

Arco de ladrillo sito en la estación Campo Grande de Valladolid: Caracterización geométrica, material, estructural y constructiva

J.A. Martínez¹, D. Rubio², I. Lombillo³, L. Villegas³, C. Thomas⁴, L. M. García⁵

¹ Dpto. de Ingeniería Civil. Universidad de Burgos. Escuela Politécnica Superior

² Dpto. de Estructuras. Eypo Ingeniería, S.L. (www.eypo.es)

³ Dpto. de Ingeniería Estructural y Mecánica, Universidad de Cantabria. E.T.S. de Ingenieros de Caminos, España. (www.gted.unican.es)

⁴ Dpto. Ciencia e Ingeniería del Terreno y de los Materiales, Universidad de Cantabria, E.T.S. de Ingenieros de Caminos, C. y P. España.

(www.ladicim.unican.es)

⁵ Dpto. de Construcciones Arquitectónicas e Ingeniería de la Construcción y del Terreno. Universidad de Burgos. Escuela Politécnica Superior.

Resumen. En este documento se presenta una propuesta de caracterización de una estructura antigua de fábrica de ladrillo. En concreto nos referimos al Arco de Ladrillo situado junto a la actual estación de ferrocarril de Campogrande, en Valladolid. Se describen el conjunto de trabajos encaminados a su caracterización geométrica, y mecánica, y en este último caso tanto de los materiales constituyentes por separado, como de su caracterización mecánica en conjunto, y abarcando el estudio tanto a la parte vista de la estructura, como a su contacto con el subsuelo.

1 Introducción

En el presente trabajo se describe el procedimiento de actuación ante una construcción antigua muy arraigada en el entorno en el que se encuentra emplazada. Responde a situaciones que con frecuencia se dan en la práctica, en donde coexisten de una manera casi muda, con el quehacer cotidiano de una sociedad que transita junto a estas construcciones sin hacerse apenas preguntas sobre sus orígenes, la propia justificación de su existencia, o incluso la motivación de la necesidad de su conservación o pervivencia.

Cuando se plantean esos interrogantes, es necesario aplicar un conjunto de técnicas o herramientas muy diversas, y unos protocolos de intervención singulares y poco repetitivos.

2 Planificación de la intervención

En los aspectos técnicos, el trabajo se planificó de forma que se pudiera dar respuesta a las siguientes cuestiones:

- tipo de materiales y características de los mismos
- determinación del material de relleno
- evaluación del estado tensional bajo peso propio
- tipo de cimentación
- caracterización del contacto con el terreno.

Para ello el estudio se apoyó en un conjunto de técnicas de diagnóstico entre las que podemos citar las siguientes:

- fotogrametría apoyada en topografía láser
- difracción de rayos X
- dispersión de rayos X
- ensayos de compresión
- ensayos de heladicidad
- técnica de gato plano
- catas, sondeos y penetrómetros
- fotografía de detalle

Un resumen de todas ellas se resumen en los apartados siguientes.

3 Caracterización geométrica

Uno de los trabajos realizados para el presente trabajo ha consistido en la toma de datos para la caracterización geométrica del mismo. La misma era necesaria, en primer lugar, para documentar la situación real del Arco, pero también para otros trabajos como son la evaluación de su comportamiento estructural y la definición de la cimbra en la fase de proyecto de ejecución.

Para la caracterización geométrica se ha empleado la técnica de la fotogrametría, apoyada con la de la topografía láser.

Para la captura de la información, se empleó el Láser escáner 3D FARO Photon 80, que se caracteriza por ser el más rápido (hasta 120.000 medidas por segundo) y preciso (fiabilidad de 2 mm a 25 m) de los sistemas de medición de tiempo de vuelo y desfase del mercado hasta el momento, que lo convierten en el ideal en el ámbito de la ingeniería civil y arquitectura.

Una vez realizada la toma de datos, se siguen las siguientes fases de tratamiento:

- **Limpieza, registro y optimización:** En esta etapa la información recogida en campo pasó una serie de procesos para filtrar y unir la información en un único modelo, se elimina toda aquella información que no se desea (ruido), se encuentra la posición y rotación del instrumento para cada barrido en un sistema de

coordenadas específico y se crea un modelo homogéneo. El modelo se estructura y divide en partes para facilitar su manejo y comprensión. El resultado es una superficie es una nube de puntos, procesada, libre de ruido, en el mismo marco de referencia del levantamiento.



Fig 1: Vista en perspectiva de la nube de puntos del Arco de Ladrillo.

- **Extracción de información:** El tratamiento combinado de la información fotogramétrica y de la nube de puntos permite la obtención de las características geométricas que definen el modelo. Una vez procesada la información se procedió a la restitución a escala de detalle de la información capturada.

A partir de los datos obtenidos con la topografía láser se ha dispuesto de un contorno de puntos exacto, para el intradós y trasdós respectivamente, pero sin ninguna definición geométrica concreta. En ese punto, mediante la ayuda de herramientas CAD se han ajustado curvas geométricas que se adaptaran la contorno real. Las curvas adoptadas han sido arcos de circunferencias de diferentes radios. El arco definido por sectores de circunferencia con curvatura creciente hacia la clave recibe el nombre de arco carpanel. En este caso se ha podido caracterizar el intradós por cinco arcos de circunferencia, uno central y dos laterales a cada lado. Sin embargo el trasdós, además de los 5 arcos de circunferencia, posee trazados rectilíneos en ambos extremos, tangentes a los arcos adyacentes.

Una primera observación de los datos obtenidos es que el resultado proporciona un diseño bastante armónico con una definición cuidada, hecha sin lugar a dudas por un proyectista experimentado.

