

COMPORTAMIENTO TÉRMICO DEL HORMIGÓN POROSO EN ENSAYOS DE FATIGA

Miguel Ángel Pindado¹, Antonio Aguado² y Alejandro Josa³Universidad Politécnica de Cataluña (UPC)
E.T.S. de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos de Barcelona
C/. Gran Capitán s/n. Módulo C1. 08034 Barcelona

Resumen. Los materiales porosos, y en particular el hormigón poroso, presentan propiedades de drenaje y de absorción de ruido que son especialmente interesantes en capas de rodadura de firmes. Esta aplicación requiere el estudio de determinadas propiedades del material, como es su comportamiento a fatiga, necesarias para el proyecto de las mismas. Este artículo presenta los resultados de una serie de ensayos a fatiga, y en particular el comportamiento térmico de las probetas observado en las mismas, realizados como parte de un amplio programa experimental de caracterización del comportamiento de los hormigones porosos. En dichos ensayos de fatiga se observó un significativo aumento de la temperatura de las probetas, que es analizado en el artículo.

Abstract. Porous materials, and in particular porous concrete, provide some drainage and noise absorption properties which are specially interesting in their use in pavement top-layers. This application requires the study of some properties of the material, such as fatigue behaviour, necessary in pavement design. This paper presents the results of a fatigue testing programme, but in particular the thermal behaviour of the specimens observed during the tests. The tests were carried out as part of a comprehensive experimental programme conducted to characterize porous concrete behaviour. A significant increase in specimens temperature which was observed during the fatigue tests, is analyzed in the paper.

1. INTRODUCCION

El empleo de materiales porosos en capas de rodadura de firmes está aumentando significativamente debido a las propiedades de absorción de ruido y mejora de las condiciones de drenaje que proporcionan. En este tipo de aplicación, los hormigones porosos modificados con polímeros representan una alternativa a los aglomerados porosos asfálticos. Al respecto, se ha finalizado recientemente un estudio desarrollado conjuntamente por entidades alemanas, holandesas y españolas en el contexto de un proyecto de investigación financiado por la Comisión Europea (proyecto *Brite-Euram BE-3415*), [1].

En el caso de capas de rodadura, el hormigón está directamente sometido a la acción de los neumáticos lo cual puede producir el arrancamiento de partículas de árido de la superficie, así como, en zonas frías, a la acción de ciclos hielo-deshielo y al efecto de las sales de

deshielo, por lo que el material debe ser proyectado para resistir estas acciones. Adicionalmente, el estado tensional generado por el tráfico es mayor que en capas inferiores del firme. Para dar respuesta satisfactoria a estos requisitos se requiere el empleo de adiciones, y en particular de polímeros, que permitan incrementar la resistencia sin reducir la porosidad. Estas adiciones encarecen el pavimento por lo que es preciso reducir el espesor de la capa de hormigón poroso. Esto conduce a secciones estructurales compuestas por una capa superior delgada de hormigón poroso y una capa inferior de hormigón convencional.

En este artículo se presentan los resultados obtenidos en el programa de ensayos a fatiga sobre hormigones porosos llevado a cabo como parte del proyecto anteriormente citado y en particular el comportamiento térmico de las probetas observado durante los mismos. Este estudio es necesario debido al carácter cíclico de las cargas de tráfico y a las variaciones que en este

¹Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. Departamento de Ingeniería de la Construcción. E.T.S. de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. Universidad Politécnica de Cataluña

²Dr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. Departamento de Ingeniería de la Construcción. E.T.S. de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. Universidad Politécnica de Cataluña

³Dr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. Departamento de Ingeniería del Terreno y Cartográfica. E.T.S. de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. Universidad Politécnica de Cataluña.

comportamiento presentan los hormigones con diferentes estructuras a las de un hormigón convencional como señalan diversos autores recogidos en [2].

