

The logo for AXA, featuring the letters 'A', 'X', and 'A' in a stylized, blue, sans-serif font. The 'X' is positioned between the two 'A's and is slightly larger and more prominent.

UNA REVISTA DE ARTE Y ARQUITECTURA

Alfonso González de Corbella, Doctorando
M^a Teresa Ruiz Abrio, Dra. en Ciencias Químicas

CARBONATACIÓN DE LA CAL EN TAPIALES

UNIVERSIDAD ALFONSO X EL SABIO

Villanueva de la Cañada, MMXI



© del texto: **María Teresa Ruiz**

Enero 2015

<https://www.uax.es/publicaciones/axa.htm>

© de la edición: **AxA. Una revista de arte y arquitectura**

Universidad Alfonso X el Sabio

28691 - Villanueva de la Cañada (Madrid)

Editor: Felipe Pérez-Somarriba - axa@uax.es

No está permitida la reproducción total o parcial de este artículo ni su almacenamiento o transmisión, ya sea electrónico, químico, mecánico, por fotocopia u otros métodos, sin permiso previo por escrito de la revista

Datos de Contacto del Autor:

María Teresa Ruiz

Universidad Alfonso X El Sabio. Villanueva de la Cañada, Madrid.

e-mail: truiz@uax.es

Alfonso González de Corbella

Arquitecto Técnico-Ingeniero de la Edificación-Máster Oficial de Rehabilitación. Mantenimiento y Recuperación de Edificio.

email: gonzalezdecorbella@gmail.com

RESÚMEN:

Englobado dentro del estudio de la rehabilitación y recuperación de la muralla almohade de la ciudad de Andújar (Jaén), se estudia el proceso de carbonatación del material con diversas mezclas (tierra / cal grasa / áridos) con la finalidad de analizar distintas dosificaciones que conduzcan al mayor grado de resistencia y durabilidad. Se sigue, una vía lenta que es la carbonatación natural sometida a la intemperie del entorno como pueden ser espacios abiertos lateralmente pero dotados de cubierta para la protección de las lluvias; también se procede por vía más rápida, generando un ambiente con alto contenido de CO₂.

PALABRAS CLAVE:

Carbonatación natural y forzada, mezclas cal/ tierra/ áridos, tiempo y velocidad de carbonatación.

ABSTRACT:

Encompassed within the study of rehabilitation and recovery of the Almohad wall of the city of Andújar (Jaén) , the carbonation process the material is studied with various mixtures (soil / lime fat / dry) in order to analyze different dosages leading to greater strength and durability. Continues , a slow path that is exposed to the weather of the environment as natural carbonation but open spaces being endowed laterally deck rain protection ; also proceeds by quickest route , creating an atmosphere rich in CO₂.

KEY-WORDS:

Natural and forced carbonation, mixtures lime/ soil/ aggregates, carbonation time and speed.

ÍNDICE:

Introducción

Estudio experimental

2ª Serie de probetas

Resultados carbonatación

Conclusiones

Introducción

En las construcciones, muros y murallas, de tierra cruda mezclada con cal Ca(OH)_2 , hidróxido cálcico, la finalidad que se pretende es que la cal, como aglomerante, cierre el ciclo y que, en este caso, vuelva a su estado original de carbonato cálcico (CO_3Ca). Todo ello exponiendo al elemento constructivo al medio atmosférico, con su componente de CO_2 , que, en definitiva, es el encargado de la carbonatación. El tiempo necesario para esa transformación natural ambiental es inversamente proporcional al contenido de CO_2 en la atmósfera, natural o forzada, envolvente al elemento constructivo y directamente proporcional a la masa específica del citado elemento; otro factor importante es la impermeabilidad o porosidad del elemento constructivo que impedirá o facilitará la aireación interna. Es decir:

- a. A mayor cantidad de CO_2 ambiental en el lugar objeto, menor tiempo de carbonatación
- b. A mayor volumen macizo del elemento constructivo mayor será el tiempo necesario para su carbonatación total y por el contrario cuanto menor sea su volumen más rápida será su carbonatación total.
- c. Cuanto más porosa sea la pieza, más rápida será su carbonatación y cuanto más impermeable y compacta, más lenta será su carbonatación.