La segunda observación es que aunque aparentemente su forma es simétrica, al tratar de ajustarle una definición geométrica se observa que realmente no lo es. A pesar de ello es prácticamente seguro que su proyecto sí que tuviera una definición geométrica exacta. La falta de concordancia entre lo proyectado y lo que realmente existe puede ser debido a errores de replanteo de la cimbra durante su ejecución, a pequeños ajustes o asentamientos tras el descimbrado, o a pequeños movimientos de la cimentación durante su existencia.

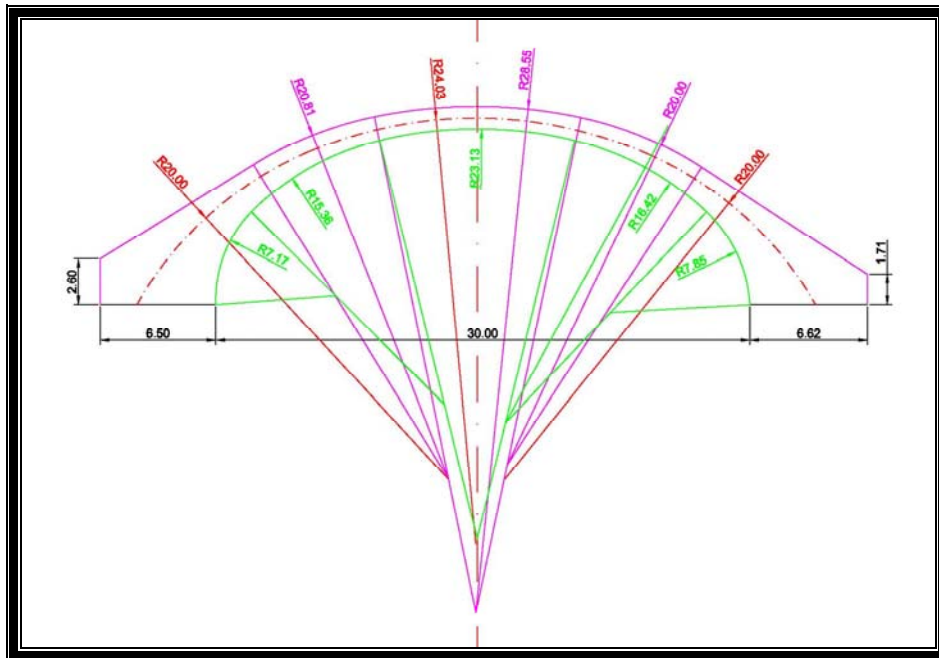


Fig 2: Definición geométrica del arco de ladrillo

4 Caracterización de materiales

Con objeto de valorar el estado de la construcción y establecer las posibles pautas encaminadas a conseguir una completa caracterización de los materiales, se desarrolló un estudio de los materiales formes de la fábrica de ladrillo del Arco, morteros y ladrillos.

En primer lugar se llevó a cabo una toma de muestras en 3 zonas bien diferenciadas del estribo Sur del Arco (Fig. 3 y 4). Se recogieron muestras de ladrillo de las 3 zonas indicadas en la Fig. 3. Igualmente, también se tomaron muestras de los morteros en cada una de las zonas referidas.



Fig. 3 y 4: Zonas de toma de muestras (la zona 1 corresponde con la cara opuesta a la mostrada en la fotografía) y detalle de un instante de las tareas de extracción.

Sobre los materiales considerados, se llevaron a cabo actuaciones específicas de cara a su caracterización óptima con relación a la función que desempeñan:

- Análisis visual de coloración y consistencia de los materiales.
- Caracterización física de los materiales: Ha comprendido la realización de ensayos para la determinación de las densidades, la porosidad y la absorción de distintas muestras preparadas para tal efecto.
- Caracterización mecánica de los materiales: Resistencia a compresión.
- Análisis químico elemental mediante microscopio electrónico de barrido, equipado con microanálisis por energía dispersiva de rayos X.
- Análisis mineralógico mediante difracción de rayos X de los morteros.

En lo que sigue se presentan los principales resultados y conclusiones obtenidas.

4.1 Morteros

En el transcurso de la inspección llevada a cabo se han identificado 3 tipos de mortero poco diferenciados. En cuanto a su **composición**, aparentemente, se trata de un mortero fabricado con arena de tipo silíceo, como relleno, en los que se ha utilizado cal como material conglomerante. Los morteros presentan un **estado** muy deteriorado que se manifiesta en una fácil disgregación de los mismos.

La **composición química elemental** (Fig. 5) de las muestras de mortero analizadas cuentan, como elemento mayoritario, el calcio, entre un 34-40 % en

peso, debido a la utilización de cal como elemento aglutinante. Finalmente, la presencia y proporciones de silicio, aluminio, potasio y sodio hacen pensar que el árido utilizado en la fabricación de los morteros es de tipo granítico, reforzando este hecho la hipótesis de que el origen del árido de relleno tiene su procedencia en algún río de la zona.

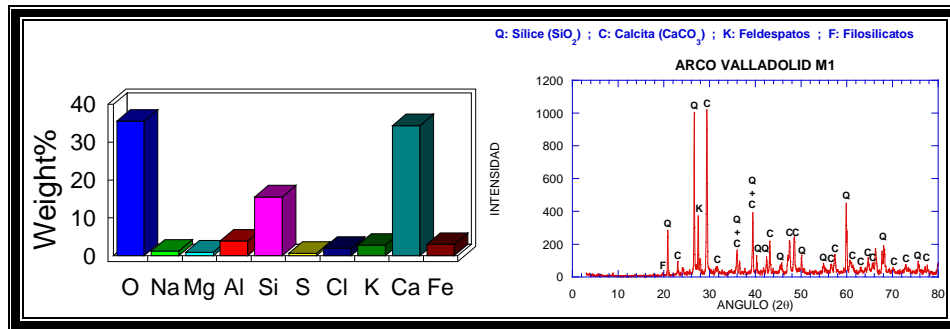
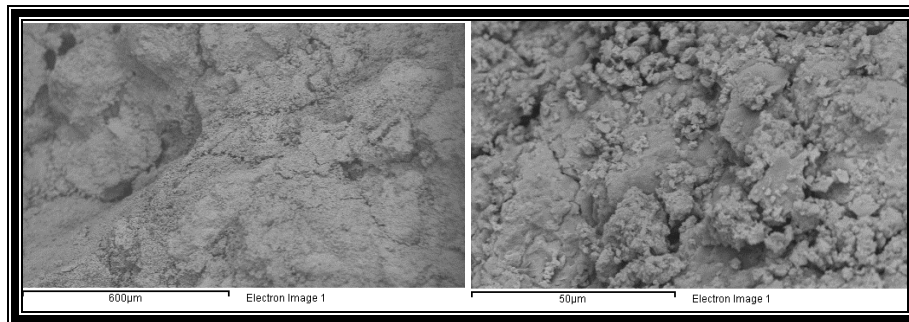


