

Morteros

Recomendaciones técnicas para el estudio de morteros

La conservación de construcciones históricas está requiriendo desde hace tiempo el empleo de morteros aptos para este tipo de intervenciones. Los morteros de cemento Pórtland han resultado ineficaces por lo que se hace necesario retomar las antiguas técnicas de elaboración de los morteros de cal, actualmente olvidadas. Esto requiere el establecimiento de una metodología de estudio, que en muchos casos coincidirá con la usada para la piedra natural pero que en otras ocasiones tendrá características particulares definidas para este tipo de material (caracterización del árido, del ligante, etc.). Los morteros de restauración se deben estudiar no sólo desde el punto de vista de su caracterización, sino también desde la óptica de su compatibilidad con los materiales históricos

Definición de las condiciones que deben cumplir los estudios previos aplicados a morteros

El estudio de morteros se puede abordar desde dos vertientes diferentes, como morteros históricos y como morteros de restauración. Se propone una metodología que permita la investigación paralela sobre el mortero antiguo y de restauración, estableciendo una relación lineal entre sus características y cronología. A la hora de definir las características del mortero, se deben establecer en función del estado en el que normalmente se encuentra (EN-998-2/04): estado plástico (si el caso lo requiere) y endurecido, de forma que se pueda abordar la investigación sobre las características técnicas de los morteros antiguos, la determinación de las materias primas y las mezclas empleadas, la identificación de los parámetros físico-químicos característicos y la datación.

Technical recommendations for the study of mortars

For many years now, the conservation of historical buildings has required the use of mortar suitable for this type of work. Portland cement mortars have proven ineffective in this sense, prompting the need to recover old, forgotten techniques for preparing lime mortar. This requires the establishment of a study methodology, which will often combine techniques used for natural stone but may sometimes have specific characteristics defined for this type of material (characterisation of the aggregate, binder, etc.). Restoration mortars must be studied not just in terms of their characterisation but also from the standpoint of their compatibility with historical materials.

Definition of the conditions governing preliminary studies applied to mortars

Mortars may be studied from two different angles: as historical mortars or as restoration mortars. A methodology is proposed that enables old mortar and restoration mortar to be studied simultaneously, establishing a linear relationship between their characteristics and chronology. When defining the characteristics of mortar, these must be determined according to the normal conditions of mortar (EN-998-2/04) - plastic state (whenever required) and hardened - in order to study the following aspects: research into the technical characteristics of old mortars, determination of the raw materials and mixtures used, identification of the characteristic physical-chemical parameters and dating.

Recomendaciones técnicas para el estudio de morteros¹

El presente capítulo aborda el estudio de los morteros, tanto los originales de construcciones históricas como los nuevos materiales a utilizar en restauración. Se recomendarán los métodos a emplear para su caracterización (composición mineralógica, propiedades físicas, etc.), que en muchos casos coincidirán con los usados para la piedra natural, pero que en otras ocasiones tendrán características particulares definidas para este material (caracterización de árido y del ligante, etc.). Los morteros de restauración se estudiarán no sólo desde el punto de vista de su caracterización, sino también desde la óptica de su compatibilidad con los materiales históricos.

Los morteros, en general, son mezclas homogéneas de uno o más conglomerantes inorgánicos, áridos (arenas) y agua en proporciones adecuadas, pudiendo contener, además, aditivos (GASPAR, 1996). El resultado final es un material compuesto por una serie de granos embebidos en una matriz de naturaleza variable, con una textura semejante a la que presentan las rocas sedimentarias.

Dentro del término mortero se incluyen en la actualidad todos los materiales que se emplean en los trabajos de albañilería: morteros de construcción de obras de fábrica, morteros de capa fina y morteros ligeros, así como trabajos de revocos externos y enlucidos internos (GASPAR, 1996). Su función es enlazar y consolidar unidades de albañilería en una masa monolítica, rellenando grietas y espacios vacíos, actuando como una barrera impermeable que evite la entrada de agua, proporcionando suficiente resistencia frente a los agentes de alteración externos.

Los morteros, según su función, pueden ser de fábrica o de revestimiento; atendiendo a la naturaleza del aglomerante, se pueden clasificar como morteros de barro, de yeso, de cemento, de cal y morteros bastardos.

El uso del mortero supuso un avance importante en la técnica de construcción y se consiguió cuando tuvo lugar el descubrimiento del aglomerante y su mezcla con otros componentes (áridos, aditivos, agua, etc.), con lo que se obtenía un material capaz de endurecer y comportarse como un material pétreo natural. Estos compo-

nentes deben estar en una proporción que permita que la mezcla sea trabajable, cuando esté fresca, con propiedades físico-mecánicas aceptables, durable, al endurecer, y con buena adherencia al transformarse en un material coherente.

A la hora de definir las características del mortero, se deben de establecer en función del estado en el que normalmente se encuentra (UNE-EN-998-2/04): estado plástico y endurecido. La trabajabilidad es la propiedad más característica del mortero en estado plástico y se define como la propiedad que permite al albañil asegurar una adherencia satisfactoria con el soporte y trabajar su superficie (Rilem MR I-R1/82). La trabajabilidad va a depender fundamentalmente de la relación aglomerante/agregado y contenido en agua.

Las propiedades que definen las características del mortero endurecido vienen dadas por su resistencia a compresión y a flexión, que a su vez va a depender de su capacidad de retención de agua.

Las materias primas tienen gran importancia en el proceso de fabricación porque de sus características depende, en gran parte, la calidad del producto resultante. Así el aglomerante es el componente que dota a este material de la capacidad de endurecer y a la vez hacerlo trabajable y plastificante, y el árido es el componente granular cuya finalidad es estabilizar el volumen, hacer de relleno y disminuir la retracción del mortero durante el secado.

Los aditivos son sustancias que se agregan al mortero para modificar sus propiedades como disminuir o aumentar la porosidad del material, facilitar la plasticidad, y/o aumentar el grado de consistencia y durabilidad. Pueden ser de naturaleza inorgánica (entre los más frecuentes se encuentran las arcillas, tejo, fragmentos de ladrillo, puzolanas naturales o artificiales), orgánica (sangre animal, leche, huevos, clara de huevo, goma arábiga, estiércol, carbón y azúcar) (tabla 1) y, por último, sintéticos (resinas, polímeros acrílicos, fracciones de petróleo, acrilonitrilos, benzotriazoles, siliconas, ácidos carboxílicos, hidroxilados, polivinilos, etc.).

Los aditivos inorgánicos se han usado tradicionalmente con la finalidad de dar un carácter hidráulico al mortero. El tejo juega un papel importante en el endurecimiento ya que su presencia, al ser un material poroso, favorece el acceso de CO₂ y alivia las presiones generadas durante la ruptura de las mezclas endurecidas.

La identificación de componentes minoritarios, en morteros antiguos, nos puede aportar una información muy valiosa sobre las características del material. En este sentido la presencia de sílice disuelta y óxidos de Fe y Al puede ser indicativa de actividad puzolánica. La presencia de sales solubles en forma de cationes alcalinos (Na⁺, K⁺) y aniones (Cl⁻, NO₃⁻, SO₄⁻² y, en menor proporción, F⁻) puede poner de manifiesto la presencia de sales y fenómenos de alteración. Los elementos traza de naturaleza metálicos (que se encuentran en partes por millón o billón) pueden ser indicativos de la cantera de procedencia del material (tanto del ligante como del agregado).

Objetivos

Los morteros han cubierto una etapa fundamental en la construcción de edificios y monumentos, y más recientemente en su rehabilitación, por diversas razones, entre las que cabe destacar su carácter físico-químico, estético e histórico.

La fabricación de morteros ha experimentado cambios importantes, pasando de una fabricación artesanal a

una industrial, utilizando productos cada vez más elaborados. En este avance las formas tradicionales de fabricación de morteros han quedado olvidadas. Por esta razón resulta necesario revitalizar determinadas actividades en este campo que permitan reproducir las técnicas operativas del pasado que, por otra parte, suponen un gran aporte de conocimientos empíricos que es preciso traducir científicamente. Las restauraciones se articulan y toman rigor con la ayuda de un profundo conocimiento científico que aclarará muchos aspectos de la complejidad de su puesta en obra. Por tanto, nos interesa conocer las técnicas históricas para desvelar aspectos restaurativos y conocer sus complejidades. En este sentido los objetivos del estudio de este material se centran en los siguientes aspectos: por un lado, en la recopilación de información a través de fuentes históricas sobre este tipo de materiales e investigación paralela con métodos de análisis adecuados, que nos pongan de manifiesto las técnicas antiguas de elaboración; por otro lado, la puesta a punto de un método de elaboración de morteros normalizados para uso en restauración, que permita un adecuado control de calidad sobre sus constituyentes.

Todo ello lleva implícito la definición de procedimientos analíticos estandarizados con los que se pueda medir su respuesta frente a los agentes de alteración (en este caso simulados en laboratorio), así como sus propiedades de resistencia mecánica, adhesión al sustrato, densidad, propiedades térmicas y compatibilidad con las fábricas tradicionales.

Tabla 1. Propiedades de los aditivos orgánicos

ADITIVOS	FUNCIONES
Clara de Huevo	Acelerador y retardador del fraguado, plastificante
Azúcar	Acelerador del fraguado, resistencia a la escarcha
Gelatina	Incrementador de la durabilidad
Gluten	Incrementador de la adherencia, retardador del tiempo de fraguado
Caseína	Incrementador de adherencia
Albúmina	" y plastificantes
Cerveza	Incrementador de durabilidad
Orina	" "
Leche	Plastificante
Aceite mineral	"
Glicerina	"
Glucosa	"
Sangre	Retardadores del tiempo de fraguado
Sacarina	" "

Campo de aplicación

Este material ha tenido innumerables formas de uso, de forma que se ha empleado como ligante o material de unión de piedras (sillares, mampuesto y ladrillos), para la fabricación de muros de altura y grosor importante, como parte del tapial, o como material para acabado de superficies. Por este motivo, en la actualidad lo encontramos formando parte de innumerables construcciones arqueológicas e históricas.

Aunque es poco lo que se sabe sobre este tipo de morteros, sí que se pueden establecer a priori las características que deben cumplir los morteros de restauración. De forma que deben ser lo más similares posibles al mortero que se va a sustituir, compatibles con los demás elementos de fábrica (morteros, piedra, ladrillo, etc.), de fácil trabajabilidad, rapidez y seguridad en su colocación, de características físico-mecánicas semejantes al resto de la fábrica, de compatibilidad, docilidad y mínima retracción, adherencia adecuada, permeabilidad baja, así como duraderos y resistentes a los agentes externos.

El estudio completo de este tipo de material (antiguo) lleva consigo un gran número de determinaciones que se pueden concretar en los siguientes puntos:

- **Preservación y deterioro.** La insuficiente cohesión y falta de adhesión que frecuentemente presenta este material en construcciones históricas es el fenómeno de deterioro más preocupante y puede estar originado por las características del material, como por el tipo de agregado utilizado, la relación aglomerante/agregado (lo que determina las propiedades físico-mecánicas del material), la composición mineralógica (incluidas las sales de contaminación, que juegan un papel decisivo en el proceso de deterioro) y las condiciones medioambientales.
- **Conservación y tratamiento.** Durante la intervención es importante que los morteros que se vayan a reponer sean compatibles con el antiguo mortero y con el resto de los materiales que constituyen la fábrica adyacente. En este sentido es importante la investigación paralela entre los morteros antiguos y de reparación en base a una metodología de estudio adecuada con la definición de técnicas y ensayos que resulten de interés para este tipo de material.
- **Tecnología y datación.** El estudio sobre la forma de elaboración de los morteros históricos puede contribuir a la

adecuada interpretación de la superposición de distintos materiales, facilitando en algunos casos su datación.

En arqueometría resulta muy interesante identificar la composición y textura de los diferentes morteros para conocer la tecnología de elaboración, procedencia de las materias primas y cronologías (información tecnológica y de tipo histórico), siempre que se pueda establecer una relación material-época. A estas conclusiones se puede llegar tras compaginar, previo a una valoración crítica, los datos obtenidos con las diversas técnicas de análisis y las hipótesis histórico-arqueológicas (DE LA TORRE, 1995). La metodología utilizada debe ser flexible para que pueda ser aplicada a cualquier tipo de mortero y a cada caso en concreto (ALESSANDRINI, 1985).

Los conocimientos empleados en construcción para el control de calidad de los morteros de cemento Pórtland resultan insuficientes en el campo de las intervenciones, surgiendo la necesidad de introducir los conocimientos de otras disciplinas (química analítica, física del estado sólido, dinámica, geología mineralógica-petrográfica, ingeniería, arquitectura, arqueología, historia, etc.), para coordinar de forma adecuada las distintas piezas de un rompecabezas que actualmente no está totalmente resuelto.

Esto obliga a estudiar la reactividad potencial de los materiales originales (piedra, ladrillo o mortero antiguo) con los componentes de la fase intersticial del mortero de intervención. En este sentido, los morteros de arena y cal tradicionales, de cara a su aplicación reciente en las intervenciones, pueden proporcionar resultados no satisfactorios por su difícil trabajabilidad, mala colocación en ambientes húmedos y su lenta y a veces incompleta carbonatación bajo la superficie, todo ello motivado por el desconocimiento que actualmente se tiene sobre las antiguas técnicas de elaboración de este tipo de materiales.

Por estas razones se hace necesaria la investigación sobre los procedimientos más adecuados.

Actualmente contamos con importantes trabajos de investigación en esta materia, así como la normativa en vigor existente. No obstante, la situación en la que nos encontramos, todavía poco definida, nos obliga a seguir investigando.

Definición de las condiciones que deben cumplir los estudios previos aplicados a los morteros

Antecedentes

Como se ha puesto de manifiesto en apartados anteriores, constituye un interesante reto científico-técnico la caracterización de morteros antiguos empleados en la construcción de obras monumentales, que implica (ÁLVAREZ GALINDO, 1997) el establecimiento de la formulación original, con indicación de las materias primas utilizadas y su tratamiento, en segundo lugar la datación de dichos morteros y, por último, la identificación de los cambios físico-químicos que experimentan con el paso del tiempo.

El conocimiento de todos estos aspectos podría explicar el distinto comportamiento en obra que normalmente observamos en este material.

Por otra parte, la mezcla de las materias primas utilizadas en la elaboración de morteros plantea un problema analítico desde el punto de vista de la conservación de edificios históricos, de forma que hace necesario conocer las características de los distintos componentes (áridos, aglutinantes y aditivos), su comportamiento una vez mezclados en estado plástico, el control de las modificaciones que experimentan durante el proceso de endurecimiento y carbonatación y, por último, su comportamiento una vez el mortero esté endurecido.

El interés por los morteros de intervención en edificios históricos y los primeros intentos de formular correctamente el problema y aclarar estrategias de investigación datan de 1981, con ocasión del simposio organizado por el ICCROM (Roma, 1981). Desde este momento los trabajos sobre el tema se han multiplicado y los especialistas tienen acceso a diversos métodos de investigación desarrollados ya ampliamente en la caracterización de la piedra.

Entre los temas de investigación de particular interés figura el desarrollo de métodos que permitan la precisa determinación de la calidad del aglomerante y la influencia en las propiedades físicas y mecánicas de los clásicos agregados como las puzolanas, teja molida, etc. Aunque en los últimos años hemos asistido a un avance importante, todavía hoy en día se pone de manifiesto

la imposibilidad de determinar satisfactoriamente estas propiedades en los morteros antiguos, en buenas condiciones o dañados, y cómo reemplazarlos.

El conocimiento ha progresado sin duda; no obstante, como se demuestra en un examen crítico, es difícil extrapolar desde estos estudios una metodología general para aplicar sobre este tipo de materiales. Esto es debido, por una parte, a la heterogeneidad del material y, como consecuencia, la diversidad de aspectos que hay que abordar para su adecuado conocimiento. La imposibilidad de poder extraer la cantidad necesaria de material en el edificio y no disponer de una cantera de extracción donde obtener el material necesario son los mayores inconvenientes que presenta el estudio de este material.

El tema ha sido tratado por diferentes autores tanto a nivel internacional como nacional. Las primeras investigaciones sobre morteros tradicionales (de cal) fueron realizadas por Jedrzejewska (1960). Esta autora establece una metodología de análisis comparativo preliminar con la que encontrar un significado histórico a las características de las muestras analizadas. Más tarde, Furlan et al. (1975, 1982, 1984 y 1990) proponen una forma de abordar el problema aunque no una metodología de estudio, mostrando la necesidad de utilizar morteros de cal en las intervenciones sobre edificios históricos, indicando el uso abusivo de los ligantes hidráulicos modernos en este tipo de edificaciones, partiendo de la base de que se trata de un material no suficientemente experimentado cuyos efectos eran por entonces poco conocidos. Ponen de manifiesto las ventajas de los morteros de cal y la necesidad de ensayar los materiales de esta naturaleza que se vayan a utilizar en las intervenciones de carácter histórico.

La alteración que normalmente observamos en estas construcciones históricas, en muchos casos, se debe a la interacción química que se produce al ponerse en contacto los morteros de cemento portland (utilizados en intervenciones recientes) con los materiales de fábrica original (piedra, ladrillo y mortero antiguo), siendo la reacción alcalina de la sílice amorfa y las sales con formación de la etringuita y thaumasita las causantes del deterioro,

Tabla 2. Áreas de investigación sobre el estudio de morteros y su aplicación en patrimonio (Hansen et al., 2003)

Conservación	Conservación de los morteros de cal	<ul style="list-style-type: none">> Diagnóstico: establecimiento de objetivos y métodos para la adecuada conservación de este tipo de materiales> Investigación documental: recogida de información para abordar la fase de diagnóstico y tratamiento> Conservación y tratamiento: investigación sobre morteros de cal de cara a su uso como métodos de tratamiento para la conservación de edificios construidos con fábricas tradicionales de piedra, ladrillo, etc.
Historia	Conocimiento sobre los morteros de cal y uso a lo largo de la historia	<ul style="list-style-type: none">> Contexto histórico: emplazamiento cronológico y geográfico del uso de estos morteros históricos> Técnicas antiguas de elaboración: recopilación de información sobre las formas de elaboración, composición, características y uso de los morteros de cal a lo largo de la historia
Caracterización y análisis	Investigación científica a través del empleo de técnicas de análisis adecuadas para la determinación de la composición y propiedades físicas de los morteros	<ul style="list-style-type: none">> Composición global de los morteros: identificación de los distintos componentes en una muestra de mortero o referido a la mezcla utilizada durante el proceso de elaboración> Técnicas de análisis: selección de las técnicas de análisis más adecuadas para la completa caracterización de estos materiales> Investigación sobre el proceso de elaboración: incluye identificación de la naturaleza de las materias primas (características de la cal y los áridos) y las proporciones en que se encuentran, así como el proceso de elaboración de los morteros> Aditivos: investigación de los distintos aditivos utilizados en la elaboración de los morteros y cómo inciden en las propiedades y comportamiento final del material. Su análisis puede requerir el empleo de técnicas especiales> Modelos: comportamiento físico y mecánico de los morteros de cal mediante modelos simulados en laboratorio> Textura: análisis sobre su organización espacial, morfologías cristalinas, relación de sus componente (agregado/matriz o aglomerante)
Comportamiento	Refleja las modificaciones que experimenta las propiedades del material con el paso del tiempo	<ul style="list-style-type: none">> Ensayos de envejecimiento acelerado: información sobre el deterioro de este material al ser sometido a factores medioambientales simulados en laboratorio> Formas de alteración y deterioro: identificación de los agentes, mecanismos y procesos de alteración que afectan a estos materiales> Durabilidad: comportamiento de los morteros frente a la exposición de factores de alteración> Exposición: comportamiento de los morteros frente a agentes medioambientales (contaminación, agua, etc.)> Propiedades mecánicas: comportamiento mecánico de los morteros de cal> Normativa: información sobre los procesos o valores de referencia usados para evaluar las propiedades de los morteros de cal
Tecnología	Incluye recopilación de información sobre el proceso de obtención de la cal, elaboración de los morteros, su evolución en el tiempo y la investigación sobre las formas tradicionales de elaboración	<ul style="list-style-type: none">> Procesos de obtención de la cal: calcinación y apagado de la cal> Selección de materias primas: incluye los requerimientos que deben cumplir estos materiales> Aplicación del producto: características del proceso de elaboración, contenido de los componentes y puesta en obra> Proceso de endurecimiento y carbonatación: evolución y control del proceso de carbonatación del mortero con el tiempo

actuando el agua como elemento condicionante de estas reacciones (PERONI et al., 1981; COLLEPARDI, 1990).

Hay autores que proponen una serie de técnicas y ensayos para determinar la composición de los morteros y su comportamiento: análisis químicos, mineralógico-petrográfico, ensayos mecánicos, distribución de la porosidad, propiedades hídricas y mecánicas (entre otros, PERONI et al., 1981; ALESSANDRINI et al., 1992; MARCHESE et al., 1983; RASSONEUX et al., 1989; CHAROLA et al., 1998; MEUCCI et al., 1981; BLANCO-VAREDA et al., 1992; HENRIQUES et al., 2000).

El interés de la comunidad científica por la investigación sobre estos materiales se pone de manifiesto en la recopilación bibliográfica llevada a cabo por Hansen et al. (2003), agrupada por las diferentes áreas de investigación que se han venido desarrollado en los últimos años, claramente relacionadas entre sí (tabla 2). De acuerdo con los contenidos de la tabla 2, la investigación sobre morteros se concreta en las siguientes áreas de actuación:

- Evaluación y verificación de una metodología adecuada para la identificación composicional (química y mineralógica), caracterización física (propiedades físicas y mecánicas) y estado de conservación de este material.
- Tecnología y datación. El conocimiento de la tecnología de elaboración de los morteros puede contribuir a la adecuada interpretación de los Bienes Inmuebles, facilitando en algunos casos su datación.
- Investigación de los efectos de la práctica tradicional (proceso de elaboración y utilización de determinados aditivos) para estimar la formulación del proceso de elaboración e influencia de la composición en las propiedades de estos materiales de cara a su durabilidad, con la finalidad de crear morteros aptos para las intervenciones. Las aportaciones de la investigación científica apoyada en el empleo de técnicas de análisis y ensayos en laboratorio estandarizados permitirán reducir el riesgo de utilizar morteros inadecuados incrementando el éxito de las intervenciones.

En este sentido, la metodología debe incluir una fase previa que tenga en cuenta los siguientes aspectos (TORRE LÓPEZ, 1994): por un lado, la observación detallada del monumento y toma de muestras seleccionando lugares que presenten importantes indicios de alteración y zonas donde el material original esté en buenas

condiciones; y, por otro, la documentación bibliográfica acerca de la historia del edificio. Esta información previa permite la programación del muestreo, que incluye la toma de muestras sobre materiales originales y posibles intervenciones posteriores.

Por otra parte, la metodología a aplicar debe estar en función de los objetivos, estableciendo una relación directa entre los resultados obtenidos con las distintas técnicas de análisis seleccionadas, la cronología del material y su tecnología de elaboración (tabla 3).

En el análisis de morteros antiguos es importante llevar a cabo un estudio comparativo entre morteros de distintos periodos constructivos para determinar la forma de fabricación y composición dentro de un mismo complejo arquitectónico (ONTIVEROS et al., 1996, 1999), de manera que se hace necesario utilizar parámetros que permitan establecer patrones comparativos válidos (tabla 4).

En base a esto, las propuestas de intervención pueden llevar implícita una nueva fase de estudios en laboratorio para el diseño de las soluciones más adecuadas, sin excluir su carácter interdisciplinar. Lo recomendable es, en la medida que sea posible, la mínima intervención y solucionar el problema de origen.

Por esta razón los especialistas en materiales llevan ya algún tiempo investigando sobre la utilidad de la normativa existente (BSI, DIN, UNE, UNI, CEN, etc.), aplicada a morteros y hormigones de cemento, para su empleo en morteros aptos para este tipo de intervenciones y, en otros casos, la creada por algunas instituciones para este fin (Rilem, Normal, etc.).

