



Universidad de Valladolid

Fabricación y ensayo de probetas de fábrica de ladrillo

Prácticas de laboratorio
Estructuras de Ladrillo (Curso 2018-19)

Jose Antonio Balmori ; Leandro Morillas; David Escolano
(Septiembre de 2019)

INDICE

1. INTRODUCCIÓN	3
2. OBJETIVOS.....	3
2.1. Objetivo de la práctica.....	3
3. FUNDAMENTO TEÓRICO	4
3.1. Resistencia sólo a compresión (o no resistencia de tracciones).....	4
3.2. Variabilidad en la resistencia a compresión (factor humano, entre otros).....	5
3.3. Coeficiente de Poisson (o tracciones derivadas)	6
3.4. Ductilidad (modos de rotura)	7
3.5. Rotura de la probeta.....	9
3.6. Comportamiento en muros	10
4. MATERIAL Y MÉTODOS	12
4.1. Material : Ladrillo y mortero	12
4.2. Fabricación de las probetas	12
4.3. Equipo.....	13
4.4. Ensayo a compresión (set up).....	15
5. CÁLCULOS PREVIOS (ESTIMACIÓN DE CARGA)	18
5.1. Calculo de la resistencia a compresión.....	18
5.2. Estimación de la carga de rotura de cada probeta	18
5.3. Cálculo del módulo de elasticidad.....	19
6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	20
6.1. Fuerza máxima de rotura (Gráfica fuerza-desplazamiento).....	20
6.2. Deformaciones 0 y 90 grados	21
7. CONCLUSIONES.....	22
8. AGRADECIMIENTOS	22
9. REFERENCIAS	23
10. ANEXO 1. FICHA DE MATERIALES.....	24
11. ANEXO 2. ESPECIFICACIONES BANDAS EXTENSOMÉTRICAS.....	26

1. INTRODUCCIÓN

El taller de laboratorio realizado en la asignatura “Estructuras de Ladrillo” durante el curso académico 2018-19, se divide en dos sesiones prácticas: en una primera sesión los estudiantes, organizados en pequeños grupos, construyen con sus propias manos unas probetas de ladrillo. Para ello se les facilitan los materiales; ladrillos, mortero, agua, y herramientas. Transcurridos 28 días, en una segunda sesión, se ensayan a compresión las probetas de fábrica, estimando previamente cada grupo la resistencia “esperada” de sus probetas. Para realizar este ensayo, cada grupo es responsable de la instrumentación de su probeta, enseñándoles la base de la medición con bandas extensométricas, sus fundamentos teóricos y las técnicas de colocación.

A partir de la experiencia práctica desarrollada por los alumnos, los fundamentos teóricos previos expuestos en el aula, y los resultados obtenidos de los ensayos realizados en el laboratorio, se elabora este material docente por los profesores Dr. Leandro Morillas, Dr. David Escolano y Dr. Jose Antonio Balmori. Sirva este documento de guía y apoyo para futuros estudiantes y compañeros docentes.

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo de la práctica

El principal objetivo de este taller es afianzar los conocimientos teóricos desarrollados durante la parte inicial del curso, abordando desde la práctica conceptos como aparejo, dosificación de morteros, plasticidad, o la elección de los coeficientes de seguridad adecuados a cada tipo de obra. Incidiendo en la gran repercusión que tiene sobre la resistencia final de la fábrica la buena o mala ejecución del operario, y en la necesidad, como técnicos, de realizar un correcto control sobre la ejecución de la fábrica.

El segundo objetivo es mostrarles empíricamente el comportamiento real de las estructuras de fábrica a compresión, observando durante los ensayos los principales tipos de rotura y causas de colapso estudiados teóricamente en clase, consolidando y profundizando los conceptos que mueven el diseño y cálculo de este tipo de estructuras. Además, se les instruye en la metodología de un ensayo científico. Cada grupo es responsable de la instrumentación con bandas extensométricas de su probeta, participando activamente en el set-up previo a ensayo, instrumentación adicional (LVDT) y control del comportamiento de cada una de sus probetas durante el ensayo a través de la monitorización a tiempo real de carga, deformación global (LVDT) y deformación local (bandas extensométricas). Se analizan los datos obtenidos durante el ensayo, y se reflexiona sobre las causas que responden a los distintos comportamientos de cada probeta.

El último objetivo del taller es aplicar los conocimientos de cálculo estudiados durante el curso. Mostrar la corrección de los métodos de cálculo teóricos utilizados con el comportamiento real obtenido en el ensayo. Para ello, cada grupo debe estimar la resistencia a compresión de sus probetas, teniendo en cuenta las variables de la ejecución que ellos mismos han experimentado. Antes de iniciar el ensayo, en el aula, cada grupo dispone de un tiempo para calcular y debatir la carga estimada de rotura de su probeta, entregándoles la resistencia real de los ladrillo y mortero utilizados, obtenida mediante ensayo. Con estos datos se realiza un “concurso” en el cual “gana” el grupo que más se aproxime a la carga de rotura real de su probeta.

3. FUNDAMENTO TEÓRICO

3.1. Resistencia sólo a compresión (o no resistencia de tracciones)

La fábrica de ladrillo se realiza mediante la colaboración de dos elementos fundamentales; unas piezas cerámicas de tamaño y peso moderado, como elemento principal, y un mortero de diversa naturaleza que, como elemento secundario, permite asentar y ligar adecuadamente a las piezas. Para que todos estos elementos de pequeño tamaño funcionen en conjunto conformando un elemento estructural, es necesario construir la fábrica siguiendo una determinada ley de traba o aparejo que permita enlazar y redistribuir solidariamente los esfuerzos en el conjunto de la estructura.

Las estructuras de fábrica son diseñadas para trabajar, fundamentalmente, bajo esfuerzos predominantes de compresión vertical. Sin embargo, las fábricas también pueden verse sometidas a esfuerzos (secundarios) horizontales, como consecuencia de la acción de viento, sismo u otras causas. Estos esfuerzos horizontales generan en la estructura de fábrica tensiones de tracción o cortante que deben ser cuidadosamente estudiados.

Observando la naturaleza de la fábrica, multitud de pequeñas piezas amontonadas según una ley de traba, es fácil comprender su (casi) nula capacidad para resistir esfuerzos de tracción. Si comparamos la capacidad de resistencia de una estructura de fábrica ordinaria ante los distintos esfuerzos podemos entender su limitada resistencia (casi nula) a cualquier otro esfuerzo que no sea la compresión. El orden de magnitud podemos situarlo en la Tabla 1:

Tabla 1. Valores característicos estimados para una fábrica ordinaria*

Resistencia Compresión (MPa)	Resistencia Tracción (MPa)	Resistencia Cortante (MPa)
5	0,4	0,2

**Estos valores se estiman para ladrillo perforado de resistencia normalizada $f_b=15\text{MPa}$; mortero ordinario de resistencia $f_m=7,5\text{MPa}$, según CTE, con el fin de comparar el orden de magnitud de su resistencia.*

Debido a esta limitación ante esfuerzos de tracción y cortante, todas las estructuras de fábrica construidas se diseñan para trabajar, fundamentalmente, a esfuerzos de compresión. Sus mecanismos de fallo y colapso son consecuencia de tensiones de tracción, directas o inducidas, derivadas de la puesta en carga y asentamiento de la fábrica. Como se observará durante el ensayo, incluso ante esfuerzos de compresión pura, la dualidad de materiales que componen la fábrica genera tensiones de tracción inducidas que condicionan el colapso de las probetas por esfuerzos finales de tracción lateral /cortante.

En la Fig. 1 se resumen los tipos de rotura que puede sufrir las estructuras de fábrica. Como puede verse, el desencadenante del colapso es siempre una tracción, bien sea directa o derivada del cortante. Incluso en compresiones puras (Fig. 1.E), como este ensayo, el colapso se desencadena por tracciones derivadas.

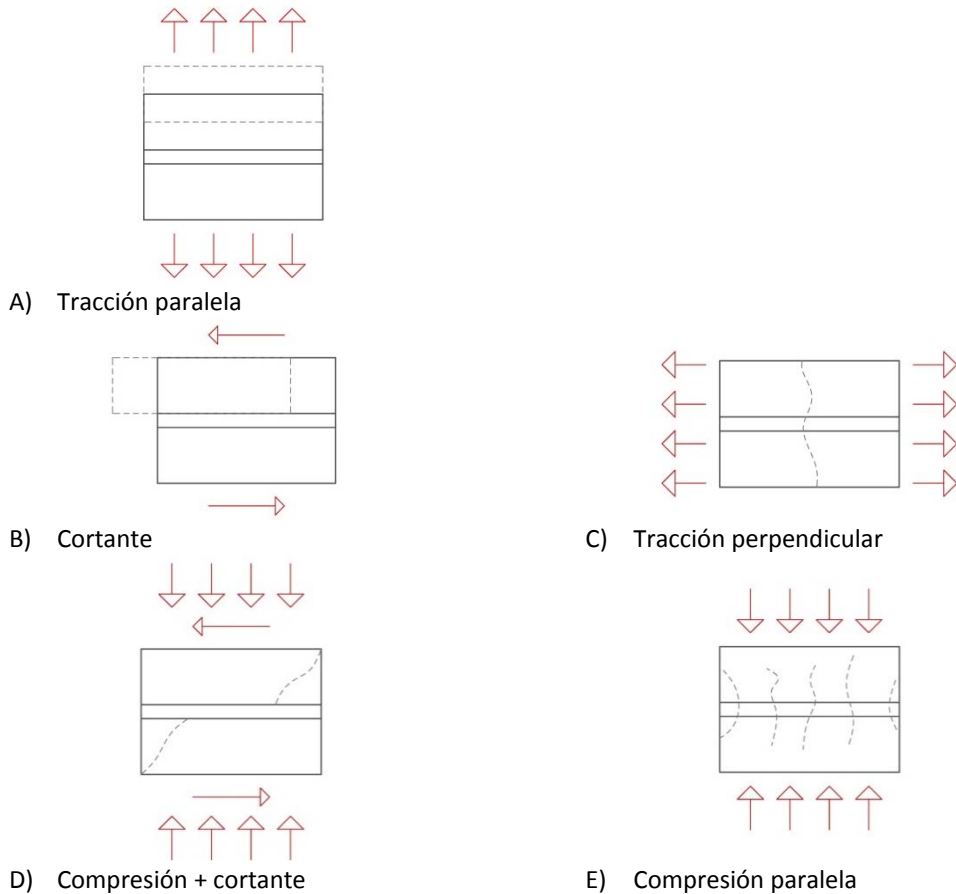


Fig. 1. Roturas canónicas de los distintos esfuerzos aplicados sobre la fábrica [7].

