

Influencia del espesor de la junta de mortero en la deformabilidad de las fábricas pétreas medievales

Effect of mortar joint thickness on deformability in medieval stone walls

M. J. Cassinello^(*)

Recepción/Received: 18-XI-05
Aceptación/Accepted: 29-III-06

RESUMEN

El análisis desarrollado sobre las fábricas pétreas de las catedrales góticas revela que los maestros medievales utilizaron diferentes espesores de juntas de mortero en cada uno de sus elementos estructurales. Este hecho —no tenido en cuenta hasta la fecha— tiene una gran repercusión en el comportamiento estructural de la catedral, ya que influye directamente en sus parámetros fundamentales: deformabilidad y resistencia. Dada la inexistencia de datos, realizamos un programa experimental de ensayos en el laboratorio central de INTEMAC, para establecer los posibles rangos de variabilidad de la deformabilidad de las fábricas medievales en función de la variabilidad del espesor del mortero de juntas que detectamos en los diferentes elementos estructurales de las catedrales góticas españolas. Los resultados obtenidos demuestran —tal y como señaló Eduardo Torroja— que la junta de mortero es un factor determinante en el comportamiento estructural de la fábrica. El rango de variabilidad del módulo de deformación alcanzó valores de 169,7 a 5.632,7 N/mm² con juntas de 17,00 a 5,50 mm. Este patrón de comportamiento estructural debe ser incluido en los modelos estructurales mediante un análisis de sensibilidad paramétrica para conocer el comportamiento estructural de las catedrales góticas con mayor rigor.

Palabras clave: fábrica pétreo, mortero de cal, estabilidad, deformabilidad, resistencia a compresión.

SUMMARY

An analysis of the stone walls in Gothic cathedrals revealed that Medieval master builders varied mortar joint thicknesses from one structural member to another. This fact, which has gone largely unnoticed to date, has a considerable impact on the structural behaviour of cathedrals, due to its direct effect on two fundamental parameters, deformability and strength. In the absence of field data, an experimental test programme was conducted at the INTEMAC Central Laboratory to determine the possible variations in deformability of Medieval masonry with changes in joint mortar thickness in the range found in the structural members of Spanish Gothic cathedrals. The results obtained show —further to an observation by Eduardo Torroja— that mortar joints are a determinant in the structural behaviour of masonry. The modulus of deformation varied from 169.7 to 5,632.7 N/mm² at joint thicknesses ranging from 17.00 to 5.50 mm. Structural models should be adapted to accommodate this behaviour pattern via parametric sensitivity analysis to obtain a clearer understanding of structural behaviour in Gothic cathedrals.

Keywords: stone masonry, lime mortar, stability, deformability, compressive strength.

^(*) Escuela Técnica Superior Arquitectura Madrid.

1. INTRODUCCIÓN

La heterogeneidad físico-química, reológica y mecánica de las fábricas pétreas antiguas constituye en sí misma una importante barrera para poder realizar con suficiente rigor científico la modelización de sus características fundamentales frente al análisis de su comportamiento estructural (1). En efecto, la natural heterogeneidad de la piedra impide la aplicación de conceptos de resistencia y deformabilidad características de una fábrica, ya que pese a que los sillares utilizados en la construcción de una fábrica procedan de la misma cantera, cuentan con características muy diferentes unos de otros. Cuando además la fábrica pétreá está construida añadiendo mortero en sus juntas, se obtiene una fábrica más heterogénea porque los antiguos morteros fueron ejecutados con mezclas no homogéneas.

Por otra parte, esta heterogeneidad de las fábricas se ve incrementada por una realidad existente en la construcción medieval y que no ha sido tenida en cuenta hasta la fecha. El hecho de que en una misma obra arquitectónica cada elemento estructural está construido con diferentes espesores de juntas de mortero y diferentes relaciones entre éstos y las dimensiones de los sillares o dovelas. El análisis de las características de las fábricas pétreas de las catedrales góticas españolas arroja una amplia gama, no ya de leyes de traba, sino también de espesores de juntas de mortero de cal.

Los maestros medievales construyeron las fábricas pétreas de cada uno de los diferentes elementos estructurales de la catedral, con piedras y espesores de juntas diferentes en función de las necesidades, no sólo de resistencia mecánica sino también de "deformabilidad" —adaptabilidad—, pese a no conocer estos conceptos. Los plementos de las bóvedas de crucería los construyeron con piezas pétreas poco pesadas —sillarejos de labra tosca y reducido espesor (17 a 23 cm) y juntas de mortero de cal muy amplias (2 a 3,3 cm). Esta configuración constructiva proporciona poco peso —menor empuje— y gran posibilidad de adaptabilidad. Sin embargo, las nervaduras de las bóvedas de crucería, los arbotantes, pilares y contrafuertes los construyeron en general con menores espesores de mortero en sus juntas (0,8 a 2 cm) (Figura 1).

Ante esta realidad no sólo es inapropiado utilizar valores fijos de deformabilidad y resistencia para modelizar fábricas pétreas antiguas de arquitecturas construidas en épocas y lugares diferentes, sino que tampoco es rigurosa la utilización de los mismos rangos de variabilidad para todas las fábricas de un mismo monumento histórico.

El actualmente extendido análisis estructural por medio de la aplicación del Método de Elementos Finitos —MEF— introdujo acertadamente hace algunos años estudios de

1. INTRODUCTION

The physical-chemical, rheological and mechanical heterogeneity of ancient stone masonry is in itself a sizeable obstacle to sufficiently rigorous modelling of the fundamental characteristics of such buildings in the context of structural behaviour analysis (1). Standard masonry concepts such as characteristic strength and deformability cannot be applied to stone due to its natural heterogeneity, for even when all the stones used to build a given member are taken from the same quarry, their characteristics vary. Moreover, stone masonry structures erected with old mortar are particularly heterogeneous because they preceded the modern concept of a standard mix by several centuries.

And a further element, not hitherto analyzed, that adds to the heterogeneity of Medieval construction has recently come to light: the existence in a given cathedral of variations, from one structural member to another, in mortar thickness in the joints and joint thickness: stone size ratios. An analysis of the characteristics of the stone masonry in Spanish Gothic cathedrals has revealed a wide range not only of type of bond but also of lime mortar thickness in joints.

