



Capítulo 4. Análisis de los resultados del ensayo

4.1. Introducción

En este capítulo se analizarán los resultados obtenidos durante la ejecución del ensayo del puente de medio punto. Es preciso volver a remarcar que los resultados obtenidos no permiten relacionar niveles de daño y de carga en el tiempo debido a las incidencias ocurridas durante el desarrollo del ensayo del puente. Además, las series de datos, tal y como se podrá observar en los gráficos de este capítulo, carecen de puntos suficientes para poder realizar un análisis exhaustivo.

Asimismo, para facilitar la ardua tarea que representa este trabajo se hará uso de la experiencia cobrada en el análisis de este tipo de ensayos por J. Serna [5], H. Gutiérrez y G. de Marco [3]. De igual manera, se intentarán contrastar los resultados obtenidos con los observados en el más claro precedente de este ensayo, el puente de medio punto ensayado en la Universidad de Dundee [15].

También se hará referencia al modelo analítico basado en el análisis límite utilizado para la predicción del comportamiento del puente. Sin embargo, como ya se ha comentado en el tercer capítulo de esta misma tesina de especialidad, dicho modelo precisa de ciertas modificaciones para tener en cuenta algunos de los aspectos que se habían pasado por alto en el momento de su diseño o que (debido a las diferencias entre el puente estudiado por Soms y el ensayado en este caso) se introducen para este nuevo ensayo.

4.2. Datos sobre la carga aplicada

El ensayo se llevó a cabo mediante dos ciclos de carga. La intención era la de mantener en ambos un ritmo de aplicación de la carga constante en el tiempo.

El primer ciclo se inició, en teoría, con una velocidad de carga constante en el tiempo de 0'05bares/segundo, lo que teniendo en cuenta la superficie del pistón equivale a 0'25toneladas por minuto. Por los problemas descritos en 3.4.1 se inició lo que se denomina “avance rápido”, de manera que el *crecimiento de la carga* dejó de ser constante para pasar a incrementarse de forma prácticamente lineal en el tiempo. De hecho, como se remarca al principio de este párrafo, el crecimiento de la carga era “teóricamente” constante ya que tal incremento no existió en la realidad. Esto se puede observar en las figuras 4-1 y 4-2, en las que se muestran las gráficas obtenidas de los datos registrados por la célula de carga como por la transductor de presión relativa conectado al gato hidráulico.



Carga-tiempo (célula de carga)

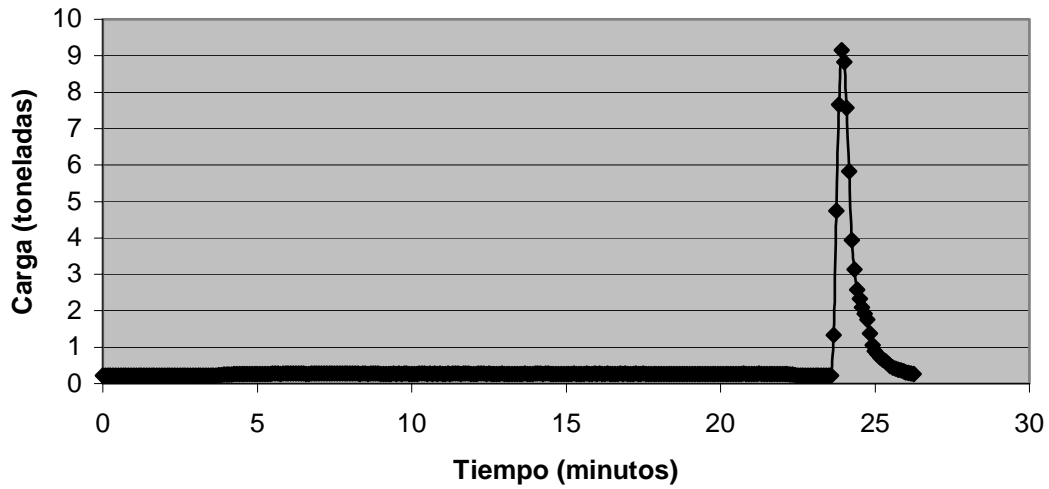


Figura 4-1.- Evolución de la carga con el tiempo. Gráfico obtenido de la célula de carga.

Carga-tiempo (gato hidráulico)

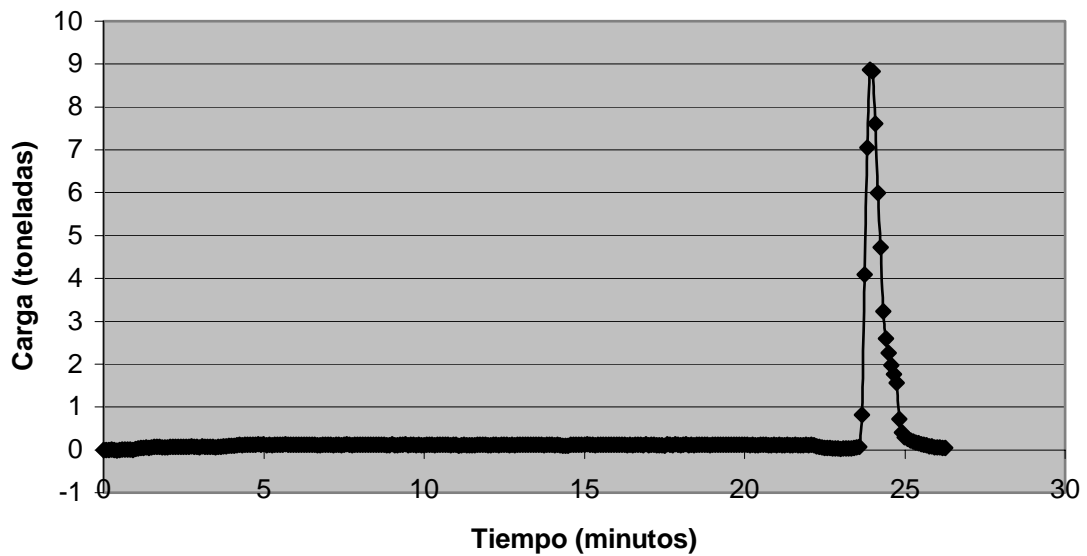


Figura 4-2.- Evolución de la carga con el tiempo. Gráfico obtenido del transductor de presión relativa conectado al gato hidráulico.