2. PROGRAMA DE ENSAYOS

Planteamiento general de los ensayos

Un método clásico para caracterizar el comportamiento a fatiga de los materiales es la definición de las curvas de Wöhler o diagramas $S-N$. Estas curvas, que son las habitualmente utilizadas en el proyecto de pavimentos, relacionan el cociente entre la tensión máxima en los ciclos de carga y descarga (f_{max}) y la resistencia (estática) del hormigón (f_c), $S=f_{max}/f_c$, con el número de ciclos hasta rotura, N . Las curvas obtenidas varían dependiendo del tipo de ensayo (compresión, flexotracción) y del tipo y frecuencia de los ciclos. Consecuentemente, estos factores deben adaptarse lo máximo posible a las condiciones de carga y descarga que se producen en la realidad, si se desean obtener modelos de comportamiento realistas y aplicables en situaciones prácticas, como a continuación se expone para este caso. Todos los ensayos, estáticos y dinámicos, fueron realizados en una prensa servo-hidráulica *INSTRON-digital 8500*.

Respecto al tipo de ensayo, el factor fundamental a considerar es el estado tensional producido en el hormigón. Los vehículos inducen solicitaciones de flexión en las losas del pavimento. Sin embargo, debido a que la losa no es homogénea al estar compuesta por una subcapa porosa y otra densa, y estar situada la capa porosa en la parte superior del pavimento, se puede considerar que ésta última estará básicamente sometida a las tensiones de compresión correspondientes a la zona superior de la distribución tensional de flexión, junto a las tensiones de compresión verticales directamente asociadas a la acción de las ruedas. Esto, no obstante, no es siempre realista, debido a que en determinadas circunstancias (por ejemplo por efecto de gradientes térmicos) la parte superior puede estar sometida a tracciones. En base a lo anterior, se decidió finalmente utilizar ensayos a compresión para definir las curvas de Wöhler válidas para hormigones porosos, dado por otro lado, la mayor simplicidad de los mismos.

Respecto a los ciclos, debido a que el efecto del tráfico en movimiento sobre el pavimento puede ser adecuadamente modelado mediante una carga rápida desde cero (cuando el vehículo llega), seguido inmediatamente por una descarga rápida hasta cero, de forma que el ciclo es más o menos rápido según sea la velocidad del vehículo, se adoptó, como parámetros realistas para la simulación en laboratorio, un valor muy bajo de la relación entre la carga máxima y la carga mínima en el ciclo, $R=f_{min}/f_{max}=0.05$, y una frecuencia muy alta, 10 Hz. Adicionalmente, y para una sola dosificación se obtuvieron las curvas de Wöhler correspondientes a $R=0.2$ y $R=0.5$ con una frecuencia de 15 Hz. A pesar de que éstos últimos valores no son

utilizados en el proyecto de pavimentos, sirvieron para determinar las posibles variaciones en la contribución resistente del polímero ante variaciones en las características de las solicitaciones.

Dosificaciones, fabricación y curado

Las dosificaciones ensayadas han sido cuatro y son las correspondientes a las propuestas por los diferentes participantes en el proyecto. Las dosificaciones 1 y 2 fueron desarrolladas por el equipo español. Tan sólo la dosificación 1 contiene polímero. La dosificación 2 se ensayó con el fin de tener una referencia sobre el comportamiento a fatiga de un hormigón poroso convencional, con el fin de conocer la incidencia en el comportamiento a fatiga de la adición de polímeros que en experiencias previas en otros tipos de hormigones era notable, Hsu [3]. La dosificación 3 fue desarrollada por el equipo holandés y contenía polímero mientras que la dosificación 4 desarrollada por el equipo alemán contenía microsíllice como adición.

Tanto las dosificaciones utilizadas como los procesos seguidos en la fabricación y el curado de las probetas, se detallan en [4, 5 y 6].

Características principales del programa

- Estudio del comportamiento de hormigones porosos sometidos a un *alto número de ciclos* (1.000 a 10.000.000 ciclos), de acuerdo con la clasificación de Hsu [7]. Dentro de este intervalo se encuentran los valores necesarios para el proyecto de pavimentos.
- $R=f_{min}/f_{max}=0.05$ Adicionalmente, para la dosificación 1, se determinaron las curvas de Wöhler con $R=0.2$ y $R=0.5$.
- La frecuencia de los ciclos fue de 10 Hz para $R=0.05$, y de 15 Hz para los otros valores de R . De acuerdo con la experiencia previa en hormigones, el comportamiento del material no varía en ese rango de frecuencias, reduciéndose los tiempos de ensayo para el caso de frecuencia igual a 15 Hz. La forma de los ciclos es la que se muestra en la figura 1 (variaciones lineales de la tensión).

