

090 - 091

## Criterios

Programa de normalización. Morteros. Aglomerante y agua de amasado

PH45 - Octubre 2003

# Criterios

## Programa de normalización. Morteros. Aglomerante y agua de amasado

Esther Ontiveros Ortega  
Centro de Intervención del IAPH

### Resumen

Uno de los aspectos que suscita mayor interés en el estudio de los morteros son los aglomerantes, su extendido uso en trabajos de restauración ha hecho despertar el interés por la cal y la necesidad de conocer más sobre ella. 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 permite llevar a cabo una adecuada restauración, de acuerdo con los criterios que aconsejan emplear materiales y técnicas análogas a las originales. Los aglomerantes deben emplearse con dosis adecuadas de agua, si no es así, el aglomerante se agrieta al secarse perdiendo sus cualidades de unión, siendo un elemento indispensable para que la masa del mortero conserve su plasticidad y fluidez. El análisis de estas materias primas se ha llevado a cabo sobre la base de la normativa existente y trabajos de investigación desarrollados sobre el tema.

### Palabras clave

Morteros  
Metodología  
Técnica de análisis de materiales  
Normalización  
Bienes inmuebles  
Aglomerante  
Agua de amasado  
Cal  
Control de calidad  
Calcinación  
Agua de curado

### Introducción

Continuando con el análisis de la materia prima empleada en la elaboración de morteros, y para finalizar esta serie de estudios iniciada en PH 37<sup>1</sup>, se van a dar una serie de recomendaciones referidas al aglomerante y agua de amasado en morteros.

La calidad técnica de los morteros de cal depende en gran medida de las características del aglomerante como son la composición química, maduración, grado de cristalinidad etc.; ya que estos factores controlan la calidad de la cal en el seno del mortero, la tecnología de producción empleada, así como aspectos intrínsecos a su físico-química que resultan de interés científico. Estos factores inciden en las siguientes propiedades de la cal: plasticidad, fraguado, porosidad, consistencia y durabilidad de la fábrica. Para su análisis se parte de la normativa actualmente en vigor, UNE ENV 459-1 y 459-2.

### La cal

#### Introducción

Cal es un término general que incluye formas físico-químicas de diferentes variedades que pueden presentarse como óxidos e hidróxidos de calcio y magnesio y cal para la construcción (ENV 459-1/94) como un aglomerante cuyos principales componentes son  $\text{CaO}$ ,  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{Mg}(\text{OH})_2$ , además de  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  y  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ .

Este producto se obtiene a través de un conjunto de procesos que se engloban dentro de la denominación "ciclo de la cal": El ciclo incluye una primera fase de calcinación de la piedra caliza o dolomía para obtener cal viva ( $\text{CaO}$ ,  $\text{MgO}$ ); su posterior apagado con agua permite obtener cal apagada (portlandita:  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  o brucita:  $\text{Mg}(\text{OH})_2$ ). 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  $\text{CO}_2$  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) (Ver Tabla I).

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. Las cales con una temperatura de calcinación más suave dan lugar a un aglomerante con más capacidad de retención de 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 and Davis, 1926). Durante este proceso el agua permite la difusión de los iones  $\text{Ca}^{2+}$  y  $\text{OH}^-$  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 al que se someta la cal, 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, por eso, según Cowper (1927), las cales altamente reactivas necesitan agua fría para que el proceso de hidratación se acelere. 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/m<sup>3</sup>). Para la correcta conservación de la cal, Arhurst (1990) 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 o más e incluso tres años (Swallow, 1996).

Con el tiempo, los cristales grandes de portlandita de hábito prismático se transforman en cristales submicrométricos planares, debido a que en condiciones de sobresaturación, el tamaño del cristal decrece y se produce un rápido crecimiento en la dirección paralela al plano (0001). Bhandarkar (1989) y Cowper (1998) observan un incremento de la plasticidad en la cal relacionado con la retención de agua y envejecimiento, atribuido a una dispersión coloidal de los agregados de partículas y aumento del área superficial; aspectos que han sido estudiados por Rodríguez Navarro et al. (1998).

### 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 estas razones 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 II).

La norma UNE 80-502/97, ya anulada, agrupa las cales en: **Cales clase I** (cales vivas de calcio o dolomíticas o micronizadas) y **Cales clase II** (cales apagadas o hidratadas). La norma UNE-ENV 459-1, establece una diferenciación en función de la composición química y resistencia mecánica (ver Tabla III).

