

REPRODUCCIÓN EXPERIMENTAL DE MORTEROS DE CAL GRASA: EL OPUS CAEMENTICIUM ROMANO

Rosa Calero Cordeiro

LOS ORÍGENES

Los romanos introdujeron el mortero de cal en su arquitectura hacia finales del siglo III a. C. Las influencias de Oriente o el mundo heleno llegaron primero a la Italia meridional y central, Campania y *Latium*, dos regiones donde encontramos caliza apropiada para la preparación de cal y puzolana en grandes cantidades. Esta técnica se desarrollará y generalizará rápidamente, hacia el año 160 a. C., sustituyendo a los sistemas utilizados anteriormente.

PROCESOS PARA LA OBTENCIÓN DE LA CAL

La cal se obtiene calentando una piedra calcárea, hecha esencialmente de carbonato cálcico, a temperaturas bastante altas. La piedra de cal se reduce en trozos (si ya no son por ejemplo piedras de río), se introduce en el horno y se calcina a una temperatura entre 700° y 900° C, para obtener la calcinación del calcar en cal viva (óxido cálcico, CaO). Mediante este proceso pierde su gas carbónico.

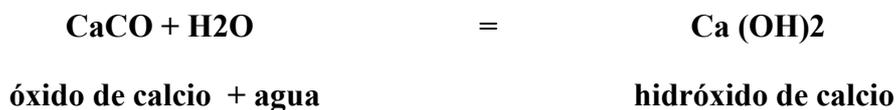
La ecuación química de la calcinación de la caliza pura se expresa de la siguiente forma:



El producto restante, es un óxido de calcio al que llama cal viva. Es una masa porosa, tan deseosa de agua que se hidrata espontáneamente al ponerla en contacto con el aire y en base a la cantidad de impurezas contenidas en el calcar del principio; su color irá variando del blanco al amarillo claro.

La hidratación o apagado se hace por inmersión en agua y provoca la dislocación de los bloques, que se hinchan y desprenden un gran calor transformándose en una pasta, que es la cal apagada. Este es el material plástico que se va a mezclar con los conglomerados para obtener las argamasas.

La ecuación química de esta segunda transformación se expresa así:



Es preciso señalar que pueden aparecer otros cuerpos de reacción química, pudiendo modificar los procesos de apagado y diversificando la composición del producto acabado; uno de estos elementos puede ser la arcilla.

La cal puede dividirse en dos grandes categorías en función de la proporción de arcilla:

- 1.- Cales aéreas: se denominan así porque su proceso de cristalización sólo se puede producir mediante la presencia de aire, presentan un lento fraguado y la posibilidad de ser conservadas en grandes cantidades. Estas cales aéreas se dividen en:
 - 1.1.- Cal Grasa: resulta de la calcinación y el apagado de caliza pura o con un contenido del 0,1 a 1% de arcilla.
 - 1.2.- Cales Magras: se obtienen mediante cocción y apagado, su porcentaje de arcillas es del 2 al 8%.
- 2.- Cales hidráulicas: su fraguado puede realizarse en contacto con el agua, un mortero fresco; aglomerado con cales de este tipo, puede sumergirse tras haberle dado forma, sin que su endurecimiento se interrumpa, y se consigue con calizas que contengan más de un 8% de arcillas. Pero aquellas que contengan más de un 20% de arcilla no se utilizan para conseguir cal, ya que a partir de un 35%, la roca se vuelve extremadamente blanda y se desmenuza fácilmente; con un 50% de arcilla en su composición se vuelve plástica.

Los análisis que se han realizado en la actualidad señalan que los constructores romanos sólo utilizaron cales aéreas.

Habría que hablar también de los cementos, ya que aparecen con frecuencia en textos que hablan sobre arquitectura romana. *Caementa* designa a los guijarros que se mezclan con el aglomerante para la preparación de las mamposterías, no al aglomerante en sí; así es como el *opus caementicium* define este tipo de técnica; por lo tanto, los cementos son mezclas artificiales de cal con arcilla y sales metálicas, por lo general óxidos de hierro y óxidos de magnesio.