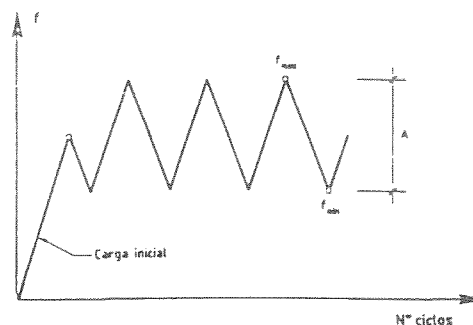


Fig. 1. Esquema genérico de solicitaciones

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados de los ensayos a fatiga se han representado como diagramas $S-N$ (curvas de Wöhler). Las expresiones analíticas correspondientes fueron obtenidas mediante regresiones lineales entre S y $\log N$. Estas expresiones analíticas aparecen en [4, 5 y 6] y son de utilidad para el proyecto de estructuras de hormigón poroso sometidas a cargas cíclicas como es el caso de capas de rodadura.

Como ya se ha indicado, la dosificación 1 fue utilizada para estudiar la influencia de R en el comportamiento a fatiga de hormigones porosos con polímero. La figura 2 muestra los diagramas $S-N$ para $R=0.5, 0.2$ y 0.05 . En esta figura se aprecia que, como ocurre en otros materiales, la resistencia a fatiga aumenta al aumentar R . Es decir, para un valor constante de f_{max} , la resistencia a fatiga aumenta cuando la amplitud de los ciclos de carga disminuye. Puede observarse, asimismo, que para valores bajos de N , los diagramas $S-N$ tienden a converger hacia valores de S mayores que 1. Este hecho es debido a que la resistencia a compresión utilizada como referencia fue obtenida mediante ensayos estáticos de diferente naturaleza a los ensayos dinámicos, y por lo tanto, la relación entre el valor de S al cual converge cada diagrama $S-N$ y el valor de $S=1$ nos da una idea del fenómeno de rigidización que sufre el hormigón cuando es sometido a procesos muy rápidos de carga.

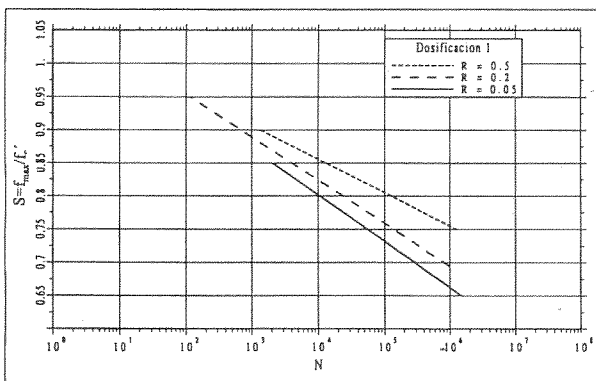


Fig. 2. Diagramas $S-N$ correspondientes a la dosificación 1, para tres valores de R (0.5, 0.2 y 0.05).

La figura 3 muestra los diagramas $S-N$ obtenidos con cada una de las dosificaciones utilizadas (1, 2, 3, y 4) para un valor constante de la razón ($R=0.05$). En ella se puede observar que la adición de polímeros mejora el comportamiento a fatiga de los hormigones porosos. De esta forma, para un valor constante de S (f_{max}/f_c), la vida a fatiga (N) de un hormigón poroso con polímero (dosificaciones 1 y 3) mejora, aproximadamente, en un orden de magnitud en comparación con un hormigón poroso sin polímero (dosificaciones 2 y 4). Esta mejora no se mantiene constante en todo el rango de valores de S ensayado, siendo máxima para valores bajos de N , y disminuye a medida que aumenta N , hasta que la mejora llega a ser poco significativa (por ejemplo, para $N=2 \cdot 10^6$ ciclos, la diferencia es del orden de $0.04 \cdot f_c$, que a

efectos prácticos es inapreciable). Este tipo de mejora inducido por el polímero en el comportamiento a fatiga del hormigón poroso, mayor en la zona de valores altos de S (bajo número de ciclos), y decreciente con N , se observa también en otros tipos de hormigones con polímero y en otros tipos de cargas, Hsu [3].

