



Capítulo 1. Introducción

1.1. Interés de los puentes en arco de obra de fábrica

Los puentes en arco de obra de fábrica representan la más antigua forma de obra de paso que todavía conserva relevancia económica y social. El conjunto de esta tipología representa un grupo de gran importancia cuantitativa y cualitativa dentro de las estructuras de paso existentes.

La importancia cuantitativa está más que justificada por su número. Más de un 30% de los puentes de la red española de carreteras son de obra de fábrica, porcentaje que se incrementa si se considera la red ferroviaria. Pero no sólo debemos referirnos a España; en prácticamente todos los países de la Europa Occidental esta tipología estructural constituye una parte fundamental de las actuales redes de transporte.

La composición según tipología de las estructuras de la Red de Carreteras del Estado viene detallada en la tabla 1-1 [1]. El porcentaje de este tipo estructural aumenta en las comunidades que tradicionalmente han tenido un mayor desarrollo económico y que antes han necesitado establecer vías de comunicación rápidas y seguras.

Hormigón			Acero	Mixta	Relleno sobre bóveda
en masa	armado	Pretensado o			
17,6%	25,3%	36,6%	5,0%	1,3%	14,4%

Tabla 1-1.- Porcentaje de estructuras clasificadas según su tipología estructural. Datos del Inventario de obras de paso de la Red de Carreteras del Estado (1996).

Así, en las comunidades de Madrid y Cataluña el tanto por ciento de esta tipología estructural llega al 40%, habiendo, por ejemplo cerca de 3800 puentes en arco de obra de fábrica tan sólo en la comunidad de Madrid. Un porcentaje similar es el que, según el TRL (*Transport Research Laboratory*)[10], se alcanza en el Reino Unido, donde se estima que puede haber cerca de cuarenta mil puentes en arco de fábrica, treinta tres mil de los cuales pertenecen a la red ferroviaria, de muy temprano desarrollo en las Islas Británicas.



La gran mayoría de los puentes de obra de fábrica son estructuras pequeñas, de tal forma que la luz de un arco no suele superar los diez metros. Los resultados de un estudio realizado por el *Department of Transport* del Reino Unido [7], recogidos en la figura 1-1, permiten constatar este hecho. Asimismo, la tabla 1-2 muestra como el rango de luces habituales entre las estructuras de fábrica de la Red Autonómica de la Comunidad de Madrid está por debajo de los diez metros [3].

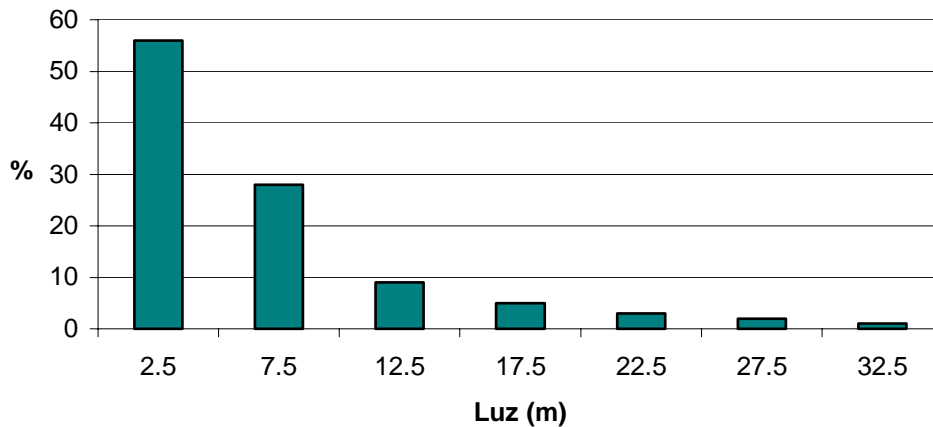


Figura 1-1.- Distribución de puentes en arco de obra de fábrica según su luz en el Reino Unido. Resultados obtenidos de [7].

Rango de luces	2m < L < 10m	L > 10 m
Número	3.160	631
Fábrica	60%	45%
Hormigón en masa	40%	55%

Tabla 1-2.-Estructuras de paso de fábrica clasificadas en función de su luz y material de construcción. Red Autonómica. Tabla obtenida de [3].

Si a los datos expuestos se añade el hecho que la mayoría de estos puentes son de edad muy avanzada, lo que exige elevados costes de mantenimiento, acondicionamiento, rehabilitación y reparación, no es de extrañar que en los últimos años la evaluación de este tipo de estructuras haya despertado un interés creciente en las administraciones y organismos públicos y privados.