En la construcción de la muralla militar, por los almohades, en la ciudad de Andújar (Jaén), se emplearon grandes cantidades de cal, mezclada con tierra del lugar y árido, como desengrasante, procedente de las vías fluviales de la zona, entre ellas del río Guadalquivir como principal; todo para fabricar el barro que apisonado entre tapiales conformaron la gran fortificación que lo fue entonces para asentar el fuerte militar de Andújar en el año aproximado del 1200.



Fig. 1 Muralla Almohade de Andújar

En el presente trabajo se estudia la rehabilitación y recuperación de la muralla que aún queda en pie. Para ello se elaboró una primera serie de probetas con diversa mezclas (tierra / cal grasa / áridos) con la finalidad de analizar distintas dosificaciones y ver cual proporcionaba una mayor resistencia a rotura por carga vertical.

Estudio experimental

A finales del 2012 se fabricaron doce probetas, piezas prismáticas en forma de ladrillo; otros ladrillos de tamaño normalizado (29x14x5'5) y algunas probetas cilíndricas de menor tamaño (10 cm de alto y 5 cm de diámetro). En enero del año 2014, poco más de un año después en que las probetas estuvieron expuestas al ambiente natural exterior y protegidas de la lluvia, se analizó el estado de carbonatación en dichas muestras.



Fig. 2 Probeta nº XII

Sobre una de las caras del ladrillo se roció, con un pulverizador, una solución al 1% de fenolftaleína. Se sabe que esta solución de fenolftaleína, que es incolora ($\text{pH} < 8$), adquiere una tonalidad rosa suave ($8 \leq \text{pH} \leq 9,5$) indicando presencia de hidróxido cálcico. Después de la pulverización del citado ladrillo, aparecieron de inmediato, unos estampados de color rosado muy pálido, así como, unas manchitas de color rosado más intenso. Después de un año de exposición, aún estaban sin carbonatar pequeñas zonas superficiales.

A continuación, se seccionó el ladrillo, para mostrar su cara interna y comprobar el grado de carbonatación de la misma (UNE-EN 13295:2005). Bajo una ligera pulverización, se pudo comprobar que toda la superficie seccionada se tiñó de color rosado. Mediante un calibre se mide la profundidad de la carbonatación (GALÁN GARCÍA, 2011). Todo indica que el efecto de carbonatación, en el caso de este ladrillo XII, es muy lento después de más de un año de exposición al ambiente exterior. Se puede deducir:

1. Que la propia carbonatación en superficie, ya consolidada, puede crear una pátina o costra, con cierta impermeabilidad, que ralentice la penetración del CO_2 al interior del ladrillo.

2. También es posible como causa añadida, que los poros de la superficie del ladrillo quedaran, en el periodo de fabricación tapados o reducidos, al tratarse en fresco, esta superficie exterior, con llana metálica.

Con respecto a la muestra XI, que tuvo un tiempo de exposición a la intemperie superior a la anterior, se procedió a eliminar de su superficie, 0.50-1'00 milímetros de espesor aproximadamente, con un cepillo de alambre.

Inmediatamente se roció con pulverizador la solución de fenolftaleína indicada, observándose en su superficie la aparición de puntitos rosados. Esto nos indica que la carbonatación, bajo la cara externa eliminada, era también muy escasa, aunque sí algo más profunda que la anterior probeta nº XII. Después se realizó una ranura de 10 milímetros de ancho y una profundidad, que oscilaba entre de 1'50 mm y 2.5 mm. Sobre esta ranura se volvió a proyectar, con pulverizador, la solución de fenolftaleína observándose que toda la ranura, fondo y laterales, se tiñeron de color rosado indicando igualmente que la carbonatación era muy poco profunda y que por tanto esta se desarrolla muy lentamente en el tiempo GAZTAÑAGA(1996).