Medieval master builders used different types of stones and joint mortar thicknesses in the structural members of cathedrals to meet differing demands in terms not only of mechanical strength, but also of deformability —adaptability—, despite their unawareness of such concepts. They built vault severies with comparatively lightweight stone —small, fairly thin (17 to 23 cm) rough-hewn ashlar— and a very thick layer of lime mortar in the joints (2 to 3.3 cm). The result was lightweight —reducing thrust— and highly adaptable structures. Vault ribs, flying buttresses, piers and buttresses, however, were usually built with thinner mortar joints (0.8 to 2 cm) (Figure 1).

In light of these observations, the use of fixed deformability and strength values to model ancient stone masonry structures built in different ages and places is obviously inappropriate: but the accuracy of applying the same range of variability to all the masonry in a given historic monument is no less questionable.

Some years ago, the now widely used finite element method (FEM) of structural analysis rightly introduced studies "sensitive" to variations in two fundamental parameters



Figura 1. Bóveda de la catedral de Sevilla. Plamentos y nervaduras. Diferentes espesores de juntas de mortero en sus fábricas.
Figure 1. Vault in Seville Cathedral. Severy and rib masonry with different mortar joint thicknesses.

“sensibilidad” a la variación de los parámetros fundamentales; resistencia y deformabilidad (2), pero el rango de variabilidad posible de estos parámetros en las diferentes arquitecturas antiguas construidas con fábricas pétreas continúa siendo una incógnita que demanda la proliferación de ensayos específicos que contribuyan a perfilar el conocimiento de dichos rangos para completar con suficiente rigor los análisis estructurales de sensibilidad paramétrica.

Dado que hasta la fecha no se han realizado análisis experimentales sobre la influencia del espesor de la junta de mortero en la deformabilidad de las fábricas pétreas antiguas, realizamos en el laboratorio central de INTEMAC un plan de ensayos experimentales, cuyo objetivo fue conocer el alcance de dicha influencia, cuantificando posibles rangos de variabilidad del módulo de deformación.

2. PARTE EXPERIMENTAL

Plan de ensayos: se desarrolló un plan de ensayos para establecer el posible rango de variabilidad de los parámetros fundamentales —resistencia y deformabilidad— de una fábrica medieval, en función de la variabilidad del espesor de las juntas de mortero de cal.

La dificultad de llevar a cabo el objetivo previsto era la necesidad de reproducir en laboratorio piezas de fábrica de “características medievales” para que los resultados de los ensayos experimentales fueran razonablemente representativos de su comportamiento estructural. Por esta razón se realizaron análisis previos de caracterización de la piedra y el mortero de cal*, seleccionando los existentes en las catedrales de León y Sevilla.

Posteriormente, se fabricaron en el laboratorio 7 piezas de fábrica formadas por tres sillares de dimensiones

such as strength and deformability (2). The range of possible variation in these parameters in ancient stone masonry, however, continues to be poorly understood, necessitating the proliferation of specific tests to determine such variations with a view to sufficiently rigorous parametric sensitivity analyses.

Inasmuch as the effect of joint thickness on the deformability of old stone masonry has not been analyzed to date, an experimental test programme was conducted at the INTEMAC central laboratory to determine the extent of that effect and the possible range of the modulus of deformation.

2. EXPERIMENTAL PART

Test programme: a test programme was designed to establish the possible range of variation in two fundamental parameters, strength and deformability, in Medieval masonry depending on the thickness of the lime mortar joints.

The challenge in designing the experimental procedure was the need to build laboratory samples whose structural behaviour was reasonably representative of the behaviour of Medieval masonry. For this reason, prior analyses were conducted to characterize the stone and lime mortar in samples taken from Leon and Seville cathedrals.*

The seven masonry structures subsequently built in the laboratory consisted of three stone ashlars measuring

145 x 96 x 93 mm, con juntas de mortero de cal de 5, 10 y 17 mm de espesor. Transcurridos 331 días se realizaron dos tipos diferentes de ensayos; uno a rotura bajo compresión simple de cuatro piezas de fábrica diseñadas para determinar el efecto del espesor de la junta de mortero en el comportamiento estructural de la fábrica, y un ensayo bajo carga axial sobre tres piezas de fábrica con ángulos de 5°, 10° y 20° con el eje vertical, para determinar los desplazamientos en función del ángulo de aplicación de la resultante de la bóveda sobre los arbotantes.

Análisis y ensayos previos: selección y caracterización del tipo de piedra y mortero de cal para ser utilizados en la fabricación de piezas de ensayo representativas de una fábrica medieval.

La piedra: la construcción medieval se ejecutó en España con una enorme variedad de tipos de piedra, desde las más resistentes como es el caso del granito de las fábricas de la catedral de Tuy, a las más blandas y alterables como la arenisca de la catedral de Sevilla. Si bien predominó la utilización de piedras de resistencias mecánicas medias como son las diferentes calizas existentes en la mayor parte de la península. Por esta razón se seleccionó la piedra caliza de Boñar con la que fue construida la catedral de León, ya que además su cantera permanece actualmente en funcionamiento.

Se consideró innecesario la realización de los mismos ensayos experimentales con todos y cada uno de los tipos de piedras existentes para alcanzar el objetivo previsto —*reproducir con el mayor rigor posible una fábrica pétreo medieval para conocer la influencia del espesor de la junta de mortero en su deformabilidad*—, ya que aunque con cada tipo de piedra se obtendrían rangos diferentes de variabilidad de resistencia y deformabilidad, cualitativamente es suficientemente representativo cuantificar un caso concreto para determinar la importancia de considerar este aspecto en la modelización de un monumento concreto para su análisis estructural.

Los sillares de caliza de Boñar se sometieron a un análisis mineralógico y se ensayaron para determinar sus

145 x 96 x 93 mm, bonded with lime mortar joints 5, 10 and 17 mm thick. After 331 days, two different types of tests were conducted: a compression test on four of the structures to determine the effect of mortar joint thickness on the structural behaviour of the masonry; and an axial loading test on the other three structures, conducted at 5°, 10° and 20° angles to the vertical axis to determine how displacement is affected by the angle of the force exerted by the vault resultant on the flying buttresses.

