales de Construcción. Vol. 59, 296, 37-52.

53 Soriano Martínez, L. (2007). Nuevas aportaciones en el desarrollo de materiales cementantes con residuo de catalizador de craqueo catalítico (FCC). Tesis doctoral. Director; Payá Bernabéu, J. Universitat Politècnica de València

## vi. Reactividad puzolánica

La reacción puzolánica consiste en una reacción química entre la parte sílicoaluminosa de las puzolanas y el hidróxido cálcico:  $\text{CH}^{54}$ . Esta reacción da lugar a la formación de silicatos y aluminatos cálcicos hidratados insolubles con propiedades cementantes.

Dentro de esta reacción existen variantes que determinaran una mayor o menor reactividad<sup>55</sup> como; el contenido de material vítreo, la composición química-mineralógica, superficie específica y tensión producida por las inclusiones cristalinas<sup>56</sup>. De forma general se concluye que cuanto más vítreo y fino sea el material, mayor actividad puzolánica presenta debido a que las partículas se disuelven con mayor rapidez en la fase alcalina.

La reactividad puzolánica se determina a partir de dos parámetros; la máxima cantidad de cal que puede combinarse con la puzolana (porcentaje de cal fijada) y la velocidad a la que ocurre dicha reacción.

Dentro del mismo estudio tomado como referencia<sup>57</sup>, se evaluó la reactividad de los diferentes residuos por medio de estudios termogravimétricos. La reactividad del residuo se ensaya según la capacidad de fijación de hidróxido de calcio en diferentes edades de curado (3,7,14 y 28 días) en morteros de sustitución del 15%. Los datos recogidos por Payá se muestran en la siguiente tabla;

Puzolana / Pozzolan	3 días / 3 days	7 días / 7 days	14 días / 14 days	28 días / 28 days
CAT1-20	22.9	16.0	21.7	36.2
CAT2-20	28.3	24.0	27.7	35.0
CAT3-20	24.2	13.1	23.3	31.6
CAT4-20	26.8	22.2	30.0	34.5
CAT5-20	30.4	24.9	29.4	33.6
Valor medio / Mean value	26.5±3.0	20.0±5.2	26.4±3.7	34.2±1.7

Se concluye de esta forma como en tiempo de curados cortos no presenta un aumento progresivo de fijación de cal debido a que ocurre de forma simultánea las reacción de de hidratación y de reactividad puzolánica. Con un mayor tiempo de curado se aprecia un incremento de la fijación de la cal, donde los diferentes catalizadores presentan unos valores que oscilan entre el 13% y 36%.

### a. Cinética reacción puzolánica<sup>58</sup>

Las reacciones puzolánicas conllevan una serie de reacciones químicas de forma ordenada. Estas, se dan de la siguiente forma;

La primera de las reacciones consiste en el ataque de los iones  $\text{OH}^-$  a  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ -  $\text{SiO}_2$ , causando el debilitamiento o ruptura de los enlaces del silicio con el oxígeno. Esta reacción sucede de forma repetida hasta dar lugar a la formación de ácidos aniónicos, que pueden mantenerse fijos o encontrarse en disolución. Esta disolución da lugar a la formación de otros iones silicatos en adicción a los óxidos aniónicos formados. La solubilidad de el sílice se relaciona con el pH de la disolución, obteniéndose mayor solubilidad cuando más altos sean los valores de pH.

Tras un descenso del pH de la solución y la temperatura, comienza la reacción de polimerización del sílice disuelto, dando lugar a la formación de ácidos silícicos de mayor peso molecular.

Cuando la concentración de  $\text{OH}^-$  en la superficie es lo suficientemente alta, las cantidades de sílice pasan a la

54 García de Lomas Gómez, M. (2016). Viabilidad científica, técnica y medioambiental del catalizador gastado de craqueo catalítico (FCC) como material puzolánico. Tesis doctoral. Director; Sánchez de Rojas, M.I., Frías Rojas, M. Universidad Autónoma de Madrid

55 García de Lomas Gómez, M. (2016). Viabilidad científica, técnica y medioambiental del catalizador gastado de craqueo catalítico (FCC) como material puzolánico. Tesis doctoral. Director; Sánchez de Rojas, M.I., Frías Rojas, M. Universidad Autónoma de Madrid

56 (Taylor, 1997)

57 Payá, J., Borrachero, M. V., Monzó, J., Soriano, L., (2009). Estudio del comportamiento de diversos residuos de catalizadores de craqueo catalítico (FCC) en cemento Portland. Materiales de Construcción. Vol. 59, 296, 37-52.

58 García de Lomas Gómez, M. (2016). Viabilidad científica, técnica y medioambiental del catalizador gastado de craqueo catalítico (FCC) como material puzolánico. Tesis doctoral. Director; Sánchez de Rojas, M.I., Frías Rojas, M. Universidad Autónoma de Madrid

disolución formándose el gel CSH. Durante este proceso, las cargas se mantienen compensadas por los iones  $H^+$  y cationes metálicos (principalmente calcio). Cuando la proporción del gel CSH es mayor que el porcentaje de disolución de sílice, el gel tiende a depositarse sobre la superficie del grano, frenando la disolución, pudiendo llegar a paralizarla. Cuando la proporción se mantiene en menor proporción, en la disolución continúa formándose gel CSH y gel silicato cálcico alcalino rico en  $K^+$ ,  $Na^+$ .

La reacción puzolánica está ligada a la cantidad de calcio, álcalis, sulfatos, silicatos y aluminatos liberados en la fase líquida por el cemento y de los materiales puzolánicos (Jawed, y col. 1991).

En general y en función de la naturaleza de las puzolanas las principales fases hidratadas formadas durante la reacción puzolánica son: Geles CSH con una relación  $CaO/SiO_2$  menor de 1, aluminatos cálcicos ( $C_4AH_{13}$  y/o  $C_4AH_{19}$ ), strätlingita ( $C_2ASH_8$ ), carboaluminatos ( $C_4ACH_{11}$ ) y, una fase cúbica perteneciente a la familia de los hidrogranates ( $C_3ASH_6$ ) (Turriziani, 1954, Luwing, y col. 1963, Aitcin, y col.(1986).

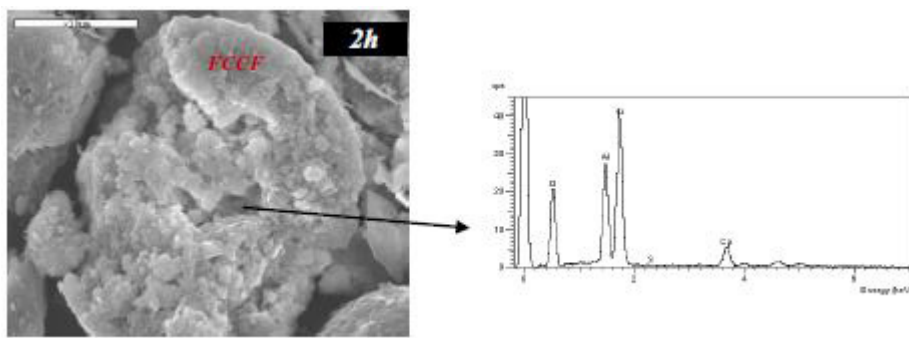
### b. Cinética de reacción de FCC

En los datos aportados por la tesis de Macarena García, podemos encontrar una evaluación de la actividad puzolánica del FCC sin que se encuentre en combinación con el cemento. En esta misma investigación se estudio la cinética de reacción del sistema  $FCC/Ca(OH)_2$ , donde se analizaron los compuestos hidratados formados durante dicha reacción.

Para este ensayo cinético, se ha empleado el catalizador en estado molido, al presentar mejores características finales. Estas se relacionan con la mayor superficie específica que presentan las partículas, confiriéndole una mayor reactividad a edades más cortas (2h<sup>59</sup>).

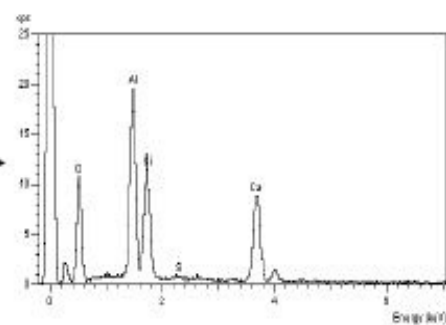
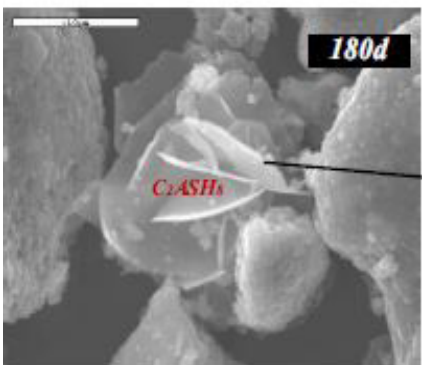
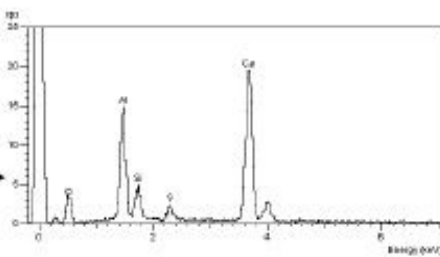
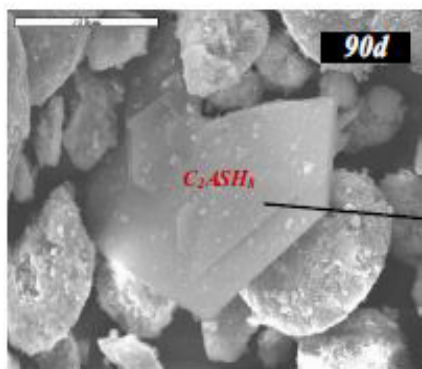
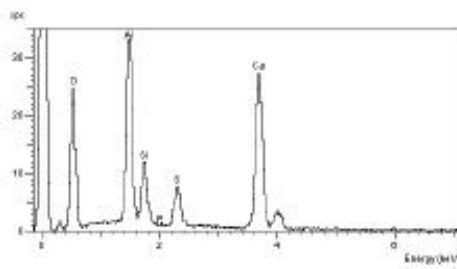
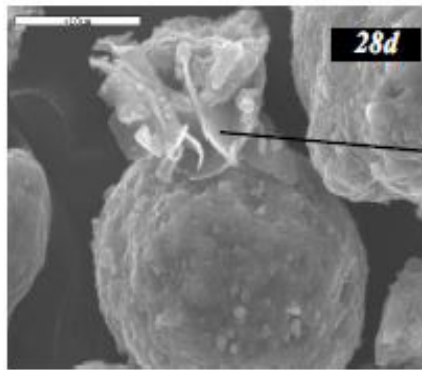
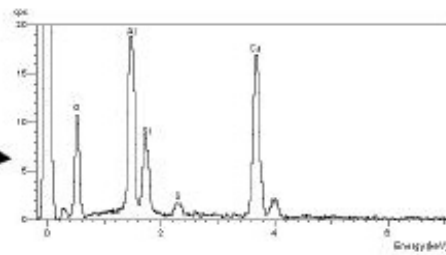
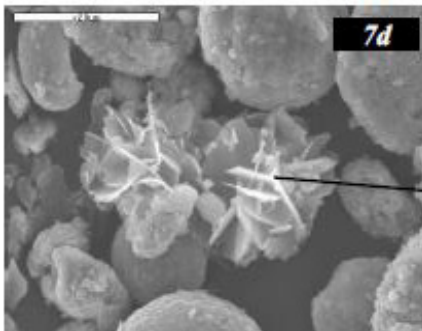
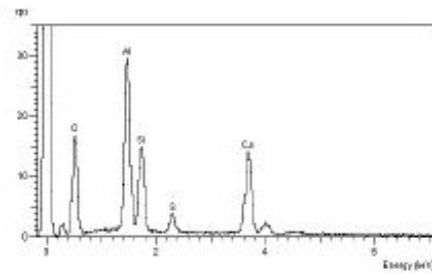
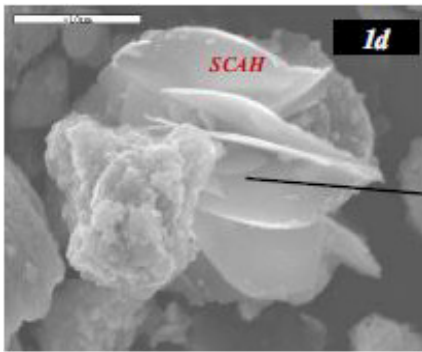
Entre los ensayos realizados para determinar la capacidad puzolánica, cabe destacar el estudio morfológico de los productos de reacción por SEM/EDX. Las micrografías mostraron distintas esferas de FCC con diferentes grados de reacción en periodos menores a un día. La caracterización de estos productos de reacción determino la presencia de Al, Si y Ca, debido a la formación de silicoaluminatos cálcicos hidratados<sup>60</sup>. Estos continuaron su formación, no siendo hasta el periodo de 90/180 días cuando dichos productos podían apreciarse con mayor claridad. A esta edad de curado se destaco la formación de cristales hexagonales de un tamaño aproximado de 10  $\mu m$  de diámetro.

El estudio realizado por Payá y col. (2003) donde estudia los productos de reacción, determina la misma formación de cristales hexagonales, de cuyos microanálisis se dedujo que se podría tratar de gellenita hidratada (strätlingita) ( $C_2ASH_8$ ) (silicoaluminato cálcico hidratado).



59 García de Lomas Gómez, M. (2016). Viabilidad científica, técnica y medioambiental del catalizador gastado de craqueo catalítico (FCC) como material puzolánico. Tesis doctoral. Director; Sánchez de Rojas, M.I., Frías Rojas, M. Universidad Autónoma de Madrid. Pg. 74

60 García de Lomas Gómez, M. (2016). Viabilidad científica, técnica y medioambiental del catalizador gastado de craqueo catalítico (FCC) como material puzolánico. Tesis doctoral. Director; Sánchez de Rojas, M.I., Frías Rojas, M. Universidad Autónoma de Madrid Pg. 83





## vii. Justificación de la elección del FCC como material de ensayo

En múltiples ocasiones, el estado de deterioro en el que se encuentran inmuebles de carácter patrimonial provoca que deba intervenir de emergencia. En estos casos, la edificación tiende a encontrarse con debilidades estructurales, pudiendo incluso llegar al colapso, por lo que la actuación debe aportar propiedades resistentes en periodos de tiempo reducidos.

En este sentido el cemento Portland ha sido ampliamente usado como material de restauración en intervenciones con carácter estructural desde inicios del S.XX. Esta situación se debe al impulso de este material durante la época, al presentar a edades tempranas un alto aporte de resistencia, ideal para situaciones de riesgo estructural. Así, los morteros empleados durante la primera mitad y parte de la segunda del siglo basaban su composición en el cemento, conformando los denominados como morteros de base cementicia.

A finales de siglo y comienzo del S.XXI, de forma general la tendencia del mercado ha sido, la de obtener materiales cada vez más productivos. Con los años, la búsqueda de un mayor rendimiento material generó la producción de cementos con un mayor aporte de aditivos o la sustitución del ligante cementicio por resinas orgánicas<sup>61</sup>, llegando incluso a ser el componente principal.

El empleo incontrolado y el desconocimiento acerca de las posibles patologías que su utilización podía conllevar, ha provocado daños irreversibles en los inmuebles tratados. Esta problemática se relaciona además con la falta de evaluación de los resultados de intervenciones en periodos de tiempo prolongados, provocando la aparición de alteraciones de carácter irreversible tras un periodo de 40-50 años. Esta situación, se debe a las propiedades intrínsecas del cemento, relacionándose no solo con su dureza, sino por sus características poco transpirables e impermeabilizantes.

El origen de las numerosas patologías provocadas por el cemento Portland se relaciona, además de por las características físicas comentadas, por el aporte de sales a la fábrica patrimonial, derivando en el debilitamiento material. La epsomita, mirabilita, ettringita y thaumasita son sales que se han citado específicamente ligadas al cemento Portland<sup>62</sup>.

Ante esta situación, y en base a uno de los criterios fundamentales de la restauración, los bienes de carácter patrimonial han de ser intervenidos con materiales compatibles con la fábrica y de los que se espera unas propiedades estables. De esta forma, los materiales que muestran una mayor compatibilidad físico-química, son los que comparten composición con la fábrica a tratar al presentar propiedades similares. En intervenciones de carácter estructural, los morteros de cal han sido ampliamente utilizados, al presentar resultados óptimos tanto por el aporte de resistencia, como por el respeto hacia las propiedades de la fábrica.

El proceso de consolidación estructural, la inyección de los morteros siendo el único método que permite alcanzar la mayor parte de las oquedades interiores. Durante el proceso de inyección, se debe prestar especial atención a la fluidez de los morteros, debiendo ser la indicada para que su aplicación no genere problemas relacionados con obstrucciones en las vías. Según la relación de agua/cal, las propiedades finales del mortero variarán en función de la dosificación, pudiendo relacionar una mayor proporción de agua con una mayor fluidez, y una reducción de la resistencia final del mortero<sup>63</sup>.

Al relacionarse con intervenciones de carácter estructural, el material debe presentar una resistencia adecuada. Es sabido que la adición de materia con carácter puzolánico en morteros con base de cal acelera la reacción de hidratación y carbonatación, proporcionando resistencia a edades más cortas.

La selección del material puzolánico se basó en las referencias aportadas por Jose Monzó y toma como referencia el

61 Gisbert Aguilar, J., Mateos Royo, I., y Somovilla de Miguel, I. A. Morteros de restauración (primera parte) El obrador. Revista Zabaglia. Colegio oficial de aparejadores, arquitectos técnicos e ingenieros de Edificación de Huesca. Pag.14

62 Gisbert Aguilar, J., Mateos Royo, I., y Somovilla de Miguel, I. A. Morteros de restauración (primera parte) El obrador. Revista Zabaglia. Colegio oficial de aparejadores, arquitectos técnicos e ingenieros de Edificación de Huesca. Pag.14

63 Sepulcre Aguilar, A. (2005). Influencia de las adiciones puzolánicas en los morteros de restauración de fábrica de interés histórico-artístico. Tesis doctoral. Director; Hernández Olivares, J. Escuela técnica superior de Arquitectura. Madrid

estudio realizado por Piles y co.(2005)<sup>64</sup>. En este, se determinó que la adición del FCC como puzolana en morteros de cal, mejoraba no solo la resistencia del mortero, sino que aportaba una mayor durabilidad ante ciclos de hielo-deshielo y agentes agresivos. El propio autor destaca la posibilidad de emplear esta clase de morteros en obras de restauración al presentar unos resultados óptimos acorde a las necesidades de intervención.

Estos datos de referencia, han permitido seleccionar el catalizador gastado de craqueo catalítico como el material puzolánico a ensayar durante esta investigación. Esta decisión se ha basado en los estudios comentados previamente en este capítulo, al aportar datos sobre las propiedades de los morteros con esta adición. Entre las características se pueden destacar;

- La mejora de las resistencias mecánicas de los morteros<sup>65</sup>
- Al tratarse de una puzolana altamente reactiva, los morteros adquieren resistencias notables a edades cortas de curado<sup>66</sup>. Esta característica posibilita poder emplear esta clase de morteros en intervenciones de emergencia.
- Mejora en la durabilidad de los morteros con esta adición<sup>67</sup>.
- Amabilidad con el medio al emplearse un residuo, del que apenas se conocen aplicaciones viables.

### viii. Características esperadas de los morteros

En base a los estudios expuestos, hacen que de la adición del residuo en morteros de cal se esperen unas características óptimas para poder ser incluidos entre los materiales a tener en cuenta en una intervención.

Una de las principales propiedades a destacar es la reducción del tiempo de curado. Esta situación, hace posible poder incluirlos entre los materiales a tener en cuenta en intervenciones de emergencia al requerir tiempos de actuación cortos. En intervenciones donde existe un riesgo de colapso de la estructura, ya sea total o parcial, se requieren materiales que permitan una devolución rápida de resistencia, aportando sustento rápido a la estructura patrimonial.

Los morteros empleados en intervenciones de carácter estructural, se caracterizan por su fluidez, conllevando una reducción de sus propiedades finales. A partir de los datos aportados, se espera que esta adición supla las debilidades que se relacionan con el proceso de inyección, aportando un mayor grado de resistencia a la estructura.

Otra de las propiedades a destacar es su esperada durabilidad ante fluctuaciones ambientales. La resistencia y estabilidad son dos propiedades buscadas de los materiales susceptibles de ser empleados en tratamientos sobre inmuebles patrimoniales. Esta situación se debe a que estos quedan vinculados casi de forma irreversible con el inmueble, buscándose de ellos unas propiedades duraderas y estables ante el paso del tiempo. Así, deben mostrar resistencia ante las posibles fluctuaciones atmosféricas y agentes de alteración relacionados con el contexto en el que se localiza el inmueble y a los que ambos estarán sometidos. A partir de los datos conocidos sobre la adición de FCC en morteros de cal se ha confirmado una mejora de su durabilidad ante ciclos de hielo deshielo y el ataque con Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>.

Además de las propiedades comentadas, se espera que la utilización de este material no suponga una modificación de la porosimetría ni de la transpirabilidad del material, con el fin de que su empleo no derive en futuras alteraciones. Esta investigación toma estas referencias y puntos esperables como puntos a ensayar en la parte experimental, pudiendo confirmar que su empleo no suponga efectos nocivos sobre la materia de intervención.

64 V. Piles, M.V. Borrachero, J. Payá, J. Monzó, A. García- Codoñer. "Ensayos de envejecimiento acelerado sobre materiales compuestos con base de cal o con base mixta de cal y yeso". VI Congreso Nacional de Materiales Compuestos. AEMAC 2005. Asociación Española de Materiales Compuestos. Valencia, Junio, 2005, 947-954.

65 Zornoza, E., Payá, J., Borrachero, M.V., Monzó, J. (Carbonatación y corrosión de materiales compuestos de matriz cementante: efecto de la dosificación y de la adición de residuo de catalizador de craqueo catalítico (FCC). Grupo de Investigación en Química de los Materiales de Construcción (GIQUIMA). Universidad Politécnica de Valencia. MATERIALES COMPUESTOS 05 781

66 J. Payá, J. Monzó, M.V. Borrachero, L. Soriano, E. Peris-Mora. Estudio de materiales compuestos de matriz cementicia de altas prestaciones mecánicas, con incorporación de puzolanas. Grupo de Investigación en Química de los Materiales de Construcción (GIQUIMA). Universidad Politécnica de Valencia

67 V. Piles, M.V. Borrachero, J. Payá, J. Monzó, A. García- Codoñer. "Ensayos de envejecimiento acelerado sobre materiales compuestos con base de cal o con base mixta de cal y yeso". VI Congreso Nacional de Materiales Compuestos. AEMAC 2005. Asociación Española de Materiales Compuestos. Valencia, Junio, 2005, 947-954.

## 08. Parte Experimental

### i. Introducción fase experimental

La presente investigación plantea la evaluación de tres formas diferenciadas de aplicación del FCC como material susceptible de ser empleado durante los procesos de consolidación. Tras la programación de los ensayos a realizar, el inicio de la fase experimental se centró en el acopio de los materiales y permisos necesarios para la realización de esta.

Para la selección de los materiales sobre los que se ensayará la viabilidad del FCC, se tomaron como referencia los relacionados con la técnica constructiva tradicional del tapial, en concreto de la tapia real<sup>68</sup>, por las características de homogeneidad que presenta la fábrica, permitiendo reproducir su materialidad y unas propiedades similares, próximas a ejemplos reales. La extensa bibliografía acerca de las propiedades materiales del tapial y de las proporciones de los materiales que la constituyen, permiten reproducir unas condiciones similares en probetas de ensayo. Aún no siendo comparables con las propiedades que presentan las fabricas tradicionales, ya que este aspecto sería imposible de reproducir, se ha tratado de aproximar las proporciones más comunes empleadas, con el fin de estudiar la interacción entre la tierra y el FCC en los diferentes casos de aplicación. En el capítulo de introducción a la técnica al tapial, se estipularon unas proporciones concretas respecto a los materiales constituyentes, determinando una relación de tierra/ cal de entre 0 y 15%<sup>69</sup>.

Con el objetivo de basar los resultados en datos conocidos, las probetas de ensayo se dividirán en dos grupos; probetas de referencia y probetas de ensayo. Este planteamiento permite obtener datos comparables en toda la población de ensayo, ya que presentan las mismas dosificaciones y las mismas condiciones, haciendo posible su comparación.

### ii. Planteamiento fase experimental

Basándose en las alteraciones que presenta la arquitectura de tierra y tomando como referencia casos de intervención<sup>70</sup>, entre los tratamientos considerados como habituales cobra especial importancia los tratamientos vistos de consolidación, reintegración y reconstrucción<sup>71</sup>.

Las principales patologías que presentan los elementos de tierra se relacionan con la falta de cohesión, debido por lo general a la constante exposición a agentes atmosféricos. Esta inevitable situación, hace que la intervención planteada busque la devolución de la estabilidad a la fábrica, tratando de preservarla. La calidad y durabilidad de las intervenciones se relaciona con el producto aplicado y por tanto en su efectividad. Los resultados de esta clase de intervenciones se basan en la selección del producto adecuado en relación a las patologías que presenta y a las condiciones a las que estará expuesto, permitiendo determinar un producto lo más próximo a las necesidades que presenta el material.

Así, y según lo comentado en el apartado correspondiente a las patologías encontradas en construcciones de tapia, la consolidación se muestra como una operación común en materia de intervención. Tomando como base la información expuesta en el apartado 04, las labores de consolidación pueden plantearse de dos formas según el nivel en el que se encuentre la patología, pudiendo ser tanto a nivel superficial como interno o estructural.

De esta forma, la fase experimental de esta investigación se basa en determinar la viabilidad de la aplicación del FCC para los procesos de intervención comentados. Así, se plantea su aplicación para la producción de tres materiales experimentales, siendo un mortero de tierra estabilizada, como consolidante superficial y como mortero de intervención.

68 RAMÓN PANIAGUA, J. (1978) Vocabulario básico de arquitectura. Tapia real. Construida a base de tierra y cal. Cuaderno de arte Cátedra. pg.307

69 VV.AA. (2016). Estudio de buenas prácticas en las intervenciones sobre arquitectura tradicional española. Instituto universitario de restauración del patrimonio. Universitat Politècnica de Valencia.

70 Información desarrollada en el Bloque I. 02. d. y e.

71 Información desarrollada en el Bloque II.

### a. Desarrollo como mortero de tierra estabilizada

Este, responde a la necesidad encontrada de restituir o reintegrar zonas debido a la pérdida de material patrimonial, planteándose la necesidad de su reconstrucción en algunas intervenciones. Su utilización podría destinarse a reconstrucciones de coronaciones o zonas donde la incidencia de los agentes de degradación es mayor

Se ha pensado que esta adición aportaría mayor resistencia a la argamasa, altamente sensible a la acción del agua. Al no tener datos relacionados que respalden la viabilidad de esta aplicación, los ensayos a realizar tratarían de responder a dos objetivos principales; el primero responde a determinar la efectividad del método, y siendo el resultado positivo, determinar el aporte de resistencia tanto mecánica como a la exposición al intemperie.

### b. Desarrollo como mortero de intervención

Según los datos aportados en el bloque III de este estudio, existe un uso preferente de la cal hidráulica como material de consolidación interna. El uso extendido se relaciona con la compatibilidad físico-química con el material patrimonial, al tratarse de un material ya presente en esta. Una de las limitaciones que se pueden relacionar con su empleo es el tiempo de espera que se requiere para observar el aporte de propiedades mecánicas. Esta situación se relaciona con la lentitud a la que se da el proceso de carbonatación.

En el pasado, el empleo de morteros de base cementica durante estas intervenciones tenía la finalidad de reducir dichos tiempos. Su empleo se fundamenta en la reducción del tiempo de curado de los 28 días que precisan los morteros de cal a un periodo de 7 días, mostrando a las pocas horas un aumento de su resistencia.

70

Esta situación hace posible plantearse la aplicación del FCC en morteros de cal con carácter experimental durante esta clase de intervenciones. La capacidad del FCC de acelerar la reacción de carbonatación, hace posible reducir el tiempo de actuación, además de aportar propiedades resistentes al mortero final. La disminución de los tiempos de espera abre la posibilidad de poder emplear este tipo de morteros en obras de emergencia, al aportar estabilidad de forma rápida.

Tomando como referencia el estudio realizado por Piles et al.(2005)<sup>72</sup>, en el cual se determinó que dicha adición aportaba resistencia ante ciclos de hielo-deshielo, y medios agresivos de  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ . Estos datos se deben tomar en consideración al querer introducirlo como material de intervención, ya que presenta propiedades estables que se buscadas entre los productos aplicados.

El porcentaje de sustitución en el mortero de cal a realizar se fija entre 15 y 20%, al ser el valor considerado como óptimo y en el que los diferentes grupos de investigación coinciden.

Como se ha reflejado en el apartado de morteros de inyección, el proceso se toma como irreversible, por lo que este estudio trata de aportar datos preliminares que determinen el cumplimiento de unas características mínimas, para poder ser considerado como viable para el proceso. Así, deben tomarse como datos sobre los que sentar las bases para una posterior investigación donde se profundice en su caracterización. De este método de aplicación se pretenden aportar datos de caracterización sobre la permeabilidad al vapor, absorción capilar y resistencia hidráulica, además de resistencia a compresión del mortero como valores base para permitir la finalidad contemplada.

72 V. Piles, M.V. Borrachero, J. Payá, J. Monzó, A. García- Codoñer. "Ensayos de envejecimiento acelerado sobre materiales compuestos con base de cal o con base mixta de cal y yeso". VI Congreso Nacional de Materiales Compuestos. AEMAC 2005. Asociación Española de Materiales Compuestos. Valencia, Junio, 2005, 947-954.

### c. Desarrollo como consolidante superficial

En sí, el FCC se considera un residuo inerte de carácter puzolánico. Su reacción se basa en la interacción con el hidróxido de calcio, acelerando el proceso de carbonatación y aportando mayor resistencia final. Esta situación limita la aplicación del catalizador como consolidante superficial al deber ser empleado ombinado con otros materiales.

A pesar de ello, se cree favorable el estudio de este ya que su utilización podría solventar situaciones de riesgo localizadas en la coronación del inmueble. Esta aplicación se cree viable, además de por el rápido aporte de propiedades resistentes, por su carácter estable ante fluctuaciones ambientales bruscas a las que la zona suele estar expuesta.

Además, la necesidad de combinarlo con el hidróxido de calcio lleva al planteamiento de una segunda ventaja respecto a su uso, siendo la capacidad de regular las propiedades finales del producto según el porcentaje añadido. Los tratamientos de consolidación considerados como más estables son los realizados con productos inorgánicos, los cuales presentan limitaciones en la penetración del producto, por lo que tienden a aplicarse las veces necesarias con la finalidad de obtener un buen resultado en el proceso. El tamaño reducido de partícula que presenta el FCC hace que se espere una capacidad de penetración mayor, proporcionando una recuperación de propiedades en menos aplicaciones.

Otro de los aspectos por lo que se cree un posible material de intervención es su compatibilidad y reactividad con la cal, siendo esta uno de los materiales más habituales de intervención. Estas características hacen suponer que aportará no solo resistencia al tratamiento superficial, sino que permitirá una mayor integración entre las diferentes operaciones llevadas a cabo en una misma intervención.

71

Como se ha comentado su reactividad se basa en la combinación con hidróxido de calcio, por lo que para plantear este método se debe seleccionar un material que presente esta composición y que permita a su vez una buena penetración. Ante esta situación se descartó el agua de cal y la lechada de cal al presentar problemas relacionados con la carbonatación en superficie, debido al tamaño que presentan sus partículas. El producto basado en el hidróxido que presenta un menor tamaño de partícula es el desarrollado por el CSIG, llamado Nanorestore®.

El planteamiento de este método experimental de aplicación trata de dar respuesta a dos puntos; el primero acerca de la efectividad del producto y el aporte de propiedades respecto a la Nanocal, y un segundo en relación al aporte de propiedades respecto al porcentaje de FCC empleado. De esta forma, se elaboran dos productos diferenciándose en el porcentaje de solución siendo al 25% y al 50%.