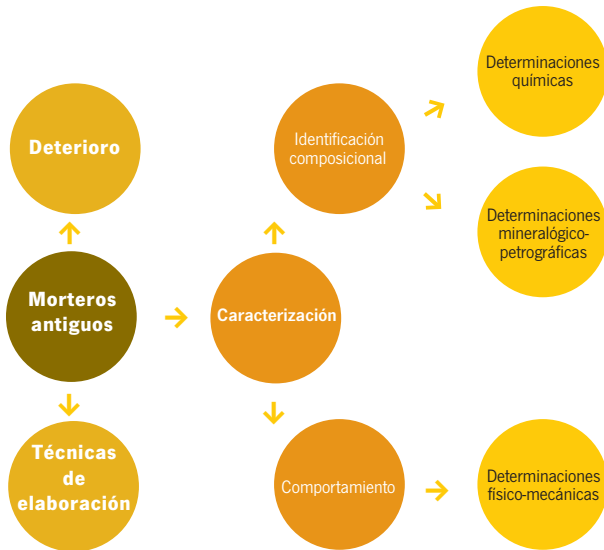
En los numerosos trabajos realizados sobre el tema se ha puesto de manifiesto la incidencia de la materia prima tipo de cal (propiedades físicas y químicas de la cal), características de los áridos (granulometrías, composición química, contenido en finos y material arcilloso) y tipos de aditivos (puzolanas artificiales, cerámicas machacadas, etc.)- en la elaboración de los morteros de cal y cómo influye en el proceso de curado y carbonatación (ALEJANDRE SÁNCHEZ, 1996; SEBASTIÁN PARDO et al., 1998; CAZALLA, 2000). A pesar de los innumerables trabajos que hay realizados, es poco lo que realmente se sabe acerca de la técnicas de elaboración antigua. Se es consciente del gran número de factores que incurre; entre ellos, la cal es el que despierta mayor interés, quizás porque es el componente que más incide en aspectos tan importantes como

Tabla 3. Metodología de estudio de morteros históricos

OBJETIVOS	METODOLOGÍA: TÉCNICAS Y ENSAYOS	
Características técnicas	<ul style="list-style-type: none"> > Análisis mineralógicos > Análisis morfológico y textural > Análisis químicos > Caracterización físico-química y mecánica 	<ul style="list-style-type: none"> > Difracción de RX, microscopía electrónica (SEM y EDX), análisis térmico-diferencial y termogravimétrico > Microscopía óptica, análisis de imágenes, análisis modal, análisis granulométrico del árido > Comparación de métodos químicos, espectrometría de infrarrojo, ICP > Estudio de la porosidad (porosimetría de mercurio), propiedades hídras y ensayos para determinar la resistencia a la alteración > Ensayos de resistencia mecánica (flexión, compresión y adherencia)
Cronología (datación)		> Método ¹⁴ C, análisis químicos y termoluminiscencia
Deterioro		> Difracción de RX, microscopía óptica, microscopía electrónica (SEM y EDX), análisis químico, porosimetría de mercurio

Tabla 4. Parámetros comparativos en el estudio de morteros históricos

ELEMENTOS A COMPARAR	CARACTERIZACIÓN EN EL MORTERO	INVESTIGACIÓN	INVESTIGACIÓN ARQUEOMÉTRICA
Cal	<ul style="list-style-type: none"> > Química > Mineralógica 	<ul style="list-style-type: none"> > Proceso de obtención > Tratamiento de la cal > Puesta en obra 	
Árido	<ul style="list-style-type: none"> > Composición > Granulometría 	<ul style="list-style-type: none"> > Proceso de selección respecto al material de origen 	Localización de las materias primas empleadas en el proceso de elaboración de los morteros
Dosificaciones	<ul style="list-style-type: none"> > Relación cal/árido > Proporción y composición del aditivo 	<ul style="list-style-type: none"> > Determinación de las dosificaciones de los distintos componentes durante el proceso de elaboración 	
Mortero	<ul style="list-style-type: none"> > Identificación de sus propiedades físicas y mecánicas 	<ul style="list-style-type: none"> > Incidencia de los distintos componentes en el comportamiento final 	



son el proceso de carbonatación, la adherencia pasta-árido y el comportamiento final del mortero.

Es importante conocer “cómo” y “por qué” las propiedades de los morteros de cal se ven afectadas por la variedad de técnicas, materiales y métodos implicados. Los posibles efectos del envejecimiento sobre las propiedades y uso de la cal son algunas de las consideraciones más importantes a tener en cuenta. Los estudios, en este sentido, se centran en conocer el momento en que la cal se encuentra apta para su uso y el efecto del sistema portlandita Ca(OH)_2 / H_2O sobre ella.

Aunque son numerosos los trabajos realizados acerca de la nucleación, disolución y evolución de la portlandita en el cemento portland y en otros materiales, en realidad se sabe poco acerca de los factores que condicionan la calidad del aglomerante en los morteros de cal. En esta línea deben ir encaminadas las investigaciones futuras si se quiere tener la clave que nos permita elaborar morteros adecuados que garanticen la correcta conservación de estos edificios.

La metodología de estudio observada en la bibliografía especializada presenta una gran dispersión de los distintos aspectos a estudiar. Sin embargo, ponen de manifiesto que el estudio de morteros antiguos no se debe abordar sólo desde el establecimiento de una metodología rígida que englobe de forma sistemática una serie de técnicas y ensayos para la determinación de las características del material, sino que además es importante la definición de una serie de parámetros (físicos, químicos y mineralógicos) que permitan conocer, por una parte, la tecnología de elaboración antigua y, por otra, los requerimientos de calidad que estos materiales precisan. Esto posibilitará la investigación y puesta a punto de nuevos materiales aptos para las intervenciones.

Por otra parte, la bibliografía consultada sobre este ámbito refleja la necesidad de procedimientos analíticos normalizados, con la correcta utilización de la tecnología existente adaptada a las necesidades del tema.

Como se ha puesto de manifiesto, los morteros en general constan de un endurecedor (aglomerante), una carga inerte (árido), un medio acuoso o plástico que le confiere trabajabilidad (agua) y una serie de compuestos que mejoran las propiedades de la mezcla (aditivos).

Teniendo esto en cuenta, la metodología a aplicar para el estudio de morteros debe abordar la caracterización

de estos componentes así como su comportamiento al generarse la mezcla y obtenerse el producto final.

Los expertos coinciden en que la correcta caracterización debe realizarse por métodos físico-químicos y mineralógicos-petrográficos, indicando la complejidad que trae consigo el estudio de este material y la necesidad de coordinar correctamente las distintas técnicas de análisis e instrumentales existentes. Estas técnicas de análisis y ensayos deben permitir estudiarlo a diferentes escalas y desde perspectivas diferentes: sobre la globalidad del material (bien endurecido o en estado plástico), o sobre sus componentes (áridos, aglomerante y aditivos), partiendo de la base de que todos estos aspectos son complementarios.

El fundamento de la metodología de los morteros antiguos está en función de los distintos elementos que vienen indicados en la figura 1.

Los aspectos a tratar sobre morteros de intervención están dirigidos al diseño de morteros compatibles con los materiales antiguos, por tanto sus determinaciones están más orientadas al control de los parámetros físicos de la pasta y sus características de cara a su comportamiento una vez puesto en obra. Los fundamentos metodológicos están recogidos en la figura 2.

Morteros antiguos

El estudio de morteros históricos, como para el caso de la piedra natural, debe llevar implícito una metodología de campo y otra de laboratorio que permitan de forma conjunta determinar los distintos interrogantes que nos plantea el estudio de este material.

Fase de campo

Al igual que vimos en el capítulo de la piedra natural, la fase de campo engloba los pasos previos a seguir en el estudio de este tipo de material antes de abordar su caracterización en el laboratorio. Dentro de las distintas etapas que incluye esta fase, cabe destacar, por su importancia, la inspección visual y posterior toma de muestras.

Inspección visual

La inspección visual *in situ* permite en un primer momento poner de manifiesto los aspectos macroscópicos de los

morteros, indicando su grado de homogeneidad, características, así como las patologías y formas de alteración que presentan. En base a esto es necesario conocer la funcionalidad de los morteros en el edificio (unión de elementos constructivos, sujeción y asentamiento de unidades de fábrica o reintegración de algunos elementos constructivos), la historiografía e historia material, e indicadores de alteración y patologías que presentan.

Con la observación de estos aspectos se puede establecer los criterios más adecuados para la toma de muestras. A veces la sola observación visual resulta insuficiente, por lo que resulta necesario utilizar una serie de técnicas auxiliares *in situ* (tabla 5) que pueden ser muy útiles para la estimación de su grado de deterioro e identificación, contribuyendo a un conocimiento a priori de los materiales.

Descripción de las técnicas y ensayos *in situ*

El empleo de estas técnicas, en muchos casos, puede ser de interés para la determinación de sus propiedades, si tenemos en cuenta la problemática que plantean estos materiales en lo que se refiere a la imposibilidad de extraer la cantidad necesaria para llevar a cabo la caracterización completa en laboratorio.

1) Ensayos no destructivos

Con el uso de las técnicas no destructivas (TAVARES et al., 2005) se consigue poner de manifiesto a priori las características físicas en el interior o sobre la superficie de estos materiales sin deteriorarlos.

Dentro de este grupo de ensayos podemos destacar los siguientes métodos:

a) Ensayo de permeabilidad al agua a baja presión. El método consiste en medir la cantidad de agua absorbida por la superficie de estos materiales en función del tiempo. Este ensayo puede realizarse también en laboratorio Normal 44/93. En caso de que el ensayo se realice *in situ* se requiere de una superficie mínima de 25 cm² y un espesor superior a 2 cm. El procedimiento del ensayo se basa en la metodología adoptada por Rilem 25-PEM (1980), que consiste básicamente en fijar un conjunto de pequeños tubos graduados en forma de pipa sobre la zona de la pared que se pretende estudiar.

La medida de la permeabilidad al agua a través de este método permite valorar cualitativamente el estado en el que se encuentra el mortero y su respuesta frente a las agresiones del medio ambiente.

b) Ultrasonidos. Las variaciones de la velocidad de transmisión de vibraciones acústicas (de la misma naturaleza que el sonido pero de frecuencia superior) a través de este tipo de material permiten detectar variaciones estructurales. La ralentización de la velocidad, dependiendo de las zonas inspeccionadas, refleja pérdidas de resistencia mecánica, incremento de la porosidad y fenómenos de alteración en el material (desarrollo de fisuraciones, disgregaciones, presencia de sales, grado de humedad, etc.). Sin embargo la interpretación de los resultados se debe hacer con cuidado ya que un mortero con importante contenido en sales y muy saturado en agua puede dar velocidades de transmisión mayores, ya que estas ondas se transmiten mejor en el agua o material sólido que en el vacío.

c) Termografía de infrarrojo. La técnica se fundamenta en la transferencia de calor, como energía en tránsito,



debido a diferencias de temperatura. El calor es una propiedad intangible que no podemos medir de forma directa sino sólo por sus efectos en los cuerpos a través de cambios de la temperatura. La velocidad de calentamiento o enfriamiento (la diferencia genera contraste) depende de las propiedades térmicas, estado físico, tamaño y naturaleza del producto, así como del mecanismo de transferencia.

La transferencia puede ser por conducción, convección, radiación o por sus combinaciones. Esta técnica permite evaluar las tres formas de transferencia de calor mediante la generación de una imagen cuya lectura posibilita detectar las características que presenta el material: espesor de las distintas capas de mortero aplicadas y discriminación entre distintos litotipos, falta de adhesión de las capas al sustrato, porosidad del material, pérdida de material en algunos puntos, desarrollo de costras de alteración, existencia de vacíos, oclusiones de aire, discontinuidades, fisuras y deformaciones.

d) Endoscopia. Es una técnica óptica que se emplea para inspeccionar áreas que no son directamente observables al ojo humano. En edificios antiguos este método tiene diversas aplicaciones como la detección de las degradaciones en el interior de las fábricas de albañilería o de elementos metálicos que provoquen la degradación de las estructuras, así como la existencia de fisuras en el interior del material.

e) Humidímetro portátil. Este aparato de uso sencillo mide el contenido en agua de las paredes a través de la

introducción de electrodos en forma de agujas o sondas. Aunque se trata de una técnica poco precisa que maneja datos comparativos (vinculada al uso de tablas convertidoras), puede ser bastante útil para detectar zonas con elevado contenido en humedad.

f) Identificación y determinación de sales solubles. Existen métodos rápidos que de forma preliminar relacionan las sales disueltas en el agua con las lesiones observadas en el material. En este sentido se utilizan ensayos microquímicos, basados en reacciones químicas, a través de los cuales se puede detectar la presencia de aniones de sulfatos, cloruros, nitratos, etc. Dentro de estos ensayos podemos destacar el *ensayo strip*, para identificar iones específicos, o el *ensayo Kits* (calorimétricos), para revelar la presencia de ciertas sales a través de la intensidad del color que presentan.

2) Ensayos destructivos y/o poco destructivos

a) Ensayos de resistencia superficial. Consiste en hacer impactar una bola de 50 mm de diámetro o un elemento cortante sobre la superficie del material. La resistencia se evalúa a través del diámetro de la marca producida en la superficie del material.

b) Ensayo de penetración controlada. Este ensayo consiste en provocar la penetración de un punzón de acero, con una escala graduada en milímetros, a través de varios impactos de energía constante. Mide de forma

Tabla 5. Metodología de campo para el diagnóstico de morteros y enlucidos en edificios históricos

ESTADO DE CONSERVACIÓN		
Observación general del edificio y registros	Conocimiento global del edificio	<ul style="list-style-type: none"> > Investigación histórica (época) > Identificación visual de los materiales > Condiciones ambientales del edificio
	Registro fotográfico	<ul style="list-style-type: none"> > Fotografías con radiación visible (simples o macro, fotografías con luz rasante, fotogrametría) > Fotografías con radiación invisible (ultravioleta, infrarrojo, reflectografía y radiografías)
	Investigación cromática	<ul style="list-style-type: none"> > Investigación histórica > Toma de muestras
Métodos de ensayo	Técnicas no destructivas	<ul style="list-style-type: none"> > Permeabilidad al vapor de agua > Colorimetría > Ultrasonidos > Termografía de infrarrojo > Endoscopia > Humidímetro portátil > Identificación del contenido en sales
	Técnicas destructivas o poco destructivas	<ul style="list-style-type: none"> > Resistencia superficial > Penetración controlada > Cohesión > Ensayo de adherencia > Microperforación

cualitativa la resistencia a la penetración de cada capa (capas internas) y se logra una evaluación de su resistencia, directamente relacionada con su estado de conservación.

c) Ensayos de cohesión. Se pueden realizar bien con un disco metálico, que raya la superficie a lo largo de 15 cm con una fuerza cortante, o con una lija (abrasión) adaptada a superficies más friables. La evaluación tiene lugar midiendo la profundidad de la raya producida o por la cantidad de material extraída, que determinan la cohesión superficial de los morteros o enlucidos.

d) Ensayo de adherencia por tracción. Con este ensayo se puede evaluar la adherencia del revestimiento al soporte y el modo de rotura previsible. Este método presenta algunas limitaciones ya que sólo tiene algún significado en zonas bastante homogéneas y en revestimientos y soportes en relativo buen estado; en caso contrario, la dispersión de los resultados y la disgregación del mortero imposibilitan la evaluación.

e) Ensayo de microperforación. El ensayo consiste en la producción de una hendidura sobre la superficie del material y la medida de la distancia recorrida y la fuerza de la resistencia ofrecida por el material. Los valores de dureza a la perforación dependen directamente de la composición, humedad y grado de cohesión del material, así como de las características del aparato como son la velocidad de rotación y la fuerza de penetración utilizada.

Toma de muestras

La investigación sobre estos materiales requiere, como un paso inicial, la adecuada toma de muestras en el edificio y la sistematización y preparación de las mismas para su análisis en laboratorio. Esta fase debe realizarse con posterioridad a la inspección visual sobre el inmueble, para conocer la dispersión del material y la selección de la cantidad de muestra necesaria. De ahí la importancia de la recogida simultánea de información (documentación bibliográfica y fotográfica completa) que permita plantear correctamente las cuestiones a abordar: objetivos y aplicabilidad del estudio.

La toma de muestras se rige por el siguiente principio: las muestras aisladas y débilmente identificadas no tienen valor científico, ya que los resultados que se pueden obtener con la aplicación de distintas técnicas de análi-

sis no pueden resolver las cuestiones que en la práctica se nos plantean.

En este sentido la toma de muestras debe cumplir los siguientes requerimientos:

- La extracción de muestras debe realizarse con un número mínimo de tres muestras por tipo. Este número estará en función de la heterogeneidad del material y de las necesidades de la analítica. Esta cantidad según los distintos métodos puede oscilar entre 10 y 20 g o 100 y 500 g (MARTÍN PÉREZ, 1990).
- El registro de las muestras debe incluir la descripción, procedencia, sistema de toma de muestras, condiciones de conservación e información adicional.
- En la descripción se debe indicar la tipología, funcionalidad, características (disgregada o cohesionada) y estado de conservación (alterada o sana), así como su procedencia, situación en el inmueble acompañado de documentación gráfica, condiciones de exposición y materiales de contacto (piedra, ladrillo, etc.).
- El mortero es un material heterogéneo (árido-ligante-agua, más posibles aditivos) del que desconocemos a priori sus propiedades en conjunto y las características de sus componentes. Durante la preparación de las muestras, para su estudio en laboratorio, hay que partir de la base de que este material debe estudiarse como una unidad y como un conjunto de elementos. En este último caso se hace necesario separar, en la medida de lo posible, cada uno de sus componentes (árido-ligante) para conocer su proporción y características por separado.

Una vez cumplidos estos requerimientos se procederá al estudio en laboratorio, con la finalidad de caracterizar lo más ampliamente posible el material.

Fase de laboratorio

La caracterización de morteros aborda aspectos tan importantes como el estudio del ligante (naturaleza y proporción) y el árido. La microscopía óptica, junto con los análisis químicos y mineralógicos, son las técnicas más resolutivas para la caracterización del aglutinante. El estudio del árido es otro parámetro importante a la hora de caracterizar un mortero; interesa conocer su proporción, forma y tamaño. La granulometría es una propiedad

importante, que para el caso de morteros históricos presenta importantes limitaciones de cara a su determinación. Se tiene que proceder a la disolución del ligante con algún ácido, pero este procedimiento sólo es aplicable a morteros con árido de naturaleza exclusivamente silíceo. Otra posibilidad es proceder a la disgregación manual del mortero, con la limitación en cuanto a conseguir reducirlo a tu tamaño original. El estudio del árido a través de la microscopía óptica con tratamiento digital de imágenes puede ser un método adecuado en ambos casos.

La caracterización físico-mecánica de los morteros presenta ciertas limitaciones ya que muchas de estas determinaciones requieren una cantidad de material, con forma y tamaño normalizado, que la mayoría de las veces no se puede extraer del edificio.

Uno de los aspectos que más interesan en el estudio de este material es conocer su estado de conservación, y más concretamente cómo actúan los mecanismos y cómo se desarrollan los procesos de alteración en el material.

La datación de morteros sigue siendo un área poco definida, partiendo de la base de que los métodos clásicos de datación absoluta, por ejemplo el ^{14}C , no han dado ningún éxito completo al respecto. La literatura científica sigue apostando como mejor instrumento la datación relativa (correlación entre material-época), poniendo de manifiesto las limitaciones que este instrumento presenta (DE LA TORRE, 1994).

Descripción de las técnicas y ensayos

Análisis mineralógico-petrográfico

Dentro de este grupo se consideran las técnicas habitualmente utilizadas para la identificación mineralógica de los componentes inorgánicos de los morteros.

Difracción de rayos X

Para los fundamentos y el procedimiento, remitimos a la página 38.

Objetivos y campo de aplicación

Dentro de los distintos métodos experimentales de difracción de rayos X, el más útil para el análisis de morteros es el método de polvo cristalino. Este método permite identificar las fases minerales presentes en las

muestras de morteros (cuarzo, calcita, dolomita, portlandita, brucita, etc.) y asociarlas a la composición del árido, aglomerante, aditivos o sales de alteración, siempre que se haga una correlación adecuada de los resultados con otras técnicas (microscopía óptica, análisis químicos y SEM-EDX). Esta técnica ha sido ampliamente utilizada para la caracterización mineralógica de morteros antiguos por numerosos autores (MEUCCI, 1981; MASAZZA, 1981; ALESSANDRINI, 1983 y 1991; CHAROLA, 1984; MARCHESE, 1983; BELLO, 1988; RASSINEUX, 1989; GUTIÉRREZ-SOLANA, 1989; DESOYE, 1991; KAWIAK, 1991; DE LA TORRE, 1991; RELLER, 1992; MARTINET, 1992; PUERTAS, 1992; ONTIVEROS et al., 1996, 1999; etc.).

Para la identificación de la fracción arcilla, en el caso de que exista o esté en suficiente concentración, se utiliza el método de agregados orientados (Normal 34/91). Su identificación resulta interesante porque su presencia condiciona el comportamiento del material; al ser un material muy ávido al agua, este componente puede modificar de forma importante las propiedades físicas de los morteros.

Resultados

Los resultados obtenidos con esta técnica (figura 11, página 42) se concretan en dos aspectos: los componentes mineralógicos globales existentes en las muestras de morteros y su cuantificación con un error estimado del 5-10%.

La cuantificación de las distintas fases existentes en las muestras se basa en la intensidad de las líneas de difracción que está directamente relacionada con la cantidad de cada sustancia cristalina presente en la muestra, aunque también influyen otros factores (el tamaño de la partícula, grado de cristalinidad, orientación preferencial de algunas fases minerales, absorción de radiación, etc.).

A diferencia de la piedra, los resultados de la analítica tienen que ser interpretados de forma cuidadosa, debido a las características que presenta este material. En base a esto, previo al análisis, hay que tener en cuenta los aspectos texturales *a visu* (el tamaño del árido), que van a condicionar la cantidad de muestra a analizar, para que los datos reflejen de forma proporcional la composición global de las muestras. Algunos autores proponen eliminar los áridos de gran tamaño (DE LA TORRE, 1994) o bien eliminarlos totalmente y sólo analizar las fracciones finas (referida fundamentalmente al

ligante). En cualquier caso estos aspectos deben quedar claramente referidos en los resultados.

La técnica presenta ciertas limitaciones en el estudio de este material ya que, además de la composición global, interesa discriminar entre la composición de los componentes del mortero (árido y ligante), aspecto que a priori no se puede resolver sólo con esta técnica.

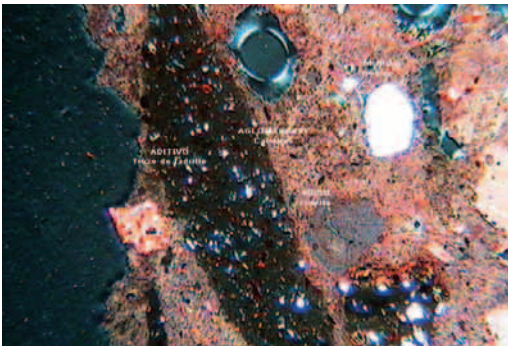
Microscopía óptica de luz transmitida

Para los fundamentos y procedimiento remitimos a la página 43.

Objetivos y campo de aplicación

El estudio textural mediante microscopía óptica de los morteros históricos abarca la identificación constitucional y la organización de los elementos que lo integran, incluyendo tanto elementos sólidos como espacios vacíos. Esta técnica se ha venido utilizando desde hace un siglo y medio para la caracterización de la piedra natural y dada su versatilidad ha sido utilizada para la caracterización de morteros antiguos (ALESSANDRINI, 1991; DE LA TORRE, 1992; LINDQVIST, 1993; ONTIVEROS, 1996; etc.).

La observación de los morteros en lámina delgada a través del microscopio petrográfico nos permite analizar los siguientes aspectos: composición de los áridos, matriz y, en algunos casos, aditivos; determinación del tamaño, forma del árido y su cuantificación (granulometría); estado de cristalinidad del aglomerante y fenómenos de disolución del mismo; estudio de la zona de contacto entre la matriz y el árido y grado de interacción; identificación de los componentes de alteración (sales); cuantificación de la macroporosidad del material, presencia de fisuras, pérdida del ligante y disgregaciones.



3. (10X). Identificación composicional del mortero a través de la microscopía óptica (aumento)

Si esta técnica se compagina con el análisis modal y digital de imágenes y de las fotografías obtenidas mediante el microscopio petrográfico (con un cuarteo de puntos por secciones o con un escáner de imagen fotográfica diferenciando las tonalidades de grises), se pueden hacer cuantificaciones bastante exactas de la proporción de los distintos componentes (relación agregado/ligante) y del tamaño del árido.

Resultados

Los resultados vienen dados a través de imágenes obtenidas por el microscopio óptico de luz transmitida (con nicóles paralelos o cruzados) que, tras una lectura especializada, pueden poner de manifiesto la existencia de los distintos componentes mineralógicos que constituyen el material así como sus aspectos texturales (ver objetivos) (figura 3).

El carácter cuantitativo de este método se complementa con los resultados obtenidos con otras técnicas como la difracción de rayos X, análisis químicos, SEM-EDX, etc. No obstante, la heterogeneidad de este tipo de materiales y la representatividad que puede suponer la observación parcial de una lámina delgada respecto a la globalidad del material hacen que los datos obtenidos sean considerados como semicuantitativos. La limitación de esta técnica está en que no identifica componentes orgánicos ni la naturaleza de los componentes microcristalinos.

Microscopía electrónica de barrido SEM

Para fundamentos y procedimiento remitimos a la p. 48.

Objetivos y campo de aplicación

Esta técnica permite la observación de los minerales presentes y su microtexturas. El microanálisis puntual o por microáreas de estos componentes puede desvelar aspectos sobre su tecnología de fabricación y estado de conservación. Ha sido utilizado ampliamente por distintos autores (ALESSANDRINI, 1983 y 1991; CHAROLA, 1984; MARCHESE, 1983; RASSINEUX, 1989; DESOYE, 1991; KAWIAK, 1991; DE LA TORRE et al., 1991; RELLER, 1992; MARTINET, 1992; PUERTAS, 1992; ONTIVEROS et al., 1999; etc.).

Estas observaciones se concretan en el grado de carbonatación de los morteros, la existencia de microfracturas (intra o intercristalinas), la interfase árido-ligante (fenómenos de reacción árido-ligante y grado de adhesión de la pasta), la evaluación del estado de conservación

mediante la observación y microanálisis de minerales de neoformación (sales) o esferas de contaminación, la acción del biodeterioro (presencia de algas y hongos) y su efecto sobre estos materiales, así como en la caracterización del sistema poroso mediante la observación de microporos. Además permite observar directamente los poros en “cuello de botella” (poros de gran tamaño con acceso pequeño) de gran importancia en el estudio del sistema poroso que no se pueden detectar con otras técnicas.

Esta técnica no permite hacer estudios cuantitativos desde el punto de vista textural debido a la baja cantidad de muestra que se puede analizar; sin embargo, es una técnica que complementa de forma importante a otras técnicas como la difracción de rayos X, microscopía óptica, análisis químicos, porosimetría de mercurio, contribuyendo de forma importante al conocimiento del material.

Resultados

Los resultados vienen dados a través de imágenes obtenidas mediante microscopio electrónico, que reflejan la micromorfología textural de las especies mineralógicas (figuras 4 y 5) y espectros de microanálisis químico.