Prior analyses and tests: selection and characterization of stone type and lime mortar to be used to build the test structures representing medieval masonry.

Stone: Medieval builders in Spain drew from a wide variety of stone types, ranging from the hardest such as the granite in Tuy cathedral to the softest and most readily altered such as the sandstone in Seville cathedral. The most prevalent type, however, was stone of intermediate strength such as the limestone available across most of the peninsula. For this reason and because the original quarry is still in operation, the Boñar limestone used to build Leon cathedral was chosen for the present study.

It was felt that the objective pursued: namely, to replicate a Medieval masonry structure with the maximum rigour to ascertain the effect of the mortar thickness in its joints on deformability, could be attained without having to conduct all the tests on all the existing stone types. Although each type of stone would generate different ranges of strength and deformability values, one specific case was regarded to suffice for the intents and purposes of a qualitative analysis designed to determine the importance of including this feature in the analytical models developed for specific monuments.

Boñar limestone was tested for flexural strength as per Spanish standard UNE 22.185 (Table 1) and compressive

Tabla 1 / Table 1
Resistencia a flexión de la piedra (UNE 22.185)
Stone flexural strength (UNE 22185)

Resistencia a flexión N/mm ² Muestras <i>Flexural strength N/mm² Sample</i>	A	B	C	D
Probeta 1 / <i>Sample 1</i>	5,0	7,0	9,3	5,0
Probeta 2 / <i>Sample 2</i>	4,7	8,3	9,0	5,8
Probeta 3 / <i>Sample 3</i>	5,3	9,2	9,1	5,3
Módulo de Rotura (valor medio) / <i>Modulus of rupture (mean)</i>	5,0	8,2	9,1	5,4

Tabla 2 / Table 2
Resistencia a compresión de la piedra (UNE 22.186)
Stone compressive strength (UNE 22186)

Resistencia a compresión N/mm ² <i>Compressive strength N/mm²</i>	Muestras ensayadas <i>Sample</i>
89.70	A
79.50	B
78.20	C
66.10	D

características físico-mecánicas. Se realizaron ensayos de resistencia a flexión según UNE 22.185 (Tabla 1), resistencia a compresión según UNE 22.186 (Tabla 2) y análisis mineralógico, mediante estudio microscópico del material en lámina delgada.

Según el análisis mineralógico, las cuatro muestras de piedra ensayadas correspondían a la clasificación de dolomía, una roca relativamente homogénea constituida por dos tipos de texturas diferentes, una micrítica masiva y otra más cristalina (cristales 10-20 micras) con restos de peloides y algunos fósiles foraminíferos y pelecípodos. La porosidad microcristalina era muy baja (menor de 1%) por estar los poros generalmente ocupados por cemento calcítico. En la muestra D predominaba la textura cristalina y existían abundantes fracturas rellenas de material arcilloferroso. La natural heterogeneidad de la piedra demostró una vez más que no existen dos piezas absolutamente idénticas, razón por la que se obtuvieron diferentes resultados en los ensayos tanto a flexión como a compresión.

El mortero de cal: una vez seleccionada, caracterizada y ensayada la piedra, el mayor problema para poder construir fábricas pétreas semejantes a las medievales era fabricar un tipo de mortero de cal que reuniera todas las características mecánicas y físico-químicas de los utilizados por los maestros góticos en la construcción de las catedrales. Tal y como se deduce de los antiguos manuscritos y recientes trabajos publicados, sólo se conocen los componentes de la mezcla de morteros medievales, pero no la dosificación exacta en la que intervinieron cada uno de ellos; agua, cal y arena. Por esta razón, era necesario realizar una toma de muestras del mortero de juntas de una catedral gótica, y analizarla para poder, posteriormente, reproducir en el laboratorio un mortero de características medievales con el que construir las fábricas para los ensayos previstos. Se seleccionó la catedral de Sevilla porque existen datos históricos de los que se puede deducir la posible existencia de fábricas medievales que no han sufrido restauraciones, mientras que en otras catedrales como la de León es difícil poder encontrar fábricas en las que el mortero de cal sea el primitivo, ya que esta catedral ha sido restaurada constantemente a lo largo de su historia.

strength as per Spanish standard UNE 22.186 (Table 2). A microscopic study of a thin layer of the stone was conducted to determine its mineralogy.

According to the mineralogical findings, the four stone samples analyzed comprised dolomite, a relatively uniform rock characterized by two different textures, a micrite mass and a more crystalline component with remains of polodite and occasional foraminifer and pelecypod fossils. Their microcrystalline porosity was found to be low (under 1%) because the pores were generally clogged with lime cement. The prevailing texture in sample D was crystalline and the many fractures on its surface were filled with a ferrous clay material. The natural heterogeneity of the material provided further evidence that no two pieces of stone are identical, which would explain the differences in the flexural and compressive strength findings.

Lime mortar: *after selecting, characterizing and testing the stone, the next step in replicating Medieval stone masonry was the definition of a lime-based mortar with all the mechanical, physical and chemical properties of the mortars used by Gothic builders in cathedrals. While old manuscripts and recently published works contain descriptions of the components of Medieval mortar—water, lime and sand—, information on the exact dosage has been lost to history. Consequently, the joints on at least one Gothic cathedral had to be sampled and analyzed to produce laboratory mortar of the same characteristics for use in the construction of test masonry. Seville cathedral was chosen for such sampling, because historical records have been kept from which it may be deduced that certain parts of its medieval masonry may have gone untouched. By contrast, in Leon cathedral, original lime mortar is difficult to find, for the structure has been routinely restored throughout its history.*

Se tomaron 7 muestras M del mortero de la catedral de Sevilla en las zonas bajas del muro interior del triforio, así como de las partes altas del muro exterior. Se ensayaron determinando su composición volumétrica, y no sus resistencias mecánicas dada la necesidad de extraer para ello una gran cuantía de material y en determinadas condiciones de compacidad difíciles de obtener sin causar deterioro en las fábricas medievales.

