

# EVALUACIÓN ESTRUCTURAL MEDIANTE ULTRASONIDOS DEL EFECTO DEL ESPESOR DE LA JUNTA DE MORTERO EN MUROS DE FÁBRICA DE LADRILLO CERÁMICO SOMETIDOS A ESFUERZOS DE COMPRESIÓN HASTA SU ROTURA

S. M. Monteagudo<sup>1</sup>, M. J. Casati<sup>2</sup>, J. C. Gálvez<sup>1</sup>, J. Kratochvil<sup>1</sup>, G. Al-Assadi<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Departamento de Ingeniería Civil: Construcción, E.T.S de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, Universidad Politécnica de Madrid. c/ Profesor Aranguren s/n, 28040 Madrid, España.

E-mail: sm.monteagudo@alumnos.upm.es

E-mail: jaime.galvez@upm.es

E-mail: ghaida@caminos.upm.es

<sup>2</sup>Departamento de Vehículos Aeroespaciales, E.U.I.T Aeronáutica, Universidad Politécnica de Madrid. Plaza Cardenal Cisneros nº 3, 28040 Madrid, España.

E-mail: mariajesus.casati@upm.es

## RESUMEN

En este trabajo se analiza la influencia del espesor de la junta de mortero en el comportamiento estructural de probetas de fábrica de ladrillo cerámico bajo esfuerzos de compresión uniaxial. El ensayo de compresión reproduce la forma habitual de trabajo de estas estructuras. Se han ensayado nueve muros y nueve pilares, combinando tres espesores de junta de mortero, sometidos a carga de compresión hasta rotura. Con el fin de evaluar el progresivo agrietamiento del material durante el proceso de carga, se han realizado medidas con ultrasonidos. Además se han realizado medidas con extensómetros y esclerómetro para contrastar la validez de las medidas de ultrasonidos. Los resultados obtenidos muestran que existe una correlación entre los valores de la fuerza de compresión que soportan las probetas y el tamaño del espesor de la junta: a menor espesor de junta mayor carga de rotura. Del estudio también se desprende que esta relación es más clara en los muros que en los pilares, ya que la esbeltez de los muros es mayor y aparecen efectos de pandeo. La medida con ultrasonidos muestra una buena correlación con las medidas extensométricas y permite una eficaz detección del agrietamiento interior del material durante el proceso de rotura.

## ABSTRACT

The aim of this paper is to analyze the influence of the mortar joint thickness on the structural behavior of brick-masonry specimens under compressive stress. The compression test reproduces the usual working way of these structures. Nine walls and nine columns were tested, combining three mortar joint thicknesses subjected to compressive load until failure. To evaluate the progressive cracking of the material during the loading process, ultrasound measurements have been performed. In addition, measurements with extensometers and sclerometer have been made in order to check the reliability of ultrasound measurements. Results show that a correlation exists between compressive strength values supported by specimens and the mortar joint thickness: the thinner the mortar joint, the greater the breaking loads. The research also shows that this relationship is more evident in walls than in pillars, as the thinness of the walls is higher and buckling effects occur. Ultrasound measurement shows a good correlation with the extensometer measures and allows an accurate detection of cracking inside the material during the breaking process.

**PALABRAS CLAVE:** Fábrica, ladrillo cerámico, compresión uniaxial, ultrasonidos.

## 1. INTRODUCCIÓN

La fábrica de ladrillo cerámico se ha empleado desde la antigüedad y tiene una gran tradición en nuestro país. Aún así, el estudio de su comportamiento estructural y resistencia sigue centrando el interés de los investigadores [1-3]. Parte de este interés responde a la necesidad de evaluar la capacidad portante de estructuras históricas como puentes y edificios.

La recuperación de edificios históricos que llevan años cerrados, así como el cambio de uso de otros bien conservados, requiere evaluar su resistencia para establecer el posible refuerzo o reparación en función de las solicitaciones de uso.

