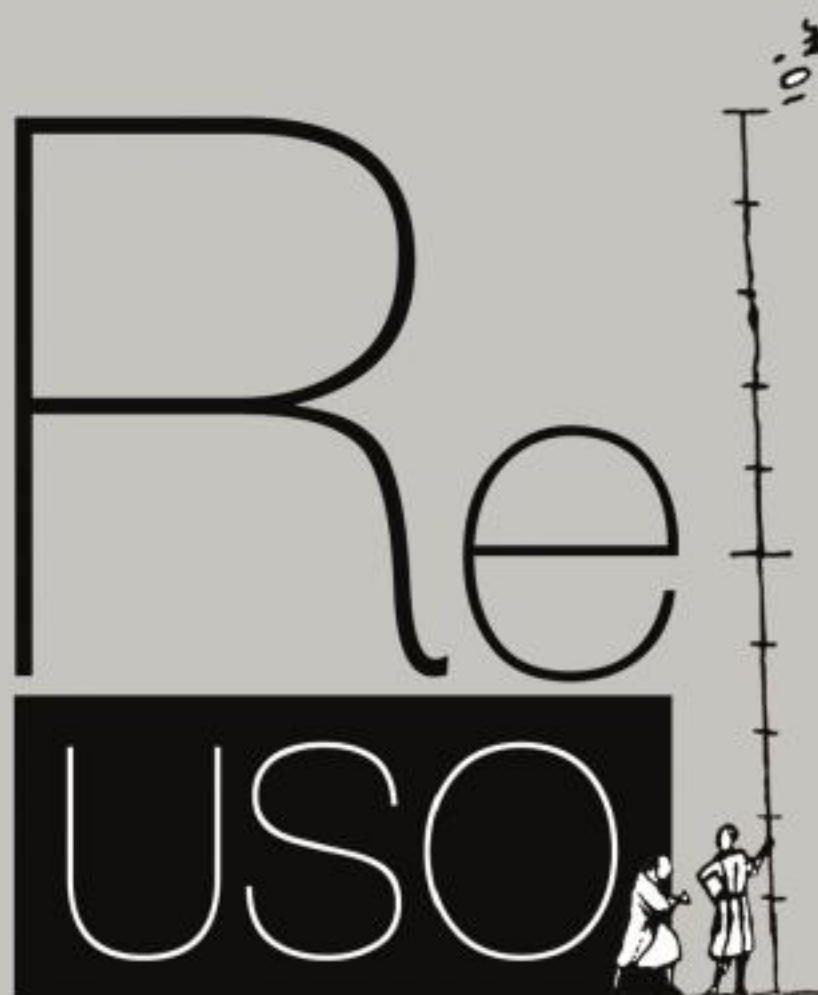


# LA EXPERIENCIA DEL REUSO



ACTAS CONGRESO INTERNACIONAL  
Propuestas para la Documentación, Restauración  
y Reutilización del Patrimonio Arquitectónico

*VOLUMEN I*



*CRITERIO Y MÉTODO EN ÉPOCA DE CRISIS*

*INGENIERÍA Y TÉCNICA AL SERVICIO DE LA RESTAURACIÓN*



# Construcción de bóveda a escala reducida con cemento natural

**M. Fortea Luna**

*Arquitecto Departamento de Construcción  
Universidad de Extremadura*

**I. Peco Royo**

*Técnico laboratorio Escuela Politécnica  
Universidad de Extremadura*

**J.C. Salcedo Hernández**

*Arquitecto Departamento de Construcción  
Universidad de Extremadura*

**J. Saumell Lladó**

*Arquitecto Departamento de Expresión Gráfica  
Universidad de Extremadura*

*Se compara la aptitud de un cemento natural con el yeso y el cemento portland, para la ejecución y rehabilitación de bóvedas tradicionales de ladrillo en el ámbito extremeño.*

*Se parte de una bóveda tabicada, ejecutada sin cimbra, similar a otras existentes en el patrimonio regional, enraizadas en la tradición musulmana y bizantina.*

*Ventajas de aplicación: compatibilidad del material con la obra rehabilitada por su mayor elasticidad, permitiendo su deformación conjunta con la fábrica original; sostenibilidad por la reducción de energía en el proceso de fabricación del cemento natural respecto al portland; facilidad de ejecución por la alta resistencia inicial; analogía cromática entre materiales. Se destaca la puesta en valor de técnicas de conocimiento y de consolidación del patrimonio.*

## INTRODUCCIÓN

El objeto de este ensayo es evaluar la aptitud de un cemento natural para ser utilizado en la formación de bóvedas de ladrillo. Este trabajo se encuadra en una línea de investigación de consolidación estructural de fábricas en obras de rehabilitación, ensayando materiales tradicionales.