Además, la norma recoge otras propiedades como son: la reactividad, que viene dada por el temperatura de reacción ( $T_{\text{max}}$ ) y tiempo de reacción ( $t_{\text{r}}$ ), la demanda de agua, la retención de agua y la densidad aparente en kg/dm<sup>3</sup> (ver Tabla IV).

La figura 1 muestra cómo llevar a cabo un control de calidad sobre la cal, en base a las recomendaciones dadas por la normativa UNE EN 459-2 y trabajos de investigación.

### > Propiedades químicas

La composición química es un factor fundamental para definir las cales, en base a esto la norma UNE EN 459-2/94 recomienda las siguientes determinaciones y métodos de análisis:

- > Determinación del contenido en  $\text{CaO}+\text{MgO}$ . Método recomendado UNE-EN196-2.
- > Determinación del contenido en  $\text{MgO}$ . Método recomendado UNE-EN 196-2.
- > Determinación del contenido en  $\text{CO}_2$ . Método recomendado UNE-EN 169-21: Determinación del contenido en  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{CO}_2$  y álcalis del cemento. También se puede seguir el método alternativo (volumétrico), que consiste en medir el volumen de  $\text{CO}_2$  contenido en la cal en forma de carbonato con  $\text{ClH}$ .
- > Determinación del contenido en  $\text{SO}_3$ . Método recomendado UNE-EN 196-2 (% de  $\text{SO}_3$ ).
- > Pérdida por calcinación. Método recomendado UNE EN196-2.
- > Contenido en cal útil (en cales aéreas y cales hidráulicas). Se pueden seguir el método de ensayo descrito en la norma UNE-EN 459-2 para cales aéreas e hidráulicas.

### > Propiedades físicas

La norma UNE ENV 459-2 recoge las siguientes propiedades físicas y como determinarlas:

- > **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  $\mu\text{m}$ , obtenién-

## 092 - 093

### Criterios

Programa de normalización. Morteros. Aglomerante y agua de amasado

PH45 - Octubre 2003

Tabla I. 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

Tabla II. Normativa UNE, en vigor, aplicada a las cales

	Normativa UNE relacionada con la cal
ENV495-1/96	Cales para construcción. Parte 1: Definiciones, especificaciones y criterios de conformidad.
EN 459-2/95	Cales para construcción. Parte 2: Métodos de ensayo.
UNEEN196-/96	Métodos de ensayo de cementos. Parte 2: Análisis químico de cementos
UNE EN-196-3/94	Método de ensayo de cementos. Parte 3: Determinación del tiempo de fraguado y estabilidad de volumen.
UNE EN-196-6/91	Método de ensayo de cementos. Parte 6: Determinación de la finura.
UNE EN-196-21	Métodos de ensayo de cementos. Parte 21: Determinación del contenido en cloruros, anhídrido carbónico y álcalis del cemento.

Tabla III. Requisitos de la cal según la norma UNE-ENV 459-1

Clasificación	Composición	MgO	CO <sub>2</sub>	SO <sub>3</sub>	Cal util
<b>Cales aéreas</b>	CaO+MgO				
CL90	≥90% CaO	≤5 <sup>1),3)</sup>	≤4	≤2	-
CL80	≥80% CaO	≤5	≤7	≤2	-
CL70	≥70% CaO	≤5	≤12	≤2	-
DL85	≥85% CaO	≥30	≤7	≤2	-
DL80	≥80% CaO	≥5 <sup>1)</sup>	≤7	≤2	-
<b>Cales hidráulicas</b>	Resistencia a compresión N/mm <sup>2</sup> (28 días)				
HL2	2 a 2,5	-	-	≤3 <sup>2)</sup>	≥8
HL 3,5	3,5 a 10	-	-	≤3 <sup>2)</sup>	≥6
HL5	5 a 15	-	-	£3 <sup>2)</sup>	≥3
	>20%	-	-	-	-
NHL-P	puzolanas				

Tabla IV. Densidad aparente

Tipos de cales	Densidad aparente (kg/dm <sup>3</sup> )
Tipos de cales	0,3-0,6 (apagadas)
CL 70/80/90	0,4-0,6 (apagadas)
DL 80/85	0,4-0,8
HL2	0,5-0,9
HL 3,5	0,6-1,0
HL5	

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

Tipo de cal	Método de ensayo
Cales que no sean: cal viva, pasta de cal y dolomías calcinadas o hidratadas.	Método de referencia (A) y Método alternativo (B)
Cales hidráulicas con 3%<SO <sub>3</sub> <7%	Ensayo de agua fría (C)
Cal viva, pasta de cal y dolomías Calcinadas o hidratadas	Método (D)
Cales que contengan partículas >0,2 mm.	Método (E)

dose R como el residuo sobre dicho tamiz y 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 UNE ENV 459-2 define varios métodos de ensayo en función de las variaciones físico-químicas que pueden presentar las cales (ver Tabla V).