En ambas figuras puede observarse como realmente existió algún fallo en el equipo hidráulico o el sistema informático que gobernaba al mismo, cosa que provocó que durante los primeros, aproximadamente, 23 minutos realmente no se ejerciera carga alguna sobre el puente.

Fuere cual fuere la razón del fallo, lo que parece bastante claro es que este desapareció a los pocos segundos de iniciar el avance rápido, ejerciendo en ese un gran incremento de presión. Podemos observar con más detalle ese gran incremento de presión en la figura 4-3.

Carga-tiempo (detalle)

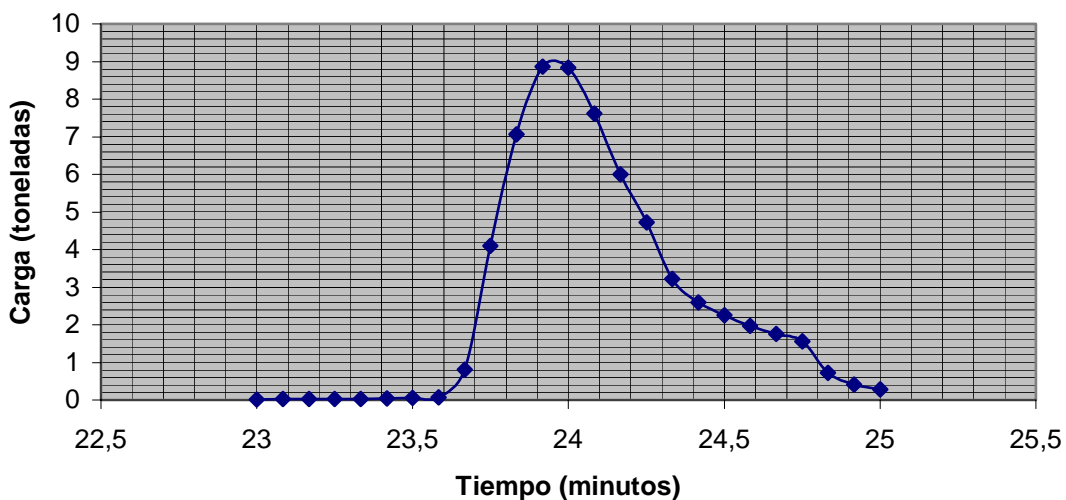


Figura 4-3.- Detalle del proceso del incremento de carga en la fase de avance rápido.

Como se puede ver en la figura inmediatamente superior se pasa de una carga inferior a 1 tonelada a otra de unas 8'8 toneladas en tan solo 15 segundos, tiempo realmente pequeño.

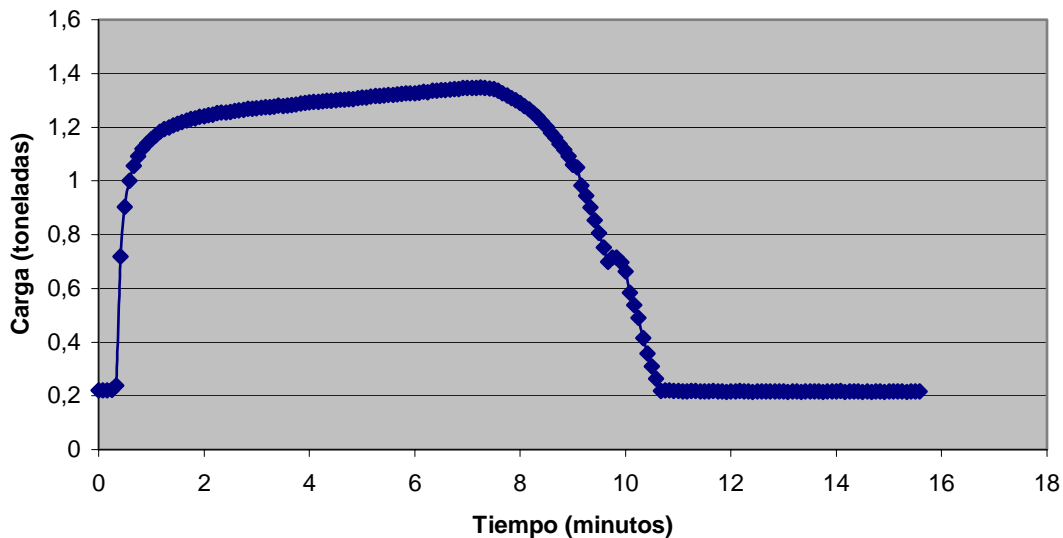
En las gráficas 4-1, 4-2 y 4-3 debe notarse otro detalle de interés. Una vez parado el ensayo (para lo que se tuvo que utilizar el botón de parada de emergencia del grupo hidráulico) la carga no cae bruscamente, cosa que había pasado en los ensayos anteriores; en vez de eso, la velocidad de descarga es mucho más lenta que la de carga, y consecuentemente se incrementa el tiempo que el puente debe soportar una acción de considerable magnitud. De hecho, según los cálculos preliminares, la estructura debía soportar hasta 3'25 toneladas, valor que fue superado durante por lo menos medio minuto.