La determinación de su composición volumétrica se realizó mediante tratamiento con ácido clorhídrico (1+5). Previamente fueron molturadas y tamizadas hasta tamaño inferior a 2,5 mm y posteriormente deshidratadas a 600 °C durante 4 horas. Los resultados confirmaron la existencia de mayor proporción de cal que de arena en los morteros medievales, al contrario que en los morteros de cal empleados hoy en día y recogidos en las actuales normativas vigentes, en los que pasando de 1:1 las dosificaciones empleadas contienen mayor proporción de arena que de cal. Esto es debido a que las cales actuales son más hidráulicas y resistentes que las medievales, que son extremadamente heterogéneas, poco hidráulicas y de grano no uniforme. Las cales medievales se obtenían de las piedras calizas procedentes de la misma cantera de la que se extraían los sillares para construir las fábricas de la catedral, por esta razón en España existe una enorme variedad de tipos de cales medievales. Pero con independencia de su calidad, todas sufrían el mismo proceso de fabricación artesanal del cual resultaban cales poco homogéneas (3). Los resultados de los ensayos demostraron la existencia de dosificaciones variables según la procedencia de las muestras ensayadas: 2:1, 3:1 y 4:1, siendo la media 3:1.

En base a los datos obtenidos acerca de los morteros medievales, solicitamos una cal de las características encontradas —no existente en el mercado actual— para poder fabricar en el laboratorio morteros de dosificaciones: 1:1, 1:2, 1:3, 2:1, 3:1 y 4:1. Estos morteros se ensayaron a compresión con la finalidad de determinar las diferencias de su carbonatación y endurecimiento, y poder seleccionar el más apropiado para la construcción de las piezas de fábrica con la piedra de Boñar. Tras este proceso analítico se determinó la combinación de parámetros que mejor reproducía el comportamiento mecánico de una fábrica medieval.

Dada la inexistencia a nivel mundial de normativas específicas para ensayos de morteros antiguos (4), se fabricaron probetas de 4 x 4 x 16 cm aplicando la normativa española vigente para morteros de cal actual para la determinación de la resistencia a compresión de cada uno de los tipos de mortero. Las probetas se rompieron después de 32 días en lugar de a los 28 días prescritos en la norma para darle más tiempo de secada al aire y compensar la escasa hidráulicidad del material (Tabla 3).

The seven mortar samples taken from Seville cathedral were removed from the lower transept walls and upper portions of the exterior wall. While these samples were tested to determine the dosage used, mechanical strength was not determined, for the amount of compact material needed for such testing could not have been obtained without damaging the Medieval masonry.

To find the lime:sand ratio of the mortar the samples were ground to a particle size of 2.5 mm, dissolved in hydrochloric acid (1+5) and subsequently desiccated for four hours at 600 °C. The results obtained confirmed that more lime than sand was used in Medieval mortar, unlike present practice and the specifications set out in the existing standards, which call either for equal amounts of the two components, or more sand than lime. The reason for this difference is the greater hydraulicity and strength of today's lime compared to the Medieval variety, which in addition to being extremely heterogeneous and scantily hydraulic had a non-uniform particle size. Since medieval lime was obtained from the limestone taken from the same quarry as the stone used to build cathedrals, there is a large variety of medieval limes in Spain. Moreover, since all medieval limes were made by hand, regardless of their quality, they could hardly be expected to be homogeneous (3). The results of the tests run on the samples showed that the lime:sand ratios used were 2:1, 3:1 and 4:1, for an average of 3:1.

On the grounds of the information obtained on Medieval mortar, a lime with these properties —which naturally does not exist on the market— was special-ordered to make lime mortars in the laboratory with the following lime:sand ratios: 1:1, 1:2, 1:3, 2:1, 3:1 and 4:1. These mortars were compression tested for carbonation and hardening and the most suitable type selected for building sample structures with Boñar limestone. The results of this analysis were used to determine the combination of parameters best able to reproduce the mechanical behaviour of Medieval masonry.

Since there are no codes in place anywhere in the world for testing centuries-old mortars (4), the procedures set out in existing Spanish standards for determining the compressive strength of modern mortars were used to test the 4 x 4 x 16-cm specimens made from the above types of mortar. The specimens were tested 32 instead of the regulatory 28 days after casting. The extra drying time was intended to compensate for the scant hydraulicity of the material (Table 3).

De los seis tipos de mortero ensayados, los que contenían mayor cantidad de cal, es decir los morteros presumiblemente medievales, resultaron tener menor resistencia a compresión pese a que todos se ensayaron tras el mismo periodo de curado y endurecimiento al aire. Sin embargo es importante tener presente que estos resultados no significan que estos morteros sea realmente menos resistentes a lo largo de su vida útil. Lo que indican es que necesitan más tiempo para carbonatarse, ya que la capa superficial endurecida (carbonatada) forma una costra menos permeable al aire que la superficie expuesta al desmoldar las probetas.

Por otra parte, las resistencias a compresión obtenidas en las probetas realizadas con diferentes dosificaciones de cal, prácticamente se igualan a partir de las proporciones 1:2 y 2:1 con sus inmediatas superiores. Este hecho confirma que una de las razones por las cuales las normativas vigentes contemplan un estrecho rango de dosificaciones de morteros de cal que van de 1:1 a 1:3, mientras que para morteros de cemento el rango aumenta de 1:1 a 1:8. Cuanta más cantidad de cal existe en la mezcla, más tiempo necesita el mortero para endurecer y alcanzar así la resistencia correspondiente a su total carbonatación. El problema es que las fábricas medievales de un monumento concreto cuentan con grandes espesores, sufren cambios importantes de humedad relativa, existen diferencias de aireación entre el interior y el exterior, y en algunos elementos estructurales las juntas de mortero son muy estrechas. Por esta razón Robert Mark (5) sostiene que existe la posibilidad de que las fábricas de muchas catedrales góticas pueden no haber alcanzado todavía su resistencia mecánica máxima, pese a haber transcurrido varios siglos desde su construcción. Sin embargo, los morteros fabricados con alto contenido de cal pueden ser más resistentes que los que se obtienen utilizando menores cantidades de cal, pese a que sea de mala calidad, como es el caso de las medievales, y pese a que necesiten más tiempo de aireación. En efecto, aunque

Of the six mortars tested, the ones containing higher quantities of lime, i.e., the presumably "Medieval" mortars, showed lower compressive strength, even though the curing and hardening time was the same for all specimens. Be it said, however, that the above results do not necessarily mean that such mortars are actually weaker throughout their service life. Rather, it means that carbonation takes longer, for their hardened (carbonated) outer layer forms a crust less permeable to air than the surface exposed after the specimens are demoulded.