**A. Método de referencia.** Descrito en la norma UNE EN-196-3 con las siguientes modificaciones: las cales tipo CL70, CL80, HL 3.5 serán precuradas durante  $48 \pm 0,5$  h, con un mínimo de humedad relativa a  $21 \pm 1^\circ\text{C}$  de temperatura. El procedimiento consiste en hidratar en 20 ml. de agua 75 gr. de cal hidratada en un molde normalizado (UNE196-3), se mide la distancia entre dos extremos (a) y se llevan los moldes a una cámara de vapor (en ebullición) durante  $180 \pm 10$  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 UNE ENV 459-1/94.

**B. Método alternativo.** Cuando la hidratación de la cal es incompleta el CaO no hidratado genera expansión que se puede medir observando como 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 introducen en la cámara de vapor durante 90 min. y se vuelven a medir los diámetros.

**C. Ensayo de agua fría,** método aplicable también a cales hidráulicas (%  $\text{SO}_3$  entre 3 y 7%). La torta con cal hidráulica amasada con agua depositada sobre placa de vidrio (por duplicado), se colocan durante 24 horas en una cámara de almacenamiento de aire húmedo, con  $\text{HR} > 90\%$  y posteriormente se introducen en agua. Durante 27 días se observa si los bordes se alabean o se forman grietas “soplo”.

**D. Método de ensayo aplicable a cales vivas o hidratadas de cal o dolomías.** En este caso las tortas se depositan sobre placas porosas absorbentes durante 5 minutos y posteriormente en una estufa durante 4 horas a  $105 \pm 5$  C. Se considerará satisfactorio el ensayo si las tortas se mantienen firmes sin mostrar grietas de expansión.

**E. Método de ensayo aplicable a cales vivas o hidratadas de cal o dolomía con partículas de tamaño mayor de 0,2 mm.** En este ensayo se añade a la cal yeso 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 describe un procedimiento de referencia y permite el uso de métodos alternativos. Se determina observando la penetración de una aguja

Control de calidad de la cal		
Propiedades químicas	Propiedades físicas	Técnicas de análisis
<ul style="list-style-type: none"> <li>&gt; Contenido CaO+MgO</li> <li>&gt; Contenido MgO</li> <li>&gt; Contenido CO2</li> <li>&gt; Contenido SO2</li> <li>Pérdida calcinación</li> <li>&gt; Cal útil</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>&gt; Finura</li> <li>&gt; Estabilidad de volumen</li> <li>&gt; Tiempo de fraguado</li> <li>&gt; Rendimiento</li> <li>&gt; Densidad aparente</li> <li>&gt; Reactividad</li> <li>&gt; Aire libre</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>&gt; Difracción de Rx</li> <li>&gt; Microscopía óptica</li> <li>&gt; SEM</li> <li>&gt; TEM</li> <li>&gt; ATP</li> <li>&gt; TG</li> </ul>

Figura 1. Control de calidad de la cal (UNE EN459-2).

en la 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. Estas se adaptan a un accesorio anular, para facilitar la observación de las penetraciones pequeñas, los intervalos de penetración pueden ampliarse hasta 30 min. El tiempo final del fraguado se anota con una aproximación de 15 min., cuando el accesorio anular deja de marcar la probeta.

> **Densidad aparente.** Para la determinación se realizan tres medidas en el aparato de diseño Böhme (norma EN 459-2). Se parte de una muestra de cal sin secar que se hace pasar por el tamiz de 2,0 mm. (desmenuzando los terrones todo lo que se pueda).

> **Rendimiento.** El procedimiento indicado en la norma EN 459-2 consiste en mezclar 320 ml. de agua a  $20 \pm 2^\circ\text{C}$  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  $105^\circ\text{C}$  se libera agua retenida, la pérdida de masa a esa temperatura durante 2 horas se denomina humedad  $W_f$  y se calcula de la siguiente manera:

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

Donde:  $W_f$  es el contenido en humedad en % en masa,  
 $M_{11}$  es la masa inicial de la muestra,  
 $M_{12}$  la masa de la muestra 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). El procedimiento consiste en ir añadiendo agua

## 094 - 095

### Criterios

Programa de normalización. Morteros. Aglomerante y agua de amasado

PH45 - Octubre 2003

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: su composición química-mineralógica, la morfología y tamaño de los cristales.