Al deber ir en combinación con el producto Nanorestore, el disolvente que se empleará será el mismo, pretendiendo mantener las propiedades del producto inicial. De esta forma se empleará alcohol isopropílico como disolvente del producto a desarrollar. Otra de las limitaciones que se encontraron durante el proceso, se relaciona con la rápida reacción entre ambos materiales. Esta situación provoca que ambos materiales no puedan estar en contacto hasta momentos inmediatos previos a su aplicación. Por ello, la elaboración del producto se realizará por separado, mezclándose en la misma proporción en momentos previos a su aplicación.

### iii. Materiales empleados. Descripción y tratamiento previos

Con el fin de reproducir las mismas propiedades en todas las probetas realizadas, los materiales de ensayo se someterán a una manipulación previa que permita igualar sus propiedades con el fin de asegurar una mayor similitud entre el total de probetas.

#### TIERRA

Material cedido por el grupo investigador Res-Arquitectura. Investigación, Restauración, Difusión del Patrimonio Arquitectónico, formando parte del Instituto Universitario de Restauración del Patrimonio (IRP), de la Universitat Politècnica de València (UPV).

A simple vista, la tierra presentaba una granulometría dispar, por lo que se tamizó de forma previa con el objetivo de aportar una mayor homogeneidad a la masa de las probetas. Esta decisión se tomó con el propósito de evitar grandes diferencias en el tamaño de los granos y eliminar las posibles impurezas que presenta de forma natural. Al tratarse de ensayos sobre probetas, el estudio debe pretender que todas posean unas características comparables, con la finalidad de obtener unos resultados válidos. La presencia de impurezas y una granulometría muy dispar podría provocar resultados con valores erróneos, por lo que se decidió el control de la granulometría empleando un filtro de 2mm.

Para esta investigación, la tierra será el material base para la elaboración de las probetas y del que mayor cantidad se emplee. La totalidad de la tierra empleada consistió en 40 kg del material.

Al desconocer su composición, se programó un examen de microscopía electrónica de barrido (MEB) con el fin de determinar los elementos constituyentes. Este ensayo se plantea por la necesidad de conocer la naturaleza arcillosa de la tierra y determinar la presencia de posibles impurezas que afecten a la interacción entre los materiales.

A su vez, se realizó un ensayo de determinación granulométrica, con el fin de determinar la distribución de los tamaños de las partículas que la componen. Los resultados de ambas pruebas se expondrán en el apartado correspondiente.

#### CAL

La selección de la cal se basó en datos recogidos de intervenciones de restauración sobre patrimonio de tierra, a partir de las cuales se concluyó el empleo habitual de cal hidráulica natural (NHL), relacionando su uso con procesos de consolidación estructural. Este carácter se debe a las limitaciones intrínsecas del tratamiento, relacionadas con los procesos de carbonatación en el interior de las fábricas. La falta de dióxido de carbono en el interior, limita dicha carbonatación, por lo que las cales empleadas deben poseer un carácter hidráulico o presentar adicción puzolánica con el objetivo de iniciar dicho proceso en ausencia de CO<sub>2</sub>. Así, la cal utilizada para la realización de las probetas tiene una clasificación de NHL-5, seleccionada no solo por sus prestaciones, sino por haber sido empleada, entre otras, en obras de restauración arquitectónica como: Restauración del castillo de Ucleo (Soria), Restauración Iglesia de Santa María de Cervera, Restauración Castillo Mayor de Daroca, en restauración de hornos verticales (etc.)<sup>73</sup>. Esta situación permite estudiar la interacción del FCC con un material susceptible de ser empleado en intervenciones patrimoniales, permitiendo aproximar los resultados a unas condiciones más próximas a una situación real.

Así, la cal empleada es la Cal Hidráulica Natural Tigre®, adquirida con su propia ficha técnica adjunta en el anexo en la que se especifica composición y sus propiedades esperables. Estos datos se tomarán como referencia para la caracterización del producto. El total de cal empleada durante el proceso de elaboración fue un total de 8kg.



Proceso tamizado de la tierra

## FCC



Proceso de molido del FCC

Producto facilitado por el grupo investigador Giquima, perteneciente al Instituto Universitario de Ingeniería del Hormigón, Universitat Politècnica de València (UPV).

En las publicaciones de referencia desarrolladas en el apartado 07. II.b., correspondiente con el estado del arte del FCC, se recomienda un procesado previo del material, el cual tiene la finalidad de reducir el tamaño de partícula. Según los datos aportados por los diferentes grupos investigadores, esta disminución granulométrica, potencia sus propiedades puzolánicas, los cuales concluyen como resultado óptimo una molienda en molino de bolas de 20min. El residuo presenta de forma natural un tamaño de partícula medio de 82  $\mu\text{m}$  reduciéndose tras su molienda a 18  $\mu\text{m}$ .

La cantidad de material empleado para el desarrollo de la fase experimental consistió en 700 gr de FCC

## vi. Probetas

### a. Proceso de producción

De forma inicial, las probetas contaban con unas dimensiones no normalizadas de 07x07x07cm, realizadas con moldes de madera de fabricación propia. Durante el proceso se determinó su inviabilidad al presentar unas dimensiones finales dispares, a causa de la presión ejercida en el apisonado de la tierra, provocando la deformación del molde hasta su inutilización.

A consecuencia de esta situación, y dado que el disponer de unas medidas normalizadas era exigido por el ensayo de compresión, y con el fin de que todas las probetas contasen con unas dimensiones similares, se decidió utilizar moldes metálicos triples para el proceso de producción<sup>74</sup>. Esta decisión facilitó que toda la población de probetas contara con las mismas dimensiones y por tanto con unas propiedades comparables. Con respecto a este método de producción se observó una limitación relacionada con el apisonado, sus reducidas dimensiones (40x 160mm.) no permitían la introducción de un mini pisón.

Como se apreciará en las conclusiones, la falta de este proceso conlleva una ligera reducción de la resistencia del material, por lo que el material no se podría comparar en propiedades con una fábrica de tapial, como se había planteado en un inicio. Aun conociendo esta limitación, se procedió de igual forma pues los resultados del estudio se basarían en la comparación con las probetas de referencia. Esta situación únicamente implica la imposibilidad de poder extrapolar los resultados obtenidos tras esta fase con casos reales de patrimonio de tierra.

### b. Dosificaciones

#### 1. Probetas de referencia

La elaboración de este grupo de probetas se plantea por la necesidad de obtener unos datos de referencia en los que basarse para fundamentar la evaluación del producto. De esta forma, las probetas patrón servirán para la obtención de unos datos de partida en los que basar la comparación de resultados, determinando el aporte de propiedades y el grado de efectividad del cada método. Las probetas de referencia y las dosificaciones con las que se han elaborado se pueden dividir en cuatro grupos;

- **DOT.** Corresponden a muestras de determinación de los materiales empleados. De esta forma se elaboraran probetas de tierra sola y cal sola, obteniendo las propiedades de ambos materiales de forma individual.

74 Dimensiones son 160x 40x 40 mm

- **DOM.** Corresponden a muestras de mortero de inyección. Como se ha comentado, las propiedades de los morteros responden directamente a las proporciones empleadas, de forma que estas se usan como referencia del segundo método comentado.
- **DOCo.** Se trata de la muestra de referencia donde se determinara el aporte de propiedades de la Nanocal empleada. Así, se obtienen los datos en los que se basará la evaluación del FCC como consolidante superficial.
- **D1 y D2.** En si consisten en las muestras sobre las que se aplicará el FCC como consolidante superficial. Se toman como patrón al obtenerse datos de partida de las proporciones presentes en las mezclas de tierra y cal al 5 y 10%. Estas dosificaciones, se ensayarán con diferentes días de curado como forma de analizar su evolución, obteniendo datos con los que comparar el aporte de propiedades de los métodos superficial y en masa.

DOSIFICACIONES REFERENCIA	FAMILIA	PROPORCIÓN
D0T	Probeta tierra sola	1500gr. Tierra 300gr. Agua
DOCo	Probeta referencia Nanorestore	Nanorestore aplicado de forma pura sobre muestras D1 y D2
DOM	Probeta mortero de inyección	Proporción c/a 1: 1,5
D1	Probeta tierra-cal (5%)	2500 gr. Tierra 125 gr. Cal 600 ml agua
D2	Probeta tierra-cal (10%)	2500 gr. Tierra 250 gr. Cal 600 ml agua



74

## 2. Probetas de ensayo

Este segundo grupo de probetas responden a las dosificaciones de ensayo de los tres métodos experimentales. Así, y como se muestra en la siguiente tabla, este grupo se subdivide en tres de la siguiente forma;

GRUPO	DOSIFICACIONES ENSAYO	MÉTODO ENSAYO	COMPOSICIÓN
MORTERO TIERRA ESTABILIZADA	<b>D3</b>	EN MASA. Tierra/ cal 5% + FCC 10%	1500 gr. Tierra 75 gr. Cal 7,5 gr. FCC 360 ml agua
	<b>D4</b>	EN MASA. Tierra/ cal 10% + FCC 10%	1500 gr. Tierra 150 gr. Cal 15 gr. FCC 360 ml agua
	<b>D5</b>	EN MASA. Tierra/ cal 5% + FCC 15%	1500 gr. Tierra 75 gr. Cal 11.25 gr. FCC 360 ml agua
	<b>D6</b>	EN MASA. Tierra/ cal 10% + FCC 15%	1500 gr. Tierra 150 gr. Cal 22.5 gr. FCC 360 ml agua





CONSOLIDANTE SUPERFICIAL	D7	CONSOLIDANTE. Tierra/ cal 5%. Nanocal +FCC 25%	(consolidante empleado) 3.75gr. Nanocal 1.25gr. FCC 1l 2-propanol
	D8	CONSOLIDANTE. Tierra/ cal 5%. Nanocal +FCC 50%	(consolidante empleado) 2.5 gr. Nanocal 2.5 gr. FCC 1L 2-propanol
	D9	CONSOLIDANTE. Tierra/ cal 10%. Nanocal +FCC 25%	(consolidante empleado) 3.75gr. Nanocal 1.25gr. FCC 1l 2-propanol
	D10	CONSOLIDANTE. Tierra/ cal 10%. Nanocal +FCC 50%	(consolidante empleado) 2.5 gr. Nanocal 2.5 gr. FCC 1L 2-propanol
MORTERO DE CAL	D11	MORTERO DE INYECCION. Adición del 15%.	1360 gr. Cal 255 gr. FCC 1.5 L agua
	D12	MORTERO DE INYECCION. Adición del 20%.	1360 gr. Cal 340 gr. FCC 1.5 L agua



La obtención de datos útiles se basa en que todas las probetas presenten unas propiedades similares, aportadas por la proporción de componentes empleados en ellas. De esta forma, las probetas que corresponden a cada una de las dosificaciones deben presentar la misma proporción con el objetivo de limitar los errores de resultado. Es por ello, por lo que se expresa en la tercera columna los datos concretos de los materiales que las conforman.

### 3. Justificación dosificaciones seleccionadas

La proporción de FCC en cada una de las dosificaciones se justifica de la siguiente forma;

- Para el ensayo de adición *como carga puzolánica en un mortero de inyección* se tomará como referencia la investigación realizada por Piles et al. (2005) donde se ensayó la adición del residuo en morteros de cal, mostrando resultados positivos respecto a su durabilidad.

En esta investigación se ensayaron morteros con porcentajes de adición de FCC del 50%, aunque este no se tomará como referencia para el estudio que se presenta, pues la cal utilizada presenta únicamente un porcentaje de cal libre del 15%. Esta proporción intrínseca de la cal obtenida, limita la reactividad del FCC el cual reacciona únicamente con el hidróxido de calcio libre. En caso de emplear un porcentaje de adición alto podría repercutir en la resistencia final del mortero, al presentarse únicamente como carga en masa.

De esta forma, se planteará una adición del 15% y 20% en relación al total de la cal empleada en estas dosificaciones. De estas, el 15% se tomará como el máximo admitido en base a las propiedades de la cal comentadas, aunque se ha decidido ensayar un porcentaje ligeramente superior con el objetivo de comprobar como una mayor adición repercute sobre las propiedades de esta clase de morteros.

- En relación a la aplicación del FCC *como consolidante*, no existe bibliografía de referencia. Dicho material es clasificado como carga puzolánica, confiriéndole a la cal el aumento de resistencia mecánica comentada. De esta forma, la combinación con el hidróxido de calcio es necesaria para que se dé esta activación.

Al concebirse como tratamiento superficial, la penetración del producto es fundamental. Como ya se ha desarrollado, la penetración se basa en el tamaño de la partícula que presenta el material y en el disolvente seleccionado. De esta forma, se planteó la opción de combinarlo con agua de cal o lechada de cal, desechando la idea pues ambos productos presentan limitaciones respecto a su penetración debido al tamaño de partícula. Es por ello, que se tomó como referencia el producto desarrollado por el Consorcio para el desarrollo de Sistemas a Gran Interface (CSGI) de la Universidad de Florencia, denominado Nanorestore®. Este material se basa en la nanotecnología, posibilitando la obtención de hidróxido de calcio de dimensiones nanométricas. Estas partículas se encuentran en dispersión en alcohol isopropílico (2-propanol) facilitando la penetración por su escaso carácter viscoso. Gracias a las características que presenta este material, se tomó como referencia para el desarrollo del nuevo consolidante.

Nanorestore® presenta una concentración de cal del 0.5% por litro de alcohol isopropílico. El material a desarrollar se basa en la adición de parte del hidróxido cálcico presente, por un porcentaje de FCC. En el proceso de selección de los porcentajes idóneos, no existe ningún tipo de bibliografía, por lo que se planteó una sustitución del 25% y 50%. Al tratarse de proporciones experimentales, lo que se pretende es concluir una primera aproximación en relación a la proporción más efectiva respecto a las propiedades finales.

Para poder obtener resultados que permitan la comparación del aporte de propiedades, inicialmente se aplicara Nanorestore®, sobre muestras D1 y D2 permitiendo la obtención de unos resultados base.

- En el caso de la *adición en masa de los morteros de tierra como estabilizante*, se carece de porcentajes sobre los que basar para la toma de decisiones. El planteamiento de este procedimiento de ensayo trata de determinar si su adición aumenta el valor de resistencia del mortero en comparación con las muestras que presentan la misma proporción de tierra-cal. De esta forma, se elaborará una argamasa con las mismas proporciones T/C de 5% y 10%, a las que se añadirá el FCC de forma previa al proceso de amasado. Los porcentajes seleccionados del residuo serán el 10% y 15% del total de la cal empleada en dicha mezcla. Esto se basó en la presencia de cal libre de la cal empleada para los ensayos, presentando el 15% del total. Así, y con el fin de que la totalidad de la cal llegue a reaccionar con el FCC, se tomo el 15% como porcentaje máximo, ya que un mayor porcentaje supondría que no reaccionara la totalidad del FCC, pudiendo incluso reducir las propiedades finales del mortero.

Esta forma de ensayo, contempla la realización de cuatro dosificaciones, siendo;

- D3.Tierra/cal 5% +FCC 10%
- D4.Tierra/cal 10% +FCC 10%
- D5.Tierra/cal 5% +FCC 15%
- D6.Tierra/cal 10% +FCC 15%

Éstas se han tomado con el fin de permitir extraer conclusiones tanto en comparación con muestras sin la adición como con las propias de este método de aplicación. El objetivo es apreciar el aporte de propiedades por parte del residuo y cómo varían éstas en función de su porcentaje.

### c. Numero de probetas

A la hora de programar el número de muestras necesarias, se decidió un mínimo de tres muestras de cada dosificación para los ensayos correspondientes a cada tiempo de curado. El número de ensayos planteados ascienden a 6, de los que tres conllevan la destrucción de la probeta. Según este planteamiento, el número de muestras necesarias asciende a 468.

En relación a los ensayos planteados, el único que presentaba unas dimensiones normalizadas es el ensayo a compresión. Por ello, debido a limitaciones de tiempo y material, se decide la ruptura en dos de las muestras destinadas a los ensayos de permeabilidad y capilaridad, en los cuales no hay medidas definidas. Esta decisión permite reducir el número de muestras a 156.

Para el resto de los ensayos planteados (colorimetría, difracción y microscopia electrónica de barrido) no se precisa la elaboración de muestras expresas. Por ello se decidió la realización de una probeta más destinada a estos ensayos, lo que permite además contar con una probeta de error.

De esta forma, al contar con cuatro tiempos de curado y necesitar un mínimo de tres probetas para cada edad, el número de probetas necesarias para cada dosificación será de 12.

### d. Tiempos de ensayo

Con el fin de garantizar una correcta obtención de resultados sobre las capacidades del material, las pruebas planteadas se realizaran con cuatro tiempos diferentes de curado. La decisión de evaluar el material en diferentes etapas de curado se tomó por la importancia del papel de la cal en el proceso. El proceso de carbonatación es considerado como un proceso lento, donde comienza a obtener cierta resistencia mecánica a partir de los 28- 30 días de curado. Por ello las diferentes edades de curado se plantearán como forma de determinar la evolución de la combinación de la cal con el catalizador gastado. Las edades de curado planteadas corresponderán a 7 días, 28 días, 63 días y a envejecimiento acelerado un tiempo de dos meses. 77

Los tiempos de curado son los siguientes:

- **7 días de curado.** Se trata de una edad temprana. La evaluación de este periodo se basa en que según investigaciones el catalizador gastado presenta el aporte de propiedades a edades muy tempranas.
- **28 días de curado.** Este periodo fue seleccionado en base al tiempo de reacción de la cal, siendo a los 28 días cuando puede comenzar a observarse el aporte de propiedades resistentes.
- **63 días de curado.** La selección de este periodo trata únicamente de determinar la evolución del material de ensayo.
- **Envejecimiento acelerado.** La finalidad de someter a las probetas a un envejecimiento acelerado trata de responder a la determinación de la estabilidad del material tras someterse a ciclos de contraste. Las probetas estarán un total de dos meses y medio, en los que se programara un cambio de ciclo cada dos semanas, con el objetivo de incidir sobre ellas cambios bruscos de temperatura y humedad. Además, se expondrá a una probeta de cada dosificación a la exposición constante de radiación UV, mientras que un segundo grupo simplemente será sometido a los cambios de temperatura y humedad. Las condiciones seleccionadas corresponderán de la siguiente forma;

Ciclo 1: 24 horas a 20°C y 24 horas a 60°C, con humedad el 85% en ambos casos

Ciclo 2: 24 horas a 5°C con 40-45% de humedad y 24 horas a -20°C y 55% de humedad.

## v. Procedimiento experimental

Como se ha expuesto, el presente trabajo pretende determinar la posibilidad de aplicación del FCC en tres metodologías diferenciadas, de las cuales dos de ellas requieren su adición en masa por lo que durante el proceso de elaboración de las probetas se añadirá el FCC en la mezcla quedando integrado en los materiales que las conforman, y una tercera requiere su aplicación superficial. Dicho apartado, tratará de explicar ambas formas de utilización, siendo durante el proceso de amasado como el proceso de aplicación superficial

### a. Proceso de amasado

Durante este proceso, se mezclarán previamente los materiales correspondientes con cada dosificación en seco, con la finalidad de dar homogeneidad a la distribución de los componentes en la masa. Esta adición se corresponde con el método de ensayo en morteros de inyección y morteros de tierra-cal (5%,10%), cuyas proporciones se han especificado en apartados anteriores.

#### Equipo de necesario

- Amasadora
- Balanza
- Recipientes graduados

Durante el proceso de amasado se añadió a la argamasa la parte proporcional de FCC para cada dosificación. De esta forma las dosificaciones que se corresponden con esta adición en masa presentan la siguiente numeración; D3, D4, D5, D6, D11 y D12



Proceso amasado probetas

### b. Proceso aplicación superficial

78

Este tipo de ensayo requiere un proceso de aplicación posterior a la elaboración de las probetas, al aplicarlo de forma superficial. Una vez las probetas presenten un tiempo de curado mínimo de 28 días, se procederá a su aplicación.

La cara de las probetas a ensayar se corresponde con una de las que está en contacto con el molde, por lo que su acabado es liso. Esta situación ha llevado a pensar que la acumulación de finos en la superficie impedirá la penetración del producto a aplicar, al presentar poros cerrados de forma superficial. Con el fin de permitir una mayor penetración, las caras a ensayar se lijaron, eliminando los primeros milímetros, hasta que la superficie presente una apariencia rugosa. De forma previa a la aplicación del producto se aspirará la superficie, eliminando posibles partículas residuales del rebaje realizado.

Respecto al proceso de elaboración del consolidante, se debe contemplar una limitación en el proceso, siendo la limitación del tiempo de contacto entre el consolidante comercial y el FCC. Debido a esta situación, la elaboración del producto se realizará por separado, por lo que el consolidante a testar presentará dos partes, correspondiéndose con el producto comercial y el desarrollado en este trabajo. Ambos se deben mezclar en la misma proporción de forma previa a su aplicación, con el fin de que la reacción entre ambos se dé una vez el producto haya penetrado.

Los porcentajes a ensayar serán el 25% y 50%, como se ha comentado en el apartado 08.VI.b.3. Para el proceso de elaboración se debe tener en cuenta la concentración de cal que presenta Nanorestore®, ya que el porcentaje de FCC ira en función de este. Nanorestore® presenta una concentración de cal del 5 gr. por litro de alcohol isopropílico, por lo que con el objetivo de no reducir su efectividad, se empleará el mismo disolvente en el producto a desarrollar.

El producto a desarrollar se clasificará como suspensión debido al carácter insoluble del catalizador. La cantidad empleada de FCC se tomara en base al 0.5% de cal que presenta el producto, por lo que las cantidades empleadas de residuo serán 2,5 y 1,25 gr de FCC correspondiéndose con el 50% y 25% respectivamente. Con el objetivo de no modificar la relación nanocal-disolvente del producto comercial, las cantidades comentadas se aplicaran en medio litro de alcohol isopropílico. Ambos productos de mezclaran en la misma proporción en un recipiente graduado, y aunque su suma resulte en un producto de carácter ligeramente diluido, permitirá la comparación entre ellos.

## vi. Ensayos

Esta investigación tiene como objetivo determinar las propiedades del catalizador como material a tener en cuenta en procesos comentados de consolidación, reintegración y reconstrucción. Al tratarse de una investigación limitada en el tiempo, los datos que se exponen se presentan como un estudio preliminar sobre la posibilidad de aplicación del FCC en las tres formas comentadas. De esta forma, cada una de las dosificaciones a ensayar presenta ligeras variaciones, de forma que permita una primera aproximación acerca de la proporción óptima.

En un primer momento, el planteamiento de la fase experimental trató de obtener datos relacionados con aspectos químicos y físico-mecánicos. A causa de limitaciones de tiempo y económicas la mayor parte de los ensayos realizados se centraron en la caracterización físico-mecánica.

La efectividad de los materiales de restauración se basa en el respeto por las propiedades del material original. De esta forma, se cree fundamental el conocimiento acerca de las propiedades que este puede llegar a conferirle al material y el modo en que ambos interactuarán.

### i. Justificación ensayos

El planteamiento de los ensayos que se desarrollarán en el apartado posterior, trata de estudiar el funcionamiento del FCC como carga puzolánica, correspondiéndose con el grupo 1 y 3 y como consolidante superficial grupo 2.

Con el fin de poder comparar las propiedades que confiere el catalizador, se han realizado muestras de referencia con las mismas proporciones y expuestas a las mismas condiciones que las probetas de ensayo. Este planteamiento permite obtener datos acerca de su funcionamiento a lo largos de las 4 edades de curado comentadas en el apartado 08. VI. d. (7 días, 28 días, 63 días, y tras envejecimiento)

Los ensayos a realizar trataron de dar respuesta a los aspectos principales que se deben tener en cuenta de un material al quererlo implantar en el ámbito patrimonial. Entre los principales objetivos de la investigación son los siguientes;

- Comprobar la viabilidad de aplicación del FCC respecto a los tres métodos comentados
- Determinar el aporte de propiedades por comparación entre la propia población de muestras
- Determinar la dosificación que mejor respuesta presenta
- Determinar el aporte de resistencia mecánicas de los grupos 1 y 3. Tomando de nuevo como referencia el apartado 03. Criterios de intervención material, los materiales empleados en intervenciones patrimoniales deben respetar las propiedades resistentes de los preexistentes. De esta forma, se debe evitar la utilización de materiales que superen las propiedades resistentes con el fin de que la aplicación de estos no derive en tensiones internas. El ensayo de resistencia a compresión y flexión se plantea por la necesidad de conocer y determinar si la adición del FCC en masa aumenta la resistencia respecto a las muestras de referencia, determinando a su vez la proporción que obtiene mejores resultados
- Determinar el aporte de resistencia superficial del grupo 2 . Al igual que el ensayo anterior, el objetivo de este ensayo trata de determinar dicho aporte de resistencia y cuantificarlo. El ensayo de dureza shore C se plantea por la necesidad de conocer el aporte de dureza que confiere el FCC empleado como consolidante superficial. El planteamiento de este ensayo trata de determinar si este sería compatible con su aplicación, al ser respetuoso y no aportar un exceso, que derivaría al igual que en el caso anterior en problemas de fisuración interna. Se considero ensayar el grupo 2 a compresión pero se descartó por el carácter superficial del tratamiento, considerándose que los resultados que se obtuvieran serian prácticamente iguales a los de las muestras de referencia .

- Determinar el *comportamiento material ante la incidencia hidráulica*. Este ensayo permite aproximar de forma acelerada el comportamiento del material ante la incidencia de agua. El planteamiento de este ensayo se considera de importancia al ser materiales expuestos directamente a los agentes atmosféricos, por lo que determinar sus propiedades ante la incidencia acelerada de agua se cree beneficioso. Se toma como referencia el ensayo de erosión acelerada de Swinburne (SAET), permitiendo determinar la resistencia material ante dicha acción.
- Determinar su *posible comportamiento en un periodo de medio plazo*. Insistiendo de nuevo en los puntos básicos que deben cumplir los materiales susceptibles de emplearse en restauración, destaca como imprescindible su estabilidad y durabilidad, al tratarse de materiales vinculados irreversiblemente con la materia patrimonial. El ensayo de ciclos de contraste, pretende obtener una respuesta aproximada acerca del comportamiento del material después de someterlo a ciclos contrastados de temperatura y humedad. Este ensayo permite “simular” un envejecimiento acelerado del material, lo que permite apreciar si las propiedades que presenta el material son estables.
- Determinar la *estabilidad y respeto por la permeabilidad interna del material*. Este aspecto es fundamental pues en intervenciones patrimoniales se debe evitar la utilización de materiales susceptibles de modificar las propiedades intrínsecas que presenta el material original. Como se ha comentado en el respectivo apartado, una de las principales limitaciones de los productos de restauración es que su aplicación provoca impermeabilización de los paramentos tratados, derivando en la aparición de fisuras y grietas debido a la diferencia de comportamiento.

De esta forma, el ensayo de permeabilidad se plantea con la finalidad de determinar si la adición como carga puzolánica modifica las propiedades internas en comparación con las probetas sin dicha carga. El ensayo se plantea con el fin de determinar la saturación máxima que alcanza el material con el objeto de estudiar un posible cambio entre las dosificaciones de referencia y ensayo.

- Determinar que *su utilización no suponga una modificación del sistema capilar*. El planteamiento de este ensayo trata de determinar si la utilización del FCC supondría una modificación de la red capilar del material. El ensayo de absorción permite determinar la curva de absorción y saturación del material, permitiendo observar cambios en el comportamiento ante el agua. El principal objetivo de este ensayo trata de determinar si la aplicación del FCC como consolidante supondría una modificación de las capas más superficiales, y cuantificar dicha modificación. En este punto se debe recordar que un consolidante superficial tiene el objetivo de devolver la consistencia al material degradado, generalmente rellenando los huecos que presenta este. El objetivo de este ensayo trata de determinar si dicha aplicación crea una barrera impermeabilizante.
- Determinar y cuantificar diferencias *tonales entre las muestras de referencia y las de ensayo*. Esto permite determinar que se trata de un material incoloro, asegurando que su aplicación no modifica el carácter estético del bien patrimonial. Así, se realizó un análisis de color de todas las muestras permitiendo determinar su empleo del FCC conlleva modificación respecto al color original.

Al tratarse de ensayos acerca de la determinación de propiedades de elementos de tierra y morteros empleados en restauración, las normas que más se aproximan están relacionadas con la evaluación de materiales patrimoniales. La selección se basó en la aproximación de los materiales de estudio, puesto que la mayor parte de las normas se relacionan con la evaluación del cemento y el hormigón, siendo materiales que no forman parte de las intervenciones en patrimonio. Tras delimitar las pruebas de interés que se creen relevantes para la determinación de la viabilidad del producto, se consultó con profesionales del campo con el fin de verificar dichas conclusiones y buscar opciones no contempladas. Los ensayos a realizar se deben dividir en dos grupos, correspondiendo con los análisis de determinación y caracterización de los materiales y ensayos físicos mecánicos.

Así, se determinó la realización de las siguientes pruebas, mostrándose a su vez la norma que se ha tenido en cuenta para cada ensayo;

	ENSAYO	NORMA
ENSAYOS DE DETERMINACIÓN	Determinación granulométrica	UNE 103101:1995
	Ensayo retracción lineal	
	Microscopía electrónica de barrido (MEB)	
	Ensayo colorimetría	UNE-EN 15886. Métodos de ensayo. Medición del color en superficies
ENSAYOS FÍSICO-MECÁNICOS	Ensayo de resistencia a compresión	UNE EN 13 279-2
	Ensayo dureza superficial	UNE EN 102042
	Ensayo cíclico de humectación-heladicidad y secado	
ENSAYOS DE COMPORTAMIENTO AL AGUA	Ensayo de erosión acelerada de Swinburne (SAET)	UNE 41410
	Ensayo de determinación de absorción de agua por capilaridad	UNE-EN 15801. Métodos de ensayo. Determinación de la absorción de agua por capilaridad
	Ensayo de determinación de la permeabilidad al vapor de agua	UNE-EN 15803. Métodos de ensayo. Determinación de la permeabilidad al vapor de agua.

## ii. Desarrollo ensayos

### 1. Técnicas de análisis y determinación

#### a. Estudio granulométrico

Este ensayo ha sido realizado en el Laboratorio de Materiales de Escuela Técnica Superior de Gestión de la Edificación (UPV), gracias a la colaboración de D. Rafael Calabuig Pastor, al facilitar los medios e instalaciones para su ejecución.

Trata de determinar la distribución granulométrica de la tierra empleada en la parte experimental de este trabajo. Respecto a la selección de la norma a seguir para dicho ensayo, y en relación a la similitud de los materiales a ensayar, se tomo como referencia la norma UNE 41410, Bloques de tierra comprimida para muros y tabiques, definiciones, especificaciones y métodos de ensayo. En ella se recoge que el ensayo de determinación granulométrica se debe realizar según la normas UNE 103101:1995; *Análisis granulométrico de suelos por tamizado* y UNE 103102:1995, *Análisis granulométrico de suelos finos por sedimentación. Método del densímetro*.



#### Equipo de ensayo

- Tamices normativos UNE de malla cuadrada y tejido de alambre
- Estufa de desecación
- Balanza

#### Procedimiento

El ensayo realizado se basó en la primera norma comentada, UNE 103101:1995, empleándose tamices UNE de 2.00mm., 1.00mm., 0.5mm., 0.25mm., 0.125mm. , 0.063mm y fondo. Al presentar una limitación en relación a la caracterización de la parte de finos, se procedió a una primera determinación de estos por lavado.

Para la realización de este ensayo se tomó una muestra de 125.0 gr. previamente secada en la estufa a 100°C durante 24h, con la finalidad de eliminar el porcentaje de humedad que puede presentar.

La tierra de ensayo se introduce en un recipiente con poco fondo, en el que se vierte agua tratando de que las partículas de menor tamaño queden en suspensión. Tras un mínimo reposo, donde se sedimenten los granos de mayor diámetro, se elimina el agua superficial. El proceso se repite hasta que el agua eliminada tenga un aspecto transparente. Tras este proceso, se vuelve a introducir en la estufa la tierra resultante en las mismas condiciones. Una vez seca, la tierra se vuelve a pesar, determinando la proporción eliminada, correspondiéndose con el porcentaje de partículas más finas.

Tras esta primera determinación, la materia se introduce en los diferentes tamices en orden descendente. La materia retenida en cada uno de ellos se pesará, determinando el porcentaje correspondiente con cada granulometría.