La fábrica de ladrillo es un material heterogéneo y anisótropo constituido por ladrillos y mortero. Su comportamiento hasta rotura es no-lineal y depende

fundamentalmente de sus componentes (ladrillo, mortero y junta ladrillo-mortero), así como de la disposición constructiva (aparejo y espesor de la junta) [4]. Los modelos de cálculo de la resistencia de la fábrica disponibles conducen a valores muy diferentes y no contemplan aspectos importantes como el espesor de junta [4].

La intervención sobre el Patrimonio Cultural Inmueble debe ser lo menos agresiva posible [5], siendo el uso de ensayos no destructivos una vía muy adecuada para conocer las propiedades de la fábrica. La medida de la velocidad de los pulsos ultrasónicos (VPU) se ha empleado con éxito en ladrillos [6], en fábrica de piedra [7] y combinada con termografía [8]. Sin embargo no hay resultados acerca de cómo afecta el distinto espesor de las juntas de mortero en la fábrica de ladrillo.

En este trabajo se analiza la influencia del espesor de la junta de mortero en el comportamiento estructural de probetas de fábrica de ladrillo cerámico bajo esfuerzos de compresión uniaxial. Se han ensayado nueve muros y nueve pilares, combinando tres espesores de junta de mortero, sometidos a carga de compresión hasta rotura. Con el fin de evaluar el progresivo agrietamiento del material durante el proceso de carga, se han realizado medidas con ultrasonidos. Además se han realizado medidas con extensómetros y esclerómetro para contrastar la validez de las medidas de ultrasonidos.

## 2. CAMPAÑA EXPERIMENTAL

Se han ensayado pilares y muros de fábrica de ladrillo, con tres espesores de junta, de 5, 10 y 15 mm, respectivamente. Se han ensayado tres probetas de cada espesor. La dimensión de los pilares fue 235x235x800mm<sup>3</sup>. Los muros tenían una planta de 750x115 mm<sup>2</sup> y altura entre 650-830mm. La nomenclatura utilizada para designar a las probetas se muestra en la Tabla 1. La Figura 1 muestra un esquema de los pilares y muros con sus dimensiones.

### 2.1. Ladrillos

Para la fabricación de las probetas se han empleado ladrillos comerciales cerámicos macizos de dimensiones 235x108x37mm<sup>3</sup>. Su resistencia a compresión uniaxial,

Tabla 1: Nomenclatura y dimensiones de las probetas ensayadas.

Espesor de la junta	Nombre de la probeta		
	Pilares		
5 mm	P 1.05	P 2.05	P 3.05
10 mm	P 1.10	P 2.10	P 3.10
15 mm	P 1.15	P 2.15	P 3.15
Muros			
5 mm	M 1.05	M 2.05	M 3.05
10 mm	M 1.10	M 2.10	M 3.10
15 mm	M 1.15	M 2.15	M 3.15

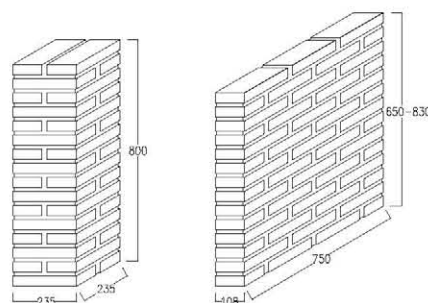


Figura 1. Esquema de pilar y muro (cotas en mm).



Figura 2. Fabricación de un muro.

medida según UNE-EN 772-1 [9], sobre tres probetas con dimensiones 40x40x40mm<sup>3</sup>, fue de 60 MPa.

### 2.2. Mortero

El mortero empleado estaba compuesto por cemento Portland CEM I 42,5 N y arena silícea normalizada con un tamaño máximo de árido de 1,5 mm. La relación agua/cemento fue 0,5. La relación cemento:arena 1:6. La resistencia a compresión del mortero, según la norma UNE-EN 1015-11 [10], sobre tres probetas con dimensiones 35x35x35mm<sup>3</sup>, fue de 22,9 MPa.