> **Difracción de rayos X.** Esta técnica experimental de amplio uso constituye en la actualidad una herramienta de trabajo en distintas disciplinas científicas. El análisis de la cal a través del método en polvo permite:

- > La identificación de las fases minerales presentes en la cal y su semicuantificación (con un error de al menos un 5%).
- > El análisis de los diafractas nos ofrece, además, información sobre el grado de cristalinidad de las fases cristalinas, en el que influyen otros factores como son la forma, tamaño, orientación de los distintos minerales, la manipulación previa de las muestras, etc. (Mellinguer, 1979).
- > La determinación del parámetro R (Cazalla, 2000), permite poner de manifiesto el grado de carbonatación de la cal. Se define como la relación:

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

> Y por último el parámetro A(0001) que mide la relación de hidróxido de calcio de hábito planar respecto a otras morfologías (ejemplo prismática). Se determina de la siguiente forma (Detwiler y Monteiro, 1988):

$$A_{0001} = \frac{I_{0001}}{I_{0010}}$$

donde:  $I_{0001}$  y  $I_{0010}$  son las intensidades (áreas integradas 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).** Esta técnica es de gran utilidad en el estudio de superficies rugosas, con aumentos que van desde 20 a más de 100.000. El análisis con electrones secundarios permite observar las formas cristalinas de los componentes de la cal (portlandita, periclusa, óxido de calcio, brucita, calcita y dolomita), su tamaño y con un seguimiento controlado los procesos de transformación que experimenta con el tiempo la cal.

> **Microscopía electrónica de Transmisión (TEM).** Esta técnica permite determinar el hábito, morfología y tamaño microcristalino, además de la composición química de la cal a emplear.

> **Análisis granulométrico (ATP).** Esta técnica permite determinar el análisis granulométrico de la fracción de aglomerante comprendido entre 0,5 y 100  $\mu\text{m}$ , 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).** Los análisis térmicos se basan en la relación entre la temperatura y alguna otra propiedad del sistema. Dentro de esta técnica podemos destacar la termogravimetría basada en la medida, de forma continua, de la pérdida o ganancia de peso de una muestra cuando se calienta entre 900-1500°C. El termograma 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

### Introducción

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 del mortero la trabajabilidad necesaria. Por otra parte, el agua cubre un papel importante durante el proceso de curado evitando la desecación, mejorar la hidratación del aglomerante e impedir su retracción prematura. Por estas razones debe ser más estricta la aptitud del agua de curado que la de amasado.

#### > 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 VI).

Las recomendaciones que se han de seguir para la toma de muestras (UNE 7236) son:

- > 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 VII.

**Tabla VI. Normas UNE aplicadas al agua de amasado en morteros**

Norma	Contenido de la norma
UNE 7.236.	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/	Determinación del contenido total de sustancias solubles en agua para amasado de hormigones.
UNE 7131	Determinación del contenido en sulfatos en agua de amasado para morteros y hormigones
UNE 7178	Determinación de los cloruros contenidos en el agua utilizada para la fabricación de morteros y hormigones
UNE 7235	Determinación de los aceites y grasas contenidos en el agua de amasado de morteros y hormigones.
UNE 7132	Determinación cualitativa de hidratos de carbono en aguas de amasado para morteros y hormigones.

**Tabla VII. Condiciones que debe cumplir el agua de amasado**

Determinación	Valores permitidos	Riesgos
pH (UNE 7.234)	Mínimo 5	Alteraciones del fraguado y endurecimiento
Sustancias disueltas (UNE 7.130)	Máximo 15g /l	Eflorescencias o manchas, pérdida de resistencia mecánica y fenómenos expansivos
Sulfatos , SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> (UNE 7.131)	Máximo 1g /l	Alteraciones del fraguado y endurecimiento, pérdida de durabilidad
Salvo el cemento SR	5.g/l	
Ion Cl <sup>-</sup> (UNE 7.178) con armaduras Pretensado	Máximo 6g/l 1g por litro	Corrosión de armaduras y elementos metálicos
Hidratos de carbono (UNE 7.132)	0	No fragua y alteraciones en el endurecimiento
Sustancias orgánicas solubles en éter (UNE 7.235)	máximo 15 g/l	Alteraciones del fraguado y endurecimiento, pérdida de durabilidad

