

Propiedades físicas y mecánicas del hormigón dañado y su significado en la caracterización del material en estructuras afectadas

G. Giaccio¹
M. C. Torrijos²
R. Zerbino²

¹ Investigador CIC-LEMIT- Facultad de Ingeniería UNLP, La Plata, Argentina.

² Investigador CONICET-LEMIT- Facultad de Ingeniería UNLP, La Plata, Argentina.
zerbino@ing.unlp.edu.ar

Resumen

Este trabajo discute, en base a numerosos estudios experimentales, la problemática de las propiedades residuales del hormigón cuando es afectado por diferentes procesos de degradación. Los casos estudiados incluyen el daño por exposición a altas temperaturas y el daño por efecto de la reacción álcali-sílice; no obstante, resultan aplicables a diferentes patologías en lo que respecta al modo en que pueden alterarse las propiedades físicas y mecánicas del hormigón. El conocimiento del efecto de los procesos de daño sobre las diferentes propiedades y la vinculación entre las mismas resulta necesario al momento de interpretar los resultados obtenidos durante la evaluación del hormigón de una estructura dañada, sea sobre la estructura en si misma o a partir de la extracción de testigos, en vistas a su rehabilitación, reparación o refuerzo.

Abstract

This paper discusses, based on numerous experimental works, about the residual properties of concrete affected by different degradation processes. The studied cases include damage caused by exposure to high temperatures and damage caused by the alkali-silica reaction; however, they are applicable to different pathologies with regard to the way the physical and mechanical properties of concrete can be altered. The knowledge of the effect of the damage processes on the different properties and the relationship between them is necessary when interpreting the results obtained during the evaluation of the concrete of a damaged structure, either on the structure itself or from the cores extraction, in view of its rehabilitation, repair or reinforcement.

Palabras clave

Estructuras de hormigón, hormigón dañado, propiedades residuales, exposición a alta temperatura, reacción álcali - sílice.

Key words

Concrete structures, damaged concrete, residual properties, high temperatures, alkali silica reaction.

INTRODUCCION

Marco de referencia

En la actualidad, la reparación o refuerzo de estructuras existentes representa una cuestión de gran interés en todo el mundo ya que resulta imperiosa la necesidad de aprovechamiento y extensión de la vida en servicio de las obras de infraestructura, en busca de una mayor sustentabilidad. En varias ocasiones el hormigón puede estar expuesto a procesos de degradación que generan diferentes tipos y niveles de daño, alteran sus propiedades físicas y mecánicas y, consecuentemente, afectan el funcionamiento y fiabilidad de la estructura.

La evaluación de la capacidad en servicio o la toma de decisiones sobre reemplazo, sistemas de refuerzo o reparación en estructuras dañadas requieren muchas veces del conocimiento de las propiedades del hormigón existente, para lo que se recurre al uso de diversas herramientas desde la observación visual, métodos no destructivos o la extracción y caracterización de testigos.

En un material compuesto como el hormigón los procesos de degradación pueden generar daño, tanto a nivel de la matriz como de las interfaces y/o la aparición de micro y macro fisuras. Es reconocido que el simple proceso de retracción por secado puede dar lugar a la fisuración en el material. La exposición a alta temperatura (EAT) y el desarrollo de la reacción álcali - sílice (RAS) constituyen casos de degradación de particular interés a nivel mundial. Ambos pueden provocar alteraciones significativas en la estructura interna del hormigón, existiendo numerosos ejemplos de estructuras afectadas. Los casos de EAT aparecen en centrales nucleares, instalaciones industriales, incendios, túneles; por su parte tableros de puentes, obras hidráulicas en general, viaductos y pavimentos constituyen casos típicos de evaluación y reparación de estructuras afectadas por RAS.

Este trabajo tiene como finalidad mostrar en qué medida se modifican las propiedades físicas y mecánicas en un hormigón dañado a partir de ejemplos de los dos casos antes indicados (EAT y RAS) incluyendo distintos grados de alteración (escaso, severo).