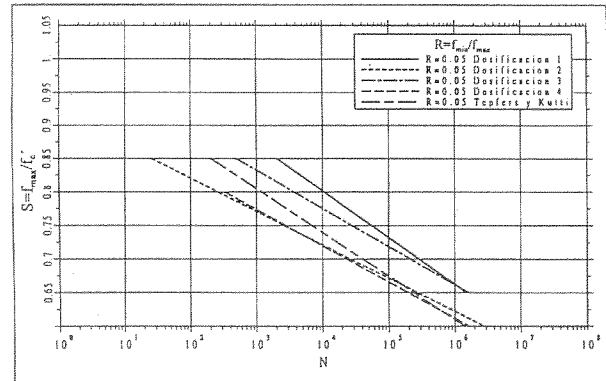


Fig. 3. Diagramas $S-N$ de las probetas de hormigón poroso (dosificaciones 1, 2, 3 y 4) y para hormigón convencional (Tepfers y Kutti, [8]) con $R=0.05$.

En dicha figura se incluye también el diagrama $S-N$ propuesto por Tepfers y Kutti [8] para hormigones en masa, convencionales o ligeros, y $R=0.05$. Se puede observar que los diagramas $S-N$ para hormigón denso (esta última curva) y poroso, con o sin polímero (dosificaciones 1, 2, 3 y 4), son diferentes. Observándose como el comportamiento a fatiga de un hormigón convencional se sitúa entre el de un hormigón poroso sin polímeros y el de un hormigón poroso con polímeros. Consecuentemente, se puede concluir que no es posible utilizar con suficiente fiabilidad los diagramas correspondientes a hormigones convencionales para caracterizar el comportamiento a fatiga de hormigones porosos.

El comportamiento de las dos dosificaciones sin polímero (2 y 4) es prácticamente idéntico, de lo cual podemos deducir que la adición de microsílíce (en la dosificación 4) no supone una mejora en el comportamiento a fatiga de un hormigón poroso. Además, y teniendo en cuenta las diferencias existentes en su composición y en sus características resistentes (ambas dosificaciones presentan una gran diferencia en sus valores de resistencia a compresión) podríamos deducir que es posible obtener una ley de comportamiento a fatiga genérica para cualquier hormigón poroso (sin polímeros), de la misma forma que es posible hacerlo para otros tipos de hormigones. No obstante, para ello deberían realizarse nuevos ensayos con otras dosificaciones.

Las diferencias observadas en el comportamiento a fatiga correspondiente a las dosificaciones 1 y 3, ambas con polímero, son muy pequeñas. Así, por ejemplo, para $N=1.000$ ciclos, $\Delta S=0$. Estas diferencias son probablemente debidas al tipo y dosificación de áridos empleados en cada caso, más que a la variación en la

proporción del polímero utilizado. La mejora que induce el polímero en el comportamiento a fatiga del hormigón puede considerarse debida a que hace más dúctiles los enlaces entre partículas de árido, por lo que éstos resisten mejor la acción de los ciclos de carga y descarga sin llegar a rotura. Probablemente, a partir de una cierta cantidad de polímero este efecto no se incrementa y el comportamiento a fatiga deja de mejorar. Pese a lo anterior, la utilización de mayores dosificaciones de polímero puede ser necesaria por otro tipo de criterios (por ejemplo, resistencia a ciclos hielo-deshielo, o para evitar el arrancamiento de partículas).

Adicionalmente se realizó un análisis estadístico de cada uno de los diagramas $S-N$ obtenidos, mediante la determinación de las bandas de confianza sobre la media asociadas a un nivel de confianza del 90%. En las Figuras 4 y 5 se muestran algunos de los resultados obtenidos, concretamente los obtenidos para las dosificaciones 2 y 4 con $R=0.05$. En esas figuras se incluyen, representados como puntos, todos los ensayos realizados para la determinación de las citadas curvas $S-N$, incluidos los de aquellas probetas que no llegaron a rotura, en cuyo caso son representados mediante un punto y una flecha hacia la derecha.