## Bibliografía

**Adams, F.W.** (1927) "Effect on particle size on the hydration of lime". Industrial and Engineering Chemistry. Vol 19 n°5, 1927, pp. 589-591

**Adams, F.W.; Kneller, W and Dollimore, D.** (1992) " Thermal analysis (TA) of lime and gypsum based medieval mortars. Thermochimica Acta, 211, 1992, pp. 93-106

**Arhurt, J.** (1990) "Mortars for stone building in Conservation of building and Decorative Stone". Vol 2, ed. J. Ashurst and F.G. Dimes, Butterworth-Heinemann. London, 1990, pp. 78-93

**Asociación Española para la Normalización (AENOR). UNE: 7094/55.** Método para medir la humedad en cales y calizas.

**Asociación Española para la Normalización (AENOR) :**

**UNE: 7095/55.** Método para la determinación del SiO<sub>2</sub> y residuo insoluble de los Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, CaO y MgO en cales y calizas.

**UNE: 7096/55.** Método para la determinación del SO<sub>2</sub> en calizas y cales.

**UNE 7097/55.** Determinación del azufre total en cales y calizas.

**UNE: 7098/55.** Determinación del MgO en cales y calizas.

**UNE: 7187/55.** Determinación en húmedo de la finura de molido en cales.

**UNE: 7188/62.** Determinación del tiempo de fraguado de las cales hidráulicas.

**UNE: 7189/62.** Determinación de la resistencia a compresión de las cales hidráulicas.

**UNE: 7190/83.** Determinación en seco de la finura del molido de las cales hidráulicas.

**UNE: 80501-1/93.** Cales para la construcción. Parte 1. Definición y especificidad.

**UNE: 80501-2/93.** Cales para la construcción. Parte 2. Métodos de ensayo.

**UNE: 80502/97.** Cales vivas o hidratadas utilizadas en la estabilización de suelos.

**UNE ENV 495-1/96.** Cales para construcción. Parte 1: Definiciones, especificaciones y criterios de conformidad.

**UNE: ENV 459-2/95.** Cales para construcción. Parte 2: Métodos de ensayo.

**UNE ENV-196-1/94.** Métodos de ensayo de cementos. Parte 1. Determinación de resistencias mecánicas.

**UNE ENV-196-2/96.** Métodos de ensayo de cementos. Parte 2 Análisis químico de cementos.

**UNE ENV-196-3/94.** Método de ensayo de cementos. Parte 3. Determinación del tiempo de fraguado y estabilidad de volumen.

**UNE EN-196-6/91.** Método de ensayo de cementos. Parte 6. Determinación de la finura.

**UNE EN-196-21.** Métodos de ensayo de cementos. Parte 21. Determinación del contenido en cloruros, anhídrido carbónico y álcalis del cemento.

**UNE 80-108-86.** Método de ensayo de cementos: Ensayos físicos. Determinación de la finura de molido por tamizado húmedo.

**UNE 80-122-91.** Métodos de ensayo de cementos. Determinación de la finura.

**UNE 72.236.** 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 72130/.** Determinación del contenido total de sustancias solubles en agua para amasado de hormigones.

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

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

**UNE 7235.** Determinación de los aceites y grasas contenidos en el agua de amasado de morteros y hormigones.

**UNE 7132.** Determinación cualitativa de hidratos de carbono en aguas de amasado para morteros y hormigones.

096 - 097

## Criterios

Programa de normalización. Morteros. Aglomerante y agua de amasado

PH45 - Octubre 2003

**Bhandarkar, S.; Brow, R. and Estrin, J.** (1989a) "Studies in rapid precipitation of hydroxide of calcium". *Journal of Crystal Growth*, 97, 1989, pp. 406-414

**Bhandarkar, S.; Brow, R. and Estrin, J.** (1989b) "Arqueos phase coprecipitation of hydroxide of calcium and magnesium". *Journal of Crystal Growth*, 98, 1989, pp. 843-846

**Carrinton, D. (1996) and Swallow, P.** (1996) "Lime and lime mortars-Part two". *Journal of architectural Conservation*, 1, 1996, pp. 7-22

**Cazalla, O.; Rodriguez-Navarro, C.; Sebastian, E.; Cultrone, G. and De la Torre, M. J.** (2000) "Aging of Lime Putty: Effects on Traditional Lime Mortars Carbonation." *Journal of the American Ceramic Society*, 83, 2000, pp. 1070-1076

