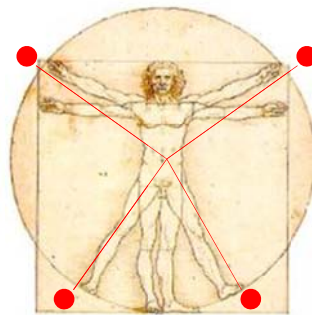


TECNOLOGÍ@ y *DESARROLLO*

Revista de Ciencia, Tecnología y Medio Ambiente

VOLUMEN XIII. AÑO 2015

SEPARATA



ESTUDIO Y ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DE LA PIEDRA CALIZA DE LA SIERRA DE ESPARTEROS DE MORÓN DE LA FRONTERA (SEVILLA) DURANTE EL PROCESO DE COCCIÓN Y APAGADO POSTERIOR

Alfonso González de Corbella, M^a Teresa Ruiz Abrio



UNIVERSIDAD ALFONSO X EL SABIO
Escuela Politécnica Superior
Villanueva de la Cañada (Madrid)

Del texto: Alfonso González de Corbella , M^a Teresa Ruiz Abrio
Junio, 2015.

<http://www.uax.es/publicacion/estudio-y-analisis-del-comportamiento-de-la-piedra-caliza-de-la-sierra.pdf>

© De la edición: *Revista Tecnol@ y desarrollo*

Escuela Politécnica Superior.

Universidad Alfonso X el Sabio.

28691, Villanueva de la Cañada (Madrid).

ISSN: 1696-8085

Editor: Javier Morales Pérez – tecnologia@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.

ESTUDIO Y ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DE LA PIEDRA CALIZA DE LA SIERRA DE ESPARTEROS DE MORÓN DE LA FRONTERA (SEVILLA) DURANTE EL PROCESO DE COCCIÓN Y APAGADO POSTERIOR

Alfonso González de Corbella (a), M^a Teresa Ruiz Abrio (b)

(a) Arquitecto Técnico–Ingeniero de la Edificación–Máster Oficial de Rehabilitación. Mantenimiento y Recuperación de Edificio. Tlf.: 656250941, email: gonzalezdecorbella@gmail.com

(b) Dra. en Ciencias Químicas. Universidad Alfonso X el Sabio. Tlf.: 918109759, email: truíz@uax.es
Universidad Alfonso X El Sabio

RESUMEN: Análisis de las piedras calizas de la sierra de Esparteros. Cocción en horno eléctrico y apagado de la cal viva resultante por fusión. Se realiza, un breve análisis de los hornos artesanales de piedra caliza. Posteriormente se estudia la caliza de origen pisolítico de Esparteros en base a: porosidad accesible, volumen y densidad aparente, y posterior cocción en horno eléctrico a temperatura constante para conocer la contracción producida por la piedra como consecuencia de la cocción y en función de la porosidad accesible de la caliza. Así mismo la calidad de la cal viva resultante (%residuos) y, una vez apagada en agua por fusión, las temperaturas alcanzadas en el apagado.

PALABRAS CLAVE: Hornos cocción, piedra caliza, cal viva, cal apagada.

ABSTRACT: Analysis of the limestone of the Sierra de Esparteros. Cooking oven or off the resultant lime fusion. A brief analysis of artisanal limestone kilns is performed. Subsequently pisolitic limestone Esparteros source is studied based on: accessible porosity, bulk density and volume, and subsequent baking in an electric furnace at constant temperature to determine the contraction produced by the stone as a result of firing and porosity depending limestone accessible. Also the quality of the resultant lime (% residue) and, once in water by melting off, the temperatures reached on Shutdown.

KEY-WORDS: cooking ovens, limestone, quicklime, lime.

SUMARIO: 1. Introducción, 2. Estudio experimental, 3. Resultados, 4. Apagado de la cal viva, 5. Conclusiones.

SUMMARY: 1. Introduction, 2. Experimental study, 3. Results, 4. Conclusions.

1 Introducción

El presente trabajo se encuadra dentro de un amplio estudio sobre la muralla militar almohade de Andújar (Jaén) desde la perspectiva de la ingeniería militar y de su recuperación. La muralla se construyó con tapia militar, que se caracteriza por su gran contenido de cal y su compacidad.



Figura 1.1 Muralla militar almohade de Andújar.

El primer objetivo fue localizar los hornos de cal y los caleros que informaran acerca de su funcionamiento y sobre los contenedores de piedra caliza. En esta ciudad, los hornos de cocción de piedra caliza, para la obtención de cal viva, desaparecieron totalmente entre los años 50 y 60 del siglo pasado y solo podía entrevistarse a los hijos, ya mayores de aquellos caleros. En los pueblos de la comarca de Andújar, solamente en Arjonilla quedan tres hornos, aunque en buen estado, totalmente inactivos. Los hornos artesanales activos, a disposición del comercio, y de mayor tradición calera de Andalucía, se encuentran en Morón de la Frontera (Sevilla).

La primera línea de investigación se centró precisamente en estos dos lugares: Los hornos de Arjonilla y los de Morón. Los hornos de uno y otro lugar, aunque su finalidad es la misma, son diferentes en cuanto a su tamaño y a la manera de cargar los hornos; siendo característico y diferente entre unos y otros la configuración de las bóvedas que, de piedra caliza en seco, se construyen para soportar la carga de piedra caliza por arriba y, debajo, formar el cenicero y el hogar de la leña de olivo que se utiliza y utilizaba, en ambos lugares respectivos. Existe una diferencia muy significativa de estas bóvedas, que en Morón son casi cónicas, muy altas y apuntadas, mientras que en Arjonilla eran esférica y muy rebajadas.

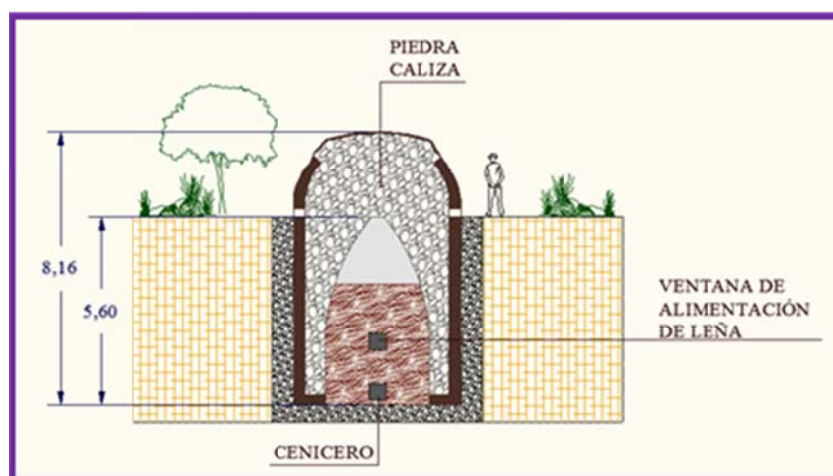


Figura 1.2 Hornos artesanos. Horno de Morón.

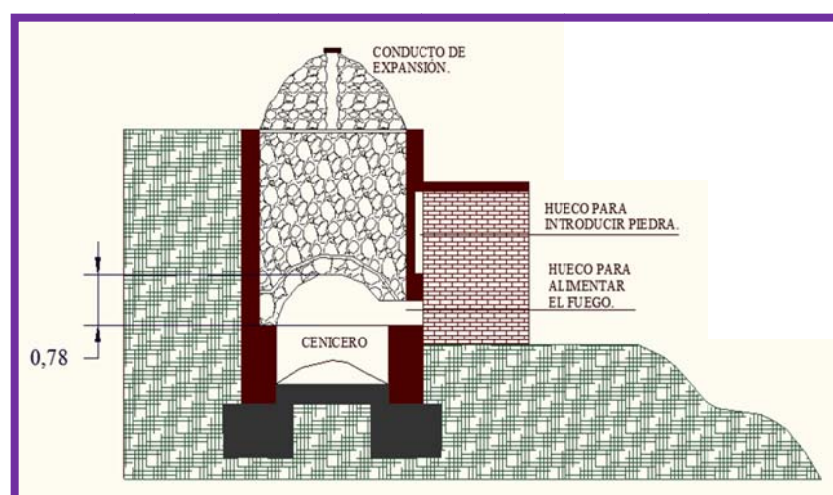


Figura 1.3 Hornos artesanos. Horno de Arjonilla.

En la aldea de Los Caleros en Morón de la Frontera (Sevilla), llama la atención, en principio y vistos desde la carretera de acceso, la altura sorprendente que alcanzaban los hornos artesanales de cocción de piedra caliza. Altura, próxima a los 8 metros, considerada desde el ras de suelo hasta la parte alta de la cúpula.