Cabe aclarar que, como es bien conocido, otro caso de degradación muy importante desde el punto de vista de la sustentabilidad es la corrosión de armaduras en las estructuras de hormigón armado. Es evidente que este proceso además de dar lugar a la degradación de las barras de

acero y de su adherencia con el hormigón, puede generar fisuras que afecten la durabilidad y propiedades mecánicas del material, afectando todo esto el desempeño e integridad de los elementos estructurales. Sin embargo el análisis de esta patología escapa al alcance de este trabajo.

La estructura del hormigón como material compuesto y la presencia de daño

El hormigón es un material compuesto donde inclusiones de diferentes formas y tamaños (los agregados) se encuentran inmersas en una matriz más o menos continua que actúa como ligante. El mecanismo de falla del hormigón está vinculado estrechamente con el inicio y propagación de fisuras, los agregados, en especial los agregados gruesos, dan lugar a zonas de mayor debilidad (interfaces) que favorecen el inicio de la fisuración. Se ha reconocido el efecto de los niveles relativos de resistencia de la matriz y los agregados y de la adherencia de interfaces sobre el mecanismo de rotura [1].

Hace varias décadas se ha mostrado que la respuesta tensión - deformación en compresión está íntimamente ligada al desarrollo de fisuración interna [2]. Inicialmente suelen existir pequeñas fisuras en las interfaces (o zonas de transición), a medida que aumentan las cargas estas fisuras crecen en forma aislada pero superado aproximadamente el 50 % de la carga de rotura se ramifican e internan dentro del mortero y en muchos casos se produce coalescencia con otras fisuras, por lo que la curva se aparta marcadamente de la linealidad. Finalmente, si vuelve a aumentar la carga llega un punto donde ya las fisuras crecen en forma rápida e inestable hasta alcanzar la rotura. En este proceso el agregado desempeña un doble rol, por un lado favorece el inicio de las fisuras en las zonas de transición, y por otro provoca la ramificación y/o interrupción de las fisuras controlando el mecanismo de rotura.

En el caso del hormigón dañado, este proceso de crecimiento de fisuras se ve favorecido y se refleja claramente en las curvas tensión - deformación. La Figura 1 compara la respuesta en compresión de un hormigón convencional sano y con diferentes niveles de daño, no solo se modifica la resistencia sino también la deformabilidad del material.

Los mecanismos de fractura pueden variar conforme las propiedades de la matriz, las interfaces y los agregados; esto no sólo aplica a hormigones

de alta resistencia (donde pueden fracturarse los agregados) sino también al caso del hormigón dañado. Los procesos de contracción de la pasta o diferencias en coeficientes de expansión térmica que existan entre la matriz y los agregados generan microfisuras a nivel de las interfaces afectando la adherencia. Ante procesos de degradación como los aquí discutidos (EAT, RAS) también se puede generar un daño a mayor escala que afecte directamente a la matriz.

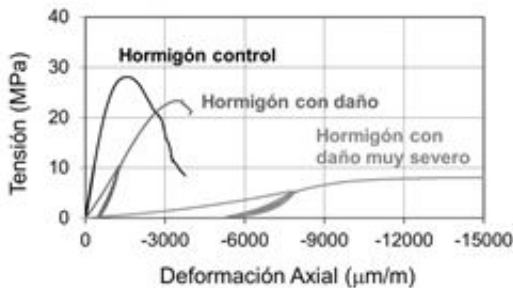


Figura 1. Comportamiento tensión deformación de hormigones dañados.

En consecuencia, las fisuras o microfisuras pueden existir en el hormigón incluso antes de ser puesto en servicio y luego crecen ante la aplicación de las cargas. La fisuración es determinante al momento de considerar la durabilidad de las estructuras. Los diversos ataques por agentes agresivos externos a los que puede estar sometido el hormigón (casos de lixiviación, sulfatos, cloruros, carbonatación) se potencian si existen en el material estas vías de ingreso. Aún más, el crecimiento de la velocidad de degradación depende en gran medida del tamaño y densidad de fisuras.