La importancia cualitativa de estas estructuras no es menos justificada, escapando en la mayoría de los casos de una simple valoración funcional y económica. Los puentes en



arco de obra de fábrica representan un incalculable patrimonio histórico, artístico e ingenieril. No debe olvidarse que , en muchos casos, estos puentes, además de estructuras funcionales, representan la cultura y arte de una determinada época histórica y, al mismo tiempo, son reflejo de los avances de la ciencia y la tecnología de la época en que se proyectaron y construyeron. Entre estas estructuras podemos encontrar obras tan emblemáticas como el puente de Alcántara o el de Bibeí en España, el puente de Gard en Francia, el Pontevecchio en Italia o el de Pulteney en Gran Bretaña.

Por lo tanto, resulta evidente la importancia de que estos puentes continúen desempeñando su función. Su sustitución no es deseable ni practicable, tanto a nivel económico como a nivel cultural y social.



Figura 1-2.- Puente de Alcántara.

1.2. Problemática actual y planteamiento de esta tesina

A comienzos del s. XXI muchas de las estructuras de la red ferroviaria y de carretera son bóvedas de fábrica. No es necesario señalar, sin embargo, que la cantidad de tráfico que los puentes de obra de fábrica deben soportar ha aumentado tremendamente desde el momento de su construcción, así como lo ha hecho, muy especialmente, el peso de muchos de los vehículos que conforman dicho tráfico. La enorme cantidad de estos puentes que, pese a ello, se conservan funcionales hoy en día es una prueba de la durabilidad de los materiales con que se han construido y de su adecuado funcionamiento estructural, así como un testimonio hacia sus constructores.



Ciertamente, se trata de estructuras con una capacidad resistente amplia, que evidencian, por lo general, un elevado margen de seguridad. Sin embargo, las continuas nuevas exigencias a las que estas estructuras se ven sometidas ha hecho necesario disponer de métodos de análisis mejorados que permitan conocer y predecir el comportamiento de este tipo de puentes de manera general y con suficiente precisión y exactitud.

En efecto, a menudo se presentan situaciones en que resulta imprescindible un cuidadoso análisis estructural de un puente de obra de fábrica, como frente al paso de un tren de cargas excepcional, una eventual ampliación de la plataforma o ante la presencia de daños importantes en la estructura. En estas situaciones resulta evidente la conveniencia, convertida en necesidad, de contar con una metodología de evaluación, basada en criterios fundados y contrastada experimentalmente, que permita tomar una decisión consistente a partir de los datos disponibles.

Por otro lado, aunque sea el primer y más fundamental objeto de estudio, no sólo el análisis último o en agotamiento, esto es, conocer el margen de seguridad, resulta de interés; el conocimiento de estas estructuras bajo las cargas habituales permitiría conocer el régimen de trabajo en servicio, lo que resulta imprescindible para asegurar un mantenimiento óptimo. Éste resulta fundamental para cubrir las mayores exigencias en calidad funcional y seguridad por parte de los usuarios que van asociadas al cambio en las condiciones de explotación.

Ante este aumento de las solicitaciones y de las exigencias funcionales a las que se ven sometidos, los puentes arco de obra de fábrica presentan una importante ventaja en su construcción que cabe destacar. Esta ventaja consiste en la posibilidad de realizar trabajos de reparación y de refuerzo de la estructura sin que ello suponga un cambio visible en la apariencia del puente. Dicha alternativa, que ya ha sido muy utilizada y que sin duda lo será mucho más, vuelve a poner de manifiesto la importancia de contar con métodos de análisis que permitan conocer el comportamiento estructural del puente para determinar su estado actual y las necesidades reales y formas más adecuadas de actuación. En la medida en que éstas son desconocidas, los condicionantes de seguridad disparan el coste de cualquier intervención.

Asimismo, aunque la mayor parte del trabajo realizado en los últimos años para la mejor comprensión de estas estructuras estaba y está movido por la necesidad económica de mantener la infraestructura, también es de destacar como se está dando un cierto movimiento de resurgimiento del uso de esta tipología en la construcción de puentes arco de gravedad usando nuevos materiales. La razón de este renovado interés radica en un intento de reproducir la durabilidad claramente demostrada por estas, a menudo, muy antiguas estructuras.

En efecto, la actual generación de puentes de vigas prefabricadas de hormigón no ha resultado estar tan libre de mantenimiento como en un principio se pudo pensar. La construcción de nuevos arcos se presenta por lo tanto como una alternativa atractiva especialmente cuando los costes a lo largo de toda su vida útil son considerados. Esto explica el también pujante interés de algunos proyectistas y constructores por estudiar y entender las antiguas tecnologías, y saber así adaptarlas a los actuales requisitos de diseño y construcción.