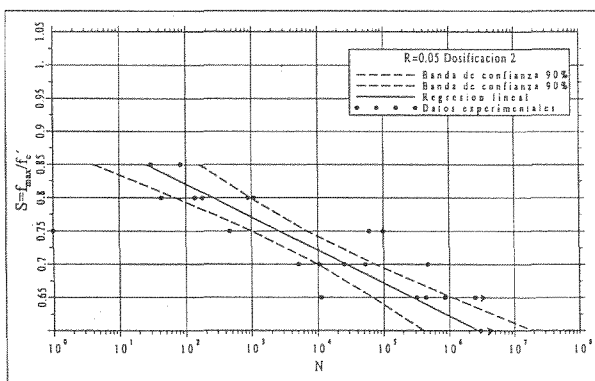


Fig. 4. Resultados individuales, diagrama $S-N$ y bandas del 90% de confianza para las probetas españolas sin polímero y $R=0.05$.

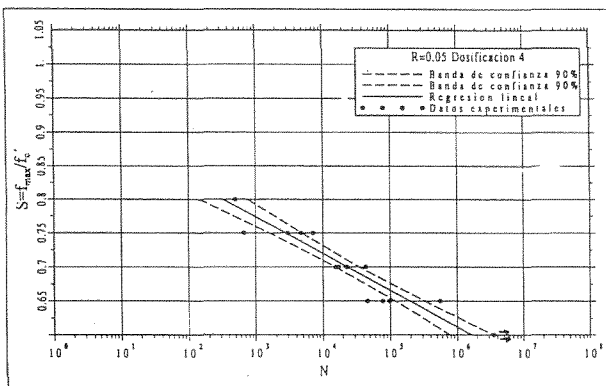


Fig. 5. Resultados individuales, diagrama $S-N$ y bandas del 90% de confianza para las probetas alemanas, con polímero, y $R=0.05$.

4. COMPORTAMIENTO TERMO-DEFORMACIONAL

Durante la realización de los ensayos de fatiga anteriormente presentados se observó un sensible incremento de la temperatura de las probetas no constatado con anterioridad en ensayos de fatiga con otros tipos de hormigones, Oliveira [9] y Fernández [10], realizados bajo las mismas condiciones. Por ello, se procedió a disponer tres termopares en las probetas durante la realización de los ensayos, siendo ello posible gracias a la porosidad del hormigón, que permitía introducir el extremo de los termopares a una profundidad aproximada de 1 cm dentro de la probeta. Los termopares se dispusieron en las zonas superior, media e inferior. Asimismo, se registró también la temperatura ambiente.

Con objeto de poder correlacionar los datos sobre la evolución de la temperatura con la evolución de la deformación, durante el ensayo se registraron las deformaciones máximas y mínimas de la probeta correspondientes a diferentes ciclos. Por consiguiente los valores de deformación obtenidos son unos valores totales asociados a la altura de toda la probeta. La textura de un hormigón poroso impedía el empleo de galgas pegadas que permitiesen la determinación de la deformación en puntos concretos de la probeta.

En la figura 6 se presentan los resultados de la evolución de la deformación máxima y mínima con el número de ciclos. Esta figura corresponde a los resultados de una probeta de la dosificación 4 (alemana) sometida a $S=f_{max}/f'_c=0.65$, que rompió tras 559.992 ciclos. En ella se constata la existencia de tres fases en la evolución de la deformación. En una primera fase, la deformación avanza muy rápidamente, hasta que al llegar aproximadamente al 5 % de N (rotura) ese proceso se estabiliza y la deformación progresa más lentamente, hasta que, nuevamente y aproximadamente para el 95 % de N , la deformación vuelve a aumentar más rápidamente hasta llegar a la rotura final. Esta evolución de la deformación durante el ensayo de fatiga, que es ampliamente conocida ([2]) está relacionada con las diferentes fases del proceso de evolución de la fisuración que se produce en la probeta durante el ensayo a fatiga.