Fig. 5: Composición química elemental en peso del mortero de la muestra MZ1.

Fig. 6: Análisis mineralógico del mortero MZ1.

En relación al **análisis mineralógico** de los morteros (Fig. 6), en las tres muestras se detecta la presencia de sílice, feldespatos y filossilicatos, procedente del árido empleado, y carbonato cálcico, producto de la meteorización de morteros de cal.

En cuanto a la **microestructura** del mortero (Figs. 7 y 8), éste se presenta como un material abierto, en concordancia con la alta porosidad y poca consistencia observada sobre las muestras llevadas al laboratorio.



Figs. 7 y 8: Micrografías del mortero de la zona 3.

4.2 Ladrillos

Los ladrillos, fabricados mediante técnicas hoy en día artesanales, presentan aspectos diferenciados según la zona o posición que ocupan: así, las caras más expuestas son las que han sufrido mayor deterioro, probablemente físico-químico, presentando ángulos más redondeados y superficies más alteradas

De la **inspección visual** de estos materiales, puede esperarse una baja densidad, una alta porosidad y una alta capacidad de absorción.

De los resultados obtenidos en la **caracterización física** (densidad, porosidad y absorción) de las muestras analizadas, puede deducirse que los tres tipos de ladrillo analizados son de características muy similares. La densidad relativa se sitúa en torno a los $1,86 \text{ g/cm}^3$, la absorción total es algo superior al 15% en peso de la muestra y la porosidad abierta se sitúa en torno al 33% en volumen de muestra. Como era de esperar, destacan la baja densidad y la alta porosidad de estos materiales.

La **resistencia mecánica**, a compresión, de los ladrillos de las distintas zonas, es mucho más homogénea de lo que cabría esperar en piezas artesanales de la época. Sin embargo, los ladrillos correspondientes a la zona 1 (13,46 MPa) presentan una resistencia a compresión notablemente inferior a la que presentan los ladrillos de las zonas 2 y 3 (22,60 Mpa y 23,31 Mpa, respectivamente), estando estos resultados (tabla 1) en concordancia con las propiedades físicas de los mismos: menor densidad y mayor porosidad.

Desde un punto de vista de evaluar la **durabilidad de los ladrillos** formes de la fábrica, se ha desarrollado una campaña experimental basada en la comparación del material, previamente y con posterioridad, a la ejecución de una serie de ciclos de hielo-deshielo y frente a ciclos de humedad-sequedad.

En relación con la evaluación del **envejecimiento por helada (ciclos hielo-deshielo)**, dicha valoración se ha llevado a cabo desde una doble óptica.

Por un lado se ha evaluado la resistencia a la helada mediante la pérdida de masa experimentada por las muestras antes y después de la ejecución de los ciclos (Fig. 9). Se ha obtenido una pérdida de masa de la zona 1 de entorno al 6 %, de alrededor del 1,5 % en la zona 2, y de algo más del 1 % en la zona 3.

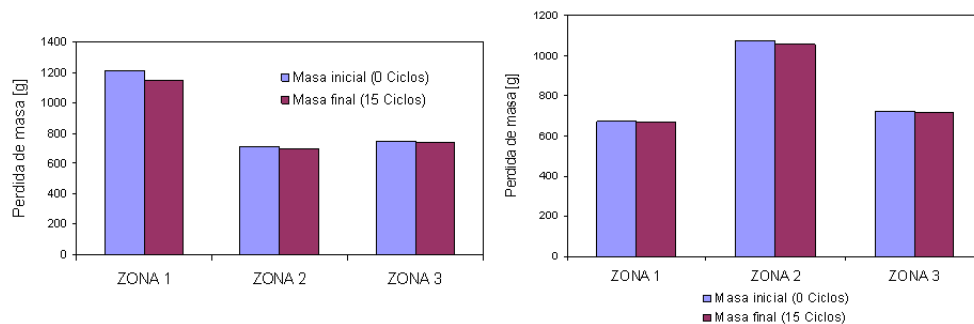


Fig. 9: Pérdida total de masa de las muestras obtenidas de las 3 zonas antes y después del envejecimiento por ciclos de hielo-deshielo.

Fig. 10: Pérdida de masa de muestras y testigos antes y después del envejecimiento por ciclos de humedad-sequedad.

Complementariamente se ha estimado la posible pérdida de resistencia mecánica mediante la realización de ensayos de rotura a compresión de los testigos obtenidos

de los ladrillos antes y tras haber completado el programa de ciclos previsto. Éstos resultados se presentan en la Tabla 1. Como era de esperar se ha producido una pérdida importante de la resistencia en las muestras que presentaban originalmente menor degradación.

Tabla 1: Evaluación de la resistencia a la helada por pérdida de resistencia.