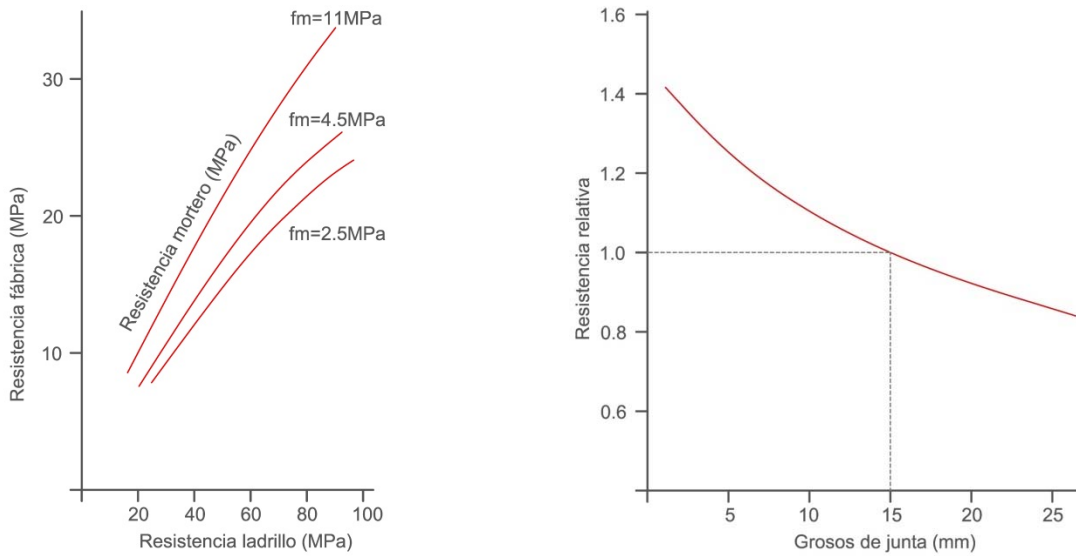
3.2. Variabilidad en la resistencia a compresión (factor humano, entre otros)

Puede parecer sensato pensar que la calidad/resistencia de los materiales (ladrillo y mortero) son los principales factores que afectan a la resistencia de la fábrica. Sin embargo, la resistencia a compresión de la fábrica de ladrillo varía en función de distintos factores (Tabla 2), siendo el factor humano durante la ejecución el principal factor de variabilidad.

Tabla 2. Factores que afectan a la resistencia a compresión de la fábrica de ladrillo.

Características piezas	Características mortero	Características fábrica	Ejecución
Resistencia/Calidad	Resistencia mortero:	Tipo/grosor juntas	Errores en el aparejo
Tipo de pieza y geometría:	- Plasticidad	Dirección de carga	Mala colocación
- Macizo	- Relación agua/cemento	Carga puntual o repartida	Desviación verticalidad
- Perforado	- Tipo granulometría		Exposición a climatología adversa (agua/hielo/calor)
- Hueco	Deformabilidad en relación con los ladrillos		No saturación previa pieza
Relación ancho/grueso			Mala relación resistencia mortero/ladrillo
Propiedades de absorción			
Defectos de fabricación			

Nos sorprenderíamos si reflexionamos sobre la relativa “poca” influencia que tiene la resistencia unitaria del ladrillo o el mortero en comparación con otros factores dependientes de la ejecución como el aparejo, la verticalidad o el espesor de la junta. El uso de ladrillos de altas resistencias no afecta de forma lineal a la resistencia final de la fábrica, siendo mucho más determinante las propiedades de deformabilidad del mortero y el espesor de junta ejecutada. En la Fig. 2, se muestra la resistencia estimada para una fábrica en función de la relación de resistencias ladrillo/mortero, y espesor de junta.



A) Influencia en la fábrica de la relación entre resistencia de ladrillo y resistencia de mortero. B) Influencia del grosor de junta en la resistencia de la fábrica.

Fig. 2. Influencia de la resistencia y geometría del mortero [8].

Esta variabilidad de resistencias en función de múltiples variables ha obligado, tradicionalmente, a la realización de ensayos empíricos para la estimación de resistencia de las fábricas. Vitruvio ya describe la realización de pruebas de carga en las construcciones de fábrica tras su construcción, y en la normativa vigente se impone la necesidad de realizar probetas para ensayar en laboratorio. Esta variabilidad se ve muy influenciada por la buena o mala ejecución (factor humano) de las estructuras de fábrica. Como se puede observar en los resultados, con los mismos materiales, condiciones ambientales y tiempos, se observa una clara diferencia entre probetas achacable únicamente a la ejecución de cada grupo.

Estos dos factores; variabilidad material y variabilidad de ejecución (factor humano) queda recogida en el CTE, utilizando un mayor coeficiente de seguridad al disminuir los controles sobre el material y la ejecución de la obra.

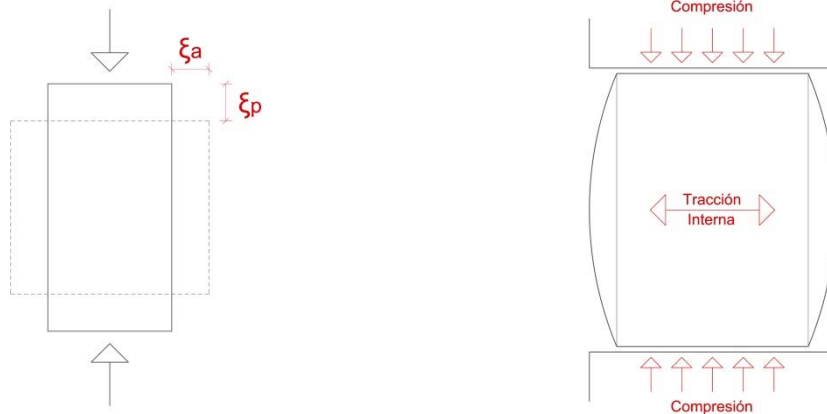
Tabla 3. Coeficientes parciales de seguridad (γ_M) recogido en Tabla 4.8 de CTE

Situaciones persistentes y transitorias ⁽¹⁾	Categoría de la ejecución		
	A	B	C
Resistencia de la fábrica	1,7	2,2	2,7
Resistencia de llaves y amarres	2,0	2,5	3,0
Anclaje del acero de armar.	1,7	2,2	
Acero (armadura activa y armadura pasiva)	1,15	1,15	

⁽¹⁾ Para las comprobaciones en situación extraordinaria, los coeficientes de llaves y amarres son los mismos; de las fábricas los coeficientes son 1,2 1,5 y 1,8 respectivamente para las categorías A B y C.
⁽²⁾ Categorías según 8.1.1

3.3. Coeficiente de Poisson (o tracciones derivadas)

El coeficiente de Poisson (ν), se define como “la relación entre la deformación axial (en el sentido de la carga), y la deformación transversal (perpendicular al sentido de carga)”. De modo que, todo cuerpo sometido a una carga (de tracción o de compresión) sufre una deformación principal o primaria en el sentido de la carga (ϵ_p), y además, una deformación secundaria o inducida* en el eje perpendicular (ϵ_a). [*Si es material es anisótropo, puede presentar deformaciones secundarias de distinta magnitud en función de la dirección.]



A) Deformación de un sólido (Poisson)

B) Deformación transversal durante ensayo.

Fig. 3. Efecto Poisson.

El coeficiente de Poisson es adimensional, depende del material y da una idea de la compresibilidad del sólido. Su valor debe ser $\nu < 0.50$, si $\nu = 0.5$, el cuerpo es incompresible. Su valor se obtiene como:

$$\nu = - \varepsilon_p / \varepsilon_a$$

En fábricas de ladrillo, los valores de Poisson varían en función de las características mecánicas del tipo de ladrillo y mortero utilizado en su fabricación, aunque varias publicaciones [5] [6] suelen tomar valores de Poisson en torno a $\nu = 0.15$.

Como se observará durante los ensayos, debido a esta deformación transversal se generan esfuerzos de tracción sobre la probeta que condicionarán el tipo de rotura, pese a que en el ensayo realizado únicamente se apliquen cargas de compresión.