Moreover, beginning with the specimens whose lime:sand ratios were 1:2 and 2:1, the compressive strength obtained was found to be practically the same for the specimen in question and the one with the next higher ratio. This justifies the narrow range for lime mortar dosage specified in the existing regulations, namely 1:1 to 1:3, which contrasts with the much broader range provided for cement mortars, 1:1 to 1:8. The higher the lime content in the mix, the more time is needed for the mortar to harden and reach the strength corresponding to total carbonation. In Medieval monuments, this process is impacted by the thickness of masonry structures, wide fluctuations in relative humidity to which they are exposed, differences in inside and outside air circulation and overly narrow mortar joints in some structural members. This led Robert Mark (5) to sustain that despite the centuries that have lapsed, much of the masonry in Gothic cathedrals may not yet have reached its maximum mechanical strength. Nonetheless, mortars made with a high lime content may be stronger than mortars with less lime in their composition, even when the lime is of low quality such as in medieval mortars and has to be aired for longer periods of time. Total carbonation is not in fact reached for many centuries, in a process that ultimately turns the lime/sand mix into a new material

Tabla 3 / Table 3
 Resistencia a compresión de morteros
Mortar compressive strength

Tipo de Mortero / <i>Mortar type</i> Cal y arena / <i>Lime and sand</i>	Resistencia a Compresión (32 días) / <i>Compressive strength (32 days)</i>		
	valor medio N/mm ² <i>mean (N/mm²)</i>	Desv. Estándar—Coef. Variación <i>Std Dev. Variance</i>	
1:1	0,9	0,06	(7%)
1:2	0,8	0,07	(9%)
1:3	0,8	0,11	(14%)
2:1*	0,7	0,04	(6%)
3:1*	0,5	0,09	(18%)
4:1*	0,4	0,13	(31%)

* Morteros medievales / *Medieval mortar.*

la carbonatación total se produzca al cabo de muchos siglos, este proceso de endurecimiento del mortero termina por convertir la mezcla de cal y arena en un nuevo material similar a la piedra natural. Este hecho genera en las fábricas pétreas un incremento considerable de resistencia y continuidad frente a la transmisión de cargas y estabilidad del conjunto de la catedral.

Dado que la "esbeltez" en un mortero es un factor básico para su comportamiento resistente, así como para su deformabilidad, el hecho de que la resistencia máxima obtenida sea de $0,9 \text{ N/mm}^2$ en probetas de $4 \times 4 \times 16 \text{ cm}$, no significa que el mismo mortero en juntas de 1, 2 o 3 cm no sea capaz de transmitir cargas de hasta 9 N/mm^2 , trabajando como una lámina elástica.

En base a los resultados obtenidos en estos ensayos previos, a las dimensiones de las probetas que se iban a fabricar en el laboratorio y al tiempo que iba a transcurrir desde su fabricación hasta su ensayo (1 año), se seleccionó un mortero de cal de dosificación 1:1, fabricado con la misma cal de mala calidad utilizada en las probetas anteriormente ensayadas. No se seleccionó un mortero de mayor contenido de cal porque el objetivo era utilizar el tipo de mortero de cal que mejor pudiera representar el comportamiento estructural de un mortero medieval tras varios siglos de proceso de carbonatación. Se consideró que el mortero de dosificación media 3:1 encontrado en las fábricas medievales de la catedral de Sevilla no podía ser usado para la fabricación de las piezas para ensayos en el laboratorio dado que el tiempo que transcurriría sería sólo de un año. Se estableció una posible correlación entre los parámetros "espesor de juntas, dosificación del mortero de cal y tiempo de envejecimiento de la pieza", considerando la más apropiada: 5,50 a 17,00 mm de espesores de juntas, 1:1 de dosificación de mortero de cal y 1 año de tiempo de envejecimiento de la pieza para ensayar.

Ensayos de fábricas: una vez realizados los análisis y ensayos previos de la piedra y el mortero de cal, se procedió a la fabricación en laboratorio de las 7 piezas de fábrica previstas. Se construyeron con sillares de piedra de Boñar de dimensiones $145 \times 96 \times 93 \text{ mm}$, con mortero de cal 1:1 y diferentes espesores de junta: 5,50 mm (pieza B) - 10,00 mm (pieza C) - 10,50 mm (piezas C' y B') - 11,00 mm (piezas A y A') - 17,00 mm (pieza D). Se realizaron dos tipos diferentes de ensayos a rotura con las piezas de fábrica: compresión simple (4 piezas) (Tabla 4), y bajo carga axil a 5° , 10° y 20° con el eje vertical de la pieza (3 piezas) (Tabla 5). Con los ensayos a compresión simple se pretendía conocer la influencia del espesor de la junta en el comportamiento de la fábrica (Figura 2), y con los ensayos realizados bajo carga axil, determinar los desplazamientos en función del ángulo de aplicación de la carga, simulando la situación de la resultante de la bóveda sobre el arbotante (Figura 3).

similar to natural stone, considerably enhancing cathedral strength, loading continuity and stability.

Since slenderness is a basic factor in mortar strength and deformability, the fact that maximum compressive strength is attained at 0.9 N/mm^2 in $4 \times 4 \times 16\text{-cm}$ specimens does not mean that the same mortar in 1-, 2- or 3 -cm thick joints, where it would behave like an elastic shell, would be unable to transmit loads of up to 9 N/mm^2 .