#### b. Ensayo retracción lineal

El planteamiento de este ensayo surge con el fin de determinar la retracción que presenta la tierra empleada en el ensayo. La tierra empleada en construcción debe presentar un porcentaje de arcilla en su composición, por lo que este ensayo trata de verificar que ésta es viable para el ensayo. La arcilla presente en la tierra, puede presentar unas propiedades plásticas muy activas, sufriendo un hinchamiento de éstas en contacto con el agua. Las arcillas muy expansivas son poco recomendadas para un fin constructivo, ya que tienden a ser inestables con la humedad y sufrir cambios de hinchamiento y retracción, por lo que no sería viable ensayar con ella al considerarse el material que sirve de base para el ensayo.



La metodología aplicada para su realización no sigue una normativa, sino que se tomo como referencia el método descrito por Gernot Minke en su libro “Manual de construcción en tierra” , basada en la norma alemana DIN 18952.

El objetivo del ensayo es determinar tanto a nivel cualitativo como cuantitativo la contracción del material base para la elaboración de la totalidad de las probetas a causa de la pérdida del agua aportada en el amasado.

#### Equipo de ensayo

- Pie de rey
- Molde normativo 160x40x40mm.
- Amasadora
- Estufa de desecación

#### Procedimiento

Se realizará una argamasa de tierra y agua (5:1), y se introducirá en el molde metálico con unas medidas de 106x40x40 mm. Los moldes se cubrieron con la finalidad de controlar el proceso de evaporación, con el objetivo de suavizarlo y que no se generarán grietas durante el proceso de secado. Tras un periodo de 7 días, se introdujo en la estufa 48h a 50°C.

Una vez pasado este periodo, se tomaron medidas de las dimensiones. Estas se compararán con las medidas conocidas de los moldes, determinando la retracción que ha sufrido la probeta.

#### c. Microscopía electrónica de barrido (SEM)

Este examen ha sido realizado gracias al servicio de microscopía electrónica de barrido (SEM) de la 83 UPV.

El microscopio electrónico de barrido es un instrumento capaz de ofrecer información acerca de la composición de las muestras por la incidencia de un haz de electrones secundarios. Esta incidencia permite además, obtener una imagen aumentada de la superficie examinada.

Para ello, se han seleccionado tres de las dosificaciones elaboradas, siendo a priori las que mostraban mejores características en relación a los ensayos realizados. Estas se corresponden con la DOT, siendo la muestra de tierra empleada en el ensayo, con la finalidad de obtener información acerca de su composición, y las dosificaciones de ensayo D4 y D11, al mostrar inicialmente las mejores propiedades.

Para su examen fue necesario un tratamiento previo, donde se recogió aproximadamente un gramo de muestra, el cual se desecó posteriormente con la finalidad de no presentar H<sub>2</sub>O en su composición, ya que por el contrario, los resultados podrían considerarse erróneos.

En este proceso, se adhirió sobre un porta muestras de carbono, una cinta adhesiva del mismo material, depositando sobre la superficie la dosificación a analizar.

#### Equipo de ensayo

- Microscopio electrónico de barrido

Los resultados del examen se expondrán en el anexo correspondiente con el fin de aportar información acerca de dicha composición.



Porta muestras de carbono y microscopio electrónico de barrido



#### d. Ensayo colorimetría

La realización del examen colorimétrico ha sido posible gracias a la colaboración con el Grupo de investigación del Color en Arquitectura, formando parte del Instituto Universitario de Restauración del Patrimonio (UPV), el cual ha facilitado los medios para su elaboración. Se ha contado así, con la ayuda de D<sup>a</sup>. Ana Torres Barchino, sin la cual no hubiera sido posible el planteamiento de dicho examen.

La finalidad de este ensayo trata de determinar como la adición de FCC, tanto en masa como de forma superficial, modifica la colorimetría de las dosificaciones respecto a las tomadas como referencia.

Este examen se cree de importancia debido al carácter superficial de los posibles tratamientos, en los que se podrían emplear los materiales propuestos en este trabajo. A su vez, el planteamiento del ensayo tratará de evaluar la existencia de cambios colorimétricos en las probetas de ensayo en función de la edad de curado, tratando de determinar si existe diferencia entre las curadas de forma natural con respecto a las sometidas a ensayo de envejecimiento acelerado.

#### Equipo de ensayo

- Colorímetro Kónica Minolta Color Reader CR-11 Munsell
- Colorímetro NCS colour scan 2.0
- Carta Color Munsell. Soil Color Charts



Colorímetro Kónica Minolta Color Reader CR-11 Munsell



Carta color Munsell. Soil Color Charts



Colorímetro NCS colour scan 2.0

## 2. Ensayos físico-mecánicos

### a. Ensayo compresión

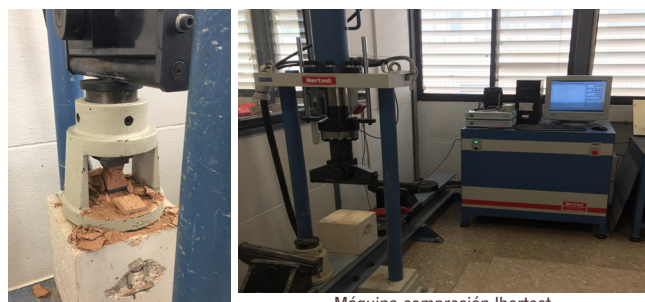
La realización de este ensayo ha sido posible gracias a la colaboración de D. Rafael Calabuig Pastor (Dpto. de Construcciones Arquitectónicas) al facilitar los medios e instalaciones y tiempo para su ejecución.

El presente ensayo se planteó con la finalidad de apreciar diferencias entre las probetas sin adición en masa (grupo RT y RM) y con ella (grupos 1 y 3), con el objetivo de determinar si esta adición favorece la resistencia del mortero de tierra y cal realizados.

La realización del ensayo se basó en la norma UNE 13279-2, *Yesos de construcción y conglomerantes a base de yeso para la construcción. Parte 2: Métodos de ensayo, por la proximidad entre los materiales a ensayar*. El procedimiento del ensayo tomo de esta forma las pautas aportadas por la norma aun sufriendo una ligera modificación respecto a los materiales, pues en este caso se tratara de morteros de tierra y cal y morteros de cal.

#### Equipo de ensayo

- Prensa hidráulica



Máquina compresión Ibertest

#### Procedimiento

Para la realización de este ensayo se requería una medida normalizada de las probetas, debiendo presentar unas dimensiones de 40x40x160 mm. Tras la espera del tiempo de curado correspondiente, y de forma previa al ensayo se realizó un pre-acondicionamiento, de forma que todas presentaran las mismas condiciones. Este proceso consistió en su introducción 48 h a 50°C en la estufa secadora. Previamente al ensayo se mantuvieron media hora en un secador de forma que recuperará temperatura ambiente, sin que adquiriera durante el proceso humedad.

Las probetas a ensayar fue una de las dosificaciones comentadas en cada edad de curado, obteniendo de cada una

tres medidas, tomándose su media como resultado final. Las caras ensayadas se corresponderán con las caras laterales de la probeta, que se colocarán de forma alineada con respecto a los platos de la prensa, que presentan unas medidas de 40mm x 40mm. El ensayo consistirá en comprimir la probeta hasta su rotura, permitiendo obtener la resistencia máxima a compresión. La velocidad empleada en la totalidad de las roturas fue de 0,03Mpa/s, seleccionada por la fragilidad del material de ensayo.

### b. Determinación dureza Shore C

La realización de este ensayo ha sido posible gracias a la colaboración de D. Rafael Calabuig Pastor (Dpto. de Construcciones Arquitectónicas) al facilitar los medios para su ejecución.

Este ensayo se planteó por la necesidad de determinar un valor aproximado acerca de la dureza superficial aportada por el consolidante superficial experimental. Se ha pensado que este ensayo permitiría obtener información comparable entre las muestras de referencia y las de ensayo.

El interés de este ensayo radica en las dosificaciones del grupo 2 (D7, D8, D9, D10) pues es el único ensayo que permite caracterizar sus propiedades a nivel superficial.

En un primer momento el ensayo tomó como referencia la norma UNE 13279-2, *Yesos de construcción y conglomerantes a base de yeso para la construcción. Parte 2: Métodos de ensayo*, consistiendo en medir la huella dejada por una bola de acero de 10mm sobre la superficie de la probeta. Esta metodología de ensayo se descarto tras la prueba preliminar por haber dado errores en los resultados, debido a la posible presencia de irregularidades en la masa de la probeta.

De esta forma el procedimiento llevado a cabo para este ensayo, consistió en la medida de dureza superficial por medio del ensayo de dureza shore C, según la norma UNE 102042, *Yesos y escayolas de construcción. Otros métodos de ensayo*.

#### Equipo de ensayo

- Durómetro Shore C

#### Procedimiento de ensayo

Se realizan un total de 10 mediciones por cada cara de ensayo correspondiente con una de las caras del molde. La separación mínima entre pinchazos debe ser de 2cm con el objetivo de evitar que la presión y la hendidura del durómetro no alteren la medida.

El resultado del ensayo se corresponderá con la media aritmética de las mediciones realizadas, expresadas en unidades enteras shore C.



Durómetro Shore C



### c. Ensayo de erosión acelerada de Swinburne (SAET)

La realización de este ensayo ha sido posible gracias a la colaboración con D. Joan Romero, y al laboratorio de geotecnia de la Universidad Politécnica de Valencia, dentro del Departamento de Ingeniería del Terreno, al haber facilitado los medios e instalaciones para su ejecución.

Este ensayo se contempló por la necesidad de conocer el comportamiento que podrán presentar los materiales con esta adición expuestos a la incidencia de agentes de degradación reales, siendo el más común el lavado superficial por agua.

Para la realización de este ensayo se tomó como referencia la norma UNE 41410. *Bloques de tierra comprimida para muros y tabiques. Definiciones, especificaciones y métodos de ensayo*. En el apartado 8.4

de ésta, se expresa la metodología a seguir para el ensayo de erosión acelerada Swinburne (SAET), siendo la que se tome para la realización del ensayo.

### Equipo de ensayo

- Conjunto de depósito, soportes y tubo de diámetro interior de 5mm
- Varilla de 3 mm de diámetro
- Pie de rey



Depósito, soportes y tubo para ensayo SAET

### Procedimiento

El objetivo del ensayo es estudiar la caída de agua durante 10 minutos sobre la superficie inclinada de la probeta. El ensayo se realizará sobre la totalidad de las dosificaciones, cuya superficie de evaluación se corresponderá con una de las caras laterales de las probetas.

Las probetas a ensayar presentarán unas dimensiones de 40mm x40mmx 80mm. Estas dimensiones se deben a que las probetas a ensayar serán sometidas de forma previa a un ensayo de flexión, tras los que las dos fracciones se someterán a diferentes ensayos, siendo el comentado y el ensayo de permeabilidad al vapor.

Para la realización del ensayo, la probeta se dispone en ángulo de 27° respecto a la horizontal, forma que la caída del caudal de agua se presente inclinada. Una vez situada se abre el caudal constante de agua situado a una altura de un metro. El tubo debe presentar una medida de 5mm de diámetro interior, conectado a un tanque de agua de nivel constante con un diámetro de 3mm.

86

### d. Ensayo cíclico de humectación-heladicidad y secado

La realización de este ensayo ha sido posible gracias a la colaboración con D. Rafael Molina Nieto (Dpto. de Construcciones Arquitectónicas) al haber facilitado los medios, instalaciones y tiempo para la ejecución de este ensayo.

Como se ha comentado en el planteamiento de la fase experimental, se cree de importancia evaluar las propiedades de los materiales con adición de FCC en condiciones extremas. La finalidad de este ensayo trata de determinar el posible comportamiento a largo plazo de este material respecto a las diferentes metodologías de aplicación, una vez haya sido puesto en obra.

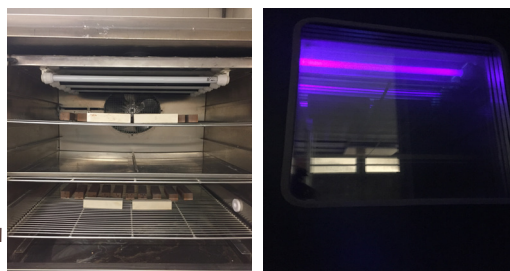
Los ciclos programados trataron de ser fluctuantes y bruscos con la finalidad de provocar unas condiciones extremas. Aun no existiendo una correlación entre los ciclos artificiales y las condiciones reales, el ensayo se toma en comparación con las propiedades que presentan las probetas en diferentes días de curado. Esta conclusión permite obtener información de cómo las condiciones afectan a las probetas sin adición y las propiedades que presentan las adicionadas en comparación.

Las probetas a ensayar consistieron en una familia de tres probetas por dosificación, de las que una de cada proporción se sometió a radiación UV. Las no expuestas se protegieron interponiendo una bandeja metálica de forma que no les alcanzase radiación.

### Equipo de ensayo

- Cámara climática

Cámara de ensayos climáticos CCM 25/480 EN  
Sin y Con radiación



## Procedimiento

Tras superar un curado previo de 28 días, las probetas se introdujeron en la estufa secadora 50°C 48 h., con la finalidad de que todas presentasen las mismas características de forma previa a su introducción en la cámara climática.

Los ciclos programados consistieron en dos ciclos de contraste en intervalos de tiempo de dos semanas durante dos meses. Estos presentaron las siguientes condiciones;

	TEMPERATURA	HUMEDAD
CICLO 1	24h. 20°C	85%
	24h. 60°C	85%
CICLO 2	24h. 5°C	40-45%
	24h. -20°C	55%

## Resultados

Los resultados se obtendrán tras ensayar las probetas sometidas a ensayo tras un periodo de estabilización de 60°C durante dos días, como forma de igualar las condiciones de ensayo con el resto de las dosificaciones.

### e. Ensayo de determinación de absorción de agua por capilaridad

La realización de este ensayo ha sido posible gracias a la colaboración con D. Rafael Molina Nieto, (Dpt. Construcciones Arquitectónicas) al facilitar los medios, instalaciones, tiempo y haber colaborado durante toda su ejecución.

Este ensayo tiene por objeto estudiar el coeficiente de absorción de agua por capilaridad de cada una de las dosificaciones, evaluándose para las diferentes edades de curado. Esta evaluación permite conocer la capacidad de absorción de cada dosificación empleada, pudiendo extraer conclusiones a modo de comparación entre ellas. El ensayo permite concretar en como la adición de FCC influye en dicho proceso.

La norma de referencia para este ensayo será la Norma UNE-EN 15801. *Métodos de ensayo. Determinación de la absorción de agua por capilaridad*, de las normas que se relacionan con la determinación de materiales patrimoniales. La selección de esta se basó en la proximidad de materiales, descartando previamente las relacionadas con piezas para fabricas de albañilería, por el contacto directo de la pieza con el agua al tratarse de probetas de mortero de tierra. Se cree que dicho contacto supondría una fácil disgregación de la probeta, dando por ello un error en el resultado. La norma contemplada interpone un material absorbente, de modo que la ascensión capilar se realizaría de una forma más lenta, permitiendo por ello la obtención de unos resultados más ajustados a la realidad.

### Equipo de ensayo

- Bandeja grande
- Lecho permeable. Discos de algodón
- Cronómetro, de exactitud de 1s
- Estufa de desecación, con temperatura constante
- Depósitos de desecación, con producto desecante
- Balanza analítica de exactitud de 0.01 gr.
- Pie de rey, con exactitud de 0.1mm.
- Depósito de agua



Ensayo Capilaridad  
Bandejas de ensayo

## Procedimiento

En la norma a seguir se especifica que las probetas deben presentar unas dimensiones mínimas de 10 mm. de altura y de diámetro. El número de probetas a ensayar debe ser de mínimo tres por cada serie, permitiendo la obtención de un resultado ponderado. De esta forma, y por limitaciones respecto al número de probetas, se decidió la división en tres de cada una de ellas. Posteriormente se procedió al lijado de las caras irregulares con el fin de presentarlas de forma prismática y con unas dimensiones similares. Se prestó especial atención a las dimensiones de cada una de ellas pues una diferencia en la altura podría inducir a error.

Las caras ensayadas deben presentar un acabado pulido, por lo que se corresponderá con la cara de la probeta que estuvo en contacto con el molde, al presentarse como la más uniforme.

Respecto al proceso de selección de las caras de ensayo, se presentó una limitación en relación a las dosificaciones correspondientes con el método de consolidación superficial. Esta situación se debe a que de forma previa a la aplicación del producto, se decidió lijar de forma superficial las caras sobre las que se aplicó, con el fin de facilitar la penetración del producto.

De forma previa a la realización del ensayo y tras el proceso de preparación de las probetas, se debe conocer la masa y dimensiones de cada una de ellas, con la finalidad de conocer la superficie específica de la probeta de ensayo. Así, se midieron y pesaron cada una de ellas, y se introducirán en la estufa a una temperatura constante de 60°C. Con el objetivo de conocer la masa constante, se realizó una pesada cada 24h. hasta que la diferencia entre pesadas sea inferior al 0,1%, entendiéndose que presentan una masa constante.

Para el ensayo se preparará una bandeja con un lecho permeable de 5mm de espesor mínimo y se añade agua destilada hasta la saturación del material permeable, no debiendo superar la superficie superior de este. El nivel de la lámina de agua se debe mantener constante. La probeta a ensayar se colocará en esta superficie cronometrando su contacto.

Este ensayo a realizar sufrirá una modificación respecto a la norma seguida, viéndose modificados los tiempos de ensayo, ya que se cree que los tiempos de pesada deben contemplar tiempos más cortos. Así, se procederá a su pesada a los 30", 1', 3', 5', 10', 20', 30', 45', 1h, 2h, 3h y 48h, permitiendo obtener unos resultados más exactos.

Con cada pesada debe pasarse un paño húmedo la cara de ensayo, con la finalidad de retirar el agua sobrante que no ha penetrado. Los resultados permitirán obtener una gráfica donde se refleje la absorción de cada dosificación.

## Resultados

La cantidad de agua absorbida por la probeta por unidad de superficie (kg/m<sup>2</sup>) en el tiempo (s) se calcula mediante la fórmula, siendo  $m_i$  la masa pesada en cada intervalo de tiempo,  $m_0$  la masa inicial y  $A$  la superficie de absorción

$$Q \text{ (superficie)} = [(m_i - m_0) / A]$$

Para determinar la curva de absorción de cada dosificación los valores  $Q$  se representarán en un gráfico como una raíz cuadrada del tiempo.

El coeficiente de absorción de agua por capilaridad es la pendiente de la parte lineal de la curva obtenida, representando la variación de masa por unidad de superficie en función de la raíz cuadrada del tiempo, y debe calcularse por regresión lineal, utilizando al menos cinco puntos alineados y consecutivos.

## f. Ensayo de determinación de la permeabilidad al vapor de agua

La realización de este ensayo ha sido posible gracias a la colaboración con D. Rafael Molina Nieto, (Dpt. Construcciones Arquitectónicas) al facilitar los medios, instalaciones, tiempo y haber colaborado durante toda su ejecución.

La permeabilidad al vapor de agua es la capacidad de un material de permitir el paso del vapor de agua a través de su estructura interna. En climas moderados la temperatura interior suele ser superior a la ambiental, produciéndose una diferencia de presión de vapor entre ambas, tendiendo a equilibrarse a través del muro. La introducción de nuevos materiales al inmueble patrimonial debe mantener una transpirabilidad compatible, al con el objeto de que la difusión del vapor entre ambas zonas no genere problemas relacionados con condensaciones internas.

La realización del siguiente ensayo presenta interés al tener como objetivo mostrar la capacidad de permeabilidad al vapor de agua en los materiales de ensayo. Al querer presentar el FCC como adición en morteros de inyección, en su evaluación se debe prevenir posibles variaciones de permeabilidad, respecto a las muestras de referencia. La conclusión se cree importante con el fin de prevenir que su aplicación no genere patologías relacionadas con impermeabilizaciones y condensaciones.

En un principio la norma que se tomó como referencia fue UNE-EN 15803. *Conservación del patrimonio cultural. Métodos de ensayo. Determinación de la permeabilidad al vapor de agua*. Esta se descartó por la imposibilidad de acceder a las instalaciones necesarias para dicho proceso. Ante esta situación el procedimiento a seguir se realizará de forma libre, tratando de que alcanzasen la máxima saturación con el fin de determinar la capacidad máxima del material.

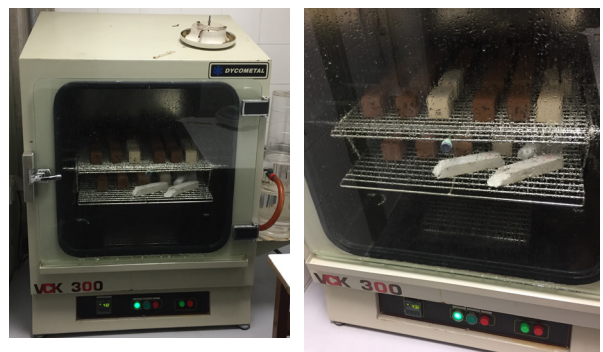
Respecto a esta, el procedimiento a seguir sufrirá modificaciones debido a falta del equipo de ensayo. Con el fin de determinar el grado de permeabilidad y penetración del vapor de agua, las probetas se introdujeron en una cámara de saturación (cámara de corrosión Kesternich), seleccionada por alcanzar la saturación constante de humedad a una temperatura constante.

El ensayo proporcionara datos relacionados con la cantidad de humedad absorbida por cada probeta expuestas todas a las mismas condiciones, las cuales se pre-acondicionarán de igual modo para equilibrar sus propiedades iniciales. Los materiales porosos poseen una humedad de equilibrio o de saturación, por lo que la finalidad del ensayo trata de determinar el tiempo en el que adquieren dicha saturación.

### Equipo de ensayo

- Cámara de saturación
- Estufa secadora
- Balanza

Cámara de corrosión Kesternich  
Serie VCK



### Procedimiento

Los resultados que se obtendrán determinarán la absorción de vapor de agua, de lo que se obtendrá como resultado la absorción por masa y el porcentaje de absorción de cada una de las dosificaciones.

Las probetas a ensayar, se corresponden con una de las mitades obtenidas tras el ensayo de flexión. Tras este, se introdujeron en la estufa a 60°C, programando pesadas cada 24h a temperatura ambiente hasta alcanzar un peso constante (+/- 0.1%). De forma previa a la introducción en la cámara se calculo el volumen de cada probeta de ensayo con el objetivo de hallar la absorción por cm<sup>3</sup>

Una vez alcanzado, se toman medidas necesarias, las probetas se introducen en la cámara Kesternich. El ensayo comienza a las 24h de su introducción, programando al igual que en el pre acondicionamiento pesadas cada 24h. El ensayo finaliza cuando las pesadas presentan una variación de +/- 0.1%.

## vii. Resultados

### EXPRESION DE RESULTADOS

Con el fin de poder obtener unas conclusiones orientativas sobre la eficacia de los materiales a probar en el trabajo realizado, la toma de resultados se basó en la comparación, como se ha insistido, entre un grupo de probetas tomadas como referencia y las propias de ensayo.

Con el propósito de que ambos grupos puedan ser comparados, se prestó especial atención a las proporciones de cada material durante el proceso de producción. Este planteamiento permite estudiar la influencia de la adición de FCC sobre las probetas de ensayo, tomando como punto de partida las no tratadas.

A su vez, los resultados obtenidos se expondrán comparando cada tratamiento de forma individual. A su vez, cada tratamiento presenta variaciones en porcentaje, ya que el objetivo trata de aproximar un porcentaje óptimo, siendo por ello que los grupos MTE y CS, se estudiarán en función de la familia.

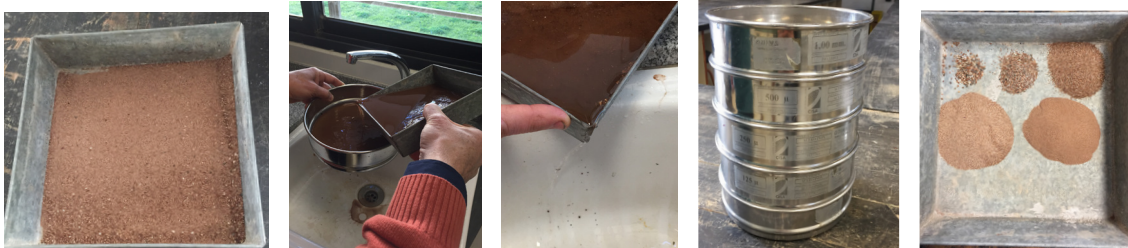
Respecto a este análisis, se tomaron como referencia el grupo de datos ensayados a 63 días de curado, al tratarse del grupo de probetas que presentaban mayor tiempo de curado natural. Tras estas conclusiones se estudiará la evolución de su comportamiento respecto a la edad de curado, que como se ha expuesto, será a 28 días, 63 días, envejecimiento con radiación ultravioleta y envejecimiento sin radiación.

TRATAMIENTO	GRUPO/FAMILIA	
MORTERO TIERRA ESTABILIZADA (MTE)	Mortero tierra estabilizada 5%	D1, D3 Y D4
	Mortero tierra estabilizada 10%	D2, D5 Y D6
CONSOLIDANTE SUPERFICIAL (CS)	Consolidante sobre mortero 5%	D1, D7 Y D8
	Consolidante sobre mortero 10%	D2, D9 Y D10
MORTERO CAL	Mortero cal	DOM, D11 y D12

90

### 1. Técnicas de análisis y determinación

#### a. Estudio granulométrico



En base al proceso descrito, la determinación de finos por el proceso de lavado resultó en una pérdida de 71 gr, correspondiéndose con una presencia de finos del 56.8%.

En la siguiente tabla se refleja la relación entre la proporción y granulometría presente.

TAMIZ UNE	MATERIA RETENIDA	PORCENTAJE
2.00 mm	0	-
1.00 mm	2 gr.	1.6%
0.5 mm	3.9 gr.	3.12%
0.25 mm	10.8 gr.	8.64%
0.125 mm	31.9 gr.	25.52%
0.063 mm	21.9 gr.	17.52%
Pasa	71 gr.	56.8%



**b. Ensayo retracción lineal**

Como se ha comentado los moldes cuentan con unas dimensiones de 160mm x 40mm x 40mm de luz interna. Así, y tras la realización de las probetas de referencia de tierra sola (DOT) se puede concretar en que las dimensiones tras el secado resultan en 152 mm x 38mm x38mm. De esta forma se puede apreciar como se han reducido ligeramente sus dimensiones; de ancho y alto 2 mm y de largo 8mm.

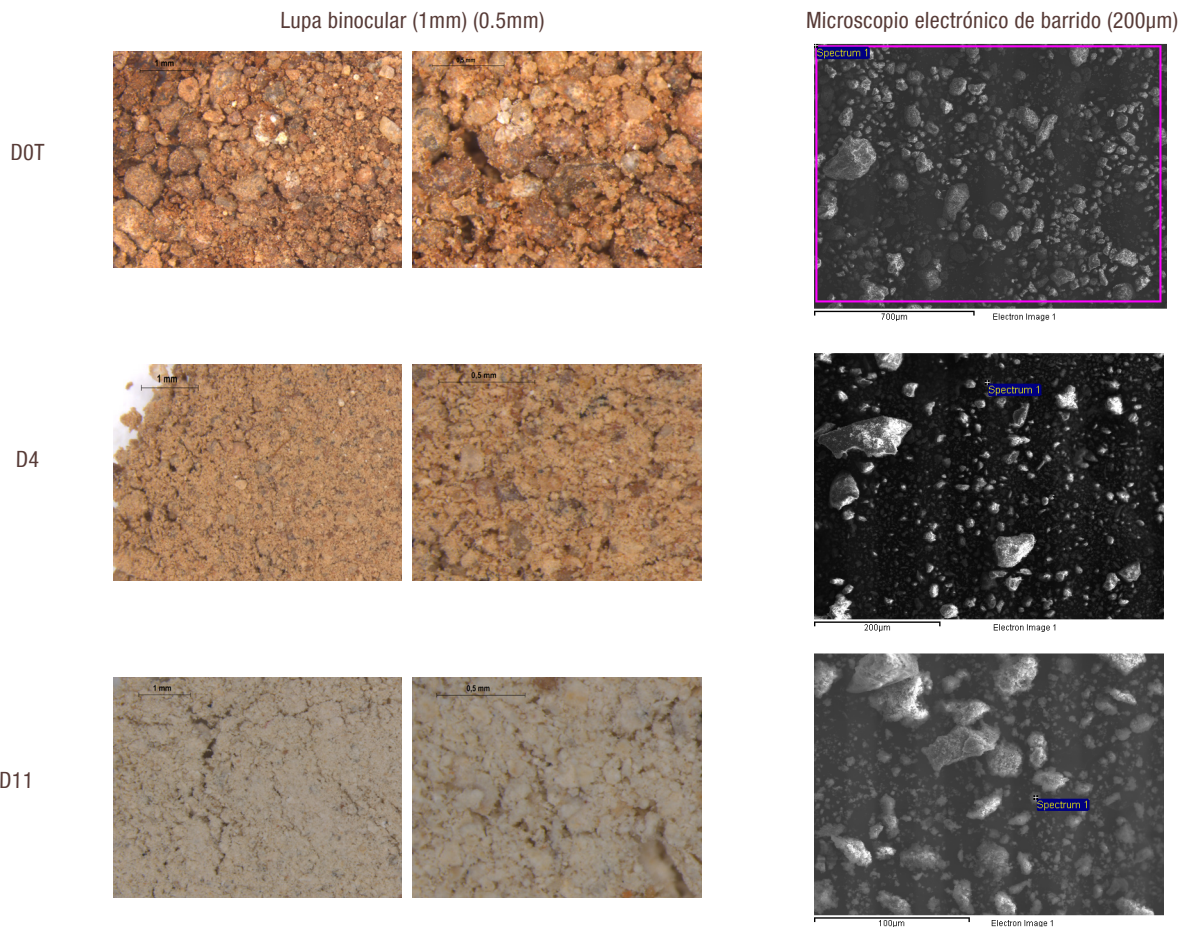
Así se puede concluir en que la arcilla presenta de forma natural movimientos durante el secado, pero que estos no supondrán un problema, por lo que la arcilla es apta para la realización del ensayo



**c. Microscopía electrónica de barrido (SEM)**

La finalidad inicial de la prueba consistió en determinar la composición de la tierra empleada durante la producción de probetas. Dicho resultado se presentará como información adicional en el anexo.

A pesar de esto, la prueba consistió en realizar un análisis visual de las dosificaciones seleccionadas. Así, se realizó un examen mediante lupa binocular y microscopio electrónico de barrido, al permitir la obtención de fotografías con diferente grado de aumentos. Esta información gráfica se expondrá a continuación.



## d. Ensayo colorimetría

TRATAMIENTO	GRUPO	PROBE-TAS	CARTA COLOR	CODIGO COLOR	COLOR
MORTERO TIERRA ESTABILIZADA	Mortero tierra cal 5%	D1	NCS	NCS S 3020-Y40R	
			MUNSELL	7.5 YR 6/4	
		D3	NCS	NCS S 4020-Y40R	
			MUNSELL	7.5 YR 6/4	
		D4	NCS	NCS S 4020-Y40R	
			MUNSELL	7.5 YR 6/4	
	Mortero tierra cal 10%	D2	NCS	NCS S 3020-Y40R	
			MUNSELL	7.5 YR 6/4	
		D5	NCS	NCS S 4020-Y40R	
			MUNSELL	7.5 YR 6/4	
		D6	NCS	NCS S 4020-Y40R	
			MUNSELL	7.5 YR 6/4	
CONSOLIDANTE SUPERFICIAL	Consolidante sobre mortero 5%	D1	NCS	NCS S 3020-Y40R	
			MUNSELL	7.5 YR 6/4	
		D7	NCS	NCS S 3020-Y40R	
			MUNSELL	7.5 YR 6/3	
		D8	NCS	NCS S 3020-Y40R	
			MUNSELL	7.5 YR 6/3	
	Consolidante sobre mortero 10%	D2	NCS	NCS S 3020-Y40R	
			MUNSELL	7.5 YR 6/4	
		D9	NCS	NCS S 3020-Y40R	
			MUNSELL	7.5 YR 6/3	
		D10	NCS	NCS S 3020-Y40R	
			MUNSELL	7.5 YR 6/3	
MORTERO CAL	Mortero cal	D0M	NCS	NCS S 1505-Y30R	
			MUNSELL	10 YR 8/3	
		D11	NCS	NCS S 1505-Y40R	
			MUNSELL	10 Y 8/2	
		D12	NCS	NCS S 1505-Y40R	
			MUNSELL	10 Y 8/2	

En la tabla presentada se exponen los códigos de color de cada una de las probetas a una edad de curado natural de 63 días. En esta representación se exponen los resultados obtenidos tras su análisis mediante dos sistemas de ordenación del color, siendo como se ha expuesto, NCS (Natural Colour System) y Munsell. Se puede apreciar como el grupo de morteros de tierra estabilizada, independientemente del porcentaje de cal, presenta tras el análisis por el sistema NCS un tono más rojizo, correspondiéndose con las dosificaciones que presentan FCC en su composición, mientras que las probetas de referencia (D1 y D2) presentan un tono más amarillento. Esta misma familia analizada con el sistema Munsell, apenas presenta diferencias tonales.