En la figura 7 se muestran los resultados de la temperatura registrados por los tres termopares en una probeta de la dosificación 3 (holandesa) sometida a una sucesión de ciclos de carga y descarga con $S=0.70$, que rompió tras 1.493.113 ciclos. Como se puede observar, la evolución de la temperatura durante el ensayo responde al mismo comportamiento anterior en lo que hace referencia a la existencia de tres fases. En realidad esas tres fases en el proceso de fisuración son observadas también mediante otras técnicas de ensayo tales como: registro de las emisiones acústicas, ultrasonidos, etc. [2].

Como se puede observar en la citada figura 7 la temperatura más alta corresponde a la registrada en la

zona media de la probeta, lo cual es lógico si se tiene en cuenta que en esa zona ya han desaparecido los efectos favorables de confinamiento que en las zonas superior e inferior de la probeta se produce como consecuencia del rozamiento entre el plato de la prensa y la probeta. En la misma figura se observa también que la temperatura es ligeramente más alta en el termopar superior que en el inferior, lo cual tiene su explicación en el hecho de que el plato superior es el móvil, y por tanto en esa zona se producen mayores deformaciones que en la zona inferior. En ese mismo sentido cabe destacar que la rotura a fatiga se concentraba en la mayoría de las ocasiones en la zona superior de la probeta.

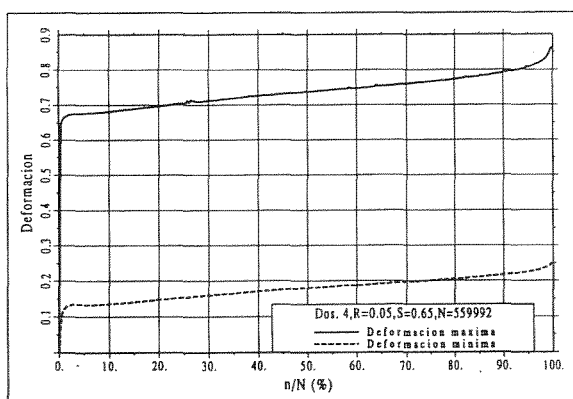


Fig. 6. Evolución de la deformación total máxima y mínima durante un ensayo a fatiga

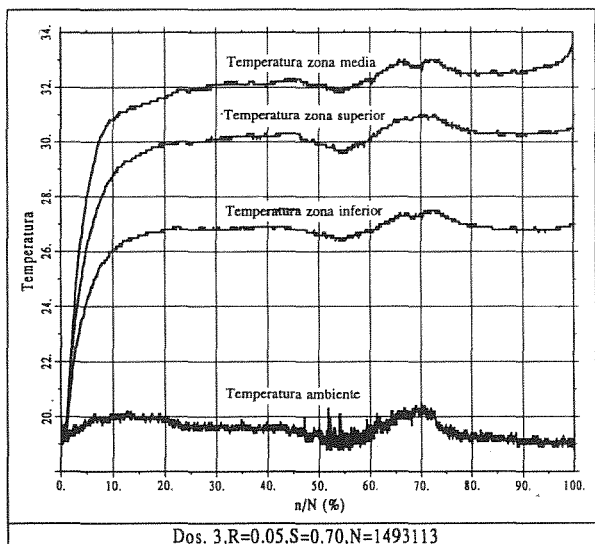


Fig. 7. Evolución de la temperatura en una probeta sometida a un ensayo de fatiga.

Para que estas tres fases del desarrollo de la microfisuración aparezcan claramente, es necesario que el ensayo a fatiga tenga una duración mínima, puesto que, si la rotura es rápida, el proceso de microfisuración no presenta la zona intermedia de estabilización de la temperatura, sino que tanto la deformación como la temperatura aumentan rápidamente desde el inicio hasta el final del ensayo. Un ejemplo de este caso se puede observar en la figura 8, correspondiente al ensayo de una

probeta de la dosificación 1 con $R=0.05$ y $S=0.80$, que rompió tras 56.465 ciclos, y donde se observa que la temperatura en los tres termopares aumenta durante todo el ensayo.