Todos los hornos, en esta zona, se ubican y empotran de costado sobre la ladera del monte; para ello es necesario realizar un corte, vertical frontal, al perfil del terreno. De esta manera se forma, además, una explanada para facilitar la maniobra exterior que permite el movimiento de camiones y maquinaria relativamente pesada que facilita la entrada al interior del horno y realizar la carga y extracción de la piedra, así como la alimentación de la leña de olivo.

La bóveda del horno, como se observa en el esquema, es muy apuntada, alcanzando una alturas de aproximadamente cinco metros. Esta circunstancia, conociendo ya el

sistema de Arjonilla, llama la atención pero los caleros consultados indicaron que esto responde a una tradición.

No obstante es significativo, y probablemente ahí radique esta cuestión, que las piedras calizas que utilizan en Morón, aunque sin dejar de ser calizas, se estructuran de manera diferentes a las que se utilizan en Arjonilla.

La piedra caliza que se utiliza en Morón procede de las canteras abiertas de la denominada Sierra de Esparteros aunque realmente es un monte aislado, pero de gran envergadura, conocido como Monte Gil.



Figura 1.4 Horno artesano de Morón

La piedra de la Sierra de Esparteros es de cantera, muy pura y rica en calcio, origen primario, estructurada con pisolitos y oolitos micronizados interior y exteriormente.

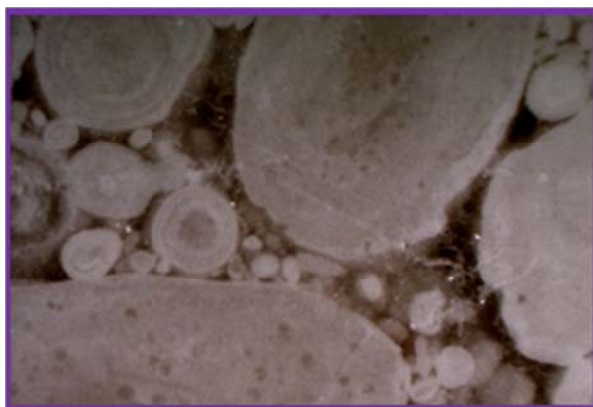


Figura 1.5 Detalle de la piedra

Por otro lado en la población de Arjonilla cercana a Andújar, aproximadamente 5 Km, como se ha dicho anteriormente, los hornos existentes, activos solo en el recuerdo, son algo más pequeños e igualmente excavados en ladera de monte o en profundidad a modo de pozo. En este caso no está facilitada la entrada de maquinaria pesada y todo hay que hacerlo de forma manual.



Figura 1.6 Bóveda esférica.

El radio de la bóveda esférica, Figura 1.6, no superaba los 0'80 metros; es decir una bóveda esférica muy rebajada.

Por otro lado, los depósitos o contenedores de piedra caliza se encuentran, en zonas de cultivo, normalmente en forma de guijarros de canto rodado dispuestos en superficie o a escasa profundidad, transportada por vía fluvial desde zonas más altas durante miles de años. Esta caliza no es de origen primario y su interior es granular donde se aprecian granos de cuarzo.

Es de interés para este estudio encontrar una explicación lógica del por qué las bóvedas de los hornos de Morón de la Frontera son tan apuntadas y la posible incidencia que, en esta cuestión, tenga la piedra caliza de la Sierra de Esparteros.

Para el estudio se realizaron varias visitas a la Aldea de los Caleros en Morón de la Frontera, presenciando el funcionamiento de un horno artesanal, la carga de uno de dichos hornos, así como la cocción.

Entre los clásicos se había asentado el razonamiento de que la piedra caliza al salir del horno en la forma de cal viva perdía, aproximadamente, un tercio con respecto a cuando entró, por la pérdida del CO_2 de la piedra caliza al cocerla.

Andrea Palladio (1508 – 1584) .- **“Las piedras para hacer cal ó se sacan de los cerros ó se toman de los ríos. Qualquier piedra de los cerros es buena, con que sea seca de humores, purgada, quebradiza y que no tenga en sí otra materia y quemada al fuego tenga menos peso y así será mejor la que se hiziere de piedra**

muy fuerte y blanca y que después de cocida pese un tercio menos que era antes.”
(Gárate Rojas I, 2002. Artes de la Cal.).

Se pensaba igualmente, que la densidad de la cal viva, también sería proporcionalmente menor; cuestión ésta a la que no hace mención alguna Andrea Palladio, que tan solo se refiere al peso de la piedra sin mencionar en algún momento alteraciones en su volumen.

2. Estudio experimental

En Morón de la Frontera se recogieron, de una hornada fría, seis piezas o piedras de cal viva para poderle realizar análisis de peso, densidad, incocidos, reacción de apagado por fusión, residuos etc... Las muestras se escogieron de distintas zonas del horno, donde ya se pudo apreciar que, al no estar protegidas adecuadamente de la atmósfera envolvente, las piedras de cal viva mostraban indicios de hidratación, desagregación y carbonatación. Al escogerlas, en el horno, solo se tuvieron en cuenta algunas características observables a la vista y tacto como: aristas, peso comparado, percusión, color, suavidad etc... Se sabía también, porque se había medido, que en el interior de los hornos, estas piedras de caliza para convertirse en cal viva, habían sufrido temperaturas comprendidas entre los 700 °C y 1300 °C. En los hornos artesanales, la carga de reposición de leña hay que hacerla a brazo y por seguridad del calero, cuando el horno se encuentra en baja intensidad –menor temperatura-. Una vez realizada la carga de leña, el horno alcanza las mayores temperaturas. Se comprueba que los valores de temperatura, en el interior del horno no son constantes y continuos sino por el contrario muy oscilantes. Se desconocía el volumen, peso, densidad, porosidad etc... de las piedras calizas originarias, de la Sierra de Esparteros, que una vez cocidas, dieron forma a las piedras de cal viva escogidas. Por lo que en aquel momento se consideró, en teoría, que podrían tener una densidad por igual en cantera de 270 Kg. / dm³. A las piedras de la cal viva en cuestión, se les calculó peso, volumen y densidad aparentes.

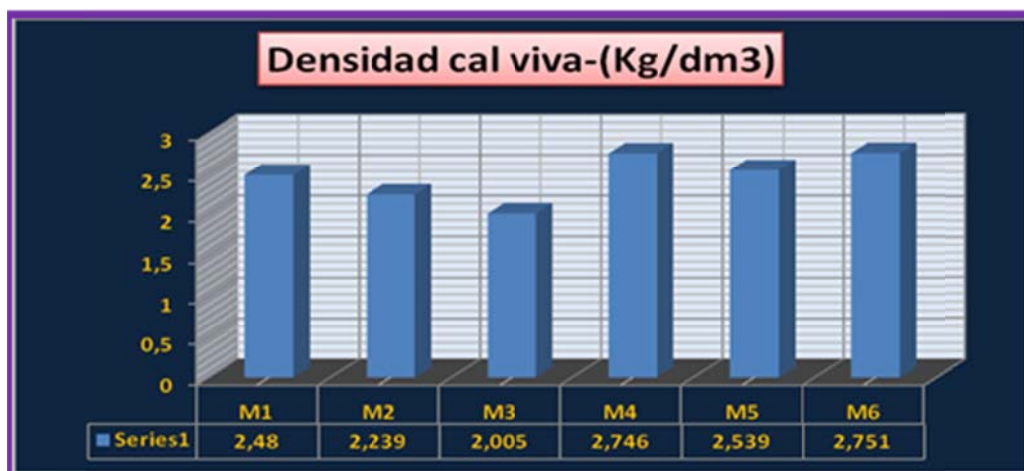


Figura 2.1.



Figura 2.2.

Dos de las piedras de óxido de calcio (cal viva) escogidas tenían una densidad superior a $2,70 \text{ Kg/dm}^3$, la de la piedra caliza (carbonato cálcico) de procedencia. Todo ello determinaba la existencia de unas contracciones muy fuertes una vez que se comprobó que las seis piedras habían sido cocidas perfectamente; es decir cal viva pura.

El siguiente paso fue elegir, de manera aleatoria y en distintos tamaños, una serie de piedras calizas (carbonato cálcico) en uno de los montones existentes de piedra caliza clasificada, presta para ser cocida; todo con la finalidad de cocerlas en un horno eléctrico a temperatura constante y hacer un seguimiento exhaustivo de las transformaciones que se iban a producir: piedra caliza cruda (carbonato cálcico) a piedra de cal cocida (cal viva - óxido de calcio) y finalmente cal apagada por fusión (hidróxido cálcico).

De este montón de piedras calizas, previamente escogidas por el cantero, procedentes de la Sierra de Esparteros, para ser introducidas en el horno, se escogieron 11 piezas de distinta dimensión y forma.

Sobre las piedras escogidas se anotaron un número de orden y el peso con precisión de un gramo.