LOS MORTEROS

La cal en su estado puro solamente se utilizaba para fabricar lechadas de cal, que son una pintura blanca cuya preparación consistía simplemente en diluir ese material en un 70-80% de agua, y cuya aplicación al soporte se realizaba con un pincel.

Será bajo la forma de mortero como se utilice la cal en mampostería, mezclada en proporciones variables con materiales diversos llamados conglomerados y que desempeñan la misma función que los desengrasantes mezclados con la arcilla. Sin la presencia de estos conglomerados, la cal extendida en grandes cantidades se agrietaría al secarse por la pérdida de volumen, perdiendo sus cualidades de cola, además, sus características de cal grasa impedirían que fraguara en el interior de la masa, conservando una plasticidad interna que podría producir apelmazamientos y deslizamientos peligrosos en la obra de mampostería.

En la obra de Vitruvio podemos encontrar las “recetas” de morteros que él propone, entre las que destaca la utilización de una arena volcánica, la puzolana.

Las virtudes de la puzolana permiten al mortero ser resistente al agua y fraguar en un entorno muy húmedo, esto se debe a la presencia de una gran cantidad de silicatos de alúmina, que, unidos a la cal, hacen que ésta se transforme artificialmente en una cal hidráulica. Es la misma transformación que se produce al mezclar cerámica triturada con mortero, mezcla que utilizaron los romanos para sus revestimientos estancos.

Para resumir las proporciones de los morteros antiguos:

CAL	ÁRIDOS	AGUA
1 volumen de cal	3 volúmenes de arena de cantera. (Vitruvio II, V, 5)	15 - 20%
1 volumen de cal	2 volúmenes de arena de río (Vitruvio II, V, 6)	15 - 20%
1 volumen de cal	2 volúmenes de arena de río 1 volumen de tejoletas (Vitruvio II, V, 7)	15 - 20%
1 volumen de cal	2 volúmenes de puzolanas 1 volumen de tejoletas (Vitruvio V, XII, 8-9, obras marítimas)	15 - 20%

La proporción de agua para hacer la mezcla se determinará en función del clima, y por lo tanto en función del porcentaje de evaporación y del uso, es decir, un mortero que se utilizará para la realización de cimentaciones, estará menos húmedo porque estará menos ventilado que un mortero de juntas o enlucidos; asimismo, la arena y su granulometría variarán según se trate de un mortero de unión o de suelo mezclado con cascotes gruesos, o de un mortero de enlucido hecho con arena más fina.

El mortero debe su buena fijación al cuidado con que se haya aportado a la mezcla de la cal grasa con la arena y la tejoleta, la cual debe ser lo más homogénea posible. Esto se realizará cerca de la obra que se esté realizando, sobre un área de tierra apisonada en la que se extenderá la arena en forma de cráter (de 1 a 3 metros de diámetro, en medio del cual se deposita el montón de cal grasa), se irá añadiendo el agua poco a poco y se mezclarán los elementos.

LA EXPERIMENTACIÓN

LOS MOLDES



Fig. 1. Muro compuesto romano

La gran aportación de la técnica romana al arte de construir fue la adopción del Opus Emplectum, una adaptación del Emplecton griego. Los romanos universalizaron esta técnica y produjeron una gran cantidad de soluciones prácticas a los problemas que planteaba su ejecución. Esta evolución fue posible gracias a la generalización en el uso del Opus Caementicium, hecho que se produjo aproximadamente a principios del siglo II. A partir de este momento, los constructores romanos fueron abandonando de forma progresiva la ejecución de muros homogéneos de una sola hoja en beneficio del Opus Emplectum. Detalle de un muro compuesto romano en el que se pueden apreciar los travesaños de apoyo del andamiaje y unos ladrillos de cosido de las tres hojas que forman el elemento, según Choisy.

ladrillos de cosido de las tres hojas que forman el elemento, según Choisy.

Una de las diferencias entre el hormigón moderno y los morteros de cal que utilizaban los constructores romanos reside en que el mortero romano es una mezcla que se realiza en la pared, es decir, entre dos paramentos de ladrillo previamente montados o que se van montando a la vez que se va vertiendo en el hueco que se va dejando entre los dos paramentos verticales que van formando esos ladrillos y que a su vez, se sujetan por unos encofrados de madera que evitan que esos ladrillos y el mortero se desplomen mientras no se ha fraguado (Fig. 1 y 2). Por el contrario, el hormigón actual es una mezcla preparada con antelación, realizada en la fábrica y que se vierte directamente en los encofrados que contienen las armaduras de vigas, pilares y zunchos perimetrales sin que se añadan posteriormente otro tipo de materiales.