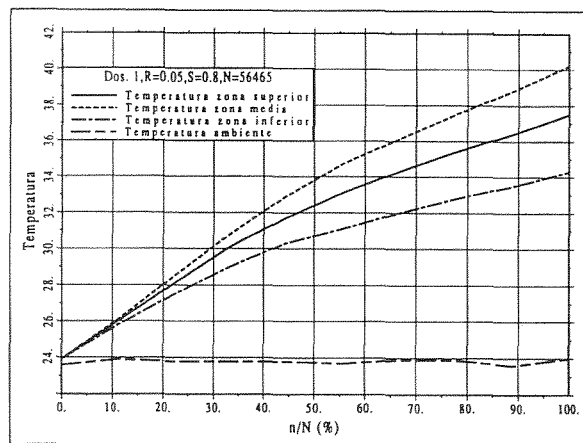


Fig. 8. Evolución de la temperatura en una probeta sometida a un ensayo de fatiga.

En ambos casos (Figuras 7 y 8), la diferencia entre la temperatura en la zona media (máxima) y la temperatura ambiente en el instante de rotura son aproximadamente iguales, y del orden de 15°C. Sin embargo, esta coincidencia no se produjo en todos los ensayos y se llegaron a registrar diferencias entre ambas temperaturas de más de 25°C.

Destacar asimismo que en otros ensayos llegaron a alcanzarse temperaturas de hasta 50°C. Estas altas temperaturas durante los ensayos se registraron para las probetas correspondientes a las dosificaciones 1 y 2, mientras que los resultados para las dosificaciones 3 y 4 fueron menores y del orden de los mostrados en la figura 7.

Estos incrementos de temperatura responden a las características del ciclo de histéresis, el cual no se ha podido medir. Cuando un proceso de carga y descarga se realiza en condiciones isoterms ambas curvas de carga y descarga coinciden, siendo mínima el área encerrada por el ciclo de histéresis. La misma situación se produce cuando el proceso se realiza en condiciones adiabáticas, es decir, sin intercambio calorífico con el exterior, en el que de nuevo el área encerrada en el ciclo de carga y descarga es mínima. Es en situaciones intermedias en las que el ciclo encierra un área mayor y en consecuencia se registra una mayor disipación de energía en forma de calor.

Trasladando ese hecho a un ensayo a fatiga se observa como es la frecuencia la que determinaría una mayor o menor disipación de energía, puesto que, unas frecuencias bajas darían lugar a unas condiciones isoterms mientras que unas frecuencias altas darían lugar a unas condiciones adiabáticas deduciéndose de ello que sería en un rango intermedio de frecuencias (propio de cada material) en el que se produciría una mayor disipación de energía.

Puesto que no se ha observado esta disipación de energía en hormigones convencionales en ensayos realizados con esas frecuencias es de suponer, que las velocidades de carga y descarga asociadas a esas frecuencias se sitúan lejos de la zona de frecuencias de máxima disipación de energía, pudiéndose suponer que esas frecuencias aseguran unas condiciones adiabáticas durante los ciclos de carga y descarga. El diferente comportamiento observado en los hormigones porosos hace suponer que esas mismas frecuencias no aseguran unas condiciones adiabáticas sino que se encuentran dentro de ese rango intermedio, característico del material, asociado a una máxima disipación de energía. Esta diferencia de comportamientos puede explicarse teniendo en cuenta la estructura extremadamente abierta de un hormigón poroso que facilita de forma notable los intercambios térmicos con el exterior. Esa estructura ocasionaría que para frecuencias iguales a las empleadas en hormigones convencionales el intercambio con el medio resultase más fácil, no pudiéndose mantener, por tanto, unas condiciones adiabáticas. Esta particularidad difícilmente se podía observar en ensayos estáticos, y sólo ha podido ser constatada en ensayos cíclicos en los cuales la disipación de energía se multiplica por el número de ciclos totales.