### 2.3. Construcción de los pilares y muros

Los ladrillos se sumergieron en agua una hora antes de emplearlos con el fin de evitar la absorción del agua del mortero por parte del ladrillo, lo que podría causar una mala adhesión en la interfaz ladrillo-mortero. Los muros y los pilares se confeccionaron con tres espesores de junta 5, 10 y 15 mm. La Figura 2 muestra la fabricación de uno de los muros. Las caras superior e inferior de las probetas estaban rematadas con una capa de mortero de 20 mm de espesor. La superficie de apoyo se rectificó con una capa de azufre.

### 2.4. Procedimiento de ensayo de las probetas

Los muros y los pilares se ensayaron a compresión uniaxial de acuerdo a la norma UNE-EN 1052-1 [11]. El ensayo se realizó con una máquina servohidráulica de 2000 kN de capacidad, con control de desplazamiento. En los pilares la carga se aplicó intercalando un tablero de aglomerado de 1cm de espesor entre el plato de la

máquina y la probeta. En el caso de los muros se empleó una viga metálica de reparto HEB250 con rigidizadores para distribuir la carga uniformemente. La carga se aplicó en escalones de 150 kN, con estabilización de la deformación en cada escalón. La Figura 3 muestra un esquema de la aplicación de la carga.

El acortamiento de las probetas durante el ensayo se midió con extensómetros inductivos (tipo LVDT) de 40 mm de recorrido. En los pilares se emplearon dos adosados en caras opuestas, mientras que en los muros fueron cuatro, dos en cada cara (véase Figura 4).

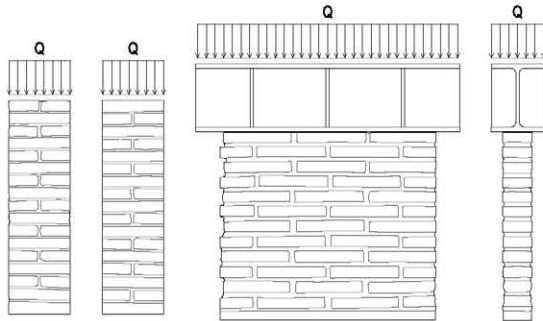


Figura 3. Esquema de carga en pilares y muros.



Figura 4. Ensayo de compresión de un muro.

La medida de la VPU se hizo con un equipo PUNDIT con transductores de alta frecuencia (50-100 kHz). En el caso de los pilares la VPU se midió de forma directa en dos direcciones (véase Figura 5). En la *posición 1* el tren de ondas atraviesa ladrillo y mortero (L+M), y en la *posición 2* solo ladrillo (L). Estas medidas se realizaron en las dos direcciones *x* e *y* del plano de medida.

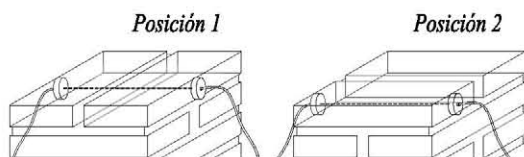


Figura 5. Esquema de posición de transductores en la medida de velocidad de pulso ultrasónico en pilares.

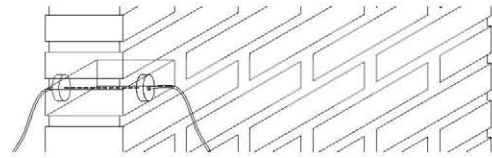


Figura 6. Esquema de posición de transductores en la medida de velocidad de pulso ultrasónico en muros.

En los muros, la medida se realizó a través del ladrillo sin atravesar el mortero (Figura 6). Las medidas se realizaron en tres alturas diferentes.

Además, se empleó un esclerómetro para determinar la variación de la dureza superficial del ladrillo y del mortero durante la carga de los pilares, se tomaron seis medidas a diferentes alturas. En el caso de los muros se midió el alargamiento horizontal de sus caras en cada escalón de carga con un deformímetro.

### 3. RESULTADOS

La Figura 7 muestra la VPU en los pilares en función de la carga aplicada para las dos posiciones de medida.