En la práctica es frecuente estimar las propiedades elásticas a partir de la resistencia a compresión como así también considerar valores típicos para el coeficiente de Poisson o para las deformaciones que se alcanzan en la rotura. Sin embargo, cuando se desarrollan procesos de degradación en el hormigón pueden aparecer cambios de importancia, un cuadro de fisuración interna modifica significativamente la respuesta tensión - deformación. Por ejemplo, en un estudio sobre los efectos de la exudación en elementos de 2 m de altura [3] se informan grandes diferencias entre la respuesta de testigos extraídos en la dirección de llenado de la zona superior y de la inferior de las columnas; una alta velocidad de exudación había generado canales que reducían tanto la resistencia como la rigidez del hormigón, mientras que cuando la exudación solo provocó bolsas debajo

de los agregados no se modificó tanto la resistencia pero sí se alteró la curva tensión - deformación y se evidenció una fuerte anisotropía.

Casos estudiados

Se discuten a continuación varios aspectos relevantes de las propiedades residuales físicas y mecánicas del hormigón dañado. Se seleccionaron para ello dos mecanismos de degradación: la exposición a alta temperatura (EAT), considerando diferentes niveles de temperatura y por lo tanto de daño, y la degradación por reacción álcali-sílice (RAS), considerando diferentes cinéticas de reacción a partir del uso de agregados gruesos reactivos, agregados finos reactivos y reacciones en la misma pasta generadas por la presencia de partículas de cenizas de cáscara de arroz residual. Se describen someramente a continuación los antecedentes del conocimiento sobre estos dos procesos de daño.

EAT: la exposición a alta temperatura constituye un caso de daño importante para las estructuras de hormigón. Los distintos coeficientes de expansión de las fases componentes (pasta y agregados) y los cambios en el contenido de agua de la pasta dan lugar a fisuras. Aquí, el tipo de agregado representa una variable de importancia mayor que el tipo de cemento. Inicialmente se elimina el agua de los poros con la consecuente contracción de la pasta, hasta temperaturas del orden de 200 o 300 °C no provocan mayor alteración ni en los agregados ni en los productos de hidratación del cemento. Temperaturas superiores a 500 °C producen una alteración irreversible en la estructura del material ya que comienza a perderse el agua de hidratación de los silicatos. También se generan alteraciones en mezclas que incluyan agregados con cuarzo. Además, crece la microfisuración en las interfaces y en general el tamaño y proximidad de las fisuras en todo el material. No obstante, ya desde temperaturas mucho menores se verifican reducciones en la velocidad de pulso ultrasónico (VPU) y en el módulo de elasticidad (E), las que aumentan sensiblemente con la temperatura de exposición. El nivel de temperatura, el tiempo de exposición y las condiciones de enfriamiento constituyen los principales factores que afectan las propiedades residuales; además de caídas en resistencia, se han informado incrementos en las deformaciones finales y reducciones en la relación de Poisson. La resistencia a tracción es más sensible que la resistencia a compresión ante la EAT, también en este caso el tipo de agregado posee gran incidencia. La ener-

gía de fractura se modifica en forma particular frente al daño. A simple vista, además de fisuras superficiales se detectan cambios de coloración. Si bien temperaturas menores a 200 °C no tienen mayores efectos sobre la resistencia a compresión, se reconoce que pueden afectar el hormigón de recubrimiento y dar lugar a cambios significativos en las propiedades de transporte y la durabilidad en general. [4-13].

RAS: la reacción álcali-sílice induce caídas en la fiabilidad de las estructuras de hormigón. Como es bien sabido, la RAS ocurre si existen agregados reactivos y suficiente disponibilidad de álcalis (K_2O , Na_2O) y agua en el sistema de poros; se estima que niveles de humedad relativa ambiente mayores al 60% brindan condiciones para el desarrollo de la RAS, pero por supuesto depende de las dimensiones de los elementos estructurales. Conforme la cinética de reacción pueden producirse diferentes niveles de fisuración en el hormigón. Se han observado micro y microfisuras por tensiones internas en mezclas que incorporan agregados de reacción rápida. En hormigones conteniendo agregados con cuarzo tensionado, donde el proceso es lento, se han detectado reacciones dentro de los agregados (intercristales) [14-15]. La mayoría de los trabajos acuerdan en que las propiedades más afectadas son la resistencia a tracción y el módulo de elasticidad. Las reducciones en resistencia a compresión son siempre menores e incluso en algunos casos no se aprecian diferencias, consecuentemente esta propiedad no constituye un buen indicador de la calidad del hormigón dañado por RAS; por ello sus resultados deberán interpretarse considerando el mecanismo de falla del material. Es habitual interpretar el nivel de daño por RAS en base a resultados de expansión lineal, sin embargo, las propiedades mecánicas pueden ser muy diferentes para una misma expansión. Los diferentes cuadros de fisuración se reflejarán en la respuesta tensión-deformación. El cuadro de fisuras también se modifica cuando existen armaduras o cuando el hormigón está sometido a cargas permanentes.