En relación al grupo de consolidante superficial, tras el análisis realizado por el sistema NCS se puede concluir en que apenas existe diferencia tonal en la misma familia. Por el contrario, el análisis realizado

por mediante el sistema Munsell, determina una diferencia entre las dosificaciones de referencia y las que presentan el consolidante superficial. Estas, pese a ser de la misma familia presentan una diferencia de Choma, presentando las tratadas superficialmente, mayor proporción de amarillo.

Por último, tras el análisis de los morteros de cal, se puede determinar cómo tras el análisis mediante el sistema NCS, las dosificaciones de ensayo presentan un carácter ligeramente más amarillo, aun perteneciendo a la misma familia. El análisis mediante el sistema Munsell, confirma esta conclusión, el cual presenta las dosificaciones de ensayo como más luminosas.

**Evolución respecto al tiempo de curado**

		D1		D3		D4	
		NCS	MUNSELL	NCS	MUNSELL	NCS	MUNSELL
Mortero tierra cal 5%	63 días	NCS S 4020-Y40R	7.5 YR 6/4	NCS S 4020-Y40R	7.5 YR 6/4	NCS S 4020-Y40R	7.5 YR 6/4
	E +UV	NCS S 4020-Y40R	7.5 YR 6/4	NCS S 3020-Y40R	7.5 YR 6/4	NCS S 3020-Y40R	7.5 YR 6/4

		D2		D5		D6	
		NCS	MUNSELL	NCS	MUNSELL	NCS	MUNSELL
Mortero tierra cal 10%	63 días	NCS S 4020-Y40R	7.5 YR 6/4	NCS S 4020-Y40R	7.5 YR 6/4	NCS S 4020-Y40R	7.5 YR 6/4
	E +UV	NCS S 4020-Y40R	7.5 YR 6/4	NCS S 3020-Y40R	7.5 YR 6/4	NCS S 3020-Y40R	7.5 YR 6/4

Únicamente se puede concluir en que existe una ligera modificación del color en las dosificaciones que presentan el FCC en masa. A su vez se puede determinar que el porcentaje de cal y de FCC no influye, pues no existen variaciones entre las pertenecientes al mismo grupo, al dar el mismo código de color, expresado en el cuadro correspondiente a los 63 días.

		D1		D7		D8	
		NCS	MUNSELL	NCS	MUNSELL	NCS	MUNSELL
Consolidante superficial sobre 5%	63 días	NCS S 4020-Y40R	7.5 YR 6/4	NCS S 3020-Y40R	7.5 YR 6/3	NCS S 3020-Y40R	7.5 YR 6/3
	E +UV	NCS S 4020-Y40R	7.5 YR 6/4	NCS S 3010-Y40R	7.5 YR 6/3	NCS S 3010-Y60R	5 YR 6/3

		D2		D9		D10	
		NCS	MUNSELL	NCS	MUNSELL	NCS	MUNSELL
Consolidante superficial sobre 5%	63 días	NCS S 4020-Y40R	7.5 YR 6/4	NCS S 3020-Y40R	7.5 YR 6/3	NCS S 3020-Y40R	7.5 YR 6/3
	E +UV	NCS S 4020-Y40R	7.5 YR 6/4	NCS S 3010-Y40R	5 YR 6/3	NCS S 3010-Y60R	7.5 YR 7/2

En base a la situación presentada a los 63 días, donde apenas existía diferencia en los códigos de color NCS, se puede apreciar como los ciclos de envejecimiento han supuesto una modificación del color en superficie. Este tratamiento presenta un cambio mayor en el consolidante al 50%, amarilleando, tendiendo a aportar matices más rojizos a la superficie. Por el contrario el análisis mediante el sistema

de color Munsell, revela que las dosificaciones que se mantienen de una forma más estable con la D8 y D9, presentando en la primera el consolidante al 50% sobre un mortero al 5% de cal, y la segunda el consolidante al 25% sobre un mortero de cal al 10%. La dosificación D10 se presenta como la más afectada, al aumentar tanto en luminosidad como en croma.

		D0M		D11		D12	
		NCS	MUNSELL	NCS	MUNSELL	NCS	MUNSELL
Mortero de cal	63 días	NCS S 1505-Y30R	10 Y 8/2	NCS S 1510-Y30R	10 Y 8/2	NCS S 1510-Y30R	10 Y 8/2
	E +UV	NCS S 1505-Y30R	10 Y 8/2	NCS S 1510-Y40R	10 YR 8/3	NCS S 1510-Y40R	2.5Y 8/2

Respecto al grupo de morteros de cal, se puede apreciar como la dosificación de referencia no muestra una modificación del código de color, mientras que las que presentan FCC si varía. Dicha variación consiste en la que presenta una menor proporción un aumento del tono, presentando un tono más amarillo. Respecto a la que presenta una mayor proporción de FCC se puede apreciar de forma más clara el aumento de la tonalidad amarilla.

## 2. Ensayos físico-mecánicos

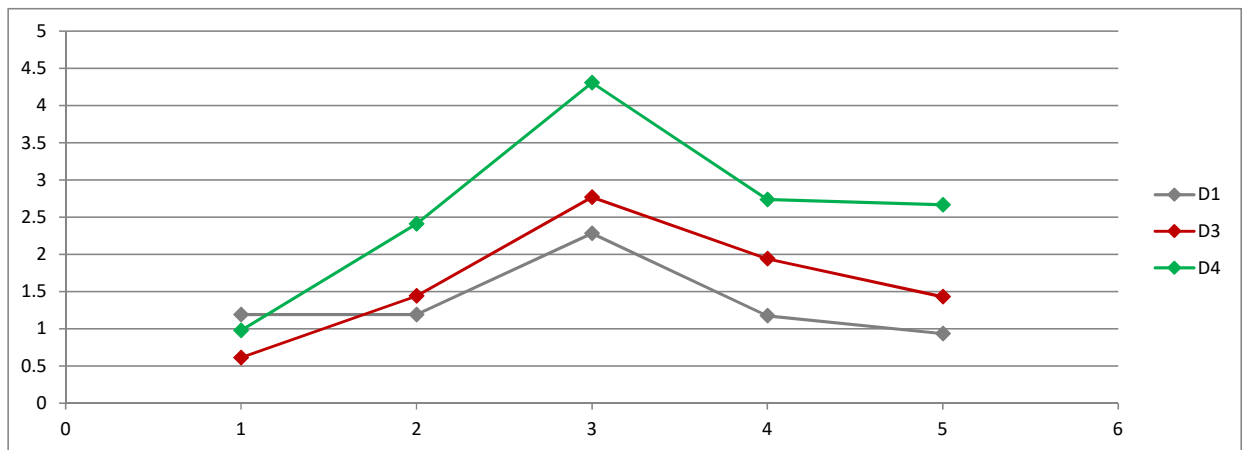
### a. Ensayo compresión

Las probetas ensayadas se corresponden con las dosificaciones de mortero de tierra y mortero de cal. Las relacionadas con la metodología de consolidación superficial se omitieron del ensayo pues la capa de consolidante superficial no supone un aumento de la resistencia a compresión, dando como resultado la resistencia de las probetas de referencia sobre las que se aplicó el producto.

A su vez, esta prueba ha sido la única que se ha ensayado a 5 edades de curado, contando con un periodo más temprano (7 días), además de las mencionadas. Se ha pensado que esta aportaría datos de referencia acerca de la ganancia de resistencia del material y su velocidad.

#### Mortero de tierra estabilizada

##### Grupo 5%

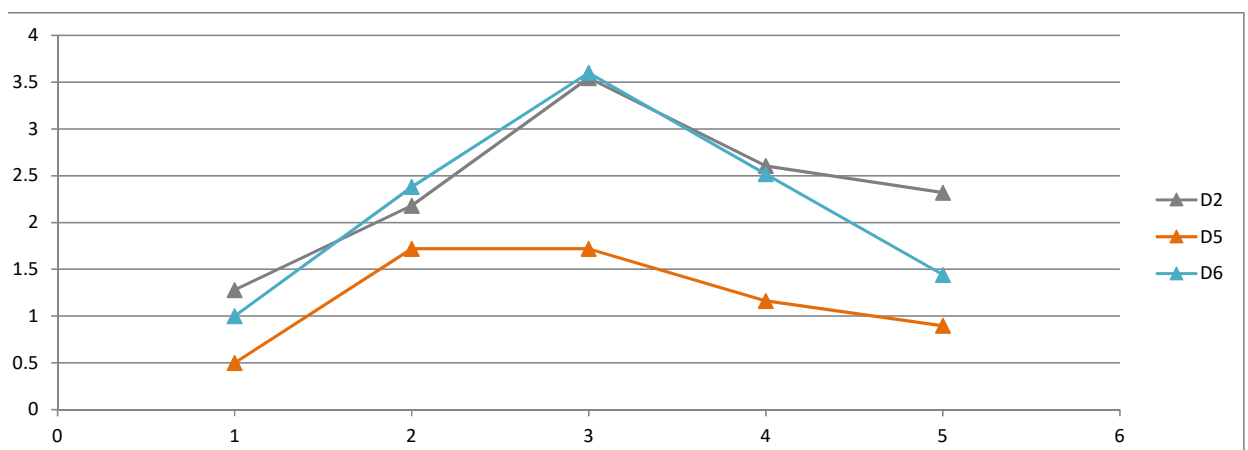


La diferencia entre las probetas de ensayo radica en el porcentaje de FCC, siendo de 10% en la D3 y de 15% en la D4. Se puede apreciar como a una edad muy temprana las propiedades resistentes de la probeta de referencia son mayores, pero son rápidamente superadas por las probetas de ensayo. Además se puede observar la influencia del porcentaje de FCC sobre el aporte de resistencia, pudiendo determinar que en estas proporciones en concreto un mayor porcentaje aumenta dicha resistencia.

La edad de curado que representa la máxima resistencia alcanzada por la población de probetas se corresponde con los 63 días, donde la dosificación D4 alcanza el máximo valor siendo 4,307 Mpa/s.

Tras estos valores, la resistencia disminuye de forma general a causa de haber sido sometidas al ensayo de envejecimiento, viéndose agravada la situación por la incidencia de radiación ultravioleta, suponiendo una pérdida mayor de resistencia.

##### Grupo 10%

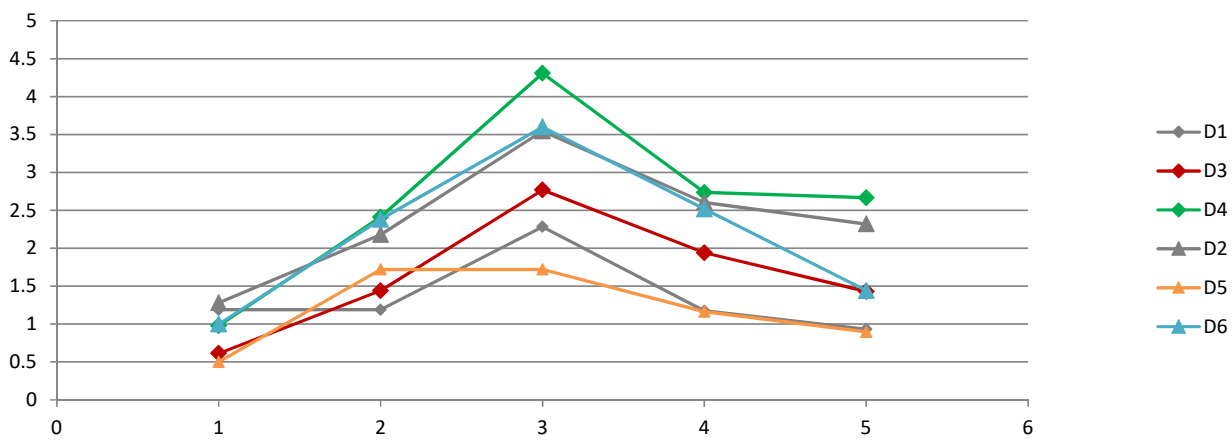


Respecto a las dosificaciones que presentan un porcentaje de cal del 10%, se puede apreciar como la dosificación presenta un mejor comportamiento a compresión es la que presenta una proporción mayor de FCC, D6 (15%), al igual que en el caso anterior. Por el contrario, los valores de resistencia con 63 días de curado son muy similares a los de la probeta de referencia.

En relaciona la dosificación que presenta un menor porcentaje de FCC, D5, alcanza su valor de resistencia máximo a los 28 días, manteniéndose invariable hasta los 63 días.

Nuevamente se puede apreciar como los ciclos de envejecimiento afectan a las propiedades resistentes de los morteros. Al igual que en el caso anterior se puede apreciar como esta situación se ve agravada por la incidencia de radiación ultravioleta (UV). Como ejemplo de ello se deben tomar los valores correspondientes a las dosificaciones D2 y D6. Estas han presentado un comportamiento similar a lo largo del ensayo, salvo la exposición a la radiación ultravioleta donde la probeta D6 mostro una mayor reducción.

### Comparación morteros de tierra estabilizados

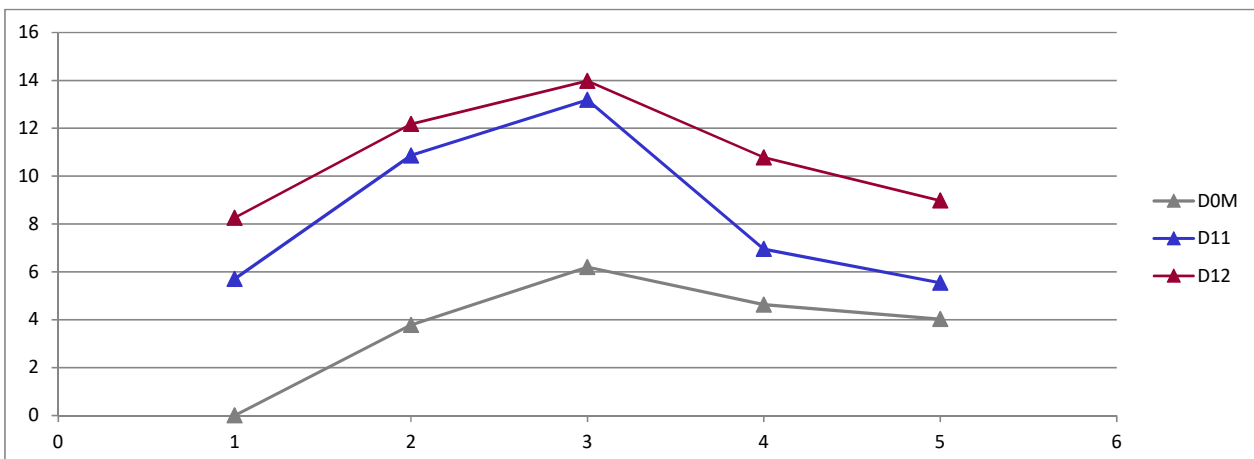


96

Tras una comparación general de los resultados, se puede apreciar como la resistencia aumenta con el tiempo de curado, suponiendo a una edad de 63 días la resistencia máxima de cada dosificación de ensayo. Tras esta edad, las curvas descienden, correspondiéndose con las probetas ensayadas en la cámara climática. Además se puede apreciar, como de forma general la incidencia de la radiación UV afecto en mayor medida a la resistencia de las probetas de ensayo, pudiendo determinar una mayor sensibilidad en las probetas que presentan FCC en masa.

No se aprecian diferencias cuando el % de cal es mayor, incluso tiene peor comportamiento con dosificaciones bajas de FCC. Podría ser objeto de posteriores estudios probar dosificaciones más altas de FCC cuando el porcentaje de cal es más alto ya que los valores de resistencia en este caso son incluso menores que en la dosificación con 5% de cal. Las conclusiones en función de dichos resultados muestran como la dosificación D4 es la que mejores resultados ha obtenido, al superar no solo la probeta de referencia, sino las que presentaban una mayor proporción de cal. Con este resultado se podría aproximar una primera aproximación de la proporción ideal de tierra/ cal/ FCC / agua.

### Mortero de cal



En este grupo de probetas se aprecia de forma clara como la adición de FCC supone un aumento de la resistencia del material respecto al de referencia.

Al igual que en casos anteriores, se puede apreciar como una mayor adición de FCC supone un aumento de la resistencia de estas proporciones en concreto. Así, la dosificación D12, presenta los mejores valores del grupo, presentándose a su vez como la más estable ante la exposición a la radiación UV.

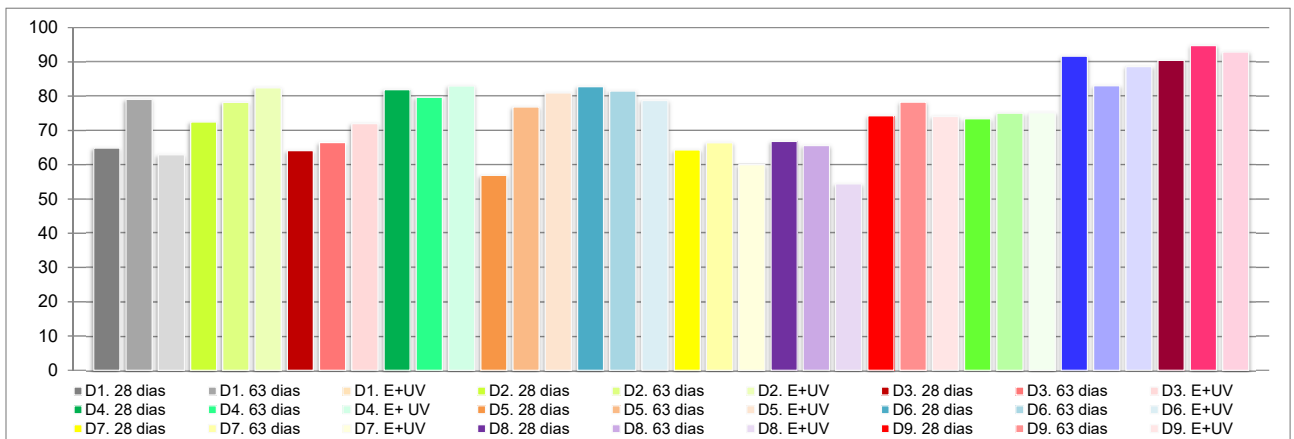
Se debe destacar además como las dosificaciones de ensayo presentan una mayor sensibilidad ante dicha radiación, mientras que la probeta de referencia se muestra más estable. Esta situación se aprecia en mayor medida en la dosificación D11, donde su resistencia se ve reducida a la mitad por dicha exposición, mostrándose como más sensible.

Pese a tratarse de cal hidráulica, cuyo contenido en cal libre es del 15%, la dosificación que ha presentado mejores resultados es la de la misma proporción. Ante esta situación cabría estudiar si, en el caso favorable, la totalidad del FCC o en su mayoría, reaccionó con el hidróxido de calcio.

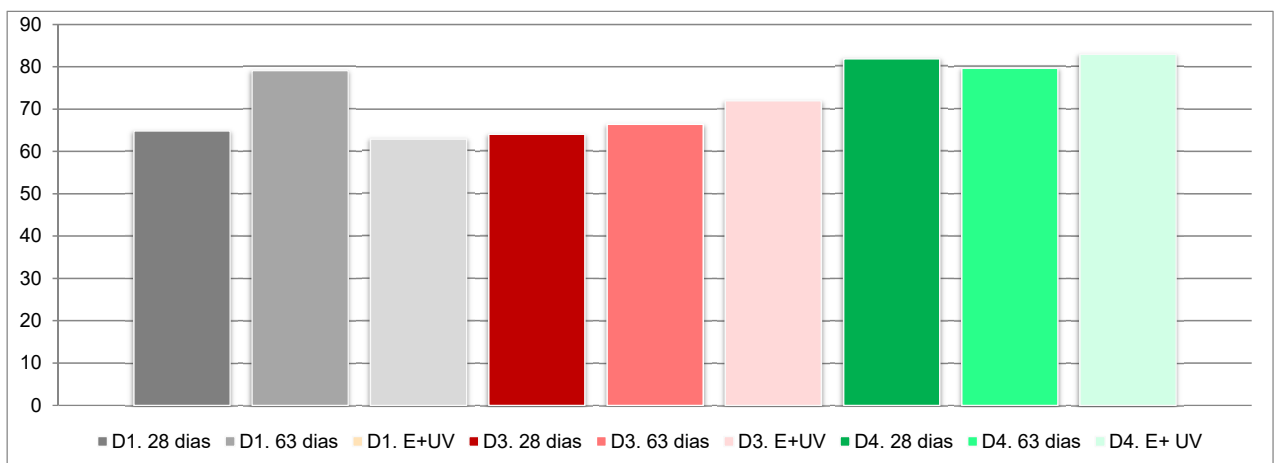
### c. Determinación dureza Shore C

Los resultados de este ensayo se expondrán comparando cada grupo de forma individual, expresando en cada grafico la evolución de la dureza superficial respecto al tiempo de curado.

En este primer grafico se puede observar como las dosificaciones que presentan una mayor dureza superficial se corresponden con los morteros de tierra estabilizada siendo las que presentan más dureza un mayor porcentaje de FCC, D4 y D6.



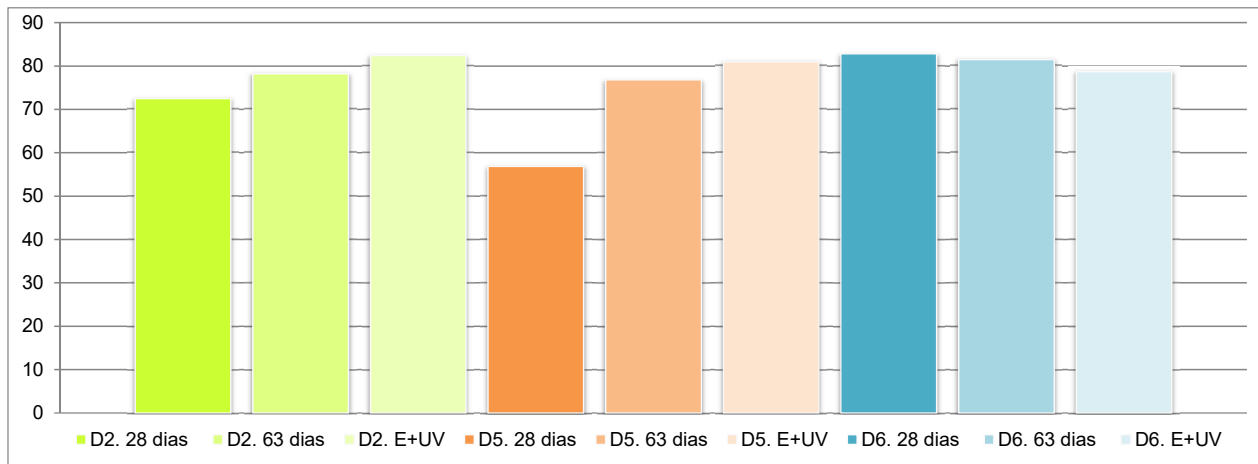
#### Mortero tierra estabilizada 5%



Dentro de esta comparación se puede apreciar como el mortero de tierra estabilizada con FCC al 10% presenta una mayor dureza superficial respecto a la probeta de referencia, desde una edad de curado más temprana. Esta dosificación de ensayo aumenta ligeramente su dureza superficial a mayor curado, incluso tras someterse a los ciclos de envejecimiento.

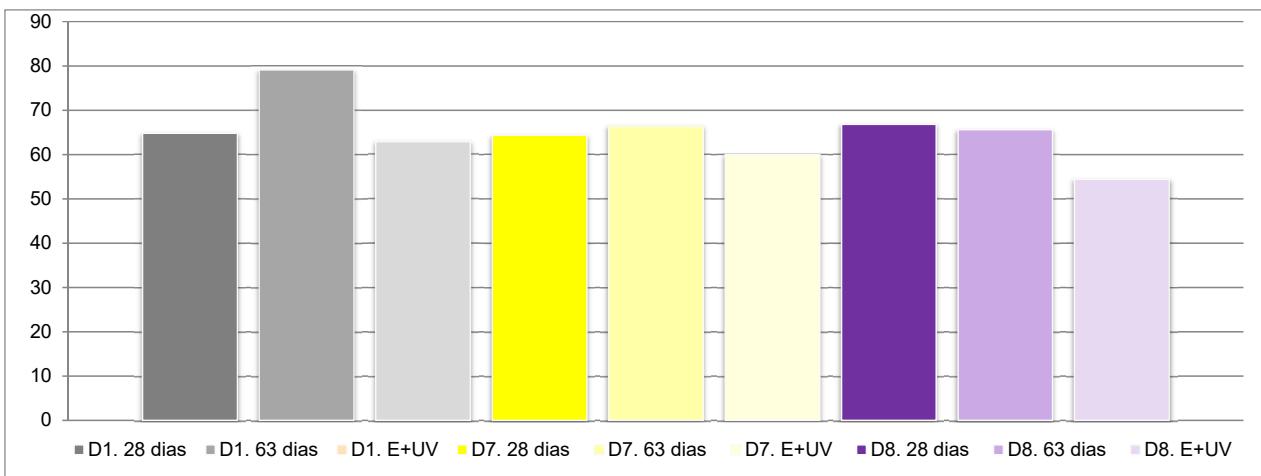
Respecto a la dosificación D3, se puede apreciar cómo ha adquirido resistencia en relación al tiempo de curado, apreciándose una situación muy similar en la D4. Por el contrario, la probeta de referencia se ha visto afectada por la exposición a las condiciones de envejecimiento, viéndose reducida su resistencia superficial.

**Mortero tierra estabilizada 10%**



Dentro de este grupo se puede observar como nuevamente las dosificaciones que presentan un mayor porcentaje de FCC, presentan la mayor resistencia del grupo. Estas dosificaciones –D6–, presenta una gran estabilidad en relación al tiempo de curado, presentando ya a edades tempranas gran resistencia superficial. Cabe destacar que ésta presenta una ligera reducción de la resistencia superficial tras someterse al ensayo de envejecimiento. Las probetas restantes presentan un aumento de resistencia a mayor tiempo de curado, siendo ambas muy similares.

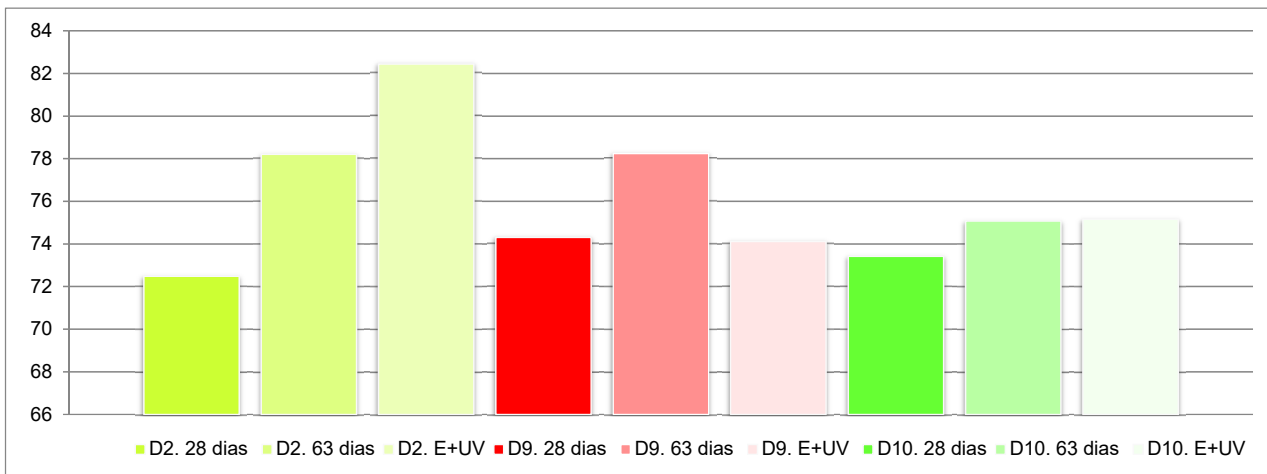
**Consolidante superficial sobre mortero 5%**



Se puede apreciar como los resultados obtenidos dentro de este grupo se muestran muy similares entre ellos. Esta situación puede deberse a que el ensayo de dureza superficial no sea el método de evaluación más propicio para determinar el aporte de resistencia del consolidante superficial. Esto se debe a que la profundidad de penetración es muy reducida, dando por ello un valor parecido al de la resistencia de la probeta usada como soporte.



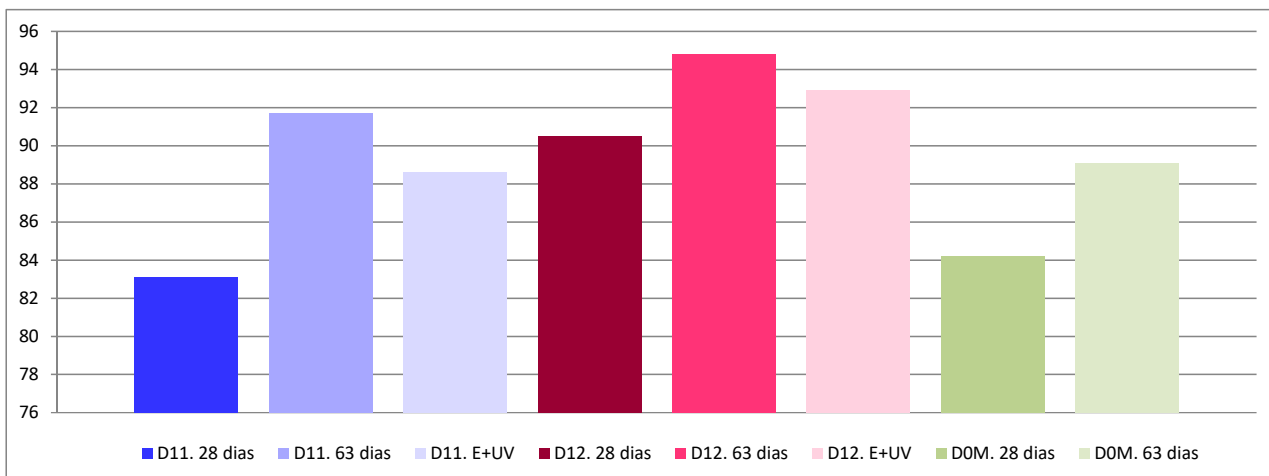
### Consolidante superficial sobre mortero 10%



Se puede apreciar como la preparación superficial ha supuesto un mayor daño en este grupo, ya que los valores de resistencia superficial de las probetas de ensayo se encuentran por debajo de la probeta de referencia, tratándose de la misma dosificación. Esta situación se debe al pre-acondicionamiento de las probetas donde se rebajó la cara más superficial con la finalidad de que adquiriera un carácter más disgregado, permitiendo apreciar el carácter consolidador del producto.

Pese a esta situación, se puede apreciar como a una edad de curado temprana las probetas de ensayo presentan una dureza ligeramente mayor que la probeta de referencia.

### Morteros de cal



Nuevamente se muestra un aumento de la resistencia superficial respecto al curado, aumentando esta a mayor edad. A su vez, se puede apreciar como la exposición a condiciones de envejecimiento y radiación han afectado a la estabilidad de las dosificaciones.

En esta representación se puede apreciar como la influencia de FCC en masa proporciona mayor resistencia respecto a las dosificaciones de referencia, mostrándose por ello la D12 como la más resistente.

Tras la realización de dicho ensayo, se aprecia que se trataba de un examen sujeto a muchos factores que pueden producir errores por lo que los resultados ofrecidos quizás no sean definitivos dado el escaso número de probetas sobre los que se realizó dicho ensayo. Se podría plantear un ensayo más detallado en un futuro, con una mayor cantidad de probetas de cada tipo.