Ante esta circunstancia, se puede confirmar, en principio, que la velocidad de carbonatación en profundidad es inferior a 1'00 milímetro por año, en el primer año. En los siguientes años con toda probabilidad, en base a una lógica razonable, se ralentizará la velocidad debido a que la propia carbonatación exterior podría generar una camisa protectora en la superficie de la pieza o del elemento constructivo que dificulta, en cierta medida, la penetración del CO₂ del aire. Recordemos que en poco más de un año la carbonatación, del ladrillo XII, había profundizado apenas unas micras.

Fig. 3 Carbonatación del Ladrillo XI

No obstante se expuso uno de los dos trozos seccionados del ladrillo XII a un ambiente forzado y saturado de CO₂, durante 10 días para poder, al final de este corto periodo de tiempo, comprobar el resultado a efectos del avance de la carbonatación. Esta operación se realiza a cubierto.

Los cortes y secciones del ladrillo se realizaron ayudado de un martillo y cuchilla muy afilada, al corte por golpe seco y con las mismas herramientas se perfilaron los bordes. El resultado mostraba que la velocidad de penetración en una atmósfera saturada y continuada de CO₂ era muy substancial, alcanzándose valores de hasta 7'00 mm en tan solo esos diez días.

Después de estas comprobaciones es patente que, la velocidad en profundidad de la carbonatación, sobre piezas de tierra bien compactada por medios manuales y una dosificación en cal apropiada, es muy lenta en el medio natural y sin embargo en un medio constantemente saturado de CO₂, la profundidad de carbonatación se multiplica considerablemente en muy pocos días.

Todo esto puede apoyar la probabilidad de que en murallas y torres, de grandes dimensiones y volumen, exista un núcleo aún no carbonatado de hidróxido cálcico y que después de centenares de años aún siga continuando su fraguado por dentro a medida que se desagrega por fuera. Todo ello como consecuencia, de su gran volumen.

2ª Serie de probetas.

Se procedió a fabricar una segunda serie de probetas de ladrillo. El procedimiento y metodología seguida en la mezcla de los materiales fue el siguiente:

- En primer lugar se mezcló la tierra con la arena, previamente pesadas, en un primer recipiente. La tierra, una vez desmenuzada se tamizaba por un tamiz de 10 mm, eliminando el material retenido. La arena se utilizaba granulada tal y como venía de cantera.
- A continuación, en un segundo recipiente se echaba la cal grasa, previamente pesada.
- Sobre este recipiente nº2 que contenía la cal, se fue vertiendo poco a poco, mezclando y batiendo energicamente, el contenido del recipiente nº1 (tierra y arena). Si es necesario, para facilitar un mezclado perfecto, se adiciona más agua de cal.

Todo ello proporcionó una masa que, en este caso, después del batido y una mezcla homogénea, resultó plástica o plástico-fluida. Posteriormente, se desecó la mezcla para conseguir una consistencia seca y poder apisonarla adecuadamente. El periodo de desecación será mayor o menor dependiendo de la consistencia o docilidad de la mezcla. Es evidente que si se quiere, desde un principio obtener una mezcla de consistencia seca, es necesario realizar un batido más intenso.

Se ha optado por una desecación con luz infrarroja. Sin la aportación de la luz infrarroja, la probeta nº 1, desecada al ambiente natural necesitó un periodo de 50 horas; sin embargo con la luz infrarroja se emplearon 17 horas. Al final el barro tendrá aproximadamente entre 15-17% de humedad con respecto a su materia seca.

Con esta consistencia final y estado de desecación, el barro se puede coger y formar bolas con las manos sin que manchen; permitiendo el compactado en los moldes metálicos.