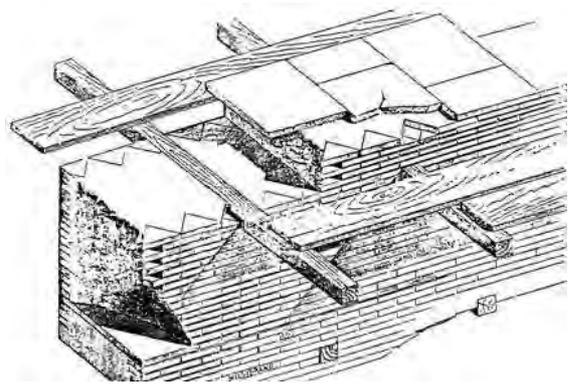


Fig. 2. Santuario de la Fortuna Pimigenia.
(Palestrina)

Las dimensiones interiores de estos moldes son las siguientes:



Fig. 3. Moldes para mezclas

El que tendríamos en un primer plano y en cuyo interior se encuentra la escala gráfica presenta una dimensión interior de 17.2 x 35.2 x 0.67 cm. El molde que se encuentra en un segundo plano tendría unas dimensiones de 16 x 35.8 x 0.67 cm. Esas pequeñas fluctuaciones se deben a la falta de destreza con el serrucho en la experimentación (Fig. 3). Los moldes, donde se depositarán los dos tipos de mezcla, se han realizado en madera de pino macizo.

Este trabajo pretende obtener una muestra, por ello se optó por depositar la mezcla en un molde de madera; en realidad, lo más apropiado hubiese sido construir unos paramentos verticales de ladrillo sujetos por unos andamiajes a modo de encofrados que sujetasen el conjunto, pero eso hubiera supuesto problemas de traslado por su tamaño y sobre todo por su peso. Teniendo en cuenta este problema, se fabricaron un par de cajones en madera de pino y abeto sujetos por una serie de tirafondos y unos angulares para reforzar las uniones en escuadra de los cantos.

LOS MATERIALES

Antes de realizar alguna de las dos mezclas, era imprescindible saber qué materiales eran necesarios y conseguirlos, para ello, se contactó con diferentes empresas que se dedican a la producción de materiales que se utilizan en las obras actualmente.

En cuanto a definir los materiales necesarios bastaba con la lectura de los trabajos de Vitrubio, pero la explicación que se daba de los mismos, aunque era más o menos clara, planteaba dudas, como por ejemplo, qué tipo de cal era la que se utilizaba realmente, ¿eran cales aéreas o hidráulicas?, si era aérea, ¿cuál de ellas, grasa o magra?. ¿Cuánto tiempo debía estar sumergida en agua?, también se plantean dudas en cuanto a los tipos de arena, ya que en la actualidad se utiliza la arena de miga pero, ¿era a la que Vitrubio denominaba arena de cantera? Más adelante se vio que la arena de cantera era un tipo de arena que se extraía de las explotaciones de las rocas o minerales de las canteras, y de esa extracción se producían arenillas que eran comercializadas como arenas de cantera. En cuanto a lo que

era arena de río o de playa, se siguen utilizando en la actualidad para la construcción por lo que su obtención era sencilla.

Contando con el apoyo de distintos profesionales de la empresa Intemac, pudimos obtener una primera información sobre el proceso a reproducir. La cal utilizada era hidráulica y se apagaba durante años en lechos inundados y según las necesidades de las construcciones que se iban realizando se aprovisionaban de la cal del fondo de los lechos y añadiéndose más cantidad de cal viva. A esto se le une la particularidad de que las cales en la actualidad contienen entre un 15 y un 20 % de silicatos.