#### d. Ensayo de erosión acelerada de Swinburne (SAET)

Según la norma tomada como referencia los resultados se clasificarán como aptos y no aptos. Así, se medirá la profundidad de la huella con pie de rey, clasificando como aptos los resultados que presenten entre 0 y 10 mm y no apto cuando superen los 10mm.

TRATAMIENTO	GRUPO	PROBETAS	DIMENSIONES	HUELLA
MORTERO TIERRA ESTABILIZADA (MTE)	Mortero tierra estabilizada 5%	D1	1.6 cm x 1.2 cm	2 mm
		D3	0.7 cm x 0.5 cm	
		D4	-	-
	Mortero tierra estabilizada 10%	D2	-	-
		D5	-	-
		D6	-	-
CONSOLIDANTE SUPERFICIAL (CS)	Consolidante sobre mortero 5%	D1	1.6 cm x 1.2 cm	2 mm
		D7	1.9 cm x 1.3 cm	3mm
		D8	2.3 cm x 1.1 cm	4 mm
	Consolidante sobre mortero 10%	D2	-	-
		D9	Ligeramente lavada	Ligeramente lavada
		D10	Ligeramente lavada	Ligeramente lavada
MORTERO CAL	Mortero cal	D0M	-	-
		D11	-	-
		D12	Ligeramente lavada	Ligeramente lavada

- MT5%. Se puede observar como una mayor proporción de FCC aumenta la resistencia a la abrasión hidráulica acelerada, reduciendo por ello la dimensión de la huella.

- MT10%. Se puede apreciar como la incidencia del caudal de agua no ha supuesto sobre este grupo ningún daño, mostrándose por ello estable ante la acción mecánica del agua.

- CS5%. La erosión sobre este grupo puede deberse a la fragilidad de la argamasa, la cual solo presentaba un 5% de cal. Esta situación pudo verse agravada por el rebaje superficial realizado sobre todo el grupo correspondiente con la aplicación superficial. El mayor daño sobre la probeta que presentaba un mayor porcentaje de FCC en superficie puede deberse a una debilidad en la masa tal como oquedades en superficie. Los resultados obtenidos en este grupo deben tomarse como erróneos, y por ello quedan pendientes de un estudio posterior.

- CS10%. La erosión hidráulica superficial sobre este grupo ha presentado buenos resultados al mostrarse resistente ante dicha incidencia. Se puede apreciar como de forma clara, el consolidante superficial ha sufrido un ligero lavado, pero no ha supuesto una pérdida de masa en la probeta.

- Mortero de cal. dentro de este grupo la erosión hidráulica no ha supuesto modificaciones, considerándose por ello estable ante la acción mecánica del agua.

- Así el aumento de resistencia se mantiene con un mayor porcentaje (0.33:1 respecto 1:1 y 0.66:1

**Evolución respecto a curado**

MORTERO TIERRA 5%		D1		D3		D4	
		DIMENSIÓN	HUELLA	DIMENSIÓN	HUELLA	DIMENSIÓN	HUELLA
	28 días	3.9 cm x 3.8 cm	3 mm	-	-	-	-
63 días	1.6 cm x 1.2 cm	2 mm	0.7 cm x 0.5 cm	< 1mm	-	-	
E+UV	1.3 cm x 1cm	1.5 mm	0.9cm x 0.7 cm	1.5 mm	-	-	

- Se puede apreciar como los ciclos de envejecimiento han afectado ligeramente a la resistencia de la dosificación D3, agravándose ligeramente esta situación por la incidencia de radiación ultravioleta.
- Se puede apreciar como sobre la probeta de referencia el curado ha proporcionado propiedades más resistentes, aumentando incluso de forma posterior a los ciclos de envejecimiento.

MORTERO TIERRA 10%		D2		D5		D6	
		DIMENSIÓN	HUELLA	DIMENSIÓN	HUELLA	DIMENSIÓN	HUELLA
	28 días	-	-	2.3 cm x 1.2 cm	1mm	-	-
63 días	-	-	-	-	-	-	
E+UV	-	-	1.6 cm x 1.4 cm	2 mm	-	-	

- Se puede apreciar como la probeta más sensible a la erosión hidráulica es la dosificación D5. Esta presenta poca resistencia a edades tempranas, adquiriendo mayores propiedades a 63 días.
- Se puede apreciar a su vez, como los ciclos de envejecimiento han afectado a la estabilidad de la masa, provocando un daño mayor respecto a la edad de curado más corta

CONSOLIDANTE SOBRE MORTERO 5%		D1		D7		D8	
		DIMENSIÓN	HUELLA	DIMENSIÓN	HUELLA	DIMENSIÓN	HUELLA
	28 días	3.9 cm x 3.8 cm	3 mm	3.6 cm x 3.3 cm	7mm	4.4 cm x 3 cm	5mm
63 días	1.6 cm x 1.2 cm	2 mm	1.9 cm x 1.3 cm	3mm	2.3 cm x 1.1 cm	4 mm	
E+UV	1.3 cm x 1cm	1.5 mm	2.3 cm x 1.6 cm	8 mm	1.2 cm x 1.8 cm	2.5mm	

- D7. Se puede apreciar como de forma clara, la dosificación ha ido ganando resistencia a la erosión hidráulica con un mayor tiempo de curado. Pese a esta situación, la dosificación ha perdido resistencia debido a la exposición a las condiciones de envejecimiento. Esta situación puede deberse a la presencia de defectos en la masa tales como oquedades o debido al rebaje material realizado de forma superficial.
- D8. De nuevo, se puede apreciar como un mayor tiempo de curado proporciona a las dosificaciones propiedades resistentes a la erosión hidráulica. Por el contrario al caso anterior, la exposición a los ciclos de envejecimiento no han afectado a la capacidad resistente de la probeta, apreciándose como en este caso concreto, la dosificación muestra una resistencia mayor. Esto hace suponer que el consolidante superficial al 50% sobre un mortero de tierra-cal al 5% aporta una ligera resistencia superficial. Esto

se puede suponer pues todo el grupo de probetas sometidas a este tratamiento han sido rebajadas, debilitando por ello la superficie.

CONSOLIDANTE SOBRE MORTERO 10%		D2		D9		D10	
		DIMENSIÓN	HUELLA	DIMENSIÓN	HUELLA	DIMENSIÓN	HUELLA
28 días	-	-	-	Ligeramente lavada	Ligeramente lavada	-	-
63 días	-	-	-	Ligeramente lavada	Ligeramente lavada	Ligeramente lavada	Ligeramente lavada
E+UV	-	-	-	Ligeramente lavada	Ligeramente lavada	Ligeramente lavada	Ligeramente lavada

- Dentro de este grupo no existen daños ocasionados por la incidencia del caudal de agua. Si se comparan ambos productos consolidantes se puede apreciar como el consolidante que presenta un 50% de FCC es más resistente que el que presenta un menor porcentaje. Esto se puede apreciar en las probetas D9, donde se aprecia como el producto ha sido lavado ligeramente, mientras que en las D10 no ha sufrido apenas cambios.

MORTERO CAL		D0M		D11		D12	
		DIMENSION	HUELLA	DIMENSION	HUELLA	DIMENSION	HUELLA
28 días	-	-	-	-	-	-	-
63 días	-	-	-	-	-	Ligeramente lavada	Ligeramente lavada
E+UV	-	-	-	-	-	-	-

102



Comparación visual de la evolución de dureza superficial respecto al tiempo de curado 28 días , 63 días y Envejecimiento (+UV) respectivamente

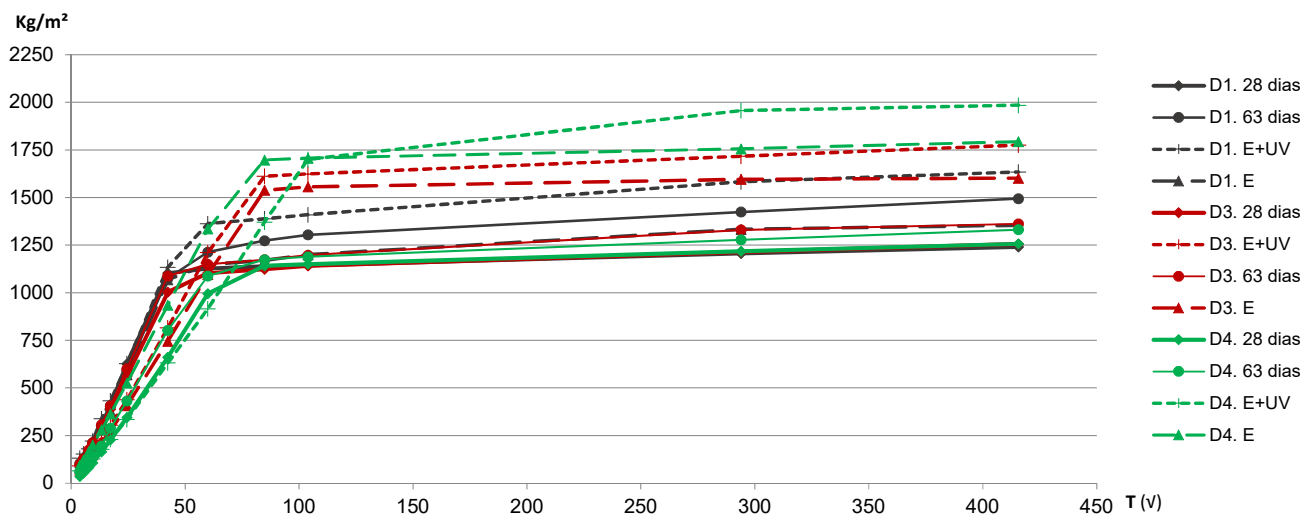
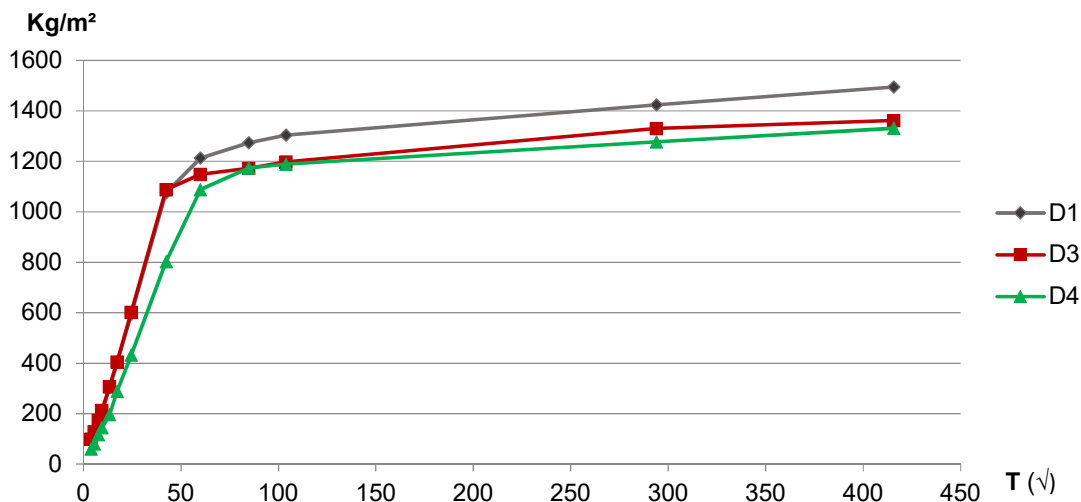
### f. Ensayo de determinación de absorción de agua por capilaridad

Los resultados del ensayo se expresan en relación a la norma tomada para la realización del ensayo. Así en las graficas facilitadas se indica la cantidad de agua absorbida por capilaridad, por unidad de superficie, en función de la raíz cuadrada del tiempo.

La metodología de exposición de los resultados se realizara siguiendo la pauta comentada, exponiendo en un primer momento los datos a 63 días de curado y posteriormente la evolución de cada grupo en función del tiempo de curado.

#### MORTERO TIERRA ESTABILIZADA

##### Grupo mortero 5%



En la representación aportada se muestra como las tres dosificaciones presentan una absorción capilar similar, tendiendo a absorber de forma más lenta a partir de la hora de ensayo. Además se puede destacar como las dosificaciones D1 y D3 presentan una capacidad de absorción de agua por capilaridad inicial mayor respecto a la probeta D4. Esta última presenta además un poder de captación de agua menor respecto a las comparadas. Esta situación supone que la dosificación D4 presenta mayor resistencia a la ascensión capilar en el tiempo al permitir una menor absorción de agua por capilaridad.

#### Evolución respecto al tiempo de curado

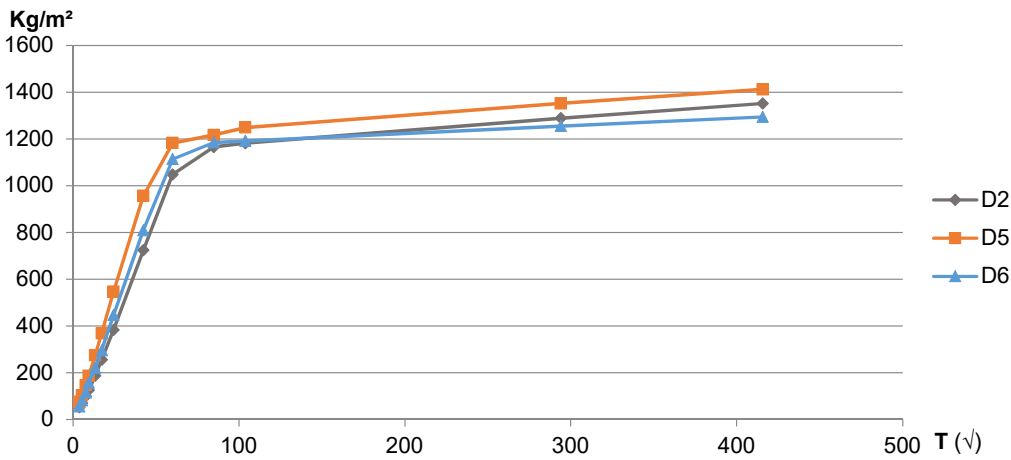
Respecto a la evolución de las probetas no tratadas, se aprecia como el aumento de la edad de curado proporciona mayor resistencia inicial ante la absorción de agua capilar. El bajo porcentaje de captación que presentan las probetas de 28 días se puede relacionar con su temprana edad, donde posiblemente aun presente humedad

retenida en el interior de los poros, derivada del proceso de producción.

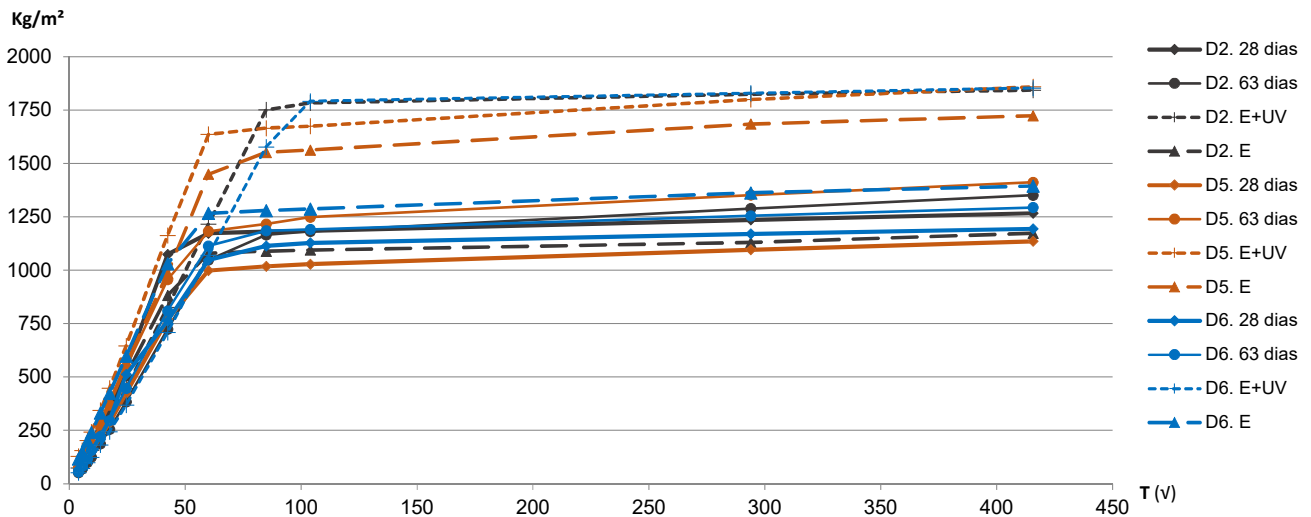
En relación a las probetas envejecidas, se puede determinar como de forma general el ensayo –de envejecimiento– empeora las propiedades resistentes a la absorción de agua por capilaridad. Así, pese a absorber de una forma más lenta durante el inicio del ensayo, las probetas expuestas tienden a aumentar su capacidad de absorción capilar, captando mayor cantidad de agua. A su vez se puede apreciar cómo la exposición ante estas condiciones de temperatura y humedad afecta de forma más significativa a las dosificaciones que presentan la adición de FCC en masa, empeorando por ello su resistencia ante la ascensión capilar. Esta situación se ve agravada por la incidencia de radiación ultravioleta, resultando en un aumento de la capacidad de absorción capilar durante el ensayo.

Respecto a estas conclusiones, se puede destacar la dosificación D3 como la que presenta una mayor resistencia a la absorción capilar.

**Grupo mortero 10%**



104



Tras la evaluación de los morteros basados en el 10% de cal, se puede apreciar como las dosificaciones de ensayo presentan una curva de absorción similar en relación a la probeta de referencia. Se puede apreciar además, como esta última presenta una ligera resistencia mayor a la ascensión capilar, al absorber de una forma más lenta.

Ante esta situación se puede concluir que la adición de FCC sobre morteros que presentan un 10% de cal, aumenta ligeramente la capacidad de absorción capilar del material, tendiendo a absorber una mayor cantidad de agua.

**Evolución respecto al curado**

En relación a la evolución en edades tempranas, las dosificaciones D5 y D6, presentan una mayor resistencia a la absorción capilar respecto a las de 63 días. Esta diferencia se puede atribuir a la presencia de humedad retenida en los poros interiores, al igual que en el caso anterior. En relación a estas, se aprecia como un mayor tiempo de curado aumenta

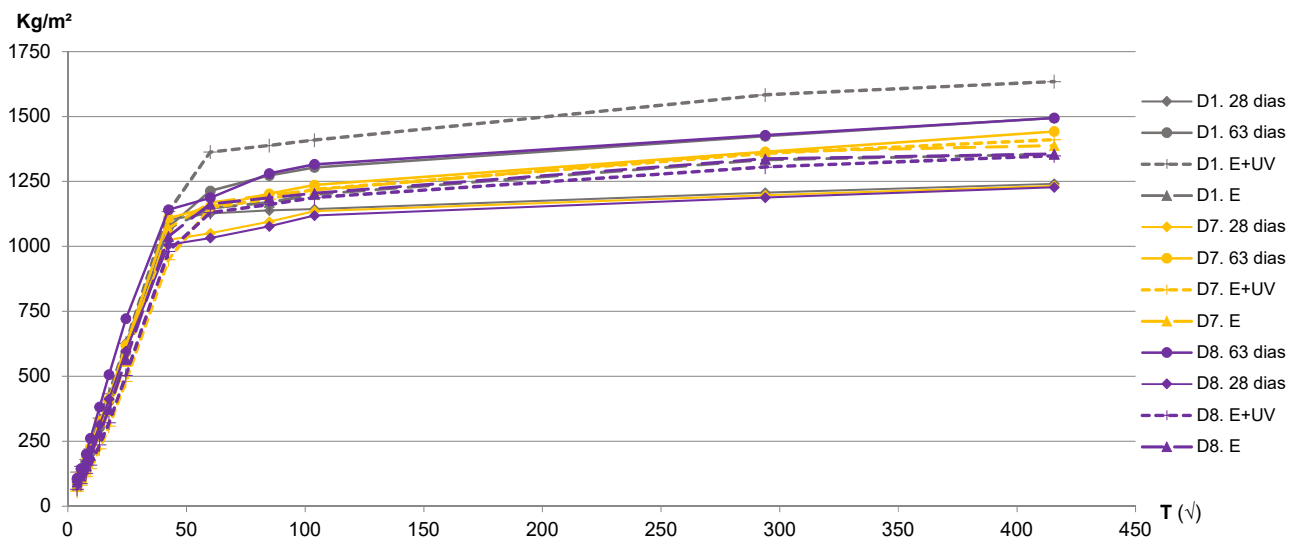
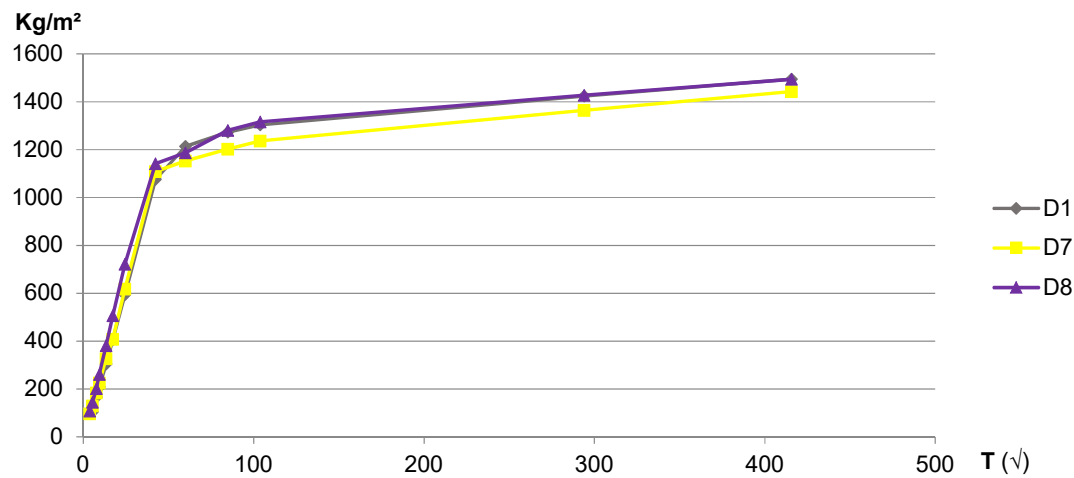
la capacidad de absorción capilar del material, resultando en una pérdida de propiedades respecto a la probeta de referencia.

A su vez, y en relación a las probetas sometidas a ensayo de envejecimiento, se puede apreciar una reducción de las propiedades resistentes ante la acción capilar. Al igual que la evaluación anterior, se aprecia como la exposición a la radiación ultravioleta afecta en mayor medida a dichas propiedades, provocando un aumento de la capacidad de absorción de agua por capilaridad en la totalidad de morteros, resultando por ello en una pérdida mayor de resistencia. Puede destacarse nuevamente que la exposición a condiciones de contraste afecta en mayor medida a las dosificaciones que presentan un porcentaje de FCC mayor.

La velocidad de absorción capilar es muy similar en esta familia, por lo que no destaca una dosificación que presente mejores propiedades resistentes a la acción capilar.

### CONSOLIDANTE SUPERFICIAL

#### Consolidante sobre mortero 5%



Como se puede apreciar en el gráfico, la absorción de este grupo de probetas es muy similar. Respecto a las probetas de ensayo, la dosificación D7 presenta la velocidad de absorción capilar más lenta dentro del grupo, suponiéndola como la que presenta mayor resistencia a la ascensión de agua capilar.

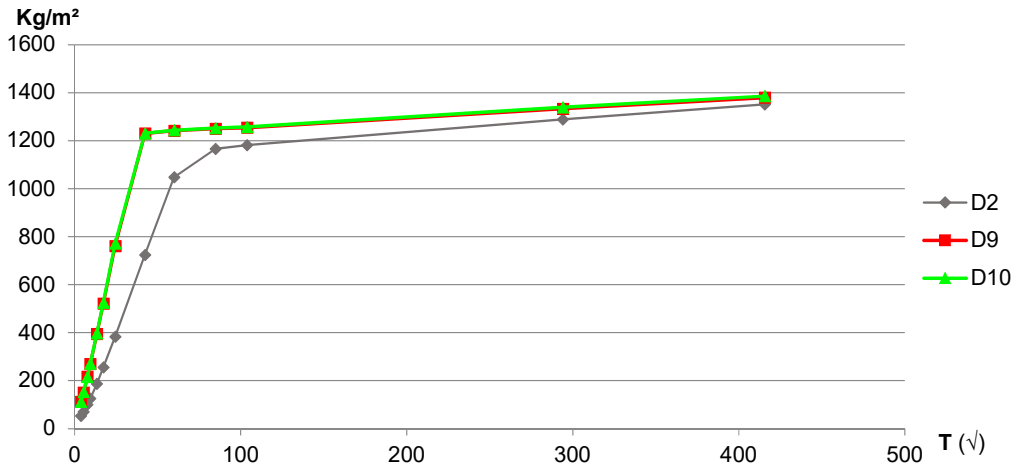
#### Evolución respecto al curado

En base a esta representación se puede concluir como el consolidante superficial presenta unas propiedades más estables con el tiempo en comparación con la evolución de la probeta de referencia. Respecto a esta, se debe destacar como la incidencia de radiación ultravioleta durante el ensayo de envejecimiento, ha reducido significativamente su resistencia a la absorción capilar.

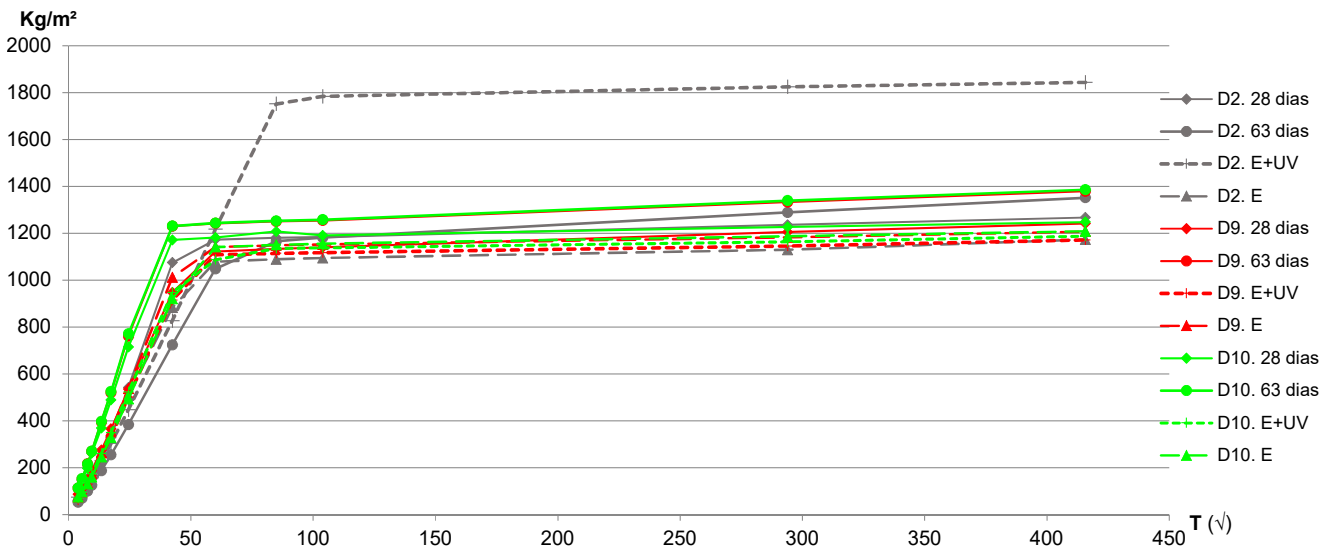
En comparación, las probetas de ensayo han presentando un comportamiento más estable ante la exposición a las mismas condiciones, aumentando incluso su resistencia a la absorción de agua por capilaridad respecto a las de 28 días de edad. Además de no presentar una reducción de sus propiedades, estas se presentan como más estables con el tiempo, al mantener su capacidad de absorción capilar constante.

Respecto a la dosificación que ha presentado mejores resultados, destaca la probeta D8 en base al aumento de sus propiedades resistentes respecto al tiempo de curado, manteniéndose estas constantes pese a la acción de la radiación.

**Consolidante sobre mortero 10%**



106



En esta representación existe una clara similitud entre ambas probetas de ensayo, las cuales tienden a absorber capilarmente de una forma más rápida que la probeta de referencia, presentando por ello una resistencia menor ante la ascensión capilar. Esta situación puede responder al proceso de rebaje superficial, realizado sobre el grupo de probetas correspondientes a la aplicación superficial. En este caso en concreto puede haberse incidido con mayor insistencia, dando por ello un error en el resultado.

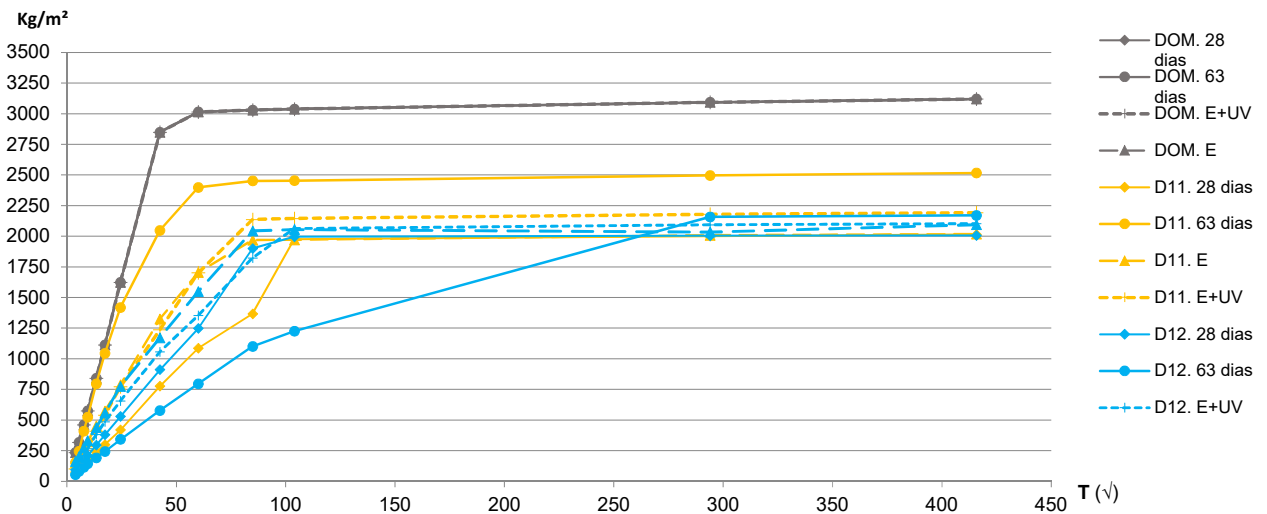
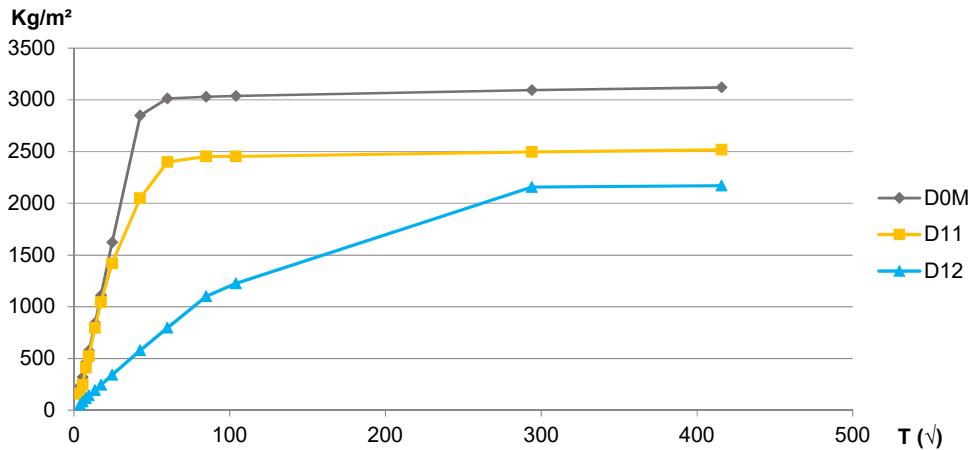
**Evolución respecto al curado**

Con respecto a su evolución, se puede apreciar como a mayor edad de curado, las propiedades de resistencia a la ascensión capilar aumentan levemente, tendiendo a captar agua de una forma ligeramente más lenta.