3.4. Ductilidad (modos de rotura)

Según la RAE, dúctil se define como “Cuerpo que admite grandes deformaciones mecánicas antes de romperse”. Esta definición traducida al comportamiento mecánico de una estructura (del tipo que sea) implica, gracias a esta cualidad de poder deformarse, la capacidad de redistribuir los esfuerzos locales entre el conjunto de la estructura. Es decir, en la práctica previamente al colapso de la estructura en su conjunto se producen roturas locales acompañadas de deformaciones sensibles, que permite (al menos sobre el papel) alertar del elevado estado tensional. Por tanto, la ductilidad en las estructuras puede utilizarse como sinónimo de seguridad para las personas.

Si pensamos en materiales dúctiles difícilmente elegiremos las estructuras de fábrica. Los materiales pétreos o cerámicos utilizados en las fábricas no son dúctiles, por naturaleza su resistencia a tracción es nula o mínima, y su rotura se produce de modo frágil. No obstante, pese a que estos materiales son los mayoritarios en la construcción de las fábricas, se ven unidas en un mortero o argamasa basados en arena y conglomerantes, y cuyas propiedades podemos modificar a nuestra elección alterando su dosificación. Además, las fábricas se construyen con piezas de pequeño tamaño siguiendo unas leyes de aparejo que traban y solidarizan todo el muro. Veremos que estos dos elementos; aparejo y mortero, son los responsables de otorgar una cierta ductilidad a la fábrica, convirtiéndolas con ello en estructuras seguras para su uso en arquitectura.

Como hemos visto previamente, debido al efecto de Poisson, cualquier material sometido a una compresión (0°) tiene una cierta deformación transversal (90°). Parece intuitivo, que si se somete a

compresión los ladrillos y el mortero por separado, la deformación que sufriría uno y otro sería libre y diferente. Sin embargo, al ejecutar la fábrica aparejada y unidos íntimamente los ladrillo con el mortero, se debe considerar que las interacciones entre los dos elementos (adherencia del mortero, influencia de los huecos de la pieza,...) hacen que la deformación de ambos sea uniforme (se deforman juntos por igual). Su comportamiento global, su ductilidad y tipo de rotura, dependerá de la rigidez y resistencia que otorguemos a cada uno de ellos.

En el caso de que los ladrillos sean el elemento más rígido y resistente, el ladrillo limitaría (confinaría) la deformación del mortero. En la Fig. 4.A1 puede observarse la deformación del conjunto, y la deformación de los elementos por separado (línea a trazos). Esto implica que, al aumentar las compresiones por efecto Poisson, el ladrillo sufriría debido a tracciones perpendiculares generando pequeñas roturas localizadas, mientras que el mortero continuaría deformándose sin daños. De este modo, se genera una cierta ductilidad en la estructura que permite repartir las tensiones sobre el resto de elementos, pese a que surjan roturas locales. En la Fig. 4.A2, puede observarse el tipo de rotura dúctil.

Si por el contrario, el mortero es el elemento más rígido y resistente, su menor espesor en comparación con los ladrillos, y la desconexión entre ellos, impide una correcta distribución de tensiones produciéndose una rotura frágil de la estructura (Fig. 4.B).

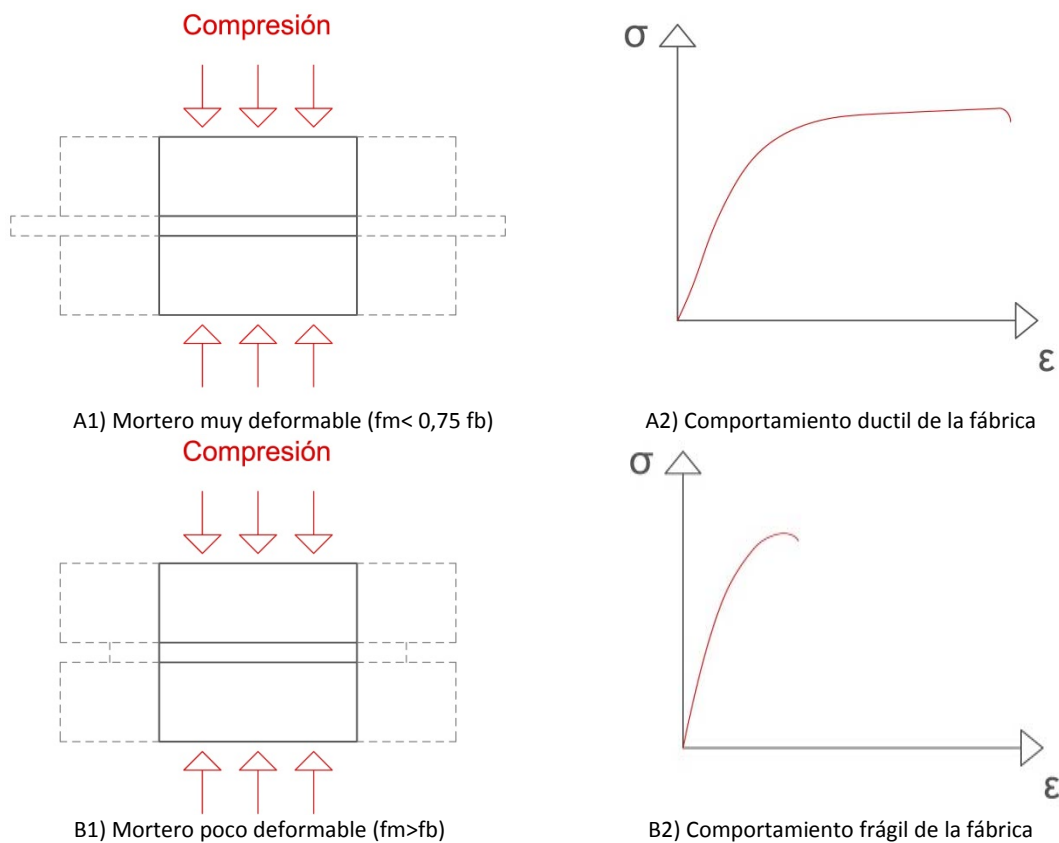


Fig. 4. Modos de comportamiento a rotura en función de la relación con la deformabilidad del mortero.

Una vez entendida la influencia de las propiedades del mortero en la ductilidad de la fábrica, puede entenderse que las normas de cálculo (CTE, EC6), relacionen en sus tablas la resistencia del ladrillo con el tipo de mortero. Como recomendación general, debe utilizarse un mortero de resistencia igual o menor al 75% de la resistencia del ladrillo. Por ejemplo, para un ladrillo de resistencia característica a compresión $f_{bk}=10\text{MPa}$, el mortero utilizado (como máximo) sería un M7,5 de resistencia característica a compresión $f_{mk}=7,5\text{MPa}$. (Ver tabla 4.4 del CTE en su DB-SE-F). No obstante, la resistencia final de la

fábrica va a depender más de aspectos como la ejecución o la geometría de los materiales que de la resistencia pura de los ladrillos y mortero. En la Fig. 5 se compara los gráficos de ensayos a compresión de ladrillo, mortero y fábrica por separado.

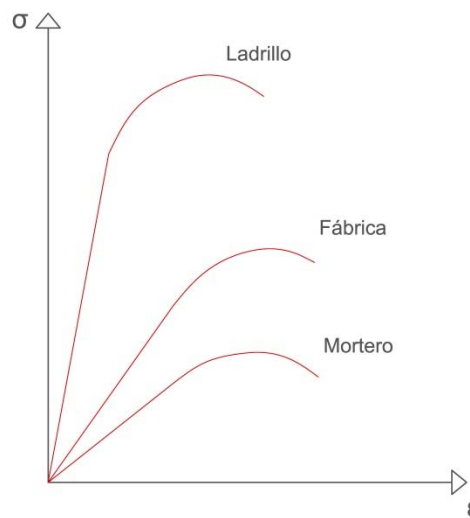


Fig. 5. Gráficas comparadas de ensayo a compresión de ladrillo, mortero y fábrica [4].

3.5. Rotura de la probeta

El ensayo de probetas de fábrica estructural a compresión se desarrolla según la norma EN 1052-1 [3]. No obstante, más allá de la determinación de dimensiones, modos de carga e instrumentación, los modos de fallo y evolución son similares en todos los ensayos a compresión.

Como se ha expuesto en puntos anteriores, al aplicar una carga de compresión, y debido al efecto Poisson, se produce un acortamiento vertical y ensanchamiento horizontal, como el expuesto en la Fig. 6.A. Obviamente esta deformación es de milésimas por lo que durante el ensayo no podemos observarlo visualmente; sin embargo si podemos medirlo y cuantificarlo gracias a la instrumentación con bandas extensométricas a 0° y 90°. El efecto Poisson generará pequeñas tracciones perpendiculares derivadas en la probeta, representadas en la Fig. 6.B.

Si la probeta estuviese libre, o su tamaño fuese suficientemente grande, estas tracciones se prolongarían verticalmente a lo largo del eje principal de la probeta hasta su colapso. Sin embargo, la fricción que se produce entre el plato de la prensa y la cara de la probeta coacciona las cabezas de la probeta, impidiendo su libre movimiento. Esto provoca que la zona central se deforme más que las cabezas, como se representa en la Fig. 6.C, transformando las tracciones perpendiculares en esfuerzos de cortante e iniciándose las primeras roturas locales en los puntos más débiles de la probeta.

Una vez iniciado este proceso el colapso de la probeta es irreversible, pudiendo ser más dúctil o más frágil en función de la relación de resistencia mortero-ladrillo, grosores de junta o tamaño de los ladrillos. El colapso de la probeta muestra siempre una rotura en forma bi-cónica, representada en la Fig. 6.D, debida a un fallo por cortante.