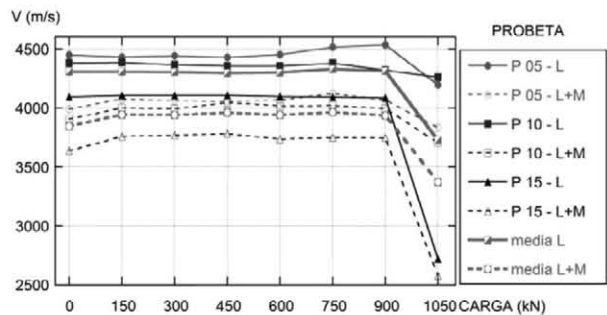


Figura 7. Velocidad de pulso ultrasónico en pilares en función de la carga.

El promedio de VPU obtenida en la *posición 1* (L+M) fue de 3.863,2m/s, mientras que en la *posición 2* (L) fue de 4.236,5m/s.

La Figura 8 muestra la VPU en los muros en función de la carga aplicada.

La Figura 9 compara en cada escalón de carga la VPU para cada espesor de junta de mortero en los pilares. La Figura 10 muestra análogos resultados para los muros.

Tabla 2: Tensión de rotura de las probetas ensayadas.

Tipo de probeta	Espesor de la junta	Tensión de rotura (MPa)	
		Individual	Media
Pilares	5 mm	20,5	19,5
	10 mm	19,1	
	15 mm	19,0	
Muros	5 mm	10,4	7,8
	10 mm	7,7	
	15 mm	5,3	

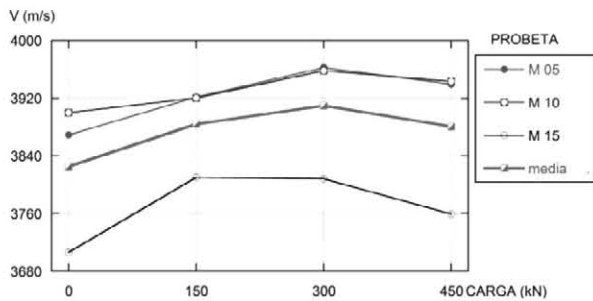


Figura 8. Velocidad de pulso ultrasónico en muros en función de la carga.

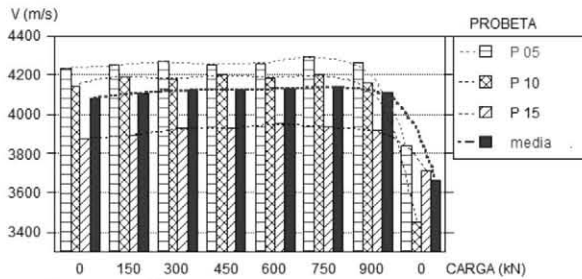


Figura 9. Velocidad de pulso ultrasónico en pilares para cada espesor de junta en función de la carga.

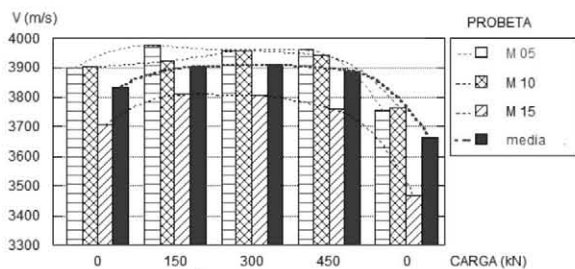


Figura 10. Velocidad de pulso ultrasónico en muros para cada espesor de junta en función de la carga.

La Tabla 2 muestra las tensiones de rotura para los pilares y los muros. Los valores individuales para cada espesor de junta corresponden al valor medio de las tres probetas ensayadas.

Las Figuras 11 y 12 muestran la VPU medida en los pilares y los muros, en función de la altura, antes, durante y después del ensayo.

La Figura 13 muestra el índice de rebote medido en los ladrillos y el mortero de los pilares en los distintos escalones de carga.

Las Figuras 14 y 15 muestran las curvas tensión deformación, medida con los extensómetros, en los pilares y los muros respectivamente.