Se requiere un cemento natural por su compatibilidad con las fábricas de mampostería tradicionales y por su proceso de fabricación mucho menos contaminante que el de un cemento portland convencional. La compatibilidad es química y mecánica, por la menor resistencia y rigidez del cemento natural. Se determina de forma experimental la aptitud de una pasta de agua y cemento natural (de fraguado rápido y altas resistencias iniciales) para la formación de una bóveda tabicada -sin cimbra- en sustitución del yeso empleado históricamente.

Se trata de comprobar si un operario con experiencia en la formación de bóvedas tabicadas puede formar la estructura de manera similar a como se haría con yeso (con la dosificación oportuna) y si la resistencia obtenida es compatible con la de una fábrica de ladrillo.

## ANTECEDENTES: BÓVEDAS DE LADRILLO SIN CIMBRA

### *Bóvedas de rosca*

En Extremadura se utilizan desde tiempo inmemorial las bóvedas de ladrillo construidas sin cimbra; una técnica heredada del mundo bizantino a través de la España musulmana. Son las llamadas bóvedas “de rosca”, por la forma de colocación del ladrillo, tomado con mortero de cal. La ausencia de cimbra obliga a colocar el ladrillo de forma estable durante su ejecución, por la tardanza en fraguar del mortero

de cal aérea. Se ejecutan hiladas cónicas, con el ladrillo inclinado como para que se mantenga estable por sí mismo por la adherencia del mortero.

### *Bóvedas tabicadas*

En la bóveda tabicada los ladrillos se colocan de tabla. En Extremadura, esta técnica se conocía prácticamente desde su inicio, con restos de piezas en el Sur de la provincia de Badajoz. Se necesita yeso, material inexistente en Extremadura, restringido hasta la llegada del ferrocarril: la bóveda de rosca evolucionó hacia la bóveda tabicada, con un ahorro económico importante de material y de mano de obra, que explica su rápido desarrollo, a partir de análoga geometría.

## METODOLOGÍA

El objeto del ensayo es comprobar la aptitud del cemento rápido natural en sustitución del yeso para la ejecución de una bóveda tabicada con técnica extremeña, pariente de la catalana. La mezcla resultante será estudiada en laboratorio para determinar densidad y resistencia.