	Testigo ZONA 1		Testigo ZONA 2		Testigo ZONA 3	
	0 Ciclos	15 Ciclos	0 Ciclos	15 Ciclos	0 Ciclos	15 Ciclos
Rm [MPa]	13,46	12,15	22,60	15,19	23,31	17,62
Pérd. [MPa]		1,31		7,41		5,69
Pérdida [%]		9,73		32,79		24,41

Por su parte, en relación con la valoración del **envejecimiento por choque térmico**, se ha evaluado la resistencia a los **ciclos de humedad-sequedad** mediante la pérdida de masa experimentada. Dicha pérdida de masa es muy inferior a la encontrada en los ensayos de hielo-deshielo por ser éste un método menos agresivo. Se ha encontrado para la zona 1 una pérdida de masa de entorno al 1,5 %, para la zona 2 una pérdida de cerca del 2,3 %, y finalmente, para la zona 3 aproximadamente de un 1,2 %. La gráfica 10 esquematiza la pérdida de masa que han sufrido el conjunto de probetas analizadas.

En cuanto a la **composición química elemental** de los ladrillos (Fig. 11 y 12), la mayoría de los constituyentes de las piezas cerámicas en sus caras internas (sin contacto atmosférico directo) son elementos típicos de la arcilla utilizada para fabricar elementos constructivos de este tipo. Sin embargo, las composiciones de las caras exteriores o expuestas presentan elementos cuyo origen es, probablemente, la contaminación ambiental (P, S, Cl y Ti, tabla 2), circunstancia que podría desencadenar erosión de origen químico, que sumada a la de origen mecánico, contribuiría a la desagregación superficial de los ladrillos (Fig.13).

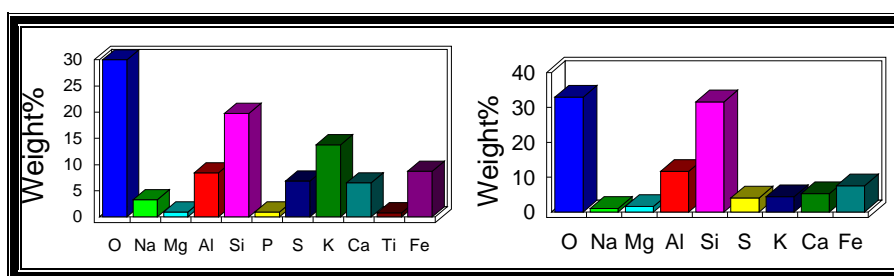


Fig.11: Composición química elemental en peso del ladrillo, en su cara exterior expuesta, LZ2.

Fig. 12: Composición química elemental en peso del ladrillo, en su cara interior, LZ2.

Tabla 2: Comparativa ladrillos: Análisis químico elemental, presencia [% en peso].

	Cara exterior o expuesta			Cara interior, no expuesta		
	Zona 1	Zona 2	Zona 3	Zona 1	Zona 2	Zona 3
O	31,22	29,98	35,09	32,36	32,89	32,53
Na	0	3,26	0,93	0	1	0
Mg	1,23	0,94	2,06	1,54	1,59	2,2
Al	10,57	8,45	9,54	12,98	11,7	11,82
Si	29,86	19,73	30,96	37,45	31,62	32,96
P	0	0,94	0	0	0	0
S	4,37	6,87	0,6	0	4,05	0
Cl	0	0	0,55	0	0	0
K	4,89	13,78	3,45	4,34	4,4	6,42
Ca	9,38	6,51	8,5	3,91	5,26	6,62
Ti	0	0,83	1,02	0	0	0
Fe	8,47	8,7	7,31	7,41	7,48	7,46

En lo que respecta a la **microestructura**, destaca la gran heterogeneidad morfológica de los ladrillos. Es de destacar, el gran tamaño de los poros abiertos (Fig. 14). Éstos tienen su origen más probable en la deficiente compactación del material antes del cocido.

En cuanto a la influencia de esta porosidad en la durabilidad del material, estos macroporos pueden ser el origen de posibles patologías debidas al envejecimiento, principalmente, por ciclos de hielo-deshielo (con la consecuente erosión mecánica). Observando la estructura del arco, pueden detectarse fácilmente muchos ladrillos que han sufrido una gran meteorización (Fig. 13). Este hecho puede explicarse teniendo en cuenta la alta porosidad y la baja consistencia del material, todo ello combinado con las extremas condiciones climáticas a las que se ven sometidos en la ciudad de Valladolid.

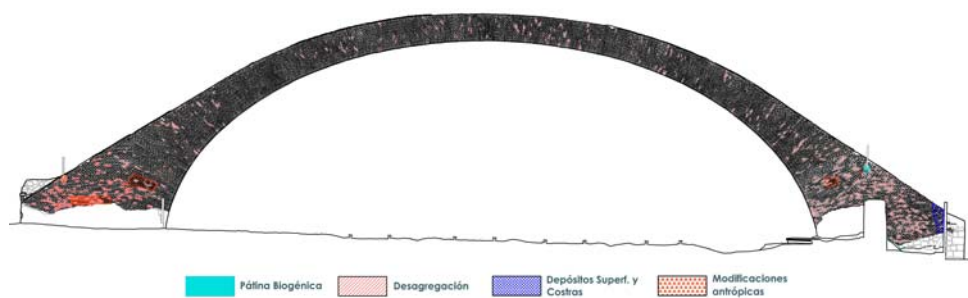


Fig. 13: Alzado Este, procesos patológicos.

Finalmente, cabe referir que se encuentra una microestructura más homogénea en los ladrillos de las zonas 2 y 3, que en los de la zona 1.