Otra cuestión que resulta interesante plantear, es someter a las mezclas a estudios de carga (tracción, compresión y flexión) así como de tiempos de fraguado (para lo cual se realizan familias de probetas que se someterán a rotura a los 28, 75 y 90 días una vez realizada la mezcla o de su puesta en obra) y reflejar los resultados, pero debido a su elevado coste, ya que se trata de materiales fuera de toda normativa establecida, ha sido imposible realizar estos análisis, aunque sería una cuestión interesante para futuros estudios.

Igualmente se procedió a realizar distintas encuestas con maestros estucadores que continuaban utilizando morteros tradicionales. Concretamente contactamos con los profesionales D. Emilio Quílez y D. Julio Barbero.

Barbero, en conversación telefónica, informó que en su empresa todavía activa, trabaja con materiales y técnicas tradicionales y que las cales que ellos utilizaban eran cales grasas, ricas en carbonatos cálcicos (alrededor de un 90%), estas cales cuanto más tiempo estuviesen sumergidas en agua más plásticas se volvían y se trabajaban mejor (de seis meses a un año de inmersión). Quiero desde estas líneas agradecer la colaboración prestada en este trabajo por D. Julio Barbero quien me obsequió con todo el material necesario.

Una vez obtenida la cal, se empezó por cribar la arena para eliminar cualquier resto de hojas que pudiese existir, ya que la arena de río provenía de un pueblo de la sierra norte de Madrid y se encontraba almacenada a la intemperie, por lo que presentaba gran cantidad de restos vegetales. Este proceso fue rápido y la arena obtenida presentaba una textura limpia y suave.

Tras el cribado de la arena, la siguiente operación consistía en ir deshaciendo la teja de la que se disponía. Estas tejas habían sido obtenidas de un pueblo abandonado de León, por lo que el grosor y composición de las mismas no eran los que se podrían encontrar en la actualidad en el mercado, ya que el pueblo en cuestión era de construcción antigua y lo que se pretendía era encontrar una cerámica lo más antigua posible.



Fig. 4. Tejas para una de las mezclas

Se aprecia en la imagen de las tejas una diferencia de color, unos fragmentos más anaranjados y otros mucho más rojizos (Fig. 4). Este cambio de color podría estar producido por el tipo de cocción al que fue sometido en su momento o por la acción de los agentes climáticos, pero lo más indicado sería analizar los diferentes tipos de fragmentos para ver si estas diferencias tienen alguna repercusión en las mezclas en las que se utilice teja.

Las dimensiones de la teja completa son:

- Desarrollo de la curvatura de mayor radio: 243 mm.
- Desarrollo de la curvatura de menor radio: 210 mm.
- Longitud: 280 mm.
- Superficie total de la teja: 9744 mm². $A = (B + b) \cdot h / 2$

Procedimos a fragmentar las cerámicas partiendo de fragmentos variados que presentaban durezas diferentes, por lo que en algunos casos el machaqueo se realizó de una forma más sencilla, ya que esa cerámica, aún estando cocida, resultaba más blanda al impacto del martillo y su rotura era más fácil, mientras que, por el contrario, existían trozos cuya dureza era mayor y por lo tanto el esfuerzo para realizar el mismo trabajo aumentaba. (Fig. 5).

Esta teja más dura, presentaba un color rojizo más intenso, mientras que la teja que era más fácil de machacar poseía un color anaranjado.

Tras obtener la cerámica machacada se procedió a su cribado para eliminar el polvo, siguiendo las instrucciones de la obra de Vitruvio.



Fig 5. Proceso de machaqueo de la teja sobre piedra

Una vez dispuestos todos los materiales se decidió cuál sería la unidad de medida para determinar las cantidades de material necesarias para hacer las mezclas (Fig. 6). Se estableció que el contenedor de la báscula para pesar los materiales sería una buena unidad. Este contenedor tenía las siguientes dimensiones:

- Longitud: 110 mm.
- Ancho: 84 mm.
- Altura: 60 mm.
- Volumen total del contenedor: 0.5544 mm³.



Fig. 6. Materiales

LAS MEZCLAS

Se optó por realizar dos mezclas, la segunda y la tercera, porque los materiales necesarios eran más fáciles de conseguir.