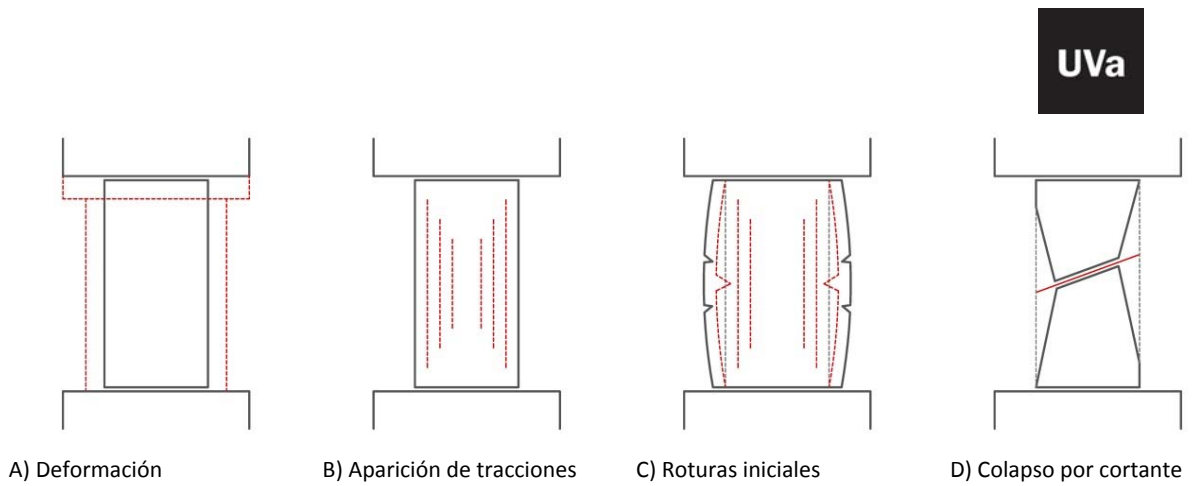


Fig. 6. Evolución de un ensayo a compresión. [7]

Sin entrar en consideraciones de variaciones por ejecución, la evolución del ensayo y la resistencia final de la probeta puede modificarse variando los condicionantes geométricos. Un mayor grosor en las juntas de mortero reduce la resistencia máxima de la probeta, pero permite una mayor deformación perpendicular que se traduce en roturas más dúctiles y prolongadas. Del mismo modo, un aumento en la ductilidad puede alcanzarse utilizando ladrillos de menores grosores que permitan un mejor asiento y reparto de cargas a lo largo de las juntas de mortero.

3.6. Comportamiento en muros

Los modos de rotura analizados en los ensayos pueden ayudarnos a entender el comportamiento de las estructuras de fábrica. Al fin y al cabo, como puede observarse en la Fig. 7 el comportamiento de un muro es semejante al analizado en las probetas.

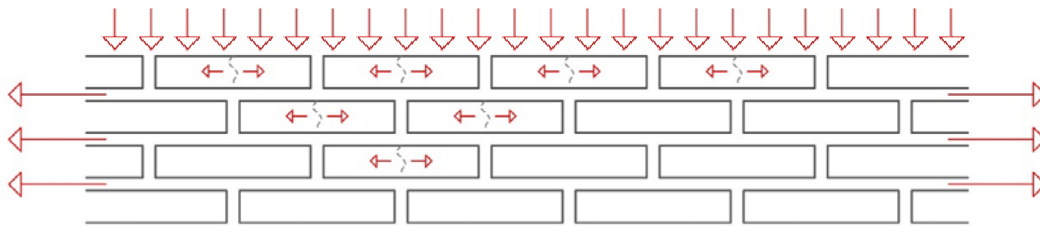


Fig. 7. Esquema de comportamiento de un muro de fábrica [7]

Sin embargo, las acciones que actúan sobre las estructuras de fábrica son dispares y no es común que un muro se vea sometido sólo y exclusivamente a compresiones como las probetas del ensayo. Además de la acción principal a compresión vertical, las estructuras de fábrica se ven sometidas a acciones horizontales o empujes de intensidad variable como consecuencia del viento, el sismo, excentricidades en la aplicación de la carga o asientos de las cimentaciones. Por ello, para entender el comportamiento de los muros de fábrica es necesario que se piense que además de una acción vertical principal, siempre aparecerá una acción horizontal secundaria, sometiendo el muro a esfuerzos combinados de compresión y cortante. De la relación entre la magnitud de ambos esfuerzos se desencadenarán unos modos de rotura u otros. En la Fig. 8 se resumen los modos de fallo más genéricos en función de la relación entre la intensidad de ambos esfuerzos.

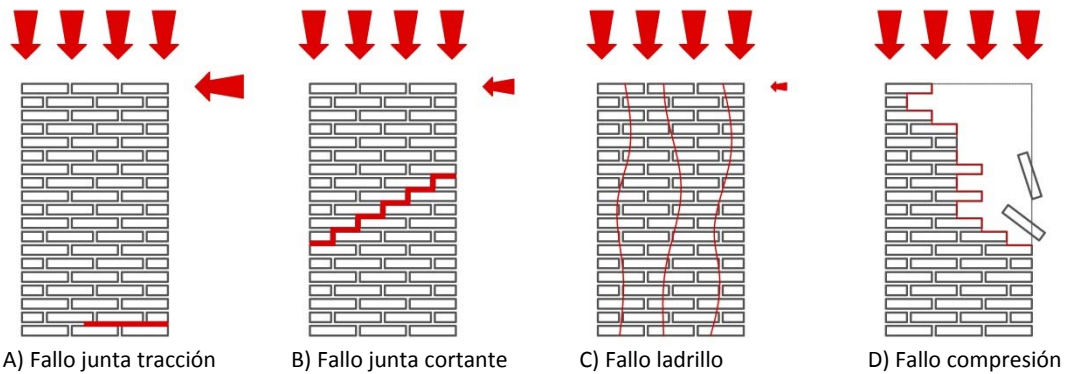


Fig. 8. Modos de rotura de estructuras de fábrica por compresión y cortante combinados.

Este comportamiento está ampliamente investigado, hasta el punto de que en la normativa europea (Eurocódigo 6) se recogen gráficos como el de la Fig. 9, donde se describen la compleja relación entre tensiones de compresión y cortante. Se logra caracterizar de este modo la influencia de uno y otro esfuerzo sobre el modo de fallo, y el área de seguridad al combinar ambas.

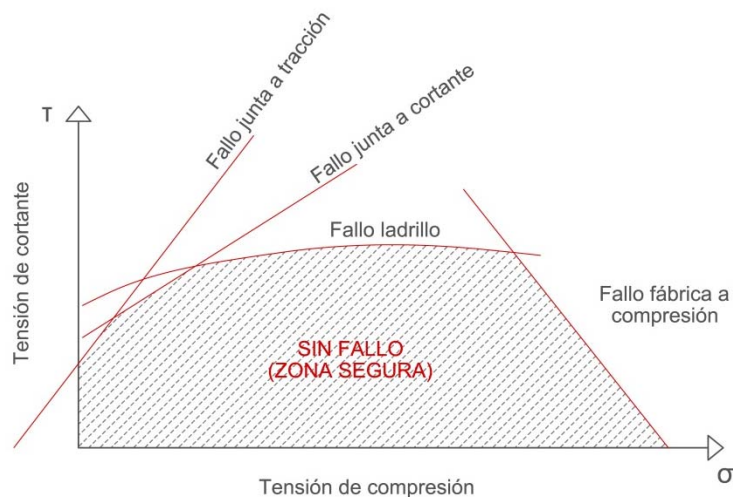


Fig. 9. Gráfico comparativo de fallos en fábrica ante tensiones de cortante y compresión combinadas (EC6).

En todo caso, el único modo de garantizar el adecuado margen de seguridad en el diseño y ejecución una estructura de fábrica es la realización de un adecuado control durante la ejecución y una campaña de ensayos exhaustiva.

4. MATERIAL Y MÉTODOS

4.1. Material : Ladrillo y mortero

- *Ladrillo*

Para la realización del taller se utilizan ladrillos perforados (tipo II), comúnmente llamado “tosco”, de dimensiones 240x115x80mm y resistencia característica a compresión declarada por el fabricante de $f_{bk}=10\text{MPa}$. A cada uno de los grupos se les entregan 10 ladrillos, así como una cubeta con agua para poder saturar el ladrillo. Además, en un segundo taller se utilizan también ladrillos perforados caravista (tipo I), de dimensiones 240x115x50mm y resistencia característica a compresión declarada por el fabricante de $f_{bk}=10\text{MPa}$. A cada uno de los grupos se les entregan 10 ladrillos, así como una cubeta con agua para poder saturar el ladrillo.

- *Mortero*

Se utiliza un mortero M5, de resistencia característica a compresión aproximada de $f_{mk}=5\text{MPa}$, mezclado en el propio laboratorio. Se utiliza arena de sílice (tipo “Tudela”) comprada envasada, cernida y limpia, y cemento portland tipo CEM II/B-L 32,5N, en una dosificación según peso de 6:1.

Para comprobar la adecuada plasticidad del mortero, se realiza finalizado el amasado el ensayo de cono de Abrams, midiéndose una altura de cono de 17cm. Además, se toman 8 probetas de mortero, de dimensiones 40x40x100mm, para su posterior ensayo a compresión.