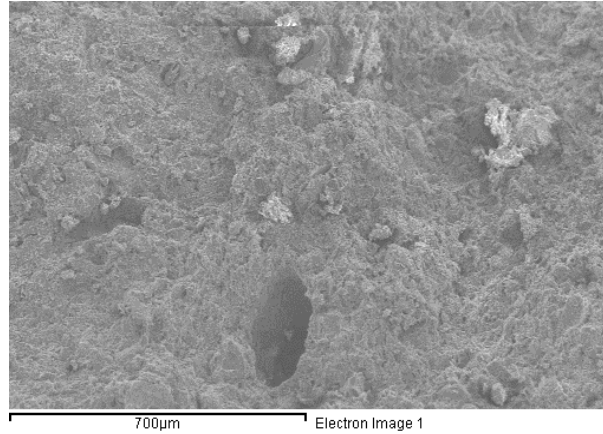


Fig. 14: Micrografía del ladrillo obtenido de la zona 1.

5 Caracterización mecánica

La finalidad de este epígrafe es proceder a la caracterización mecánica (módulo de elasticidad y coeficiente de Poisson) de la fábrica de ladrillo componente del arco, mediante técnicas de gato plano, así como estimar los niveles tensionales, a peso propio, existentes en dos puntos de la estructura, con la finalidad de calibrar los modelos numéricos.

Un gato plano, en general, consiste en dos planchas de acero inoxidable soldadas a lo largo de las esquinas con uno o dos puertos de entrada y salida, que conectados a un circuito hidráulico con bomba son capaces de suscitarle una presión interna.

El ensayo de gatos planos es un método directo e in situ que requiere solamente la remoción de una porción de mortero de las juntas de una fábrica, por ello que se considera un ensayo ligeramente destructivo al ser un daño temporal y fácilmente reparable después de realizar el ensayo.

El objetivo de la técnica consiste en obtener información estimativa y fiable sobre los siguientes parámetros:

- Estimación del estado tensional de compresión en una zona muy local de la estructura.
- Estimación de las características de deformabilidad (módulo de deformación y coef. de Poisson) de los materiales que la forman (Fig. 16).

El ensayo con gato plano se lleva a cabo en dos fases. En primer lugar se determina el estado tensional a compresión de la fábrica (Fig. 15) y en la segunda, las características de deformabilidad (Fig. 16).

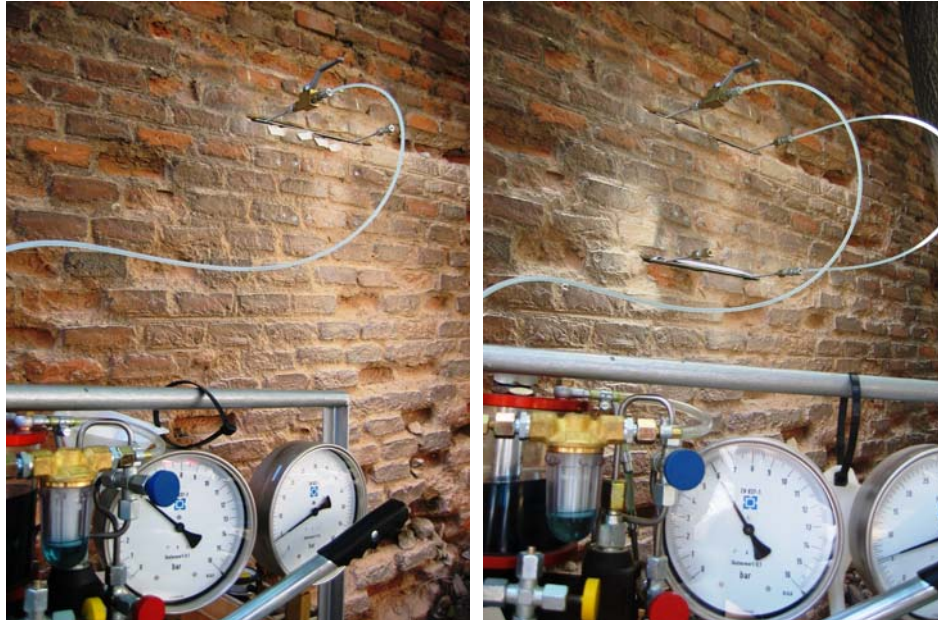
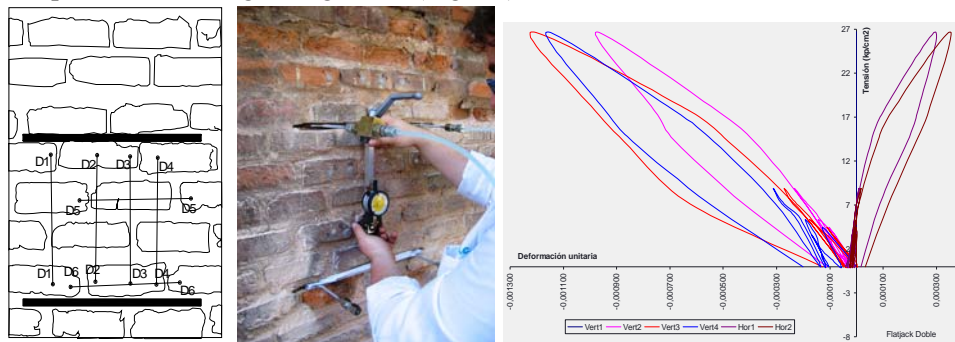


Fig. 15: Estimación del nivel tensional a compresión en el estribo Sur del Arco

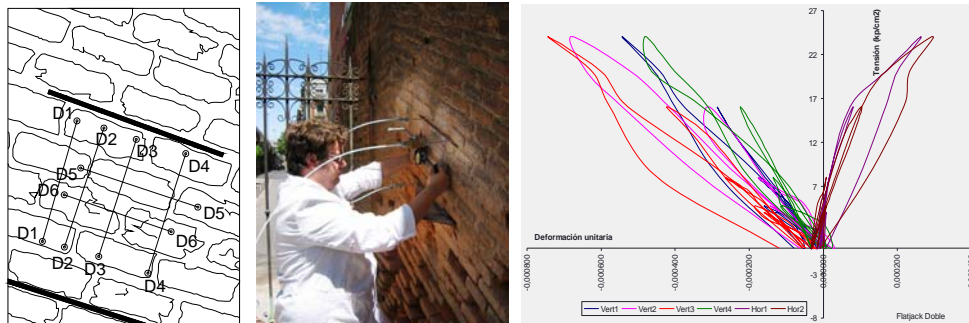
Fig. 16: Estimación de las características mecánicas en el estribo Sur del Arco

En nuestro caso concreto se realizaron sendos ensayos de gato plano simple y doble en ambos estribos (Figs. 17-22). La localización de los mismos puede comprobarse en la figura siguiente (Fig. 23).