De nuevo se aprecia como el tratamiento superficial se presenta estable ante los ciclos de envejecimiento y la exposición a la radiación, mientras que la probeta de referencia pierde resistencia ante la ascensión capilar, tendiendo a absorber de forma capilar mayor cantidad de agua, viéndose agravada esta situación por la incidencia de radiación



## MORTERO DE INYECCION



En base a la representación aportada, se puede determinar como el mortero que presenta una mayor adición de FCC es más resistente a la ascensión por capilaridad. Esta situación se da tanto en comparación con la probeta que presenta un menor porcentaje de FCC como con la probeta de referencia.

A su vez, se puede apreciar como esta adición aumenta la resistencia a la absorción de agua por capilaridad, ya que la probeta de referencia capta agua capilarmente de una forma más rápida. Así, se puede determinar como la proporción de FCC influye en la capacidad de absorción por capilaridad, presentando una mayor resistencia ante la absorción capilar cuanto mayor proporción presenta.

### Evolución respecto al curado

De forma general se puede concluir como la exposición a los ciclos de envejecimiento, tanto con como sin radiación, no suponen variaciones sobre la probeta de referencia, la cual no presenta adición de FCC.

Respecto a las probetas de ensayo, se puede observar como a una edad de curado temprana ambas presentan un comportamiento similar, siendo la D11, la que presenta una mayor resistencia a la ascensión capilar. Con un tiempo de curado mayor, su comportamiento varía tal y como se ha expuesto en el punto anterior.

El ensayo de envejecimiento supone en el caso de la probeta D11- menor proporción- un aumento de la capacidad resistente a la acción capilar. A su vez la exposición a la radiación no supone grandes cambios sobre su comportamiento, manteniéndose más o menos constante.

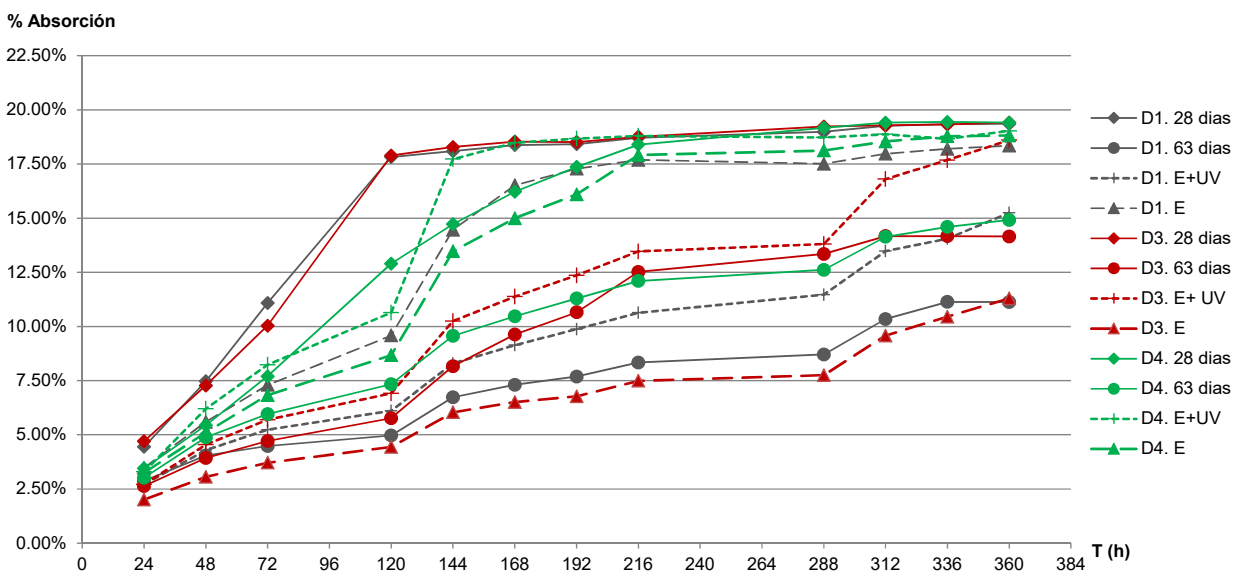
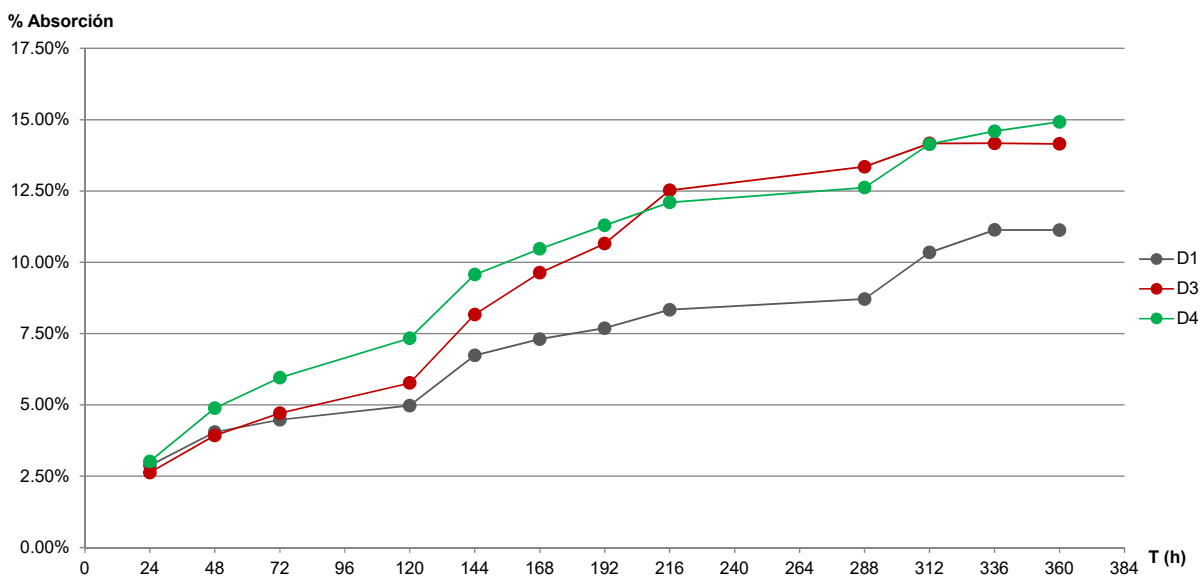
Por el contrario, la exposición a las mismas condiciones supone para la probeta con mayor porcentaje de FCC, una reducción de la resistencia a la ascensión que presentaba de forma previa al ensayo. A pesar de ello, la exposición a UV no supone modificaciones en las propiedades de absorción capilar, manteniéndose constantes. A pesar de esta pérdida de propiedades respecto a la no sometida a ensayo, la dosificación D12 se puede considerar como la que presenta mejores propiedades resistentes ante la ascensión capilar.

### g. Ensayo de determinación de la permeabilidad al vapor de agua

Como se ha expuesto con anterioridad, para la realización de este ensayo, no se ha podido seguir una pauta marcada por la norma, a causa de la carencia de medios para su realización. Con el objetivo de determinar el comportamiento del material ante la presencia de humedad, la metodología propuesta trató de determinar el porcentaje de absorción de cada material, con el fin de estimar la velocidad de captación de vapor de agua de cada uno de ellos. Además, el ensayo trató de determinar la ganancia de peso respecto a su volumen, intentando aportar información acerca de la densidad aparente de cada una de ellas, ya que al tratarse de un material sensible al agua, no se pudo determinar de otro modo.

En las graficas aportadas, se representara el porcentaje de ganancia de humedad en relación con el tiempo de ensayo, donde cada medición corresponde con 24h. Los resultados se expondrán según se ha comentado anteriormente. En un principio, se analizarán los resultados correspondientes a 63 días de curado, y posteriormente se evaluará su comportamiento en función de la edad de curado.

#### MORTERO TIERRA ESTABILIZADA 5%



Esta comparación permite determinar como la presencia de FCC en masa aumenta la capacidad de captación de vapor de agua por parte del material. Esta situación se puede apreciar debido a la diferencia entre las curvas de las probetas de ensayo –D3 y D4- respecto a la probeta de referencia –D1-, siendo esta última la que presenta unas propiedades más impermeables.

### Evolución respecto al tiempo de curado

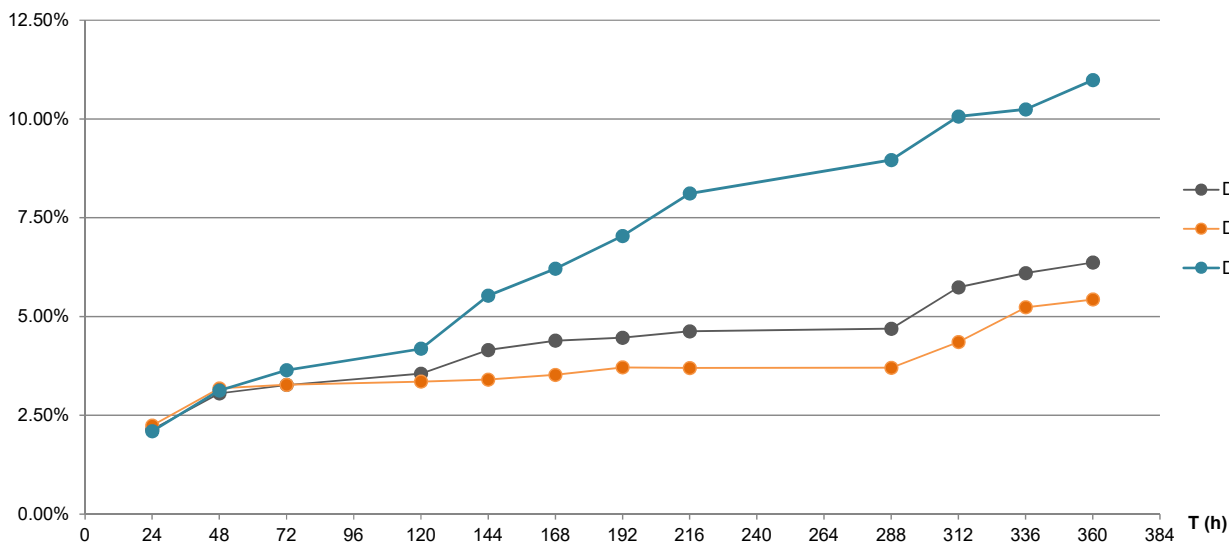
En esta representación grafica se puede apreciar como a una temprana edad de curado, las probetas captan un mayor porcentaje de vapor de agua en un menor tiempo. Entre ellas, la que presenta un porcentaje de FCC mayor, D4, presenta mayor resistencia inicial al vapor de agua.

Un mayor tiempo de curado supone una mayor estabilidad ante la presencia de humedad, pudiendo apreciarse en un aumento del grado de impermeabilización respecto a las comentadas anteriormente. A pesar de este comportamiento, las dosificaciones que presentan FCC en masa tienden a captar un mayor grado de vapor de agua respecto a la probeta de referencia, siendo esta situación la descrita en el caso anterior.

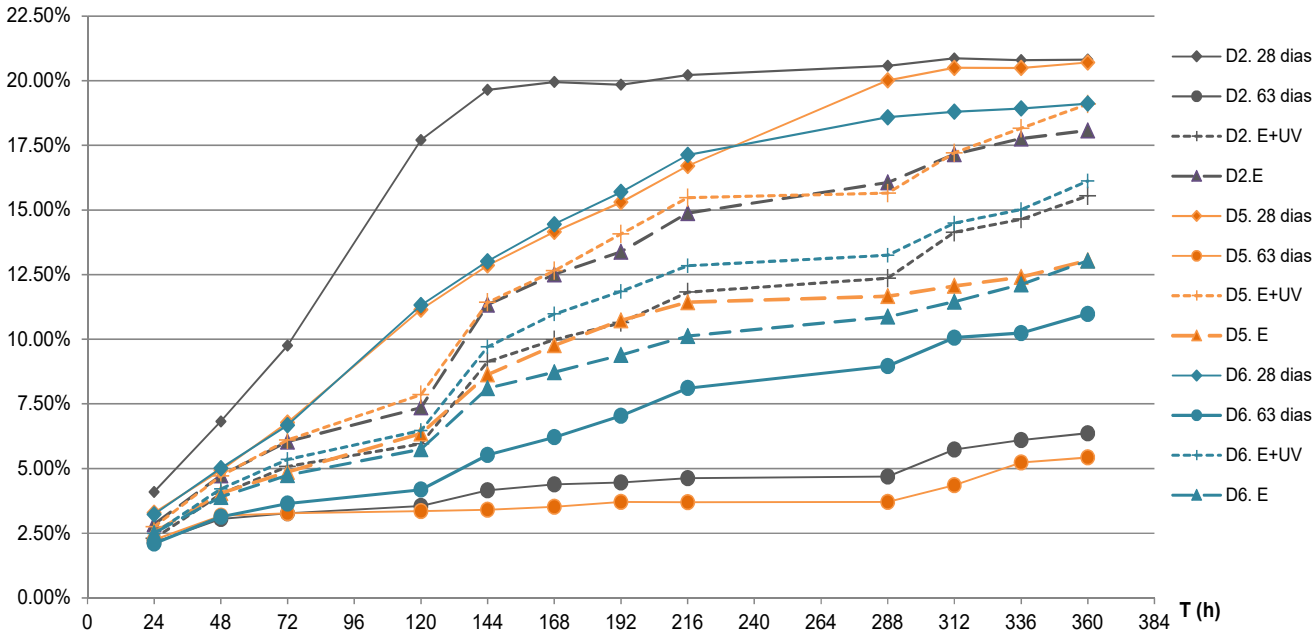
Respecto a las probetas envejecidas, se puede determinar como la exposición a condiciones aceleradas de temperatura y humedad, además de la indecencia de radiación reducen la resistencia de captación de vapor, presentando por ello un carácter más permeable. Esta situación se ve agravada en las dosificaciones que presentan un mayor porcentaje de FCC –D4-, mientras que las que presentan un 5% se presentan más estables ante dichas condiciones climáticas.

### MORTERO TIERRA ESTABILIZADA 10%

% Absorción



% Absorción



En esta representación se puede apreciar una similitud entre la probeta de referencia y la D5, que presenta un porcentaje del 5% de FCC, siendo la que presenta mayor resistencia a la penetración de vapor de agua del grupo.

Respecto a la dosificación que presenta mayor porcentaje de FCC, su comportamiento ante la saturación de vapor es poco resistente, captando un mayor porcentaje de una forma más rápida. Dicho resultado debe considerarse como anómalo, por lo que con el fin de poder comparar los resultados, debería ser objeto de un estudio posterior. Con el fin de aclarar esta situación, se debe comprobar la densidad aparente de la probeta. Dicho resultado se relaciona con una mayor densidad aparente y por ello un menor volumen de captación de agua. Esta situación impide que el resultado pueda compararse.

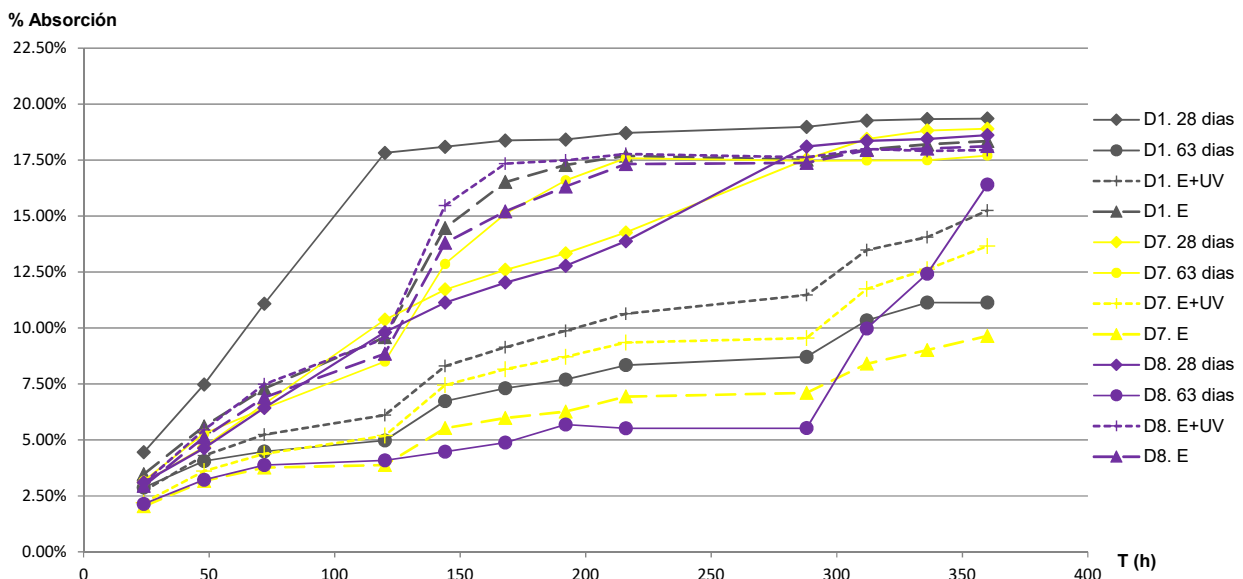
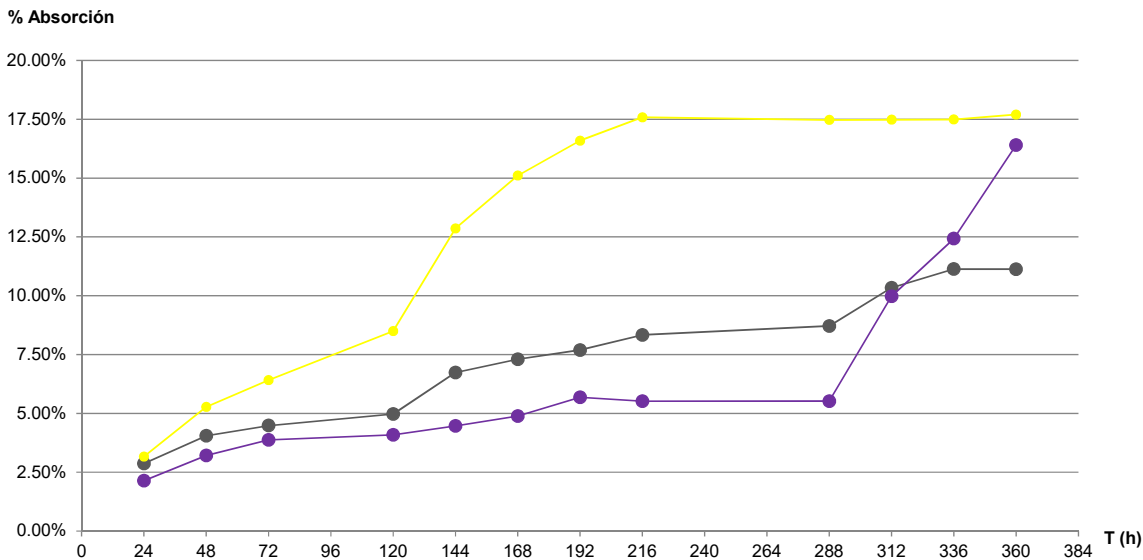
### Evolución respecto al tiempo de curado

Al igual que en la evolución del grupo anterior, se puede apreciar como a cortas edades de curado, el mortero de tierra estabilizada presenta un comportamiento poco resistente ante la captación de vapor de agua.

Con un tiempo de curado mayor, dicha resistencia aumenta mostrando características más impermeables por parte del material.

En relación a las probetas sometidas a envejecimiento, se puede apreciar un aumento del porcentaje de absorción del material, mostrando nuevamente un carácter más permeable a la presencia de la humedad. Dichas dosificaciones de ensayo presentan un comportamiento muy similar. La resistencia a la permeabilidad se ve reducida en mayor medida en las dosificaciones expuestas a radiación, siendo en este caso más estable la dosificación que presenta mayor proporción de FCC.

### CONSOLIDANTE SOBRE MORTERO 5%



Se puede apreciar como de forma clara, la dosificación que presenta mayor resistencia a la captación de humedad es la dosificación D8 –consolidante superficial Nanocal-FCC 50%- . Esta, presenta la mayor resistencia de las probetas del mismo grupo durante los primeros 9 días de ensayo, siendo a partir de este periodo, cuando tiende a alcanzar su saturación. Se puede apreciar como dicha dosificación presenta incluso más resistencia inicial que la probeta de referencia.

Por el contrario la dosificación que presenta un menor porcentaje de FCC, presenta apenas resistencia. Esta situación puede responder a la preparación previa de las probetas destinadas a la aplicación de consolidante superficial, las cuales se rallaron superficialmente con el fin de disgregar la superficie. Esta acción abrió los poros en superficie, permitiendo una entrada de vapor de agua más rápida.

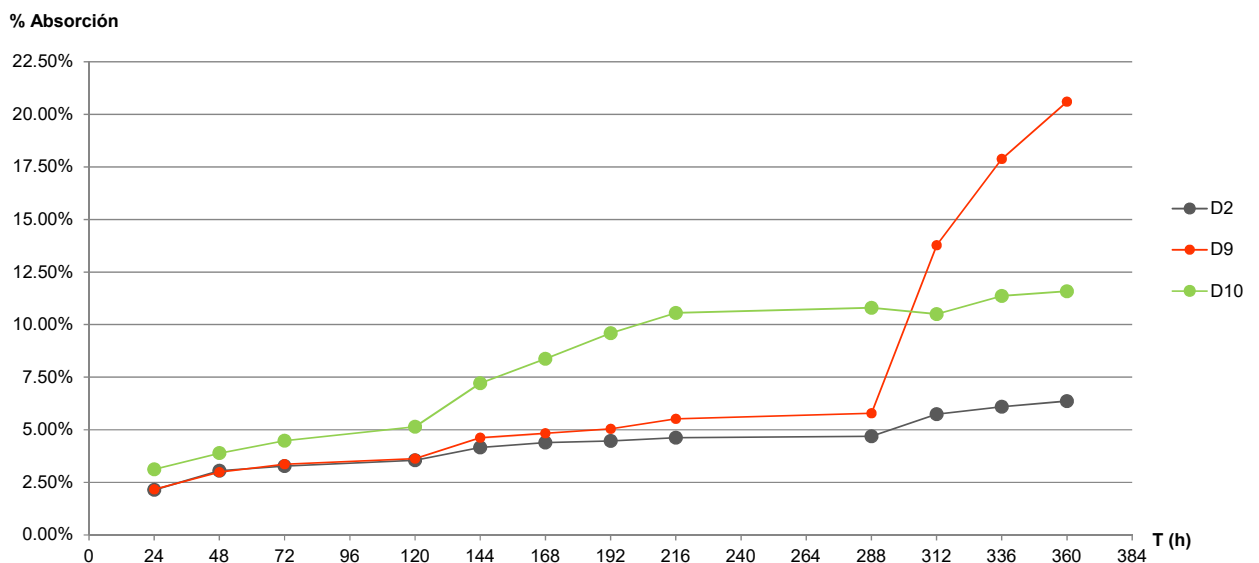
**Evolución respecto al tiempo de curado**

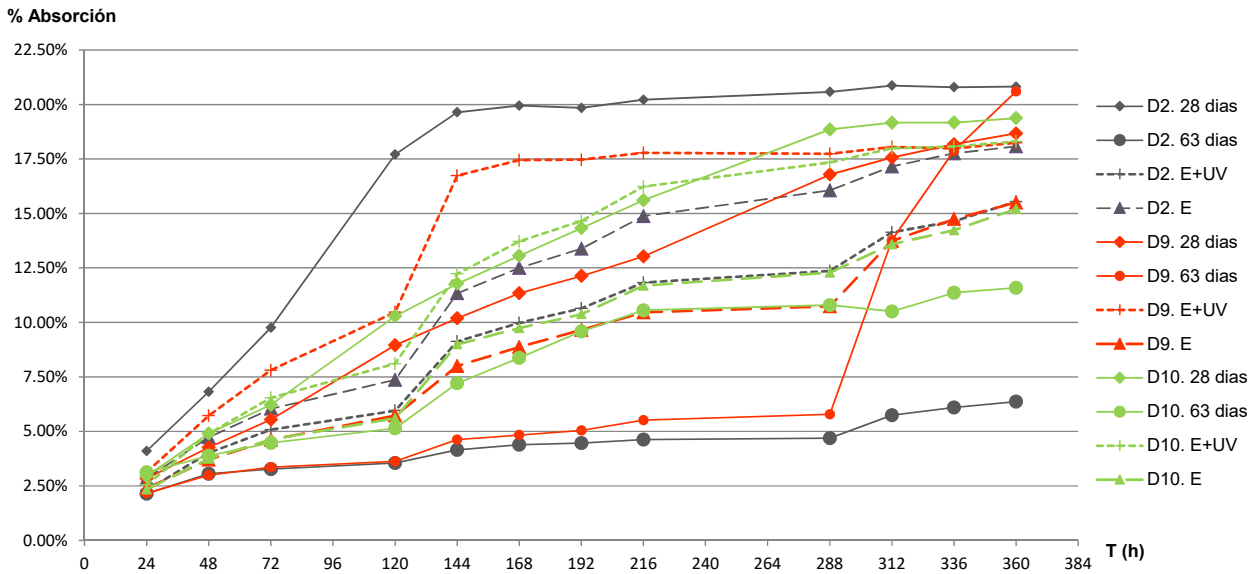
Confirmando la situación que se viene exponiendo hasta el momento, se puede determinar que las probetas de una edad de curado menor, presentan peores propiedades ante la presencia de humedad, presentando un carácter permeable. De la misma forma, una mayor edad de curado supone un aumento de dicha resistencia, adquiriendo un carácter más impermeable. Como se ha expuesto, la dosificación que presenta un comportamiento más estable y por ello mayores propiedades impermeables es la D8, a una edad de 63 días. Esta característica no dista de las propiedades que presenta la probeta de referencia por lo que su uso no supondría problemas relacionados con la creación de barreras.

De nuevo, la exposición a condiciones de envejecimiento acelerado, supone una pérdida de las propiedades resistentes al vapor de agua, afectando en mayor medida a las dosificaciones que presentan mayor porcentaje FCC de forma superficial.

Por el contrario, las dosificaciones que presentan un porcentaje menor de FCC -D7-, muestran unas propiedades más estables ante los efectos del envejecimiento, tanto con radiación como en ausencia de esta. Así, se podrían presentar como las más estables del grupo, comparándose en propiedades con la probeta de referencia D1 a 63 días.

**CONSOLIDANTE SOBRE MORTERO 10%**





Al contrario que en el caso anterior, se puede afirmar que la dosificación que presenta mejores propiedades ante la captación de vapor de agua es la que presenta menor porcentaje de FCC de forma superficial –D9-. Esta, presenta durante los primeros 9 días una resistencia muy similar a la probeta de referencia, pese a que esta última no sufrió un rayado superficial. A pesar de estas buenas propiedades, pasados los primeros 9 días, la probeta alcanza de forma rápida la saturación.

Respecto a la probeta con mayor porcentaje de FCC, se muestra como más sensible a la humedad, tendiendo a captarla de forma rápida desde el inicio del ensayo.

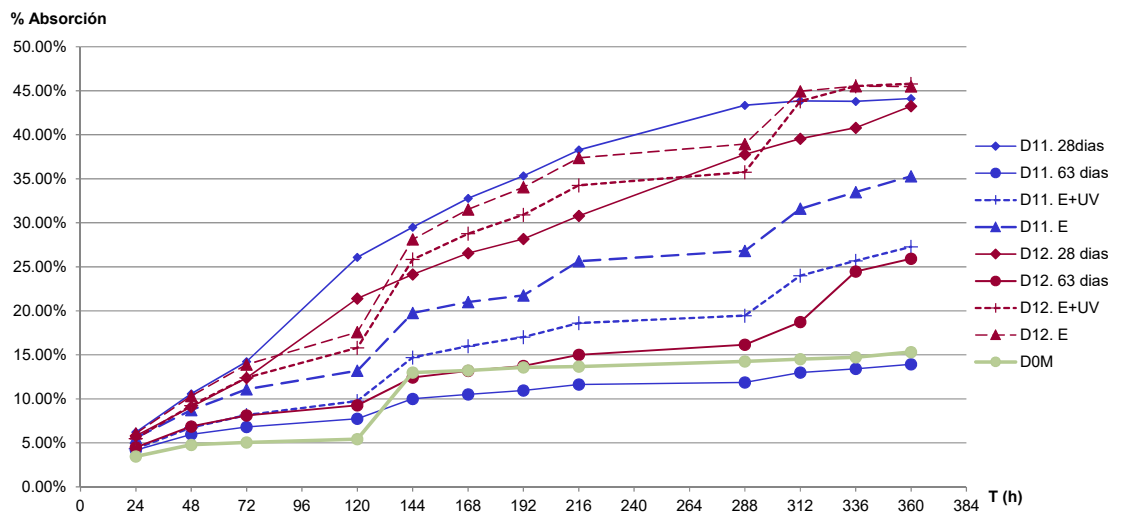
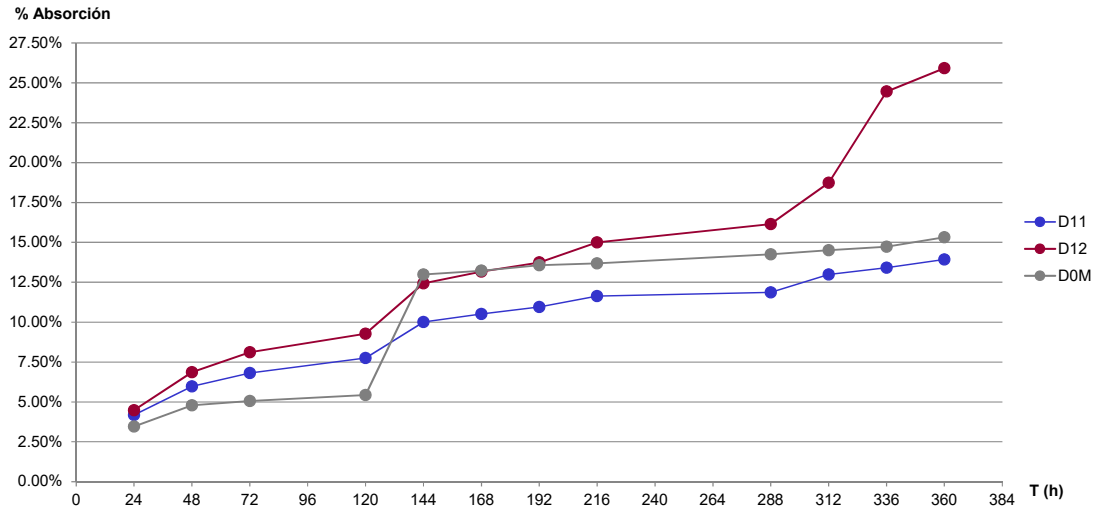
### Evolución respecto al tiempo de curado

En relación a la evolución del consolidante superficial sobre un mortero de tierra cal al 10%, se puede apreciar como a una edad de curado temprana, ambas probetas de ensayo presentan mayor resistencia a la presencia de humedad, comportándose de una forma más estable respecto a la tomada como referencia. Con un mayor tiempo de curado, la situación varía, apreciándose como la probeta de referencia y D9 comparten unas características similares durante los primeros 9 días de ensayo.

En relación a las probetas sometidas a ciclos de envejecimiento acelerado, se puede apreciar como dichas condiciones reducen las propiedades resistentes del mortero de forma general. Las probetas de ensayo sometidas a dichas condiciones presentan mayor estabilidad que la dosificación de referencia, siendo ligeramente más resistentes a la penetración de vapor de agua. Esta situación difiere ligeramente respecto a las expuestas a radiación ultravioleta, presentándose en este caso como más inestables. Este último caso, la probeta que presentaba consolidante superficial menor proporción de FCC en el consolidante, redujo sus propiedades resistentes, adquiriendo mayor permeabilidad al vapor de agua.

### MORTERO CAL

## MORTERO CAL



Respecto a los morteros de cal, se puede apreciar como un menor porcentaje de FCC proporciona propiedades más resistentes ante la permeabilidad de vapor de agua. Esta situación se da tanto respecto a la probeta de referencia como a la dosificación que presenta un mayor porcentaje. Así, la dosificación D11 presenta un buen comportamiento ante ambientes húmedos, mejorando ligeramente las propiedades del mortero sin adición.