4.2. Fabricación de las probetas

Los alumnos se dividen en grupos de cuatro, entregándoles el material (ladrillo y mortero), agua para saturar los ladrillo, y herramientas (paleta, nivel, mazo, ...). Son ellos los encargados de ejecutar sus propias probetas de acuerdo con las directrices y recomendaciones explicadas en el aula (Fig.10 y 11).



A) Materiales entregados.



B) Grupo de alumnos ejecutando su probeta.

Fig. 10. Materiales y laboratorio durante la ejecución de las probetas.



Fig. 11. Ejecución de las probetas de fábrica realizadas por los propios alumnos.

Este proceso de ejecución debe permitirles constatar la importancia del factor humano y el necesario control de los procesos de ejecución para garantizar la seguridad de las estructuras de fábrica.

4.3. Equipo

Para la realización de los ensayos a compresión se utiliza una prensa hidráulica Mod. Ibertest, con una carga máxima de 1500kN, realizando control de ensayo por velocidad de carga. El equipo no dispone de control informático, mostrando la fuerza analógicamente en un display. Para poder recoger digitalmente la fuerza aplicada se conecta a la salida analógica del equipo (10V), un equipo de adquisición de datos Mod HBM Quantum 840MX, donde a través de su software de ensayo Catman, puede traducirse el voltaje recogido en fuerza. Para realizar la conexión entre ambos equipos se realiza una adaptación con un latiguillo con un Conector DIN 5/180 (Prensa) en una de las cabezas, y un conector VGA DE-15 en la otra. La conversión voltaje-fuerza realizada es de: $10V \rightarrow 21366T$. A partir de esa conexión, puede utilizarse el programa CATMAN HBM para monitorizar y controlar la evolución del ensayo a través de gráficos de carga (Fig.12).



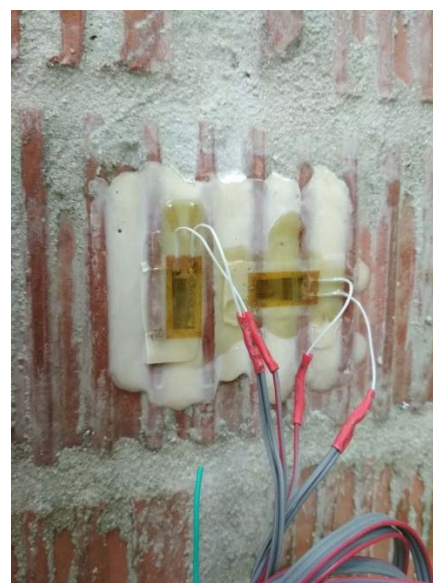
Fig. 12. Detalle de los equipos de ensayo.

La deformación de la probeta durante el ensayo se mide con la colocación de dos extensómetros LVDT de 100mm de carrera, modelo HBM LVDT WA-100, conectados al equipo de adquisición de datos Mod HBM Quantum 840MX, de modo que puede mostrarse durante la realización del ensayo la gráfica fuerza-deformación. La deformación de la probeta se calcula comparando la distancia final con la inicial según $\epsilon=AL/L$; donde L=altura de la probeta (mm) y AL=carrera del extensómetro. La deformación real se obtiene como la media de ambos extensómetros, colocados en caras opuestas de la probeta.

Adicionalmente se instrumenta cada probeta con dos bandas extensométricas adheridas sobre la cara del ladrillo central, una en dirección a la aplicación de la fuerza (0° =llagas), y otra perpendicular a la anterior (90° =tendeles). Se utilizan bandas extensométricas unidireccionales, tipo HBM LY41-10-120, con una longitud de rejilla de 10mm, para los ladrillos tosco (Fig.13), y rosetas tipo HBM XY41-6-120 para los ladrillos caravista (Fig.14). Ambas pegadas al ladrillo con adhesivo bicomponente HBM X60. En el anexo 2 se detallan las propiedades y características de las bandas extensométricas.

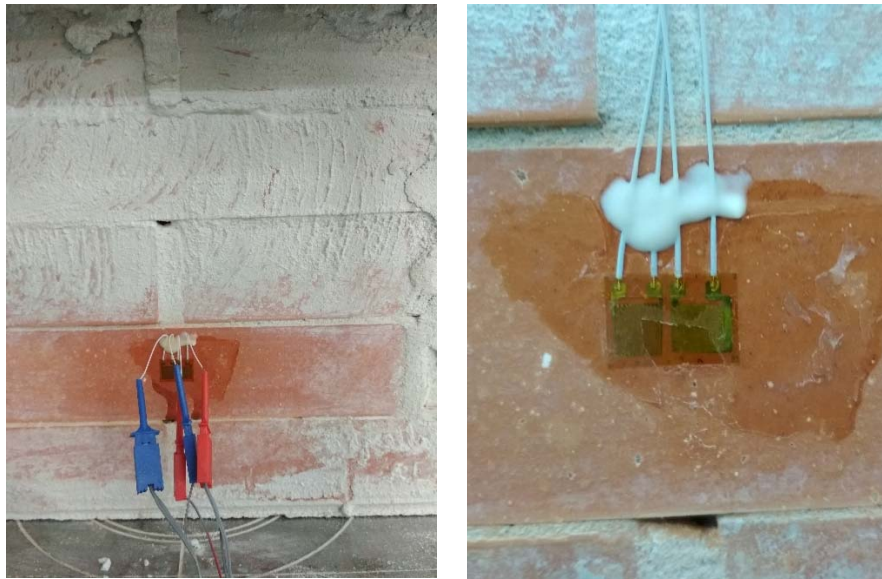


A) Pegado bandas extensométricas



B) Bandas colocadas.

Fig. 13. Instrumentación de probetas con bandas extensométricas (Ladrillo tosco con bandas aisladas).



A) Banda extensométrica en roseta (0°+90°) instrumentada.

B) Detalle de banda en roseta (0°+90°) colocada.

Fig. 14. Instrumentación de probetas con bandas extensométricas (Ladrillo visto con roseta).

La colocación de las galgas se realiza para poder medir la deformación del ladrillo en la dirección de carga y su perpendicular, de modo que pueda constatarse la rotura por tracción perpendicular de los mismos. También se instrumentan las probetas de mortero a ensayar (Fig.15).



Fig. 15. Probeta de mortero instrumentada.

4.4. Ensayo a compresión (set up)

Los ensayos se realizan según la norma EN 1052-1 [3] titulada “Métodos de ensayo para fábricas de albañilería. Parte 1: Determinación de la resistencia a compresión”. Esta norma establece las dimensiones, instrumentación mínima y metodología para realizar un ensayo de fábrica a compresión en condiciones reproducibles (Fig.16).

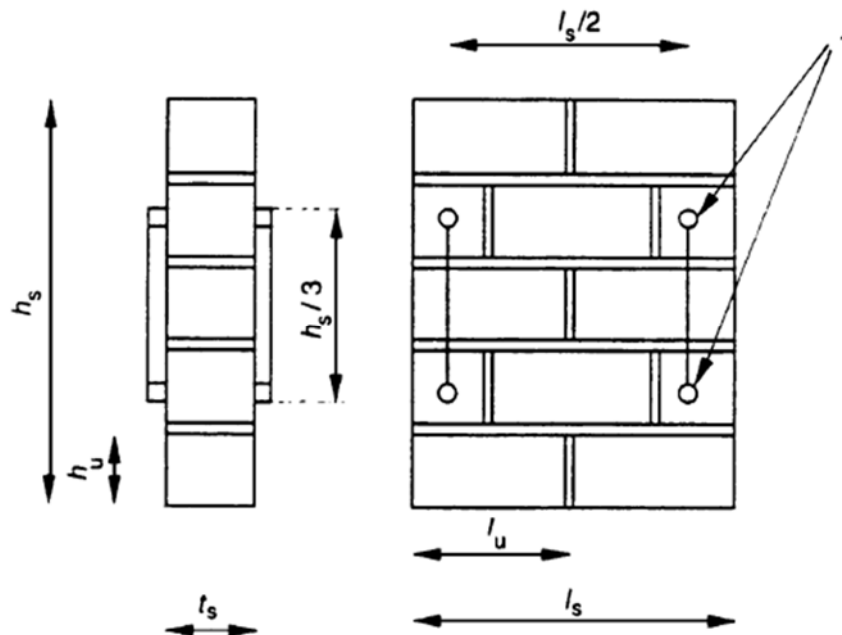
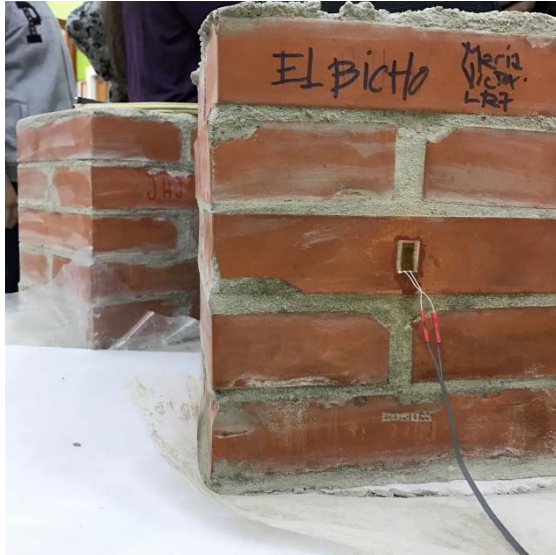


Fig. 16. Instrumentación de la probeta según Norma EN 1052-1.