**Cazalla, O.; Sebastian, E.; Cultrone, G., De la Torre, M. J. and Rodriguez-Navarro, C.** "Comportamiento de Morteros de Restauración en Función de las Cales y Áridos Empleados en su Fabricación." *Ajimez*, 3

**Cazalla, O.; Rodriguez-Navarro, C.; Sebastian, E.; Cultrone, G.; De la Torre, M. J. and 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, O.** (2002) "Morteros de cal. Aplicación en Patrimonio histórico". Tesis Doctoral. Universidad de Granada.

**Cowper, A.** (1927) "Lime and lime mortars". Dolohead Publishing Ltd, Dosert (1998).

**Detwiler R.J. and Monteiro P.J.** (1988) *Textural of calcium hydroxide near the Concrete Research*. Vol. 18, 1988, pp. 823-829

**Giles, D.E.; Ritchie, I.M. and Xu, A.** (1993) "The kinetics of dissolution of skaked". *Hydromellargy*

**De la Iglesia Fdez, A.** (1996) "Difracción de rayos X". *Degradación y Conservación del Patrimonio*. Madrid: Editorial Complutense, 1996

**Elert, K.; Rodriguez-Navarro, C.; Sebastian Pardo, E.; Hansen, E.; Cazalla, O.** (2002) "Lime mortars for the conservation of historic Buildings". *Studies in Conservation*, vol. 47, n° 1, 2002

**Hedin, R.** (1963) "Plasticity of lime mortars". *Azbe Award*, n° 3. National Lime Association. Washington DC.

**Mellinguer, R.M.** (1979) "Quantative X-ray diffraction analysis of clay minerals. An evolution. SRC". *Report, Saskatchewan Research Council G-79*, 6, 1979, pp. 1-46

**Montoya Irigoyen, C.** (2002) "Estudio mineralógico, fisicoquímico, mecánico y durabilidad de morteros de cal del románico en Navarra". Tesis Doctoral. Pamplona

**Murray, J.A.** (1956) "Report to National lime Association on Summary of Fundamental research on lime and application of resultas to comercial problems". *NLA*, 19

**Ontiveros Ortega, E.** (2001) "Programa de normalización de estudios previos y control de calidad en las Intervenciones. Morteros empleados en construcciones históricas. Metodología de estudio. Fundamentos (1ª parte). *PH Boletín del Instituto Andaluz del Patrimonio Histórico*, n° 37, 2001, pp 84-95

**Rodríguez Navarro, C.; Hansen, E. and Ginel, W.S.** (1998) "Calcium hydroxide crystal evolution upon aging of lime putty". *Journal American Ceramic Society*, vol. 81, 1998, pp. 3032-3034

**Whitman, W.G. and Davis, G.H.B.** (1926) "The hydration of lime". *Industrial and Engineering Chemistry*. Vol. 18 n° 2, 1926, pp. 118-120

## Nota

<sup>1</sup>Referente al artículo publicado en PH n° 39 (2002), hay que aclarar que la Instrucción EH-E/1999 actualmente en vigor establece unas modificaciones respecto a la anterior EH-91 que no se recogieron en dicho artículo y que se pone de manifiesto en esta anotación de la forma que se indica a continuación:

La EHE-99 introduce modificaciones en la serie de tamices seleccionada para la determinación del tamaño máximo del árido dentro del estudio granulométrico. La serie de tamices seleccionada para su determinación se indica a continuación, junto con la serie complementaria.

TablaA. Serie de tamices UNE EN 933-2/96

125	63	31,5	16	8	4	2	1	0,5	0,25	0,025	0,063
Serie complementaria											
40											
20											
10											

La EHE establece la valoración de las granulometrías de los áridos de acuerdo con los husos granulométricos que se indican a continuación.

Tabla B. Husos granulométricos definidos EHE (en % retenido por tamices)

Tamices (mm)	4	2	0,5	1	0mm	0125	0,063
Límite inferior	0%	4%	16%	40%	7%	82%	100%
Límite superior	20%	38%	60%	82%	94%	100%	100%

Esta Instrucción introduce también variaciones respecto al límite de finos que se establece según el tamiz 0,063 UNE EN 933-2 en lugar del 0,08 UNE 7050 y un valor para el coeficiente de forma >0,20 UNE EN 933-3 en lugar de 0,15 UNE.