Figs. 17 y 18: Detalles de la zona de ejecución del ensayo en el estribo Sur del Arco.

Fig. 19: Ley tensión-deformación obtenida en el estribo Sur



Figs. 20 y 21: Detalles de la zona de ejecución del ensayo en el estribo Norte del Arco.

Fig. 22: Ley tensión-deformación obtenida en el estribo Norte

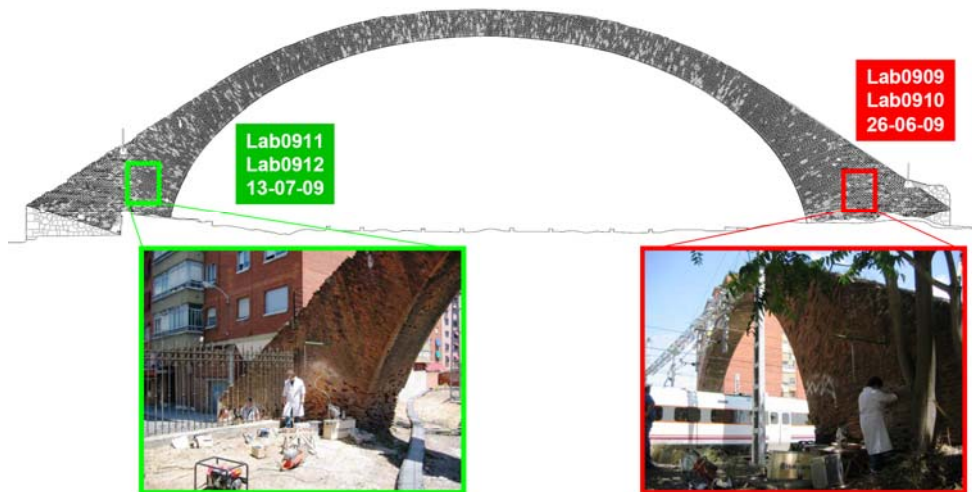


Fig. 23: Localización de los ensayos de gato plano (alzado Oeste)

Como resumen de los trabajos realizados, puede sintetizarse la información en la tabla 3:

Tabla 3: Resultados de los ensayos de gato plano realizados

Fecha	Comentarios	σ (MPa)	$E_{sec, prom}$ (MPa)	u_{prom}
26-06-09	Nivel tensional en el estribo S	0,42	-	-
26-06-09	Características mecánicas en el estribo S	-	4.233,5	0,28
13-07-09	Nivel tensional en el estribo N	0,48	-	-
13-07-09	Características mecánicas en el estribo N	-	4.717,0	0,25

Puede comprobarse que tanto en lo que respecta a niveles tensionales, como a características mecánicas, sendos estribos presentan un comportamiento similar.

6 Caracterización del contacto estructura - subsuelo

Desde el punto de vista geológico en el ámbito del estudio se encuentran materiales correspondientes a las Facies de Tierra de Campos de edad Miocena. Se trata de una unidad extensamente desarrollada en el centro de la Cuenca del Duero. Está formada por depósitos lutíticos arenosos de origen aluvial y tonos rojizos y ocres.

Sobre estos materiales aparecen los más recientes del Cuaternario, constituidos por gravas y arenas, conformando las terrazas medias del río Pisuegra. Estos materiales son permeables y constituyen un acuífero libre, encontrándose el nivel freático a escasos metros de la superficie.

Morfológicamente se trata de un terreno llano correspondiente a un extenso valle en el que se han desarrollado terrazas fluviales.

Para la caracterización del terreno de apoyo del arco se comenzó estudiando el “Estudio Geológico, Geotécnico e Hidrogeológico para la Modificación del PGOU de la red Ferroviaria Central de Valladolid” redactado en Julio de 2006, además de otros reconocimientos realizados en el trazado del ferrocarril, a unos 500 metros al Oeste del arco, observándose en su conjunto la uniformidad de los terrenos en esta zona, en lo referente a las características de los materiales y niveles freáticos.

Tras este análisis se procedió a definir la campaña de reconocimientos del terreno, que ha consistido en lo siguiente:

- Ejecución de 2 sondeos mecánicos hasta una profundidad media de 8 metros, uno en cada apoyo del arco. Con extracción de testigo continuo y muestras para ensayos.
- Un total de 5 ensayos SPT en los sondeos.
- Un ensayo de penetración dinámica DPSH, junto al apoyo sur del arco. Dados los resultados obtenidos en este ensayo, por la heterogeneidad de los rellenos, zonas pavimentadas y dificultad de accesos, no se consideró necesario realizar más ensayos de penetración.
- Ejecución de tres catas en el apoyo Sur del arco, para determinar la tipología de la cimentación. La presencia de servicios enterrados próximos a la cimentación y la imposibilidad de acceso en alguna zona, impidió la ejecución de más catas en el apoyo Norte.
- Ensayos de laboratorio de las muestras de terreno obtenidas en sondeos para su caracterización geotécnica.
- Determinación del nivel freático con sonda en los sondeos.