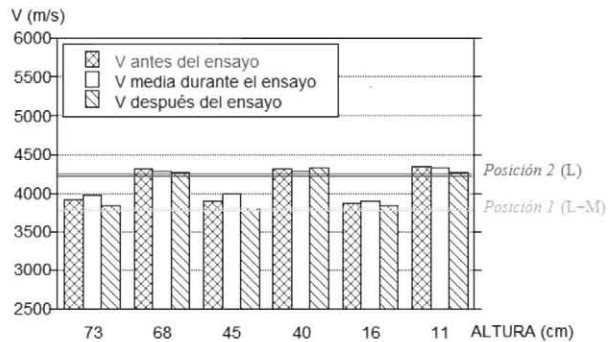


Figura 11. Velocidad de la onda en función de la altura - Pilar P 05 - Dirección del eje X.

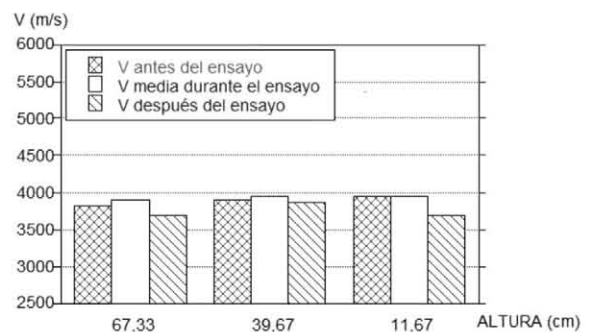


Figura 12. Velocidad de la onda en función de la altura - Muro M 05.

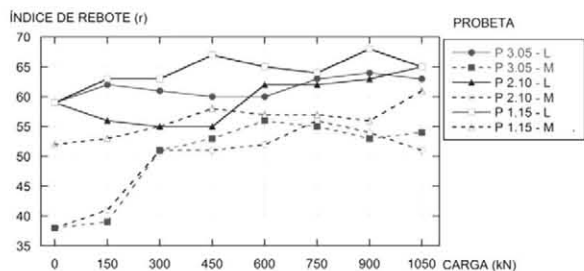


Figura 13. Índice de rebote medido en los ladrillos y el mortero de los pilares.

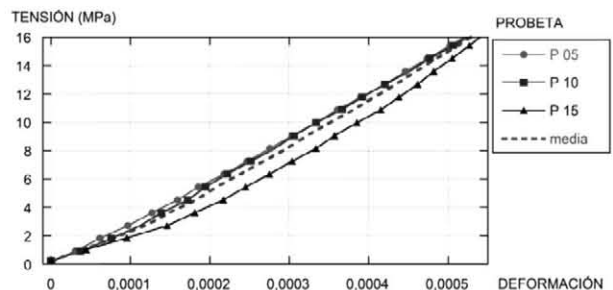


Figura 14. Curvas tensión-deformación en pilares.

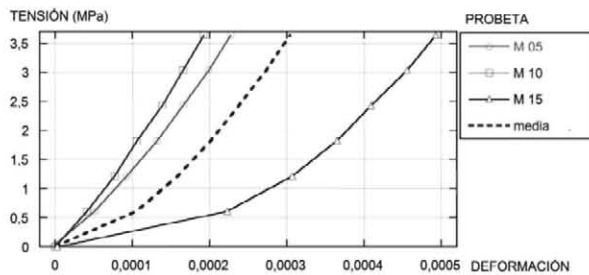


Figura 15. Curvas tensión-deformación en muros.

Tabla 3: Valores promedio de la tensión característica obtenidos mediante expresiones analíticas

Norma	Resistencia característica a compresión (MPa)	
EC-6	$f_k = K f_b^{0,65} f_m^{0,25}$ $K = 0,60$ $f_m < 20 \text{ MPa}$ $f_m < 2 \cdot f_b$	$f_k = 18,16 \text{ MPa}$
CTE		
NBE FL-90	$\hat{f}_k = \hat{f} - 1,64\delta$ $\delta = \sqrt{\frac{\sum(f_j - \hat{f})^2}{n-1}}$	$f_{k \text{ PILARES}} = 18,7 \text{ MPa}$ $f_{k \text{ MUROS}} = 5,15 \text{ MPa}$

#### 4. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

La VPU es claramente inferior siempre que el pulso atraviesa ladrillo y mortero, es el caso de los pilares con medida de VPU en *posición 1* (véase Figura 7). La razón se debe a la menor rigidez del mortero y a la presencia de la discontinuidad ladrillo-mortero. Este fenómeno ha sido observado por otros autores [6 y 12].