Cabría pensar que, dada su antigüedad y profusión, el conocimiento acumulado sobre los puentes en arco de obra de fábrica podría permitir conocer todo lo necesario sobre el comportamiento y resistencia de este tipo de construcciones. Sin embargo, nada más lejos de la realidad. Es innegable el desconocimiento que de estas estructuras tienen los ingenieros actuales si se compara con otras tipologías basadas en los nuevos materiales. La irrupción de las estructuras metálicas, primero, y de hormigón armado o pretensado, después, fue haciendo que la actividad de proyecto y construcción de estructuras de fábrica se languidciera hasta prácticamente desaparecer.

Es lógico que el práctico abandono de esta tipología estructural en la construcción de nuevos puentes durante las últimas décadas haya tenido como consecuencia el que los ingenieros de hoy carezcan del oficio con el que los ingenieros de principios avanzados del siglo XX afrontaban el proyecto de estas estructuras. En efecto, previamente a la aparición de nuevos materiales y tipologías, en la época de ingenieros como Sejourné o Ribera, se llegó a disponer de una sistemática muy prolija y bien acotada para el proyecto y la construcción de puentes de fábrica. Ese acervo técnico se sustentaba, al tiempo, en la larga experiencia transmitida a través de generaciones y en el conocimiento, limitado sólo por las herramientas de la época, del comportamiento de la estructura, de sus elementos constitutivos, y de los materiales.

A esta actual pérdida de praxis debe añadirse el que la tarea ahora sea principalmente la de comprobación y refuerzo, y no tanto la de proyecto. Esto comporta matices y actitudes diferentes en el estudio de estas construcciones. En primer lugar, porque si el análisis de cualquier estructura existente está rodeado de un gran número de incertidumbres, el caso de los puentes de fábrica es quizás un caso límite. Esto se debe a que existe un elevado grado de desconocimiento de la distribución de las variables de sollicitación y resistencia que caracterizan estos puentes, así como una enorme variedad en sus tipologías, materiales, historias y magnitudes de cargas (destrucciones y reconstrucciones). Un segundo aspecto importante es el hecho de que en la mayoría de los casos el proyecto de estas estructuras no ha estado asistido por normativa alguna.

Como resultado, cuando los técnicos de hoy han de tomar decisiones sobre la capacidad portante de un puente arco de fábrica ante el paso de un tren excepcional de carga, o ante un descalce y movimiento de pilas y estribos o algún otro tipo de daño, no se ven asistidos por criterios o herramientas contrastados y ni siquiera consensuados entre los pocos especialistas en este campo. Así pues, al paso del tiempo y consiguiente deterioro de las estructuras, se unen unas nuevas necesidades, fruto de las exigencias de servicio actuales, que no hacen posible aplicar, de forma general, las reglas de buena práctica que, suficientes hace décadas, resultan ahora incompletas y fuera de su ámbito de validez.

A todo esto se debe el que la investigación en el comportamiento estructural de los puentes arco de fábrica sea actualmente muy activa, y nuevas técnicas analíticas para su estudio estén hoy en desarrollo. En efecto, dado que en general las técnicas tradicionales para el estudio de estos puentes están generalmente consideradas como demasiado conservativas o inapropiadas, parece indispensable disponer de nuevos criterios de comprobación para estas estructuras que tengan en cuenta el estado de las mismas, las



condiciones actuales de explotación y, por supuesto, el comportamiento resistente específico de esta tipología.

En este sentido, se ha realizado en las últimas dos décadas un importante esfuerzo, sobre todo en el Reino Unido, para desarrollar, contrastar y mejorar los métodos de evaluación estructural de estas construcciones. Fruto de ello son varias campañas experimentales de ensayos sobre puentes arco de fábrica llevadas a cabo, la mayoría, en universidades británicas. Estas campañas incluyen tanto ensayos de campo y laboratorio a escala real, como ensayos a escala reducida.

Así pues, hoy en día la necesidad de elaborar nuevos métodos de cálculo de puentes arco de obra de fábrica o de mejorar y contrastar los ya existentes sigue siendo un tema fundamental de investigación. Consecuentemente, también en España existen programas de estudio de esta tipología estructural en marcha. En concreto, en el Laboratorio de Tecnología de Estructuras de la Universidad Politécnica de Cataluña, se están realizando una serie de ensayos sobre distintos puentes en arco de fábrica a escala real sobre cuyo planeamiento, realización e interpretación trata este trabajo.