Una vez finalizado el primer ciclo y dejado que el puente relajara cuantas deformaciones pudiera, se inició el segundo ciclo de carga. Como se comenta en el apartado 3.4.2.2 de este mismo trabajo se optó por volver a aplicar una carga de 0'25toneladas/minuto; en el mismo apartado también se comenta que visualmente



pareció que el sistema de carga funcionó correctamente. Sin embargo, tal y como se puede apreciar en las gráficas de la figura 4-4, la administración de carga volvió a ser incorrecta; en esta ocasión sí se ejerció presión sobre la estructura casi inmediatamente después de dar la orden al grupo hidráulico (solo hizo falta el transcurso de tiempo necesario para el ajuste del mismo grupo), pero por segunda vez la carga no se ejerció con una velocidad constante como indicaba el equipo informático de gobierno del grupo hidráulico.

Carga-tiempo



Carga-tiempo (gato hidráulico)

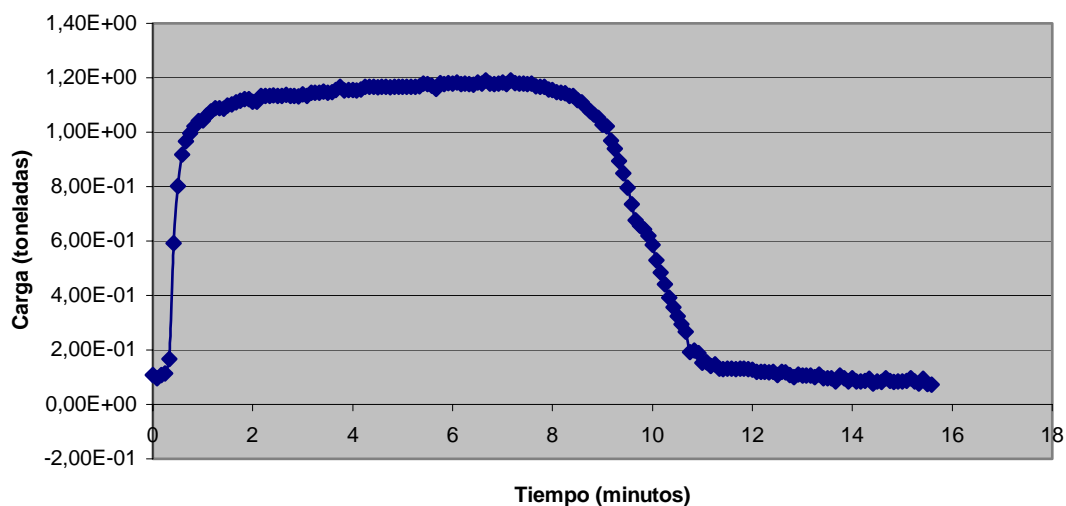


Figura 4-4.- Gráficos del segundo ciclo de carga. Registro de la célula de carga (primer gráfico) y del transductor de presión relativa (segundo grafo



Los dos grafos de la figura 4-4 muestran como en el segundo ciclo de carga tan sólo se llegó a unas 1'4 toneladas. Esto es indicativo de que el puente había alcanzado ya colapso mediante la formación del mecanismo de cuatro rótulas plásticas (cosa, que por otra parte, ya era más que evidente en vista del estado del puente después del primer ciclo de carga).

De estos gráficos de carga no se pueden obtener grandes conclusiones, pero lo que sí parece que se puede asegurar es que el cálculo preliminar quedó muy del lado de la seguridad a la hora de evaluar la carga última del puente de medio punto; parece quedar patente en ellos que la estructura podía soportar más de 3'25 toneladas. Aunque las conclusiones importantes sobre este tema deberán esperar a que el modelo numérico utilizado para la evaluación de la carga última de la estructura esté modificado en los aspectos enumerados anteriormente en esta tesina de especialidad y vuelva a realizarse otro ensayo de un puente de medio punto para poder a contrastar los nuevos resultados.

4.3. Datos sobre los desplazamientos del arco

A continuación se muestran los resultados obtenidos por los tres transductores de movimiento situados en los puntos $\frac{1}{4}$, $\frac{1}{2}$ y $\frac{3}{4}$ de la luz del arco del puente. Los tres transductores de desplazamiento se situaron en el eje central longitudinal de la bóveda y midieron los desplazamientos verticales. Cabe destacar que durante el proceso de carga de un puente en arco de fábrica también se generan movimientos horizontales; éstos no fueron registrados, pero, en cualquier caso, son más pequeños y de menor interés.

Las figuras que siguen muestran la evolución de los mismos durante el primer ciclo de carga. Es de mencionar que en ellas no se han incorporado todos los datos registrados durante este primer ciclo para evitar tener un gran cúmulo de datos en el origen de los desplazamientos; sólo se han representado gráficamente los registros tomados a partir del momento en que el puente entra en carga (entre los minutos 23 y 24).