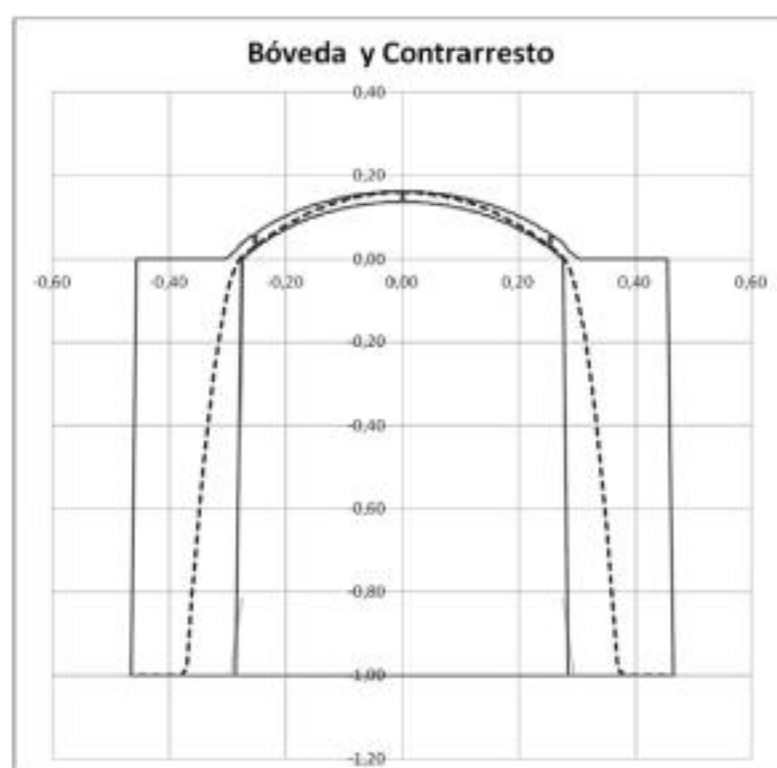


Figura 1. Contrarresto de la bóveda

## DISEÑO ESTRUCTURAL DEL MODELO

### *Trazado de la bóveda*

El modelo elegido es una bóveda rebajada de cañón corrido, apoyada sobre dos muros paralelos. La sección de la bóveda es un arco circular de radio 69 cm, con una flecha de 39 cm y una luz total de 124 cm. El canto de la hoja es la dimensión del canto del ladrillo.



*Dimensionado*

El dimensionado de la bóveda ha sido realizado con un programa informático de elaboración propia, cuyos resultados se recogen en la tabla 1 y figuras 2, 3 y 4.

Tabla 1. Datos y resultados del dimensionado

DATOS. Materiales	
Densidad de la fábrica en kN/m <sup>3</sup>	12,00
Tension máxima admisible de la fábrica N/m <sup>3</sup>	4,00
Coefficiente dilatacion térmica de la fábrica (10 <sup>-6</sup> m/m <sup>3</sup> C)	6,00
DATOS. Geometría del arco	
Dimensión X en m	..0,55
Flecha Lado X en m	...0,14
Canto hoja m	..0,03
Ancho del arco de apoyo en m	..1,00
Ancho del arco en clave en m	..1,00
RESULTADOS. Geometría	
Superficie del arco en planta en m <sup>2</sup>	..0,55
Superficie del arco en verdadera magnitud por el intradós en m <sup>2</sup>	..0,64
Factor de concavidad	..1,16
RESULTADOS. Empujes	
Empuje horizontal del arco en apoyo en kN	0,0780
Empuje vertical del arco en apoyo en kN	0,0942
Empuje horizontal en apoyo en kN/m lineal	0,0780
Empuje vertical en apoyo en kN/m linea	0,0942
Inclinación del empuje en grados respecto la horizontal	50
RESULTADOS. Tensiones C.S.G.	
Tensión máxima en N/mm <sup>2</sup>	0,00489
Tensión máxima en % capacidad	0,12
Coefficiente de Seguridad Geométrico mínimo en la hoja	1,12

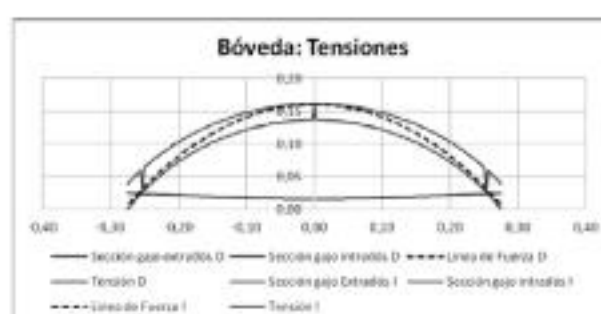


Figura 2. Tensiones en la bóveda

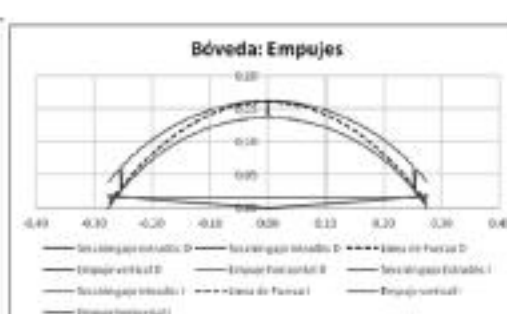


Figura 3. Empujes en la bóveda

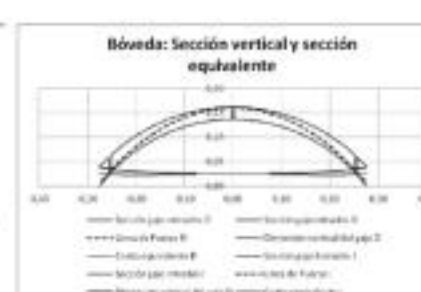


Figura 4. Sección vertical y sección equivalente en la bóveda

## ESTUDIO DE MATERIALES

### *Materiales empleados*

Ladrillo y el mortero de agarre. La técnica extremeña permite su ejecución cimbra de sujeción.

