

EVALUACION DE PUENTES ARCO DE FÁBRICA: INTRODUCCION AL ANALISIS CON EL M.E.F.

Juan José Clemente Tirado

Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos

Pantecnia Consulting, S.L.

Prof. Asoc. ETSICCP Universidad Politécnica de Valencia

jjclemente@pantecnia.es

Resumen

Un elevado numero de puentes arco de fabrica siguen prestando servicio en las redes de carreteras y ferrocarril en numerosos países y por tanto es necesario para los gestores de dichas redes disponer de información precisa sobre el estado de sus estructuras. Sin embargo, debido a la longevidad y robustez de estas construcciones, las técnicas comúnmente utilizadas para su evaluación son muy simplificadas y proporcionan valores excesivamente conservadores. El uso de métodos de análisis mas sofisticados como el método de los elementos finitos (MEF) proporcionan una información mas aproximada a la realidad contrastada mediante ensayos, sin embargo demandan un mayor conocimiento sobre el comportamiento de los materiales y sus interacciones. En el presente documento se presentan y comentan las características principales de este tipo de estructuras así como los diferentes métodos de análisis del comportamiento estructural de los puentes arco de fábrica, haciendo especial hincapié en las técnicas basadas en el MEF.

1. Introducción.

Los puentes arcos de fábrica de han sido usados durante mas de 4000 años. En muchos países un elevado numero de puentes arco de fabrica siguen prestando servicio en las redes de carreteras y ferrocarril. Debido a su robusta y conservadora construcción estos puentes han sido capaces de soportar el incremento continuo de las sobrecargas de tráfico, mostrando además una gran durabilidad y, en general, un alto valor estético y social. A tenor de los datos de la UIC, el 37% de los puentes de mas de 2 m de luz de la red de ferrocarril de la Unión Europea son arcos de fábrica (33% de piedra y el resto de ladrillo). Ello representa aproximadamente 80.000 puentes arco de fábrica solo en la red de FFCC, de los que alrededor del 96% tienen más de 50 años. En España se estima que los puentes arco de fábrica representan alrededor del 40% del patrimonio de puentes de la red de carreteras y ferrocarril.

La necesidad de evaluar estructuras existentes puede proceder de diversas situaciones: Cambio de uso anticipado, finalización de su vida útil, chequeo frente a acciones específicas (ej. Sismo), por requerimientos de compañías de seguros y propietarios, observación de una degradación de los materiales, daños estructurales derivados de acciones accidentales, errores en el diseño o construcción, dudas sobre la seguridad estructural, mal funcionamiento en servicio (vibraciones, deformabilidad, etc.). La evaluación de estructuras existentes es una disciplina que va ganando importancia con gran rapidez, debido al enorme incremento del parque de estructuras, al envejecimiento de las mismas y a la necesidad de prolongar su uso más allá de su vida útil. En los últimos años se está realizando un esfuerzo para comprender el funcionamiento de los puentes arco de fábrica en vistas a mejorar las técnicas de evaluación de la carga portante última, debido a que las

técnicas comúnmente utilizadas en la práctica resultan ser excesivamente conservadoras frente a los resultados obtenidos en ensayos a escala real.

Dada la complejidad del comportamiento de los materiales que componen la fábrica, la variabilidad de tipologías estructurales y materiales y su difícil caracterización, no existe en la práctica un método de análisis generalizado para este tipo de estructuras (ver Hughes y Blackler, 1997), utilizándose en la práctica desde los métodos manuales muy simplificados hasta complejas modelizaciones no lineales. La evaluación de estructuras de fábrica es por tanto muy diferente a la evaluación de las estructuras actuales, y no cuenta como estas últimas con procedimientos de análisis consolidados y una normativa específica para la evaluación del nivel de seguridad.

En el presente documento se presentan y comentan las características principales de este tipo de estructuras así como los diferentes métodos de análisis del comportamiento estructural de los puentes arco de fábrica, haciendo especial hincapié en las técnicas basadas en el método de los elementos finitos (MEF).

2. Caracterización estructural.

2.1. Elementos estructurales

Entre los muchos elementos que conforman un puente arco de fábrica, los más importantes desde un punto de vista exclusivamente estructural son:

- *Bóveda*. Puede ser de dovelas de ladrillo o de sillares, con una o varias capas superpuestas, recta o esviada y con diferentes geometrías. El comportamiento puede variar mucho de unas tipologías a otras, y por tanto puede ser decisivo en el tipo de análisis a efectuar.
- *Tímpanos*. Dada la enorme rigidez que aportan, afecta enormemente al comportamiento del puente en servicio. En general no se suele tener en cuenta este efecto en un análisis para la determinación de la resistencia última, debido a que para determinados niveles altos de carga, se suele producir el “despegue” lateral del tímpano.
- *Relleno*. La acción del relleno también afecta enormemente al comportamiento del puente, influyendo positivamente en su capacidad resistente última. Por un lado distribuye las cargas concentradas y aumenta la estabilidad al aumentar las compresiones en la bóveda. Por otro lado se puede llegar a movilizar cierto empuje pasivo favorable (bóveda-relleno) frente a las deformaciones producidas al formarse un mecanismo de fallo. No obstante, para considerar estos efectos es necesario comprobar que se encuentra en un estado aceptable.
- *Cimientos (estribos y pilastras)*. El movimiento de los apoyos es una de las principales causas de fallo de esta tipología de puentes. No obstante, en la práctica, solo se introduce esta acción en análisis de estructuras de envergadura o donde han aparecido patologías con este origen, debido a que los métodos más simplificados (y más utilizados) no suelen permitir su consideración.

2.2. Esquema de comportamiento.

La teoría de las estructuras de fábrica debe considerar las especiales características del material “fábrica”: heterogeneidad, alta resistencia a compresión, una casi despreciable resistencia a tracción del mortero de unión y un alto coeficiente de rozamiento. Los niveles tensionales que se suelen alcanzar en las construcciones de fábrica históricas suelen ser muy bajos, por lo que, en general, no hay peligro de fallo por excesiva compresión de los materiales. En cuanto al fallo de los estribos y pilas, que como ya se ha comentado es causante de un buen número de hundimientos en este tipo de estructura, pertenece a otra disciplina de la ingeniería y no va a ser analizado en el presente documento.

En estas condiciones, la seguridad de un arco de fábrica, y en general de las estructuras de fábrica, es un asunto de geometría. Un estado de equilibrio “seguro” se consigue gracias a una adecuada configuración geométrica.

2.3. Modos de fallo

Los principales modos de fallo de esta tipología estructural son:

- Formación de un Mecanismo. Aparición de rótulas en el arco o bóveda, convirtiéndolo en un mecanismo. Es el modo más frecuente de fallo en puentes arco de fábrica. Estas rótulas pueden ser debidas a la rotura de las dovelas, las juntas de mortero o a un fallo de adherencia entre ambas.
- Aplastamiento de los materiales de las dovelas por excesiva compresión. Puede producirse en arcos muy tendidos, con un avanzado estado de degradación de los materiales y en arcos de grandes luces.
- Pandeo *snap-through* por pérdida violenta de estabilidad geométrica.
- Separación de las hojas. Solo en arcos con varias capas de sillares o ladrillos superpuestas.

3. Métodos de Análisis.

El análisis de las estructuras de fábrica antiguas es una tarea compleja. Por un lado el comportamiento mecánico de los materiales que la componen no está exhaustivamente estudiado, siendo además difícilmente generalizable. Por otro lado está la dificultad de obtención de información sobre la configuración de la estructura (geometría, proceso constructivo, intervenciones anteriores, daños, material del relleno, etc.) que se pretende analizar, así como las características mecánicas de los materiales (tipo y configuración geométrica de las fábricas y morteros, estado del relleno, nivel de degradación, parámetros resistentes de los diferentes elementos, etc.) que supone un elevado grado de complejidad, coste y variabilidad. Y por último, la ausencia de códigos o normativas aplicables que permitan evaluar el nivel de seguridad.

Dada la complejidad del comportamiento de los materiales que componen la fábrica, la variabilidad de tipologías estructurales y materiales y su difícil caracterización, no existe en la práctica un método de análisis generalizado para este tipo de estructuras (ver Hughes y Blackler, 1997), utilizándose en la práctica desde los métodos manuales muy simplificados hasta los complejos modelos no lineales basados en el MEF con comportamiento elasto-plástico de los materiales e incluyendo elementos que caractericen las juntas y la interfaz.

El objetivo final es determinar la carga para la que produce el fallo de la estructura mediante alguno de los modos anteriormente citados; no obstante, no todos los métodos de análisis contemplan todas las formas de fallo posibles, por lo que muchos quedan restringidos a su uso en evaluaciones previas o a casos muy concretos donde las simplificaciones del método proporcionan resultados aproximados bastante conservadores. Por otra parte, los métodos más sencillos suelen obtener la resistencia del puente considerando solo la aportación del arco o bóveda, sin tener en cuenta otros elementos como el relleno o los tímpanos, por lo que, en general, conducen a una subestimación de la capacidad portante del puente. No obstante este tipo de análisis es comúnmente aceptado y utilizado.

A continuación se presentan y comentan las características principales de este tipo de estructuras así como los diferentes métodos de análisis del comportamiento estructural de los puentes arco de fábrica utilizados en la práctica, en especial las técnicas basadas en el método de los elementos finitos (MEF). Otros métodos también utilizados como los derivados del análisis no-lineal basado en las teorías de Castigliano o la utilización de modelos de elementos discretos combinados con elementos finitos, no son analizados en este documento.