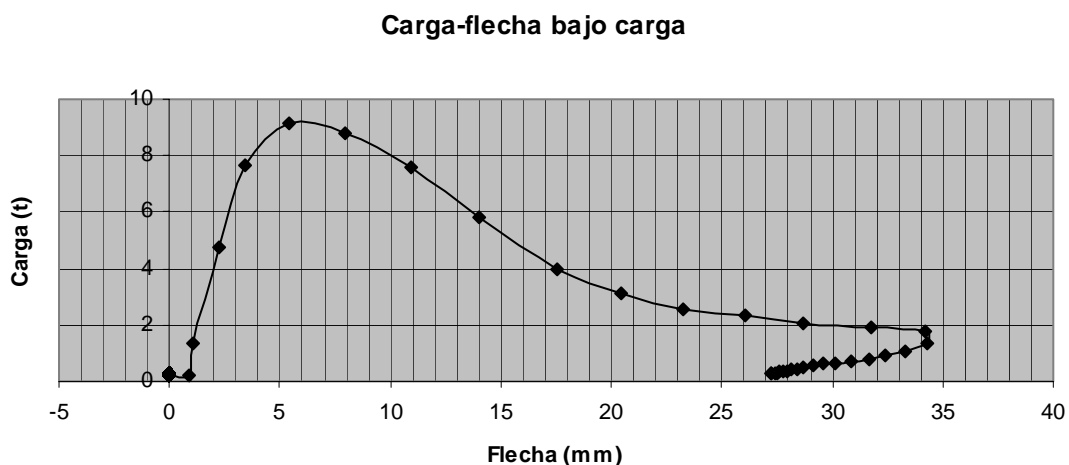


Figura 4-5.- Relación carga-flecha bajo el punto de aplicación de la carga. Flecha positiva indica descenso.



Carga-flecha en centro luz

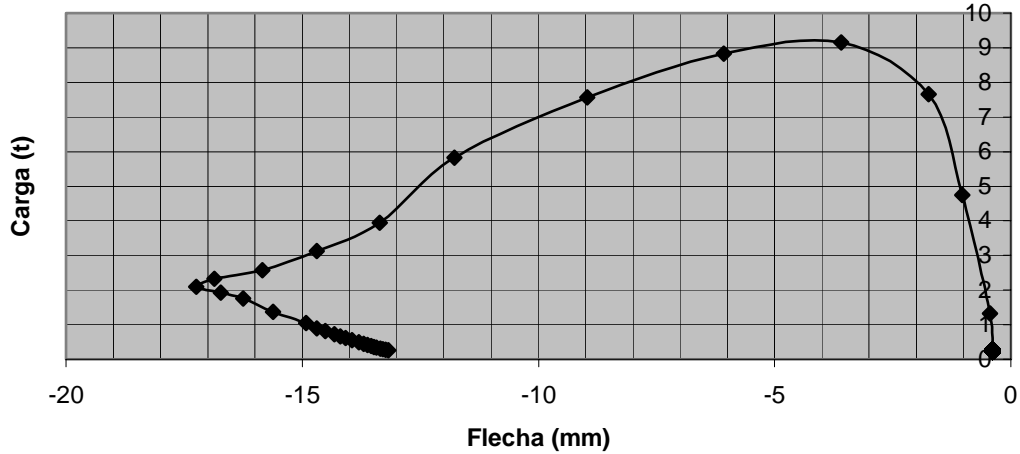


Figura 4-6.- Relación carga-flecha en centro luz. Flecha negativa indica ascenso.

Carga-flecha en punto simétrico

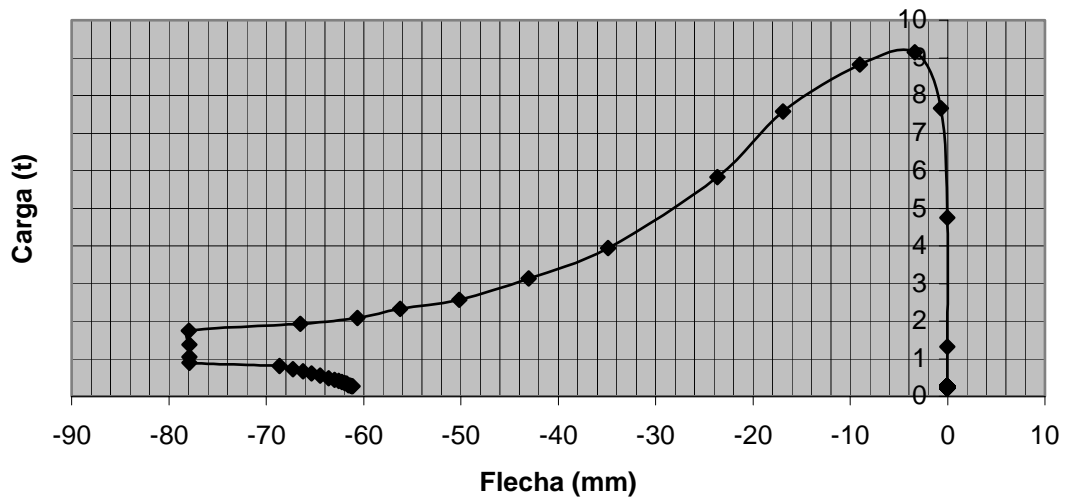


Figura 4-7.- Relación carga-flecha en punto simétrico al de aplicación de carga. Flecha negativa indica ascenso.

Si comparamos las gráficas con los resultados del ensayo de la Universidad de Dundee [15] vemos que los desplazamientos hasta el momento en que se alcanza la carga última son del mismo orden (entre 5 y 10mm.). Además en los dos ensayos los mayores movimientos se dan bajo carga y en el punto simétrico de éste respecto la clave. Otra coincidencia, por otro lado obvia, es la de que en la zona bajo carga los desplazamientos



verticales son de descenso, mientras que desde centro luz hacia la zona descargada son de ascenso.