Los grupos tienen la libertad de realizar una probeta prismática (1pie) o una probeta alargada (1/2 pie), en función de su habilidad para ejecutarlas. Todas las probetas se refrendan en cabeza y base antes de realizar el ensayo (Fig.17). La aplicación de la carga se controla por rampa de carga, con una velocidad de carga aplicada de 240 N/seg, y una velocidad de lectura de datos de 2Hz. Realizándose el ensayo hasta la rotura de las probetas (Fig.18).



Fig. 17. Algunas de las probetas ensayadas.



A) Probeta previo ensayo.

B) Rotura de probeta tras ensayo.

Fig. 18. Ensayo de probetas a compresión.

5. CÁLCULOS PREVIOS (ESTIMACIÓN DE CARGA)

5.1. Calculo de la resistencia a compresión

Según el CTE en su DB-SE-F, la resistencia característica (f_k) a compresión de las fábricas puede estimarse, conocida la resistencia de las piezas y del mortero, con la utilización de la tabla 4.4. del CTE:

Tabla 4.4 Resistencia característica a la compresión de fábricas usuales f_k (N/mm²)

Resistencia normalizada de las piezas, f_b (N/mm ²)	5		10	15		20		25	
Resistencia del mortero, f_m (N/mm ²)	2,5	3,5	5	7,5	7,5	10	10	15	15
Ladrillo macizo con junta delgada	-	-	3	3	3	3	3	3	3
Ladrillo macizo	2	2	4	4	6	6	8	8	10
Ladrillo perforado	2	2	4	4	5	6	7	8	9
Bloques aligerados	2	2	3	4	5	5	6	7	8
Bloques huecos	1	1	2	3	4	4	5	6	6

No obstante, en su anexo C el CTE permite obtener una aproximación más precisa, conocidos los valores reales (previo ensayo) a compresión de las piezas cerámicas y mortero.

$$f_k = K \cdot f_b^{0,65} \cdot f_m^{0,25}$$

con f_m no mayor que 20 N/mm², ni que 0,75 f_b . Donde:

- **K** es una constante, de valor:
 - en muros de una hoja, cuando el grueso de la fábrica sea igual al tizón o a la soga de las piezas $K = 0,60$ para piezas macizas, $K = 0,55$ para piezas perforadas, $K = 0,50$ para las aligeradas y $K = 0,40$ para las huecas.
 - en muros de dos hojas o con suturas continuas, $K = 0,50$ para piezas macizas, $K = 0,45$ para las perforadas y $K = 0,40$ para las aligeradas
- **f_b** es la resistencia normalizada a la compresión de las piezas de fábrica, en la dirección del esfuerzo, en N/mm²
- **f_m** es la resistencia a la compresión especificada del mortero ordinario en N/mm², no mayor que 20 N/mm², ni que f_b

En este caso, se realizan ensayos a compresión de los ladrillos y del mortero utilizados en los ensayos para que los alumnos puedan obtener un valor lo más fidedigno posible a la realidad.

DATOS:

$K = 0,55$

$f_b = 11,5 \text{ MPa}$ (media 5 probetas ensayadas)

$f_m = 6,8 \text{ MPa}$ (media de 5 probetas ensayadas)

CÁLCULO RESISTENCIA (CTE Anexo C)

$$F_k = k \cdot f_b^{0,65} \cdot f_m^{0,25}$$

$f_k = 4,3445 \text{ MPa}$

CÁLCULO FUERZA MÁXIMA:

Área probeta (240x240mm) = 57600mm²

Fuerza rotura estimada (k) = 250,24 kN

5.2. Estimación de la carga de rotura de cada probeta.

Todos los grupos realizan la probeta en el mismo laboratorio (iguales condiciones ambientales), utilizando los mismos ladrillos y mortero (iguales materiales), por lo que la variación en el comportamiento de cada probeta puede considerarse fundamentalmente al operario (distinta ejecución). Para dar la carga final de la probeta, cada grupo deberá debatir que coeficiente de seguridad aplica a su probeta, en función de su experiencia durante la ejecución.

Tabla 4.8 Coeficientes parciales de seguridad (γ_M)

Situaciones persistentes y transitorias ⁽¹⁾	Categoría de la ejecución			
	A	B	C	
Resistencia de la fábrica Categoría del control de fabricación ⁽²⁾	I	1,7	2,2	2,7
	II	2,0	2,5	3,0
Resistencia de llaves y amarres	2,5	2,5	2,5	
Anclaje del acero de armar.	1,7	2,2		
Acero (armadura activa y armadura pasiva)	1,15	1,15		

⁽¹⁾ Para las comprobaciones en situación extraordinaria, los coeficientes de llaves y amarres son los mismos; de las fábricas los coeficientes son 1,2 1,5 y 1,8 respectivamente para las categorías A B y C.
⁽²⁾ Categorías según 8.1.1

Con el ladrillo de Cat.II utilizado, y suponiendo la máxima categoría de ejecución (A), el coeficiente de seguridad a aplicar sería $\gamma_M=2,0$

De modo que la resistencia de cálculo a utilizar sería de:

$$f_k=4,3445 \text{ MPa}$$

$$f_d=4,3445/ 2,0$$

$$f_d= 2,17 \text{ MPa}$$

Siempre que los resultados de la probeta sean iguales o superiores a este valor nuestra estructura de fábrica sería segura.

5.3. Cálculo del módulo de elasticidad

El CTE en su DB-SE-F, también permite estimar el módulo de deformación de la fábrica (pto. 4.6.5 Deformabilidad). Para estados límite de servicio (ELS) el módulo de elasticidad se estima como:

$$E= 0,6 * (1000 * f_k)$$

DATOS:
 $f_k=4,3445 \text{ MPa}$

CÁLCULO MÓDULO ELASTICIDAD (CTE Anexo C)
 $E= 600 \cdot f_k$
 $E=2606,7 \text{ MPa}$

Al monitorizar fuerza y desplazamiento global con los LVDTs, es posible comparar el módulo de elasticidad estimado y el módulo de elasticidad real de la probeta medido sobre la pendiente de la gráfica Tensión-deformación, en la rampa elástica inicial.

6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Todas las probetas están realizadas con los mismos materiales, no obstante, al haber sido fabricadas por distintos grupos, se introduce variaciones sensibles en los grosores de llaga y tendeles, errores de niveles, o errores de ejecución, que van a generar alteraciones en el comportamiento mecánico de cada probeta.

Los principales resultados obtenidos del ensayo de la probeta se resumen en la Tabla 4:

Tabla 4. Resumen de resultados obtenidos en el ensayo.

	F_{Max} (kN)	Tensión (MPa)	LVDT (mm)	Deformación (mm/mm)	Galga 0º (µm/m)	Galga 90º (µm/m)
Grupo 1	196,15	3,39	2,71	0.0102	-91,28	+31,52
Grupo 2	195,32	3,38	1,43	0,0057	-163,11	+472,23
Grupo 3	196,74	3,41	2,31	0,0095	-101,41	+104,29
Media	196,07	3,39	2,15	0,0085	-118,60	+202,68
SD	0,71	0,01	0,65	0,0024	38,87	236,25
COV (%)	0,30	0,37	24,87	23,35	26,77	95,18

6.1. Fuerza máxima de rotura (Gráfica fuerza-desplazamiento)

La fuerza máxima soportada por las probetas es, como era de esperar, muy similar en todas ellas, con un valor medio de 196kN y un coeficiente de variación de sólo 0,30%. Sin embargo, los modos de rotura no son exactamente idénticos. Como puede observarse en la Fig. 19.C, la probeta del grupo 3 sufre un proceso de plastificación previo al colapso, mientras que el resto de probetas sufre una rotura frágil. Este diferente comportamiento puede explicarse por la ejecución, una correcta ejecución, con llagas anchas y aparejos nivelados permite repartir la carga de forma más homogénea y obtener roturas más “dúctiles”. Una mala ejecución, o el uso de llagas excesivamente delgadas condicionan la rotura “frágil” de las probetas de los grupos 1 y 2.

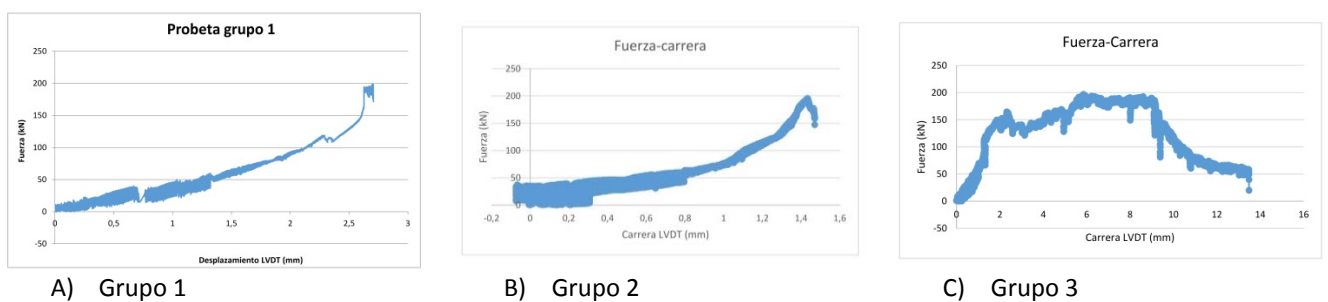


Fig. 19. Gráficos de fuerza-desplazamiento de las distintas probetas ensayadas.

La tensión máxima soportada por las probetas alcanza un valor medio de 3,39MPa, superior a la teórica estimada en 2,17MPa, y por tanto del lado de la seguridad.