3.1. Métodos semi-empíricos MEXE/MOT.

El método MEXE (*Military Engineering Experimental Establishment*), (MEXE, 1963) fue desarrollado en el reino Unido a mediados de los 50's. Basado en las ecuaciones de Pippard (Pippard, 1948) que modelizan el arco como elástico lineal, articulado en los estribos, perfil parabólico, sección transversal variable y sometido a una carga puntual en la clave.

El método consiste en un nomograma que relaciona las cargas admisibles con las dimensiones del puente (luz del arco y profundidad total del relleno y dovelas del arco en la clave). Para un arco de dimensiones dadas, la carga axial provisional obtenida directamente del nomograma se afecta por una serie de coeficientes de ponderación, que dependen de relaciones geométricas entre dimensiones del arco, de la estimación de la calidad del material de la rosca y relleno, del ancho, espesor y estado del mortero de las juntas y de un coeficiente del estado general del puente. El método MEXE está sometido a una serie de coeficientes excesivamente subjetivos, no obstante proporciona valores conservadores y es sencillo y comúnmente utilizado.

3.2. Análisis Rígido-Plástico. Método del Mecanismo.

Los métodos basados en la formación de un mecanismo por la aparición de cuatro rótulas plásticas fueron desarrollados básicamente por Heyman (Heyman, 1995) y asumen que la fábrica se comporta como un material perfectamente plástico en tracción y perfectamente rígido en compresión y corte. Las hipótesis de este método son: (1) resistencia a tracción nula. Debido a la existencia de juntas (secas o con morteros de cal) se asume que las obras de fábrica no son capaces de transmitir tracciones, (2) resistencia a compresión infinita. En las obras de fábrica, los esfuerzos de compresión son bajos en comparación con la resistencia a compresión, por lo que el fallo por aplastamiento de los mampuestos no es frecuente y no se suele considerar, excepto en arcos muy tendidos (Crisfield y Packham, 1988) y (3) pequeños desplazamientos. Se asume que el fallo de la estructura de fábrica se produce con pequeños desplazamientos, por lo que la variación de los desplazamientos externos depende linealmente de las deformaciones internas.

Se fundamentan en el planteamiento de las ecuaciones de equilibrio de un mecanismo con cuatro rótulas sometido a una carga puntual y al peso propio. Se repite el proceso para diferentes mecanismos hasta obtener la menor carga que produce un mecanismo (en general, para un arco sometido a carga puntual, la posición más desfavorable de la misma suele estar en el entorno de $\frac{1}{4}$ de la luz). En este método están basados numerosos programas como el Archie-M.

Este método da resultados experimentalmente más rigurosos que los del MEXE (Page, 1993) debido a que la formación de mecanismos como forma de fallo ha sido contrastada en numerosos ensayos. Versiones mejoradas del método del mecanismo incluyen el efecto del relleno, considerando su peso propio y la resistencia por la movilización del empuje pasivo.

Sus principales ventajas radican en que es un método muy sencillo y con baja demanda de datos, mientras que presenta el inconveniente de la evaluación de la estructura frente a un único modo de fallo, siendo necesario realizar una comprobación tensional a posteriori.

3.3. Análisis Bloques rígidos.

Una moderna aplicación de la teoría del límite superior del análisis límite o método del mecanismo permite considerar nuevos modos de fallo en estructura, como el deslizamiento entre dovelas y el aplastamiento de las dovelas por exceso de compresiones. Basado en la obtención de la carga última que produzca la menor energía. Las principales hipótesis son la indeformabilidad y la no-adherencia de los elementos que forman parte de la estructura (bloques rígidos).

Se utiliza el teorema de los trabajos virtuales para obtener la carga de rotura asociada al mecanismo de colapso de mínima energía. Se aplica una carga P a la estructura en un punto y se impone un

desplazamiento virtual en ese punto. La estructura deformada de esta forma puede ser un modo de fallo permitiendo el desarrollo de un número suficiente de rótulas (flexión o corte). El valor de P se obtiene estableciendo que el balance energético del sistema es cero.

3.4. Análisis MEF.

Frente a su uso masivo en otras áreas del análisis estructural, el método de los elementos finitos no es comúnmente utilizado en la práctica ingenieril para el análisis de estructuras de fábrica. Ello es debido a varios factores: por un lado la existencia de numerosos métodos aproximados mas sencillos y comúnmente aceptados, y aunque proporcionan en general valores conservadores, los arcos de fábrica suelen tener reservas considerables de resistencia; por otro debido a las dificultades de caracterización del comportamiento no-lineal de las estructuras de fábrica y sus materiales constituyentes, no implementadas en los programas comerciales.

El MEF permite por un lado el análisis de la estructura completa, representado la interacción de los diferentes componentes de la misma, y por otro el análisis de todos los modos de fallo posibles. No obstante la utilización de esta técnica no solo supone un mayor coste, sino que requiere un buen conocimiento del comportamiento mecánico de todos los elementos de la estructura (dovelas, juntas, interfaces, relleno, pavimento, cimentación, etc.)