Las coincidencias no acaban aquí. La sucesión de inicios de los desplazamientos verticales en los tres transductores coincide con la observada en los dos ensayos del puente rebajado en el LTE anteriores a esta tesina [3], [5]. Así, el primer transductor en detectar movimientos es el situado bajo la carga, en los primeros instantes de aplicación de la misma. Aunque no se puede asegurar, en la figura 4-5 se observa un cambio en la pendiente de la curva carga-flecha al llegar a 1 tonelada; esto podría ser indicativo de que la rótula situada en ese punto ya estaba formada o se estaba desarrollando, o bien, de la separación entre rosca y tímpanos.

De hecho, para el mismo valor de la carga es cuando se empiezan a registrar movimientos en el transductor situado bajo clave. Esto podría indicar algo más; podría ser que en ese instante ya se comenzaran a formar las segunda y tercera rótula en las dos zonas de estribos. Parece que el orden de formación de éstas más lógico sería el de primero la formación de la rótula en el estribo más alejado de la carga, y seguidamente en el contrario. Sin embargo, con los resultados y la observación obtenidos del ensayo esta es una hipótesis que no se puede asegurar, porque como ya se ha dicho es imposible establecer una rigurosa relación entre niveles de daños y de carga.

En el transductor situado en el punto simétrico al de carga respecto centro luz no se registró ningún movimiento hasta aproximadamente las 6 toneladas. Este podría ser el instante real en que las tres primeras rótulas plásticas ya se habían formado completamente. De nuevo, no se puede asegurar tal comentario, pero parece lógico que en ese punto no se inicien los movimientos hasta que estos sean habilitados por la formación de las tres primeras rótulas.

En el mismo registro (figura 4-7) se ve un claro cambio en la pendiente a partir de las aproximadamente 7'6 toneladas, que también se identifica en los datos tomados bajo carga y en centro luz. A partir de ese momento se incrementa el ritmo de deformación en los tres transductores, lo que indica claramente la formación de la cuarta rótula plástica y, por tanto, del mecanismo de colapso completo. Lo interesante de esta observación es que los movimientos en el punto simétrico de la carga no son apreciables hasta prácticamente la formación completa del mecanismo de colapso, lo que, por otro lado, podría estar indicando una gran rigidez del arco.

Un hecho que se refleja en las tres gráficas mostradas, que además coincide con los resultados de los ensayos tomados como referencia para contrastar los registros de éste (ensayo en Universidad de Dundee [15] y los dos ensayos anteriores en el LTE [3] y [5]), es que una vez formado el mecanismo de colapso, a pesar de bajar la carga a que se ha sometido el puente, los desplazamientos incrementan rápidamente (hecho que reafirma la formación de las cuatro rótulas plásticas). De esta manera, en el punto simétrico se registran los mayores movimientos verticales (cerca de 78mm. en sentido ascendente), seguido del punto bajo carga (entre 34 y 35 mm. descendiendo) y, por último, en centro luz (unos 17mm. ascendentes).

Para acabar el análisis de los registros de desplazamiento del primer ciclo de carga, se muestran a continuación las gráficas carga-desplazamiento del primer ciclo hasta carga

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



última de dos ensayos realizados con anterioridad y la correspondiente al presente ensayo. Como se puede apreciar, las tendencias de las tres gráficas son las mismas; la únicas diferencias que podemos encontrar la inferioridad de datos en el registro del presente ensayo (fruto del fallo informático) y el reflejo de una curva de post-rotura más larga. Sin embargo, se puede asegurar que, en caso de disponer las curvas post-rotura de los otros dos ensayos, éstas coincidirían con la tendencia mostrada en el actual ensayo: un claro incremento de los desplazamientos a pesar de la disminución de la carga [3],[5],[15].