2.1 Análisis de las piedras calizas de la sierra de esparteros. Cocción en horno eléctrico y apagado de la cal viva resultante por fusión

A partir de este punto se abrió una ficha de características a cada una de ellas, donde se hicieron constar: peso seco; peso saturado en agua a temperatura ambiente; peso en la balanza hidrostática: volúmenes aparentes y relativos; densidades aparentes y relativas; volumen de poros accesibles; porosidad y absorción de agua.

DATOS MUESTRA - 2		
(Ps) Peso seco muestra (gramos)	2.477,00	
(Psat) Peso saturado muestra (gramos)	2.531,00	En agua
(Pbh) Peso b/ hidrostática muestra (gramos)	1.525,00	En agua
CÁLCULO DENSIDAD Y VOLUMEN: APARENTE Y RELATIVO		
(Va) Volumen aparente (cm ³)	1.006,00	$Va = Psat - Pbh$
(Da) Densidad aparente (g/cm ³)	2,462	$Da = Ps / (Psat - Pbh)$
(Vr) Volumen relativo (cm ³)	952,00	$Vr = Ps - Pbh$
(Dr) Densidad relativa (g/cm ³)	2,602	$Dr = Ps / (Ps - Pbh)$
POROSIDAD DE LA MUESTRA		
(h') Volumen de poros accesibles (cm ³)	54,00	$h' = Va - Vr$
(Pr) Porosidad abierta (%)	5,37	$Pr = (h' / Va) * 100$
(Abs) Absorción de agua (%)	2,18	$Abs = ((Psat - Ps) / Ps) * 100$

Tabla 2.1 Datos de la muestra 2.

DATOS MUESTRA - 1 (ROCA CALIZA)		
(Ps) Peso seco muestra (gramos)	3.698,00	
(Psat) Peso saturado muestra (gramos)	3.726,00	En agua
(Pbh) Peso b/ hidrostática muestra (gramos)	2.258,00	En agua
CÁLCULO DENSIDAD Y VOLUMEN: APARENTE Y RELATIVO		
(Va) Volumen aparente (cm ³)	1.468,00	$Va = Psat - Pbh$
(Da) Densidad aparente (g/cm ³)	2,519	$Da = Ps / (Psat - Pbh)$
(Vr) Volumen relativo (cm ³)	1.440,00	$Vr = Ps - Pbh$
(Dr) Densidad relativa (g/cm ³)	2,568	$Dr = Ps / (Ps - Pbh)$
POROSIDAD DE LA MUESTRA		
(h') Volumen de poros accesibles (cm ³)	28,00	$h' = Va - Vr$
(Pr) Porosidad abierta (%)	1,91	$Pr = (h' / Va) * 100$
(Abs) Absorción de agua (%)	0,76	$Abs = ((Psat - Ps) / Ps) * 100$

Tabla 2.2 Datos de la muestra 1.

DATOS MUESTRA - 3		
(Ps) Peso seco muestra (gramos)	2.229,00	
(Psat) Peso saturado muestra (gramos)	2.280,00	En agua
(Pbh) Peso b/ hidrostática muestra (gramos)	1.415,00	En agua
CÁLCULO DENSIDAD Y VOLUMEN: APARENTE Y RELATIVO		
(Va) Volumen aparente (cm ³)	865,00	$Va = Psat - Pbh$
(Da) Densidad aparente (g/cm ³)	2,577	$Da = Ps / (Psat - Pbh)$
(Vr) Volumen relativo (cm ³)	814,00	$Vr = Ps - Pbh$
(Dr) Densidad relativa (g/cm ³)	2,738	$Dr = Ps / (Ps - Pbh)$
POROSIDAD DE LA MUESTRA		
(h') Volumen de poros accesibles (cm ³)	51,00	$h' = Va - Vr$
(Pr) Porosidad abierta (%)	5,90	$Pr = (h' / Va) * 100$
(Abs) Absorción de agua (%)	2,29	$Abs = ((Psat - Ps) / Ps) * 100$

Tabla 2.3 Datos de la muestra 3.

DATOS MUESTRA - 5		
(Ps) Peso seco muestra (gramos)	4.036,00	
(Psat) Peso saturado muestra (gramos)	4.116,00	En agua
(Pbh) Peso b/ hidrostática muestra (gramos)	2.472,00	En agua
CÁLCULO DENSIDAD Y VOLUMEN: APARENTE Y RELATIVO		
(Va) Volumen aparente (cm ³)	1.644,00	$Va = Psat - Pbh$
(Da) Densidad aparente (g/cm ³)	2,455	$Da = Ps / (Psat - Pbh)$
(Vr) Volumen relativo (cm ³)	1.564,00	$Vr = Ps - Pbh$
(Dr) Densidad relativa (g/cm ³)	2,581	$Dr = Ps / (Ps - Pbh)$
POROSIDAD DE LA MUESTRA		
(h') Volumen de poros accesibles (cm ³)	80,00	$h' = Va - Vr$
(Pr) Porosidad abierta (%)	4,87	$Pr = (h' / Va) * 100$
(Abs) Absorción de agua (%)	1,98	$Abs = ((Psat - Ps) / Ps) * 100$

Tabla 2.4 Datos de la muestra 5.

DATOS MUESTRA - 4 (ROCA CALIZA)		
(Ps) Peso seco muestra (gramos)	4.566,00	
(Psat) Peso saturado muestra (gramos)	4.816,00	En agua
(Pbh) Peso b/ hidrostática muestra (gramos)	2.792,00	En agua
CÁLCULO DENSIDAD Y VOLUMEN: APARENTE Y RELATIVO		
(Va) Volumen aparente (cm ³)	2.024,00	$Va = Psat - Pbh$
(Da) Densidad aparente (g/cm ³)	2,256	$Da = Ps / (Psat - Pbh)$
(Vr) Volumen relativo (cm ³)	1.774,00	$Vr = Ps - Pbh$
(Dr) Densidad relativa (g/cm ³)	2,574	$Dr = Ps / (Ps - Pbh)$
POROSIDAD DE LA MUESTRA		
(h') Volumen de poros accesibles (cm ³)	250,00	$h' = Va - Vr$
(Pr) Porosidad abierta (%)	12,35	$Pr = (h' / Va) * 100$
(Abs) Absorción de agua (%)	5,48	$Abs = ((Psat - Ps) / Ps) * 100$

Tabla 2.5 Datos de la muestra 4

DATOS MUESTRA - 6		
(Ps) Peso seco muestra (gramos)	5.077,00	
(Psat) Peso saturado muestra (gramos)	5.218,00	En agua
(Pbh) Peso b/ hidrostática muestra (gramos)	3.150,00	En agua
CÁLCULO DENSIDAD Y VOLUMEN: APARENTE Y RELATIVO		
(Va) Volumen aparente (cm ³)	2.068,00	Va = Psat - Pbh
(Da) Densidad aparente (g/cm ³)	2,455	Da = Ps / (Psat - Pbh)
(Vr) Volumen relativo (cm ³)	1.927,00	Vr = Ps - Pbh
(Dr) Densidad relativa (g/cm ³)	2,635	Dr = Ps/(Ps - Pbh)
POROSIDAD DE LA MUESTRA		
(h') Volumen de poros accesibles (cm ³)	141,00	h' = Va- Vr
(Pr) Porosidad abierta (%)	6,82	Pr = (h' / Va)*100
(Abs) Absorción de agua (%)	2,78	Abs =((Psat - Ps)/Ps)*100

Tabla 2.6 Datos de la muestra 6

DATOS MUESTRA - 7		
(Ps) Peso seco muestra (gramos)	5.461,00	
(Psat) Peso saturado muestra (gramos)	5.589,00	En agua
(Pbh) Peso b/ hidrostática muestra (gramos)	3.348,00	En agua
CÁLCULO DENSIDAD Y VOLUMEN: APARENTE Y RELATIVO		
(Va) Volumen aparente (cm ³)	2.241,00	Va = Psat - Pbh
(Da) Densidad aparente (g/cm ³)	2,437	Da = Ps / (Psat - Pbh)
(Vr) Volumen relativo (cm ³)	2.113,00	Vr = Ps - Pbh
(Dr) Densidad relativa (g/cm ³)	2,584	Dr = Ps/(Ps - Pbh)
POROSIDAD DE LA MUESTRA		
(h') Volumen de poros accesibles (cm ³)	128,00	h' = Va- Vr
(Pr) Porosidad abierta (%)	5,71	Pr = (h' / Va)*100
(Abs) Absorción de agua (%)	2,34	Abs =((Psat - Ps)/Ps)*100