The dimensions and age (one year) of the laboratory specimens were based on the results of this preliminary analysis; a 1:1 lime:sand ratio was used in the mortar, which was made with the same poor quality lime as in the mortar samples tested. A higher proportion of lime was not chosen because the aim was to use the type of mortar which would best represent the structural behaviour of Medieval masonry after several centuries of carbonation. It was felt that a lime mortar with a ratio of 3:1—such as found in Seville cathedral— would not be suitable for the laboratory specimens because only one year would have lapsed before testing. Correlation studies for the parameters "joint thickness, lime:sand ratio and ageing time" showed that the optimal values were: joint thickness, 5.50 to 17.00 mm; lime:sand ratio, 1:1; and ageing time, 1 year.

Masonry tests: after the above analyses and tests were completed, the seven laboratory masonry samples were built with Boñar quarry stone measuring $145 \times 96 \times 93 \text{ cm}$, a lime mortar with a lime:sand ratio of 1:1 and the following joint thicknesses: 5.50 mm (sample B); 10.00 mm (sample C); 10.50 mm (samples C' and B'); 11.00 mm (samples A and A'); and 17.00 mm (sample D). These masonry samples were tested to failure to determine both compressive strength (4 samples in all, Table 4) and ultimate axial loading at 5° , 10° and 20° angles to the vertical axis of the sample (3 samples in all, Table 5). The compression tests were designed to determine the effect of joint thickness on sample structural performance (Figure 2), while the axial loading tests were conducted to ascertain displacement at different angles to simulate the action exerted by the resultant on the flying buttresses (Figure 3).

3. RESULTADOS E INTERPRETACIÓN

Los resultados obtenidos demuestran la gran influencia que tiene el espesor de juntas de mortero de cal en el comportamiento estructural de las fábricas pétreas, incidiendo directamente en la variabilidad de sus parámetros fundamentales: deformabilidad y resistencia. En efecto, los ensayos de fábricas se realizaron variando el espesor del mortero de sus juntas hasta un 200% (de 5,50 mm a 17,00 mm), produciéndose un descenso del módulo de elasticidad del 97% (de 5.632,7 N/mm² a 169,70 N/mm²) y de la resistencia a compresión del 26% (de 22,5 N/mm² a 16,6 N/mm²). Estos resultados demuestran que el espesor del mortero de juntas influye más en la deformabilidad de la fábrica que en su resistencia.

La pieza B que corresponde al mínimo espesor de junta ensayada —5,50 mm— rompió a una tensión de

3. RESULTS AND INTERPRETATION

The results obtained revealed that lime mortar joint thickness has a significant effect on the structural behaviour of stone masonry and a direct impact on the variability of such fundamental parameters as deformability and strength. The masonry tests were conducted on samples with joint thicknesses that varied by up to 200% (from 5.50 mm to 17.00 mm), resulting in differences of up to 97% in the modulus of deformation (from 5,632.7 N/mm² to 169.70 N/mm²) and 26% in compressive strength (from 22.5 N/mm² to 16.6 N/mm²). Further to these findings, mortar thickness affects deformability more intensely than strength in stone masonry.

Sample B, which had the thinnest joint tested (5.50 mm), failed under a compressive stress of 22.50 N/mm²,

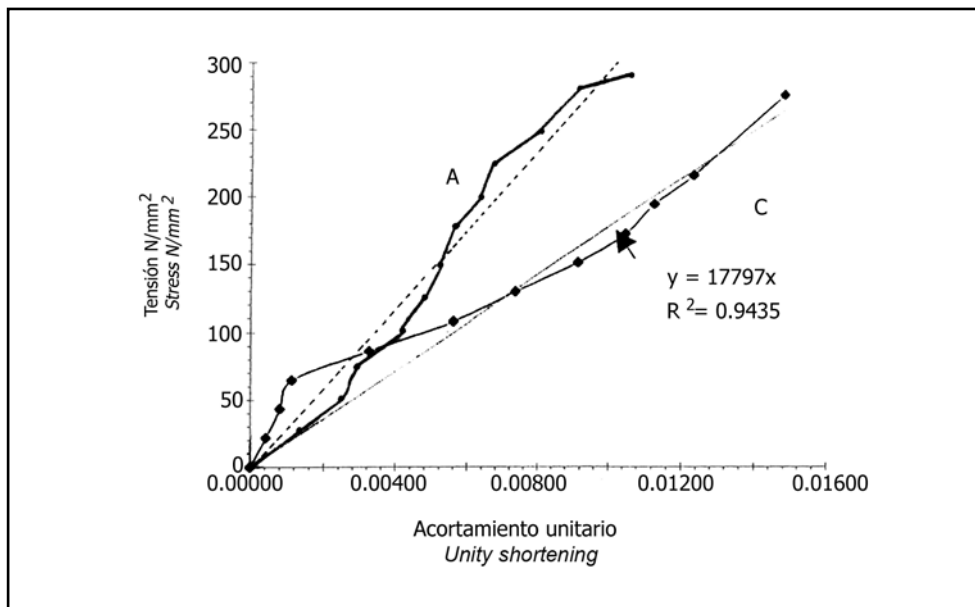


Figura 2. Gráfico Tensión Deformación: Pieza C con 10,00 mm de espesor de juntas de mortero, Pieza A con 11,00 mm de espesor de mortero de juntas.

Figure 2. Stress-strain curve: sample C, with 10.00-mm mortar joints; sample A with 11.00-mm mortar joints.