### Evolución respecto al tiempo de curado

A una temprana edad de curado, se puede apreciar como la dosificación con una presencia menor de FCC se comporta ligeramente peor que la que mayor proporción. Esta situación no se mantiene constante a mayor curado, pues como se ha comentado en el punto anterior, a 63 días, la dosificación que presenta menor proporción de FCC adquiere mayor resistencia ante la captación de vapor de agua. Las dosificaciones sometidas a envejecimiento presentan una reducción de las propiedades resistentes ante la presencia de vapor de agua, volviéndose más permeables. De nuevo, las dosificaciones que presentan mayor proporción de FCC son más sensibles ante estas condiciones, viéndose sus propiedades aun más reducidas ante la exposición de radiación UV. Así, las dosificaciones que presentan mejores propiedades resistentes a la permeabilidad son la D11.





## viii. Conclusiones

### MORTERO DE TIERRA ESTABILIZADA

Puede determinarse como la adición puzolánica del FCC mejora la resistencia a compresión de las dosificaciones de ensayo respecto las de referencia. Pese a esta situación se aprecia como en el grupo que presenta un mayor porcentaje de cal, (mortero de tierra estabilizada al 10%), las probetas de ensayo no han superado la probeta de referencia, ni las del grupo con menor proporción.

Esto determina que las proporciones empleadas correspondientes con el grupo de morteros de tierra estabilizada al 5% se presentan como más óptimas al duplicar en el caso de la dosificación D4 la resistencia a compresión respecto a la de referencia. La proporción de la dosificación que mejores resultados presenta, tiene una proporción de cal/FCC de 0,33:1.

En relación al grupo de morteros del 10% las dosificaciones empleadas no han mostrado buenos resultados, presentando un comportamiento similar a la de referencia. Esta situación puede deberse al proceso de hidratación de la cal y FCC. La demanda de agua por parte de ambos materiales es elevada, pudiendo haber sido insuficiente en este grupo de probetas. La alta proporción de ambos materiales y una relación deficiente de agua pudo provocar que el proceso de hidratación no se completase, dando como resultado su escasa reactividad y por ello baja resistencia. Los resultados obtenidos no han sido los esperados pues la proporción de agua ha sido la misma en ambos grupos, pasando por alto la demanda de agua de ambos materiales. Pese a esta situación se podría determinar que con un porcentaje de agua adecuado la resistencia del mortero aumenta de forma considerable, por lo que se debería profundizar en el estudio acerca de dichas proporciones.

A pesar de poder presentar unos resultados favorables para su aplicación se deberá profundizar 115 en el comportamiento de todo el grupo de morteros de tierra, al presentar una reducción de sus propiedades tras la exposición a las condiciones climáticas comentadas, viéndose agravada la situación por la incidencia de radiación ultravioleta.

Respecto al comportamiento ante la erosión hidráulica acelerada se puede concluir en que la presencia de FCC aporta resistencia ante dicha incidencia. Esta situación se aprecia de forma clara en comparación con las probetas de referencia respecto a las de ensayo, presentando según su proporción cal/FCC una huella de erosión menor. En relación a esta situación se puede afirmar como la probeta que presenta una menor resistencia es la correspondiente con la D3.

Del mismo modo, se puede apreciar como en relación a la dureza superficial, las dosificaciones que presentan una mayor resistencia son las que presentan un mayor porcentaje de FCC. Los mejores resultados de esta prueba se atribuyen a las dosificaciones D4 y D6, siendo a su vez muy similares a los presentados en el ensayo de SAET.

En relación al comportamiento capilar de estas dosificaciones se puede concluir como las probetas no sometidas al ensayo de envejecimiento acelerado presentan una resistencia mayor a dicha ascensión capilar, además de mostrar un comportamiento más estable. Nuevamente se puede apreciar como la exposición a los ciclos de contraste reducen la resistencia a la absorción capilar de las probetas, comportándose a su vez peor las sometidas a radiación ultravioleta. La probeta que presenta unas propiedades más estables y resistentes ante la ascensión capilar son las dosificaciones D3 y D5 nuevamente. Esta situación determina que las probetas que presentan un menor porcentaje de FCC son más estables ante los ciclos de envejecimiento ensayados, respecto a las de mayor porcentaje.

En función de su comportamiento de permeabilidad ante la presencia de humedad, destacan

nuevamente como más estables las dosificaciones D3 y D5, presentando ambas un porcentaje de FCC del 10%. Así, las proporciones que mejores resultados han presentado ante la presencia de humedad en el grupo de morteros de tierra estabilizada son de cal/FCC al 0,5:1 y 1:1. A pesar de esta situación, y por el contrario a lo comentado, ante condiciones de envejecimiento, las dosificaciones de ensayo se comportan de una forma más estable ante la presencia de humedad que la probeta de referencia, mejorando incluso su comportamiento, al adquirir características que mejoran su resistencia a la absorción de agua. A su vez, ante la exposición a radiación ultravioleta, las probetas se presentan como más sensibles, reduciendo su resistencia a la captación de humedad.

## CONSOLIDANTE SUPERFICIAL SOBRE MORTERO

Este grupo de ensayo no se ha podido ensayar en la totalidad de las pruebas planteadas puesto la capa de actuación del consolidante se reduce a los primeros centímetros. Así, se este grupo se evaluara su comportamiento permeable ante la presencia de humedad, ascensión capilar, resistencia superficial y resistencia a la abrasión hidráulica.

En relación a su comportamiento ante la presencia de humedad, se puede concluir en que la dosificación más estable es la que presentaba un 25% de FCC, al mantener sus características estables durante las diferentes edades de curado. Pese a esta situación, el producto que presentaba un 50% de FCC, presentó las características más impermeabilizantes del grupo. Esta situación no debe tomarse negativa pues su aplicación únicamente retrasa la captación de vapor de agua, tras lo que el material tiende a absorber dicho vapor.

116

Del mismo modo, el tratamiento superficial reduce la absorción de agua por capilaridad en ambos grupos de probetas. Esta situación se aprecia de forma clara en comparación con las sometidas a envejecimiento, pues presentan una mejora de las propiedades. De esta forma cabría profundizar en el estudio acerca de las propiedades del consolidante superficial pues las condiciones de envejecimiento han supuesto en la mayoría de los ensayos una reducción de las propiedades resistentes, tanto en las probetas de referencia como en los grupos correspondientes a la tierra estabilizada. Pese a esta situación, nuevamente se puede concluir en una mayor inestabilidad de las dosificaciones que presentan un porcentaje mayor de FCC ante la exposición a radiación ultravioleta

En relación a la resistencia a la abrasión hidráulica, los morteros que presentan un 5% de cal se muestran como más sensibles ante la incidencia del caudal del agua, resultando por ello errores en el resultado, pues el soporte presenta una alta sensibilidad. Por el contrario, los morteros empleados que presentaban un 10% de cal, se consideran más resistentes, pudiendo apreciar como la incidencia erosiva superficial, ha provocado un ligero desgaste superficial del producto consolidante. Esto puede suponer una ligera resistencia del producto ante la acción del agua.

## MORTERO DE CAL

Nuevamente, muchas de las conclusiones aportadas son comunes con las propiedades que presenta este grupo de ensayo. Así, se puede determinar como un mayor porcentaje de FCC aumenta tanto la resistencia a compresión como la dureza superficial, presentándose de este modo la D12 como mas resistente.

De igual modo, una mayor proporción de FCC reduce las propiedades resistentes del mortero tras la exposición a los ciclos de envejecimiento. Esta situación puede apreciarse, además de en los

resultados de resistencia a compresión, en los valores de resistencia a la abrasión hidráulica, donde se puede apreciar un ligero desgaste superficial de la superficie ensayada.

Respecto a su comportamiento permeable ante la presencia de humedad se puede apreciar como ambos morteros de ensayo presentan comportamientos muy similares ante la captación de vapor. A pesar de esta situación, se puede observar como nuevamente como un mayor porcentaje de FCC aumenta ligeramente la captación de humedad por parte del material, presentando por ello menor resistencia. Así, se puede suponer como los morteros más estables ante ambientes húmedos son los que presentan una menor proporción de FCC.

En relación a la capacidad de absorción capilar, se presenta una situación opuesta a lo presentado con anterioridad pues el mortero que presenta un mayor porcentaje de FCC en masa, absorbe agua por capilaridad de una forma más leve, tanto en el tiempo como en cantidad de agua respecto a la de menor proporción. A su vez, su comportamiento ante la absorción capilar mejora con la exposición a condiciones de envejecimiento, cuya exposición a la radiación no supone una reducción de sus propiedades.



## IX. BIBLIOGRAFÍA

### BLOQUE I. ARQUITECTURA DE TIERRA

- AA. VV., *Arquitectura tradicional*, Instituto de Estudios Almerienses, Almería, 2008
- AA.VV. Conferencia Internacional de Arquitectura Moderna. (1931). Carta de Atenas. Obtenido de [http://ipce.mcu.es/pdfs/1931\\_Carta\\_Atenas.pdf](http://ipce.mcu.es/pdfs/1931_Carta_Atenas.pdf)
- AA.VV. Congreso Internacional de Arquitectura y Técnicos de Monumentos Históricos. (1964). Carta de Venecia. Obtenido de [http://ipce.mcu.es/pdfs/1964\\_Carta\\_Venecia.pdf](http://ipce.mcu.es/pdfs/1964_Carta_Venecia.pdf)
- AA.VV. Consejo Internacional de Monumentos y Sitios - ICOMOS. (1999). Carta del patrimonio vernáculo construido. Obtenido de [http://www.esicomos.org/nueva\\_carpeta/info\\_VERNACULA.htm](http://www.esicomos.org/nueva_carpeta/info_VERNACULA.htm)
- AA.VV. Consejo Internacional de Monumentos y Sitios - ICOMOS. (2003). Principios para el análisis, conservación y restauración de las estructuras del patrimonio arquitectónico. Victoria Falls, Zimbabwe: 14<sup>a</sup> Asamblea General del ICOMOS.
- AA.VV., *Estudio de buenas prácticas en las intervenciones de arquitectura tradicional española*. IPC - Plan Nacional de Arquitectura Tradicional. 2016.
- AAVV. *La restauración de la tapia en la península ibérica (1980-2010)*. Criterios, técnicas, resultados y perspectivas.
- AAVV. *Proyecto COREMANS*. Criterios de intervención en la arquitectura de tierra. Ministerio de Educación, Cultura y Deporte. UPV. 2017
- AA.VV., *Técnicas constructivas*. Arquitectura tradicional, Greta, Girona, 2016
- AA.VV., *Terra Incognita*. Découvrir & Préserver une Europe des architectures de terre, Culture Lab Éditions, 2007
- ANASAGASTI y ALGÁN, T., 1929. *Arquitectura popular*, Real Academia de Bellas Artes de San Fernando, Madrid,
- BALDINI, U. (2002). *Teoría de la restauración y unidad metodológica*. (M. Mozzillo, Trad.) Guipúzcoa: Nerea.
- BARDOU, P., & ARZOUMANIAN, V. (1979). *Arquitecturas de adobe*. Barcelona: Gustavo Gili.
- BRANDI, C., & DE ANGELIS D'OSSAT, G. (1972). Carta del Restauo. Obtenido de [http://ipce.mcu.es/pdfs/1972\\_Carta\\_Restauo\\_Roma.pdf](http://ipce.mcu.es/pdfs/1972_Carta_Restauo_Roma.pdf)
- CAPARRÓS, L.M.; GIMÉNEZ, R.; VIVÓ C., *La cal y el yeso*. Revestimientos continuos en la arquitectura tradicional valenciana, COAA TV Ed., Valencia, 2001
- CIAV Centro de Investigación en Arquitectura Vernácula. (1996). Carta del Patrimonio Vernáculo construido. Madrid, 30 de enero de 1996, ratificada por ICOMOS en México, octubre de 1999.
- CORREIA, M. (2007). *Teoría de la conservación y su aplicación al patrimonio en tierra*. Apuntes n.20. Pontificia Universidad Javeriana.
- CORREIA, M. CARLOS, G. & ROCHA, S. (ed) (2014). *Vernacular Heritage and Earthen Architecture*. Contributions for sustainable development. London: CRC-Balkema / Taylor & Francis Group.
- CRATerre (1983,1991). *Construire en terre – Building with earth*. Paris: Editions alternatives.
- CRATerre-EAG and ICCROM (1993): *Bibliographie sur la préservation, la restauration et la réhabilitation des architectures de terre*. Rome: ICCROM.
- DE HOZ ONRUBIA, J.; MALDONADO RAMOS, L.; VELA COSSÍO, R. ( 2003). *Diccionario de construcción*

tradicional de tierra, Nerea Ed., San Sebastián

**ENSAG-CRAterre.** (2014). *Versus. Lecciones del patrimonio vernáculo para una arquitectura sustentable.* Grenoble: Éditions CRAterre/ESG/UNICA/UNIFI/UPV.

**FABIO GATTI, Arch.** (2012). "Arquitectura y construcción en tierra. Estudio comparativo de las técnicas contemporáneas en tierra ". Tesina Universidad politécnica de Catalunya. Departamento de Construcción Arquitectónica. Máster oficial en tecnología de la arquitectura

**FONT MEZQUITA, F.; HIDALGO I CHULIO, P.,** (2009). *Arquitecturas de tapia*, COAAT Castellón, Castellón

**GARCIA SORIANO, Lidia.** 2015. *La restauración de la arquitectura de tapia de 1980 a la actualidad a través de los fondos del ministerio de cultura y del ministerio de fomento del gobierno de España. Criterios, técnicas y resultados.* Tesis doctoral. Directores Dra. Camilla Mileto, Dr. Fernando Vegas López-Manzanares. UPV

**GARCÍA SORIANO, L., MILETO, C., VEGAS, F.** (2013). "La coronación en la arquitectura de tapia. Técnicas constructivas de intervención a través del Instituto de Patrimonio Cultural de España (IPCE)".

**GÁRATE ROJAS, I.,** *Artes de la cal*, Munilla-Lería Ed., Madrid, 1993

**GÓMEZ LÓPEZ-EGEA, R.,** "Arquitectura popular; presente y futuro". *Estudios e Investigaciones* nº4, Madrid, 1979

**GONZÁLEZ-VARAS, I.,** (1999) "Conservación de bienes culturales: teoría, historia, principios y normas". *Manuales Arte Cátedra*, Cátedra Ed., Madrid

**GUERRERO, L., CORREIA, M., & GUILLAUD, H.** (2012). *Conservación del patrimonio arqueológico construido en tierra en iberoamérica.* *Apuntes*, 25(2), p. 210-225.

**120 GUERRERO BACA, Luís Fernando.** *Arquitectura en tierra: Hacia la recuperación de una cultura constructiva.* *Apuntes*, Bogotá , v. 20, n. 2, p. 182-201, Dec. 2007 [http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1657-7632007000200002&lng=en&nrm=iso](http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1657-7632007000200002&lng=en&nrm=iso)>.

**Houben, H., & Guillaud, H.** (1994). *Earth construction. A comprehensive guide.* (A. Gompers, & J. Schilderman, Trads.) London: Intermediate Technology Publications.

**MALDONADO RAMOS, L.; RIVERA GÁMEZ, D.; VELA COSSÍO, F.,**(2002). *Arquitectura y construcción contierra*, Maireta Ed., Madrid.

**MALDONADO RAMOS, L.; VELA COSSÍO, F.,** "El patrimonio arquitectónico construido con tierra. Las aportaciones historiográficas y el reconocimiento de sus valores en el contexto de la arquitectura popular española". *Informes de la construcción* Vol. 63, nº 523, 2011, pp. 71-80

**MINKE, G.** (2001). *Manual de construcción en tierra. La tierra como material de construcción y su aplicación en la arquitectura actual.* (K.Herzlefd, Trad.). Ed. Fin de siglo.

**MINKE, G.** (2014). *Revoques de barro. Mezclas, aplicaciones y tratamientos.* (G. Pettersen, Trad.) Barcelona: Icaria.

**MILETO, C., VEGAS, F., CRISTINI, V., GARCIA SORIANO, L.** (2011). "Earthen techniques in Europe". *Terra Europae. Earthen Architecture in the European Union.* Edizioni ETS. Pisa. p. 195- 202

**MILETO, C., VEGAS, F., CRISTINI, V., GARCIA SORIANO, L.** (2014). "La tapia en la Península Ibérica" en *La restauración de la arquitectura de tapia en la Península Ibérica. 1980-2010.* TC Cuadernos/ Argumentum. Valencia / Lisboa. p. 32-51.

**MILETO, C., & VEGAS, F.** (2014). *La restauración de la tapia en la Península Ibérica: Criterios, técnicas, resultados y perspectivas.* Valencia: TC Cuadernos.

**OLCESE, M.** (1993). *Arquitectura de tierra: tapial y adobe.* Valladolid: Colegio Oficial de Arquitectos de

Valladolid.

**VEGAS, F.; MILETO, C.**, Aprendiendo a restaurar. Un manual de restauración de la arquitectura tradicional de la Comunidad Valenciana, COACV, Valencia, 2011

**VEGAS, F.; MILETO C.; CRISTINI, V.** “Corbelling dome architecture in Spain and Portugal”. Coupoles et Habitats, ETCS Ed., Firenze, 2009

**VEGAS, F.; MILETO, C.**, (2001). Memoria construida. La arquitectura tradicional del Rincón de Ademuz. ADIRA, Valencia.

**VEGAS, F.; MILETO, C.**, (2013). Lazos de alarife. Manual sobre técnicas y materiales tradicionales en Málaga y el Norte de Marruecos para la recuperación de su patrimonio común. OMAU, Málaga.

**VERA BOTÍ, A.**, (2003). La conservación del patrimonio arquitectónico, Diego Marín, Murcia

**VERA, A.**, (2003). La conservación del patrimonio arquitectónico: técnicas. DM Editor. Murcia.

**WARREN, J.**, (2001). “Forma, significado y propuesta: objetivos éticos y estéticos en la conservación de la arquitectura de tierra”. Loggia – Arquitectura & Restauración, nº 12, pp. 10-19. UPV. Valencia.

**NEVES, Célia; FARIA, Obede Borges (Org.)**(2011). Técnicas de construcción con tierra. Bauru, SP: FEB-UNESP/PROTERRA. 79p.

## **BLOQUE II. TIERRA COMO MATERIAL**

**AA.VV.**, (2016). Estudio de buenas prácticas en las intervenciones de arquitectura tradicional española. IPC - Plan Nacional de Arquitectura Tradicional.

**AA.VV.**, (1996). Técnicas de diagnóstico aplicadas a la conservación de los materiales de construcción en los edificios históricos, IAPH Ed., Sevilla. 121

**ANGER, R., FONTAINE, L., HOUBEN, H., DOAT, P., VAN DAMME, H., OLAGNON, C., & JORAND, Y.** (2008). La terre, un béton comme les autres? Quelques mécanismes de stabilisation du matériau terre. En L. Rainer, A. Bass Rivera, & D. Gandreau (Edits.), Terra 2008: The 10th Conference on the Study and Conservation of Earthen Architectural Heritage (págs. 222-225). Los Angeles: The Getty Conservation Institute.

**BARRIOS, G., ALVAREZ, L., ARCOS, H. & ROSI, D.** (1986). Comportamiento de los suelos para la confección de adobes. Informes de la Construcción, 37(377), 43-49.

**BELLMUNT I RIBAS, R., ET AL.**, (2000). Reconocimiento, diagnosis e intervenció en fachadas, ITeC, Barcelona.

**BROTO, C.** (2005). Enciclopedia Broto de patologías de la construcción. Obtenido [https://higieneyseguridadlaboralcv.files.wordpress.com/2012/07/enciclopedia\\_broto\\_de\\_patologias\\_de\\_la\\_construccion.pdf](https://higieneyseguridadlaboralcv.files.wordpress.com/2012/07/enciclopedia_broto_de_patologias_de_la_construccion.pdf)

**CANIVELL, J. & GRACIANI, A.** (2012). Critical analysis of interventions in historical rammed-earth walls. Military buildings in the ancient Kingdom of Seville. Mileto C., Vegas F., Cristini V. (Eds.), Rammed Earth Conservation. Proceedings of the First International Conference on Rammed Earth Conservation, RESTAPIA 2012. London: Balkema- Taylor & Francis.

**CANIVELL, J. & GRACIANI GARCÍA, A.** (2011). Metodología de diagnóstico y caracterización de fábricas históricas de tapia/ Methodology for diagnosis and characterization of historical rammed-earth walls (tesis doctoral).

**COSTALES, L.** (1987). Architettura in terra: Cause del deperimento e provvedimenti per la loro conservazione - Earthen architecture: Causes of deterioration and conservation measures. Bollettino Degli Ingegneri, 12. pp. 14-20.

**FEILDEN, B. M.**, Conservation of historic buildings, ICCROM, Roma, 1982

**KEEFE, L.**, (2005). Earth Building. Methods and materials, repair and conservation. Taylor & Francis, Londres.

**MALDONADO RAMOS, L.**,(1999). “Estrategia y metodología de la intervención en edificios históricos: una perspectiva desde la arquitectura y la arqueología”. Tratado de rehabilitación Vol. 2 Metodología de la restauración y la rehabilitación, pp. 219-228. Ed. Munilla-Lería,. Madrid.

**MINGARRO, M.** (1996). Degradación y conservación del patrimonio arquitectónico. Madrid: Complutense.

**MINKE, G.** (2001). Manual de construcción en tierra. La tierra como material de construcción y su aplicación en la arquitectura actual. (K.Herzlefd, Trad.). Ed. Fin de siglo.

**MINKE, G.** (2011). Shrinkage, abrasion, erosion and sorption of clay plasters. Informes de la Construcción, 63(355), 153-158.

**MILETO, C., VEGAS, F., GARCIA SORIANO, L.** (2014). “Los fenómenos de degradación más comunes en fábricas de tapia” en La restauración de la arquitectura de tapia en la Península Ibérica. 1980-2010. TC Cuadernos / Argumentum. Valencia / Lisboa. p. 52-59.

**MILETO, C., VEGAS, F., GARCIA SORIANO, L.** (2013). “Degradation and preservation of rammed earth. The case study of Spain”. 6th International Congress “Science and Technology for the Safeguard of Cultural Heritage in the Mediterranean Basin”. Athens, Greece. 22-25 october 2013. p. 67.

**MONJO, J.; MALDONADO, L.**, (2001). Patología y técnicas de intervención en estructuras arquitectónicas, Munilla-Lería, Madrid.

**VARGAS, J., HEREDIA, E., BARIOLA, J., & METHA, P.** (1986). Preservación de las construcciones de adobe en areas lluviosas. Lima: Alfa.

**WARREN, J.**, Conservation of earth structure, Butterworth-Heinemann, Oxford, 1999

### **BLOQUE III. CONSOLIDANTES**

**ALEJANDRE-SANCUEZ, F.** (2002). Historia, caracterización y restauración de morteros. Sevilla: Instituto Universitario de Ciencias de la Construcción.

**BARADAN, B.** (1990). A new restoration material for adobe structures. En K. Grimstad (Ed.), 6th International Conference on the conservation of earthen architecture. Adobe 90 Prepints (págs. 149-152). Los Angeles: The Getty Conservation Institute.

**BÜLENT, B.** (1990). A new restoration material for adobe structures. En K. Grimstad (Ed.), 6th International Conference on the conservation of earthen architecture. Adobe 90 Prepints (págs. 149-152). Los Angeles: The Getty Conservation Institute.

**CASTILLA PASCUAL, F.** (2004). Estabilización de morteros de barro para la protección de muros de tierra. Obtenido de Universidad Politécnica de Madrid: <http://oa.upm.es/8826/>

**CHIARI, G.** (1990). Chemical surface treatments and camping techniques on earthen structures: a long-term evaluation. En K. Grimstad (Ed.), 6th International Conference on the conservation of earthen architecture. Adobe 90 Prepints (págs. 267-273). Los Angeles: The Getty Conservation Institute.

**COFFMAN, R., SEWITZ, C., & AGNEW, N.** (1990). The getty adobe research project at Fort Selden II. A Study of the Interaction of Chemical Consolidants with Adobe and Adobe Constituents. En K. Grimstad (Ed.), 6th International Conference on the conservation of earthen architecture. Adobe 90 Prepints (págs. 250-254). Los Angeles: The Getty Conservation Institute.

**DÍAZ RAMOS, I.** (2015). La piel de la arquitectura de tierra sustancias naturales al servicio de la



- restauración de superficies del patrimonio vernáculo edificado. Tesis doctoral. Director de tesis: Dr. Francisco Ortega Andrade. Departamento de Construcción Arquitectónica. Escuela Técnica Superior de Arquitectura. Universidad de Las Palmas de Gran Canaria
- FARRÉ, B.; ALDOMA, O.** Limpieza. Restauración. Mantenimiento de fachadas, Ed. Prensa XXI, Barcelona, 1989
- FERM, R. (1990).** Synthetic latex-soil slurry, a new adobe preservation technique. En G. Kirsten (Ed.), 6th International Conference on the conservation of earthen architecture. Adobe 90 Prepints (págs. 274-276). Los Angeles: The Getty Conservation Institute.
- HORIE, V. (1990).** Materials for conservation. Organic consolidants, adhesives and coatings. Oxford: Butterworth-Heinemann (1ª edición: 1987).
- MARTÍNEZ-CAMACHO, F. (2007).** La consolidación de adobe con mucílago de nopal. Estudio de un caso: el templo de la antigua misión de Nuestra Señora del Pilar y Santiago de Coscospera, Sonora. Restauración y Museografía "Manuel del Castillo Negrete". México: Escuela Nacional de Conservación
- MATTEINI, M., & MOLES, A. (2001).** La química en la restauración. Los materiales del arte pictórico (1ª ed.). (E. Bruno, & G. Lain, Trads.) Guipúzcoa: Nerea.
- MASSCHELEIN-KLEINER, L. (1988).** Observaciones sobre la utilización de disolventes en tareas de conservación. PH Boletín, 66-71.
- MASSCHELEIN-KLEINER, L. (2004).** Los solventes. Chile: Dirección de bibliotecas Archivos y Museos, Centro Nacional de Conservación y Restauración.
- MATTEINI, M., & MOLES, A. (2001).** La química en la restauración. Los materiales del arte pictórico (1ª ed.). (E. Bruno, & G. Lain, Trads.) Guipúzcoa: Nerea.
- MATTEINI, M., & MOLES, A. (2001).** Ciencia y restauración. Método de investigación (1ª ed.). (M. Martínez de Marañón, Trad.) Guipúzcoa: Nerea.
- ONTIVEROS, E. (2001).** Programa de normalización de estudios previos y control de calidad en las intervenciones: morteros empleados en construcciones históricas. Formulación y características. PH Boletín del Instituto Andaluz del Patrimonio Histórico(34), 78-89.
- PÉREZ, N. (2009).** Formulación de un mortero de inyección con mucílago de nopal para restauración de pintura mural. (Tesis de maestría), Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Occidente, Jalisco.
- PILES, V.** "Estudio de los morteros de los revestimientos continuos de las arquitecturas del Centro Histórico de Valencia. Preparación de morteros de restauración mixtos cal-puzolana". Tesis Doctoral. Departamento de Química. U. Politécnica de Valencia. España. 2006.
- SIMON, S., & GEYER, D. (2008).** Comparative testing of earthen grouts for the conservation of historic earthen architectural surfaces. En L. Rainer, A. Bass Rivera, & D. Gandreau (Edits.), Terra 2008: The 10th Conference on the Study and Conservation of Earthen Architectural Heritage (págs. 259-265). Los Angeles: The Getty Conservation Institute
- ROTA ROSSI-DORIA, P.,** "Mortars for restoration: basic requirements and quality control" en Materials and Structures Vol. 19, International Union of Laboratories and Experts in Construction Materials, Systems and Structures RILEM, 1986, pp. 445-448
- ROTA ROSSI-DORIA, P.,** "Ancient mortars for restoration" en Materials and Structures Vol. 23, International Union of Laboratories and Experts in Construction Materials, Systems and Structures RILEM, 1990, pp. 235-238.
- TEUTONICO, J. M.,** A laboratory manual for architectural conservators, ICCROM, Roma, 1988

**BLOQUE IV. CATALIZADOR GASTADO DE CRAQUEO CATALITICO (FCC)**

**TORRES CASTELLANOS, N., TORRES AGREDO, J. (2010).** Uso del catalizador gastado de craqueo catalítico (FCC) como adición puzolánica – revisión. Ingeniería e investigación vol. 30 no. 2, august 2010 (35-42)

**MEJÍA J. M.; RODRÍGUEZ, E. D. y MEJÍA DE GUTIÉRREZ, R.** Utilización potencial de una ceniza volante de baja calidad como fuente de aluminosilicatos en la producción de geopolímeros. Ingeniería y Universidad. 2014, vol. 18, no. 2, pp. 309-327. <http://dx.doi.org/10.11144/Javeriana.IYU18-2.upcv>

**ZORNOZA GÓMEZ, E. (2007).** El papel del catalizador usado de craqueo catalítico (fcc) como material puzolánico en el proceso de corrosión de armaduras de hormigón. Tesis doctoral. Dirigida por D. Jordi Payá Bernabeu. UPV

**TORRES AGREDO, J., IZQUIERDO GARCÍA, S., TROCHEZ SERNA, J., MEJÍA DE GUTIÉRREZ, R., (2012).** Estudio comparativo de pastas de cemento adicionadas con catalizador de craqueo catalítico usado (fcc), y metacaolín (mk). Ciencia e ingeniería neogranadina, vol 22-1, pp 7 - 17, bogotá junio de 2012, issn 0124-8170

**SEGURA-SIERPE, Y.P., BORRACHERO-ROSADO, M.V., MONZÓ-BALBUENA, J.M., PAYÁ-BERNABEU, J., (2015).** Preliminary studies on hydrated cement for its reuse in geopolymers. Universidad Nacional de Colombia. DYNA 83 (196), pp. 229-238. April, 2016 Medellín. <http://dx.doi.org/10.15446/dyna.v83n196.54189>

**SEPULCRE AGUILAR, A., (2005)** Influencia de las adiciones puzolánicas en los morteros de restauración de fabricas de interés histórico artístico. Tesis doctoral. Director Francisco Hernández Olivares

**MARTÍNEZ-LÓPEZ, C., M. MEJÍA-ARCILA, J., TORRES-AGREDO, J., MEJÍA-DE GUTIÉRREZ, R. (2015).**

124 Evaluación de las características de toxicidad de dos residuos industriales valorizados mediante procesos de geopolimerización. Universidad Nacional de Colombia. DYNA 82 (190), pp. 74-81. April, 2015 Medellín. <http://dx.doi.org/10.15446/dyna.v82n190.43136>

**CARRANZA TERREROS, R.A., (2017).** Nuevos materiales conglomerantes a partir de tierras de Diatomeas de distinto origen: reactividad puzolánica. Tesis doctoral. Directora dra. Dña. Lourdes soriano martínez. Ingeniería de la construcción y proyectos de ingeniería civil. Upv

**IZQUIERDO, S., RODRIGUEZ, E., Mejía-de Gutiérrez, R. (2015).** Resistencia a la corrosión ácida de morteros de cementos adicionados con catalizador de craqueo catalítico gastado (sFCC). Revista Ingeniería de Construcción RIC Vol 30 N°3, PAG 169-176

**SORIANO MARTÍNEZ, LOURDES.** “Nuevas aportaciones en el desarrollo de materiales cementantes con residuo de Catalizador de Craqueo Catalítico (FCC)”. Tesis Doctoral. Departamento de Ingeniería de la Construcción y de Proyectos de Ingeniería Civil. U. Politécnica de Valencia. España. 2007.

**MMA.** “Catálogo de residuos utilizables en la construcción”. Ministerio de medio ambiente, Centro de estudios y experimentación de obras públicas, Madrid 2002, 81-101.

**SINGH, M.; GARG, M. AND REHSI, S.** “Durability of phosphogypsum based water-resistant anhydrite binder”. Cement and Concrete Research, 20: 271–276. 1990.

**BORRACHERO, MV.; MONZÓ, J.; PAYÁ, J.; PERIS, E.; VUNDA, C.; VELÁZQUEZ, S. Y SORIANO, L.** “El catalizador gastado de craqueo catalítico adicionado al cemento portland: Las primeras 48 horas de curado y la evolución de la resistencia mecánica”. VIII Congreso Nacional de Propiedades Mecánicas. U. Politécnica de Valencia. Gandia-España. 2002. Pág. 579-589.