Towler (1985) y Crisfield (1985) fueron los primeros en introducir el MEF como método de análisis de obras de fábrica, simulando el efecto del relleno mediante muelles con comportamiento no-lineal para modelizar el empuje pasivo. Posteriormente se utilizaron (Loo, 1991) modelos macroscópicos para caracterizar el conjunto dovela-junta de mortero (fisuración distribuida). Mas recientemente (Ng et al, 1999) propone un modelo para el análisis de puentes arco de fábrica utilizando las características ofrecidas por un programa comercial, ajustándolo con los ensayos a escala real del programa TRL (Page, 1993). Thavalingham compara diferentes métodos de análisis de puentes arco de fábrica, incluyendo MEF no-lineal y Elementos Discretos, concluyendo que el primero es preferible por la facilidad de uso y mejor comportamiento en aspectos como la convergencia (Thavalingham et al, 2001).

3.4.1. Planteamiento general MEF.

a.) Geometría. La geometría de una estructura de fábrica puede ser idealizada mediante el uso de elementos 1D, 2D y 3D. Debido a la complejidad de estas estructuras, la primera impresión es que la modelización 3D es la mas razonable. Los elementos tipo sólido o placa consumen muchos recursos además de complicar enormemente el análisis de los resultados, por ello, en la practica se realiza un análisis simplificado, normalmente mediante elementos 2D (hipótesis de tensiones y/o deformaciones planas), dejando los modelos tridimensionales para estudios de detalle.

La primera dificultad aparece cuando se trata de representar con las funciones de forma habituales las discontinuidades en el campo de deformaciones producidas por las roturas de juntas de mortero y movimientos relleno-arco, cuya posición exacta no es conocida. Por ello es necesario que en la definición de la malla (discretización) se cuente con un número suficiente de elementos. Para la representación del comportamiento de las superficies de interacción entre las diferentes hojas del arco y arco-relleno se suelen asumir las hipótesis de deslizamiento finito con fricción, permitiendo la separación de las superficies en el primer caso y deslizamiento finito sin fricción en el segundo caso.

Tres estrategias principales se presentan a la hora de modelizar la discontinuidad natural de la fábrica (Lourenço, 1996) y (Rots, 1997): Micro-modelo detallado (dovelas y juntas de mortero son representadas por elementos continuos, mientras la interfaz es representada por elementos discontinuos), Micro-modelo simplificado (las dovelas se caracterizan con elementos continuos “expandidos”, mientras que el comportamiento de juntas e interfaz es representado por elementos discontinuos) y Macro-modelos (se representan las tres características mediante un elemento continuo homogeneizado); una representación esquemática se muestra en la figura 2. Los micro-

modelos, mucho mas complejos, están destinados a estudios de detalle, mientras que los macro-modelos, tiene una aplicación mucho mas practica, destinada a caracterizar el comportamiento de la estructura.

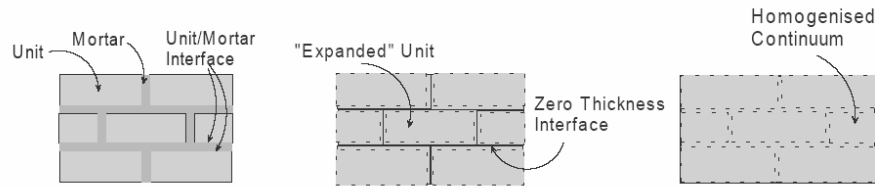


Fig. 2. Micro-modelo detallado, micro-modelo simplificado y macro-modelo, (Lourenço, 1996).

La inclusión del relleno en el modelo es importante debido a que aumenta significativamente la carga de rotura debido a varios efectos (dispersión de las cargas de superficie y acción estabilizadora al movilizarse el empuje pasivo en el relleno al deformarse la bóveda). Su inclusión modifica considerablemente la distribución de tensiones en la bóveda. Se modeliza normalmente mediante elementos continuos con un comportamiento siguiendo los criterios de Mohr-Coulomb o Drucker-Prager.

b.) Comportamiento. La fábrica es un material complejo compuesto de bloques y mortero de difícil caracterización, pero con una característica principal: su baja resistencia a tracción. Esta propiedad es tan determinante que ha condicionado la forma de las estructuras históricas. Las tres principales formas de caracterizar el comportamiento son el comportamiento elástico (con o sin redistribución), el comportamiento plástico y el comportamiento no-lineal. (Una propuesta de ecuaciones constitutivas para la fábrica y el relleno se puede encontrar en Martín-Caro, 2001).

Los modelos de EF que se utilizan en la práctica para caracterizar estructuras de fábrica utilizan dos tipos de elementos: (1) Elementos con comportamiento elástico-lineal con inclusión de las roturas mediante un grupo de elementos de rigidez a tracción nula y (2) elementos con comportamiento no-lineal. Estos últimos representan mejor el comportamiento estructural pero a costa de un mayor esfuerzo.