Tabla 4 / Table 4

Piezas de fábrica a compresión simple
Masonry compressive strength

Pieza / Sample	Edad / Age días / days	Espesor juntas mm Join thickness mm	Tensión de rotura N/mm ² Ult. strength N/mm ²	Módulo de deformación N/mm ² Mod. of deformation N/mm ²
A	331	11,00	28,90	2.900,60
C	290	10,00	27,50	1.779,40
B	212	5,50	22,50	5.632,70
D	216	17,00	16,60	169,70

Tabla 5 / Table 5
Piezas de fábrica a compresión y esfuerzo tangencial en junta
Masonry compressive strength and shear stress on joints

Pieza <i>Sample</i>	Edad días <i>Age days</i>	Espesor juntas mm <i>Joint thickness mm</i>	Angulo esf. axil directriz pieza <i>Loading ang. To vert. axis</i>	T max. deslizamiento <i>Max. sl. stress</i>	T. max compresión <i>Max. cmp. strength</i>
				Tangencial / <i>Tangential</i>	Normal / <i>Normal</i>
A	331	11,00	10°	1,80 (D y R)	22,90
C	331	10,50	20°	2,30 (D)	25,30
B	331	10,50	5°	1,30 (R)	14,50

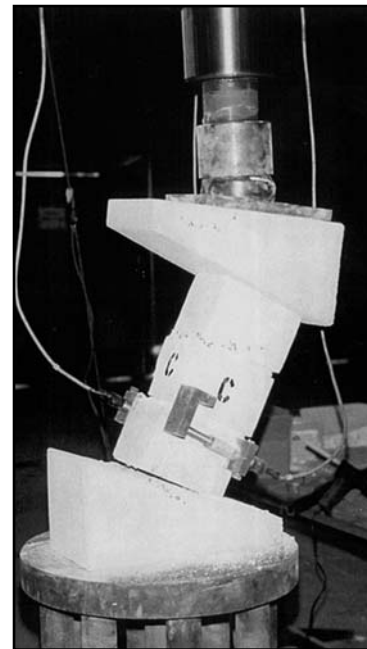
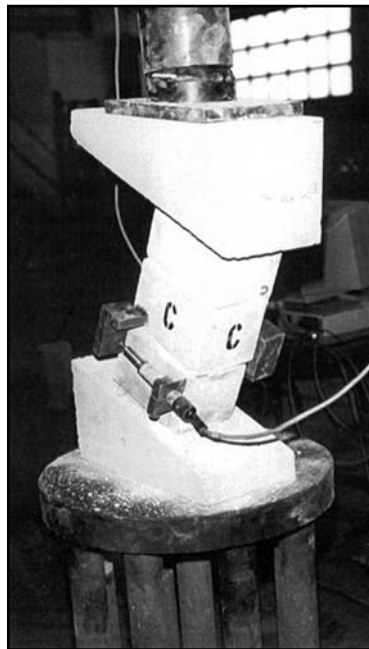


Figura 3. Ensayos de fábricas a compresión simple y carga axil a 5°, 10° y 20° con el eje vertical.
Figure 3. Masonry sample testing. Compression and axial loading at 5°, 10° and 20° to the vertical axis.

compresión simple de 22,50 N/mm², resultando un módulo de elasticidad de 5.632,70 N/mm², mientras que la pieza D que corresponde al máximo espesor de junta ensayada —17,00 mm—, rompió a una tensión de compresión simple de 16,60 N/mm², resultando un módulo de elasticidad de 169,70 N/mm². Las piezas A y C corresponden a espesores sensiblemente iguales (10 y 11 mm) cuyo ensayo se realizó tras un periodo mayor de tiempo alcanzando por ello mayor resistencia. Por otra parte, las piezas sometidas a compresión y esfuerzo tangencial en la junta presentaron un comportamiento diferente en función del espesor de junta, y al ángulo formado entre el esfuerzo axil y la directriz de la pieza. La pieza A de espesor de juntas 11,0 mm y ángulo 10° alcanzó una tensión de rotura tangencial o máxima hasta deslizamiento de 1,80 N/mm² y normal de 10,00 N/mm², resultando una resistencia máxima a compresión simple de

for a modulus of elasticity of 5,632.70 N/mm², while sample D, with the thickest joint tested (17.00 mm), broke under compression at 16.60 N/mm², for a modulus of elasticity of 169.70 N/mm². Samples A and C, with similar thicknesses (10 and 11 mm) and tested after a longer period of time, were found to be stronger. The performance of the samples tested for compressive and shear strength at the joint also varied with joint thickness and the angle between the axial load and the vertical axis of the sample. The ultimate shear stress found for sample A with a joint thickness of 11.00 and an angle of 10° was 1.80 N/mm², while the ultimate stress normal to the specimen was 10.00 N/mm² and the compressive strength was 22.90 N/mm². Sample C, in turn, with a 10.50-mm joint, exhibited an ultimate shear stress at a 20° angle of 2.30 N/mm², ultimate stress normal to the sample of 6.20 N/mm² and an ultimate compressive

22,90 N/mm², mientras que la pieza C' con 10,50 mm de espesor de junta y 20° de ángulo, alcanzó una tensión de rotura tangencial o máxima hasta desplazamiento de 2,30 N/mm² y normal de 6,20 N/mm², resultando una resistencia máxima a compresión de 25,30 N/mm². Los resultados prueban que tanto en el caso de incrementar el espesor de junta y disminuir el ángulo (A') como en el caso de disminuir el ángulo manteniendo el mismo espesor de junta (B') la resistencia disminuye. Por ello cuanto mayor componente horizontal (empuje) tiene la resultante de la bóveda y mayor espesor de junta, el contrafuerte tiene menor resistencia en la zona de aplicación de dicha fuerza.

A la vista de estos resultados podemos afirmar que cualitativamente, a medida que se incrementa el espesor de la junta de mortero de cal, el módulo de elasticidad de la fábrica pétreas disminuye, haciéndola mucho más deformable y algo menos resistente. Este hecho tiene una enorme relevancia para entender un nuevo aspecto sobre la indiscutible racionalidad con la que los maestros medievales construyeron las catedrales góticas, ya que utilizaron diferentes espesores de juntas de mortero en cada elemento estructural, dotándolos así de mayor o menor rigidez en función de sus necesidades mecánicas. Pero además de utilizar diferentes espesores de juntas de mortero, los maestros medievales construyeron las fábricas pétreas variando la relación entre el canto del sillar (C) y el espesor del mortero de juntas (e), hecho que influye en su deformabilidad.