Ensayos físico-mecánicos

La aplicación de una metodología para caracterizar de manera completa el comportamiento físico-mecánico en morteros antiguos es limitada debido a la falta de material del que normalmente se dispone y el volumen necesario de muestras que muchos de estos ensayos requieren. Alessandrini (1985) resalta que el gran interés que estos parámetros suscita en morteros de intervención decrece de forma importante en morteros antiguos, debido a que estos parámetros físicos están estrechamente relacionados con otras determinaciones (compo-

sición química y mineralógica) que sí se pueden determinar satisfactoriamente en estos materiales. A pesar de ello, algunos autores han puesto de manifiesto la posibilidad de llevar a cabo algunas determinaciones como la porosidad total, porosimetría de mercurio, permeabilidad al agua, permeabilidad al vapor de agua y resistencia a la alteración en atmósferas contaminantes, parámetros que nos pueden dar una información importante sobre las características físicas de estos materiales, aún en el caso de que las muestras no cumplan las condiciones normalizadas que requieren algunos ensayos.

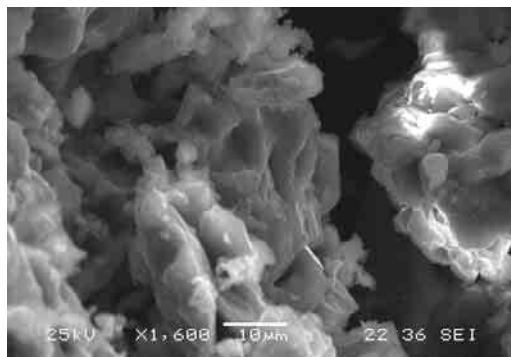
Densidad aparente y porosidad

El mortero, como todo cuerpo poroso, tiene dos densidades: la densidad real (densidad media de sus partículas sólidas) y la densidad aparente (teniendo en cuenta el volumen real de poros). La densidad aparente refleja el contenido total de porosidad del mortero (expresado en %) y es importante porque la porosidad condiciona la facilidad de circulación de agua y aire en su interior.

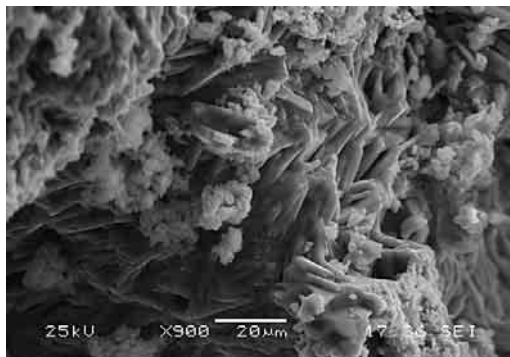
La densidad aparente en seco del mortero endurecido se determina dividiendo su masa seca por el volumen que ocupa. El procedimiento de ensayo viene descrito en la norma UNE-EN 1015-10 específica para morteros endurecidos (previamente elaborados en laboratorio), pero que se puede aplicar igualmente a morteros antiguos.

Procedimiento

El ensayo requiere moldes para elaborar probetas de tamaño normalizado 160x40x40 (UNE-EN 1015-11/00). Para el caso de morteros históricos se tiene que prescindir de estos requerimientos. El procedimiento tiene lugar en dos fases. La primera consiste en el secado a masa constante en la que la muestra se seca en una estufa a



4. Aspecto que presenta el aglomerante de cal en el mortero



5. Cristales de sulfato de calcio (yeso) en el seno del mortero

una temperatura de $70\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 5$ hasta masa constante (de acuerdo con los requerimientos de la norma). Se anota la masa de la muestra, $m_{s,sec}$ en kg con una exactitud aproximada de 0,1%. En segunda lugar, está la fase de determinación del volumen de la muestra por desplazamiento volumétrico, es decir, la muestra se sumerge en agua a $20\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2$ hasta que no se observe aumento de la masa aparente. La probeta húmeda se pesa una vez se ha eliminado el exceso de agua con un paño húmedo y se anota su masa saturada ($m_{s,sat}$) en kg, con una exactitud de 0,1%.

El volumen de la muestra se puede determinar por pesada hidrostática, determinando por este procedimiento la masa de la probeta sumergida ($m_{s,i}$), en m^3 , que se calcula por medio de la siguiente expresión:

$$V_s = \frac{m_{sat} - m_{si}}{\rho_w}$$

Resultados

De la anterior expresión, se deduce que la densidad de la muestra se calcula dividiendo la masa de la probeta ($m_{s,sec}$ en kg) entre el volumen de la probeta del mortero endurecido (V_s en m^3).

Permeabilidad al vapor de agua

Se puede seguir el ensayo descrito en la página 64 en base a la norma Normal 21/85 o Rilem 25 PEM.

Granulometría del árido

El estudio granulométrico del árido se puede realizar a través de la microscopía óptica, con ayuda del análisis digital de imágenes para cuantificar la proporción de áridos y la gradación por tamaños. Si el mortero lo permite, se puede proceder a disgregar y separar el árido del conglomerante y pasar a determinar la granulometría por tamizado de acuerdo con la norma UNE-EN 993-1/98 (el procedimiento se describe posteriormente en el apartado de áridos).

Porosimetría de mercurio

Para fundamento y procedimiento remitimos a la p. 59.

Objetivos y campo de aplicación

Esta técnica tiene una gran importancia en la caracterización de morteros, como en el caso de la piedra, ya que la

distribución del tamaño de los poros controla de forma importante el comportamiento en obra de este material (propiedades hídricas, permeabilidad al vapor de agua, etc.). La medición del tamaño de poro mediante esta técnica se calcula a través de modelo ideal (cilíndrico) que en la realidad, para este tipo de material, no se da. En este material son frecuentes los poros de tipo fisural y en "cuello de botella".

La distribución del tamaño de poro en morteros suele ser compleja ya que en ella incide un gran número de factores como el contenido y características de la cal, la presencia de material arcilloso, la distribución del tamaño de los áridos y el estado de conservación que pueda presentar el material.

Su estudio es complejo y los trabajos al respecto consultados nos ponen de manifiesto la necesidad de seguir investigando en este aspecto.

Métodos de análisis químico"

Los métodos de caracterización química de morteros persiguen la determinación de la composición química de la muestra, con mayor o menor exactitud, en función de los objetivos del trabajo y con medios o instrumentos más o menos complejos.

Los métodos químicos de análisis de morteros antiguos se fundamentan en los métodos tradicionales del análisis de cales y cementos (ALESSANDRINI, 1985; VOÏNOVITCH, 1988) tomando la muestra, en una primera aproximación, como una síntesis de elementos químicos.

La metodología analítica más simple propugna la disolución de la muestra en un ácido mineral, habitualmente ácido clorhídrico, a concentraciones y temperaturas diversas según los autores, valorando Ca, Mg, Al y Fe en la solución y expresando los resultados en óxidos, y también de la fracción de sílice (sílice soluble) que pasa a la disolución. El CO_2 unido a carbonatos se valora por calcimetría y, a través de la pérdida por calcinación, se determina el agua de absorción y de constitución y las sustancias orgánicas eventualmente presentes (ALESSANDRINI, 1985; MARTÍN, 1990).

Se han utilizado distintas metodologías de ataque, con ácidos minerales como HF (DE LA TORRE et al., 1992), HF y agua regia (SINGH, 1991), sin que se aprecien características diferentes en cuanto a la selectividad del ataque. También se ha postulado el empleo de HNO_3 ,

dando resultados parecidos a los del HCl, a excepción de los valores de aluminio, un poco más bajos con nítrico, y los de magnesio, algo superiores (DELOYE, 1979).

Por otra parte, la caracterización del árido está descuidada en muchos de los métodos propuestos, lo que supone un verdadero problema ya que se trata de una parte esencial del mortero (ALESSANDRINI, 1985).

Excede a los objetivos de este trabajo el detalle exhaustivo de las numerosas propuestas que aparecen en la bibliografía, analizando ventajas e inconvenientes de las mismas relativos al análisis de morteros antiguos. No obstante, es procedente dar referencia de los autores que han presentado algunas de las metodologías más citadas y empleadas (DELOYE, 1979; PUERTAS et al., 1992).

Si al elevado número de métodos de análisis posibles se une un (en ocasiones) importante volumen de muestras a estudiar, la obtención e interpretación de los resultados podría complicarse extraordinariamente.

Para evitar esta situación, se ha optado por seguir la metodología que aparece publicada y utilizada en las referencias que se citan (ÁLVAREZ et al., 1999; MONTOYA et al., 2004).

Objetivos/Campo de aplicación

Se persigue, a través de la metodología que se propone, completándola con ensayos de otro tipo (mineralógico-petrográfico o morfológico), clasificar, mediante una serie de ensayos rápidos, las distintas muestras de morteros antiguos que se hayan podido tomar del monumento objeto de estudios, basando el análisis en la obtención de tres valores: porcentaje de fracción soluble tras ataque con HCl (1:5) en caliente, porcentaje de residuo insoluble tras este ataque y porcentaje de CaCO_3 obtenido por vía calcimétrica.

Estos valores pueden representarse en un diagrama ternario (triangular) que permitirá apreciar los diferentes grupos de muestras, según la figura 6.

Un objetivo secundario perseguiría, en aquellos casos en que fuera necesario, la caracterización química completa de algunas muestras concretas o representativas, a través de los métodos clásicos que la Química Analítica ofrece para el análisis de cementos (tras disgregación de la muestra con carbonato sódico-bórax).

Resultados y procedimiento

- ★ Determinación del porcentaje de residuo insoluble en ácido clorhídrico (1:5) en caliente a baño maría.

Se deseca la muestra pulverizada a 105 °C en estufa hasta peso constante y se pesa con precisión, aproximadamente 1 gramo de muestra en un vaso de precipitados de 250 ml. Se ataca la muestra con 100 ml de HCl (1:5) previamente calentado a baño maría (80 °C). El vaso se sumerge en baño maría y se calienta durante 30 minutos, sometiéndolo después a agitación magnética durante 5 minutos.

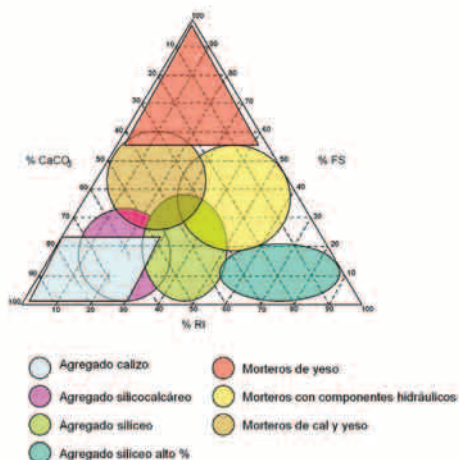
La solución resultante se filtra con succión a vacío a través de un crisol de placa filtrante previamente secado a 105 °C y tarado, secando éste en estufa a 105 °C con el residuo insoluble hasta alcanzar pesada constante. El filtrado se recoge y se lleva a un matraz aforado de 500 ml. Se enrasa con agua desionizada, conservándose después la solución en un frasco de polietileno.

Los cálculos a realizar son:

$$\% \text{ Residuo insoluble} =$$

$$\frac{c - c'}{m} \cdot 100$$

Donde **c** corresponde al peso del crisol con residuo insoluble, **c'** al peso del crisol tarado y **m** al peso inicial de muestra, en gramos.



6. Regiones aproximadas de tipos de morteros por su ubicación en el diagrama triangular

* Determinación de calcio y magnesio

Se toma una alícuota de 200 ml de la solución obtenida en 3.1.1, vertiéndola en un vaso de precipitados de 250 ml. En esta alícuota se va a proceder a la precipitación de hidróxidos de hierro y aluminio, que interfieren en la determinación de calcio y magnesio.

Se añade aproximadamente 1 g de cloruro amónico, colocando la disolución sobre placa calefactora. Antes de llegar al punto de ebullición se retira añadiendo unas gotas de indicador naranja de metilo, y se incorpora hidróxido amónico (1:2) hasta que la solución vire de rosa a amarillo pálido.

Se calienta otros 5 minutos, dejando reposar enfriando 5 minutos más. A continuación se filtra a través de un embudo con papel de filtro que retenga los hidróxidos precipitados. El filtrado se enrasa en un matraz aforado de 500 ml y se conserva en frasco de polietileno.

Se pipetea una alícuota de la solución anterior de 10 ml y se pasa a un erlenmeyer de 50 ml. Se añaden 10 ml de solución tampón de cloruro amónico/hidróxido amónico, pH=10, y unas gotas de indicador negro de eriocromo T, valorando con AEDT (0,01M, previamente titulada con solución patrón de calcio) mediante una bureta automática, anotando los ml de valorante empleados.

Otra alícuota de 10 ml se pasa a un erlenmeyer de 50 ml. Se añaden 10 ml de solución de KOH 1N, y una punta de espátula del indicador (murexida). Se valora con AEDT (0,01M, previamente titulada con solución patrón de calcio) mediante una bureta automática, anotando los ml de valorante empleados.

Los cálculos son:

$$\% \text{ CaO} = \frac{N}{1000} \cdot Vm \cdot f1 \cdot \frac{100}{m}$$

$$\% \text{ MgO} = \frac{N}{1000} \cdot (VnET - Vm) \cdot f2 \cdot \frac{100}{m}$$

Donde **Vm** son los ml de AEDT empleados con murexida, **VnET** los ml de AEDT empleados con negro de eriocromo T, **N** es la normalidad del AEDT (según titulación previa), **f** representa los factores de dilución y conversión a óxidos (f1= 7000; f2=5037,5) y **m** el peso inicial de la muestra en gramos.

* Determinación del porcentaje de CO₂ vía calcimétrica

Se seca la muestra pulverizada y el CaCO₃ patrón. Se pesan alrededor de 0,6 g de CaCO₃ con el fin de saturar la solución del calcímetro (se consigue disolviendo 1 g de bicarbonato sódico y 100 g de cloruro sódico en 350 ml de agua desionizada). Para saturar la solución calcimétrica se coloca en un erlenmeyer el patrón de CaCO₃, introduciéndose un tubo de calcímetro con 10 ml de HCl (1:1). Se acopla el tapón del calcímetro, agitando y dejando reposar 12 horas.

Para obtener la recta de calibrado se pesan con precisión CaCO₃, 0,05, 0,1, 0,2 y 0,3 gramos, realizando la lectura de desplazamiento del líquido por el CO₂ desprendido para los cuatro estándares.

Finalmente, se realiza el ensayo para la muestra, tras pesar aproximadamente 0,2 gramos de la misma con precisión.

Los cálculos son:

El porcentaje de CO₂ se calcula a través del porcentaje de CaCO₃ teórico contenido en la muestra, por extrapolación en una recta de calibrado con los estándares de CaCO₃. Esta recta representa en abscisas el volumen de dióxido de carbono desplazado (lectura del calcímetro) y en ordenadas el peso de CaCO₃ equivalente.

El resultado de la extrapolación (dado en gramos de CaCO₃) se convierte en porcentaje de CO₂ en la muestra inicial según:

$$\% \text{ CO}_2 = \frac{g}{m} \cdot 44$$

Donde **g** son los gramos de CaCO₃ extrapolados y **m** es el peso inicial de muestra en gramos.

Hasta aquí, en los apartados anteriores se han obtenidos los % de residuo insoluble, CaO y MgO. Suponiendo

que todo el magnesio de la muestra se encuentra como carbonato (posibilidad clásica en morteros de cales impuras o dolomíticas), el % de CO₂ atribuible al MgCO₃ se calcula a partir del dato de % MgO:

$$\% \text{CO}_2 \text{ relativo al MgCO}_3 = \frac{\text{MgO} \cdot 44}{40,3}$$

El restante CO₂ se asigna al CaCO₃, obteniéndose así el % de CaCO₃:

$$\% \text{CaCO}_3 = \frac{\text{CO}_2 \text{CaCO}_3 \cdot 100}{44}$$

Donde % CO₂ CaCO₃ = % CO₂ - % CO₂ relativo al MgCO₃

Los valores del porcentaje de residuo insoluble y porcentaje de carbonato de calcio se suman, y la diferencia hasta 100 se representa como porcentaje de elementos de la fracción soluble. Los tres valores se representan en un diagrama triangular comparativo.

• Determinación del porcentaje de sulfatos por gravimetría

Esta determinación sirve para morteros mixtos de cal y yeso, con idea de conocer el porcentaje de yeso en la muestra (que en las determinaciones anteriores aparecerá incluido en la fracción soluble).

Una alícuota de 100 ml procedente de la separación del residuo insoluble se incorpora a un vaso de precipitados de 250 ml, añadiéndose 10 ml de solución de BaCl₂ al 10% y calentando.

Se deja reposar 24 horas comprobando la precipitación completa del BaSO₄ por adición de una gota de BaCl₂ que no enturbia la disolución.

Se filtra a través de papel de filtro para gravimetría y se lava el precipitado con agua desionizada hasta ausencia de cloruros.

En un crisol previamente tarado se procede a la calcinación, primero en mechero, hasta que todo el papel de filtro se haya carbonizado, y después en el horno mufla a 900 °C durante 30 minutos. Se saca y se deja enfriar, pesando posteriormente.

Los cálculos son:

$$\% \text{SO}_3 = (c - c') \cdot f \cdot \frac{80}{233,34} \cdot \frac{100}{m}$$

Donde **c** y **c'** son, respectivamente, los pesos del crisol tras el ensayo y tras el tarado previo; **m** es el peso inicial de la muestra en gramos, y **f** el factor corrector de la alícuota, con valor de 5.

El porcentaje de SO₃ puede asociarse al contenido en ión calcio y expresarse como % en CaSO₄·2H₂O, fase más frecuente en morteros antiguos, simplemente multiplicándolo por 2,15.

• Determinación macroquímica global

Como se ha señalado en los fundamentos y objetivos de estos análisis, es posible (aunque costoso y lento) realizar la determinación completa de las fases principales del mortero a través de un análisis macroquímico. Este procedimiento sigue los métodos establecidos para la química de los cementos, que aparecen en la norma UNE-EN 196-2. Conviene señalar el problema de abordar el estudio conjunto del conglomerante y del agregado, aunque, tras la separación que se ha indicado del árido (con HCl (1:5)) es posible individualizar el análisis para cada una de las fases.

Dado que estos métodos de ensayo son largos (alrededor de una semana por muestra), y que aparecen detallados en la normativa citada, no se especifican en este trabajo, aunque el lector puede, en su caso, dar con ellos fácilmente y utilizarlos en caso de estimarlo oportuno.

Métodos instrumentales de análisis químico

Espectroscopia. FTIR

La espectroscopia infrarrojo FTIR es un método instrumental cualitativo más que cuantitativo, que se emplea para la determinación de los componentes de la mezcla, generalmente por el método de pastillas de KBr (RAGAI et al., 1987; PUERTAS et al., 1992). Para absorber radiación infrarroja, una molécula debe experimentar un cambio neto en su momento dipolar como consecuencia de su movimiento de vibración o de rotación. Sólo así el campo dieléctrico alternante de la radiación puede

interaccionar con la molécula y causar cambios en la amplitud de alguno de sus movimientos.

Objetivos/Campo de aplicación

Esta técnica permite identificar, por comparación con los estándares, la presencia de calcita, cuarzo, yeso, hidromagnesita, singenita, silicatos complejos, etc., en muestras de morteros antiguos. También es capaz de identificar los componentes de morteros con cierto grado de hidraulicidad, como silicatos dicálcico y tricálcico o gehlenita (LANAS et al., 2004). Tiene así mismo utilidad cuando se trate de estudiar materiales sometidos a ensayos de alteración acelerados (LANAS et al., 2005). Debe señalarse que los resultados obtenidos son en esencia cualitativos, ya que la cuantificación no resulta demasiado exacta.

Resultados y procedimiento

Tras la preparación por pulverización, secado, mezclado y prensado de las muestras junto con KBr se obtiene la pastilla que se va a utilizar para la medida. La cantidad de muestra es lo bastante pequeña como para que las absorancias estén dentro del intervalo en el que se cumple la ley de Lambert-Beer.

Previamente a la medida debe realizarse un background para eliminar las posibles interferencias con el entorno, como humedad, cantidad de oxígeno.

Los números de onda correspondientes a las absorciones características de la muestra se cotejan con los estándares para identificar por posición y forma de las bandas los compuestos presentes en las muestras.

Análisis térmicos¹¹

El análisis térmico incluye un grupo de técnicas en las que se mide una propiedad física de una sustancia y/o de sus productos de reacción en función de la temperatura mientras la sustancia se somete a un programa de temperatura controlado. Si la propiedad física que se mide es la masa de una muestra, se habla de *termogravimetría* (TG o ATG), y si lo que se mide es la diferencia de temperatura entre una sustancia y un material de referencia, se habla de *análisis térmico diferencial* (ATD o DTA). Pueden obtenerse simultáneamente ambos registros.

Los análisis térmicos se han utilizado mucho en el análisis de morteros antiguos (RICARDI et al.; 1998 y MONTOYA et al., 2003). Junto a la facilidad para la detección, su gran sensibilidad, la pequeña cantidad de muestra requerida para los ensayos y la escasa preparación (y por tanto, velocidad en obtención de datos) hacen de estos estudios técnicas muy útiles para la caracterización de morteros. La interpretación de los resultados está condicionada a la homogeneización adecuada del material.

Objetivos/Campo de aplicación

Se trata de obtener los registros TG y DTA de las muestras objeto de caracterización, con el fin de definir las fases químicas en ellas presentes, bien por comparación con estándares adecuados, bien por el conocimiento o sospecha previa de su presencia, tras corroborar la aparición de los eventos térmicos relacionados con una fase o fases concretas. Puede aplicarse sin ningún problema y sin más requisitos que la disponibilidad de un equipo de análisis térmico. La información que aporta es muy útil, tanto en lo relativo a la composición cualitativa como a la cuantitativa (por la gran sensibilidad y exactitud de la técnica).

Fases difícilmente detectables a través de otros procedimientos pueden mostrarse con este tipo de ensayos.

Resultados y procedimiento

El procedimiento a realizar, tras la pertinente homogeneización de la muestra, pasa por seguir las indicaciones del fabricante del equipo de análisis térmico. Las condiciones más adecuadas de medida pasarían por un rango de temperaturas de 25 °C a 1100 ó 1200 °C, crisoles de alúmina, mejor con tapa perforada, gas de purga (nitrógeno o argón a 50 ml/min) y una atmósfera de aire estático. No obstante, en función de los ensayos específicos, estas condiciones pueden y deben variarse, entrando las modificaciones de las curvas de ensayo dentro del comportamiento clásico descrito en cualquier manual especializado en análisis térmico.

Los resultados deben compararse como se ha indicado, bien por estándares adecuados, tras consulta bibliográfica (WEBB et al., 1970; HATAKEYAMA AND HANDBOOK, 1988), bien por presunción o por descarte de la presencia de determinadas fases y los fenómenos a ellas aparejados.

Algunos de los intervalos de temperatura correspondientes a los fenómenos fisicoquímicos más habituales dentro de los morteros usados en construcciones antiguas son los siguientes:

- 20-120 °C, humedad de la muestra
- 100-200 °C, deshidratación del yeso, que sucede en dos etapas: una primera endoterma donde pierde 3/2 de las moléculas de agua, alrededor de 162 °C, y una segunda hasta deshidratación completa a 174 °C (RICARDO et al., 1988; ADAMS et al., 1993).
- 350-375 °C, exoterma correspondiente al cambio de fase de la anhidrita soluble a la insoluble (ADAMS et al., 1993).
- 300-550 °C, pérdida de agua estructural y materia orgánica. Algunos autores relacionan este intervalo (concretamente de 200 a 600 °C) con la pérdida de agua estructural indicativa de la presencia de componentes hidráulicos en el conglomerante (BAKOLAS et al., 1988; MARAVELAKI-KALAITZAKI et al., 2003).
- Dos picos endotérmicos a 700-800 °C, y otro a 850-900 °C; el primero corresponde a la descomposición del $MgCO_3$ de la dolomita (más frecuente en morteros que la magnesita), y el segundo a la descomposición de la calcita, $CaCO_3$. Estas pérdidas aparecen a veces a temperaturas menores en función del grado de cristalinidad del material (WEBB et al., 1970; SAWADA et al., 1978).
- Ligeras pérdidas de masa en torno a 320 °C y pérdidas a 440 °C y 510 °C pueden corresponderse con la deshidratación y descarbonatación de algún carbonato de magnesio como la nesquehonita ($MgCO_3 \cdot 3H_2O$). En el caso de aparecer un pico exotérmico agudo a 500 °C, se tratará de hidromagnesita (LANAS y ÁLVAREZ, 2004 a, b).
- SiO_2 573 °C, transformación cristalina de fase $-SiO_2$, que transcurre sin pérdida de masa asociada (HATAKEYAMA AND LIU, 1989).
- 700-900 °C, descarbonatación de la calcita. La presencia de etapas en la descarbonatación revela la existencia de diferentes grados de cristalización en la calcita, por lo que puede pensarse en la existencia de áridos de naturaleza caliza (BAKOLAS et al., 1998; VECCHIO et al., 1993).
- 1290 °C, combinación de la sílice con óxido de calcio para formar silicato dicálcico o monocálcico (GLEIZE et al., 2000).

Ensayos de datación¹

Los ensayos de datación se suelen emplear para corroborar las informaciones aportadas sobre la construcción de la obra arquitectónica. Los métodos de datación absoluta parecen plantear problemas e inexactitudes según algunos autores (FULAN et al., 1975), mientras que otros defienden su validez en ciertas condiciones (VAN STRYDONCK et al., 1986).

El fundamento de estas técnicas es la medida de alguna propiedad en relación con la edad del material: en el caso concreto de morteros antiguos, se suele emplear el conglomerante calizo como fuente para obtener la información.

Objetivos/Campo de aplicación

Se utilizan estas técnicas para la determinación de la edad del mortero, lo que tiene interés desde el punto de vista arqueológico o histórico-artístico, ya que permite conocer la edad real de la obra, pero también interés tecnológico, ya que permitiría la clasificación y agrupamiento de las muestras.