El análisis no-lineal es el método de análisis mas sofisticado, que permite obtener la respuesta de la estructura desde la zona elástica hasta la rotura, permitiendo conocer incluso el comportamiento en servicio. Diferentes tipos de análisis no-lineal son posibles: no-linealidad mecánica del material, no-linealidad geométrica, y no-linealidad debida a la pérdida de contacto entre elementos debido a la aparición de planos de rotura. Para una completa formulación de método de los elementos finitos se puede consultar en la abundante bibliografía (ej. Zienkiewicz y Taylor (1989, 1991) y Bathe (1982)).

Lourenço (1996) propone un modelo MEF no lineal para caracterizar la fábrica basado en dos tipos de elementos: (1) elemento con hipótesis de tensiones planas para representar las dovelas y juntas de mortero y (2) elemento interfaz de espesor nulo, (ver figura 3).

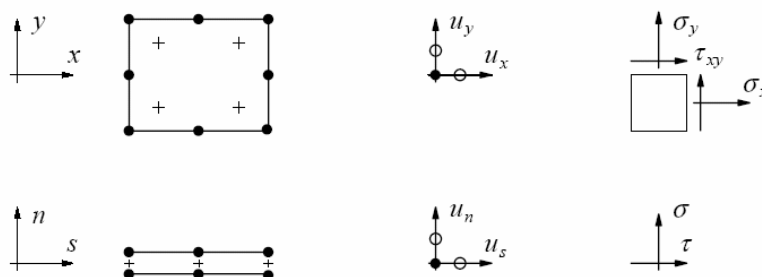


Fig. 3. cuadrilátero de ocho nodos y elemento interfaz de seis nodos, (Lourenço, 1996).

Para los elementos continuos el modelo constitutivo proporciona la relación entre tensores de tensiones y deformaciones, definidos por el vector de tensiones σ y el vector de deformaciones ϵ

(ver figura 4) y están normalmente formados por elementos cuadriláteros de ocho nodos con un esquema de integración de Gauss.

$$\begin{aligned} \boldsymbol{\sigma} &= \{ \sigma_x \quad \sigma_y \quad \tau_{xy} \}^T & \mathbf{t} &= \{ \sigma \quad \tau \}^T \\ \boldsymbol{\varepsilon} &= \{ \varepsilon_x \quad \varepsilon_y \quad \gamma_{xy} \}^T & \Delta \mathbf{u} &= \{ \Delta u_n \quad \Delta u_s \}^T \end{aligned}$$

Fig. 4. cuadrilátero de ocho nodos y elemento interfaz de seis nodos, (Lourenço, 1996).

Los elementos interfaz permiten discontinuidades en el campo de desplazamientos y establecen una relación entre las tracciones t y los desplazamientos relativos a lo largo de la interfaz Δu (ver figura 4.). Estos vectores son convenientemente definidos como vectores de tensiones σ y deformaciones ε generalizadas, por lo que se adopta la misma notación para los elementos continuos y discontinuos. (Mayor información sobre la formulación de los elementos interfaz se puede encontrar en Hohberg, 1992). Los elementos interfaz están normalmente formados por elementos cuadriláteros de seis nodos, espesor cero y esquema de integración de Lobatto.

3.4.2. Ejemplo de MEF simplificado (Ford et al, 2003).

El modelo planteado por Ford, Augarde y Tuxford (Ford et al, 2003) asume varias simplificaciones que permiten un tratamiento mucho mas sencillo del problema. Este modelo semi-discreto ha sido calibrado a partir de los ensayos en puentes reales llevados hasta el colapso realizados por el *Transport Research Laboratory* (TRL) (Page, 1993), siendo capaz de reproducir el comportamiento de tres puentes arco de fábrica. Propone la modelización de la estructura permitiendo como único modo de fallo la formación de un mecanismo en el arco (como ya se ha comentado, el modo de fallo mas habitual en este tipo de estructuras), mediante elementos finitos 2D asumiendo la hipótesis de deformaciones planas. Dicha hipótesis se puede considerar razonablemente válida para puentes sensiblemente rectos (es decir, con bajo esviaje) y con una anchura de bóveda del mismo orden de magnitud que la luz.

Dado que el modo de fallo supone la aparición de rótulas (rotura), es necesaria la modelización de las fracturas. En la práctica, una fractura puede aparecer en cualquier punto del arco, sin embargo en este modelo se crean planos radiales de debilidad (o planos de rotura) en posiciones concretas del arco, correspondientes a las zonas donde se espera la rotura.