En los pilares y en los muros se observa una relación clara entre la VPU y el espesor de la junta de mortero en todos los escalones de carga (véanse Figuras 7 y 8). La VPU es mayor en los pilares con una junta de mortero de menor espesor. Este efecto se debe a que el mortero es más deformable que el ladrillo.

Tanto los pilares como los muros muestran un ligero aumento en la VPU antes de alcanzar la carga de rotura. Este aumento se debe a la mayor compactación del material que reduce el volumen de los huecos. Tras superar la carga máxima, la aparición de grietas se evidencia por una fuerte disminución de la VPU (Figuras 7 a 10). Meglis et al. [13], entre otros, también observaron la disminución de la VPU a medida que las grietas se propagaban.

La medida de VPU a distintas alturas (Figuras 11 y 12) muestra variaciones muy pequeñas, aspecto que confirma una distribución uniforme de la carga en el elemento.

El índice de rebote es mayor en el ladrillo que en el mortero, lo que era de esperar, ya que la rigidez del ladrillo es mayor que la del mortero, propiedad que se manifiesta en la dureza superficial. Se observa una tendencia a aumentar el índice de rebote a medida que aumenta la carga debido a que el material gana compactación. Este aumento es más pronunciado en el mortero que en el ladrillo por ser el mortero un material más deformable. Los resultados de la evaluación de la dureza superficial confirman las conclusiones obtenidas al medir la VPU.

Las curvas tensión-deformación de los pilares (Figura 14) muestran una baja dispersión experimental y confirman una mayor deformabilidad en los pilares con mayor espesor de junta de mortero. En el caso de los muros (Figura 15) el resultado es análogo, si bien hay una mayor dispersión experimental achacable a la mayor esbeltez de los muros [14].

Respecto a la resistencia de las probetas se observa, especialmente en los muros, un incremento de la resistencia a medida que disminuye el espesor de la junta de mortero. Este aspecto ha sido observado por otros autores en probetas a escala [9, 10 y 11].

La Tabla 3 compara los resultados obtenidos con la resistencia propuesta por Euro Código 6 (EN-1996-1-1), el Código Técnico de la Edificación (CTE) y la Norma Básica de la Edificación de Fábricas de Ladrillo (NBE FL-90) para los pilares. Para los tres espesores de junta de mortero el resultado queda del lado de la seguridad. La NBE FL-90 está derogada, pero se incluye en la comparación porque muchos de los elementos de fábrica actualmente en servicio se han calculado de acuerdo a sus prescripciones.

La menor capacidad portante de los muros respecto a los pilares se debe a la mayor esbeltez, que a pesar de las precauciones tomadas, puede inducir excentricidad en la carga. Carpinteri et al. [14] han comprobado con probetas a escala que la tensión de rotura es una función decreciente de la esbeltez.

#### 5. CONCLUSIONES

Desde un punto de vista metodológico, los métodos de evaluación no destructiva utilizados durante la campaña experimental ofrecen resultados fiables sobre las propiedades de la fábrica, su deterioro y su estado de carga. La medida de la VPU, complementada con el martillo Schmidt (esclerómetro), es un método útil para estimar el estado de la fábrica, sin necesidad de dañar el material existente. Con la adecuada calibración, el método ultrasónico puede ser muy útil en la evaluación estructural, especialmente para detectar las zonas más dañadas que a veces no son detectables en una inspección visual.

Los resultados obtenidos muestran que existe una relación directa entre el espesor de la junta de mortero y la capacidad portante de la fábrica durante el ensayo de compresión uniaxial. Además, cuanto menor es el espesor de la junta, mayor es la VPU registrada.