Resultados y procedimiento

Las dos técnicas que pueden utilizarse, datación por carbono 14 y por termoluminiscencia, no son fáciles de utilizar, no son de uso frecuente en laboratorios y la interpretación de los resultados es, en ocasiones, farragosa.

La datación con carbono 14 se basa en la fijación de las moléculas del anhídrido carbónico del aire, que contiene el isótopo ^{14}C , por la cal hidratada. No obstante, la fijación del CO_2 puede tener lugar mucho tiempo después de la colocación del mortero. El estado de conservación de la muestra, así como la variación, a lo largo del tiempo, de la proporción del ^{14}C en el aire, pueden influir en los resultados. Además, la muestra puede estar impurificada por calizas procedentes del árido o de los aditivos, desvirtuando los resultados. El analista debe combinar sus resultados con las informaciones sobre las condiciones medioambientales y de construcción de la obra.

La datación por termoluminiscencia se aplica esencialmente a los carbonatos, que atrapan fotones liberados en el transcurso de un fuerte calentamiento del cristal (que tiene lugar en la calcinación de la caliza). Midiendo la emisión y

conociendo la referencia del lugar de muestreo se puede calcular la edad de la muestra (FULAN et al., 1975). Esta técnica, con excesivo soporte teórico, presenta como principal inconveniente la distinción entre carbonatos de la propia cal o bien incorporados a través del árido.

Morteros de restauración^{III}

En el estudio de morteros de restauración se aborda el análisis de la materia prima (áridos, aglomerante y agua) empleada para su elaboración y la evolución de la mezcla en sus diferentes estados que van desde la pasta fresca, proceso de endurecimiento y estado sólido. El control del proceso de producción de los morteros de restauración, a través de sus características y propiedades, permitirá obtener un producto apto para su empleo en trabajos de restauración.

Determinaciones sobre la materia prima

Las características y control de calidad de los componentes del mortero tienen un papel decisivo en su comportamiento, de ahí la investigación en la definición, evaluación, viabilidad y comportamiento de estas materias primas.

Áridos

El estudio sobre patologías en morteros está muy relacionado con los defectos que presentan estos agregados, de ahí que exista una normativa para el control de calidad sobre estos materiales.

Tradicionalmente, el agregado se ha seleccionado entre los materiales disponibles en el entorno, aunque sí parece que estos agregados en muchos casos eran lavados y posteriormente secados para eliminar las posibles impurezas (material arcilloso).

Su origen puede ser variable: áridos naturales o granulados (material detrítico o rocas detríticas poco consolidadas gradados en cuanto al tamaño), árido de machaqueo (obtenido mediante la trituración, molienda y clasificación por tamaños de diferentes rocas de cantera), áridos ligeros (productos naturales o artificiales empleados para la obtención de elementos en obras ligeras), áridos artificiales (subproductos de procesos industriales como escorias o material de derribos), gangas de las explotaciones mineras (obtenidas de las labores de preparación en la minería subterránea y como fuente

importante de materiales para áridos) y, por último, cenizas volantes (utilizadas como áridos o aditivos).

Las propiedades de los áridos derivan de sus características físicas (dimensiones, forma, redondez, densidad, propiedades superficiales, porosidad, permeabilidad, dureza superficial, conductividad térmica y dilatación) y químicas (solubilidad, alterabilidad e hinchamiento). Estas propiedades dependen de su origen geológico y estos aspectos son tan importantes que existen clasificaciones basadas en estos criterios, dentro de las que podemos destacar la clasificación de Figg y Bowden (1970) que, aunque fundamentada en criterios petrográficos, es a grandes rasgos química (en función de su reacción frente a los ácidos).

Los aspectos composicionales (monogénicos y poligénicos) y propiedades morfológicas, como la esfericidad, redondez y distribución del tamaño, tienen también gran importancia en las propiedades de este material.

La redondez es una propiedad que influye en el rozamiento entre granos y afecta a la trabajabilidad y rugosidad de los morteros. Su incidencia en los áridos es tan importante que las normas británicas, BS (parte 10, 1975), proponen una clasificación basada en la forma de las partículas.

Las clasificaciones de áridos más utilizadas actualmente se basan en criterios de tamaño. La *ley de Feret* dice que cualquiera que sea la naturaleza, tamaño de los áridos, proporciones, consistencia y grado de cohesión, la resistencia de los morteros depende de la siguiente relación:

$$R = \left[\frac{c}{a + c + h} \right]^2$$

Donde **R** representa la resistencia de los morteros y hormigones, **a** los volúmenes ocupados por el agua, **C** los volúmenes ocupados por el aglomerante y **h** los volúmenes ocupados por los huecos.

El mortero será más resistente si el volumen de huecos y contenido en agua es mínimo. El porcentaje de huecos se puede reducir aumentando la distribución en el tamaño del árido. Por esta razón los áridos en conjunto deben poseer una buena adherencia con la pasta del aglomerante que permita un mínimo de huecos en su normal apilamiento, manteniendo la homogeneidad del mortero fresco durante la manipulación y una hidratación del aglomerante en pasta o endurecido.

Control de calidad sobre áridos

Estos materiales deben presentar resistencias mecánicas y durabilidad aceptables, buena adherencia a la pasta, generar una mínima cantidad de huecos al apilarse, no retener excesiva cantidad de agua, mantener homogeneidad en el mortero fresco durante la manipulación y no provocar efectos negativos durante la hidratación del aglomerante ni una vez el material esté endurecido.

En España se dispone de una amplia variedad de normas referidas a áridos (tabla 6), lo que a veces parece ser causa de confusión entre los técnicos que prescriben, entre otros aspectos, los requisitos que deben cumplir los materiales empleados en la elaboración de los morteros (de cemento), por lo tanto su aplicación a nuestro caso concreto (morteros y hormigones de cal) no está exenta de matizaciones.

Requerimientos

La norma UNE-EN 13139 contempla los siguientes requisitos mínimos de calidad para este material:

Requisitos geométricos

• **Tamaño del árido.** Se otorga en términos de tamaño de áridos la designación de d/D (en milímetros), siendo d el límite del tamiz menor y D el límite del tamiz mayor, nominación en la que se encuentra la serie de tamices indicados en la tabla 7.

Se define D como la mínima abertura del tamiz de la serie indicada en la norma UNE-EN 933-2 por el que pasa el 90% en peso de la muestra y además el 100% por el tamiz $2D$, y d , como la máxima abertura del tamiz por el que pasa al menos el 10%.

La clasificación de áridos, para morteros, en función del tamaño, se indica en la tabla 8.

Tabla 6. Métodos de ensayo recogidos en las distintas normas actualmente en vigor

NORMAS	PROPIEDADES Y MÉTODOS DE ENSAYO
UNE-EN 13139/02	> Áridos para morteros
UNE-EN 932-1/97	> Ensayos para determinar las propiedades generales de los áridos Muestreo
UNE-EN 1015-1/99	> Ensayo de los morteros de albañilería > Determinación de la distribución granulométrica por tamizado
UNE-EN 933-1/98	> Determinación de las partículas > Método tamizado > Contenido en finos
UNE-EN 933-2/96-98	> Determinación de la granulometría > Tamices de ensayo > Tamaño nominal de las aberturas
UNE-EN 933-3/97	> Índice de lajas
UNE-EN 933-4/00	> Coeficiente de forma
UNE-EN 933-7/99	> Contenido en conchas
UNE-EN 933-8/00	> Equivalente de arena
UNE-EN 933-9/99	> Azul de metileno
UNE-EN 1097-6/03-A-01	> Densidad de las partículas > Absorción de agua
UNE-EN 1097-3/99	> Determinación de la densidad aparente y porosidad de los áridos
UNE-EN 1744-1/99	> Contenido en cloruros > Contenido en sulfatos > Compuestos que contienen azufre > Compuestos que alteran la velocidad del fraguado o endurecimiento del mortero: > Hidróxido de sodio > Ácido fúlvico > Tiempo de fraguado > Contaminantes orgánicos > Material soluble al agua
UNE-EN 1367-1/00	> Resistencia al hielo-deshielo
UNE-EN 1367-2/99	> Ciclos de tratamiento con sulfatos

Tabla 7. Serie de tamices UNE

0/1mm, 0/2 mm, 0/4 mm, 0/8 mm, 2/4 mm, 2/8 mm

Tabla 8. Tamaño del árido para morteros

TIPOS DE ÁRIDOS	TAMAÑO**
Arena o árido fino	D. 4mm y d. 2mm
Grava o árido grueso	D. 4mm
Finos	< 0,063 mm

** Asignado en función del tamaño de los tamices d (inferior), D (superior)

Tabla 9. Límite superior e inferior

Tamaño del árido	LÍMITE EN PORCENTAJES, EN MASA				
	Límites superiores		Límites inferiores		
	2 D ^a	1,4 D ^b	D ^c	d	0,5 d ^b
0/1	100	95 a 100	85 a 99	-	-
0/2	100	95 a 100	85 a 99	-	-
0/4	100	95 a 100	85 a 99	-	-
0/8	100	96 a 100	90 a 99	-	-
2/4	100	95 a 100	85 a 99	0 a 20	0 a 5
2/8	100	98 a 100	85 a 99	0 a 20	0 a 5

^a Para casos especiales, el tamiz por el que pase el 100% del árido se puede especificar para un valor inferior a 2 D. Para morteros de capa fina (0/1), el 100% del árido debe pasar por D.

^b Cuando los tamices calculados para 0,5 d y 1,4 D no sean números exactos de la serie ISO 565:99/R20, se deben adoptar las formas más próximas al tamiz.

^c Si el porcentaje que pasa por D es superior al 99% en masa, se debe indicar la granulometría típica, incluyendo los tamices: 8 mm, 4 mm, 2 mm, 1 mm, 0,250 mm, 0,063 mm.

Tabla 10. Serie de tamices (norma ISO 3310-2 mm)

8,0 4,0 2,00 1,00 0,50 0,200 0,125 0,063

Tabla 11. Determinación de la granulometría de las partículas por tamizado

TAMAÑO DE ABERTURA DEL TAMIZ (mm)	Kg RETENIDOS (R _i)	% DE MATERIAL RETENIDO $R_i/M_1 \times 100$	PORCENTAJES ACUMULADOS QUE PASAN $100-(R_i/M_1 \times 100)$
	R ₁		número entero más próximo
	R ₂		
Material de la bandeja			
P=			

• **Granulometría.** La granulometría de un árido se define como la distribución por tamaños de las partículas que lo constituyen y representa las proporciones de los granos de cada tamaño que hay en su conjunto. La norma UNE-EN 1015-1 describe la determinación de la distribución granulométrica (por tamizado) de los morteros para albañilería, tomando como base la norma UNE-EN 933-1. Esta granulometría debe estar conforme con los requisitos (límites para los tamaños superiores e inferiores) que se adjuntan en la tabla 9.

El análisis granulométrico del árido se puede realizar separándose en fracciones o mezclado, de acuerdo con el siguiente procedimiento:

Se determina el “tamaño máximo del árido”, que representa el tamaño de sus granos más gruesos, y se relaciona con la abertura del tamiz más pequeño por el que pasan todos o casi todos los granos. Posteriormente se realizará un análisis granulométrico de ambos áridos de acuerdo con el método indicado en la norma UNE-EN 933-1. Por último, se valorarán los resultados de dichas granulometrías.

Se establece el concepto de “casi todos los granos” respecto a cuánto puede quedar retenido sobre un tamiz, para relacionar su abertura con el tamaño máximo.

La serie de tamices empleada en el ensayo se indica en la tabla 10.

La muestra de ensayo debe cumplir los requerimientos indicados en la norma UNE-EN 1015-2. Existen dos procedimientos de ensayo: tamizado en húmedo, en el que la muestra en suspensión, bien mezclada, se vierte sobre la serie de tamices (tabla 10) con ayuda de un chorro de agua. Cada una de las fracciones retenida se seca a $105\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 5$, hasta peso constante. El segundo tipo de procedimiento es el tamizado en seco. En este caso, la muestra de ensayo se seca a $105\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 5$ hasta peso constante; posteriormente se pasa por la serie de tamices indicada anteriormente y se determina la fracción retenida en cada tamiz (M_1) como acumulados. La diferencia entre esta cantidad total (de acumulados) y la cantidad original refleja el contenido de la fracción fina (tabla 11).

Se calcula el % de finos según la siguiente expresión:

$$f = \frac{(M_1 - M_2) + P}{M_1} \times 100$$

Donde M_1 es la masa seca, M_2 la masa seca tras el lavado y $M_1 - M_2$ representa la masa seca de los finos eliminados mediante lavado.

Los resultados se expresan como el peso retenido en cada tamiz (% de masa seca original M_1). Se calcula el % de acumulado de la masa seca original que pasa por cada tamiz, excepto el tamiz $63\text{ }\mu\text{m}$.

Estos valores se representan gráficamente, tanto la granulometría de los áridos como del conjunto, en forma de “% en peso que pasa” (en ordenadas), a escala lineal, frente a la “abertura de tamices”, que se hace a escala logarítmica.

• **Granulometría típica y tolerancia.** Se debe aplicar para el control de variabilidad de los áridos finos (tablas 12 y 13).

La norma establece que la fracción gruesa se designe con la letra C, la granulometría media con la letra N y la granulometría fina con la letra F, en función del porcentaje que pasa por el tamiz de $0,500\text{ mm}$ o módulo de finura (tablas 14 y 15).

El módulo de finura (MF) en % se calcula como la suma de los porcentajes acumulados, en masa, retenidos en los tamices siguientes (mm) de acuerdo con esta expresión:

$$MF = \frac{\sum[(> 4) + (> 2) + (> 1) + (> 0,5) + (> 0,25) + (> 1,125)]}{100}$$

• **Forma de las partículas y contenido en conchas.** La forma de las partículas de las fracciones de árido $< 4\text{ mm}$ no es relevante en el comportamiento de los morteros. Para el caso de los áridos de tamaño superior, la forma de las partículas se debe determinar de acuerdo con la norma UNE-EN 933-3, y si se trata de conchas, se debe determinar según la norma UNE-EN 933-7.

La EHE establece que el coeficiente de forma del árido grueso no debe ser inferior a $0,20$.

• **Finos.** El contenido en finos debe determinarse de acuerdo con la norma UNE-EN 933-1. Los límites de finos no deben exceder a los contenidos especificados en la tabla 16.

Cuando el contenido en finos en los áridos exceda del 3% en masa y si no se tiene constancia de que no contienen componentes nocivos, éstos se deben evaluar de acuer-

Tabla 12. Tolerancia de las granulometrías típicas declaradas por el productor para áridos de uso general

TOLERANCIA MÁXIMA (%), EN MASA, QUE PASA ^a				
TAMIZ (mm)	TAMAÑO DEL ÁRIDO			
	8/0	0/4	0/2	0/1
8	±5	-	-	-
4	-	±5	-	-
2	±10	-	±5	-
1	±10	±20	±20	±5
0,250	±10	±20	±25	±25
0,063	±2	±3	±5	±5

^aAdemás de la tolerancia señalada, el árido debe estar conforme con los límites superior e inferior estipulados y el límite de contenidos en finos que se indicará a continuación

Tabla 13. Tolerancia de la granulometría típica de áridos finos

TOLERANCIA (%), EN MASA, QUE PASA			
TAMAÑO DEL TAMIZ (mm)	0/4mm	0/2 mm	0/1mm
4	5		
2		5	
1	10	10	5
0,250	10	15	15
0,063	2	3	3

Tabla 14

GROSOR O FINURA EN FUNCIÓN DEL % QUE PASA POR EL TAMIZ 0,500 mm

CP	MP	FP
5-45	30-70	55-100

Tabla 15

GROSOR O FINURA EN FUNCIÓN DEL MÓDULO DE FINURA

CF	MF	FF
3,6-2,4	2,8-1,5	2,1-0,6

Tabla 16. Límite de contenidos en finos

PORCENTAJE MÁXIMO, EN MASA, QUE PASA POR EL TAMIZ DE 0,063 mm					
TAMAÑO DEL ÁRIDO	Morteros para pavimentos, proyectados, reparación, pastas	Morteros para revocos y enlucidos	Morteros para albañilería (no roca triturada)	Morteros para albañilería (roca triturada)	Otros
0/1 ^a	3%	5%	8%	30%	> 30 ^a
0/2	3%	3%	8%	30%	
0/4; 2/4 ^b	3%	3%	8%	30%	
0/8; 2/8 ^b	3%	3%	8%	11%	

^aValor declarado por el productor

^bLos tamaños del árido 2/4 y 2/8 se usan sólo en los morteros en combinación con los tamaños 0/1, 0/2, 0/4 y 0/8. Las combinaciones de tamaños de árido deben estar conformes con los límites para el contenido en finos para el tamaño correspondiente del árido combinado

do con los siguientes ensayos: equivalente de arena (UNE-EN 933-8) y azul de metileno (UNE-EN 933-9).

La norma UNE-EN 933-8 tiene como objetivo calcular la proporción y características de los finos (arcilla, polvo, etc.) que contiene un suelo granular o un árido fino. El método se basa en la ley de Stokes. El ensayo consiste en sedimentar una muestra de arena dentro de una probeta que contiene una disolución floculante, las partículas arenosas precipitan en el fondo mientras los finos y coloides se mantienen en suspensión. Las condiciones de ejecución son muy precisas, pues el ensayo está concebido para que, pasados 20 minutos, después de la agitación y posterior sedimentación de las partículas más gruesas, queden en suspensión las partículas de tamaño menor de $20\ \mu\text{m}$. Pese a esto se aconseja repetir la separación de las partículas varias veces, debido a que su floculación y disposición influyen de forma importante en la sedimentación.

La norma UNE-EN 933-9 tiene como objetivo conocer si los finos contienen en su composición un porcentaje importante de material arcilloso. El procedimiento se basa en la capacidad de absorción del material arcilloso con respecto a ciertas sustancias (en este caso azul de metileno). Este compuesto es adsorbido preferentemente por los minerales de la arcilla, la materia orgánica y los hidróxidos de hierro, siendo un indicador de su actividad superficial.

Requisitos físicos

La norma establece en relación con los requerimientos físicos la determinación de las siguientes propiedades:

- Densidad de las partículas y absorción de agua. Se entiende por absorción de agua de un árido la relación entre el aumento de volumen en peso que experimenta el árido (debido a la imbibición parcial de agua) y su peso seco. Esta propiedad está directamente relacionada con la porosidad. La porosidad tiene una enorme importancia sobre la mayoría de las propiedades de los materiales (resistencia mecánica y química, heladicidad, variaciones volumétricas con los cambios de humedad, etc.). Aunque no existe una relación clara entre la resistencia del mortero u hormigón y la absorción del árido, Neville (1984) afirma que los poros de la superficie de los áridos afectan a la adherencia entre el árido y la pasta del aglomerante (cemento). La norma UNE-EN 1097-6 propone para su determinación el método del picnómetro y balanza hidrostática.

En cuanto a los requerimientos la EHE recomienda valores de absorción de agua < 5 .

- Resistencia al hielo-deshielo. El ensayo consiste en determinar la resistencia a la desintegración de los áridos al ser sometidos a ciclos alternativos de inmersión en disoluciones saturadas de sulfato sódico o sulfato magnésico y de secado a $105^{\circ}\text{-}110\ ^{\circ}\text{C}$. Para áridos de tamaño $> 4\ \text{mm}$, se aplica la norma UNE-EN1367-1, y para áridos de tamaño comprendido entre 10 y 14 mm, la norma UNE-EN 1367-2.

La norma UNE EN 1367-1 establece que la pérdida de peso para el caso de las arenas no debe ser superior al 15% y para la grava al 18%.

Requisitos químicos

La norma establece limitación en cuanto al contenido de ciertos compuestos que pueden afectar al comportamiento final del mortero (cloruros, compuestos de azufre, componentes que afectan a la velocidad del fraguado y endurecimiento). Sólo se determinan para morteros en el que el aglomerante contenga cemento (UNE-EN 197-1); por tanto, su aplicación queda fuera del ámbito de los morteros de cal.

Sin embargo esta norma establece como sustancias no recomendables:

- Contenido en cloruros. Su presencia debe contribuir a la formación de eflorescencias en la superficie expuesta del mortero.

- Contenido en sulfatos. La presencia de estos compuestos puede producir una rotura por expansión o depósitos superficiales.

- Presencia de piritita o lignito. Estos compuestos pueden producir coloraciones y decoloraciones, abultamiento y ampollas.

- La presencia de madera, carbón, productos arcillosos y residuos reactivos puede producir deterioro de la superficie expuesta.

- La presencia de impurezas, aunque se encuentren en cantidades muy pequeñas, puede generar adiciones de humus o compuestos a base de azúcares que pueden alterar el tiempo de fraguado y endurecimiento del mor-

tero. La presencia de ciertos minerales de la arcilla puede influir negativamente en la resistencia y durabilidad del mortero.

- Reacciones álcalis-sílice. Ciertos morteros pueden reaccionar con los álcalis presentes en la fase líquida y, en condiciones de humedad, producir expansiones y fisuraciones por reacción entre los álcalis y ciertas fases de sílice (álcalis-sílice) o, en otros casos, menos frecuente, álcalis silicatos, álcalis carbonatos. Este tipo de reacciones son más frecuentes en morteros de cemento, sin embargo también se han observado en morteros de cal.

Según se indica en la EHE los áridos no deben presentar reactividad potencial. Para su comprobación, se realizará en un primer momento un estudio petrográfico, para caracterizar mineralógicamente y texturalmente al árido y poner de manifiesto su potencial reactivo. Si presenta reactividad álcalis-sílice o álcalis-silicatos debe realizarse el ensayo descrito en la norma UNE 14507 o UNE 146508EX (método acelerado de probetas de mortero). Si por el contrario se observa reactividad sílice-carbonato, se debe realizar el ensayo descrito en la norma UNE 146507.

Las cantidades no recomendadas para este tipo de sustancias son:

- Cloruros. Se aconseja que su contenido no exceda de 0,15% para morteros corrientes, y 0,06% para morteros que contengan armaduras metálicas.

- Compuestos de azufre: sulfatos solubles en agua para áridos en general (0,2 y 0,8% y, para escorias, 1%), azufre total (1% para áridos naturales y 2% para escorias) y compuestos que alteran la velocidad del fraguado y endurecimiento del mortero. Dentro de éstos se incluyen la materia orgánica; la norma UNE-EN 1744-1 describe el método de ensayo para su identificación basado en un procedimiento colorimétrico. Las citadas normas de ensayo proponen operar con la fracción inferior a 2 mm y pulverizar las muestras hasta que pasen por el tamiz 100 ASTM.

Aglomerantes

Uno de los aspectos que suscita mayor interés en el estudio de los morteros son los aglomerantes. Su incidencia en las propiedades del mortero y su uso en tra-

bajos de restauración ha despertado el interés por este componente.

La calidad técnica de los morteros depende en gran medida de las características del aglomerante (composición química, maduración, grado de cristalinidad, etc.), ya que estos factores controlan la calidad del aglomerante en el seno del mortero, la tecnología de producción empleada, así como aspectos intrínsecos a su fisico-química (plasticidad, fraguado, porosidad, consistencia y durabilidad).

La cal ha sido el aglomerante más usado a lo largo de la historia; no obstante, en la actualidad resulta un desconocido para la construcción. Se conoce la estabilidad de la cal frente a las reacciones mecánicas y su incidencia en la durabilidad de los morteros, por lo que su uso garantiza una adecuada restauración de acuerdo con los criterios que aconsejan emplear materiales y técnicas análogas a las originales. Entre las propiedades que se le atribuyen a la cal, podemos destacar que confiere gran plasticidad a las pastas, aporta al mortero gran capacidad de retención de agua, reacciona con sustancias silíceas de baja estabilidad (reacción puzolánica; esta reacción se ve favorecida con la elevación de la temperatura), su efecto sobre las arcillas facilita la floculación (en estabilización de suelos puede emplearse cal viva, < 10%, porque ésta incrementa la reactividad, no perjudica el aumento de volumen y contribuye a secar el suelo) y, por último, protege al acero contra la corrosión (ataca al Al y al Pb).

Cal es un término general que incluye formas fisico-químicas de diferentes variedades que pueden presentarse como óxidos e hidróxidos de calcio y magnesio. La norma UNE-EN 459-1/01 la define como un aglomerante cuyos principales componentes son CaO, Ca(OH)₂, MgO, Mg(OH)₂, además de SiO₂, Al₂O₂ y Fe₂O₃.

Este producto se obtiene a través de un conjunto de procesos que se engloba dentro de la denominación *ciclo de la cal*. El ciclo incluye una primera fase de *calcina* de la piedra caliza o dolomía para obtener cal viva (CaO, MgO); su posterior *apagado* con agua permite obtener cal apagada (portlandita: Ca(OH)₂ o brucita: Mg(OH)₂). Estos componentes, si permanecen almacenados durante un periodo de tiempo, sufren cambios importantes y, finalmente, al mezclarse con el resto de los componentes del mortero y en presencia de CO₂, se transforman en calcita y/o magnesita o hidromagnesita.

El *proceso de calcinación* depende de la naturaleza de la caliza, tamaño de las partículas, grado de calcinación y naturaleza de los gases de combustión, incidiendo de forma importante en sus propiedades físicas: porosidad, densidad, reactividad, tamaño y forma de los cristales (ADAMS, 1927; MURRAY, 1956; ASHURST, 1990; GILES et al., 1993) (tabla 17).

La transformación del carbonato de calcio y/o magnesio al óxido se completa cuando se produce el colapso de la estructura cristalina (MURRAY, 1956). El óxido de calcio cristaliza en el sistema cúbico y es isoestructural con el óxido de magnesio (periclasa). Este último sin embargo presenta cristales más pequeños y densos. La temperatura de calcinación es variable y va desde 800-1200 °C, para calizas puras, y entre 700 y 800 °C, para dolomías o calizas impuras, incidiendo en su capacidad para retener agua.