Los ladrillos utilizados fueron piezas cerámicas de ladrillo hueco sencillo, del tipo rasilla, de formato 22,7 x 10,4 x 2,6 cm  $\pm$  1,0%. El peso de cada pieza es de 612 gr  $\pm$  1,2%.

El conglomerante empleado fue cemento natural de fraguado rápido marca Collet-Marfil®. No se empleó arena, simplemente pasta de este cemento con agua.

### *El cemento natural y las obras de rehabilitación*

El cemento natural es un conglomerante hidráulico que se produce mediante la calcinación de una única roca a una temperatura inferior a la de sinterización, moliéndola posteriormente. En contraste, el cemento portland se obtiene, al calcinar la mezcla artificial de dos rocas diferentes (caliza y arcilla obtenidas de dos canteras diferentes) a una temperatura superior.

Debido a su menor temperatura de cocción, el cemento natural contiene principalmente silicato dicálcico ( $C_2S$ ) y aluminato bicálcico ( $C_2A$ ). A diferencia del cemento portland, no contiene silicato tricálcico ( $C_3S$ ) ni aluminato tricálcico ( $C_3A$ ). Debido a estas diferencias químicas, el cemento natural tiene menor resistencia a compresión que el cemento portland, fragua más rápidamente, alcanza mayores resistencias iniciales y tiene un período de endurecimiento más largo.

Otra importante diferencia la explica su menor rigidez: El cemento natural tiene un módulo de deformación significativamente inferior al del cemento portland; haciendo compatible su deformación con las fábricas de mampostería tradicionales. Se generan menos tensiones diferenciales entre las fábricas existentes y el hormigón o mortero de la actuación rehabilitadora.

El cemento natural marca Collet® empleado en este ensayo, se fabrica con material procedente de una explotación subterránea -en mina- ubicada en Guardiola de Berguedá (Barcelona) y se produce desde 1890. La roca tiene en su composición natural una pequeña cantidad de combustible que reduce la energía suministrada al proceso de calcinación de la piedra.

## RESULTADOS

### *Aptitud para la formación de la bóveda*

El operario con el que se ha contado para realizar el ensayo tiene experiencia en la construcción de bóvedas tabicadas cogidas con yeso, manejando el cemento sin retardador, con pequeñas amasadas, debido al rápido fraguado.

Se consigue construir la bóveda con cemento natural utilizando la técnica del yeso con éxito, en tres horas. Sin protección, en un lugar transitado, a los seis meses permanece íntegra.



Figura 5. Operario en el proceso de ejecución de la bóveda

Figura 6. Bóveda terminada

#### *Ensayo de densidad en laboratorio*

Varias muestras representativas de la pasta empleada (in situ, de la esportilla del albañil), depositadas en una bolsa hermética, y fraguadas y endurecidas al aire, con su humedad natural en laboratorio, fueron sometidas al ensayo de densidad aparente en seco según las normas UNE-EN 1015-10 y UNE-EN 1015-10:2000/A1:2007, obteniendo los resultados de la Tabla 3.

Para comparar se elaboraron otras masas siguiendo las especificaciones del fabricante Cementos Collet®, también in situ, pero con una menor relación agua/cemento. El valor medio de la densidad natural del mortero endurecido fue de 1,75 gr/cm<sup>3</sup> en las muestras tomadas de la pasta con la que el albañil formó la bóveda y de 1,84 gr/cm<sup>3</sup> en las muestras tomadas de la pasta realizada por el técnico de laboratorio de Cementos Collet®. La diferencia de densidad (un 5,14% mayor de la pasta del fabricante frente a la del albañil) se debe a la menor cantidad de agua del primero, que genera un material menos poroso y consiguientemente de mayor densidad aparente. Se supedita la densidad a una dosificación óptima para el trabajo del albañil.