La resistencia a compresión de los materiales constituyentes de la fábrica condicionan la resistencia de la fábrica, sin embargo, por sí mismos no permiten establecer conclusiones definitivas sobre la resistencia a compresión de la fábrica. Los modelos de la normativa vigente establecen la tensión de rotura en función de la resistencia de los materiales constitutivos, sin embargo aspectos como el espesor de la junta de mortero, son cruciales en el comportamiento no lineal del conjunto de la fábrica.

## 6. AGRADECIMIENTOS

Los autores desean agradecer al Ministerio de Ciencia e Innovación la concesión de los proyecto BIA-2008-03523 e IPT-42000-2010-3.

## 7. REFERENCIAS

- [1] MOHAMMED, A. et al., *The effect of scale on the structural behavior of masonry under compression*, Construction and Building Materials, (on line), 2010.
- [2] REYES, E. et al., *Cohesive crack model for mixed mode fracture of brick masonry*, Int. J. of Fracture 151: 29-55, 2008.
- [3] REYES, E. et al., *An embedded cohesive crack model for finite element analysis of brickwork masonry*, Eng. Fract. Mech. 76: 1930-1944, 2009.
- [4] MONTEAGUDO, S., *Análisis estructural de muros de fábrica mediante ensayos no destructivos*, Proyecto Fin Máster, E.T.S. Ingenieros Caminos, Canales y Puertos, Universidad Politécnica Madrid, 2010.
- [5] LOMBILLO, I. et al., *Evaluación no destructiva del patrimonio construido*, 3er Congreso Nacional de Construcción de la Universidad de Coimbra, Portugal, 2007.
- [6] KOROTH, S. R. et al., *Evaluation of clay brick durability using ultrasonic pulse velocity*, Journal of architectural engineering, pp. 142-147, December 1998.
- [7] VASCONCELOS, G. et al., *Ultrasonic evaluation of the physical and mechanical properties of granite*, Elsevier, Ultrasonics, Vol. 48, pp. 453-466, 2008.
- [8] MEOLA, C. et al., *Application of infrared thermography and geophysical methods for defect detection in architectural structures*, Elsevier, Engineering Failure Analysis Vol. 12, pp. 875-892, 2005.
- [9] UNE-EN 772-1 Métodos de ensayo para piezas de fábrica. Parte 1: Determinación de la resistencia a compresión.
- [10] UNE-EN 1015-11. Métodos de ensayo de los morteros para albañilería. Parte 11: Determinación de la resistencia a flexión y a compresión del mortero endurecido.
- [11] UNE-EN 1052-1. Métodos de ensayo para albañilería. Parte 1: Determinación de la resistencia a compresión.
- [12] SCHULLER, M. et al., *Acoustic tomography for evaluation of unreinforced masonry*, Elsevier, Construction and Building Materials, Vol. 11, No. 3, pp. 199-204, 1997.
- [13] MEGLIS, I.L. et al., *Assessing in situ microcrack damage using ultrasonic velocity tomography*, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, No. 42, Vol. 1, pp. 25-34, 2005.
- [14] CARPINTERI, A. et al., *Damage evaluation of three masonry towers by acoustic emission*, Elsevier, Engineering Structures Vol. 29, pp. 1569-1579, 2007.
- [15] MOHAMMED, A. et al., *The effect of scale on the structural behavior of masonry under compression*, Elsevier, Construction and Building Materials, 2010.
- [16] HUGHES, T.G. et al., *Small scale testing of masonry*, 12th int. brick/block masonry conf. proc., Vol. 2, pp. 893-902, Madrid 2000.
- [17] PORTO, F. et al., *Failure modes for in plane loaded masonry walls made with thin layer mortar*, 10th Canadian Masonry Symposium, Banff, Canada 2005.
- [18] ROLANDO, A., *Resistencia característica a compresión de una fábrica de ladrillo en función de la resistencia de sus componentes - Comprobación experimental de expresiones analíticas de la normativa europea*, Escuela Técnica Superior de Arquitectura de la U.P.M., Vol. 56, No. 283, pp. 91-98, 2006.