Durante el *proceso de hidratación o apagado*, la cal se hidrata formando cristales microcristalinos de portlandita y brucita; su grado de cristalinidad depende de la relación agua/cal y de la temperatura, siendo amorfa a temperatura ambiente y cristalina a 82 °C (WHITMAN y DAVIS, 1926). Durante este proceso el agua permite la difusión de los iones Ca^{2+} y OH^- y la precipitación de la portlandita. El mecanismo es vía precipitación o solución-precipitación, a partir de soluciones saturadas, apareciendo como pequeñas láminas hexagonales de perfecta exfoliación basal, alta superficie específica, área superficial y volumen, alta capacidad de retención de agua (50-100%) y plasticidad. Su morfología depende de la velocidad, el tiempo y la temperatura a la que se desarrolle el proceso de crecimiento; además influye la composición química de la solución (si es calcítica o dolomítica), la pureza de la cal y la sobresaturación de la solución. Esta transformación supone un incremento de volumen importante (90%, portlandita, y un 117%, brucita), desprendimiento de calor (950 kJ/kg) y un cambio en el pH que pasa a ser 12,6.

La influencia de la temperatura de apagado sobre la calidad de la cal ha sido estudiada por numerosos autores.

Según Edin (1963), las reacciones de hidratación son más rápidas cuando se incrementa la temperatura, hecho que se ve favorecido por el proceso de agitación, ya que este proceso favorece la dispersión de las partículas de cal y el aumento de la temperatura durante el apagado. No obstante un prolongado calentamiento durante la hidratación genera cales poco plásticas, ya que las cales altamente reactivas necesitan agua fría para que el proceso de hidratación se acelere (COWPER, 1927). En el proceso de apagado de la cal también influye la finura de la cal (a mayor finura, mayor velocidad de hidratación), la relación agua/cal y el tiempo que la cal permanece inmersa en el agua. Una cantidad insuficiente de agua de apagado puede originar la formación de grumos de cal con una reducción importante de su plasticidad y variaciones en la densidad (valor óptimo 1,35 g/m³). Para la correcta conservación de la cal se recomienda que, durante el apagado de la cal, ésta permanezca cubierta de una fina película de agua para protegerla del aire de dos semanas a dos meses (ARHURST, 1990) o incluso tres años (SWALLOW, 1996.)

El estudio sobre el apagado de la cal y las propiedades de la portlandita ha sido tratado por diferentes autores (COWPER, 1927; BONELL, 1934; HEDIN, 1962; BOYNTON, 1980; MORREAD, 1985; BONEN, 1994). Aunque es poco lo que se sabe sobre esto, hay constatación de que si el proceso se desarrolla de forma adecuada, la cal mejora su plasticidad, el carácter reactivo con el agua y trabajabilidad.

Con el tiempo los cristales grandes de portlandita, prismático, se transforman en cristales submicrométricos planares, ya que en condiciones de sobresaturación, el tamaño del cristal decrece y se produce un rápido crecimiento en la dirección paralela al plano (0001). Se observa un incremento de la plasticidad atribuido a la dispersión coloidal de los agregados de partículas y aumento del área superficial (RODRÍGUEZ NAVARRO et al., 1998).

Tabla 17. Características de la cal según el proceso de calcinación

CARACTERÍSTICAS DE LA CAL	PROPIEDADES
> Cal bien apagada	> Alta reactividad en el agua y densidad aparente
> Cal con grumos mal calcinados	> Alta reactividad química en el mortero, baja densidad aparente y retracción
> Cal con partículas sinterizadas	> Alta densidad aparente y baja porosidad y reactividad con el agua

En esta línea, podemos destacar los trabajos realizados por Rodríguez Navarro et al. (1998) y Cazalla (2000) sobre el envejecimiento del hidróxido de calcio en morteros de cal, partiendo de la base de que la calidad de la cal depende de las características de la caliza empleada en el proceso de obtención de la cal, de la temperatura de calcinación y condiciones de apagado, indicando que los cristales de portlandita sufren importantes cambios de morfología y tamaño bajo el proceso de envejecimiento.

Hedin (1962) ya ponía de manifiesto en este sentido que no sólo influye el tamaño sino el hábito de las partículas de portlandita. Durante el envejecimiento de la portlandita los cristales se transforman de hábito prismático a tabular contribuyendo a un incremento del área superficial y reducción de volumen, y esto se debe a la diferencia de solubilidad de las caras (0001) basal y (10 $\bar{1}$ 1) de los cristales de portlandita, y a la heterogeneidad en la nucleación secundaria a escala nanométrica de las placas de portlandita.

Los pequeños tamaños de grano y la amplia área superficial hacen que la carbonatación se produzca en periodos de tiempo más cortos, influyendo en la estabilización de la estructura final del mortero.

En este procedimiento están involucrados los procesos de disolución de los cristales de portlandita a lo largo de los planos de exfoliación en dirección perpendicular al eje (esto llevará consigo una separación de delgadas láminas a partir de los cristales prismáticos) y, por otro lado, la formación de cristales tabulares de tamaño menor de 2 μm .

Control de calidad de la cal

En España la normativa sobre la cal surge con la finalidad de definir con precisión las propiedades que se exigen a estos materiales, así como los procedimientos para determinarlos. Por esta razón las distintas normas emitidas recogen la definición, clasificación, características de las cales, así como los métodos de ensayo para poder llevar a cabo estas determinaciones (tabla 18). La norma UNE-EN 459-1/02 recoge los requerimientos químicos (tabla 19) y físicos (tabla 20) para las cales.

Además la norma recoge otros requerimientos físicos como son:

- * Estabilidad de la cal después de apagado. Las cales aéreas deben cumplir las especificaciones indicadas en la norma 450-2/02 para este ensayo.
- * Rendimiento. Para cales CL90-80-70 la norma establece un valor $\geq 26\%$.
- * Finura. Los requerimientos vienen recogidos en la tabla 21.
- * Agua libre (%). La norma establece un porcentaje ≤ 2 y para las cales en pasta el agua libre debe estar comprendida entre $\leq 70\%$ y $\geq 45\%$.
- * Estabilidad. La norma recoge los requerimientos que se indican en la tabla 22.

En el caso de los ensayos para morteros de cal, los requerimientos vienen indicados en la tabla 23.

En cuanto el tiempo de fraguado, la norma UNE-EN 459-2/02 no establece ninguna limitación. Para cales hidráulicas, tiempo inicial de > 1 hora y tiempo final ≤ 15 horas.

Propiedades de la cal

En la figura 7 se recogen los métodos de ensayo y análisis más adecuados para aplicar sobre la cal.

Propiedades químicas

Para el análisis químico de los componentes de la cal se recomiendan los siguientes métodos de análisis químico (UNE EN 459-2/02): determinación del contenido en $\text{CaO}+\text{MgO}$ (método recomendado UNE-EN 196-2), determinación del contenido en MgO (método recomendado UNE-EN 196-2), determinación del contenido en CO_2 (método recomendado UNE-EN 169-21: determinación del contenido en ClF , CO_2 y álcalis del cemento. También se puede seguir el método alternativo volumétrico), determinación del contenido en SO_3 (método recomendado UNE-EN 196-2, % de SO_3), pérdida por calcinación (método recomendado UNE-EN 196-2) y contenido en cal útil (en cales aéreas y cales hidráulicas. Se puede seguir el método de ensayo descrito en la norma UNE-EN 459-2/02 para cales aéreas e hidráulicas).

Propiedades físicas

Se recogen las siguientes propiedades físicas (UNE-EN 459-2):

Tabla 18. Normativa UNE, en vigor, aplicada a las cales**NORMATIVA UNE RELACIONADA CON LA CAL**

UNE-E 495-1/01	> Cales para construcción. Parte 1: Definiciones, especificaciones y criterios de conformidad
UNE-EN 459-2/02	> Cales para construcción. Parte 2: Métodos de ensayo
UNE-EN 459-2/02	> Cales para construcción. Evaluación de la conformidad

Tabla 19. Requisitos químicos de la cal (UNE-EN 459-1/02)

CLASIFICACIÓN	COMPOSICIÓN				
Cales aéreas	CaO+MgO	MgO	CO ₂	SO ₃	Cal libre
CL90	≥ 90%	≤ 5 ^c	≤ 4	≤ 2	
CL80	≥ 80%	≤ 5 ^c	≤ 7	≤ 2	
CL70	≥ 70	≤ 5	≤ 12	≤ 2	
DL85	≥ 85	≥ 30	≤ 7	≤ 2	
DL80	≥ 80	≥ 5 ¹	≤ 7	≤ 2	
Cales hidráulicas					
HL2				≤ 3 ^b	≥ 8
HL3,5				≤ 3 ^b	≥ 6
HL5				≤ 3 ^b	≥ 3
NHL - 2				≤ 3 ^b	≥ 5
NHL - 3,5				≤ 3 ^b	≥ 9
NHL -5				≤ 3 ^b	≥ 3

^a Los valores de la tabla se expresan en %

^b Son admisibles contenidos en SO₃ superiores al 3% e inferiores a 7, si se demuestra la estabilidad de volumen a los 28 días de curado en agua según la norma EN 196-2.

^c Un contenido en MgO superior al 7% es admisible si la estabilidad de volumen determinada por el método dado en la Norma EN-459-2/02.

Tabla 20. Requerimientos físicos para la cal viva

TIPO DE CALES	RESISTENCIA A COMPRESIÓN MPA	
	7 DÍAS	28 DÍAS
HL2 y NHL2	-	≥ 2 a ≤ 7
HL3,5 y NHL3,5	-	≥ 3,5 a ≤ 10
HL5 y NHL5	≥ 2	≥ 52 a ≤ 15 ^a

^a Si HL5 y NHL5 tienen una densidad aparente inferior a 0,90 kg/dm³, se permite que la resistencia pueda llegar hasta 20 Mpa.

Tabla 21. Requerimientos de finura

TIPO DE CALES	FINURA (% DE RECHAZO EN MASA)	
	0,90 mm	0,2 mm
Cales aéreas	≤ 7	≤ 2
Cales hidráulicas	≤ 15	≤ 5

Tabla 22. Requerimientos de estabilidad

ESTABILIDAD (mm)			
Tipo de cal	Cales de construcción distintas de la cal en pasta y cales dolomíticas hidratadas		Cal en pasta y cales dolomíticas hidratadas
	Método de referencia UNE-EN 459-2/02	Método alternativo UNE-EN 459-2/02	Método según la norma UNE-EN 459-2/02
CL90	≤ 2	≤ 20	
CL80			
CL70			Cumple el ensayo
DL85	-	-	
DL80			
HL2			
HL3,5			
HL5			
NHL2	≤ 2	≤ 2	-
NHL3,5			
NHL5			

Las cales calcíticas hidratadas, las cales en pasta y las cales dolomíticas hidratadas que contienen tamaños de grano > 0,2 mm deben, además, ser estables cuando se ensayan según la norma EN 459-2/02.

Tabla 23. Ensayos para morteros

TIPO DE CAL	ENSAYOS PARA MORTEROS	
	Penetración (mm) UNE-EN 459-2/02	Contenido en aire (%) UNE-EN 459-2/02
CL90	> 10 y > 50	≤ 12
CL80		
CL70		
DL85		
DL80		
HL2		≤ 20
HL3,5		
HL5		
NHL2		
NHL3,5		
NHL5		

• Resistencia a compresión

Se determina según la norma UNE-EN 196-1/94, sustituyendo el “cemento” por cal hidráulica; se requiere de un mortero elaborado según el procedimiento indicado en la norma:

Relación agua/aglomerante: 0,5 aplicado a cales HL 5 y HNL 5.

Relación agua/aglomerante: 0,55 aplicado a cales HL 2, HL 3,5 y NHL 2 y NHL 3,5.

Cales hidráulicas y cales hidráulicas naturales con densidad $\leq 0,60 \text{ kg/dm}^3$.

Velocidad de aumento de carga a compresión debe ser $(400 \pm 40) \text{ N/s}$.

• Finura de la cal

Se recomienda la norma UNE-EN 169-6/89 empleando la serie de tamices (ISO 565/83), pero además el tamiz de 0,2 mm para las partículas de mayor tamaño. Esta norma recoge dos métodos para cementos, aplicados también a cales: el *método del tamizado*, para detectar la presencia de partículas gruesas en la cal a través del tamiz de 90 μm , obteniéndose R como el residuo sobre dicho tamiz. Por otro lado, el *método de permeabilidad al aire (método de Blaine)*, para determinar la uniformidad del proceso de molienda, basado en la medida de la superficie específica mediante la observación del tiempo que tarda una cantidad fija de aire en pasar a través de una capa compacta de cal de porosidad conocida.

• Estabilidad de volumen

La norma define varios métodos de ensayo en función de las variaciones físico-químicas que pueden presentar las cales (tabla 24).

Por un lado está el *método de referencia*; cuando la hidratación de la cal es incompleta, el CaO no hidratado genera expansión que se puede medir observando cómo varía el diámetro de una torta de tamaño normalizado. La torta se somete a una presión de 1 Mpa y se miden los dos diámetros con una precisión de 0,1 mm, después se introduce en la cámara de vapor durante 90 minutos y se vuelven a medir los diámetros.

En segundo lugar, el *método alternativo*, descrito en la norma UNE-EN 196-3 con las siguientes modificaciones: las cales tipo CL70, CL80, HL 3,5 serán precuradas durante $48 \pm 0,5$ horas, con un mínimo de humedad relativa a 21 ± 1 °C de temperatura. Se hidrata en 20 ml de agua, 75 g de cal en un molde normalizado (UNE 196-3); se mide la distancia entre dos extremos (a) y se llevan los moldes a una cámara de vapor (en ebullición) durante 180 ± 10 minutos; se deja enfriar y se mide de nuevo la distancia (b). La diferencia entre (b) y (a) debe ajustarse a lo indicado en la norma.

El *ensayo de agua fría* es un método aplicable también a cales hidráulicas (% SO_3 entre 3 y 7%). La torta con cal hidráulica amasada con agua, depositada sobre placas de vidrio (por duplicado), se coloca durante 24 horas en una cámara de almacenamiento de aire húmedo, con HR > 90%, y posteriormente se introduce en agua. Durante 27 días se observa si los bordes se alabean o se forman grietas “soplo”.

En el caso del *método de ensayo aplicable a cales vivas o hidratadas de cal o dolomias*, las tortas se depositan sobre placas porosas absorbentes durante 5 minutos y posteriormente en una estufa durante 4 horas a 105 ± 5 °C. Se considerará satisfactorio el ensayo si las tortas se mantienen firmes sin mostrar grietas de expansión.

Por último, el *método de ensayo aplicable a cales vivas o hidratadas de cal o dolomía con partículas de tamaño mayor 0,2 mm*. En este ensayo se añade a la cal yeso

Tabla 24. Métodos de ensayo para determinar la estabilidad de volumen

TIPO DE CAL	MÉTODO DE ENSAYO
> Cales calcíticas hidratadas y todos los tipos de cales hidráulicas y dolomias calcinadas o hidratadas	> Método de referencia (A) y Método alternativo (B)
> Cales hidráulicas con $3\% < \text{SO}_3 < 7\%$	> Ensayo de agua fría (C)
> Cal viva, pasta de cal y dolomias hidratadas	> Método (D)
> Cales que contengan partículas $>0,2 \text{ mm}$	> Método (E)

de París, puro no retardado, y después de que el yeso fragua, se somete a la acción del vapor. El vapor hidrata el óxido de calcio, produciendo expansión y, por tanto, erupciones en la superficie del yeso, si se encuentra inmerso en la pasta de cal.

* Tiempo de fraguado

La norma UNE-EN 196-3/94 describe un procedimiento de referencia y permite el uso de métodos alternativos. Se determina observando la penetración de una aguja en una pasta de cemento (aplicable también a cales) de consistencia normal, hasta que alcance un valor específico; valor que viene dado por el desplazamiento relativo de las agujas. Éstas se adaptan a un accesorio anular, para facilitar la observación de las penetraciones pequeñas. Los intervalos de penetración pueden ampliarse hasta 30 minutos. El tiempo final del fraguado se anota con una aproximación de 15 minutos, cuando el accesorio anular deja de marcar la probeta.

Determinaciones sobre un mortero normalizado según la masa y demanda de agua para valores de escurrimiento y penetración. La determinación del valor de la penetración, retención de agua y contenido en aire requiere de un mortero normalizado de acuerdo con la norma UNE-EN 196-1/94 con un diámetro de escurrimiento 185 ± 3 mm, según el ensayo “mesa de sacudidas”.

Sobre este mortero y con ayuda de un dispositivo (descrito en la norma), se mide el valor de la penetración, en milímetros, sobre un mínimo de 6 probetas. Este valor debe ser mayor de 2 mm, para un valor de escurrimiento de 185 ± 3 .

La retención de agua es una propiedad que se determina sobre el mortero fresco; a través de este ensayo (norma UNE-EN 459-2/01), se determina el % en agua que permanece en el mortero después de un tiempo corto de succión sobre una placa filtrante de papel. La cantidad de agua absorbida debe ser ≤ 10 g.

Para la determinación del contenido en aire se emplea el método de presión, utilizando un aparato prerregulado con una capacidad de 1 dm^3 o de $0,75 \text{ dm}^3$. El aparato debe tener una cámara de presión en la que se genera una presión definida. La apertura de una válvula de descarga permite equilibrar la presión entre la cámara de presión y el recipiente con la muestra llena de mortero en estado fresco. La caída de presión es una medi-

da del contenido en aire (en %) del mortero que se lee en una curva de calibración.

* Densidad aparente

Se realizan tres medidas en el aparato de diseño Böhme. Se parte de una muestra de cal sin secar, que se hace pasar por el tamiz de 2,0 mm (se desmenuzan los terrones todo lo que se pueda, indicando sus características).

* Rendimiento

El ensayo consiste en mezclar 320 ml de agua a $20 \text{ }^\circ\text{C} \pm 2$ con 200 g de cal viva con una finura de aproximadamente 5 mm. La mezcla se agita y el recipiente se cierra dejándolo reposar 24 horas. El rendimiento se determina cuando la pasta se separa de las paredes, midiendo con una regla la altura a la que llega la pasta de cal.

* Agua libre

Cuando una muestra se calienta a $105 \text{ }^\circ\text{C}$ se libera agua retenida; la pérdida de masa a esa temperatura durante 2 horas se denomina humedad W_F y se calcula:

$$W_F = \frac{m_{11} - m_{12}}{m_{11}} \times 100$$

Donde **W** es el contenido en humedad (%), m_{11} la masa inicial y m_{12} la masa después de la desecación.

* Reactividad

Se calcula midiendo el aumento de temperatura de la mezcla cal-agua en función del tiempo de reacción (curva de hidratación). Se añade agua a 0,5 kg de cal, agitándola simultáneamente y midiendo los cambios de temperatura observados en intervalos de tiempo variables. Los valores de temperatura medidos se representarán en función del tiempo (curva de hidratación). La velocidad de la reacción se dará en un tiempo T_u , en minutos, necesario para la conversión del 80% de la cal que se pueda apagar; el 100% tiene lugar en el momento en que se alcanza la temperatura T'_{max} .

Otras determinaciones

Las técnicas de análisis que a continuación se exponen permiten investigar sobre los siguientes aspectos de la cal: composición química-mineralógica, morfología y tamaño de los cristales.

• Difracción de rayos X

El análisis de la cal por el método de polvo cristalino permite la identificación de las fases minerales presentes en la cal y su cuantificación (error 10%).

El análisis de los difractogramas (anchura de los picos a mitad de altura e intensidad) nos ofrece información sobre el grado de cristalinidad de las fases cristalinas.

El parámetro R permite poner de manifiesto el grado de carbonatación de la cal. Se define como la relación:

$$R = \frac{\text{Calcita}}{\text{Portlandita}}$$

El parámetro $A_{(0001)}$ mide la relación de hidróxido de calcio de hábito planar respecto a otras morfologías (por ejemplo, prismática). Se determina de acuerdo con la siguiente relación (DETWILER et al., 1988):

$$A_{0001} = \frac{I_{0001}}{I_{1011}}$$

Donde I_{0001} y I_{1011} son las intensidades (áreas inte-

gradas de cada pico de las reflexiones más intensas de la portlandita). Su valor normal está en torno a 0,74. Valores superiores indican el predominio de cristales planares (0001).

• Microscopía electrónica de Barrido (SEM)

El análisis con esta técnica de grandes aumentos permite observar las formas cristalinas y tamaño de los componentes de la cal (portlandita, periclasa, óxido de calcio, brucita, calcita y dolomita), y, con un seguimiento controlado, los procesos de transformación que experimenta con el tiempo (figuras 8 y 9).

• Microscopía electrónica de Transmisión (TEM)

Esta técnica permite determinar el hábito, morfología y tamaño microcristalino, además de la composición química de la cal.

• Análisis granulométrico (ATP)

Permite determinar el análisis granulométrico de la fracción de aglomerante comprendido entre 0,5 y 100 μm , aportando datos sobre el diámetro, superficie, volumen, tipos de partículas y su concentración, de gran interés para el conocimiento de la cal.



* Análisis térmicos (TG)

Proporciona información sobre las variaciones térmicas de los constituyentes de la cal y, por tanto, permite identificar las distintas fases en las que se puede encontrar, incluso fases poco cristalinas que por difracción de rayos X pasarían desapercibidas.

Agua de amasado y curado

El agua es un elemento importante en el mortero porque participa en las reacciones químicas de hidratación del aglomerante y le confiere a la pasta la trabajabilidad necesaria. Por otra parte el agua cubre un papel importante durante el proceso de curado evitando la desecación, mejora la hidratación del aglomerante e impide su retracción prematura.

Respecto al control de calidad del agua de amasado, la instrucción EHE-99 recoge una serie de normas UNE como procedimientos de ensayo para establecer un control de calidad de este material, basándose en determinaciones de tipo químico (tabla 25).

Las recomendaciones a seguir para la toma de muestras (UNE 7236) consisten en que la toma de muestras sea representativa, que los contenedores de muestras no posean sustancias nocivas y que estén llenos totalmente, que la manipulación de las muestras no produzca alteraciones en ellas y que los análisis se realicen lo más rápidamente posible.

Las condiciones que debe cumplir el agua de amasado se indican en la tabla 26.

Elaboración del mortero, características de la pasta y proceso de endurecimiento

La calidad técnica de los morteros depende de forma importante de la forma de elaboración, características de la pasta, así como de los cambios que experimenta hasta constituirse como un material coherente.

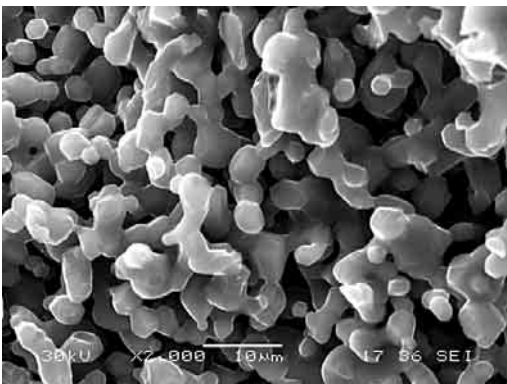
El proceso de endurecimiento comienza con el inicio de las reacciones del agua con los componentes del mortero y finaliza cuando se produce la rigidización de la pasta; comprende un endurecimiento lento por secado y reacciones irreversibles con la atmósfera para formar carbonato cálcico.

Los requisitos que deben cumplir estos materiales son acordes a las determinaciones que se indican en la tabla 27, en estado fresco o endurecido (UNE EN 998-2/04). Las normas relacionadas se indican en la tabla 28.

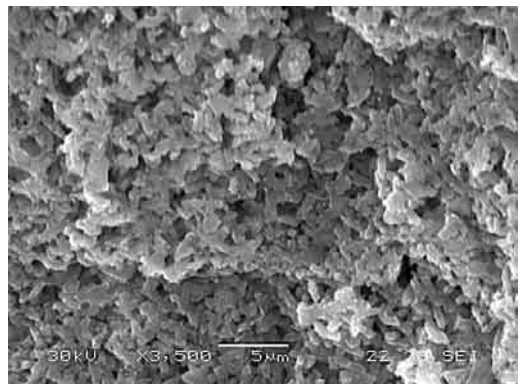
Estos ensayos establecidos por las distintas normas se deben realizar con una cantidad mínima de 10 m³ de masa (UNE EN 1015-2) sobre al menos 3 muestras unitarias, uniformemente repartidas. La muestra debe reducirse, por cuarteo, a una cantidad mínima de 10 kg para la realización de los ensayos.