A partir de la pendiente de la gráfica Tensión-Deformación en su tramo “elástico”, puede obtenerse analíticamente el módulo de elasticidad real de cada una de las probetas ensayadas. Según la ley de Hooke,

$$\sigma = E \cdot \epsilon$$

donde,

σ = Tensión del material (MPa)

E= Módulo de elasticidad (MPa)

ϵ = Deformación unitaria (mm/mm)

A partir de esta ley puede obtenerse el módulo de elasticidad como la pendiente de la curva:

$$E = \frac{\sigma_2 - \sigma_1}{\epsilon_2 - \epsilon_1}$$

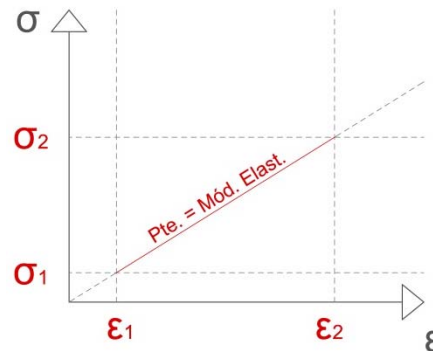


Fig. 20. Obtención del módulo de elasticidad a partir de la pendiente de la recta.

6.2. Deformaciones 0 y 90 grados

En cada probeta se colocan dos bandas extensométricas sobre el ladrillo central de la probeta. Una midiendo a 0º respecto a la aplicación de la carga, y la otra a 90º. Con esta instrumentación se mide la deformación que sufre el ladrillo, y se intenta confirmar experimentalmente la aparición de tracciones perpendiculares en la probeta pese a tratarse de un ensayo a compresión pura.

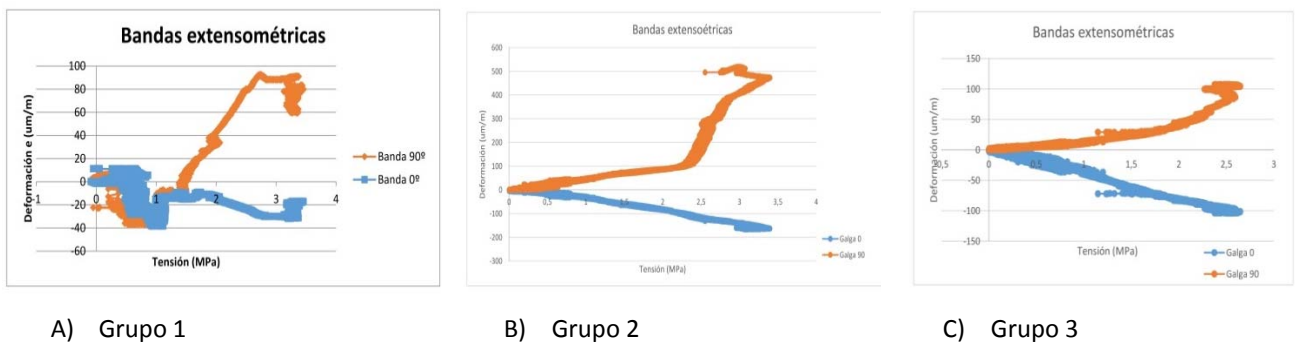


Fig. 21. Gráfico deformación-tensión medido con las bandas extensométricas a 0º y 90º.

En la Fig. 21 se observan las gráficas de deformación-tensión, con las bandas extensométricas a 0º en azul, y las bandas extensométricas a 90º en naranja. Puede observarse que en todos los casos, se mide una mayor deformación a 90º (tracción perpendicular) que a 0º (compresión pura), lo explica el tipo de rotura observado.

7. CONCLUSIONES

Varias son las conclusiones que pueden extraerse de los ensayos realizados:

1_Pese a realizarse un ensayo de compresión pura, aplicando la carga uniformemente repartida sobre toda la superficie de la probeta, el fallo y colapso se produce por la aparición de tracciones perpendiculares al eje de carga (medidas con las bandas extensométricas) que desencadena una rotura por cortante a lo largo de los puntos más débiles de la probeta.

2_La resistencia a compresión máxima alcanzada por la probeta, $media=3,39MPa$, es inferior a la resistencia nominal de los ladrillos ($11,5 MPa$) y mortero ($6,8MPa$) utilizados.

3_Todas las probetas utilizan en su fabricación materiales con las mismas propiedades mecánicas. Todas las probetas se fabrican bajo las mismas las mismas condiciones ambientales. Todas las probetas se curan el mismo tiempo en idénticas condiciones de laboratorio. Todas las probetas se ensayan el mismo día, con el mismo equipo y con idéntica rampa/velocidad de carga. Sin embargo, pueden observarse diferencias sensibles en los resultados. Estas variaciones únicamente poder ser consecuencia de la ejecución de cada grupo. Las pequeñas variaciones geométricas de aparejo, espesor de llagas y verticalidad; o los pequeños errores de ejecución, saturación previa de ladrillos o colocación de las piezas, son determinantes en el comportamiento final. En todo caso queda demostrado la gran influencia de la ejecución en el comportamiento final de las estructuras de fábrica, y como consecuencia la necesidad de realizar un correcto control de la ejecución por los técnicos en obra.

4_Los valores de resistencia estimados previamente al ensayo ($f_k= 4,35MPa$), según CTE, se aproximan suficientemente a los valores alcanzados en el ensayo ($media=3,39MPa$); y en todo caso los errores o variaciones se mantienen siempre del lado de la seguridad una vez aplicados los correspondientes coeficientes de seguridad ($f_d=2,17 MPa < 3,39 MPa$ reales). La probeta resiste un 46% más que la resistencia de diseño estimada, garantizándose de este modo la seguridad de la estructura diseñada.

8. AGRADECIMIENTOS

Este taller ha podido realizarse gracias a la aportación económica asignada por el Departamento de Construcciones arquitectónicas (CA-IT-MMCTE) de la ETS Arquitectura de la Universidad de Valladolid, dentro de su programa de Prácticas Docentes Curso 2018/2019, y al apoyo personal de su director Dr.Luis-Alfonso Basterra a este tipo de iniciativas docentes.

Agradecer la ayuda del técnico de laboratorio Ernesto y del técnico de mantenimiento Ramón; sin cuya desinteresada colaboración no habrían podido realizarse este taller.

9. REFERENCIAS

NORMATIVA

- [1] Código Técnico de la Edificación (CTE) – Documento Básico Seguridad Estructural, Fábrica (DB-SE-F)
- [2] Eurocódigo 6 : Desing of Masonry Structures (EN 1996-1-2; 2; 3)
- [3] EN 1052-1:1999 “Métodos de ensayo para fábricas de albañilería. Parte 1: Determinación de la resistencia a compresión”.

MONOGRAFÍAS

- [4] Como, M. “Statics of Historic Masonry Constructions”. Springer. 2013
- [5] McNary, S.W.; Abrams, P.D. “Mechanics of masonry in Compression”, Journal of Structural Engineer, 111, pp 857-870, 1985.
- [6] Hemant et al. “Strees-strain characteristics of clay brick masonry under uniaxial compression”. Journal of materials in Civil Engineering. September 2007.
- [7] AA.VV. “Masonry Construction Manual” Ed. Birhäuser. 2001.
- [8] Hendry, A.W.; Sinha, B.P.; Davies, S.R. “Design of Masonry structures” Ed. Spon, University of Edinburgh, UK. 2004.
- [9] Dell Argiles, J.M. “El muro de ladrillo”. Hispalyt. Madrid. 1992
- [10] Maña I Reixach, F. “La seguridad en las estructuras de fábrica” Colegio de aparejadores y arquitectos técnicos de Tarragona. Tarragona. 2004.

10. ANEXO 1. FICHA DE MATERIALES

DECLARACIÓN DE PRESTACIONES MARCADO CE

Nº: 009/06-CE/2013


CERANOR, S.A.

1.- CODIGO DE IDENTIFICACION UNICA DEL PRODUCTO. TIPO: CL PIEZA: P GRUPO: G3 CATEGORIA: II

Designación comercial	Ref.	Código de identificación única del producto
Perforado de 10	PF-10	CL-P-II 10 1001(D1) 240x115x100 -A- L0,35 E≤ 4,0 N1800(D1) -G3- FR45 B0,15 I≤4,5 M≤0,5
Perforado de 7	PF-7	CL-P-II 10 1001(D1) 240x115x70 -A- L0,35 E≤ 4,0 N1800(D1) -G3- FR45 B0,15 I≤4,5 M≤0,5

2.- USO PREVISTO POR EL FABRICANTE.

Pieza tipo P, grupo G3, categoría II, con uso previsto en fabrica de albañilería protegida en elementos exteriores e interiores con exigencias acústicas, térmicas y de fuego; fabricas estructurales sustentantes; con junta de mortero corriente.

3.- FABRICANTE.

CERANOR, S.A. Poligono Industrial El Tesoro, s/n 24200 Valencia de Don Juan -LEÓN- www.ceranor.es

4.- SISTEMA DE EVALUACIÓN.


4

5.- NORMA ARMONIZADA.