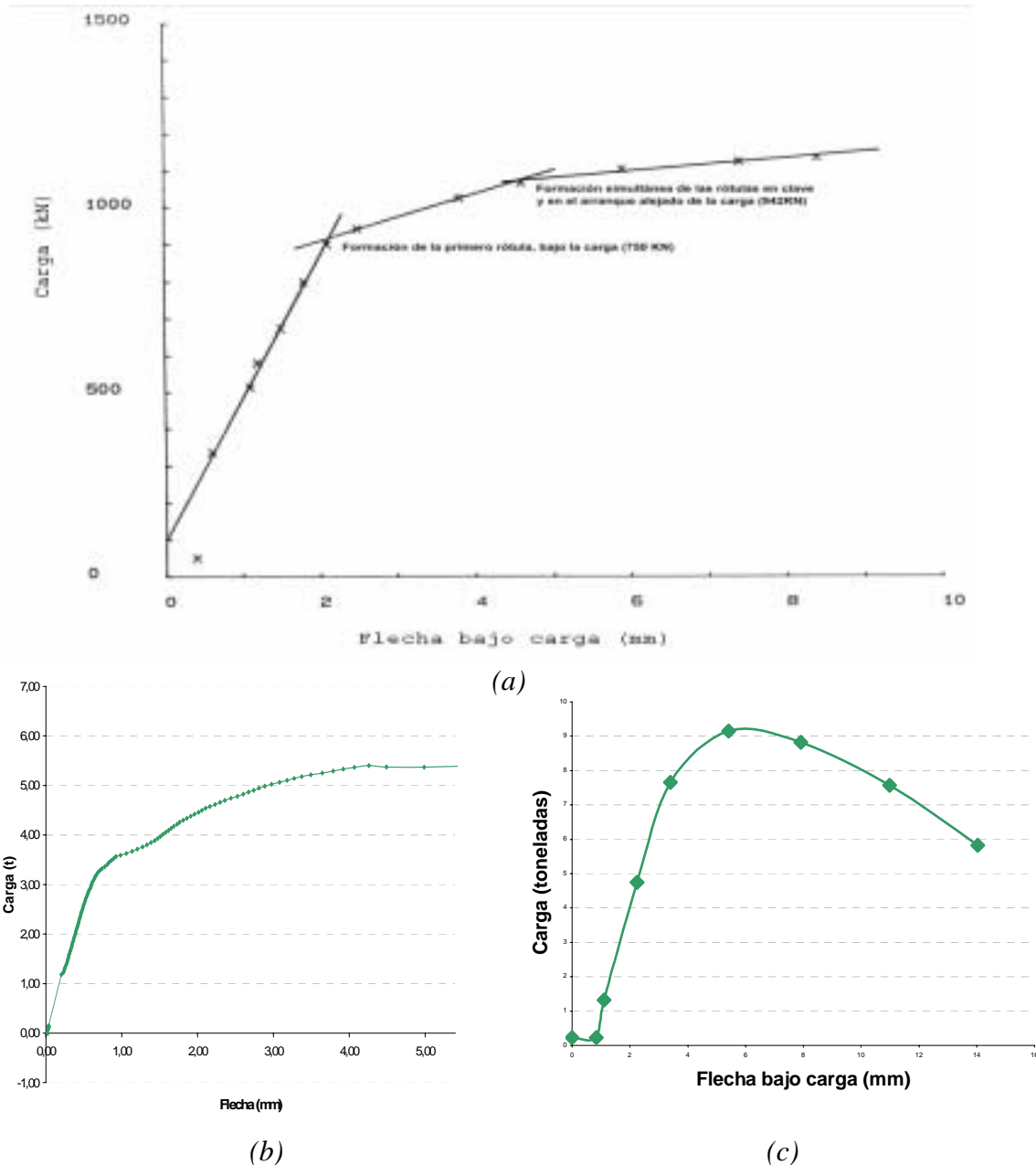


Figura 4-8.- Gráficas carga-desplazamiento primer ciclo de carga. Ensayo de Dundee (a) [15] y ensayo de Germán de Marco en el LTE (b) [3] correctas. Ensayo de la presente tesina (c).



Las siguientes tres figuras muestran la evolución de la flecha respecto la carga durante la ejecución del segundo ciclo de carga.

Carga-flecha bajo carga 2

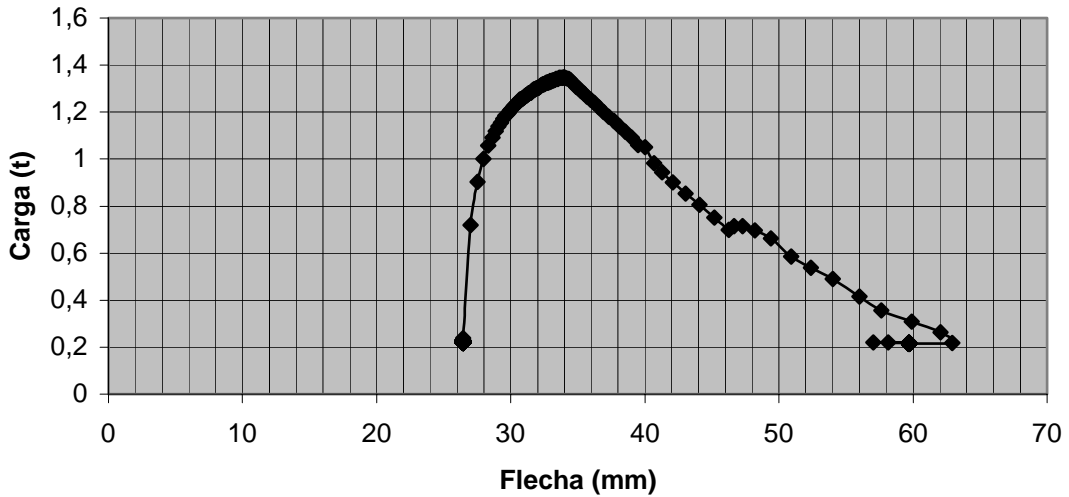


Figura 4-9.- Relación carga-desplazamiento en el punto bajo carga correspondiente al segundo ciclo de carga.

Carga-flecha centro luz 2

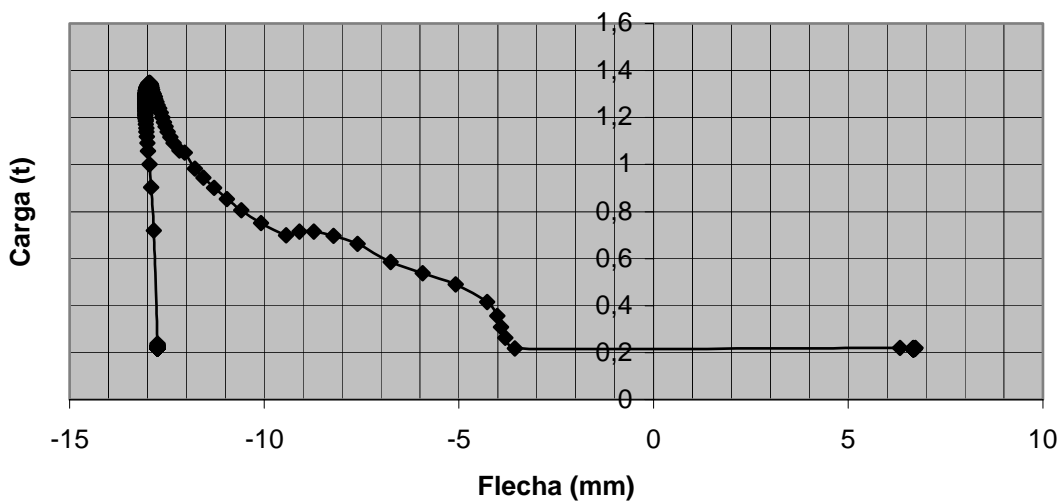


Figura 4-10.- Relación carga-desplazamiento en centro luz correspondiente al segundo ciclo de carga.