PROPIEDADES RESIDUALES EN EL HORMIGÓN DAÑADO

Se entiende por propiedades residuales aquellas que tiene el material luego de haber sido sometido a algún proceso de daño, incluyendo también la aplicación de cargas que modifiquen la fisuración. En este apartado se mostrarán ejemplos de propiedades residuales en hormigón dañado y su comparación con las del material original.

Respuesta tensión – deformación en compresión

Es conocida la asociación entre la respuesta tensión - deformación y el nivel de fisuración interna. Bajo cargas de compresión el hormigón se comporta prácticamente en forma lineal hasta una tensión del orden del 30 al 50% de la tensión última, durante esta etapa las fisuras preexistentes permanecen estables o presentan un crecimiento poco significativo. Próximo al 50% de la carga de rotura las fisuras comienzan a propagarse a lo largo de las interfaces y posteriormente se internan en la matriz. Entonces, la curva se aparta de la linealidad y la relación entre deformaciones transversales y longitudinales comienza a crecer (este punto se conoce como tensión de iniciación). Finalmente, para una tensión relativa mayor al 75% de la carga máxima (si los agregados gruesos son pequeños puede ser superior al 90%), se desarrolla un crecimiento rápido de las fisuras y si simplemente se mantuviera la carga (sin incrementarla) el sistema se tornaría inestable y en algún tiempo se alcanzaría la rotura. Si se representa la variación de las deformaciones volumétricas con la aplicación de las cargas aparece un mínimo en la curva de deformaciones, la tensión para la cual se produce este cambio en el volumen, se denomina tensión crítica y se asocia al inicio de la propagación inestable de fisuras y está vinculada con la resistencia del hormigón frente a cargas de compresión de larga duración, a veces indicado como fatiga estática.

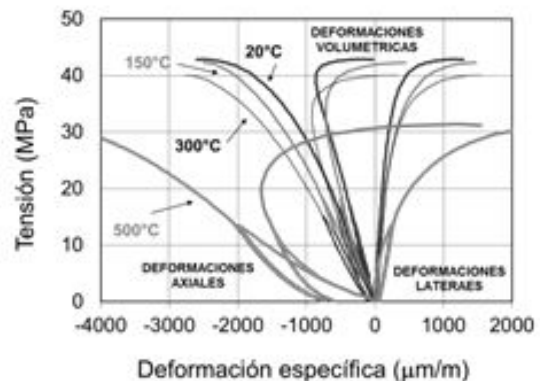


Figura 2. Efecto del daño por EAT sobre las curvas tensión deformación del hormigón.

La Figura 2 muestra la variación de las deformaciones axiales, laterales y volumétricas con el nivel de tensión para hormigones elaborados con piedra partida granítica de 19 mm de tamaño máximo que fueron previamente expuestos a 150 °C durante 24 horas, o a 300 o 500 °C du-