Las dovelas y juntas de mortero se modelizan con elementos cuadriláteros de ocho nodos dispuestos regularmente (y no siguiendo la posición real de las dovelas). Los planos de rotura se disponen regularmente repartidos en todo el arco (con dimensiones de aproximadamente 0.1° de espesor). Para permitir la formación de una rótula, los nodos de los elementos en los planos de rotura se conectan mediante elementos tipo *contact point*, que se comportan de forma elástica lineal en compresión y tracción. En tracción una vez se alcanza una tensión T (definida por el usuario), la rigidez a tracción se convierte en cero. A fin de evitar el deslizamiento relativo entre “dovelas” se incluyen elementos 2D cuadriláteros de cuatro nudos en los planos de rotura que solo transmiten esfuerzos de corte en su plano, con un comportamiento elástico lineal. Una representación gráfica de lo anterior se aprecia en la figura 4:

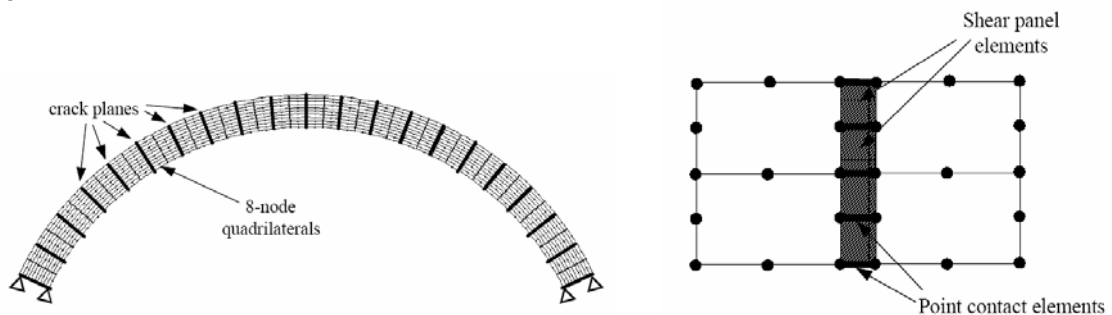


Fig. 4. Esquema del modelo del arco y los planos de rotura, (Ford et al, 2003).

El comportamiento del material de las dovelas se supone elástico no-lineal y no elasto-plástico (ej. Liu, 1995 y Lee, 1996) para simplificar el problema, dado que el objetivo final es obtener las cargas para las que se produce el fallo, más que las deformaciones.

El relleno del puente puede variar desde un material granular bien graduado hasta arcillas muy compactadas, por lo que su comportamiento, y por tanto caracterización en el modelo, no es ni mucho menos generalizable y aumenta notablemente la complejidad del problema. Dado que lo que se pretende modelizar no es el comportamiento del relleno sino sus efectos sobre el arco (reparto de las cargas concentradas y compresión inicial del arco por peso propio del relleno), el relleno se puede llegar a modelizar de forma muy simplificada con elementos cuadriláteros de ocho nodos con un comportamiento elástico-lineal. Esta hipótesis, a pesar de no ser excesivamente ortodoxa, permite tomar en consideración los dos efectos sobre el arco anteriormente citados de forma sencilla, teniendo en cuenta que el objetivo final es obtener las cargas para las que se produce el fallo, más que las deformaciones.

La interfaz entre el relleno y el extradós del arco se modeliza mediante elementos similares a los dispuestos en los planos de rotura del arco, usando elementos tipo punto de contacto y elementos 2D cuadriláteros de cuatro nudos para representar la rigidez frente a corte.

Debido a que un modelo elástico-lineal del material del relleno impide la formación de rótulas en el arco, se utiliza un material con un módulo de deformación muy bajo, siendo necesaria la inclusión de una capa superior de material mucho más rígido que simule la superficie de rodadura para evitar excesivas deformaciones en el relleno. Una representación gráfica de lo anterior se aprecia en la figura 5:

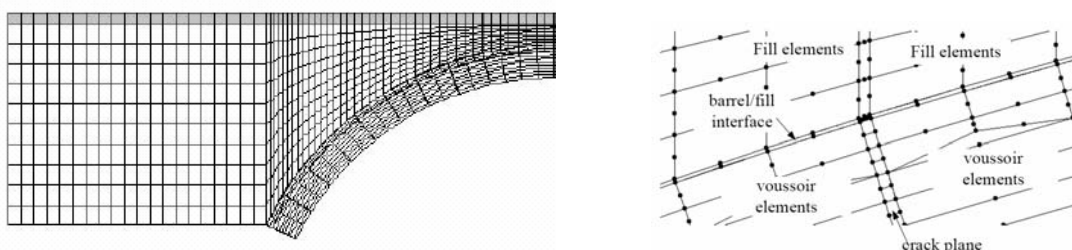


Fig. 5. Esquema del modelo del relleno, pavimento e interfaz, (Ford et al, 2003).

El modelo del relleno en esta propuesta no pretende representar el comportamiento real del relleno, sino más bien representar su comportamiento como elemento transmisor de cargas. Modelos constitutivos elasto-plásticos más sofisticados del comportamiento del relleno se pueden encontrar en varias referencias científicas (ej. Thavalingam, 2001).