Fig. 24: Campaña de ensayos geotécnicos

La estratigrafía del terreno en la cimentación obtenida es la siguiente:

- Un primer nivel de rellenos heterogéneos (limos arenosos con cantos y escombros, su espesor medio de 2,3 metros).
- El segundo nivel, con un espesor de 3,20 metros, está constituido por gravas arenosas que presentan una densidad media-alta. Son cuaternarias.
- El nivel subyacente, de gran potencia, está constituido por arenas arcillosas de elevada consistencia y densidad. Se trata del Mioceno.
- El nivel freático se encuentra a unos 3,5 metros de profundidad.

En lo referente a la tipología de la cimentación del arco se ha obtenido de las catas realizadas en el apoyo Sur, obteniéndose que la cimentación es de mampostería caliza tomada con mortero, y constituye un gran dado con unas dimensiones de 6,50 x 2 metros en la superficie de arranque de la fábrica de ladrillo y con una profundidad de 3 metros. A partir de 1,60 metros de profundidad la cimentación se ensancha 0,60 metros en todo su perímetro.



Fig. 25: Cimentación de estribos

La superficie de apoyo en el terreno es de 7,70 x 3,20 metros, es decir 24,60 m². El apoyo de la cimentación se realiza en las gravas arenosas y por encima del nivel freático, éste se encuentra medio metro por debajo. Su estado de conservación es bueno, la mampostería no se encuentra dañada manteniendo un aparejo uniforme y bien trabado.

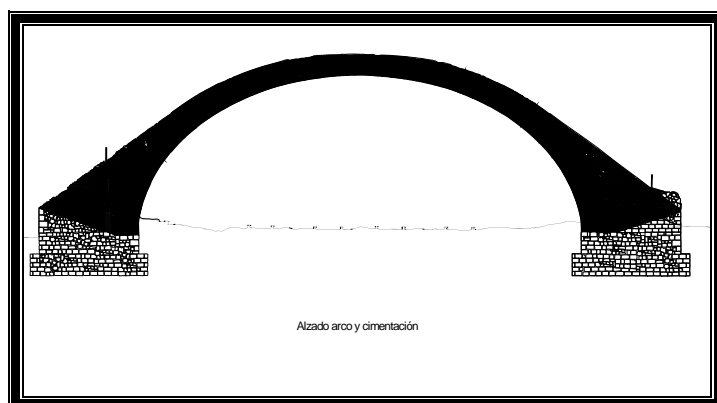


Fig. 26: Vista de cimentación y alzado

7 Caracterización estructural

Para la determinación de las cargas actuantes se ha empleado la siguiente normativa en vigor:

- IAP-98: Instrucción sobre las acciones a considerar en el proyecto de puentes de carretera.

- IAPF-07: Instrucción sobre las acciones a considerar en el proyecto de puentes de ferrocarril.
- CTE: Código Técnico de la Edificación
- EHE-08: Instrucción de Hormigón Estructural
- NCSE-02 y NCSP-07: Norma de construcción sismo-resistente y norma de construcción sismo-resistente en puentes

Asociadas a las mismas, se han analizado los siguientes tipos de acciones:

- Acciones permanentes (G):
 - Peso propio de la estructura.
- Acciones permanentes de valor no constante (G*):
 - Acciones reológicas y de degradación.
 - Asientos del terreno bajo cimentaciones
 - Empujes del terreno y nivel freático.
- Acciones variables (Q):
 - Acciones climáticas: viento, nieve y variación de temperatura.
 - Sobrecargas de uso: Vibraciones asociadas al paso de vehículos ferroviarios y sobrecargas asociadas a mantenimiento.
 - Acciones asociadas al proceso de desmontaje-montaje.
- Acciones accidentales (A) (impactos de vehículos, sismos, etc.).

Para el análisis estructural del arco se han elaborado diferentes modelos de elementos finitos, para contrastar con los resultados del análisis límite de la teoría clásica de análisis de estructuras de fábrica, así como con los resultados de una campaña posterior de ensayos dinámicos, para permitir obtener, finalmente, una idea fiable de la respuesta del arco a las acciones exteriores.

Teniendo en cuenta que el alzado del arco no presenta simetría y que las solicitaciones a considerar se aplican en planos diferentes o sobre el modelo, se ha considerado conveniente realizar un modelo 3D completo del arco, tanto con elementos barra como con elementos sólidos.

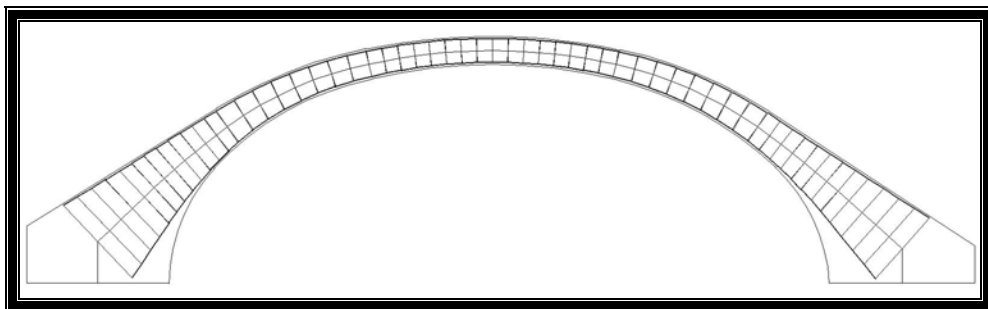


Fig. 27: Modelo de barras adyacentes

De las citadas acciones aplicadas a los modelos descritos, se han obtenido los siguientes resultados