Tabla 2.7 Datos de la muestra 7

DATOS MUESTRA - 8		
(Ps) Peso seco muestra (gramos)	3.983,00	
(Psat) Peso saturado muestra (gramos)	4.161,00	En agua
(Pbh) Peso b/ hidrostática muestra (gramos)	2.443,00	En agua
CÁLCULO DENSIDAD Y VOLUMEN: APARENTE Y RELATIVO		
(Va) Volumen aparente (cm ³)	1.718,00	Va = Psat - Pbh
(Da) Densidad aparente (g/cm ³)	2,318	Da = Ps / (Psat - Pbh)
(Vr) Volumen relativo (cm ³)	1.540,00	Vr = Ps - Pbh
(Dr) Densidad relativa (g/cm ³)	2,586	Dr = Ps/(Ps - Pbh)
POROSIDAD DE LA MUESTRA		
(h') Volumen de poros accesibles (cm ³)	178,00	h' = Va - Vr
(Pr) Porosidad abierta (%)	10,36	Pr = (h' / Va)*100
(Abs) Absorción de agua (%)	4,47	Abs =((Psat - Ps)/Ps)*100

Tabla 2.8 Datos de la muestra 8

DATOS MUESTRA - 9		
(Ps) Peso seco muestra (gramos)	3.579,00	
(Psat) Peso saturado muestra (gramos)	3.716,00	En agua
(Pbh) Peso b/ hidrostática muestra (gramos)	2.220,00	En agua
CÁLCULO DENSIDAD Y VOLUMEN: APARENTE Y RELATIVO		
(Va) Volumen aparente (cm ³)	1.496,00	Va = Psat - Pbh
(Da) Densidad aparente (g/cm ³)	2,392	Da = Ps / (Psat - Pbh)
(Vr) Volumen relativo (cm ³)	1.359,00	Vr = Ps - Pbh
(Dr) Densidad relativa (g/cm ³)	2,634	Dr = Ps/(Ps - Pbh)
POROSIDAD DE LA MUESTRA		
(h') Volumen de poros accesibles (cm ³)	137,00	h' = Va - Vr
(Pr) Porosidad abierta (%)	9,16	Pr = (h' / Va)*100
(Abs) Absorción de agua (%)	3,83	Abs =((Psat - Ps)/Ps)*100

Tabla 2.9 Datos de la muestra 9

DATOS MUESTRA - 10		
(Ps) Peso seco muestra (gramos)	5.029,00	
(Psat) Peso saturado muestra (gramos)	5.103,00	En agua
(Pbh) Peso b/ hidrostática muestra (gramos)	3.141,00	En agua
CÁLCULO DENSIDAD Y VOLUMEN: APARENTE Y RELATIVO		
(Va) Volumen aparente (cm ³)	1.962,00	Va = Psat - Pbh
(Da) Densidad aparente (g/cm ³)	2,563	Da = Ps / (Psat - Pbh)
(Vr) Volumen relativo (cm ³)	1.888,00	Vr = Ps - Pbh
(Dr) Densidad relativa (g/cm ³)	2,664	Dr = Ps/(Ps - Pbh)
POROSIDAD DE LA MUESTRA		
(h') Volumen de poros accesibles (cm ³)	74,00	h' = Va- Vr
(Pr) Porosidad abierta (%)	3,77	Pr = (h' / Va)*100
(Abs) Absorción de agua (%)	1,47	Abs =((Psat - Ps)/Ps)*100

Tabla 2.10 Datos de la muestra 10

DATOS MUESTRA - 11		
(Ps) Peso seco muestra (gramos)	5.590,00	
(Psat) Peso saturado muestra (gramos)	5.645,00	En agua
(Pbh) Peso b/ hidrostática muestra (gramos)	3.456,00	En agua
CÁLCULO DENSIDAD Y VOLUMEN: APARENTE Y RELATIVO		
(Va) Volumen aparente (cm ³)	2.189,00	Va = Psat - Pbh
(Da) Densidad aparente (g/cm ³)	2,554	Da = Ps / (Psat - Pbh)
(Vr) Volumen relativo (cm ³)	2.134,00	Vr = Ps - Pbh
(Dr) Densidad relativa (g/cm ³)	2,619	Dr = Ps/(Ps - Pbh)
POROSIDAD DE LA MUESTRA		
(h') Volumen de poros accesibles (cm ³)	55,00	h' = Va- Vr
(Pr) Porosidad abierta (%)	2,51	Pr = (h' / Va)*100
(Abs) Absorción de agua (%)	0,98	Abs =((Psat - Ps)/Ps)*100

Tabla 2.11 Datos de la muestra 11

De las 11 muestras de piedra caliza se reflejan, en estos gráficos, los valores de densidad aparente, porosidad accesible y volumen aparente. Ninguna de ellas alcanzó en su densidad aparente los 2'70 Kg/dm³

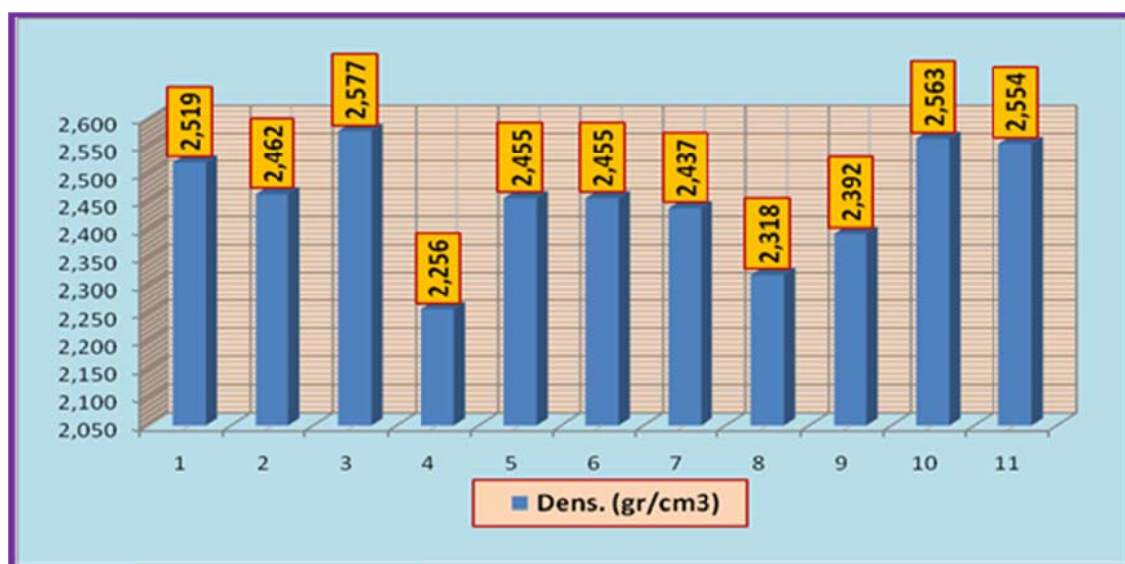


Figura 2.3.

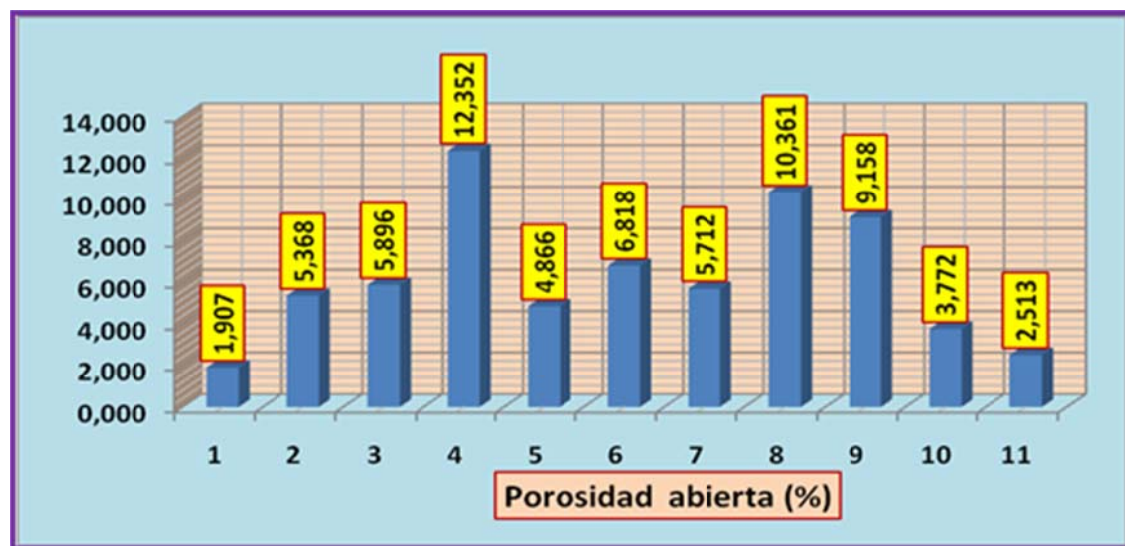


Figura 2.4.