Proceso de elaboración de la pasta

Actualmente existe un gran interés por conocer las dosificaciones más empleadas en la elaboración de los morteros antiguos. La bibliografía consultada indica que la relación cal/árido más empleada en morteros antiguos y las más adecuada para utilizar en restauración es 1:3, según diferentes autores (MALINOSWKI, 1981; SBORDONI-MORA, 1981; CARRINGTON y



8. Aspecto que presentan los cristales de óxido de calcio



9. Aspecto que presentan los cristales de portlandita

Tabla 25. Normas UNE aplicadas al agua de amasado en morteros

NORMA	CONTENIDO DE LA NORMA
UNE 7236	> Toma de muestras para el análisis químico de las aguas destinadas al amasado de morteros y hormigones
UNE 7234/71	> Determinación de la acidez de las aguas destinadas al amasado de morteros y hormigones, expresado por su pH
UNE 7130/58	> Determinación del contenido total de sustancias solubles en agua para amasado de hormigones
UNE 7131/58	> Determinación del contenido en sulfatos en agua de amasado para morteros y hormigones
UNE 7178/60	> Determinación de los cloruros contenidos en el agua utilizada para la fabricación de morteros y hormigones
UNE 7235/71	> Determinación de los aceites y grasas contenidos en el agua de amasado de morteros y hormigones
UNE 7132/71	> Determinación cualitativa de hidratos de carbono en aguas de amasado para morteros y hormigones

Tabla 26. Condiciones que debe cumplir el agua de amasado

DETERMINACIÓN	VALORES PERMITIDOS	RIESGOS
PH (UNE 7234/71)	Mínimo 5	Alteraciones del fraguado y endurecimiento
Sustancias disueltas (UNE 7130)	Máximo 15 g/l	Eflorescencias o manchas, pérdida de resistencia mecánica y fenómenos expansivos
Sulfatos, SO_4^{2-} (UNE 7131/58) Salvo el cemento SR	Máximo 1g/l 5 g/l	Alteraciones del fraguado y endurecimiento, pérdida de durabilidad
Ion Cl^- (UNE 7178/60) con armaduras Pretensado	Máximo 6 g/l 1 g por litro	Corrosión de armaduras y elementos metálicos
Hidratos de carbono (UNE 7132/58)	0	No fragua y alteraciones en el endurecimiento
Sustancias orgánicas solubles en éter (UNE 7235/71)	Máximo 15 g/l	Alteraciones del fraguado y endurecimiento, pérdida de durabilidad

Tabla 27. Determinaciones a llevar a cabo sobre morteros

ESTADO DEL MORTERO	PROPIEDADES	NORMA DE REFERENCIA
Mortero fresco	Tiempo de utilización. Determinación del periodo de trabajabilidad y tiempo abierto del mortero fresco	EN 1015-9
	Contenido en cloruros	EN 1015-17
	Contenido en aire	EN 1015-7
Mortero endurecido	Resistencia a compresión	EN 1015-11
	Adhesión	EN 1015-12
	Absorción de agua	EN 1015-18
	Permeabilidad al vapor de agua	EN 1015-19
	Densidad	EN 1015-10
	Conductividad térmica	EN 1745
	Durabilidad	No existe norma

SAWLOW, 1995; FRIZOT, 1981; MARTÍN, 1990; GUTIÉRREZ-SOLANA et al., 1989; HOFFMAN y VETER, 1990); ocasionalmente, 1:4, con proporciones de agua en torno al 15-20%, con una relación agua-árido baja (ARHURST, 1990; SORIANO et al., 1984). La proporción en volumen de cal-agua-arena de 1:0,75:2, en determinadas condiciones de curado (temperatura $21\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2$, humedad relativa 95,5% y flujo constante de CO_2), permite obtener un material de resistencia mecánica satisfactoria equiparable a los morteros hidráulicos (BORRELLI et al., 1996).

La elaboración de morteros *in situ* requiere la selección de materias primas adecuadas, espacio para acopios o balsas, apagado de la cal (tiempo), dosificaciones (en peso) y mano de obra (ALEJANDRE, 2002).

La elaboración de morteros normalizados se viene realizando de acuerdo con los métodos enunciados por la International Organization for Standardization (ISO) y por la American Society for Testing and Materials (ASTM). Se va a tomar como referencia la normativa europea CEN, basada en las normas ISO.

El proceso de elaboración consiste básicamente en introducir en una amasadora en movimiento, durante 15 segundos, el agua y posteriormente los componentes secos (aglomerantes y áridos) en cantidades comprendidas entre 1,8-3 kg (volumen 0,5-2,5 dm^3), continuando el movimiento durante 120-180 segundos hasta alcanzar los valores de consistencia indicados en la tabla 29 (UNE-EN 1015-2).

Sin embargo es preferible que se mezcle previamente la cal + agua (1:1), dentro del margen aconsejable 0,9-1 (GOMA, 1979; GORCHAKOC, 1984). Posteriormente se agrega el árido. El empleo de amasado manual permite obtener mezclas más homogéneas y la cal se aprovecha mejor (CAZALLA et al., 2000) (tabla 30).

En el caso de que se emplee aditivos de tipo puzolánico, la proporción cal-árido debe ser de 1/2 arena/ 1 tejoleta ó 1/ 2 puzolana (ADAM, 1996).

En cuanto a la utilización de aditivos y adiciones, antes de su empleo, se debe establecer su aptitud en base a la normativa europea existente (tabla 31); si no existen, se adoptarán las normas nacionales o documentos de idoneidad técnica (UNE EN 998-2/04).

Control de calidad de la pasta

Los requisitos y propiedades de los morteros se deben definir en función de los siguientes métodos y procedimientos de ensayo (UNE EN 998-2/04).

Consistencia

La consistencia es una medida de la fluidez y/o humedad de un mortero fresco y proporciona una medida de la deformabilidad de la pasta cuando se somete a un determinado tipo de esfuerzos. Define la coherencia de la masa fresca y depende de la relación agua/cal, cal/arena y tipo de arena. Se establecen tres tipos de consistencia: *seca* (valor de escurrimiento menor de 140

Tabla 28. Normativa relacionada con morteros

NORMAS	DETERMINACIONES
UNE-EN 1015-2	> Toma de muestras de morteros y preparación de probetas
UNE-EN1015-3	> Determinación de la consistencia de morteros -método de la mesa de sacudidas-
UNE-EN 1015-4	> "Determinación de la consistencia de morteros" método sonda de penetración
UNE-EN 1015-6	> Determinación de la densidad aparente del mortero fresco
UNE-EN 1015-8	> Determinación del agua retenida en morteros frescos
UNE-EN 1015-13	> Determinación de la estabilidad dimensional en morteros endurecidos
UNE-EN 1015-14	> Determinación de la durabilidad de los morteros de fábrica endurecidos
UNE-EN 1015-18	> Determinación del coeficiente de absorción por capilaridad del mortero endurecido
UNE-EN 1015-21	> Determinación de la compatibilidad de morteros a una capa con respecto al esfuerzo de adhesión al sustrato y permeabilidad al agua después de aplicarlo

mm), *plástica* (valor comprendido entre 140-200 mm) y *fluida* (valor mayor de 200 mm). Su valor se determina con los siguientes métodos de ensayo (UNE-EN 1015-6):

- Método de la mesa de sacudidas (UNE-EN 1015-3). Se mide el diámetro medio de una muestra de mortero fresco situado en un disco sobre una mesa de sacudidas, con ayuda de un molde troncocónico de dimensiones normalizadas, tras someterse el dispositivo a un determinado número de sacudidas verticales, levantando la mesa y dejándola caer libremente desde una altura determinada.
- Método de penetración del pistón (UNE-EN 1015-4). Se mide la penetración vertical (en milímetros) de un pistón cilíndrico, definido, que cae libre desde una determinada altura sobre dicha muestra.

Periodo de trabajabilidad y tiempo abierto del mortero fresco

Es una propiedad que refleja la maleabilidad de la pasta, las distintas propiedades del soporte (estado de la superficie y transferencia de humedad. MR-1-20, 1989), la retención de agua y el contenido en aire de la pasta.

La norma UNE-EN 1015-9 describe varios métodos para determinar estas dos propiedades.

- Periodo de trabajabilidad. Se aplica sobre una muestra de mortero fresco, llevado inicialmente a un valor de escurrimiento definido, midiendo el tiempo, en minutos, a partir del cual alcanza un límite definido de rigidez o de trabajabilidad, durante un ensayo tipo definido. Se describen dos métodos, A y B, cuyo fundamento se indica a continuación.

El método A se aplica en morteros de uso corriente; el procedimiento consiste en colocar las probetas (un mínimo de dos) sobre una balanza bajo una sonda de penetración. El periodo de trabajabilidad se considera desde el momento en que se elabora el mortero hasta que la resistencia a la penetración llega a un valor de $0,5 \text{ N/m}^2$.

El método B se aplica en morteros para juntas finas. Se determina el tiempo en el que el valor del escurrimiento (UNE-EN 1015-3) difiere 30 mm con relación al valor determinado 10 minutos después de amasar la mezcla.

- Tiempo abierto del mortero para juntas finas. Se aplica sobre morteros de juntas finas según el método de ensayo C descrito en la norma EN-1015-9/00. El procedi-

miento consiste en colocar una capa de mortero de 2 a 3 mm de grosor, con una espátula, sobre la superficie de contacto de los soportes de las piezas para las fábricas de albañilería y una cara de contacto de una probeta cúbica. Este dispositivo se somete durante 30 s a una carga de 1,5 kg ó 0,5 kg (dependiendo de la densidad de las piezas, si es mayor o menor de 1000 kg/m^3). Se retira la probeta cúbica y se determina el porcentaje de la zona de su superficie cubierta con el mortero adherido. El procedimiento se repite en intervalos de 1 minuto utilizando cada vez nuevas probetas cúbicas, hasta que el 50% de la superficie de contacto de dicha probeta se cubra de mortero adherido. Se registra el tiempo en minutos.

Contenido en cloruros

El procedimiento analítico consiste en preparar un extracto acuoso que contenga cloruros a partir de una muestra de mortero representativa. Los iones cloruro se llevan a precipitación añadiendo un volumen conocido de nitrato de plata y los sulfatos, para que no interfieran, se oxidan o descomponen. El nitrato de plata en exceso se valora con una disolución de tiocianato de amonio, utilizando como indicador una sal de hierro III (UNE-EN 1015-17).

Contenido en aire

El fundamento del ensayo se basa en introducir agua en la superficie del mortero y aplicar una presión de aire (si el contenido en aire es $< 20\%$) o una mezcla alcohol-agua (si el contenido en aire es $> 20\%$), una vez colocado en un recipiente de medida. La disminución del nivel de agua refleja el volumen de aire (UNE-EN 1015-7/99).

En el *método de presión* la muestra se introduce en un recipiente fijado a una cámara de aire estanca, a presión, conectada a un manómetro. La disminución de la presión de aire en la cámara refleja el contenido en aire del mortero (%) para la presión observada.

El *método del alcohol* consiste en llenar un recipiente de 500 ml de capacidad con aproximadamente 200 ml de mortero y una mezcla (alcohol+agua). El recipiente se cierra herméticamente con un tapón de caucho y se mezcla bien dejándolo reposar 5 minutos. Finalmente se lee el nivel de la superficie final del mortero V_{mf} . El contenido en aire del mortero L en (%) es:

$$L = \frac{(500 - V_{mf})}{V_{mi}} \times 100$$

Tabla 29. Consistencia (UNE-EN 1015-2)

MORTERO FRESCO (ρ_{APAR} Kg/m ³)	ESCURRIMIENTO CONSISTENCIA (mm)
> 1200	175 ± 10
> 600 y < 1200	160 ± 10
> 300 < 600	140 ± 10
< 300	120 ± 10

Tabla 30. Modificaciones sobre las normas UNE para la elaboración de morteros (Cazalla, 2000)

	NORMAS UNE	MODIFICACIONES
Tipo de amasado	Mecánico (falta de homogeneización)	Manual (buena homogeneización)
Orden de adición de componentes	11 agua, 21 cal, 31 árido	11 cal, 21 agua, 3 árido
Amasado para tres probetas	450 ± 2 g cal 1350 ± 5 g arena 225 ± 1 g de agua	450 ± 2 g cal 1350 ± 5 g arena 450 ± 1 g de agua
Relación: agua/cal	0,5 (cantidad de agua insuficiente)	1 (Se adiciona agua en cantidades controladas hasta obtener una mezcla plástica)
Compactación	Llenado del molde 1/2 (60 golpes) Llenado total (60 golpes) Enrasado con regla	Llenado del molde 1/2 (60 golpes) Llenado total (60 golpes) Enrasado con regla metálica 60 golpes
Desmoldado	Atmósferas húmedas (201°C ± 2 y 95% HR) 5 días molde y 2 días desmoldados. Hasta ensayos mecánicos, 21 días a 20°C ± 21°C y 65% ± 5% HR.	Condiciones ambientales, 7 días en el molde y el resto desmoldado hasta el momento del ensayo a 20 ± 51°C y 60% ± 5 HR.

Tabla 31. Normativa aplicada a aditivos y adiciones

NORMAS CEN	DETERMINACIONES
UNE-EN 480-1	> Mortero de referencia para ensayos
UNE-EN 480-2	> Tiempo de fraguado
UNE-EN 480-4	> Exudación de morteros
UNE-EN 480-5	> Absorción capilar
UNE-EN 480-6	> Análisis de infrarrojo
UNE-EN 480-8	> Extracto seco convencional
UNE-EN 480-10	> Contenido en cloruros
UNE-EN 480-11	> Contenido en álcalis

Tabla 32. Procedimiento para determinar la densidad según el tipo de mortero

CONSISTENCIA DE UTILIZACIÓN	VALOR DEL ESCURRIMIENTO (mm)	PROCEDIMIENTO OPERATIVO
Mortero seco	< 140	Llenado por vibración
Mortero plástico	140-200	Llenado por vibración/método de sacudidas
Mortero fluido	> 200	Método de relleno

Donde L representa el contenido en aire del mortero (%), V_{mi} es el volumen inicial del mortero (ml) y V_{mf} es el volumen final del mortero+alcohol (ml).

Densidad aparente

La norma UNE-EN 1015-6/99 describe un procedimiento que consiste en introducir y/o compactar la pasta del mortero en un recipiente de capacidad conocida. Dependiendo de la mezcla, existen varios procedimientos que afectan fundamentalmente al proceso de llenado del dispositivo y la consistencia de la mezcla (tabla 32).

El *método de vibración* consiste en llenar un vaso cilíndrico normalizado de mortero sobre una mesa vibratoria en movimiento, hasta su asentamiento. En el *método de sacudidas* se llena el vaso de medida con mortero en dos fases, basculando el dispositivo diez veces desde una altura aproximada de 30 mm. Por último, en el *método de rellenado* se colmata el recipiente con mortero desde el centro hasta los extremos, se elimina el exceso de mortero con una regla y posteriormente se limpia con un paño húmedo.

La densidad aparente del mortero se determina de acuerdo con la siguiente expresión:

$$\rho_m = \frac{m_2 - m_1}{v_v}$$

Donde m_1 es la masa del recipiente, m_2 es la masa del recipiente+mortero, ρ_m es la densidad aparente del mortero fresco, y v_v es el volumen del recipiente.

Capacidad de retención de agua

Mide la facultad que tiene el mortero de mantener su trabajabilidad cuando se pone en contacto con una superficie absorbente. Depende de la velocidad de endurecimiento y de la resistencia mecánica de los morteros.

La norma UNE 83816/93 describe un método para determinar la pérdida de agua del mortero por succión, en función de la cantidad de agua retenida por un papel de filtro situado bajo el (% de agua absorbida con respecto a su contenido original).

Endurecimiento y carbonatación en los morteros de cal

Se define endurecimiento del mortero como el proceso de tipo físico-químico mediante el cual una pasta acuosa con un conglomerante adquiere trabazón y consistencia. Este proceso comienza a las 24 horas de elaborarse y puede durar desde 6 meses hasta años e incluso siglos.

El proceso de endurecimiento en el mortero incluye dos fases: hidratación y carbonatación. En el caso de los morteros de cal, el único proceso que tiene lugar es la carbonatación. Durante este proceso el dióxido de carbono de la atmósfera (CO_2) reacciona con el hidróxido de calcio (Ca(OH)_2) para formar carbonato cálcico (CO_3Ca_2): $\text{Ca(OH)}_2 + \text{CO}_2 \rightarrow \text{Ca}_2\text{CO}_3$

Esta reacción tiene lugar en dos fases: disolución del CO_2 con agua para formar H_2CO_3 : ($\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{H}_2\text{CO}_3$) y, en segundo lugar, reacción de la portlandita con el ácido carbónico ($\text{Ca(OH)}_2 + \text{H}_2\text{CO}_3 \rightarrow \text{Ca}_2\text{CO}_3 + \text{H}_2\text{O}$).

El CO_2 disuelto en el agua es transportado a través del sistema poroso. Al ponerse en contacto con la portlandita, se forma bicarbonato cálcico (soluble), que precipita a calcita cuando alcanza la máxima saturación, con el consiguiente cambio del pH. Al principio se forman partículas pequeñas que se disuelven y actúan como núcleos generadores de cristales más grandes. La calcita puede precipitar en los poros en forma de cristales microcristalinos (se forman rápidamente en condiciones variables de pH), cristales grandes (formados lentamente en forma de “dientes de perro” a pH uniforme) y cristales aciculares “whisker” (originados rápidamente en ambientes de sobresaturación).

Durante este proceso se produce la evaporación del agua de amasado y, como consecuencia, una retracción hidráulica.

Este fenómeno fisicoquímico comienza en la superficie de contacto con el aire y progresa lentamente hacia el interior del material a través de los siguientes procesos (PAPADAKIS et al., 1991): reacción química de los productos constitutivos del mortero, difusión de dióxido de carbono a través de los poros, condensación del vapor de agua en las paredes de los poros en equilibrio con la temperatura y humedad, disolución de la portlandita en el agua y difusión de Ca^{+2} y OH^- disueltos, reacción del CO_2

con otros sólidos susceptibles de carbonatar, aumento de la densidad y disminución de la porosidad en el material.

Los factores que pueden incidir son:

- La temperatura que, al aumentar, se produce una bajada de la solubilidad de la portlandita. Su valor óptimo está en torno a 20 °C.
- La humedad relativa. La máxima velocidad de carbonatación tiene lugar cuando la HR está en torno al 50%. El exceso de humedad puede dificultar la difusión del CO₂ a través de los poros.
- La concentración de CO₂. La calcita se forma cuando su valor está en torno al 30%.
- La porosidad interconectada, necesaria para la circulación del CO₂ hacia el interior.
- El tiempo. Este proceso se inicia a las 24 horas de su elaboración y puede finalizar a los 6 meses o tardar incluso siglos. Depende de la porosidad y del espesor del material.
- La permeabilidad del medio, ya que la carbonatación resulta del intercambio de vapor de agua y CO₂.
- La composición de la cal y su finura.
- La calidad de la cal. Es necesario que esté bien hidratada y no haya carbonatado parcialmente ya que en este último caso se reduce la continuidad de la matriz, perjudicando su mayor adherencia con el árido.
- La presencia de aditivos orgánicos puede controlar la forma cristalina de la calcita.
- El pH es un buen indicador del proceso de carbonatación, ya que decrece de 12 a 8,3 cuando la solubilidad de la calcita está en equilibrio con la atmósfera.
- La presencia de álcalis.
- El tipo de árido utilizado (silíceo o carbonatado dolomítico). La adherencia del árido está en función de la rugosidad superficial, la adherencia epistáxica (adherencia con la que el aglomerante prolonga su estructura cristalina hasta el árido por superposición de redes atómicas) y su naturaleza mineralógica.

Control de la carbonatación en los morteros de cal

El proceso de carbonatación implica un sellado de poros y fisuras y un aumento de la dureza y cohesión del material. Se pone de manifiesto por los cambios en las propiedades físico-mecánicas del material (CAZALLA et al., 2000), aspectos que se pueden estudiar a través de un seguimiento controlado de estas transformaciones sobre probetas normalizadas (tabla 33).

Este proceso se puede controlar de forma experimental mediante la combinación y uso de varias técnicas y ensayos. La observación de estos procesos ha sido realizada sobre probetas de mortero elaboradas según el método seguido por Sebastián Pardo et al. (1998) y Cazalla (2000).

Transformación de la portlandita a calcita

Se puede controlar a través de las siguientes técnicas de análisis, según Cazalla (2002):

- Difracción de rayos X. Los difractogramas realizados sobre las pastas de mortero, a diferentes tiempos, permiten obtener una visión global de la evolución relativa del proceso de carbonatación mediante: la identificación de las fases minerales presentes en el aglomerante calcítico, originales o de neoformación y su semicuantificación; el grado de cristalinidad, a través del análisis, sobre el difractograma, de la anchura de los picos a mitad de altura; y la determinación del parámetro R, que permite conocer el grado y velocidad de la carbonatación de la cal en el seno del mortero.

$$R = \frac{\text{Calcita}}{\text{Portlandita}}$$

Este parámetro depende de los siguientes factores: la porosidad del mortero, que permite un mayor acceso del CO₂ hacia el interior; el tipo de árido empleado, porque la velocidad de la carbonatación es mayor para morteros con áridos calcíticos que áridos dolomíticos o silíceos (también influye la porosidad, forma y superficie de los áridos), la presencia de aditivos (ejemplo de metacaolín), el tiempo de envejecimiento de la cal (a mayor tiempo, mayor velocidad de carbonatación), el tamaño de los cristales de portlandita (si éstos son de tamaño submicrocristalino y de alta superficie específica, la velocidad de la carbonatación es mayor), la dosificación (a mayor cantidad de cal, mayor velocidad de carbonatación), el tipo de cal (las cales dolomíticas en polvo presentan menor velocidad de

carbonatación que las cales en pasta, independientemente de que sean calcíticas o dolomíticas).

- **Análisis térmicos.** Esta técnica permite determinar fases no cristalinas que por difracción de rayos X pasarían desapercibidas, permitiendo en el mortero discriminar entre la naturaleza del aglomerante (cal, yeso, cemento), su calidad, y diferenciar la calcita procedente del árido respecto a la del aglomerante, siempre que el tamaño de los cristales presente variaciones importantes.

El fundamento de la técnica se basa en medir las variaciones térmicas asociadas a las modificaciones que ocurren durante el calentamiento de las muestras (deshidratación, oxidación y descomposición de los minerales). Los cambios van acompañados de picos endotérmicos y exotérmicos sobre las curvas de ATD, que indican si la sustancia es térmicamente activa para ese rango de temperaturas seleccionado. Estos resultados se contrastan con el análisis termogravimétrico TG (análisis cuantitativo), cuyas inflexiones definen las variaciones de peso de los componentes del mortero en función de la temperatura (MARCHESE, 1980; ADAMS et al., 1992; CESARE et al., 1996; CAZALLA, 2000) (tabla 34).

El tiempo de envejecimiento de la cal y el tamaño de los cristales son dos factores determinantes en la temperatura de descomposición (HATAKEYAMAN y QUINN, 1994). Por esta razón una cal envejecida necesita mayores temperaturas de descomposición. El inconveniente de esta técnica es que no permite distinguir de forma

clara entre calcita y dolomita ya que estas curvas son continuas y se solapan.

- **Test de fenoltaleína.** La fenoltaleína es un compuesto insoluble en agua y soluble en álcalis que adquiere color intenso en ambiente alcalino e incoloro a pH neutro. Compuesto que, en presencia de portlandita, en soluciones alcohólicas, se vuelve rojo.

Este ensayo permite observar directamente el grado de carbonatación que presenta el mortero, cómo avanza el frente de carbonatación hacia el interior y cómo inciden el tiempo y las características de la cal (composición y tiempo de envejecimiento).

Se establecen dos modelos (CAZALLA, 2000). El modelo 1 genera una corona de carbonatación que se va haciendo más irregular a medida que avanza hacia el interior. El mecanismo es de difusión continua del CO₂ a través del sistema poroso. Se observa en morteros de cal (dolomítica y calcítica) con un periodo de hidratación a 1 año. En el modelo 2 el frente de la carbonatación no es uniforme, con la formación de una serie de bandas generalmente concéntricas, desde el borde hacia el centro, separadas por espacios vacíos de precipitación periódica y rítmica (bandas ricas en CaCO₃ y portlandita). Aparece en morteros de cales calcíticas, envejecidas durante 14 años, con mayor porcentaje de microporos. La microporosidad favorece la condensación de vapor de agua y el incremento de la cantidad de carbonatos e iones Ca⁺⁺ en solución.

Tabla 33. Condiciones de conservación de los probetas (UNE-EN 1015-11)

TIPO DE MORTERO	DURACIÓN DE LA CONSERVACIÓN EN DÍAS. TEMPERATURA DE 20 °C ± 2 °C		
		Humedad relativa	
	95% ± 5% o en bolsa de polietileno		65%±5%
	En el molde	Una vez retirado el molde	Una vez retirado el molde
Mortero de cal aérea	5	2	21

Tabla 34. Fases de descomposición del aglomerante calcítico

FASES MINERALES	T1 (MÍNIMA-MÁXIMA)
Portlandita	455-483
Brucita	394-427
Calcita	697-870
Dolomita	748-800

Este segundo modelo recuerda a los anillos de Liesengans, generados en medios porosos con transporte de reactivos por difusión. La formación de estos anillos se puede explicar por la teoría de Ostwald-Prager (prenucleación), sin descartar el modelo de “envejecimiento tipo Ostwald”, es decir, crecimiento competitivo de partículas o postnucleación (FEENEY et al., 1983).

La teoría de postnucleación o crecimiento competitivo de partículas explica estos últimos procesos de la siguiente manera: una vez alcanzada la sobresaturación (condiciones que sólo se dan en morteros de cales envejecidas), se produce la precipitación de hidrocalcita o vaterita (fase metaestable coloidal) que genera una inestabilidad de manera continua a medida que progresa el frente de difusión, de tal manera que las partículas de mayor tamaño crecen a expensas de las pequeñas, que son más solubles (RODRÍGUEZ NAVARRO et al., 2000).

Cambios en las propiedades físicas respecto al tiempo

En los morteros de cal la resistencia a los esfuerzos mecánicos se empieza a observar más tardíamente que en los de cemento (a los 18 meses de su elaboración). Para su control se establecen los siguientes parámetros de medida (CAZALLA, 2000):

- ★ **Análisis del sistema poroso.** El crecimiento de la calcita en poros y fisuras durante la carbonatación origina una reducción de la porosidad, bien cerrando los poros o bien disminuyendo su tamaño debido al incremento de un 12% del volumen que ocupa la calcita. La porosidad va a depender del contenido en áridos (a mayor proporción de áridos, menor porosidad), de la presencia de puzolanas (que incrementan la porosidad) y del tipo de cal. Las cales en polvo generan morteros con mayor proporción de microporos (margen de 1-0,1 μ m). Las cales en pasta originan dos poblaciones de poros, entre 1-0,1 μ m y 10-100 μ m. Las cales dolomíticas, al no carbonatar bien, incrementan la porosidad. A medida que avanza la carbonatación, se reduce el porcentaje de macroporos manteniéndose la misma microporosidad.