1.3. Objetivos de la tesina

En el Departamento de Ingeniería de la Construcción se está llevando a cabo un programa de investigación dirigido al mejor entendimiento del comportamiento estructural de los puentes en arco de obra de fábrica y a la mejora y contraste experimental de los presentes métodos para la determinación de la capacidad de carga de estas estructuras.

En Enero del 2001 Ernest Soms presentó su tesina de especialidad “*Anàlisi última de ponts d’obra de fàbrica*” [4], en la que realizó un estudio de tres puentes monoarco de obra de fábrica basándose en el análisis límite y en la formulación matricial generalizada. Posteriormente, dentro del mismo programa de investigación, se programó una campaña de ensayos en el Laboratorio de Tecnología de Estructuras (LTE) de la UPC para poder contrastar y evolucionar los resultados obtenidos por Soms.

En Julio del 2001 se realizó el primer ensayo sobre un puente en arco rebajado. Los resultados de este primer ensayo quedaron recogidos en las tesinas de especialidad “*Caracterización experimental del comportamiento hasta rotura de puentes en arco de obra de fábrica*” [5], de José Serna, y “*Caracterización del comportamiento mecánico-resistente del relleno en puentes arco de obra de fábrica*”, de Héctor Gutiérrez. El segundo ensayo se llevó a cabo en Septiembre del 2002, y los resultados del mismo se presentan en la tesina de especialidad “*Ensayo hasta rotura de un puente arco de obra de fábrica construido en laboratorio*” [3], de Germán de Marco. En este último ensayo se experimentó sobre el mismo puente rebajado que en el primero, previa reparación.

En esta tesina de especialidad *Análisis experimental de la capacidad portante de un puente arco de obra de fábrica de ladrillo*, se lleva a cabo la planificación, preparación, ejecución e interpretación del ensayo de un puente en arco de obra de fábrica de medio punto a escala real, cuya construcción fue iniciada por Germán de Marco. El puente ensayado consta de una bóveda de 3’2m. de luz, 1’6m. de flecha y un metro de ancho.

Análisis experimental de la capacidad portante de un puente arco de obra de fábrica de ladrillo



El objetivo principal de esta tesina es el de caracterizar el comportamiento hasta rotura, la capacidad última y el mecanismo de colapso del puente en arco de fábrica de medio punto a escala real construido en el LTE.

Como objetivos parciales de esta tesina de especialidad se presentan los siguientes:

- i. Estudiar los antecedentes en la experimentación con puentes en arco de obra de fábrica, prestando especial interés a los puentes a escala real ensayados en laboratorio.
- ii. Interpretar los resultados del ensayo y obtener de los mismos conclusiones sobre el comportamiento del puente.
- iii. Contrastar los resultados obtenidos con un método analítico basado en el análisis límite (Teoremas de Seguridad y de Unicidad)
- iv. Contribuir al diseño y la ejecución de un ensayo de carga hasta rotura sobre un modelo a escala real de un puente en arco de obra de fábrica.
- v. Tras la ejecución del ensayo proponer mejoras de la metodología a seguir en futuros ensayos de puentes en arco de obra de fábrica.
- vi. Realizar una compilación relativa a la campaña de experimentación de puentes en arco de obra de fábrica desarrollada en el LTE. En especial se recogerá el trabajo realizado por anteriores tesinandos para posibilitar la ejecución del ensayo del puente de medio punto.

1.4. Contenido de la tesina

Esta tesina de especialidad incluye en primer lugar un estado actual del conocimiento sobre el comportamiento de los puentes en arco de obra de fábrica. En él se identifican los diferentes elementos constituyentes y estructurales de esta tipología; también se estudia la evolución del entendimiento de estas estructuras, prestando especial atención a las teorías plásticas de análisis, la identificación de los modos de fallo de estas estructuras, así como a las técnicas experimentales y los ensayos más significativos realizados hasta la fecha.

En segundo lugar se presenta una descripción del proceso de planificación y preparación del ensayo. Se realiza una caracterización de los diferentes materiales utilizados y se justifica y describe la instrumentación utilizada para la toma de medidas durante el ensayo. A continuación se efectúa una descripción del proceso de carga y los problemas surgidos durante el mismo.

Por último, esta tesina de especialidad contiene la interpretación y el análisis de los registros obtenidos, además de una comparación con los resultados analíticos obtenidos. También se incluyen las conclusiones derivadas de la interpretación de las medidas tomadas durante el ensayo, y recomendaciones para futuras experimentaciones, basándose en la experiencia propia.