EN 771-1:2011+A1:2015 (UNE-EN 771-1:2011+A1)

6.- DECLARACION DE PRESTACIONES (DdP)



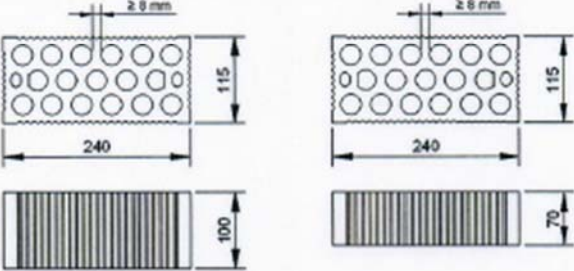
La prestación del producto identificado anteriormente junto con ficha técnica de características N° Referencia DdP 009/06-CE/2013 es conforme con las prestaciones declaradas. La presente declaración de prestaciones se emite de acuerdo con el Reglamento (UE) n° 305/2011, bajo la responsabilidad exclusiva del fabricante identificado anteriormente.

Firmado por y en nombre del fabricante por:	Florentino Cueto Álvarez Director Técnico	FIRMA: 
Lugar y fecha de emisión:	Valencia de Don Juan, 09 de junio de 2017	

Fecha de revisión: 09-06-17

Anula y sustituye a la de fecha: 01-07-13

DdP página 1 de 2

FICHA TÉCNICA MARCADO CE					
Nº de Referencia DdP: 009/06-CE/2013					
		CERANOR, S.A. 24200 Valencia de Don Juan - LEÓN -			
ORGANISMO NOTIFICADO:		SISTEMA DE EVALUACIÓN:		4	06
USO PREVISTO: Pieza tipo P, grupo G3, categoría II, con uso previsto en fábrica de albañilería protegida en elementos exteriores e interiores con exigencias acústicas, térmicas y de fuego; fabricas estructurales sustentantes; con junta de mortero corriente.					
CROQUIS 					
(dimensiones en mm)					
Designación comercial	Ref.	Codigo de identificación unica del producto			
Perforado de 10	PF-10	CL-P-II 10 1001(D1) 240x115x100 -A- L0,35 Es 4,0 N1800(D1) -G3- FR45 B0,15 I ≤4,5 M ≤0,5			
Perforado de 7	PF-7	CL-P-II 10 1001(D1) 240x115x70 -A- L0,35 Es 4,0 N1800(D1) -G3- FR45 B0,15 I ≤4,5 M ≤0,5			
CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS			NORMATIVA ENSAYO	VALORES GARANTIZADOS POR EL FABRICANTE	
				PERFORADO DE 10	PERFORADO DE 7
ASPECTO Y ESTRUCTURA	Exfoliaciones/Laminaciones:		Visual 6 piezas	0 piezas	
	Fisuras:			≤ 2 piezas	
	Desconchados:			≤ 1 piezas	
TOLERANCIAS DIMENSIONALES	T1	R1	Largo (mm)	240	240
			Ancho (mm)	115	115
			Alto (mm)	100	70
ESPESOR DE PAREDES			UNE-EN 772-16	≥ 8,0	≥ 8,0
PLANEIDAD DE LAS CARAS			UNE-EN 772-20	≤ 4,0	
PORCENTAJE DE HUECOS (%)			UNE-EN 772-3	45	
VOLUMEN DEL MAYOR HUECO (% sobre bruto)			UNE-EN 772-3/9/16	≤ 4,0	
ESPESOR COMBINADO DE TABIQUILLOS (%) (Sentido flujo calor fábrica)			UNE-EN 772-16	≥ 20	
SUCCIÓN (Kg./m² x min.)			UNE-EN 772-11	≤ 4,5	
RESISTENCIA A COMPRESIÓN NORMALIZADA: (N/mm²)			UNE-EN 772-1	≥ 10,0	
DENSIDAD (Kg./m³)			UNE-EN 772-13	Curas de apoyo según RL55: Tablas referenciadas con mortero	
Tolerancia: D1 ± 10%			Absoluta:	1800	
			Aparente:	1001	
DURABILIDAD (Resistencia al hielo/deshielo)			UNE 67028 EX	F0	
PROPIEDADES TÉRMICAS (Valor tabulado de Catalogo Elementos Constructivos)			Catalogo CTE	0,350	
PERMEABILIDAD AL VAPOR DE AGUA (μ)				5/10	
CONTENIDO EN SALES SOLUBLES ACTIVAS			UNE-EN 772-5	50	
EXPANSIÓN POR HUMEDAD (mm/m)			UNE 67036	≤ 0,5	
REACCIÓN AL FUEGO			UNE-EN 13501-1	Clase A1	
ADHERENCIA (N/mm²)			Anexo C UNE EN 998-2	0,15	
OBSERVACIONES:					
INSTRUCCIONES: Condiciones de utilización, ejecución y manejo según la forma tradicional. Soluciones constructivas www.ceranor.es					
SEGURIDAD: No contiene sustancias peligrosas. Reglamento (UE) nº 305/2011 Art.6 punto 5; Art.31 Reglamento (CE) nº 1907/2006.					
Fecha revisión: 09-06-17		Anula y sustituye a la de fecha: 01-07-13		DdP: página 2 de 2	

11. ANEXO 2. ESPECIFICACIONES BANDAS EXTENSOMÉTRICAS



Dehnungsmessstreifen
Strain gages
Jauges d'extensométrie

Bestellnummer
 Order No.
 No. de référence

K-LY4-1-09-120-0



Typ
 Type
 Type

10/120 LY41



Stückzahl
 Contents
 Quantité

10



Temperaturkoeffizient
 des k-Faktors
 Temperature coefficient
 of gage factor
 Coefficient de température
 du facteur k

93 ±10 [10⁻⁶ / K]
 (-10°C ... +45°C)

Folienlos
 Foil lot
 Lot de la feuille

A417/30



Herstellungsls
 Production batch
 Lot de fabrication

812073313



Daten / Data / Données



Widerstand
 Resistance
 Résistance

120 Ω ±0.35 %

k-Faktor
 Gage factor
 Facteur k

2.07 ±1.0 %



Querempfindlichkeit
 Transverse sensitivity
 Sensibilité transverse

0.2 %

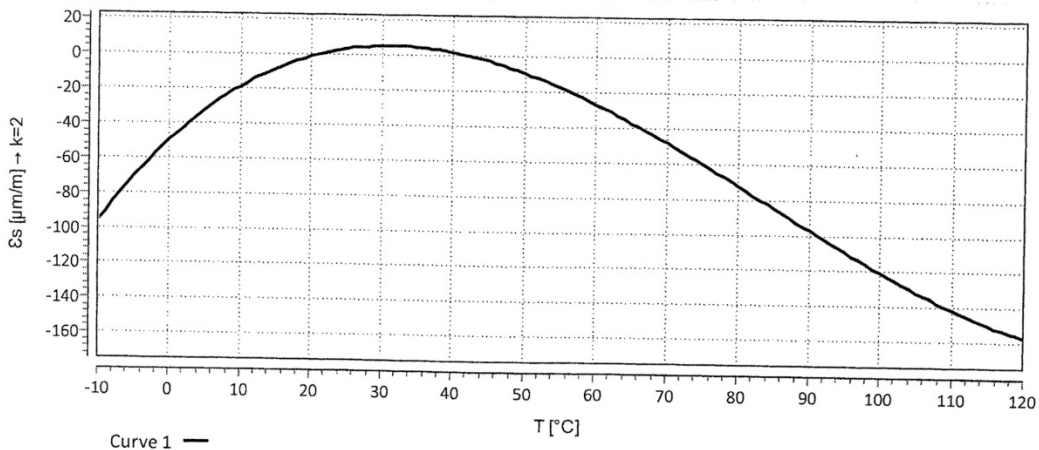


Temperaturkompensation: Ferritischer Stahl mit
 Temperature compensation: steel with
 Compensation de température: acier avec

α = 10.8 [10⁻⁶ / K]

Max. effekt. Brückenspeisespannung
 max. rms bridge excitation voltage
 tension d'alim. de pont maxi eff.

13.0 V



$$\epsilon_s(T) = -36.81 + 3.19 \cdot T - 7.55E-02 \cdot T^2 + 3.01E-04 \cdot T^3 \pm (T-20) \cdot 0.30 [\mu\text{m/m}] + 0.639 \cdot (T-20) [\mu\text{m/m}]$$

Alle technischen Daten nach VDI/VDE 2635. Geben Sie bei Rückfragen bitte Bestellnummer und Herstellungsls an.

All specifications in accordance with VDI/VDE 2635. In case of further inquiries please indicate order no. and production batch number.

Toutes les caractéristiques techniques selon la norme VDI/VDE 2635. Dans toutes communications, prière d'indiquer le numéro de commande et le numéro du lot de production.

Temperaturgang der Dehnungsmessstreifen bei Applikationen mit oben angegebenen Wärmeausdehnungskoeffizienten α. Gemessen bei kontinuierlicher Temperaturänderung.

Kennlinie 1: DMS mit 50mm Teflondraht.
 T = Temperatur in °C
 (dimensionslos)

Réponse en température des jauges d'extensométrie appliquées sur des matériaux dont des coefficients de dilatation thermique α sont indiqués. Mesurée à variation continue de la température.

Courbe 1: Jauges avec 50mm pattes de raccordement de teflon.
 T = température en °C
 (sans dimension)

The **temperature response** refers to strain gages bonded to materials with specified coefficients of thermal expansion α. Values are measured with continuous temperature variation.

Curve 1: Strain gages with 50mm teflon leads.
 T = temperature in °C
 (dimensionless)

Kopfdaten / Header / Titre



A point (".") is used as decimal separator in data; the separator needs to be configured accordingly for import into Excel.



ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR
DE ARQUITECTURA DE VALLADOLID



Universidad de Valladolid