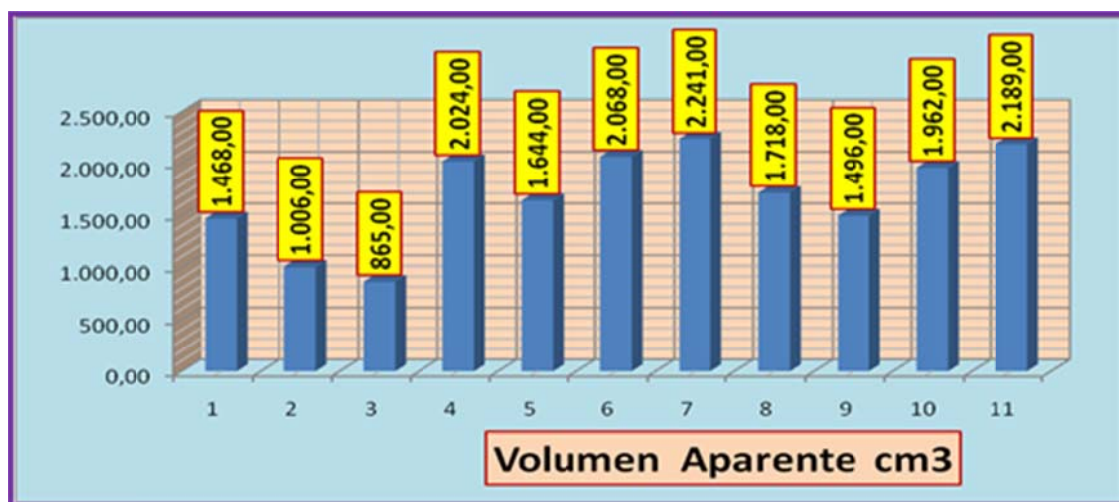


Figura 2.5.

Realizado este primer análisis de las piedras, se procedió a cocerlas en el horno eléctrico de la Escuela Taller del Ayuntamiento de Andújar, facilitado a tal fin. Este horno alcanzaba sobradamente los 900 °C y los mantenía de manera constante. También se comprobó que el tiempo necesario para que el horno ascendiese desde los 0 °C a los 900 °C fue de 6 horas. La cuestión que se suscita es el tiempo total de tratamiento. Si en el horno artesanal, el tiempo desde que se produce la ignición hasta dejar de alimentar el horno con leña es de 72 horas, con oscilaciones de temperatura interior de cierta consideración; ¿Cuánto tiempo sería necesario en un horno eléctrico donde no existen estas oscilaciones? En principio se optó en probar con 36 horas: 6 horas para alcanzar los 900°C y 30 horas más de cocción neta a 900 °C continuados. Las 11 piedras calizas disponibles se distribuyeron en dos hornadas; una primera hornada con 5 de ellas y las restantes se dejan en reserva por si era necesario rectificar el tiempo de cocción. Puesto que los datos escritos sobre las piedras para su identificación se perderían durante el proceso, se colocaron en el horno y fotografiaron de manera que después fueran correctamente identificadas.

En principio se cocieron las piedras nº 4, 6, 7, 10 y 11. Pasado el tiempo previsto se apagó el horno y se mantuvo cerrado para su enfriamiento durante 16 horas. A continuación las piedras se metieron en bolsas de plástico y a su vez se introdujeron en cajas de cartón precintadas para evitar el contacto directo con el aire antes de su análisis previo y apagado final. Se pretendía que las piedras de óxido de calcio estuvieran en contacto con el aire el menor tiempo posible. No se sabría si la cocción había sido correcta hasta que se procediera al apagado por inmersión y comprobar los posibles incómodos del producto, una vez pasado por el tamiz. No obstante, bajo la consideración

de que la cocción se había realizado correctamente, se efectuaron las fichas de control correspondientes, a cada una de ellas, detectando, en principio, la existencia de una acusada contracción en la piedra de cal (óxido de calcio) o alteración volumétrica, a su salida del horno.

Para el cálculo del volumen aparente de la cal viva (óxido de calcio), al no poderse utilizar agua, se utilizó arena de mármol con grano comprendido entre 0'40 mm y 1'20 mm eliminando los granos superiores e inferiores. Para saber la dispersión que podría haber entre la arena y el agua, a la hora de utilizarlas para el cálculo del volumen aparente de cualquier tipo de piedra, se hizo lo siguiente: utilizar la piedra caliza n° 5 (Pag. 7), que aún no se había metido en el horno, para hacer la prueba tanto en agua como en arena. Se sabe y en su ficha consta que esta piedra caliza tiene un volumen aparente, calculado con la balanza hidrostática, de 1.644 cm³ y con arena dio un resultado de 1.640 cm³.

DATOS DE LA MUESTRA - 4 (PIEDRA DE CAL - ÓXIDO DE CALCIO)		
Peso seco de la roca caliza (gramos)	4.566,00	
Peso seco en la cal viva extraída del horno (gramos)	2.558,00	
Pérdida de peso de la roca caliza CO ₂ + H ₂ O (gramos)	2.008,00	
Tanto por ciento de pérdida de peso	43,977	
Volumen aparente de la muestra en cal viva (cm ³)	1.620,00	
Densidad (kilos peso / litros volumen)	1,58	
Contracción (%)	19,96	

Tabla 2.12

ENSAYO: Sobre una bandeja amplia para evitar cualquier pérdida de árido:

- En el interior de una cubeta aforada, colocada dentro de la bandeja, se introduce la piedra caliza.
- Con una paleta se añade en la cubeta, que ya contenía la piedra caliza, el árido necesario hasta colmarla por completo y pasarle el rasero en superficie. En este momento la cubeta contenía hasta su enrase, la piedra caliza más el árido. Era conocido que la cubeta hasta el enrase, tiene una capacidad de 6.390 cm³.

- A continuación, se volcaba en la bandeja todo el contenido de la cubeta: la piedra caliza y el árido. En la bandeja se dejaba solo y exclusivamente el árido, apartando la piedra caliza que se llevaba nuevamente a su envase.
- Se mide el árido vertido en la bandeja, con las probetas aforadas. En el caso de la muestra nº5 se cubicaron 4.750 cm³ de árido.
- $6.390 - 4.750 = 1.640$ cm³ es el volumen aparente de la piedra caliza.

DATOS DE LA MUESTRA - 6 (PIEDRA DE CAL - ÓXIDO DE CALCIO)		
Peso seco de la roca caliza (gramos)	5.077,00	
Peso seco en la cal viva extraída del horno (gramos)	2.862,00	
Pérdida de peso de la roca caliza CO ₂ + H ₂ O (gramos)	2.215,00	
Tanto por ciento de pérdida de peso	43,628	
Volumen aparente de la muestra en cal viva (cm ³)	1.830,00	
Densidad (kilos peso / litros volumen)	1,56	
Contracción (%)	11,51	

Tabla 2.13 Datos de la muestra 6.

DATOS DE LA MUESTRA - 7 (PIEDRA DE CAL - ÓXIDO DE CALCIO)		
Peso seco de la roca caliza (gramos)	5.461,00	
Peso seco en la cal viva extraída del horno (gramos)	3.145,00	
Pérdida de peso de la roca caliza CO ₂ + H ₂ O (gramos)	2.316,00	
Tanto por ciento de pérdida de peso	42,410	
Volumen aparente de la muestra en cal viva (cm ³)	2.020,00	
Densidad (kilos peso / litros volumen)	1,56	
Contracción (%)	9,86	

Tabla 2.14 Datos de la muestra 7.

DATOS DE LA MUESTRA - 10 (PIEDRA DE CAL - ÓXIDO DE CALCIO)		
Peso seco de la roca caliza (gramos)	5.029,00	
Peso seco en la cal viva extraída del horno (gramos)	2.826,00	
Pérdida de peso de la roca caliza CO ₂ + H ₂ O (gramos)	2.203,00	
Tanto por ciento de pérdida de peso	43,806	
Volumen aparente de la muestra en cal viva (cm ³)	1.832,00	
Densidad (kilos peso / litros volumen)	1,54	
Contracción (%)	6,63	

Tabla 2.15 Datos de la muestra 10.

DATOS DE LA MUESTRA - 11 (PIEDRA DE CAL - ÓXIDO DE CALCIO)		
Peso seco de la roca caliza (gramos)	5.590,00	
Peso seco en la cal viva extraída del horno (gramos)	3.155,00	
Pérdida de peso de la roca caliza CO ₂ + H ₂ O (gramos)	2.435,00	
Tanto por ciento de pérdida de peso	43,560	
Volumen aparente de la muestra en cal viva (cm ³)	2.076,00	
Densidad (kilos peso / litros volumen)	1,52	
Contracción (%)	5,16	

Tabla 2.16 Datos de la muestra 11.

Una vez realizado el análisis y completadas sus fichas, se procedió a su inmersión en agua, una a una, para su apagado y comprobación de si la cocción había sido correcta en el tiempo previsto estimado.