Se trata de un modelo simplificado desarrollado con el objetivo plantear un análisis accesible mediante programas comerciales de MEF a este tipo de estructuras, permitiendo obtener comportamientos y valores de la carga de fallo bastante aproximados a los reproducidos en ensayos a escala real (Page, 1993). Sus mayores simplificaciones residen por un lado en la modelización 2D, que impide considerar los efectos de rigidización de los tímpanos. Por otro lado, se ignora el posible movimiento de los estribos, causa de un gran número de fallos en este tipo de estructuras, por lo que los fallos con origen en un comportamiento geométrico no-lineal no pueden ser reproducidos.

4. Consideraciones Finales.

Dado el elevado número de puentes arco de fábrica que siguen prestando servicio en las redes de carreteras y ferrocarril en numerosos países es necesario disponer de métodos de análisis contrastados para la caracterización de los mismos. Dada la alta complejidad de estas estructuras y la dificultad para obtener datos fiables que nos permitan caracterizar correctamente su comportamiento, en la práctica de la ingeniería se utiliza un cierto número de métodos aproximados para la obtención

de la carga última, proporcionando en general valores muy conservadores. Técnicas de análisis más sofisticadas, como el método de los elementos finitos, representan una mejor aproximación al comportamiento real, pero a costa de un esfuerzo muy superior, que solo está justificado es al caso de estructuras singulares, con patologías o con previsión modos de fallo diferentes a los planteados en las hipótesis de los métodos simplificados o bien cuando se quiere conocer el comportamiento en servicio del puente.

No es razonable por tanto proponer un único método de análisis, ya que cada uno de ellos provee resultados proporcionales al nivel de esfuerzo realizado y por tanto al nivel de análisis requerido en una determinada fase de la evaluación. Como en otras disciplinas, es necesaria la existencia de diferentes niveles de análisis estructural de puentes arco de fábrica en función del estado y la importancia de la estructura, la idoneidad de las hipótesis empleadas en los modelos y la tipología estructural.

Un primer nivel de análisis básico (estructura en buen estado, geometrías no singulares, es decir con bajo estado tensional, etc.) se realizaría con métodos como el MEXE o análisis límite como el método del mecanismo. Un segundo nivel o análisis detallado se realizaría para estructuras del tipo anteriormente descritas que no superaran la prueba de evaluación, requiriéndose valores de la carga última más aproximados, que pueden obtenerse con el método de los bloques rígidos o análisis MEF simplificados. En este nivel, el grado de conocimiento de las características mecánicas de la estructura debe ser superior, por lo que sería necesario completarlo con ensayos de campo. Un tercer nivel de análisis especial se realizaría en las estructuras que no cumplan los criterios anteriores o bien que los resultados de la evaluación no sean satisfactorios. En este nivel se utilizan las técnicas más sofisticadas como el método de los elementos finitos (2D o 3D) que requieren mucha mayor información sobre la estructura, combinándolo con técnicas de fiabilidad para determinar el nivel de seguridad estructural.

5. Referencias.

- Crisfield M.A. & Packham A.J. (1988). "A mechanism program for computing the strength of masonry arch Bridges", TRRL, Dept. of Transport, Research Report 124.
- Crisfield M.A. "Finite element and mechanism methods for the analysis of masonry and brickwork arches". Transport and Road Research Laboratory, London, 1985.
- Ford, TE, Augarde y Tuxford: "Modelling masonry arch bridges using commercial finite element software" 9th International Conference on Civil and Structural Engineering Computing, Egmond aan Zee, The Netherlands, 2003.
- Heyman, J. 1995. *Teoría, historia y restauración de estructuras de fábrica. Colección de ensayos.* ed. by S. Huerta. Madrid: Instituto Juan de Herrera/CEHOPU.
- Hughes, T.G., Hee, S.C., Soms, E. "Mechanism analysis of single span masonry arch bridges using a spreadsheet", Proc. Inst. Civ. Engrs – Structures and Buildings, 152(4), 341-350, 2002.
- Hughes T. G., Blackler M. J. "A review of the UK masonry arch assessment methods", Proc. Inst. Civ. Engrs, 122, 305-315, 1997.
- Liu, G., Houlsby, G.T. and Augarde, C.E. "Two-dimensional analysis of settlement damage to masonry buildings due to tunnelling", *The Structural Engineer*, 79(1), January, 1995
- Lee JS, Pande GN, Middleton J, Kralj B. "Numerical modelling of brick masonry panels subject to lateral loadings", *Comp. Struct.*, 61, 735-745, 1996.
- Loo, Y. and Yang, Y. "Cracking and failure analysis of masonry arch bridges", *ASCE J. Struct. Eng.*, 117(6) 1641-1659.
- Lourenço, "Computational Strategies for Masonry Structures", Delft University Press, (1996)
- Martín-Caro J.A. "Structural analysis of masonry arch bridges. Assessment criteria". *Phd. Madrid 2001.*
- Military Engineering Experimental Establishment (MEXE). (1963). "Military load classification of civil bridges." (*Solog Study B.38*), Christchurch, Hampshire, U.K.
- Ng KH, Fairfield CA, Sibbald A. "Finite-element analysis of masonry arch bridges", Proc. Inst. Civ. Engrs – Structures and Buildings 134, 119-127, 1999.
- Page, J. "Masonry arch bridges – TRL state of the art review". HMSO, London, 1993.
- Pippard, A.J.S.: "The approximate estimation of safe loads on masonry bridges". *Civil Engineer in War 1.* (1948). 365 y ss. The Institution of Civil Engineers, Londres, 1948.