**VELÁZQUEZ, S.** “Aplicaciones del catalizador de Craqueo Catalítico (FCC) usado en la preparación de conglomerantes hidráulicos. Estudio de sus propiedades puzolánicas”. Tesis Doctoral. Departamento de Ingeniería de la Construcción y de Proyectos de Ingeniería Civil. U. Politécnica de Valencia. España. 2002

**BORRACHERO, MV.; PAYÁ, J.; BONILLA, M.; MONZÓ, J.; PERIS, E. Y MELLADO, A.** “Prácticas de Química de los Materiales”. Dpto. Ing. De la Construcción y Proy. De Ingeniería Civil. Universidad Politécnica de Valencia. Edit. UPV. Ref. 2004.4087.

**ROLDÁN, W.** “Preparación de nuevos conglomerantes a partir de mezclas mixtas de cemento-yeso-puzolana”. Informe DEA. Dpto. Ing. de la Construcción y Proyectos de Ing. Civil. U. Politécnica de Valencia. Mayo 2008.

**ZORNOZA, E.; GARCÉZ, P.; MONZÓ, J.; BORRACHERO, M.V.; PAYÁ, J.** “Compatibility of fluid catalytic cracking catalyst residue (FC3R) with various types of cement”. Advance in Cement Research. 19 (2007). 117-124.

**MARTÍNEZ-LÓPEZ, C., TORRES-AGREDO, J., MEJÍA-DE GUTIERREZ, R., MELLADO-ROMERO, A. M., PAYÁ-BERNABEU, J., MONZÓ-BALBUENA, J.M.** (2013). Uso de test de lixiviación para determinar la migración de contaminantes en morteros de sustitución con residuos de catalizador de craqueo catalítico (fcc). Dyna, año 80, Nro. 181, pp. 163-170. Medellín

**VILLCA POZO, A.R.,** (2016). Utilización de cementos activados alcalinamente para la mejora de las propiedades de morteros cal-puzolana. Tesis doctoral. Directores; dra. Lourdes soriano martínez, dr. José maría monzó balbuena. Ingeniería de la construcción y proyectos de ingeniería civil. Upv

**GARCIA DE LOMAS GOMEZ, M.,** (2015). “Viabilidad científica, técnica y medioambiental del catalizador gastado de craqueo catalítico (fcc) como material puzolánico”. Tesis doctoral. Directores; dra. M<sup>a</sup> isabel sánchez de rojas gómez, dr. Moisés frías rojas. Universidad autónoma de madrid

**PAYÁ, J.,** (2012). La “transmutación” sostenible de los residuos para nuevas materias primas en el ámbito del concreto. Dyna, año 79, Edición Especial, pp. 38-47, Medellín

# ANEXO



## FICHA TÉCNICA DE LA CAL HIDRÁULICA NATURAL NHL-3,5 TIGRE

Fecha última actualización:  
04/01/2016  
Ed.2  
Página 1 de 4

### Cal Hidráulica Natural TIGRE

**PRESENTACIÓN:** Palet de 64 sacos de 17 Kg. de peso aprox. Posibilidad de adquirir el producto a granel.

**OBTENCIÓN:** La Cal Hidráulica Natural TIGRE, se elabora de forma **íntegramente natural**, a partir de la cocción de piedras calcáreas específicas [margas] y **sin ningún tipo de aditivo químico**. La cocción de la piedra se realiza a temperaturas comprendidas entre 900°C y 1200°C. Posteriormente se realiza un lento y cuidado proceso de hidratación de la piedra para acabar obteniendo un producto de carácter excepcional.

**PROPIEDADES de los Morteros de Cal Hidráulica Natural TIGRE:** Gran plasticidad y trabajabilidad con una fuerte adherencia a las superficies que permite trabajar cómodamente y eficazmente con el producto. Poca tendencia a la fisuración. Impermeabilidad al agua y permeabilidad al vapor de agua que permite que las superficies enfoscadas con morteros de Cal Hidráulica Natural TIGRE transpiren. Excelentes propiedades hidráulicas que favorecen trabajar en ambientes con alta humedad.

**CAMPO DE APLICACIÓN:** Especialmente indicado para la RESTAURACIÓN y la BIOCONSTRUCCIÓN.

### La Cal Hidráulica Natural que TRANSPIRA

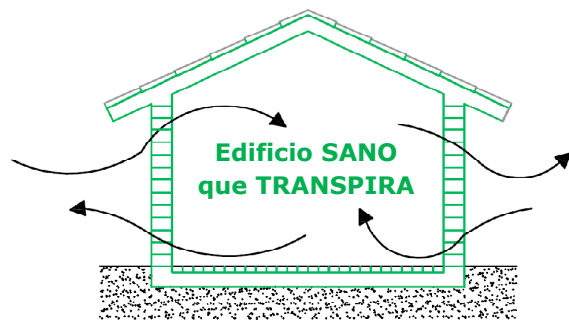
#### Construcción a base de CEMENTO CONVENCIONAL



En una construcción levantada a base de  cemento convencional, las paredes actúan como barrera al vapor de agua que evita que el edificio transpire y favorecen la creación de un clima de malestar pudiendo ser causa de varias enfermedades.

Además, la generación de humedad interior no puede ser eliminada fácilmente, dando lugar a condensaciones que pueden perjudicar gravemente la vida útil y salud del edificio.

#### Construcción a base de CAL HIDRÁULICA NATURAL TIGRE NHL-3,5



La permeabilidad al vapor de agua de la  Cal Hidráulica Natural NHL-3,5 TIGRE, facilita la transpiración del edificio, que favorece la creación de un clima interior de bienestar, más confortable y saludable que mejora la calidad de vida.

Además, la baja conductividad de la Cal Hidráulica Natural TIGRE, permite ahorros energéticos en calefacción y refrigeración de hasta el 30% respecto la utilización de cementos convencionales.



**FICHA TÉCNICA DE LA CAL  
HIDRÁULICA NATURAL NHL-3,5 TIGRE**

Fecha última  
actualización:  
04/01/2016  
Ed.2  
Página 2 de 4

**Datos Técnicos. Conforme EN 459-1:2010  
"CALES PARA LA CONSTRUCCIÓN"**



1035

**Anna Carulla Bech (CEMENTO NATURAL TIGRE)**

Av. Guissona, 9  
25200 Cervera (Lleida) ESPAÑA

13

**CNT2-1035/CPR/ES050862**

**EN 459-1:2010**

**CAL HIDRÁULICA NATURAL NHL-3,5 TRANSPIRA**

<b>RESISTENCIAS MECÁNICAS (ESPECIFICACIONES)</b>	<b>VALOR</b>
Resistencia a compresión 7 días [Mpa]	PND
Resistencia a compresión 28 días [Mpa] ( $\geq 3,5$ y $\leq 10$ )	4,6 MPa
<b>CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS (ESPECIFICACIONES)</b>	<b>VALOR</b>
Trióxido de azufre (SO <sub>3</sub> ) ( $\leq 2$ %)	1,96 %
Tasa de cal libre (Ca(OH) <sub>2</sub> ) ( $\geq 25$ %)	29,77 %
<b>FRAGUADO (ESPECIFICACIONES)</b>	<b>VALOR</b>
Inicio de fraguado ( $\geq 1$ hora)	255 min
Final de fraguado ( $\leq 30$ horas)	315 min
<b>CARACTERÍSTICAS FÍSICAS (ESPECIFICACIONES)</b>	<b>VALOR</b>
Rechazo a 90 $\mu$ en % ( $\leq 15$ %)	13,6 %
Rechazo a 200 $\mu$ en % ( $\leq 2$ %)	1,99 %
Agua libre ( $\leq 2$ %)	1,34 %
Estabilidad ( $\leq 2$ mm)	0,5 mm
Penetración ( $\geq 10$ y $\leq 50$ mm)	24 mm
Contenido en aire ( $\leq 5$ %)	4,9 %



## FICHA TÉCNICA DE LA CAL HIDRÁULICA NATURAL NHL-3,5 TIGRE

Fecha última  
actualización:  
04/01/2016  
Ed.2  
Página 3 de 4

### Aplicaciones:

#### OBRA NUEVA – RESTAURACIÓN - BIOCONSTRUCCIÓN

- ✓ Colocación y asentamiento de suelos rústicos (baldosas de cerámica y de piedra) en interiores y exteriores.
- ✓ Colocación y asentamiento de tejas árabes.
- ✓ Enfoscados y revestimientos exteriores e interiores. *Muy recomendado.*
- ✓ Bodegas y construcciones con previsión de humedad.
- ✓ Recuperación del patrimonio histórico.
- ✓ Restauración de masías, iglesias, casas de campo, murallas, castillos, etc.
- ✓ Rejuntados de piedra.
- ✓ Revoco a la tirolesa (sin adición de arena, una parte volumétrica de cal y 3 de agua).

### Información adicional de algunas aplicaciones

**ENFOSCADOS Y REVESTIMIENTOS NATURALES Y TRANSPIRABLES DE COLOR:** Mezclar la Cal Hidráulica Natural TIGRE, con arenas naturales de color para conseguir acabados estéticos de gran valor arquitectónico conservando las propiedades de la Cal Hidráulica Natural Tigre.

**RECUPERACIÓN DEL PATRIMONIO HISTÓRICO:** La Cal Hidráulica Natural TIGRE, resulta indispensable para la preservación del patrimonio histórico. La mayoría de construcciones anteriores al siglo XX, han sido levantadas a base de morteros de cal. La mala práctica actual de utilizar cementos convencionales para la restauración, puede producir daños irreversibles a las edificaciones a causa de la poca transpiración y la composición química de éstos que pueden producir reacciones de consecuencias imprevisibles.

### Modo de empleo

**PREPARACIÓN:** Mezclar 3 partes de arena por cada parte de cal (partes volumétricas). Amasar vertiendo agua en un recipiente y añadiendo la mezcla de modo gradual hasta conseguir un mortero homogéneo. La mezcla se puede realizar mecánicamente o manualmente. No reutilizar el producto una vez éste haya empezado el proceso de fraguado.

**APLICACIÓN:** El soporte debe estar limpio y sano antes de la aplicación del producto. Realizar la limpieza de las superficies para eliminar completamente residuos que puedan perjudicar la adhesión del producto. Es imprescindible humedecer siempre el soporte antes de aplicar el producto.

**LAS ARENAS:** Las arenas deben estar lavadas y limpias y ser preferiblemente silíceas o de trituración de rocas. La granulometría de éstas dependerá del tipo de aplicación a realizar. No deben contener arcilla.

**Recomendamos adquirir toda la arena de una vez para la uniformidad de color. Es importante hacer las mezclas de arena y agua con la misma proporción. Coger un mismo envase de referencia para todas las mezclas.**



## FICHA TÉCNICA DE LA CAL HIDRÁULICA NATURAL NHL-3,5 TIGRE

Fecha última  
actualización:  
04/01/2016  
Ed.2  
Página 4 de 4

### Otras indicaciones

**CONSERVACIÓN:** Conservar en lugar seco y preservado de la humedad -1 año -.

**ADVERTENCIA:** La información suministrada en esta ficha está basada en los datos que tenemos disponibles en la fecha de edición de la misma y es fruto de nuestros ensayos internos con unas condiciones climáticas determinadas.

Es responsabilidad del usuario adoptar las medidas de precaución adecuadas y valorar en cada caso si es apropiado o no para el uso previsto, asumiendo toda responsabilidad que pueda derivar del empleo del producto.

Las informaciones expuestas en la presente ficha no pueden considerarse como exhaustivas. Solicitar la ficha de seguridad en caso de necesidad.

# Project 1

10/07/2019 18:46:42

Project: Project 1  
 Owner: Administrador  
 Site: Site of Interest 1

Sample: Sample G-1  
 Type: Default  
 ID:

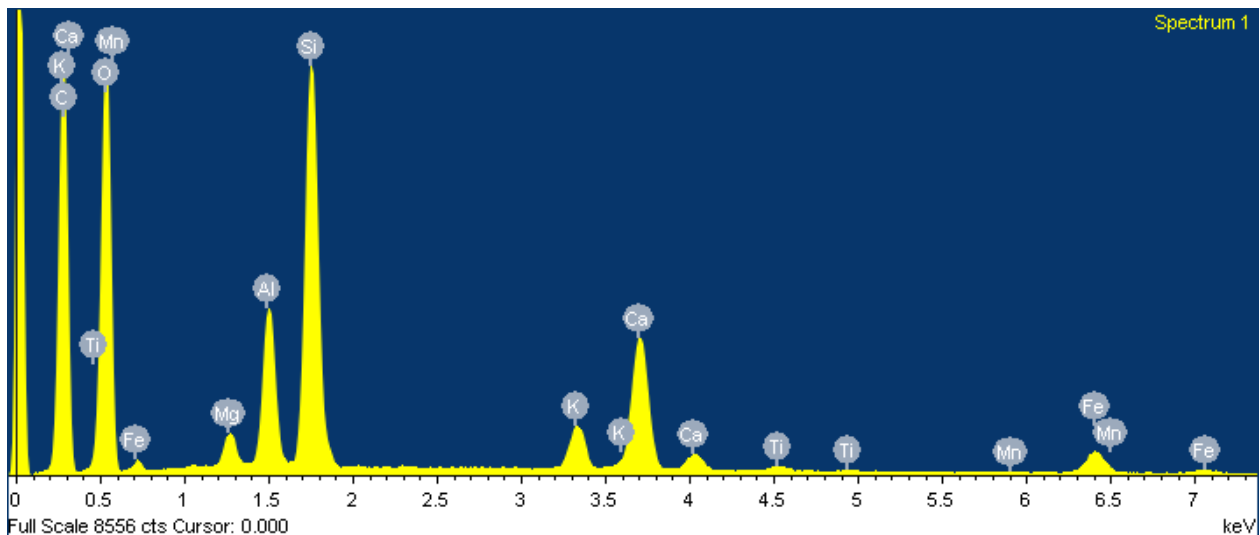
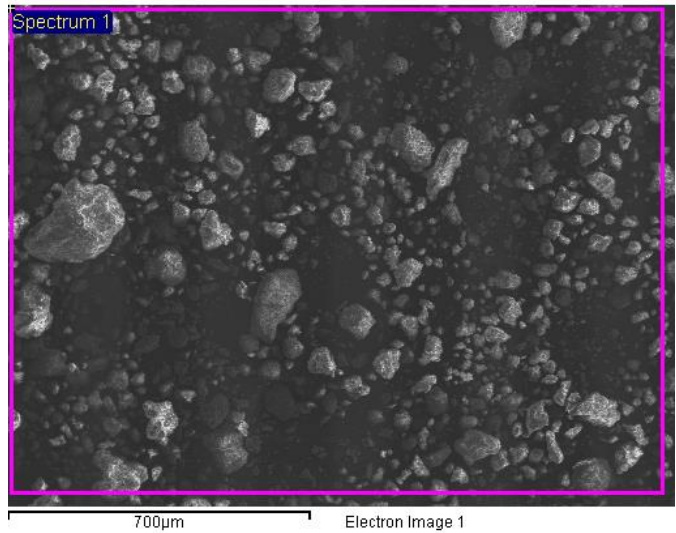
Spectrum processing :  
 Peak possibly omitted : 2.305 keV

Processing option : All elements analyzed (Normalised)  
 Number of iterations = 5

Standard :

- C CaCO3 1-jun-1999 12:00 AM
- O SiO2 1-jun-1999 12:00 AM
- Mg MgO 1-jun-1999 12:00 AM
- Al Al2O3 1-jun-1999 12:00 AM
- Si SiO2 1-jun-1999 12:00 AM
- K MAD-10 Feldspar 1-jun-1999 12:00 AM
- Ca Wollastonite 1-jun-1999 12:00 AM
- Ti Ti 1-jun-1999 12:00 AM
- Mn Mn 1-jun-1999 12:00 AM
- Fe Fe 1-jun-1999 12:00 AM

Element	Weight%	Atomic%
C K	42.53	53.30
O K	41.98	39.49
Mg K	0.60	0.37
Al K	2.35	1.31
Si K	6.19	3.32
K K	1.02	0.39
Ca K	3.43	1.29
Ti K	0.19	0.06
Mn K	0.07	0.02
Fe K	1.65	0.44
Totals	100.00	





# Project 1

Project: Project 1  
 Owner: Administrador  
 Site: Site of Interest 1

Sample: Sample G-2  
 Type: Default  
 ID:

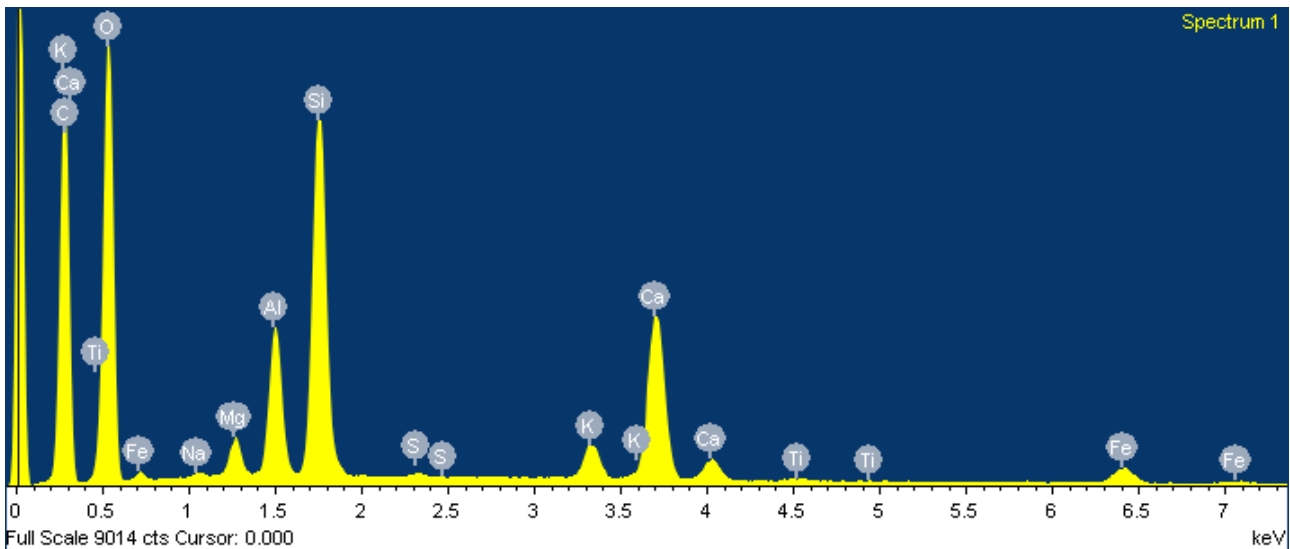
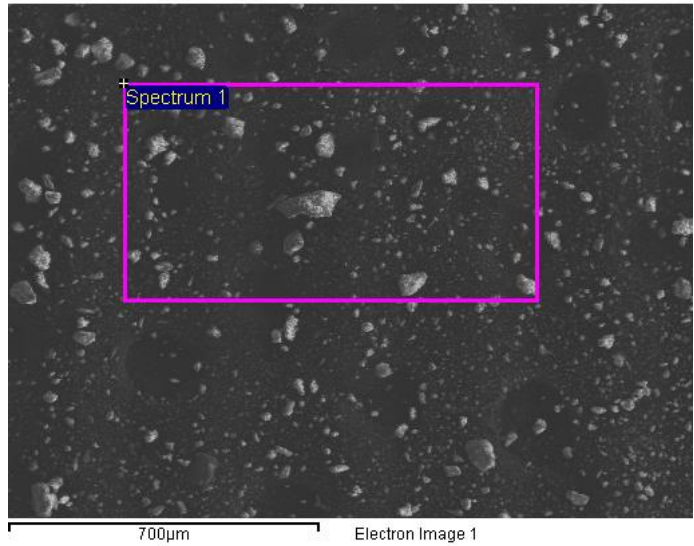
Spectrum processing :  
 No peaks omitted

Processing option : All elements analyzed (Normalised)  
 Number of iterations = 5

Standard :

- C CaCO3 1-jun-1999 12:00 AM
- O SiO2 1-jun-1999 12:00 AM
- Na Albite 1-jun-1999 12:00 AM
- Mg MgO 1-jun-1999 12:00 AM
- Al Al2O3 1-jun-1999 12:00 AM
- Si SiO2 1-jun-1999 12:00 AM
- S FeS2 1-jun-1999 12:00 AM
- K MAD-10 Feldspar 1-jun-1999 12:00 AM
- Ca Wollastonite 1-jun-1999 12:00 AM
- Ti Ti 1-jun-1999 12:00 AM
- Fe Fe 1-jun-1999 12:00 AM

Element	Weight%	Atomic%
C K	40.05	50.55
O K	44.54	42.21
Na K	0.11	0.07
Mg K	0.67	0.42
Al K	2.23	1.25
Si K	5.79	3.13
S K	0.07	0.03
K K	0.81	0.31
Ca K	4.37	1.65
Ti K	0.11	0.04
Fe K	1.24	0.34
Totals	100.00	



# Project 1 10/07/2019 18:48:15

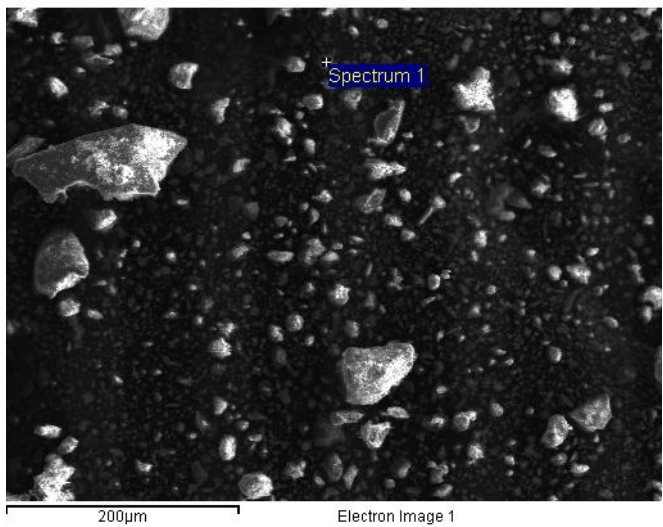
Project: Project 1  
 Owner: Administrador  
 Site: Site of Interest 2

Sample: Sample G-2  
 Type: Default  
 ID:

Spectrum processing :  
 Peak possibly omitted : 11.830 keV

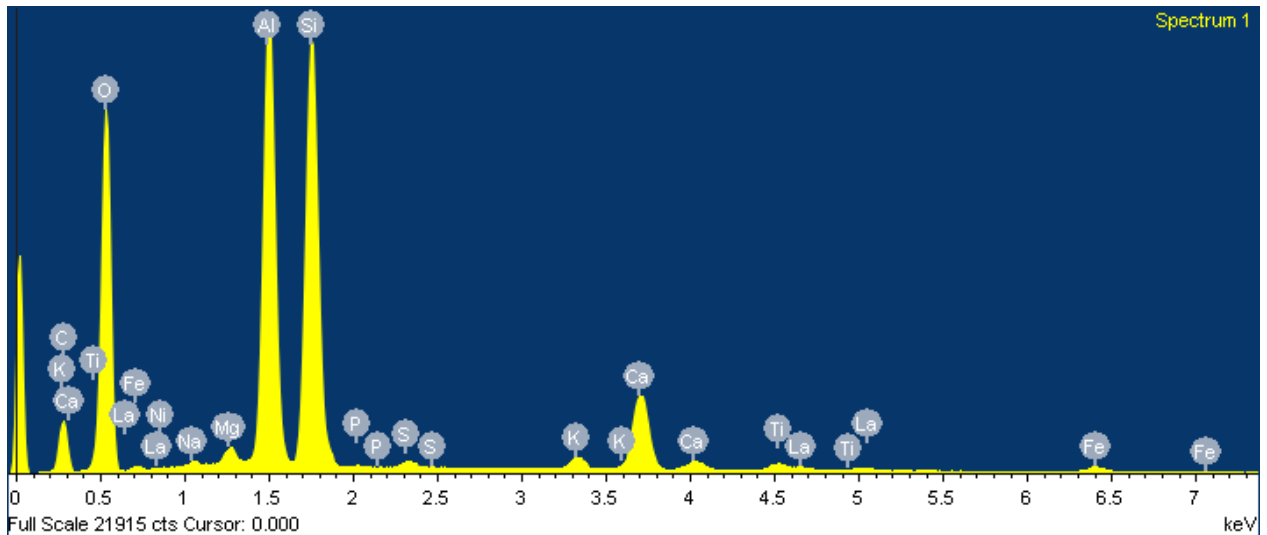
Processing option : All elements analyzed (Normalised)  
 Number of iterations = 5

- Standard :
- C CaCO3 1-jun-1999 12:00 AM
  - O SiO2 1-jun-1999 12:00 AM
  - Na Albite 1-jun-1999 12:00 AM
  - Mg MgO 1-jun-1999 12:00 AM
  - Al Al2O3 1-jun-1999 12:00 AM
  - Si SiO2 1-jun-1999 12:00 AM
  - P GaP 1-jun-1999 12:00 AM
  - S FeS2 1-jun-1999 12:00 AM
  - K MAD-10 Feldspar 1-jun-1999 12:00 AM
  - Ca Wollastonite 1-jun-1999 12:00 AM
  - Ti Ti 1-jun-1999 12:00 AM
  - Fe Fe 1-jun-1999 12:00 AM
  - Ni Ni 1-jun-1999 12:00 AM
  - La LaB6 1-jun-1999 12:00 AM



132

Element	Weight%	Atomic%
C K	17.66	25.98
O K	49.27	54.41
Na K	0.20	0.15
Mg K	0.50	0.36
Al K	12.08	7.91
Si K	13.68	8.61
P K	0.07	0.04
S K	0.27	0.15
K K	0.54	0.24
Ca K	3.68	1.62
Ti K	0.49	0.18
Fe K	0.71	0.23
Ni K	0.11	0.03
La L	0.74	0.09



Totals	100.00
--------	--------

# Project 1

10/07/2019 18:48:45

Project: Project 1  
 Owner: Administrador  
 Site: Site of Interest 1

Sample: Sample G-3  
 Type: Default  
 ID:

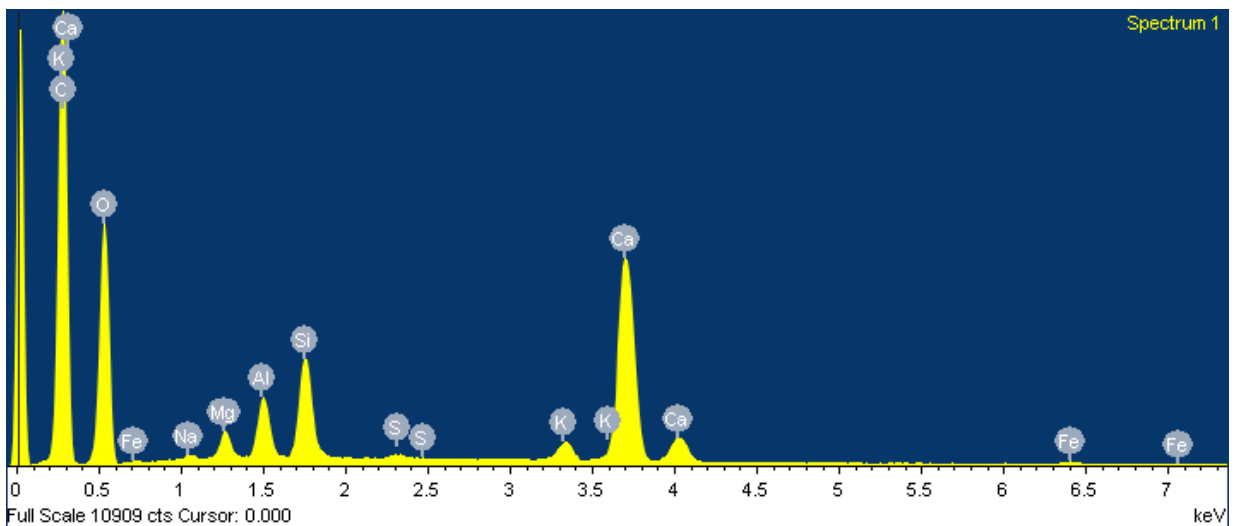
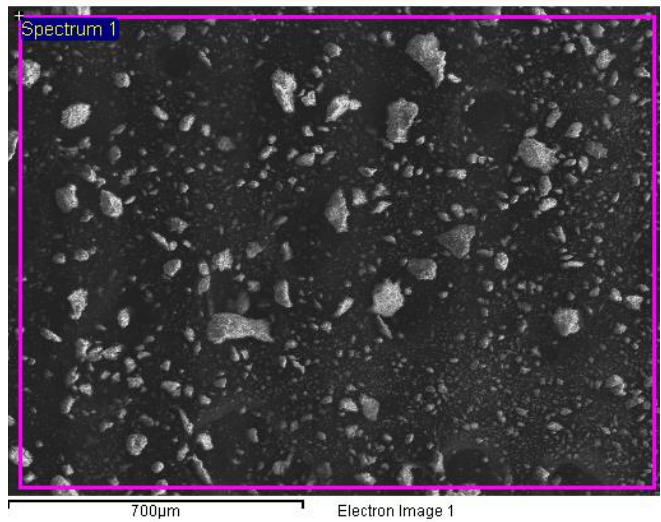
Spectrum processing :  
 No peaks omitted

Processing option : All elements analyzed (Normalised)  
 Number of iterations = 4

Standard :

- C CaCO3 1-jun-1999 12:00 AM
- O SiO2 1-jun-1999 12:00 AM
- Na Albite 1-jun-1999 12:00 AM
- Mg MgO 1-jun-1999 12:00 AM
- Al Al2O3 1-jun-1999 12:00 AM
- Si SiO2 1-jun-1999 12:00 AM
- S FeS2 1-jun-1999 12:00 AM
- K MAD-10 Feldspar 1-jun-1999 12:00 AM
- Ca Wollastonite 1-jun-1999 12:00 AM
- Fe Fe 1-jun-1999 12:00 AM

Element	Weight%	Atomic%
C K	48.10	58.64
O K	39.39	36.05
Na K	0.18	0.11
Mg K	0.65	0.39
Al K	1.24	0.68
Si K	2.10	1.10
S K	0.10	0.05
K K	0.61	0.23
Ca K	7.36	2.69
Fe K	0.28	0.07
Totals	100.00	



## Project 1

10/07/2019 18:49:31

Project: Project 1  
 Owner: Administrador  
 Site: Site of Interest 2

Sample: Sample G-3  
 Type: Default  
 ID:

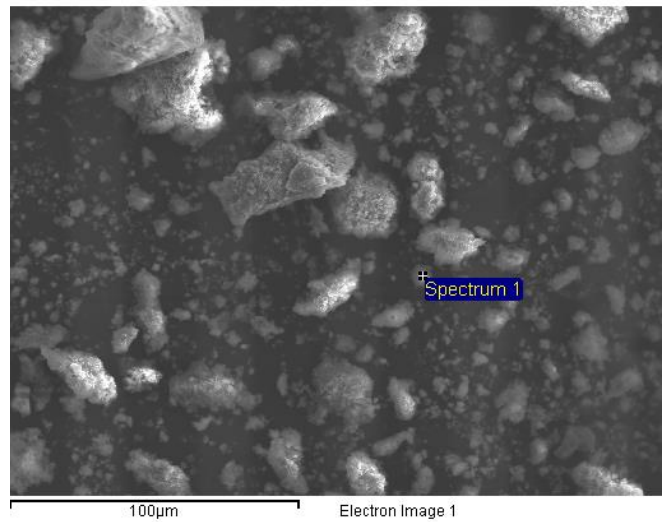
Spectrum processing :  
 No peaks omitted

Processing option : All elements analyzed (Normalised)  
 Number of iterations = 3

Standard :

C CaCO3 1-jun-1999 12:00 AM  
 O SiO2 1-jun-1999 12:00 AM  
 Mg MgO 1-jun-1999 12:00 AM  
 Al Al2O3 1-jun-1999 12:00 AM  
 Si SiO2 1-jun-1999 12:00 AM  
 S FeS2 1-jun-1999 12:00 AM  
 K MAD-10 Feldspar 1-jun-1999 12:00 AM  
 Ca Wollastonite 1-jun-1999 12:00 AM  
 Fe Fe 1-jun-1999 12:00 AM  
 Sn Sn 1-jun-1999 12:00 AM

Element	Weight%	Atomic%
C K	21.62	34.92
O K	35.78	43.39
Mg K	0.91	0.73
Al K	1.58	1.14
Si K	2.93	2.02
S K	0.17	0.10
K K	1.22	0.61
Ca K	34.83	16.86
Fe K	0.39	0.14
Sn L	0.56	0.09
Totals	100.00	



135