- Se puede afirmar que la acción del Peso Propio es la que mayores tensiones produce, del orden de 0,7 MPa de compresión. En uno de los modelos realizados se ha estimado la influencia de la pérdida de sección, en el incremento de tensiones. En un caso extremo de pérdida de un décimo de sección en cada una de las dimensiones de la sección transversal, y que representaría aproximadamente la pérdida de un 20 % de sección transversal, las tensiones se incrementarían también en aproximadamente un 20% pasando de 0,7 a 0,8 MPa. Es importante resaltar que bajo la hipótesis de peso propio todo el arco se encuentra comprimido, y por lo tanto no se produce la aparición de fisuras.
- La acción del Viento en el plano del arco se puede considerar despreciable.
- La acción del Viento perpendicular al plano del arco le hace trabajar como ménsula, generando, la hipótesis simple, pequeñas tracciones en la base y unas tensiones máximas de compresión del orden de 0,3 MPa. Combinada con la hipótesis de peso propio, se traduce en una ligera disminución e incremento de las compresiones en cada lado.
- La acción de la Nieve también se puede considerar despreciable.
- Respecto a la variación de temperatura, se producen unas concentraciones de tensiones en la base del arco debido a las condiciones de contorno de empotramiento. Estas tensiones en la base no son representativas, siendo las tensiones en el resto del arco del orden de 0,5 MPa de compresión. El caso pésimo lo genera el decremento de temperatura, pues entonces el signo de las tensiones coincide con las de peso propio. En ese caso , si el decremento fuerte de temperatura (situación de invierno) coincide con un gradiente de temperatura que aumente la diferencia entre la fibra superior e inferior en clave, las tensiones en la fibra inferior de la clave disminuyen de forma que pueden llegar a descomprimirse totalmente, o aparecer ligeras tracciones.
- Se puede afirmar que para cualquier combinación de carga que se realice, el nivel de tensiones en el arco será muy bajo del orden de 1 MPa de compresión. Para algún caso de combinación de cargas, como se ha comentado, pueden aparecer ligeras tracciones.
- En cuanto al análisis del comportamiento frente a acciones dinámicas, los modos de vibración coinciden con ambos métodos, y la secuencia de frecuencias de vibración también. Los valores cuantitativos se diferencian ligeramente. Dando mayor veracidad al estudio con elementos sólidos 3D, se observa que la primera frecuencia natural tiene un valor de 2,16 Hz, y se corresponde con una forma modal de flexión como ménsula que genera desplazamientos según el eje z, que es el perpendicular al plano del arco.
- La segunda frecuencia natural tiene un valor de 5,11 Hz, y representa una rotación - torsión sobre el eje x longitudinal del arco.

Las frecuencias naturales 3 y 4 (5,61 Hz y 7,34 Hz) generan unas formas modales contenidas en el plano del arco, siendo representativas según desplazamientos en los ejes x e y respectivamente.

8 Conclusiones

En los apartados previos se ha tratado de exponer y poner de manifiesto la singularidad de la intervención en estructuras antiguas en las que es necesario intervenir, para su investigación, mediante técnicas muy diversas y dispares, requiriendo, a su vez, la intervención de gran número de profesionales de especialización muy variada, y combinando técnicas “in situ” y de laboratorio.

9 Agradecimientos

Se desea agradecer desde estas líneas las iniciativas y facilidades proporcionadas por Valladolid Alta Velocidad 2003 S.A. para la realización de los trabajos relatados en el presente artículo.

Referencias

1. Gaceta de los Caminos de Hierro (26 de septiembre de 1858). FERRO-CARRIL DE MADRID. Página 4.
2. Ficha del Plan General de Ordenación Urbana de Valladolid
3. García Tapia, N. ‘Arquitectura y máquinas: El Arco de Ladrillo, símbolo del patrimonio industrial de Valladolid’ (Valladolid, 2000)
4. Rodicio, M ‘La verdadera historia del Arco de Ladrillo’ El Norte de Castilla (29 de enero de 1995)
5. De la Fuente, J. (Director de “Ferroviarios”). ‘El ferrocarril pintoresco. Las aparatosas inauguraciones de hace un siglo’. Artículo en la Revista CRITERIO (15 - octubre - 1948). Conservado en el Archivo Histórico Ferroviario (sign. III F 1929)
6. Archivo Histórico Ferroviario. Signatura N-0004-001. Expediente sobre “Proyecto de construcción de una pasarela sobre el paso a nivel del Arco de Ladrillo (1912)”
7. Agapito y Revilla, J.A. ‘Las calles de Valladolid’ Editorial Maxtor (2004).
8. ‘Guía Anuario de Valladolid y su provincia’. Editado por Casa Santarén (Valladolid, 1927)
9. Fotografía y ferrocarril: una reflexión en torno a las fuentes gráficas del ferrocarril, su conservación y su estudio. Domingo Cuellar Villar y otros. Terceras Jornadas Archivo y Memoria (febrero, 2008). Fundación de los Ferrocarriles Españoles
10. Revista “Informa El Museo”, nº 63, marzo y abril de 2006. Artículo “Construcción del puente Príncipe Alfonso sobre el Pisuerga (1858)” por Inmaculada García Lozano, Conservadora Jefe. Museo del Ferrocarril. Fundación de los Ferrocarriles Españoles.
11. Biblioteca Virtual del Patrimonio Bibliográfico (Ministerio de Cultura). Fotografías de

Charles Clifford (22 ud.)

12. Fundación Joaquín Díaz (www.funjdiaz.net). *Diputación de Valladolid*.
13. Diario “La España” (12-mayo-1858): describiendo los puentes de la línea Norte de Madrid a Torquemada.
14. Diario “La Epoca” (12-febrero-1858) (Pg.3): Sobre los acopios de ladrillo en los terrenos de la Estación.
15. Diario “Gaceta de los Caminos de Hierro” (26-septiembre-1858): describiendo el desmontaje de cimbras en puentes del ferrocarril.
16. Diario “El Norte de Castilla” (6-julio-1858): sobre la solidez del arco de ladrillo.
17. González Fraile, E. ‘El Depósito de máquinas de la estación de Valladolid’. Actas del Segundo Congreso Nacional de Historia de la Construcción (A Coruña, octubre-1998)
18. De la Rada y Delgado, J. de D. ‘Viaje de SS. MM. y AA. por Castilla, León, Asturias y Galicia en el verano de 1858’. (1860).