5. CONCLUSIONES

En base a los resultados experimentales anteriormente descritos, pueden deducirse las siguientes conclusiones:

- El comportamiento a fatiga de los hormigones porosos es adecuadamente modelado mediante una relación lineal entre S y $\log N$ (curvas de Wöhler). La pendiente de estas rectas depende de R de forma análoga al caso de hormigones convencionales.
- Para bajo número de ciclos de carga y descarga, los hormigones porosos modificados con polímero presentan un mejor comportamiento a fatiga que los que no contienen polímero. Esta diferencia disminuye con el número de ciclos, hasta ser prácticamente inapreciable para un número suficiente de ciclos, que es el caso más realista de la acción que inducen los vehículos sobre un pavimento a largo plazo.
- La adición de microflice en un hormigón poroso no supone ninguna variación en el comportamiento a fatiga respecto a un hormigón poroso sin adiciones.
- Los hormigones porosos modificados con polímeros presentan un mejor comportamiento a fatiga que los hormigones densos. Consecuentemente, las curvas de Wöhler obtenidas para hormigones densos no son adecuadas para el proyecto de hormigones porosos modificados con polímeros, siendo necesario utilizar curvas específicas para ellos.
- La temperatura de las probetas crece con el número de ciclos durante el ensayo a fatiga. Ese incremento térmico no es constante en toda la probeta siendo máximo en la zona central de la misma. Asimismo en la zona superior se registra un incremento térmico ligeramente superior al registrado en la zona inferior debido a la falta de simetría de la carga, puesto que, el plato móvil de la prensa es precisamente el superior.
- El área encerrada por el ciclo de histéresis de estos hormigones es mayor que el de hormigones convencionales. Una posible explicación a este hecho puede estar en la estructura extremadamente abierta de estos hormigones que facilita notablemente los intercambios térmicos con el exterior.

6. AGRADECIMIENTOS

Los autores desean expresar su agradecimiento por la financiación recibida de la Comisión Europea a través del proyecto Brite-Euram BE-3415 y del Instituto Español del Cemento y sus Aplicaciones (IECA). Asimismo, el primer autor desea agradecer a la CICYT la ayuda recibida a través del proyecto MAT93-0293 y al Ministerio de Educación y Ciencia por la concesión de una beca F.P.I.

7. REFERENCIAS

- [1] Proyecto Brite-Euram nº 3415. 1990-1994. *Optimization of the surface characteristics of concrete roads in accordance with environmental acceptance and traffic safety.*
- [2] C.E.B., 1988. *Fatigue of concrete structures. State of the Art Report.* Bulletin d'Information nº 188, junio.
- [3] Hsu, H.T., 1983. *Flexural behavior of polymer concrete beams.* Tesis doctoral no publicada. The University of Texas at Austin, diciembre.
- [4] Josa, A., Pindado, M.A., Aguado, A. y Onstenk, E. 1994. *Fatiga de hormigones porosos para capas de rodadura de firmes.* Cemento-Hormigón, nº 740, diciembre, pág. 1597-1619.
- [5] Pindado, M.A., Aguado, A., Josa, A. y Onstenk, E. 1994. *Laboratory study of fatigue of polymer-modified porous concrete for its use as top layer of concrete pavements.* ACI Fall Convention. Tarpon Springs, Octubre. Próxima publicación en un ACI Special Publication.
- [6] Aguado, A., Josa, A., Pindado, M.A., Onstenk, E y Eickschen, E. 1994. *Fatigue testing of porous concrete.* Report subtask 3.1, BE-3415, UPC, abril.
- [7] Hsu, T.T.C., 1981. *Fatigue of plain concrete.* ACI Journal, Proc. V.78, julio-agosto, pág. 292-305.
- [8] Tepfers, R., y Kutti, T., 1979. *Fatigue strength of plain, ordinary, and lightweight concrete.* ACI Journal, Proc. V.76, nº 5, mayo, pág. 635-652.
- [9] Oliveira, M.O.F., 1992. *Fatiga y microfisuración de los hormigones de alta resistencia. Consideraciones de diseño.* Tesis Doctoral. ETSECCP, UPC, Barcelona, julio.
- [10] Fernández, F., 1992. *Fatiga en hormigones de firmes. Estado de arte y estudio experimental.* Tesis de Especialidad. ETSECCP, UPC, Barcelona, septiembre.