Se han fabricado tres pares de ladrillo de 29 x 14 centímetros y grueso 6'5 centímetros, con denominación: L1, L2 y L3 con la misma dosificación.

PROBETA N° L1,L2,L3 - Fabricada el 12/12/2013	
DOSIFICACIÓN	
Kg de tierra cruda	5,00
Kg de cal grasa	6,00
Kg de arena	1,00
Consistencia	P/F
Longitud-Soga (dm)	2,930
Ancho-Tizón (dm)	1,430
Grueso (dm)	0,640
Peso (kg)	4,253
Volumen (dm ³)	2,682
Densidad (Kg/dm ³)	1,586

Fig. 4 Tabla dosificación

Para su moldeado y prensado fue necesario diseñar y fabricar un molde metálico tipo caja y una estructura metálica, que permitiera apisonar el barro y también prensarlo.

Las cuatro caras de la caja son regulables y desmontables. En el interior de la caja y adosadas a sus caras y fondo se colocan unas láminas de plástico, para evitar que el barro se adhiera al acero y facilitar el desmolde.

Para que los ladrillos salgan con el mismo grueso es necesario cuidar la dosificación y desecación de la masa y colocar dentro del molde la misma cantidad de material cuantificada en peso.

Una vez colocada la tapa, se ajusta con los tornillos para el mejor cierre entre la unión de la tapa y el molde quedando todo preparado para prensarlo.

Esta serie de ladrillos se fabricó para comprobar la profundidad de carbonatación que se alcanzaba durante su periodo de desecación y exposición al ambiente exterior protegido de la lluvia.

Se prensaba hasta la deformación elástica de la estructura metálica que soportaba el sistema. A partir de ahí ya no se producía el compactado del material.

Quince minutos después del prensado se podía proceder al desmolde. Para ello se aflojan los tornillos primero y se quitan los laterales metálicos que no están adheridos a las láminas de plástico. No se utilizaron en este caso desencofrantes de ningún tipo debido a lo siguiente:

- Para no manchar las caras del ladrillo.
- Para evitar cualquier tipo de reacción entre el desencofrante y el barro.

- Y lo más importante, para que el desencofrante no estableciera una pátina impermeable en la superficie del ladrillo que impidiera posteriormente una carbonatación adecuada con el CO₂ ambiental y forzado.

Un aspecto muy importante es la carbonatación del material para que alcance el mayor grado de resistencia y durabilidad. Para ello existe, como ya se ha dicho, una vía lenta que es la carbonatación natural sometida a la intemperie de nuestro entorno como pueden ser espacios, abiertos lateralmente, pero dotados de cubierta para la protección de las lluvias; también se puede proceder por vía más rápida, en naves cerradas totalmente, donde se puedan generar un ambiente con alto contenido de CO₂ y si es a presión mucho mejor.

En este caso, se colocaron las muestras de ladrillo, algo separadas, sobre una pequeña plataforma de madera y montadas de tal manera que permita el mayor contacto con el aire que las rodea. Esto permitirá una mejor carbonatación ambiental aunque se podría forzar y activar esta reacción.

Se sabe que el ácido clorhídrico (HCl) reacciona con el carbonato cálcico (CO₃Ca) desprendiendo dióxido de carbono.



Existe un denominador común en los ladrillos fabricados:

- Se ha empleado la misma tierra cruda (Luvisol Cálcico) de la misma zona de las probetas anteriores a esta fase de producción.
- Se ha utilizado cal grasa artesanal de Morón de la Frontera (Sevilla).
- El mismo desengrasante. (Arena caliza de cantera, no uniforme, con una riqueza del 80 %, en carbonato, procedente de la sierra de Jabalcúz (Jaén).
- El mismo programa de batido mecánico y mezclado.
- Agua de cal, cuando era necesario añadir a la masa, procedente del apagado de la cal viva. Igualmente de Morón de la Frontera.
- El mismo sistema de desecado de la masa, con luz infrarroja, hasta conseguir una docilidad alta con un porcentaje de humedad entorno al 15 %, adecuado para apisonar y compactar.
- El mismo sistema de aceleración de la carbonatación.