- ★ **Retracción hidráulica o de secado.** Se refiere a la reducción de volumen que sufren las pastas antes, durante y después del fraguado cuando son expuestas al aire. Esta retracción puede ser de dos tipos: retracción térmica y retracción hidráulica o de secado, y se manifiesta por una reducción de volumen y microfracturas

localizadas bien en la zona de contacto entre el árido y la matriz o bien en el seno de la matriz.

El proceso de secado en el mortero se produce en 2 etapas (VOS 1976, 1978): en una primera etapa, tiene lugar el transporte del agua hacia la superficie de la probeta, donde el tamaño de poro no influye; la segunda etapa comienza cuando se alcanza el contenido de humedad crítica, donde los poros comienzan a tener dificultad para transferir el agua a la superficie, teniendo un papel importante los poros de tamaño capilar. Los de mayor tamaño, que derivan de la figuración, progresan hacia poros de mayor tamaño (SHERER, 1990, COLLINS Y SANJAYAN, 2000). Esto explica que los morteros de cal envejecida con una porosidad bimodal presenten mayores retracciones (CAZALLA, 2000).

La retracción va a depender, por un lado, de las *características del árido*: su proporción (1:4 garantiza una menor retracción), su composición química-mineralógica (los áridos calcíticos favorecen la interconexión árido-matriz y los silicios favorecen la formación de microfisuras), la dimensión máxima del árido (cuanto mayor sea, menor retracción), la compacidad (n) que oscila entre 0,2 (deja muchos huecos) y 0,4 (para áridos rodados), la presencia de finos (por encima de ciertos límites hace incrementar la relación agua/cal ya que retienen mucho agua) y el módulo de deformabilidad del árido (cuanto mayor es éste, menor es la retracción del mortero). Por otro lado, la retracción también depende de la *relación agua/cal* (si esta relación aumenta, se incrementa la retracción), de la *naturaleza de la cal* (la cal dolomítica da lugar a menores retracciones. ARREDONDO et al., 1998), la *temperatura y humedad relativa del ambiente de curado de los morteros* (en condiciones de menor temperatura de curado o ambiente de humedad, el agua de amasado se evapora de forma más lenta dando lugar a una menor retracción) y de la *estabilidad de volumen*, que coincide con una atenuación en el incremento de velocidad y aumento de la proporción de calcita/portlandita (CAZALLA et al., 1998).

En las normas UNE 80-112/89 y UNE 80-113/89 se describe el procedimiento para determinar la retracción en un mortero.

Procedimiento. Consiste en la elaboración de probetas de dimensiones especiales (25 x 25 x 287 mm) y unos pernos calibradores insertados que permiten realizar las medidas de longitud con un comparador de longitudes a lo largo del proceso de curado.

Esta norma creada para morteros de cemento presenta, para el caso de los morteros de cal, las siguientes limitaciones según Alexandre et al. (1997): insuficiente resistencia del mortero a las 24 horas y edades tempranas para desmoldar las probetas, la falta de adherencia de los puerros calibradores al mortero y dificultad para desenroscar los pernos calibradores del soporte sin dañar su unión. De acuerdo con esto, establece las siguientes modificaciones sobre la norma: se mantiene el proceso de enmoldado indicado en la norma UNE 83.821/92-UNE EN 1015-11, pero con la dimensión del molde de retracción (UNE 80.112/ 86-80.113/86); se diseñan nuevos pernos calibrados sin roscas y con dos discos de acero para aumentar la superficie de contacto y adherencia entre el mortero y los pernos; y, por último, se suprimen las placas base del molde por dos placas de vidrio rígidas.

El cálculo se realiza midiendo la longitud de las probetas con un comparador de longitudes una vez desmoldado; después de permanecer en el molde 24 horas con una HR superior al 90%, se somete a una atmósfera de secado de HR 50% ± 5.

Resultados. La retracción se calcula a los 3, 7 y 28 días de acuerdo con la siguiente expresión:

$$\Delta L_{nd}(\%) = \frac{M_{nd} - M_{id}}{L_0} \times 100$$

Donde L_0 representa la longitud base del molde, M_{nd} es la medida de la probeta con el comparador de longitudes, a los n días edad (3, 7 y 28 días), M_{id} es la primera medida de la probeta con el comparador de longitudes recién desmoldado (1 día) y ΔL_{nd} es la variación de longitud (%) en función de la edad.

• Comportamiento hídrico. La dinámica y cinemática de la circulación del agua por el seno del material poroso ofrece información sobre la conductividad, tamaño de poro, cómo absorben o pierden los morteros el agua y velocidad a la que desarrolla el proceso. Para la caracterización hídrica de los morteros se utilizan los mismos métodos de ensayo aplicados a la piedra natural. Durante el proceso de carbonatación, Cazalla (2002) observa que las curvas de desorción permiten diferenciar dos fases en el secado: una primera fase, con pérdida de peso rápido y constante, dependiendo de las condiciones ambientales, y una segunda fase con pérdida de peso lenta porque el agua procede del interior del material. Proceso que se acentúa cuando se trata de

material con una alta proporción de microporos (resulta más difícil evaporar el agua absorbida).

La cinética de absorción de agua en los morteros de cal se efectúa rápidamente en los primeros cinco minutos, alcanzando porcentajes superiores al 50%, consiguiéndose el 100% a la media hora; este proceso se acelera si la porosidad es mayor. El peor comportamiento hídrico de este tipo de material se observa en morteros que presentan una buena absorción y secado muy lento.

• Propagación de ultrasonidos. Es una técnica no destructiva que, mediante la propagación de ondas ultrasónicas a diferentes tiempos, permite conocer la evolución de la carbonatación en el seno del material, poniendo de manifiesto además los cambios mineralógicos, texturales o pérdida de agua. El fundamento de la técnica se basa en la relación lineal positiva que existe entre la densidad y la velocidad de propagación de las ondas a través del material.

Cazalla (2002) pone de manifiesto, tras las aplicaciones de esta técnica a este material en concreto, los siguientes aspectos: existe una relación inversa entre la velocidad de propagación y la porosidad (ESBERT et al., 1991), por esta razón los morteros con áridos porosos o metacaolín dan velocidades más bajas; existe una relación directa entre la velocidad de propagación y la densidad, de ahí que los morteros con componentes dolomíticos (cal o árido) dan mayores velocidades (ALESSANDRINI et al., 1992); existe una relación directa entre la velocidad de propagación y la dosificación del árido; existe una relación directa entre la velocidad de propagación y el envejecimiento de la cal a pesar de que ésta sea menos densa; cuando el mortero está en estado fresco, la velocidades son mayores, y comienzan a disminuir a medida que progresa la carbonatación; las curvas de propagación de ultrasonidos en función del tiempo terminan haciéndose asintóticas porque el proceso de carbonatación no parece terminar.

Procedimiento. Para determinar la velocidad de propagación de las ondas ultrasónicas longitudinales en el seno de las probetas de morteros en sus tres direcciones ortogonales, el método es el de transmisión directa y el equipo de ultrasonidos empleado debe disponer de transductores de 100 KHz.

Se recomienda tomar al menos 10 medidas sobre un mínimo de 2 probetas de cada tipo de mortero, obteniéndose un total de 20 medidas en cada dirección del

espacio para cada tipo. Se aplica un cálculo estadístico para obtener los valores medios. Éstos se representan como: V_{p1} (velocidad de ondas longitudinales perpendicular al plano de sedimentación, en m/s), V_{p2} (velocidad paralela al plano de sedimentación en m/s), V_{p3} (velocidad paralela al plano de sedimentación, en m/s) y valores de anisotropía estructural ΔM (anisotropía total en %) y Δm (anisotropía relativa en %) de acuerdo con las siguientes fórmulas (GUYADER y DENIS, 1986):

$$\Delta M(\%) = \left(1 - \frac{V_{p1}}{V_{p2} + V_{p3}}\right) \times 100$$

$$\Delta m(\%) = \left[2 \left(\frac{V_{p2} - V_{p3}}{V_{p2} + V_{p3}}\right)\right] \times 100$$

• Propiedades mecánicas (resistencias). Para su determinación se recomienda el procedimiento de ensayo descrito en la norma UNE-EN 1015-11. Las muestras se ensayan a los 28 días después de la confección de las probetas. Se determina la resistencia a compresión y a flexión f (en N/mm²). En este último caso se calcula por medio de la siguiente expresión:

$$f = 1,5 \frac{FL}{bd^2}$$

Donde b y d son las dimensiones del molde, F es la carga máxima y L representa la distancia entre los ejes de los rodillos de apoyo en mm.

La mayoría de los autores (SBORDONI-MORA, 1981; MALINOWSKI, 1981; ARREDONDO, 1991; ARNOLD, 1993) insisten en que la resistencia mecánica de un mortero de cal es muy baja y que la adquiere en un largo plazo de tiempo muy superior a 28 días. Depende tanto de factores intrínsecos, como son la composición mineral, textura, fisuración, porosidad y contenido en aire, como de factores extrínsecos, como el procedimiento de ensayo y las condiciones ambientales. El factor que más incide es el contenido en agua, le sigue la porosidad y la naturaleza de las muestras (CHAROLA, 1993).

Control de calidad sobre los morteros endurecidos

El control de calidad de los morteros endurecidos debe realizarse transcurrido un tiempo considerable después de su elaboración, que debe ser mínimo de un año y de acuerdo con la norma UNE-EN 998-2/03 establece las siguientes determinaciones:

Densidad en estado seco

El procedimiento recomendado es el descrito en la norma UNE-EN 1015-10/00 basado en el método de la balanza hidrostática, descrito en la página 57.

Resistencia a compresión

La norma UNE-EN 998-2/03 establece unos requerimientos de resistencia a compresión que oscilan entre 1 y 20 N/mm² para este tipo de material. El método de determinación se ensaya según la norma UNE-EN 1015-11 sobre probetas elaboradas con muestras que cumplan los requerimientos indicados en la norma UNE-EN 1015-12.

Procedimiento. El procedimiento de elaboración de las probetas para dicho ensayo consiste en rellenar unos moldes, de dimensiones normalizadas (profundidad y anchura $40 \pm 0,1$ mm por $160 \pm 0,4$ mm de longitud), de masa de mortero fresco en dos capas iguales, que se compactan a 25 golpes de pisón. Estas probetas se conservan a 20 ± 2 °C con una humedad relativa de $95 \pm 5\%$ durante 7 días (dos días en el molde y dos una vez retirado del molde) y 21 días a $65 \pm 5\%$. A los 28 días las probetas se someten a una carga progresiva entre 50-500 N/s de tal modo que la rotura se produzca entre 30 y 90 segundos. Sin embargo estas condiciones no son totalmente aplicables a los morteros de cal.

Resistencia a la adhesión

Se define como la tracción máxima al arrancamiento por carga directa perpendicular a la superficie del mortero para revoco o enlucido, que se ha aplicado sobre un soporte. La carga de tracción se aplica sobre una pastilla, de tracción definida, pegada al mortero de ensayo. La resistencia a la adhesión es la relación entre la carga de rotura y el área de la superficie del ensayo. Se recomienda para la realización del ensayo la norma 1015-12.

Procedimiento. Este ensayo requiere de un mortero fresco y soportes de ladrillo u otros materiales de los que se conozca su absorción de agua por capilaridad. El mortero fresco se aplica sobre la superficie del soporte en posición vertical, con un espesor de aproximadamente $10 \text{ mm} \pm 1 \text{ mm}$. El ensayo requiere de muestras circulares de 50 mm de diámetro y con un mínimo de 5 probetas. Estas probetas se colocan en un anillo troncocónico. Después de que el mortero haya endurecido sufi-

cientemente, se cortan las probetas para el ensayo con una sonda rotatoria. Las pastillas para tracción se pegan con un adhesivo en el centro de las probetas y se someten al ensayo según el procedimiento indicado en la norma.

Resultados. La resistencia a la adhesión se calcula de acuerdo a la siguiente expresión:

$$f_u = \frac{F_u}{A}$$

Donde f_u es la resistencia a la adhesión en N/mm^2 , F_u es la carga de rotura, en N , y A es el área de la superficie de ensayo de la probetas en mm^2 .

Absorción de agua por capilaridad

Se recomienda la norma UNE-EN 1015-18/02 aunque se puede aplicar el ensayo descrito en la página 65.

Procedimiento. El ensayo requiere de tres probetas de mortero prismáticas, de dimensiones $160 \times 40 \times 40$ mm, que se colocan en una bandeja, sobre la superficie mínima, y se sumergen en agua durante la duración del ensayo, hasta una altura de 5 mm a 10 mm. Se cubre la bandeja para evitar la evaporación del agua en la superficie de las probetas. Las probetas se pesan a los 10 minutos, eliminando el agua en exceso con un paño húmedo (M_1). Se repite el mismo proceso a los 90 minutos (M_2).

* El coeficiente de absorción por capilaridad. Es por definición la pendiente de la recta que une los puntos representativos del contenido en agua tomado después de 10 minutos y después de 90 minutos. Se calcula de acuerdo con la siguiente expresión:

$$C = 0,1(M_2 - M_1)Kg(m^2 \cdot \min^{0,5})$$

Donde C es el coeficiente de absorción de agua, M_1 el peso de la probeta a los 10 minutos y M_2 el peso de la probeta a los 90 minutos.

Permeabilidad al vapor de agua

Se recomienda la norma EN 1015-19/98.

Procedimiento. Se parte de una muestra de mortero fresco, según los requerimientos indicados en la norma

EN 1015-2. Las probetas, antes del ensayo, se sellan en la embocadura de los recipientes circulares, donde la presión de vapor de agua se mantiene constante a niveles adecuados por medio de disoluciones saturadas salinas. Las probetas circulares se colocan en los recipientes de ensayo, sellando los bordes con una junta de estanquidad apropiada (impermeable y de masa constante durante la duración del ensayo). El tamaño de las probetas deberá adaptarse a las dimensiones del recipiente. Se debe dejar una pequeña lámina de aire de 10 mm \pm 5 mm entre la probeta y la superficie de disolución. El recipiente para el ensayo se debe colocar en una cámara de conservación que mantenga una temperatura de $20 \text{ }^\circ\text{C} \pm 2$ y una humedad de $50\% \pm 5$.

La velocidad de transferencia de humedad se determina por la variación de peso de los recipientes en condiciones de régimen permanente. Los recipientes para el ensayo se deben pesar a intervalos de tiempo apropiados.

Resultados. Se expresan en una gráfica que refleja la masa del recipiente en función del tiempo. La permeanza al vapor de agua se calcula a través de la siguiente expresión:

$$\Lambda = \frac{1}{A\Delta p / (\Delta G / \Delta t) - R_A} \text{ kg } i \text{ m}^3 \cdot \text{s} \cdot \text{Pa}$$

Donde A es la superficie de la embocadura del recinto ensayado, en m^2 , Δp es la diferencia de presión del vapor de agua en pascales (Pa), entre el aire ambiente y la disolución salina, $\Delta G / \Delta t$ es el flujo de vapor de agua en kg/s , y Δ es la permeanza al vapor de agua $kg / m^2 \cdot s \cdot Pa$.

Se calcula la permeanza al vapor de agua a partir del valor medio de la permeanza al vapor de agua multiplicado este valor por el espesor de la probeta.

Ensayos de envejecimiento acelerado

Los códigos europeos de la práctica (dentro de los que se incluyen el diseño arquitectónico y ejecución, además de las especificaciones y el empleo de piezas para fábrica de albañilería y de morteros para albañilería, con el fin de garantizar una durabilidad satisfactoria de la obra terminada) no se han preparado por el momento. Hasta que no existan estos códigos la norma UNE-EN 998-2/04 incluye un anexo "utilización de unidades para fábrica de albañilería y del mortero para albañilería" donde se indica la determinación de determi-

nadas propiedades como son la resistencia al hielo y el contenido en sales solubles en las condiciones de servicio, incluyendo el grado de exposición y el riesgo de saturación de agua, que pueden ser utilizadas como referencia.

No obstante, a continuación se describe el procedimiento para la realización de estos ensayos y la importancia de los mismos para conocer la calidad técnica de estos materiales.

La durabilidad de cualquier material con el paso del tiempo va a depender de la composición y microestructura que presente el material y de la funcionalidad que tenga asignada en el edificio.

El agua es considerada como el agente de degradación que más incide en el deterioro de los materiales, siendo responsable de la mayoría de las patologías que habitualmente podemos encontrar en este tipo de materiales.

En el caso concreto de los morteros el agua retenida por este material puede favorecer los procesos de disolución de la portlandita, aspecto que se puede valorar a través de los ensayos de humedad-sequedad. Por otra parte la congelación del agua que se infiltra en el material por capilaridad puede ejercer una presión interna que favorece la disgregación del material, aspecto que se puede evaluar a través del ensayo de hielo-deshielo. Por último la cristalización de sales solubles en el interior del sistema poroso actúa de forma similar al efecto del hielo, aspecto que se puede cuantificar a través del ensayo de cristalización de sales. La cristalización de sales se genera en primer lugar en poros grandes y, cuando éstos se colmatan, la cristalización continúa hacia poros más pequeños. En estos poros es donde la circulación se concentra y donde las presiones de cristalización son más grandes. El efecto de este proceso en el material es la modificación de la microestructura con formación de fisuras o incremento de la porosidad.

Los ensayos que se proponen para determinar la resistencia a los ciclos de envejecimiento acelerado son los de hielo-deshielo y cristalización de sales de gran importancia para evaluar la calidad técnica de los morteros de restauración.

A continuación se indica el procedimiento cíclico seguido por Cazalla (2002) para los distintos ensayos:

A) Ensayo de heladicidad:
Inmersión en agua durante 48 h.
Congelación a $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ durante 8 h.
Descongelación en agua a $10\text{ }^{\circ}\text{C}$.

B) Ensayo de humedad-sequedad:
Inmersión en agua a $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ durante 16 h.
Secado en estufa a $110\text{ }^{\circ}\text{C}$ durante 6 h.
Enfriamiento a $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ durante 2 h.

C) Ensayo de cristalización de sales
Inmersión en solución salina (14%) a $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ durante 4 h.
Secado en estufa a $110\text{ }^{\circ}\text{C}$ durante 16 h.
Enfriamiento a $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ durante 4 h.

Notas sobre autoría de los textos

^I Este apartado ha sido elaborado por Esther Ontiveros Ortega, Centro de Intervención del IAPH.

^{II} José Ignacio Álvarez Galindo, del departamento de Química y Edafología (Universidad de Navarra), es el autor del texto que sigue.

^{III} El texto que sigue ha sido realizado por Esther Ontiveros Ortega, Centro de Intervención del IAPH.

Bibliografía

Referencia

- ADAMS, F.W.** (1927) Effect on particle size on the hydration of lime. *Industrial and Engineering Chemistry*, v. 19 n° 5, pp. 589-591
- ADAMS, J.; KNELLER, W.; DOLLIMORE, D.** (1992) Thermal analysis (TA) lime and gypsum based medieval mortars. *Thermochemica Acta*, 211, pp. 93-106
- ADAMS, J.; DOLLIMORE, D.; GRIFFITHS, D.L.** (1993) Thermal analytical investigations of ancient mortars from gothic churches. *Journal of thermal analysis*, 40, pp. 275-284
- ADAM, J.P.** (1997) *La construcción romana, materiales y técnicas*. León: Editorial de los oficios
- ALEJANDRE, J.; BARRIOS, J.; RAMÍREZ DE ARELLÁN, A.** (1996) *Propiedades mecánicas de los morteros de cal y albero-cal y arena con adición de humo de sílice*. III Congreso Internacional de Rehabilitación del Patrimonio Arquitectónico y Edificación, Granada, pp. 328-331
- ALEJANDRE, J.** (1996) *El albero como árido en los morteros de cal. Influencia de la adición de humo de sílice*. Sevilla: Universidad (tesis doctoral. Publicación inédita)
- ALEJANDRE SÁNCHEZ, J.; BARRIOS, J.; BARRIOS, A.; ARRELANO ÁGUDO, A.** (1997) La retracción en los morteros de cal. *Materiales de construcción*, v. 47, n° 245, pp.17-27
- ALEJANDRE SÁNCHEZ, J.** (2002) *Historia, caracterización y restauración de morteros*. Sevilla: Instituto Universitario de Ciencias de la Construcción, Escuela Técnica Superior de Arquitectura
- ALESSANDRINI, G.** (1985) Gli intonaci nell'edilizia storica: metodologie analitiche per la caratterizzazione chimica e fisica. En *L'Intonaco: storia, cultura e tecnologia*. Atti del convegno di Studi, Padova: Libreria Progetto Editore, Padova, pp. 147-166
- ALESSANDRINI, G.; BUGINI, R.; FOLLI, I.; REALINI, M.; TONIOLO, L.** (1992) The compositional ratios of mortars. Comparison between chemical and petrographical methods. En *Proceedings of the 7th international congress on deterioration and conservation of stone*. Lisboa, 15-18/VI/1992, v. 2, pp. 667-676
- ÁLVAREZ GALINDO, J.I.** (1997) *Caracterización de morteros en monumentos navarros*. Navarra: Universidad (tesis doctoral. Publicación inédita)
- ÁLVAREZ, J.I.; MARTÍN, A.; GARCÍA CASADO, J.; NAVARRO, I.; ZORNOZA, A.** (1999) Methodology and validation of a hot hydrochloric acid attack for the characterization of ancient mortars. *Cement and Concrete Research*, 29, pp. 1061-1065
- ÁLVAREZ, J.I.; NAVARRO, I.; MARTÍN, A.; GARCÍA CASADO, P.J.** (2000) A study of the ancient mortars in the north tower of Pamplona's San Cernin church. *Cement and Concrete Research*, v. 30, n° 9, pp. 1413-1419
- ÁLVAREZ, J.I.; NAVARRO, I.; GARCÍA CASADO, P.J.** (2000) Thermal, mineralogical and chemical studies of the mortars used in the Cathedral of Pamplona (Spain). *Thermochemica Acta*, v. 365, n° 1-2, pp. 177-187
- ARNOLD, A.** (1993) *Causes of Disorders and Diagnosis : composition, mechanical properties, porosity and humidity. Diagnosis of stony materials. Pollution effect*. Congrès International sur la Conservation de la pierre et autres matériaux. Paris: Editions Porte Plume, M.J. Thiel, Unesco Rilem, pp. 23-30
- ARREDONDO, F.** (1977) *Dosificación de hormigones, manuales y normas*. Madrid: IRTCC
- ARREDONDO, F.; SORIA, F.; ALAMAN, A.** (1983) *Estudio de materiales*. Madrid: Servicio de Publicaciones. Revista de Obras Públicas, tomo I
- ARREDONDO, F.** (1991) *Yesos y cales*. Madrid: Servicio de publicaciones. Revista de Obras Públicas
- ASHURST, J.** (1990) Mortars for stone building in conservation of building and decorative stone. En ASHURST, J.; DIMES, F. (eds.) *Conservation of Building and Decorative Stone*. Oxford: Butterworth Heinemann, v. 2, pp. 78-93
- ASHURST, J.; ASHURST, N.** (1990) Mortars, Plasters and Renders. *Practical building Conservation*. English Heritage Technical Handbook, Gower Technical Press, v. 3
- BAKOLAS, A.; BISCONTIN, G.; CONTARDI, V.; FRANCESCHI, E.; MOROPOULOU, A.; PALAZZI, D.; ZENDRI, E.** (1995) Thermoanalytical research on traditional mortars in Venice. *Thermochemica Acta*, 269/270, pp. 817-828
- BAKOLAS, A.; BISCONTIN, G.; MOROPOULOU, A.; ZENDRI, E.** (1998) Characterization of structural byzantine mortars by thermogravimetric analysis. *Thermochemica Acta*, 321, pp. 151-160
- BHANDARKAR, S.; BROW, R.; ESTRIN, J.** (1989a) Studies in rapid precipitation of hydroxide of calcium. *Journal of Crystal Growth*, 97, pp. 406-414
- BHANDARKAR, S.; BROW, R.; ESTRIN, J.** (1989b) Arqueos phase coprecipitation of hydroxide of calcium and magnesium. *Journal of Crystal Growth*, 98, pp. 843-846
- BORRELLI, E.; LAURENZI TABASSO, M.; SÁNCHEZ MARTÍNEZ** (1998) *Realización de muestras de mortero de cal aérea para el estudio de productos consolidantes: propuestas metodológicas*. III congreso internacional de rehabilitación del patrimonio arquitectónico y edificación. Granada, pp. 307-313
- BRUNI, S.** (1998) Characterization of ancient magnesian mortars coming from northern Italy. *Thermochemica Acta*, 321, pp. 161-165
- CARRINTON, D.; SWALLOW, P.** (1996) Lime and lime mortars. Part two. *Journal of Architectural Conservation*, n° 1, pp. 7-22
- CAZALLA, O.; RODRÍGUEZ-NAVARRO, C.; SEBASTIÁN, E.; CULTURONE, G.; DE LA TORRE, M. J.** (2000) Aging of lime putty: effects on traditional lime mortars carbonation. *Journal of the American Ceramic Society*, 83, pp. 1070-1076
- CAZALLA VÁZQUEZ, O.; SEBASTIÁN PARDO, E.; DE LA TORRE LÓPEZ, M.J.; RODRÍGUEZ NAVARRO, C.; VALVERDE ESPINOSA, I.; ZEZZA, U.** (1998) *Control de la evolución de la carbonatación en morteros de cal*. Actas del IV congreso internacional de rehabilitación del patrimonio arquitectónico y edificación. La Habana (Cuba), pp. 227-229
- CAZALLA Vázquez, O.; SEBASTIÁN PARDO, E.; RODRÍGUEZ NAVARRO, C.; CULTURONE, G. DE LA TORRE, M.J.** (2000) *Behaviour of aged and non-aged hydrated lime mortars used in cultural heritage, conservation against aggressive environments*. Proceedings of the International Congress Quarry-Laboratory-Monument, 26-30/XI/2000, Pavia, Italia, v.1, pp. 225-231
- CAZALLA Vázquez, O.; RODRÍGUEZ NAVARRO, C.; SEBASTIÁN PARDO, E.; CULTURONE, G.; DE LA TORRE, M.J.; ELERT, K.** (2000) *The Carbonation of Lime Mortars: The Influence of the Aging of Lime Putty*. Vth International Congress on the Conservation of the Monuments in the Mediterranean Basin, Sevilla
- CAZALLA VÁZQUEZ, O.** (2002) *Morteros de cal. Aplicación en patrimonio histórico*. Granada: Universidad (tesis doctoral)
- COLLEPARDI, M.** (1990) *Degradation and restoration of masonry walls of historical buildings*. *Materials and Structures*, 23, pp. 81-102
- COWPER, A.** (1998) *Lime and lime mortars*. Dorset: Donhead Publishing Ltd.
- CHAROLA, A.E.** (1993) *General report on prevention and treatment cleaning biocidas and mortars*. Congrès International sur la Conservation de la pierre et autres matériaux. Paris: Editions Porte Plume, M.J. Thiel, Unesco Rilem, pp. 65-68
- CHINCHÓN, J.S.; SORIANO CARRILLO, J.** (1989) Revisión de la normativa que regula la

caracterización de la cantidad de compuestos de azufre en los áridos utilizados en la fabricación de hormigones. *Cemento y hormigón*, nº 673, pp. 1153-1159