CAL	ÁRIDOS	AGUA
1 volumen de cal	3 volúmenes de arena de cantera (Vitruvio II, V, 5)	15 - 20%
1 volumen de cal	2 volúmenes de arena de río (Vitruvio II, V, 6)	15 - 20%
1 volumen de cal	2 volúmenes de arena de río 1 volumen de tejoletas (Vitruvio II, V, 7)	15 - 20%
1 volumen de cal	2 volúmenes de puzolanas 1 volumen de tejoletas (Vitruvio V, XII, 8-9, obras marítimas)	15 - 20%

La Primera Mezcla

1 volumen de cal 680 gr.	2 volúmenes de arena de río (Vitruvio II, V, 6) 700 + 700= 1400gr	15 - 20% 15%=312 gr.
-----------------------------	--	-------------------------

- Un volumen de cal: 680gr

Densidad aparente de la cal

$$Da = \text{gr/mm}^3 \quad 680\text{gr}/0.5544\text{m.m}^3 = 1226.5512 \text{ gr/m.m.}^3$$

- Un volumen de arena: 700gr.

Densidad aparente de la arena

$$Da = \text{gr/m.m}^3 \quad 700\text{gr}/0.5544\text{mm}^3 = 1262.6263 \text{ gr/mm}^3$$

En un cuenco de dimensiones medias se depositaron dos unidades de arena cribada y una unidad de cal, a la que previamente se había escurrido el agua sobrante y se comenzó a mezclar los dos elementos. En un primer momento la mezcla se realizaba con cierta facilidad, ya que la cal aglutinaba perfectamente el volumen de arena, pero en poco tiempo fue necesario incluir pequeñas medidas de agua, estas aportaciones se fueron haciendo de 10 en 10 gramos hasta completar los 312 gr. de agua, lo que supone el 15%.

Una vez obtenida la argamasa y antes de volcarla en el molde se procedió a mojar con una brocha la base y los cantos de dicho molde de agua para evitar que la madera comenzase a absorber el agua de la mezcla, para posteriormente rellenar el molde y repartir la mezcla lo más homogéneamente posible en su interior (Fig. 7)



Fig. 7. Molde relleno con mezcla ya repartida homogéneamente fraguando

para después dejarla fraguar. En este momento se planteó una duda, ¿se usaría algún tipo de grasa como desencofrante? Actualmente, los agentes desencofrantes facilitan el desprendimiento del hormigón de los moldes o paneles; se utilizan tanto en los lugares de construcción como en fábricas de encofrado de hormigón armado. La mayoría de estos agentes que facilitan el desprendimiento del hormigón son derivados de aceite mineral (petróleo) y pueden contener disolventes orgánicos volátiles. Los productos utilizados actualmente representan un riesgo para la salud de los trabajadores y contribuyen a un problema de contaminación medioambiental. Pero en construcciones romanas, si usaban algo, sería algún elemento graso, de fácil extracción y tratamiento y muy abundante en la cuenca mediterránea, pero ante la falta de información con respecto a este punto, no se utilizó ningún tipo de grasa, quizá sería interesante hacer una mezcla con estas características.

La mayoría de estos agentes que facilitan el desprendimiento del hormigón son derivados de aceite mineral (petróleo) y pueden contener disolventes orgánicos volátiles. Los productos utilizados actualmente representan un riesgo para la salud de los trabajadores y contribuyen a un problema de contaminación medioambiental. Pero en construcciones romanas, si usaban algo, sería algún elemento graso, de fácil extracción y tratamiento y muy abundante en la cuenca mediterránea, pero ante la falta de información con respecto a este punto, no se utilizó ningún tipo de grasa, quizá sería interesante hacer una mezcla con estas características.

1 volumen de cal 680 gr	2 volúmenes de arena de río 700 + 700= 1400gr 1 volumen de tejoletas (teja picada) 280 gr (Vitruvio II, V, 7)	15 a 20% 15%=354 gr
----------------------------	---	----------------------------

La Segunda Mezcla

Un volumen de cal: 680gr

Densidad aparente de la cal

$$D_a = \text{gr/mm}^3 \quad 680\text{gr}/0.5544\text{mm}^3 = 1226.5512 \text{ gr/mm}^3$$

- Un volumen de arena: 700gr.