Hay que recordar que la primera hornada se realizó en 36 horas de cocción y las muestras fueron las numeradas 4-6-7-10 y 11. Las otras restantes muestras de piedra caliza se mantuvieron a la espera de los resultados de esta primera hornada y apagado.

Una vez terminadas estas fichas y comprobaciones, se procedió al apagado por inmersión de las primeras cinco muestras, siguiendo el criterio de que por cada kilo de piedra de cal viva u óxido de calcio se emplearían 3'6 litros de agua. En el recipiente se echará primero el agua y sobre el agua la piedra de cal viva, nunca al contrario. Se prepara el agua en el balde o recipiente y se comprueba, en principio, que la temperatura del agua es de 28'6 °C. Se prepara la piedra de cal viva a pié de balde; en este caso se trata de una piedra con fisuras que hubo que trocear para calcular correctamente su

volumen aparente. La reacción de la cal viva con la cal fue inmediata y con apreciable violencia, hasta tal punto que, en algún momento, hubo que tapar el balde, porque se producían pequeñas explosiones y el agua salía al exterior. La temperatura máxima alcanzada fue de 102'9 °C al minuto de realizarse la reacción. No aparecieron incocidos ni residuos y la cal viva reaccionó completamente. Las cinco muestras se comportaron igualmente. No hubo residuos.

Este comportamiento de las cinco primeras muestras nos indica que en un horno eléctrico, con control y estabilidad de temperatura, son suficientes 36 horas de cocción. Por ello se procedió de inmediato a realizar la segunda hornada con las muestras de piedra caliza restantes: nº 1,2, 3, 5, 8 y 9.

DATOS DE LA MUESTRA - 1 (PIEDRA DE CAL - ÓXIDO DE CALCIO)		
Peso seco de la roca caliza (gramos)	3.698,00	
Peso seco en la cal viva extraída del horno (gramos)	2.080,00	
Pérdida de peso de la roca caliza CO ₂ + H ₂ O (gramos)	1.618,00	
Tanto por ciento de pérdida de peso	43,753	
Volumen aparente de la muestra en cal viva (cm ³)	1.356,30	
Densidad (kilos peso / litros volumen)	1,53	
Contracción (%)	7,61	

Tabla 2.17 Datos de la muestra 1.

DATOS DE LA MUESTRA - 2 (PIEDRA DE CAL - ÓXIDO DE CALCIO)		
Peso seco de la roca caliza (gramos)	2.477,00	
Peso seco en la cal viva extraída del horno (gramos)	1.399,00	
Pérdida de peso de la roca caliza CO ₂ + H ₂ O (gramos)	1.078,00	
Tanto por ciento de pérdida de peso	43,520	
Volumen aparente de la muestra en cal viva (cm ³)	890,00	
Densidad (kilos peso / litros volumen)	1,57	
Contracción (%)	11,53	

Tabla 2.18 Datos de la muestra 2.

DATOS DE LA MUESTRA - 3 (PIEDRA DE CAL - ÓXIDO DE CALCIO)		
Peso seco de la roca caliza (gramos)	2.229,00	
Peso seco en la cal viva extraída del horno (gramos)	1.259,00	
Pérdida de peso de la roca caliza CO ₂ + H ₂ O (gramos)	970,00	
Tanto por ciento de pérdida de peso	43,517	
Volumen aparente de la muestra en cal viva (cm ³)	740,00	
Densidad (kilos peso / litros volumen)	1,70	
Contracción (%)	14,45	

Tabla 2.19 Datos de la muestra 3.

DATOS DE LA MUESTRA - 5 (PIEDRA DE CAL - ÓXIDO DE CALCIO)		
Peso seco de la roca caliza (gramos)	4.036,00	
Peso seco en la cal viva extraída del horno (gramos)	2.250,00	
Pérdida de peso de la roca caliza CO ₂ + H ₂ O (gramos)	1.786,00	
Tanto por ciento de pérdida de peso	44,252	
Volumen aparente de la muestra en cal viva (cm ³)	1.490,00	
Densidad (kilos peso / litros volumen)	1,51	
Contracción (%)	9,37	

Tabla 2.20 Datos de la muestra 5.

DATOS DE LA MUESTRA - 8 (PIEDRA DE CAL - ÓXIDO DE CALCIO)		
Peso seco de la roca caliza (gramos)	3.983,00	
Peso seco en la cal viva extraída del horno (gramos)	2.242,00	
Pérdida de peso de la roca caliza CO ₂ + H ₂ O (gramos)	1.741,00	
Tanto por ciento de pérdida de peso	43,711	
Volumen aparente de la muestra en cal viva (cm ³)	1.490,00	
Densidad (kg / litros)	1,50	
Contracción (%)	13,27	

Tabla 2.21 Datos de la muestra 8.

DATOS DE LA MUESTRA - 4 (PIEDRA DE CAL - ÓXIDO DE CALCIO)		
Peso seco de la roca caliza (gramos)	3.579,00	
Peso seco en la cal viva extraída del horno (gramos)	2.023,00	
Pérdida de peso de la roca caliza $\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O}$ (gramos)	1.556,00	
Tanto por ciento de pérdida de peso	43,476	
Volumen aparente de la muestra en cal viva (cm^3)	1.296,00	
Densidad (kilos peso / litros volumen)	1,56	
Contracción (%)	13,37	

Tabla 2.22 Datos de la muestra 4.

Se concluye previamente: que todas las piedras se contrajeron y que esta contracción, en la piedra de cal viva, es función, casi proporcional, de la porosidad de la piedra caliza. A mayor porosidad de la caliza mayor es la contracción de la cal viva.

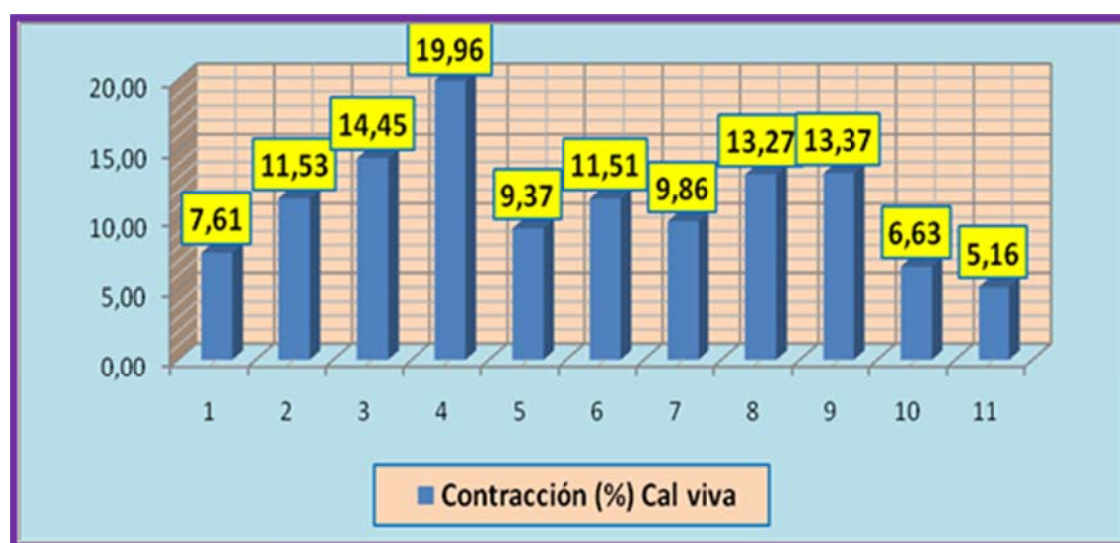


Figura 2.6.

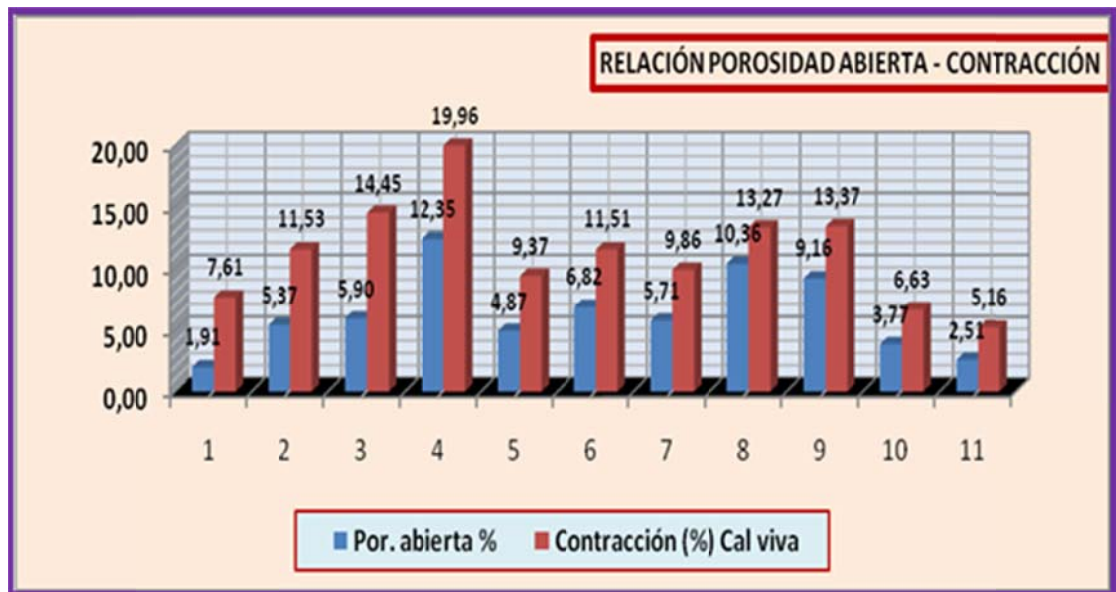


Figura 2.7.