La tierra extraída de la cantera, se desterronó en taller con pisón de madera. A continuación, se tamizó con un tamiz de 10 mm. Quedando excluidos todos los fragmentos retenidos en el tamiz.

Posteriormente las probetas fueron sometidas a una carbonatación temporal forzada. Para ello, las muestras, probetas y ladrillos, apiladas sobre la plataforma de madera, se cubrieron con una lámina de plástico, generando bajo la cubierta una atmósfera cargada de CO₂ mediante la reacción de carbonato cálcico (polvo de mármol) y ácido clorhídrico.

Resultados carbonatación

Todos los ladrillos estuvieron reposando en fase de carbonatación entre 10 y 11 meses. Durante este periodo se alternaban ambos procesos, es decir, carbonatación natural y forzada; predominando la carbonatación natural durante el 70% del tiempo. Se utilizaron 35 litros de HCl al 20-22%, y una cantidad no determinada de polvo de mármol.

El seccionado del ladrillo se realizó por cortadura al golpe de cuchilla ya que con disco mecánico la cara a ensayar se puede contaminar con restos no carbonatados de la pieza, a causa de la abrasión. El producto empleado para teñir los hidróxidos fue también fenolftaleína.

La profundidad de la carbonatación resultó ser ligeramente variable, dependiendo de las corrientes diferenciales de la atmósfera de carbonatación; de la compacidad de la pieza y/o del mayor o menor porcentaje de desengrasante acumulado por zonas.

Conclusiones

1. A mayor cantidad de CO₂ ambiental sobre el material, menor tiempo de carbonatación
2. Se ha comprobado que la carbonatación forzada en cámaras estancas apropiadas aceleran considerablemente este proceso. Cuestión de gran importancia en rehabilitación de obras, privadas o de patrimonio público, donde se empleen mezclas de cal –hidróxido cálcico- y tierra de cualquier procedencia.
3. Es evidente que los tiempos de carbonatación, según se proceda, aceleran o retrasan el ritmo y marcha de las obras e incluso la toma de decisiones. Lo correcto sería que todas las piezas, en todo su volumen, estuvieran perfectamente carbonatadas, para ello sería necesario, en caso de optar por una carbonatación forzada, para ganar tiempo, dotar a la cámara de carbonatación estanca un sistema de inyección y presión de CO₂, si el volumen de la obra así lo recomienda.
4. El empleo de ladrillos o piezas prismáticas con una relación alta de superficie / volumen podría ser una adecuada solución para, en este caso, la recuperación de la muralla militar almohade de Andújar.
5. Es probable que el empleo de otro tipo de tierras y cal de otra procedencia y estructura (cal grasa o cal hidratada), requiera un estudio particular de estos.

Igualmente el empleo de arenas, como desengrasante, en sus diversas granulometrías podría colaborar igualmente en la velocidad de carbonatación.

6. Se ha comprobado que la carbonatación forzada aligera los procesos de carbonatación de manera sustancial, tanto mayor, como es lógico, entre otros, cuanto mayor sea la relación superficie / volumen de la pieza.

Bibliografía

UNE-EN 13295:2005. Determinación de la resistencia a la carbonatación

GALÁN GARCÍA, Isabel (2011): Carbonatación del hormigón: combinación de CO₂ con las fases hidratadas del cemento y frente de cambio de pH. PhD.Madrid. ISBN: 978-84-695-0996-8

GAZTAÑAGA, M.T.(1996): *Influencia de la carbonatación en la microestructura de diferentes pastas de cemento hidratadas*. PhD. Madrid.