Carga-flecha punto simétrico 2

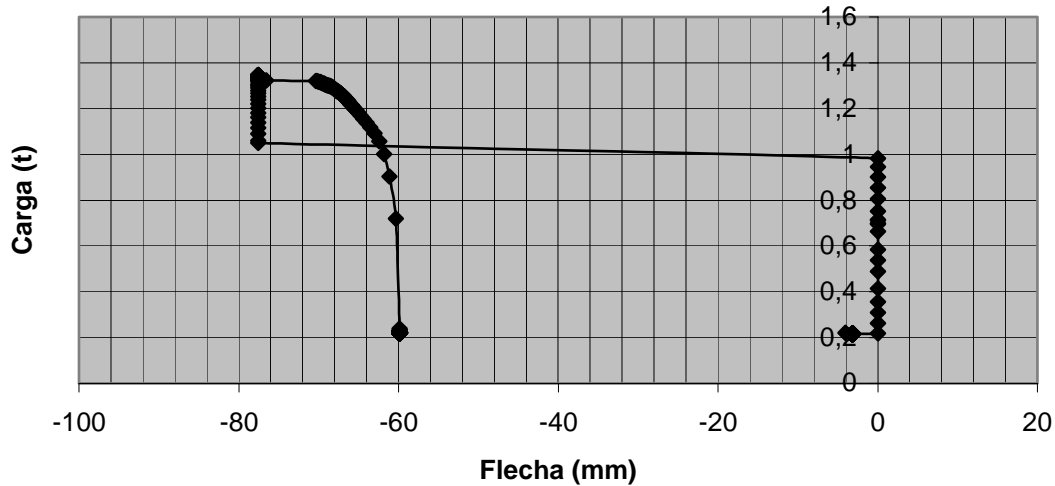


Figura 4-11.- Relación carga-desplazamiento en el punto simétrico al de carga correspondiente al segundo ciclo de carga.

En ninguno de los puntos en que se midieron los desplazamientos se observa una recuperación hacia la geometría original del puente, lo que indica el mal estado en que había quedado tras el primer ciclo de carga (es decir, la completa formación del mecanismo de colapso).

En los puntos bajo aplicación de la carga y en el simétrico de éste parece evidenciarse que los desplazamientos verticales se incrementan bruscamente a partir de 1 tonelada de carga; sin embargo, en centro luz no se observa prácticamente ningún movimiento, representando lo que podría ser una rotación respecto la clave del tramo de arco comprendido entre las dos rótulas centrales.

Poco después, antes de llegar a las 1'4 toneladas, se observa una pronunciada caída de la carga en las tres gráficas. Ese punto representa el momento en que la estructura comienza a ceder; la reacción que encuentra el sistema de carga es cada vez más pequeña. A partir de este momento parece ser que empieza a generarse el colapso total de la estructura. El punto bajo carga sigue descendiendo, mientras que en centro luz hay un cambio brusco del comportamiento, pasando de ascender a descender, lo que indica claramente ese inicio del colapso de la estructura en el que toda ella acabará viniéndose al suelo. Este principio de la caída de la estructura parece ocurrir rotando ahora respecto al punto simétrico al de carga donde no se registra ningún movimiento, hasta el momento en que el transductor ubicado en ese punto cae (hecho muy sencillo de distinguir en la figura 4-11).

Por último, en la figura 4-10 queda patente como en la estructura colapsa ante la rotura frágil del puente cuando la carga aplicada había disminuido hasta prácticamente 0'2 toneladas.



4.4. Modelo de análisis previo

Antes de realizar el ensayo se realizó un análisis previo para estimar la carga última del mismo, así como la configuración de rótulas del mecanismo de colapso previsto para éste. Para ello se utilizó un programa analítico de cálculo basado en análisis límite (teoremas de Seguridad y Unicidad), y es capaz de obtener por equilibrio la línea de presiones en el interior del arco.

Las hipótesis realizadas en un principio para la obtención de la carga y configuración de rótulas últimas eran las siguientes:

- Se supuso un reparto de la carga puntual en $\frac{1}{4}$ de la luz, de 30cm. sobre la longitud del arco, intentando modelizar de esta manera el efecto de reparto del relleno.
- Se adoptó la configuración de rótulas plásticas que se esperaba observar en el mecanismo.
- Se adoptó una excentricidad de la línea de empujes tal que ésta última quedara contenida en el interior del arco en los dos arranques de la bóveda.