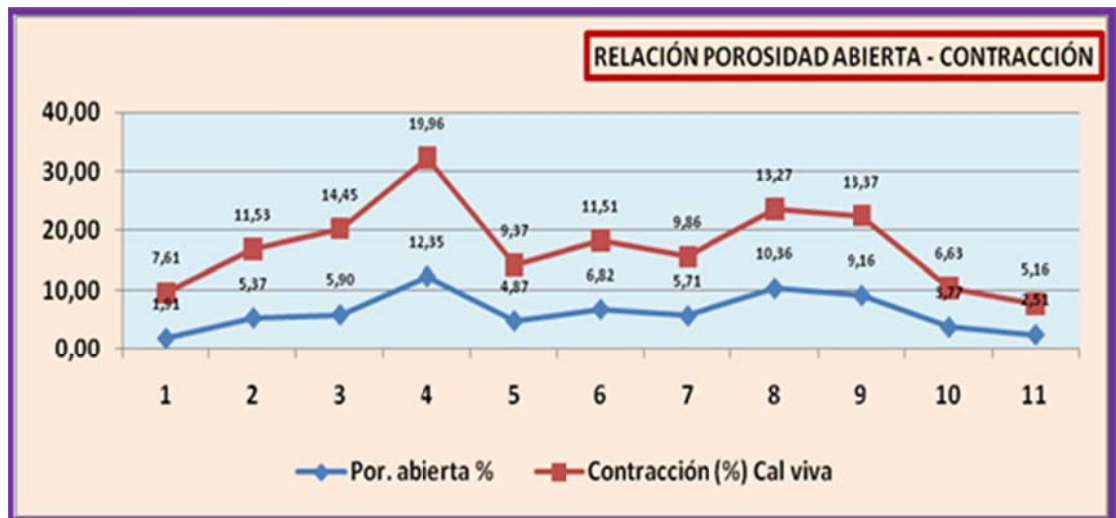


Figura 2.8.

En estas dos gráficas puede verse, con mayor claridad, el grado de proporcionalidad que existe entre la porosidad abierta de la piedra caliza con respecto a la contracción producida en el interior del horno de cocción.

Como puede comprobarse, la piedra caliza de la Sierra de Esparteros no es homogénea en su estructura física, y la porosidad accesible varía constantemente en su espacio.

Sin embargo la contracción y la densidad apreciadas en estas piedras de cal viva cocidas a temperatura constante de 900 °C durante 36 horas, es inferior a la evaluada en

las pruebas que se realizaron en las piedras de cal viva extraídas del horno artesanal frío, donde la temperatura oscilaba, en el periodo de cocción durante 72 horas, entre los 700 °C y 1300 °C.

3. Resumen y comparación de los resultados obtenidos.

		EN ROCA CALIZA (Carbonato Cálcico)			
		Peso (g)	Volumen (cm ³)	Densidad aparente	% Por. abierta
MUESTRA	1	3.698,00	1.468,00	2,52	1,91
MUESTRA	2	2.477,00	1.006,00	2,46	5,37
MUESTRA	3	2.229,00	865,00	2,58	5,90
MUESTRA	4	4.566,00	2.024,00	2,26	12,35
MUESTRA	5	4.036,00	1.644,00	2,45	4,87
MUESTRA	6	5.077,00	2.068,00	2,46	6,82
MUESTRA	7	5.461,00	2.241,00	2,44	5,71
MUESTRA	8	3.983,00	1.718,00	2,32	10,36
MUESTRA	9	3.579,00	1.496,00	2,39	9,16
MUESTRA	10	5.029,00	1.962,00	2,56	3,77
MUESTRA	11	5.590,00	2.189,00	2,55	2,51

Tabla 3.1.

		EN PIEDRA DE CAL (Óxido de Calcio)				
		Peso (g.)	Volumen (cm3.)	Densidad aparente	Contrac.%	Perd.Peso (%)
MUESTRA	1	2.080,00	1.356,30	1,53	7,61	43,75
MUESTRA	2	1.399,00	890,00	1,57	11,53	43,52
MUESTRA	3	1.259,00	740,00	1,70	14,45	43,52
MUESTRA	4	2.558,00	1.620,00	1,58	19,96	43,98
MUESTRA	5	2.250,00	1.490,00	1,51	9,37	44,25
MUESTRA	6	2.862,00	1.830,00	1,56	11,51	43,63
MUESTRA	7	3.145,00	2.020,00	1,56	9,86	42,41
MUESTRA	8	2.242,00	1.490,00	1,50	13,27	43,71
MUESTRA	9	2.023,00	1.296,00	1,56	13,37	43,48
MUESTRA	10	2.826,00	1.832,00	1,54	6,63	43,81
MUESTRA	11	3.155,00	2.076,00	1,52	5,16	43,56

Tabla 3.2.

4. Apagado de la cal viva cocida en horno eléctrico. Temperatura de reacción con el agua.

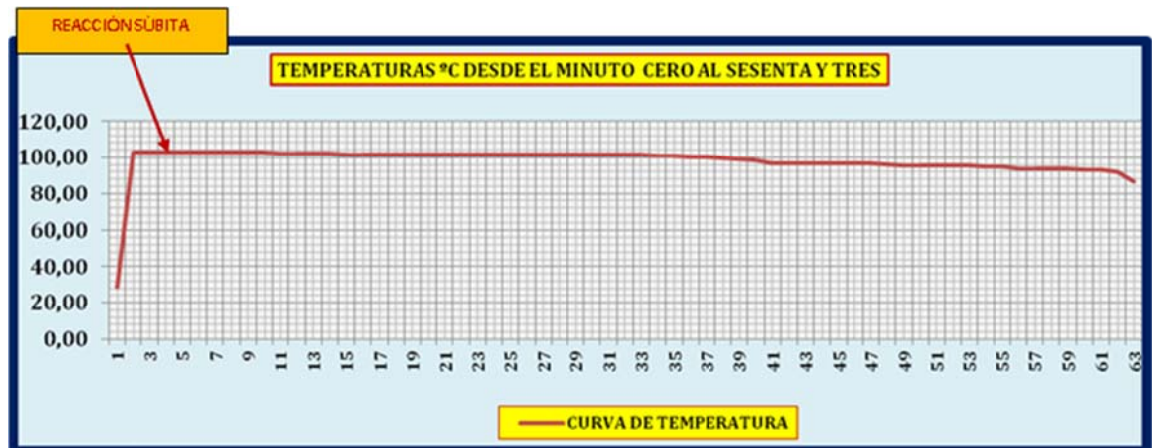


Figura 4.1.

Durante los primeros 63 minutos del apagado de la cal viva la temperatura del agua estuvo entre los 28'50 °C iniciales; los 102'80 °C fueron alcanzados en el primer minuto de la prueba y los 86'80 °C persistían en el minuto sesenta y tres. Las decenas de pruebas y mediciones realizadas en este estudio indican que las temperaturas puntas superiores medidas nunca superaron los 103°C.

La piedra caliza extraída de la Sierra de Esparteros, de tipo pisolítica, no es homogénea en cuanto a la densidad ni a la porosidad.

En hornos eléctricos de poco volumen pero capaces de mantener una temperatura constante de 900 °C, el tiempo de cocción es de 36 h desde el inicio hasta el final, en contraposición con los grandes hornos artesanales que necesitan 72 horas.

En cuanto a la contracción sufrida, solo se tuvo en cuenta, en la roca caliza, la porosidad accesible. Es muy probable que, debido a la heterogeneidad de la roca madre, existan trozos de rocas con mayor porosidad, incluso porosidad interior, no accesible, que al cocerlas en el horno tengan una contracción mucho mayor de la esperada y por tanto su densidad aumentaría. También es probable que existan otros factores, independientes de la porosidad que incidan en la mayor o menor contracción de la piedra, como puede ser el caso de la existencia mayor o menor cantidad de micrita o caliza micro cristalina, tanto en el interior de los pisolitos y oolitos como en la matriz exterior.