Densidad aparente de la arena

$$D_a = \text{gr/mm}^3 \quad 700\text{gr}/0.5544\text{mm}^3 = 1262.6263 \text{ gr/mm}^3$$

- Un volumen de teja picada: 280gr

Densidad aparente de la teja picada

$$D_a = \text{gr/mm}^3 \quad 280\text{gr}/0.5544\text{mm}^3 = 505.0505 \text{ gr/mm}^3$$

En un cuenco de dimensiones medias se depositaron dos unidades de arena cribada y una de cal, a la que previamente se había escurrido el agua sobrante y se comenzó a mezclar los dos elementos, cuando la mezcla fue más o menos homogénea, se añadió la unidad de teja picada sin polvo; la mezcla comenzó a hacerse más pesada y difícil de aglutinar, debido a que los fragmentos de cerámica comenzaron a absorber rápidamente el agua que contenía la cal, por lo que fue necesario comenzar a añadirle rápidamente el agua y seguir mezclando.

Una vez obtenida la argamasa y antes de volcarla en el molde se procedió a mojar con una brocha la base y los cantos de dicho molde para evitar que la madera comenzase a absorber el agua de la mezcla, para posteriormente rellenar el molde y repartir la mezcla lo más homogéneamente posible en su interior (Fig. 7) para después dejarla fraguar.

El molde con las mezclas fue depositado para su fraguado en un lugar protegido del sol pero al aire libre, a la espera de su secado.

LAS TEMPERATURAS

Pareció importante reflejar las temperaturas que se registraron en Madrid para observar las condiciones en las que se produjo el fraguado, por ello se incluyen las temperaturas del Instituto Meteorológico Nacional:

TEMPERATURAS	21.08.07	22.08.07	23.08.07	24.08.07	25.08.07
T° Máximas	25° C	24° C	25° C	27° C	26° C
T° Mínimas	13° C	11° C	14° C	15° C	16° C

LOS COSTES

Estos precios que se presentan son estimativos, ya que en la actualidad no existen partidas de precios que contemplen esta característica en su conjunto, por lo que se han utilizado partidas de precios descompuestos, dentro de la base de datos que se ha utilizado (Base de Precios de la Construcción del Colegio Oficial de Aparejadores y Arquitectos Técnicos de Guadalajara, 23ª Edición 2007)

CAPÍTULO 1. FABRICACIÓN DE MORTERO DE CAL GRASA Y ARENA DE RÍO						
Código	Cantidad	Ud.	Descripción	Precio	Subtotal	Importe
01.01						
	0,38	m ³	De pasta de cal grasa apagada	181,19	68,85	
	1,10	m ³	De arena de río de 0,6mm	16,67	18,33	
	0,27	m ³	De agua	0,71	0,19	
	0,40	h	De hormigonera de 200 litros de gasolina	3,00	1,20	
			Suma de partida Costes indirectos	3%	2,65	88,57 2,65 ----- 91,22 € m³
02.01						
	0,38	m ³	De pasta de cal grasa apagada	181,19	68,85	
	1,10	m ³	De arena de río de 0,6 mm	16,67	18,33	
	0,27	m ³	De agua	0,71	0,19	
	1,50	m ³	De teja curva roja	0,40	0,60	
	10	h	De peón ordinario	13,50	135,00	
	0,40	h	De hormigonera de 200 litros de gasolina	3,00	1,20	
			Suma de partida Costes indirectos	3%	6,73	224,17 6,73 ----- 230,89 € m³

CONCLUSIONES

Los resultados fueron los siguientes: las mezclas secaban bien, pero al cuarto día de fraguado, comenzaron a verse pequeñas fisuras a lo ancho de las piezas y según pasaban las horas se iban haciendo más patentes y profundas, sobre todo en la primera mezcla, la que no incluía la teja picada. Al consultar libros sobre materiales constructivos y sus características se dedujo que:

- El calor concentrado que se pudiese generar en la habitación en la que se encontraba podría haber hecho que la evaporación del agua de la mezcla se tuviese lugar rápidamente, lo que haría que la masa no se consolidase bien y terminara disgregándose. Habría sido conveniente que las piezas se fuesen regando a diario para evitar estos choques térmicos, al igual que se hace en la actualidad con los hormigonados en las obras, de ese modo se evitan las pérdidas rápidas de agua en las mezclas.
- Estas roturas podrían estar producidas por el tratamiento que se ha dado a las mezclas, ya que estas están pensadas para unir materiales, puesto que se trata de un mortero, no para realizar piezas con ellas a modo de ladrillos; si a ello le unimos el contacto con la madera, es posible que no favoreciese su consolidación. Quizá cabría plantearse la posibilidad de realizar con elementos cerámicos un muro doble con un hueco en medio en el cual verter la mezcla y apisonarla, de ese

modo, las piezas cerámicas harían la función de un encofrado perdido, pero hubiese sido un problema manejarlo ya que el peso de esa construcción hubiese sido importante.

- Otra posibilidad es que se trate de roturas por dilatación, ya que dichas roturas aparecen cada diez centímetros, y resulta que si se construye una solera de 20 centímetros de canto, el mortero se romperá por dilatación cada diez metros. Estos datos se han obtenido de la Escuela de Aparejadores de Madrid, pero dado que la escala aquí empleada es más reducida, las grietas de rotura corresponden en a diez centímetros, lo que lleva a un interrogante: ¿qué solución se le daría a un muro de opus caementicum si cada diez metros, aproximadamente, fuesen apareciendo grietas de dilatación? Teniendo en cuenta que si esa mezcla se encuentra entre dos paramentos verticales de ladrillo, a modo de sándwich o encofrado perdido, ese ladrillo no podría absorber del todo esas fisuras, además, los muros de ladrillo también presentan fisuras por dilatación cada 30 metros. Tal vez se variasen los grosores de esos muros para que ambos materiales trabajasen a tracción, que sería la única forma de que eso ocurriese, ya que los materiales utilizados trabajan siempre a compresión, pero habría que compensar de alguna forma las fisuras por dilatación que terminarían apareciendo, quizá con una distancia mayor entre ellas, pero aparecerían.
- Otra posibilidad, es que las proporciones de agua, aunque estén dentro de los límites del 15 y el 20% que se establecen en las tablas empleadas, no hubiesen sido las correctas, y las mezclas hubiesen necesitado más aporte de agua, con porcentajes cercanos al 20%. Pero si fuese ese caso, que no lo es, no se verían fisuras, sino que presentaría una superficie cuarteada de pequeñas fisuritas.



Fig. 8. Pieza de mortero fraguada realizada con cal grasa, arena y agua, donde se pueden observar claramente las fisuras que se han producido

Con todo ello, sería interesante continuar haciendo pruebas para comprobar si todos estos problemas que se han generado se repetirían utilizando otras variables como cantidades de agua o materiales que se ponen en contacto, etc. Pero todo ello requeriría mucho tiempo, dedicación, material y un buen laboratorio con los que realizar muchas más mezclas y hacer un estudio profundo de las reacciones de los materiales, tanto a nivel químico como físico.

BIBLIOGRAFÍA

- ADAM, J-P. (2002): *La Construcción romana: Materiales y Técnicas*, Editorial de los oficios, León.
- CAMUÑAS Y PAREDES, A. (1980): *Materiales de Construcción*, tomo 1. Madrid.
- CAZALLA VÁZQUEZ, O. (2001): *Morteros de Cal. Aplicación en el Patrimonio Histórico*, Universidad de Granada.
- CISNEROS CUNCHILLOS, M. (1990): *Mármoles hispanos: su empleo en la España romana*. Zaragoza.

GARATE ROJAS, I. (2002): *Artes de la Cal, Instituto español de Arquitectura*. MRRP., Madrid.

LAMPRECHT, H. O. (1968): *Opus Caementicium*, Düsseldorf.

MALDONADO RAMOS, L. Y VELA COSSÍO, F. (1998): *De Arquitectura y Arqueología*, Madrid.

SAVAL, J. M. (1980): *Materiales de Construcción*, tomo 1 Escuela de Aparejadores y Arquitectos Técnicos de Madrid.

VITRUVIO, M. L. (1996): *Los Diez Libros de Arquitectura*, Barcelona.

<http://www.emilioquilez.com>

<http://www.julio barbero.com>