#### *Ensayo de resistencia en laboratorio*

Se fabricaron probetas de 4x4x16 cm in situ a pie de obra, según norma UNE 80116:1986, ensayadas a rotura según UNE-EN 196-1:2005 determinando las resistencias mecánicas. Cada probeta se rompe primero a flexión, y luego a compresión cada una de las dos mitades. Se tomaron las muestras directamente de la pasta utilizada por el albañil (serie de probetas A) y otras realizadas a pie de obra por el técnico de laboratorio de Cementos Collet® (serie de probetas B) con menor cantidad de agua de amasado, rotas en laboratorio a 7, 28 y 60 días respectivamente.

Para empezar (ver tabla 2), todos los valores son válidos para el trabajo a compresión de las fábricas de ladrillo, para la que se establecen unos valores medios de



resistencia del mortero del orden de 5 - 7,5 - 10 N/mm<sup>2</sup>, empleando la catalogación de resistencias de CTE-DB-SE-F.

Tabla 2. Valores de Resistencia obtenidos en laboratorio

El valor medio de la resistencia a flexión, seria A de probetas (operario)	
A 7 días	2,15N/mm <sup>2</sup>
A28 días	2,50N/mm <sup>2</sup>
A 60 días	3,14N/mm <sup>2</sup>
El valor medio de la resistencia a flexión, serie B de probetas (fabricante)	
A 7 días	2,39N/mm <sup>2</sup>
A 28 días	2,90N/mm <sup>2</sup>
A 60 días	3,54N/mm <sup>2</sup>
El valor medio de la resistencia a compresión, serie A de probetas (operario)	
A 7 días	10,55N/mm <sup>2</sup>
A 28 días	15,25N/mm <sup>2</sup>
A 60 días	19,10N/mm <sup>2</sup>
El valor medio de la resistencia a compresion, seri B de probetas (fabricante)	
A 7 días	16,10N/mm <sup>2</sup>
A 28 días	18,15N/mm <sup>2</sup>
A 60 días	25,25N/mm <sup>2</sup>

Por otra parte, tras el ensayo efectuado, se comprueba que los resultados de resistencia a compresión obtenidos de las muestras del operario (utilizando más agua para conseguir la docilidad idónea para formar la bóveda) aunque sean inferiores a los del fabricante del cemento, son igualmente válidos para el objeto del experimento. Las muestras del albañil, con mayor cantidad de agua de amasado, resultaron ser más porosas (en principio negativo), pero también mejor compactadas por su consistencia menos seca.

## CONCLUSIONES

Por la rapidez de fraguado y elevada resistencia inicial, el cemento natural Collet Marfil® es adecuado para la formación de bóvedas tabicadas extremeñas, en sustitución del yeso. Amasando una pasta de cemento y agua (sin áridos) el operario consigue la consistencia y docilidad adecuadas, masa que, tras los ensayos de laboratorio realizados, ha acreditado una densidad media de 17,5 KN/m<sup>3</sup> y una resistencia a compresión a 28 días de 15,25 N/mm<sup>2</sup>.

Además, lo hace idóneo su carácter natural, de fabricación menos contaminante que un cemento portland convencional. La menor resistencia final y menor rigidez que la del cemento portland convencional, resulta compatible estructuralmente con las fábricas en obras de rehabilitación.

El cemento natural no es químicamente agresivo a la fábrica, como sí lo es un cemento portland convencional. Por último, el color del cemento (ocre medio) no altera significativamente el color de la arena silícea empleada, por lo que es posible dejar las juntas vistas, a diferencia del color negruzco que se obtiene con la mayoría de los cementos convencionales.

## REFERENCIAS

- Barahona Rodríguez, C. 2000. *Técnicas para revestir fachadas*. Madrid. Munilla-Lería
- Fortea Luna, M. y López Bernal, V. 2012. *Bóvedas extremeñas. Proceso constructivo y análisis estructural de bóvedas de arista*. Badajoz. Cantrila
- Huerta Fernández, S. 2004. *Arcos, bóvedas y cúpulas. Geometría y equilibrio en el cálculo tradicional de estructuras de fábrica*. Madrid. Instituto Juan de Herrera