DE LA TORRE M.J.; RODRÍGUEZ, J.; SEBASTIÁN, E. (1992) *Characterization of mortars in the Alcazaba of the Alhambra (Granada, Spain)*. Proceedings of the 7th International Congress on Deterioration and Conservation of Stone. Lisboa, 15-18/VI/1992, pp. 1177-11857

DELIBES Liniers, A. (1989) *Tecnología y propiedades mecánicas del hormigón*. Madrid: INTEMAC, DL

DESROYE, F.X.; MAIRE, G.; BUISSON, M.J. (1979) *Analyse des bétons durcis à partir d'une attaque nitrique*. Bull. liaison Labo. P. et Ch., 104, pp. 61-66

DETWILER R.J.; MONTEIRO P.J.M.; WENK, H.; ZHONG, Z. (1988) Texture of Calcium Hydroxide Near the Cement Paste-Aggregate Interface. *Cement and Concrete Research*, v. 18, pp. 823-829

DREUX, G. (1981) *Guía práctica del hormigón*. Barcelona: Editores Técnicos Asociados

DUPAS, M.; CHAROLA, A.E. (1986) *A simplified chemical analysis system for the characterization of mortars*. Materials Science and Restoration, F.H.Wittmann, Ed., Technische Akademie Esslingen, pp. 309-312

ELERT, K.; RODRÍGUEZ NAVARRO, C.; SEBASTIÁN PARDO, E.; HANSEN, E.; CAZALLA, O. (2002) *Lime mortars for the conservation of historic buildings*. *Studies in Conservation*, v. 47, nº 1, pp. 62-75

ESBERT, R.M.; VALDEON, L.; ORDAZ, J.; ALONSO, F.J.; GROSSI, C.M. (1991) *Ultrasonic velocity and humidity in monumental stone*. Science, Technology and European Cultural Heritage, pp. 597-600

FEENY, R.; SCHMIDT, S.L.; STRICKHOLM, P.; CHADAM, J.; ORTOLEVA, P. (1983) Periodic precipitation and coarsening waves: Applications of the competitive particle growth model. *The Journal of Chemical Physics*, v. 78, pp. 1293-1311

FERNÁNDEZ CARRASCO, I.; PUERTAS, F.; BLANCO VALERA; VÁZQUEZ, T. (1999) Nuevos avances en la carbonatación del cemento aluminoso. Hidrólisis alcalina. *Materiales de construcción*, v. 49, nº 253

FIGG J.W.; BOWDEN, S.R. (1970) *Análisis de hormigones*. Building Research Stration, Departament of the Environment.

FIORI, C.; MACCHIAROLA, M. (1996) *Study of traditional mortars and plasters using thermo analyses*. 3^{er} Congreso Internisigneu.

FRIZOT, M. (1981) L'analyse des mortiers antiques: problemes et résultats. In *Mortars, cements and grouts used in the conservation of historic buildings*. Proceeding of the Symposium ICCROM, Rome, 3-6/XI/1981, pp. 331-338

FURLAN, V.; BISSEGER, P. (1975) Les mortiers anciens, histoire et essais d'analyse scientifique. *Revue suisse d'Art et d'Archéologie*, 27,2, pp. 161-77

FURLAN, V.; PANCELLA, R. (1982) Examen microscopique en lumière réfléchie de ciments, bétons et mortiers. *Chantiers*, v. 13, pp. 25-30

FURLAN, V.; KOHLER, N. (1984) Facteur de risque a prendre en consideration lors de choix d'un crepi. *Bulletin technique de la Suisse romande*, 14/84, pp. 1171-1176

FURLAN, V. (1990) *Causes, mechanisms and measurement of damage in cultural heritage materials*. State of the art-mortars, bricks and renderings. Avanced Workshop. Analytical Metodologies for the Investigation of Damaged Stones. Pavia

GARCÍA DEL CURA, M.A. (1996) Áridos. En MINGARRO MARTÍN, F. (ed.) *Degradación y conservación del patrimonio arquitectónico*. Madrid: Editorial Complutense, S.A.

GÁRATE ROJAS, I. (1999) *Las artes de los yesos, yeserías y estucos*. Madrid: Munilla-Lería, D.L.

GASPAR TEBAS, D. (1994) Aditivos para el hormigón. Calidad y normativa. *Materiales de construcción*, v. 3, pp. 45-60

GASPAR TEBAS, D. (1996) *Morteros de albañilería, clasificación y propiedades*. Degradación del Patrimonio Arquitectónico. ISBN: 84-89365, pp. 84-9

GILES, D. E.; RITCHIE, I.M.; XU, B.A. (1993) Kinetics of dissolution of slaked lime. *Hydrometallurgy*, 32, pp. 119-128

GLEIZE, P.; SILVA, D.A.; NAPPI, S. (2000) Ancient rendering mortars from a Brazilian palace. Its characteristics and microstructure. *Cement and Concrete Research*, v. 30, pp. 1609-1614

GOMA, F. (1979) *El cemento portland y otros aglomerantes*. Barcelona: Editores Técnicos Asociados

GORCHAKOV, G.I. (1984) *Materiales de construcción*. Moscú: Editorial. Mir

GUTIÉRREZ SOLANA, J.; JÁUREGUI, M.; BOHIGAS, R.; SARABIA, P. (1989) Análisis de morteros medievales de dos castillos de Cantabria, España. *Materiales de construcción*, 39, nº 213, pp. 37-45

HANSE, E.F.; VAN BALEN, K.; ELERT, K.; RODRÍGUEZ NAVARRO, C.; SIMÓN, S.

(2003) GCI Lime Mortars and Plasters Bibliography: Sorted by General Category. INSTITUTE. THE GETTY CONSERVATION-INSTITUTE. (195pp., PDFformat, 1.6MB) www.getty.edu/conservationpublications/pdf_publication/impbib_catergories.pdf

HATAKEYAMA, T.; QUINN, F.X. (1994) *Thermal Analysis: Fundamentals and Applications to Polymer Science*. Chichester: John Wiley & Sons, LTP

HATAKEYAMA, T.; LIU, Z. (1998) *Handbook of Thermal Analysis*. Chichester: John Wiley & Sons

HEDIN, R. (1963) *Plasticity of lime mortars*. Washington DC: National Lime Association, Victor J. Azbe Award

HOFFMAN, P.; VETTER, G. (1990) Analytical examination of mortars from the medieval derelict village Holzheim. *Fresenius' Journal of Analytical Chemistry*, v. 338, pp. 133-137

IGLESIA FERNÁNDEZ (DE LA), A. (1996) Difracción de rayos X y análisis térmico. En MINGARRO MARTÍN, F. (ed.) *Degradación y conservación del patrimonio arquitectónico*. Madrid: Editorial Complutense, S.A.

JEDRZEJEWSKA, H. (1960) Old Mortars in Poland: A New Method of Investigation. *Studies in Conservation*, v. 5, nº 4, pp. 132-138

JEDRZEJEWSKA, H. (1967) *New methods in the investigation of ancient mortars*. Archeological Chemistry, Ed. M. Levey, Philadelphia: Univ. Pennsylvania Press, pp. 147-166

JEDRZEJEWSKA, H. (1981) Ancient mortars as criterion in analyses of old architecture. *Mortars, Cements and Grouts used in the Conservation of Historic Buildings*. ICCROM, Rome, pp. 311-330

LANAS, J.; PÉREZ BERNAL, J.L.; BELLO, M.A.; ÁLVAREZ, J.L. (2004) Mechanical properties of natural hydraulic lime-based mortars. *Cement and Concrete Research*, v. 34, nº 12, pp. 2191-2201

LANAS, J.; SIRERA, R.; ÁLVAREZ, J.I. (2005) Compositional changes in lime-based mortars exposed to different environments. *Thermochimica Acta*, 429, pp. 219-226

LANAS GONZÁLEZ, J.; ÁLVAREZ GALINDO, J.I. (2004) Dolomitic limes: evolution of the slaking process under different conditions. *Thermochimica Acta*, 423, pp. 1-12

LAURENZI, M. (1984) Intonaci per l'edilizia storica: il controllo di qualità delle materie prime e dei prodotti finiti. *Bollettino d'arte del Ministero per i beni culturali e ambientali*, pp. 35-36

MALINOSWKI, R. (1981) Ancient mortars and concretes: aspects of their durability. *Mortars*,

Cements and Grouts used in the Conservation of Historic Buildings. ICCROM, Rome

MARAVELAKI-KALAITZAKI, P.; BAKOLAS, A.; MOROPOULOU, A. (2003) Physico-chemical study of Cretan ancient mortars. *Cement and Concrete Research*, v. 33, n° 5, pp. 651-661

MARCHESE, B. (1980) Non-crystalline Ca(OH)₂ in ancient non-hydraulic lime mortars. *Cement and Concrete Research*, v. 10, pp. 861-864

MARTÍN PÉREZ, A. (1990) *Ensayos y experiencias de alteración en la conservación de obras de piedra de interés histórico artístico*. Madrid: Editorial Fundación Ramón Areces

MELLINGER, R.M. (1979) *Quantitative x-ray diffraction analysis of clay minerals: An evaluation (SRC report)*. Saskatchewan Research Council, G-79, 6, pp. 1-46

MONTOYA IRIGOYEN, C. (2002) *Estudio mineralógico, fisicoquímico, mecánico y durabilidad de morteros de cal del románico en Navarra*. Pamplona: Universidad (tesis doctoral)

MONTOYA IRIGOYEN, C.; LANAS GONZÁLEZ, J.; ARANDIGOYEN VIDAURRE, M.; GARCÍA CASADO, P.J.; ÁLVAREZ GALINDO, J.I. (2004) "Mineralogical, chemical and thermal characterizations of ancient mortars of the church of Santa María de Irache Monastery (Navarra, Spain). *Material and Structures*, v. 37, n° 270, pp. 433-439

MONTOYA, C.; LANAS GONZÁLEZ, J.; ARANDIGOYEN VIDAURRE, M.; NAVARRO, I.; GARCÍA CASADO, P.J.; ÁLVAREZ GALINDO, J.I. (2003) Study of ancient dolomitic mortars of the church of Santa María de Zamarce in Navarra (Spain). Comparison with simulated standards. *Thermochemica Acta*, v. 398, pp. 107-122

MOROPOULOU, A.; BAKOLAS, A.; BISBIKOU, K. (1995) Characterization of ancient, Byzantine and later historic mortars by thermal and X-ray diffraction techniques. *Thermochemica Acta*, v. 269, pp. 779-795

MURRAY, J.A. (1956) *Report to National Lime Association on Summary of Fundamental research on lime and application of results to commercial problems*. NLA

NEVILLE, A.H. (1984) *Tecnología del concreto*. Tomo I. Mexico, D.F.: Instituto Mexicano del Cemento y del concreto A.C. ed. Limusa

ONTIVEROS, E.; VALVERDE, I.; SEBASTIÁN, E. (1996) *Técnicas de análisis aplicadas a los tapiales de las Murallas de Granada*. Congreso Internacional de Rehabilitación del Patrimonio Arquitectónico y Edificación. Granada, pp. 270-273

ONTIVEROS, E.; SEBASTIÁN, E.; VALVERDE, I. (1999) *Deterioración en IX-XIV century arab*

rampart (Granada, Spain). *Material and Structures*, v. 32, pp. 45-51

ONTIVEROS ORTEGA, E. (2001) Programa de Normalización de Estudios Previos y Control de Calidad en las Intervenciones. Morteros empleados en construcciones históricas. Formulación y características (1ª parte). *PH: Boletín del IAPH*, n° 34, pp. 78-89

ONTIVEROS ORTEGA, E. (2001) Programa de Normalización de Estudios Previos y Control de Calidad en las Intervenciones. Morteros empleados en construcciones históricas. Formulación y características (2ª parte). *PH: Boletín del IAPH*, n° 35, pp. 69-77

ONTIVEROS ORTEGA, E. (2001) Programa de Normalización de Estudios Previos y Control de Calidad en las Intervenciones. Metodología de estudio. Fundamentos (1ª parte). *PH: Boletín del IAPH*, n° 37, Diciembre. Pp 79-83.

ONTIVEROS ORTEGA, E. (2002) Programa de Normalización de Estudios Previos y Control de Calidad en las Intervenciones. Metodología de estudio. Morteros de intervención Áridos. (2ª parte). *PH: Boletín del IAPH*, n° 39, pp. 81-35

ONTIVEROS ORTEGA, E. (2002) *Programa de Normalización. Morteros. Aglomerante y agua de amasado*. *PH: Boletín del IAPH*, n° 45, pp. 90-96

PANET, M.; TOUREQ, C. (1971) Les essais de granulats. Connaissances actuelles et orientation des recherches. *Revue Générale des routes*, 465, pp. 97-108

PAPADAKIS, V.G.; VAYENAS, C.G.; FARDIS, M.N. (1991) Fundamental Modeling and Experimental Investigation of Concrete Carbonation. *ACI Materials Journal*, v. 88, n° 4, pp. 363-373

PERONI, S.; TERSIGNI, C.; TORRACA, G.; CEREJA, S.; FORTI, M.; GUIDOBALDI, F.; ROSSI-DORIA, P.; DE REGE, A.; PICCHI, D.; PIETRAFITTA, F.J.; BENEDETTI, G. (1981) Lime based mortars for the repair of ancient masonry and possible substitutes. *Mortars, cement and grouts used in the conservation of historic building*. Symposium 3-6/XI/1981. Roma, pp. 63-99

PUERTAS, F.; BLANCO-VARELA, M.T.; MARTÍNEZ, S.; ACCIÓN, F.; ÁLVAREZ, G. (1992) *Methodology of analysis of stones and mortars in monuments*, 7th International Congress on Deterioration and Conservation of Stone, Ed. J. Delgado Rodríguez, F. Henriques, F. Telmo Jeremias, Lisbon, pp. 763-770

RAGAI, J.; GHORAB, H.; ANTAR, A. (1987) Surface and bulk properties of ancient Egyptian mortars. Part II: adsorption and infrared studies. *Cement and Concrete Research*, v.17, pp. 12-22

RASSINEUX, F.; PETIT, J.C.; MEUNIER, A. (1989) Ancient analogues of modern cement: calcium hydrosilicates in mortars and concretes from Gallo-Roman thermal baths of Western France. *Journal American Ceramic Society*, v. 72, n° 6, pp. 1026-1032

RICARDI, M.P.; DUMINUCO, P.; TOMASI, C.; FERLONI, P. (1998) Thermal, microscopic and X-ray diffraction studies on some ancient mortars. *Thermochemica Acta*, v. 32, pp. 207-214

RODRÍGUEZ NAVARRO, C.; HANSEN, E.; GINEL, W.S. (1998) Calcium hydroxide crystal evolution upon aging of lime putty. *Journal American Ceramic Society*, v. 81, pp. 3032-3034

RODRÍGUEZ NAVARRO, C.; CAZALLA, O.; ELERT, K.; SEBASTIÁN PARDO, E. (2002) *Liesegang pattern development in carbonating traditional lime mortars*. Proceeding of the Royal Society London, Part A, v. 458, pp. 2261-227

RODRÍGUEZ MONTERO, J. (1991) *Comentarios a las prescripciones de los áridos de la Instrucción EH-91*. Ed. S.P. E.U. A.T de Granada

SAWADA, Y.; UEMATSU, K.; MIZUTANI, N.; KATO, M. (1978) Thermal decomposition of hydromagnesite under different partial pressures of carbon dioxide. *Thermochemica Acta*, v. 27, pp. 45-59

SEBASTIÁN PARDO, E.; CAZALLA Vázquez, O.; DE LA TORRE López, M.J.; RODRÍGUEZ NAVARRO, C.; VALVERDE Espinosa, I.; ZEZZA, U. (1998) *Normativa para la elaboración de morteros de cal aérea*. Actas IV Congreso Internacional de Rehabilitación del Patrimonio Arquitectónico y Edificación. La Habana, (Cuba) pp. 491-93

SBORDONI MORA, L. (1981) Les matériaux des enduits traditionnels. Proceeding of the Symposium *Mortars, cements and grouts used in Conservation for historical Building*, CCRÖM, Rome, pp. 375-383

SINGH, S. (1991) Studies on lime plasters of Golconda Fort. 1st International Colloquium on *Role of Chemistry in Archaeology*, Ed. M.C. Ganorkar and Rama Rao, Hyderabad, pp. 81-86

SORIANO CARRILLO, J.; RIESGO PÉREZ, L.; DE LA PEÑA QUEVEDO, C. (1994) *Influencia de la naturaleza de los áridos en el comportamiento del hormigón*. I Congreso Español de Geología. Tomo II, pp. 959-969

SORIANO CARRILLO, J. (1992) Materias primas para cementos y áridos. En GARCÍA GUINEA, J.; MARTÍNEZ FRÍAS, J. *Recursos minerales de España*. Madrid: CSI

TAVARES, M.; MAGALHÃES, A.C.; VEIGA, M.R.; AGUIAR, J. (2005) *Métodos de diagnóstico para revestimientos de edificios antiguos*.

Importancia y aplicabilidad de los ensayos in situ. PH: Boletín del IAPH, nº 53, Especial Criterios, pp. 11-17

TORRE LÓPEZ (DE LA), M.J. (1995) Estudio de los materiales de construcción de la Alhambra. *Monografía de Arte y Arqueología*, nº 28 Granada: Universidad

VALVERDE ESPINOSA, I. (1993) *Caracterización de los áridos para hormigones en la Depresión de Granada*. Granada: Universidad (tesis doctoral. Publicación inédita)

VAN STRYDONCK, M.; DUPAS, M.; DAUCHOT-DEHON, M.; PACHIAUDI, C.; MARCHAL, J. (1986) The influence of contaminating (fossil) carbonate and the variations of $\delta^{13}C$ in mortar dating. *Radiocarbon*, 28(2A), pp. 702-710

VECCHIO, S.; LAGINESTRA, A.; FREZZA, A.; FERRAGINA, C. (1993) The use of thermoanalytical techniques in the characterization of ancient mortars. *Thermochemica Acta*, v. 227, pp. 215-223

VIUELA BLODA A. (1967) *Los áridos en la construcción. Empleo de los áridos calcáreos en morteros y hormigones*. Barcelona: Editores Técnicos Asociados, S.A.

VOÏNOVITCH, I. A. (1988) *Analyse des sols, roches et ciments, méthodes choisies*. Paris: Masson

VOS, B.H. (1976) Water absorption and drying of materials. Proceeding of International Symposium: *The Conservation of the stone*. Bologna, 19-21/VI/1975, pp. 679-694

VOS, B.H. (1978) *Higric methods for the determination of the behavior of stone*. 19 Unesco-Rilem International Symposium. Paris, 3-8

WHITMAN, W.G; DAVIS, G.H.B. (1926) The hydration of lime. *Industrial and Engineering Chemistry*, v. 18, nº 2, pp. 118-120

WEBB, T.L.; KRÜGER, J.E. (1970) Carbonates. En MCKENZIE, R.C. (ed.) *Differential Thermal Analysis*. London: Academic Press, pp. 238-266

Normativa

ASOCIACIÓN Española para la Normalización (AENOR)

UNE-EN 495-1/02. Cales para construcción. Parte 1: Definiciones, especificaciones y criterios de conformidad

UNE-EN 459-2/02. Cales para la construcción. Parte 2. Métodos de ensayo

UNE-EN 459/03. Parte 3. Evaluación de conformidad

UNE-EN 998-2/04. Especificaciones de los morteros para albañilería. Parte 2. Morteros para albañilería

UNE-EN-1015-1/02. Determinación de la distribución del tamaño de las partículas (método del tamizado)

UNE-EN-1015-2/99. Toma de muestras de morteros y preparación de probetas

UNE-EN-1015-3/00. Determinación de la consistencia de morteros -método de la mesa de sacudidas-

UNE-EN-1015-4/99. Determinación de la consistencia de morteros -método sonda de penetración-

UNE-EN-1015-6/99. Determinación de la densidad aparente del mortero fresco

UNE-EN-1015-7/99. Determinación del contenido en aire del mortero fresco

UNE-EN-1015-9/00. Determinación del periodo de trabajabilidad y tiempo abierto del mortero fresco

UNE-EN-1015-10/00. Determinación de la densidad aparente del mortero endurecido

pr EN-1015-8/. Determinación del agua retenida en morteros frescos

UNE-EN 1015-17/01. Determinación del contenido en cloruros solubles en agua de morteros frescos

UNE-EN-1015-11/00. Determinación de la resistencia a flexión y compresión del mortero endurecido

UNE 83816/93. Métodos de ensayo de morteros frescos. Determinación de la capacidad de retención de agua

UNE-EN-1015-12/00. Determinación de la resistencia a la adhesión de los morteros para revoco y enlucido endurecidos aplicados sobre soportes

UNE-EN-1015-19/99. Determinación de la permeabilidad al vapor de agua de los morteros endurecidos de revoco y enlucido

UNE-EN-1015-18/03. Determinación del coeficiente de absorción de agua por capilaridad del mortero endurecido

UNE-EN-1015-21. Determinación de la compatibilidad de morteros a una capa con respecto al esfuerzo de adhesión al substrato y permeabilidad al agua después de aplicarlo

UNE-EN 13139/03. Áridos para morteros

UNE-EN 932-1/97. Ensayos para la determinación general de los áridos. Método de muestreo

UNE-EN 933-1/98. Ensayo para determinar las propiedades geométricas de las partículas. Método del tamizado

UNE-EN 933-8/00. Ensayos para determinar las propiedades geométricas de los áridos. Evaluación de finos. Ensayo de equivalente de arena

UNE-EN 933-9/00. Ensayos para determinar las propiedades geométricas de los áridos. Evaluación de finos. Ensayo de azul de metileno

UNE-EN 933-3/97. Ensayos para determinar las propiedades geométricas de los áridos

ISO 565/90. Tamices y tamizado de ensayo

UNE 72236/71. Toma de muestras para el análisis químico de las aguas destinadas al amasado de morteros y hormigones

UNE 7234/71. Determinación de la acidez de las aguas destinadas al amasado de morteros y hormigones, expresado por su pH

UNE 7235/71. Determinación de aceites y grasas contenidos en el agua de amasado de morteros y hormigones

UNE 7130/58. Determinación del contenido en

sales solubles en agua de amasado en hormigones

UNE 7131/58. Determinación del contenido en sulfatos en agua de amasado para morteros y hormigones

UNE 7132/58. Determinación cualitativa de hidratos de carbono en aguas de amasado en morteros y hormigones

UNE 7178/60. Determinación de los cloruros contenidos en el agua utilizada para la fabricación de morteros y hormigones

UNE 1744-1/99. Ensayos para determinar las propiedades químicas de los áridos. 1ª parte

UNE 1367/00. Determinación de las propiedades térmicas y alteración de áridos. Resistencia a los ciclos de hielo-deshielo

UNE 1367/99. Determinación de las propiedades térmicas y alteración de áridos. Ensayos de sulfato magnésico

Norma NE 1.32-a

Norma ASTM. C 142-39

Norma ASTM C 235-47T

Norma E 132-b. Instituto Técnico de la Construcción y el Cemento

Norma ASTM C-123-64

RILEM (1982) MRI-21: Recommendation de la Rilem. Methodes d'essai des mortier et enduits:

MR-1. Determination de la consistance des mortiers basset sur la Bindemedelsnormen Suede
MR-2. Determination de la consistance des portier basset sur la norme Britannique BS 4551-1070

MR-3. Le complexe ouvrabilité-consistance-plasticité des mortiers

MR-4. Capacité de retention d'eau des mortiers

MR-5. Adherente initiale des mortiers

MR-6. Tendence des mortiers au ressuage

MR-7. Essai de determination in situ de la resistance en compression des mortiers a d urcissement hydraulique

MR-8. Determination de l'adherence en flexion entre les unités de maçonnerie et le mortier

MR-9. Caractérisation de la resistance a l'abrasion des enduits au moyen d'une brosse rotative

MR-10. Mesure de la permeabilite a l'eau d'un enduit

MR-11. Determination de la consistance du portier au moyen de la table a secousses

MR-12. Determination des modificatins de longueur des eprovettes de portier (Bassé sur la norme BS 187/77

MR-13. Determination de la resistance du portier a la deformation

MR-14. Determination de l'adherence des enduits par essai de cisaillement

MR-15. Determination de l'adherence entre brique et mortier (bassée sur la norme ASTM E 149/66)