Estas relaciones C/e de las fábricas medievales, unidas a los resultados de los ensayos experimentales realizados, demuestran que los maestros medievales optimizaron las características físicas y mecánicas de los diferentes elementos de fábrica, haciéndolos más o menos rígidos en función de su destino estructural dentro del conjunto de la catedral. Por ello construyeron los plementos de las bóvedas muy deformables ejecutándolos con amplios espesores de juntas mortero y mayor número de juntas (C/e 15 a 6), mientras que en las nervaduras, los arbotantes y los estribos utilizaron mayores relaciones C/e y menores espesores de juntas de mortero haciéndolos más rígidos (Tabla 6).

El control del grado de deformabilidad con el que fueron construidas las fábricas medievales de la catedral gótica responde a un patrón de comportamiento estructural que podríamos denominar "bóveda débil-pilar fuerte" similar al que actualmente conocemos como "viga débil-pilar fuerte". Patrón estructural apropiado para garantizar la estabilidad de la arquitectura de fábrica frente a las fuerzas dinámicas que produce un terremoto. Este hecho confirma la racionalidad sísmica con la que fueron construidas las catedrales góticas (6). Queda comprobada la necesidad de incluir en el modelo de análisis estructural

strength of 25.30 N/mm². These results prove that strength declines when the angle decreased, regardless of whether joint thickness is increased (A') or remains constant (B'). Consequently, the greater the horizontal component (thrust) of the force exerted by the vault resultant and the thicker the joint, the smaller is the strength in the buttress at the point where the force is applied.

In light of these results, it may be sustained that as the thickness of the lime mortar in the joint grows, the modulus of deformation of the stone masonry declines, rendering the structure much more deformable and slightly weaker. This fact is of enormous relevance to understanding the newly discovered rationale indisputably deployed by medieval master builders when erecting gothic cathedrals: different joint thicknesses were used on structural members to make them more or less rigid, depending on the mechanical demands involved. In addition to using different mortar thicknesses in joints, master builders also controlled deformability by varying the ratio between stone depth (C) and joint thickness (e).

The (C/e) ratios, in combination with the test results, reveal that medieval masters optimized the physical and mechanical properties of the various masonry members to make them more or less rigid depending on their structural purpose in the cathedral as a whole. This would explain the large number of thick joints in vault severies (C/e 15 to 6), and the higher ratios and thinner mortar found in vault ribs, flying buttresses and buttresses, where greater rigidity was sought (Table 6).

In gothic cathedrals, the degree of masonry deformability was controlled by means of a structural pattern that may be described as a "strong buttress/weak severy" arrangement, comparable to what is now known as "strong column/weak beam" design. The effectiveness of this structural pattern in ensuring the stability of masonry architecture in the event of an earthquake would confirm the seismic rationale underlying the construction of gothic cathedrals (6). The foregoing stands as proof of the need to include specific parametric studies in structural analysis models for medieval stonework, which should

Tabla 6 / Table 6
 Relaciones: Canto Sillar / Espesor Junta de Mortero
Stone depth / Mortar joint thickness ratios

Elemento estructura <i>Structural member</i>	C/e <i>C/e</i>
Plemento de Bóvedas de crucería / <i>Vault severly</i>	15 a 6
Pilares / <i>Pier</i>	20 a 15
Nervaduras Formeras / <i>Formeret rib</i>	80 a 20
Nervaduras Fajonas / <i>Transverse rib</i>	80 a 20
Arbotantes / <i>Flying buttress</i>	80 a 20
Contrafuertes / <i>Buttress</i>	80 a 20

de las fábricas pétreas medievales un estudio paramétrico específico que recoja los de rangos de variabilidad de su deformabilidad y resistencia en función de sus diferentes espesores de mortero de juntas. Los rangos de variabilidad de estos parámetros fundamentales serán diferentes en cada monumento concreto, y su inclusión en el modelo analítico producirá un mayor conocimiento de su comportamiento estructural.

La investigación realizada confirma finalmente que tal y como señaló Eduardo Torroja (7), es importante no olvidar que el comportamiento estructural de una fábrica pétreo depende en gran medida de las juntas que se ejecuten.

accommodate the variation in deformability and strength with changes in joint mortar thickness. Inasmuch as the range of variation of these fundamental parameters differs from one monument to the next, the inclusion of this information in analytical models will enhance the understanding of structural behaviour.

This survey also confirms Eduardo Torroja's (7) observation to the effect that the structural behaviour of stone-work masonry depends largely on the joint thickness used.

BIBLIOGRAFÍA / BIBLIOGRAPHY

- (1) Cassinello, M. Josefa: "Bóvedas góticas: problemática de la modelización de su realidad constructiva". *Actas del I Congreso Europeo de Restauración de Catedrales Góticas*, Edición Diputación Floral de Álava Departamento de Obras Públicas y Urbanismo, 1998, pp. 389-392.
- (2) INTEMAC archivo. Módulos de deformación: Torre de Pisa (2.900 a 40.400 N/mm²), Santa Sofía Estambul (200 N/mm²), Torre de Pavia (4.080 N/mm²), Duomo de Florencia (5.000 a 10.500 N/mm²).
- (3) Vicat, L. J.: "Recherches sur le morteries", Casa Goujon, Libro de sus Altezas Reales, La Duquesa de Berry, París, 1818. "Investigaciones experimentales sobre las cales de construcción, los hormigones y los morteros ordinarios". INTEMAC. Infoprint S.A., 1999.
- (4) NBE FL-90 capítulo III / UNE 41067 / Norma Europea EN 459 1-2-3 / PIET-70 Instituto Eduardo Torroja. Eurocódigo de Estructuras de Fábrica.
- (5) Mark, R.: *Experiments in Gothic Architecture*, The Massachusetts Institute of Technology, 1982.
- (6) Cassinello, M. Josefa: "Racionalidad sísmica de la Arquitectura Ojival / Tipos estructurales y constructivos", *Actas del Cuarto Congreso Nacional de Historia de la Construcción*, Instituto Juan de Herrera. Sociedad Española de Historia de la Construcción, Colegio de Arquitectos de Cádiz, Cádiz, 2005, pp. 249-258.
- (7) Torroja, E.: "Razón y Ser de los tipos estructurales", CSIC Consejo Superior de Investigaciones Científicas. Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja, 2004.

* * *