La cal viva, desde que salió del horno eléctrico, tuvo una cadena de custodia escrupulosa en el sentido de que desde el momento que sale del horno estuvo no más de 10 segundos, en contacto con la atmósfera envolvente. La pérdida de peso, en tanto por ciento, de la piedra caliza al ser cocida, estuvo en torno al 43% y fue similar en todas las muestras.

Todas las muestras de cal viva procedentes del horno eléctrico, en cuanto a su apagado por fusión, se comportaron exactamente igual y no hubo diferencia significativa alguna en cuanto a la curva de temperatura-tiempo en el agua de apagado. Diferencia que si fue significativa en las seis piedras extraídas directamente de los hornos artesanales de Morón de la Frontera en los que no existía el cuidado preciso, al cien por cien, de aislar totalmente el producto cocido del ambiente atmosférico. La temperatura del agua de apagado, en todos los casos, nunca fue superior a los 103 °C. La reacción súbita de la cal viva con el agua, procedente del horno eléctrico, se realizó dentro de los primeros 60 segundos del contacto con el agua. En la cal apagada resultante no se detectaron incocidos al ser tamizada con el tamiz de 1 mm.

Las seis piezas de cal viva (óxido de calcio), extraídas del horno artesanal en frío, fueron obtenidas por cocción de piedra caliza, de la Sierra de Esparteros, en horno artesanal durante 72 horas y temperaturas oscilantes entre 700°C y 1300 °C. Cuando en el horno artesanal la temperatura decrece a los 700 °C, se aprovecha esta circunstancia, por seguridad personal, para alimentarlo con leña de olivo. Terminada la alimentación, cuestión de pocos minutos, la temperatura asciende, en la boca del horno, de manera súbita, hasta unos 1300 °.

Es probable que la mayor contracción apreciada en las seis piedras de cal viva procedentes de los hornos artesanales, además de ser función de la porosidad de la piedra caliza (carbonato cálcico), también sea función de la temperatura oscilante en el interior del horno, o de la temperatura máxima alcanzada o del número de horas de cocción y es posible que también lo sea del tiempo que permanecen en espera antes de ser hidratadas. La densidad y contracción de estas seis piedras son muy superiores al de las once piedras de cal viva, procedentes del horno eléctrico, detalladas en este documento.

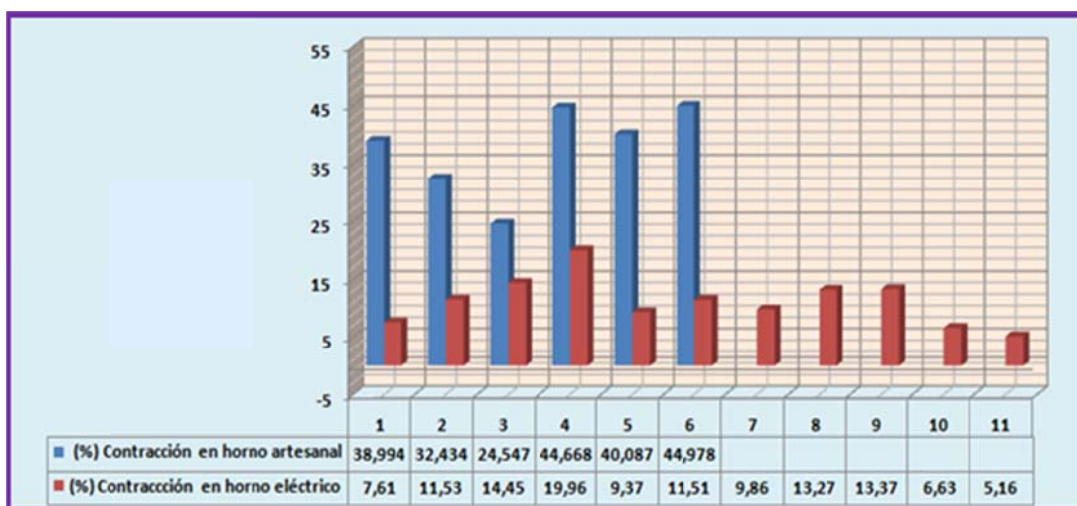


Figura 4.2.

De las seis piedras de óxido de calcio extraídas del horno artesanal, no fue posible averiguar, como se ha indicado, las propiedades –porosidad, peso y volumen- de la piedra caliza (carbonato cálcico) de las que procedían. Se estimó que, la piedra caliza podría tener una densidad aparente de 2.700 kg por m³ (en referencia a las tablas de peso específico de materiales. Bibliografía) y que una vez cocida tendría una pérdida de peso del 44% por lo que su peso por litro quedaría reducido a 1.512 kg por m³. En la Tabla 2, se indica que las doce piedras cocidas en el horno eléctrico cumplen, con cortas diferencias, este requisito de densidad aparente y pérdida de peso, a excepción de la muestra nº 3. Sin embargo, las piedras calizas (carbonato cálcico) de las que proceden respectivamente, no cumplen con el requisito de densidad aparente y todas quedan, como consecuencia de su porosidad aparente particular, por debajo de los 2.700 kg por m³ (véase Tabla 1). Sin embargo sí tiene cierta aproximación con respecto a la densidad relativa.

La cal viva procedente de los hornos artesanales, con 72 horas de cocción y temperatura oscilante, marca diferencia de contracción con respecto a la obtenida en el horno eléctrico, con 36 horas de cocción y temperatura constante: en cuanto a la densidad aparente, contracción y apagado por inmersión de la cal viva. El producto final resultante (hidróxido cálcico), tanto en uno como en otro, es el mismo: de gran calidad.

5. Conclusiones

- a.- Es patente que la piedra caliza de la Sierra de Esparteros, sufre una acusada contracción al ser cocida. Hay proporcionalidad entre la porosidad abierta de la piedra caliza y la magnitud de la contracción experimentada.
- b.- Igualmente puede existir el convencimiento de que las bóvedas de los hornos de Morón sean tan apuntadas y altas, con paredes casi verticales en su arranque, debido a estas contracciones. Contracciones que no asegurarían estabilidad en bóvedas menos apuntadas.
- c.- Es presumible que los caleros originarios, desconocedores, en principio, de esta contracción que, en la piedra caliza, se producía durante el proceso de cocción, en el interior del horno, vieran como se les derrumbaban aquellas primeras hornadas y las bóvedas que, en aquellos primeros comienzos, habrían podido ser más bajas. Poco a poco debieron subirlas hasta la configuración actual que les permitió la cocción sin derrumbe, con lo cual la altura de los hornos fue creciendo; de hecho los laterales de arranque de las bóvedas en su base son, casi verticales y es precisamente donde se colocan las piedras más grandes y pesadas.
- d.- La cal viva procedente de los hornos artesanales, con 72 horas de cocción y temperatura oscilante, es diferente a la obtenida en el horno eléctrico, con 36 horas de cocción y temperatura constante, en cuanto a la densidad aparente, contracción y apagado por inmersión de la cal viva. El producto final resultante (hidróxido cálcico), tanto en uno como en otro, es de gran calidad.

6. Bibliografía

Adam, Jean Pierre. “La Construcción Romana” 2º edición 1989.361 p. ISBN: 84-930427-4-9

Carrillo Lobo, Juan Antonio (Texto) y M. Gilortiz (Fotografía) –“La Cal de Morón”. Edita Asociación Cultural Hornos de la Cal de Morón. SE-5705-2005

Gárate Rojas, Ignacio. “Artes de la Cal”. Segunda Edición Ampliada 2002. P. 106 ISBN 84-89150-50-8

Martínez Rossy, Isabel. Eloy Barrios Rodríguez, Rosario Martín Barrientos y Martín Rupierez García. “Caleros y Canteros”. Edición de la Diputación de Salamanca 1987. ISBN 84-505-3153-5

Olaf Medenbach/ Cornelia Sussieck-Fornelfeld/ Traducción Frederic Streich. “Minerales”. S.B.N. 84-87535-04-6

Palomino León, Jesús Ángel. “Historia de Andújar. Tomo II. Capítulo: La Arquitectura medieval defensiva. El recinto amurallado de Andújar”).ISBN V.2:978-84-933172-5-6

Ros McDonnell, Diego y Lanzón Torres Marcos,2010.”Materiales de Construcción. Propiedades Físicas. Ejercicios.”. ISBN: 978-84-8425-808-7

Walter Marsh/ Olaf Medenbach/ Colaboración Hans Dieter Trochin/Traducción Rosa Sala/Revisión Dr. Solans (Universidad de Barcelona). “Rocas”. I.S.B.N. 84-87535-21-6

Peso específico de materiales.

www.euroimportadora.com.mx/.../Peso_Especifico_de_Materiales.pdf