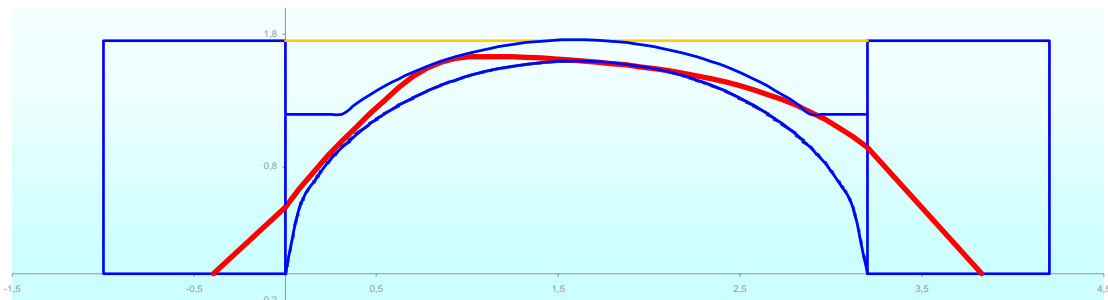


Figura 4-12.- Mecanismo de colapso obtenido en la primera iteración con el programa de cálculo.

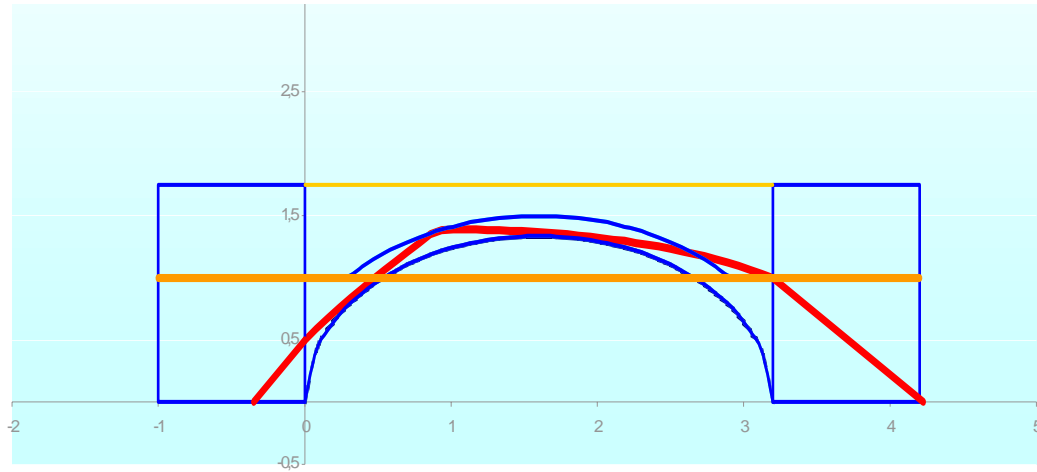
Bajo tales hipótesis la configuración de rótulas del mecanismo de colapso que se obtuvo es la que se muestra en la figura 4-12; la carga de colapso que se obtuvo en esta primera aproximación fue de unas 1'5 toneladas.

En una segunda iteración la tercera hipótesis fue modificada; se incrementó el valor de las excentricidades en los arranques para, de esta manera, simular el incremento de resistencia que se deriva de la presencia de un relleno cementado en los estribos. En esta segunda iteración se obtuvo una carga de colapso de unas 3'2 toneladas, junto con una configuración de rótulas muy similar a la obtenida con las tres primeras hipótesis.

Una vez realizado el ensayo, y en vista de los resultados obtenidos en el mismo, se ha decidido tener en cuenta la compresión centradora de la línea de presiones introducida por las fuerzas longitudinales que ejercen las barras de la estructura de contención del relleno suelto. En esta última aproximación realizada también se ha tenido en cuenta



una pequeña contribución de los tímpanos a la resistencia final de la estructura. Bajo las nuevas hipótesis realizadas la carga de formación del mecanismo de colapso es de unas 8 toneladas, con la formación del mecanismo siguiente.



La diferencia entre la carga última calculada y la obtenida en el ensayo se debe a diversos factores. Este tipo de estructuras es muy sensible y está condicionada por muchos factores que entran en juego en el comportamiento resistente, y es por ello que resulta complicado en extremo realizar una predicción afinada de la carga última. Aún así se han detectado algunos de los fenómenos que el programa de cálculo numérico no tiene en cuenta o que deben recibir un tratamiento más ajustado.

De esta manera, se debería tener en cuenta un mayor cono de reparto longitudinal de la carga a través del relleno. El que se utiliza actualmente es demasiado cerrado, de manera que penaliza el efecto que la carga, aplicada sobre la superficie de rodadura, ejerce sobre la bóveda. Asimismo, debe mejorarse la acción beneficiosa de los tímpanos en la resistencia final de la estructura (aunque ésta sólo sea considerable en los estadios de carga en los que se pueda asegurar una perfecta unión entre paredes de enjuta y arco).

Por último, no se tienen en cuenta los empujes desarrollados por el relleno bajo la acción de las cargas. Este punto es especialmente importante, ya que dichos empujes son beneficiosos, tal y como ya se ha comentado anteriormente en esta tesina de especialidad, para la estabilidad de la bóveda. Otro efecto importante relacionado con la presencia del relleno en el caso de luces cortas (como es el caso del puente ensayado) es que el peso del mismo ayuda a centrar la línea de presiones en el interior del arco ante la presencia de acciones variables sobre la superficie de rodadura.

Mediante la iteración sucesiva sobre las diferentes variables que se encuentran en el programa analítico, en busca de la carga última, se ha observado que pequeños cambios en las hipótesis de partida así como en diferentes parámetros de la modelización del puente producen cambios significativos en los valores de la carga última. Este hecho lleva a pensar que una vez se hayan introducido los cambios indicados en el programa de cálculo la carga última calculada con el mismo será prácticamente la misma que la obtenida en el ensayo.