Rots, “*Structural Masonry – An Experimental/Numerical Basis for Practical Design Rules*”, Balkema, Rotterdam (1997)

Thavalingam A, Bicanic N, Robinson JI, Ponniah D.A. “*Computational framework for discontinuous modelling of masonry arch bridges*” Computers and Structures, 79, 1821-1830, 2001

Towler, K.D.S. “*Applications of non-linear finite element codes to masonry arches*”, Proc 2nd International Conference on Civil and Structural Engineering Computing, 1985

Bibliografía extendida.

A. Thavalingam, N. Bicanic, J. I. Robinson, D. A. Ponniah: Computational framework for discontinuous modelling of masonry arch bridges – Computers and Structures 79 (2001) 1821-1830

P. B. Lourenço: Guidelines for the analysis of historical masonry structures –DIANA Conference, 2002

N. Bicanic, C. Stirling, C. J. Pearce: Discontinuous Modelling of Structural Masonry – WCCM V Fifth World Congress on Computational Mechanics, Vienna, Austria, 2002

Ford, C.E. Augarde and S.S. Tuxford: Modelling masonry arch bridges using commercial finite element software - 9th International Conference on Civil and Structural Engineering Computing, Egmond aan Zee, The Netherlands, 2003

N. Bicanic, C. Stirling: DDA Analysis of Copulet/Heyman Minimum Thickness Arch Problem - ICADD-4 Fourth International Conference on Analysis of Discontinuous Deformation

P. J. Fanning, T. E. Boothby, B. J. Roberts: Longitudinal and transverse effects in masonry arch assessment - Construction and Building Materials 15 (2001) 51-60

J. Heyman: The masonry arch, Ellis Horwood Ltd., Chichester, England, (1982)

J. Heyman: The safety of masonry arches, Int. J. Mech. Sci. 11: 363-385 (1969)

MEXE, Military load classification of civil bridges by reconnaissance and correlation methods. Military Engineering Experimental Establishment, Christchurch, 1963 [SOLOG study B38]

AJS Pippard: The approximate estimation of safe loads on masonry bridges. Civil engineer in war. Inst Civ Eng 1948;1:365-372

The assessment of highway bridges and structures, Department Standard. BD21/97. Department of Transport, London, 1997.

A. Hendry, S. R. Daves, R. Roxles, D. A. Ponniah, M. C. Forde and F. Komeyli-Birjandi: Test on masonry arch bridge at Bargower, Technical report, Crowthorne, Berks.

J. Page: Load tests for assessment of in-service arch bridges. Arch Bridges, London: Thomas Telford, 1995:299-308.

J. Page: Load tests to collapse on two arch bridges at Preston, Shropshire, and Prestwood, Staffordshire. Crowthorne, Transport and Road Research Laboratory: Transport and Road Research Laboratory Research

J. Page: Load tests to collapse on two arch bridges at Torksey and Shinafoot. Transport and Road Research Laboratory Research Report 159. Transport and Road Research Laboratory: Crowthorne, 1988.

J. Page: Load tests to collapse on two arch bridges at Strathmashie and Barlae. Transport and Road Research Laboratory Research Report 201. Transport and Road Research Laboratory: Crowthorne, 1989.

B. T. Rosson, K. Søyland, T. E. Boothby: Inelastic behavior of sand-lime mortar joint masonry arches, Engineering and Structures, Vol. 20, 14-24, 1998

CINTEC'S ARTECH Bridge and Parapet Strengthening and Repair www.cintec.com

A. S. Gago, J. Alfaiate and A. Gallardo: Numerical Analyses of the Bargower Arch Bridge – Departamento de Engenharia Civil e Arquitectura, Instituto Superior Técnico

A. Giordano, E. Mele and A. De Luca: Modelling of historical masonry structures: comparison of different approaches through a case study – Engineering Structures 24 (2002) 1057–1069

G. H. Shi: Discontinuous deformation analysis: a new numerical model for the static and dynamics of deformable block structures – Eng Comput 9 (1992) 157-168

P. A. Cundall, O. Strack: A discrete numerical model for granular assemblies – Geotechnique 29 (1979) 47-65