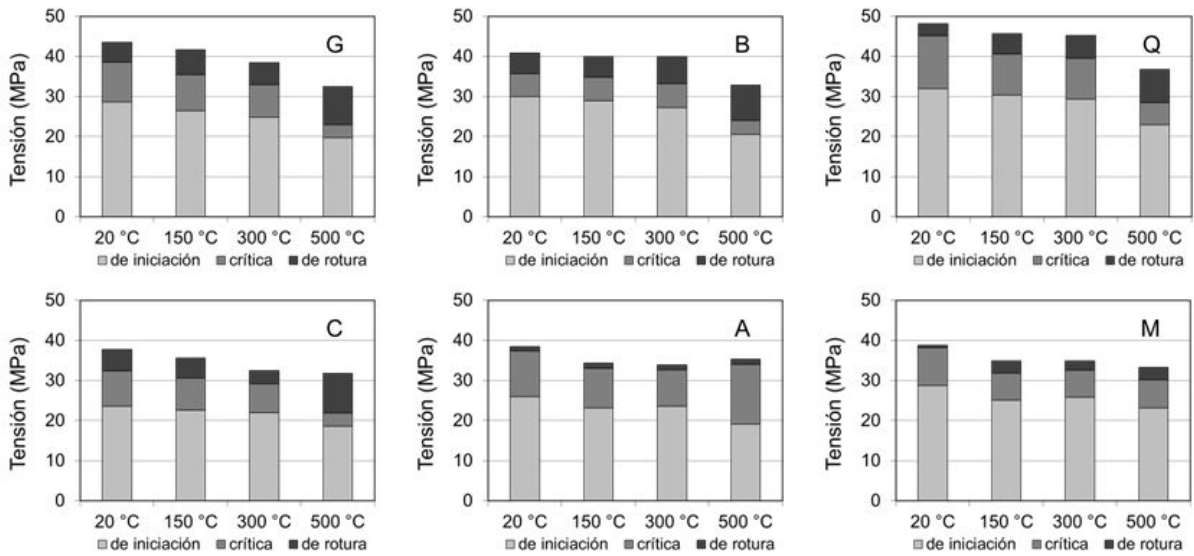


Figura 3. Variación de las tensiones residuales de iniciación, tensiones críticas y la resistencia a compresión con el nivel de daño en hormigones EAT elaborados con diferentes agregados. M: mortero, G: granito, B: basalto, Q: cuarcita, C: caliza, E: arcilla expandida.

rante 1 hora; como referencia se incluye el mismo hormigón mantenido a temperatura ambiente (20 °C). Las microfisuras y otras alteraciones en la estructura interna modifican el mecanismo de falla y esto se refleja en la forma de las curvas tensión – deformación. En el hormigón dañado se propagan con mayor facilidad las fisuras de matriz y crece el período de propagación inestable tanto más cuanto mayor es el daño interno. Consistente con los antecedentes, se observa que la microfisuración afecta más la rigidez que la resistencia a compresión, para temperaturas tan bajas como 150°C que prácticamente no modifican la resistencia, existe un decrecimiento en el módulo de elasticidad.

La Figura 3 representa, para hormigones expuestos a diferentes temperaturas, la variación de las tensiones de iniciación, tensiones críticas y la resistencia a compresión incluyendo además del hormigón con piedra granítica (G) (de la Figura 2), otros hormigones elaborados con otros agregados: basalto (B), cuarcita (Q) y calizas (C) trituradas, y con arcillas expandidas (E) todos de 19 mm de tamaño máximo. Asimismo, se incluye un mortero (M) con la misma relación agua/cemento. Entre las principales observaciones se verifica que la resistencia a compresión decrece en especial por encima de 300 °C pero el módulo de elasticidad y el período de propagación inestable de fisuras ya son afectados por temperaturas de apenas 150 °C. El efecto de estas tem-

peraturas en la microfisuración es comparable al generado por una fuerte contracción por secado. También se verifican reducciones en la relación de Poisson. Las fisuras crecen antes en hormigón dañado y tanto las tensiones de iniciación como las críticas son muy sensibles a la temperatura de exposición. Esto también justifica que, como se verá más adelante, la resistencia a tracción resulte mucho más afectada que la resistencia a compresión. En el caso del basalto, una piedra con buena adherencia y baja conductividad térmica, la resistencia a compresión prácticamente no se modifica, pero si lo hace el módulo de elasticidad y las tensiones de iniciación y críticas.

En otro estudio se analizaron las propiedades mecánicas de 4 mezclas: un hormigón de referencia (C1) y 3 hormigones afectados por RAS (R2, R3, R4); en estos últimos se emplearon diferentes agregados reactivos para generar distintas cinéticas de degradación: la mezcla R2 incluye una ortocuarcita silíceas muy reactiva como parte del agregado grueso, R3 con un porcentaje de arena muy reactiva combinada con arena natural, mientras que R4 incorpora agregados con cuarzo tensionado que generan reacción lenta. En el estudio se verificaron grandes diferencias en las velocidades de RAS, en los períodos de inducción y en los signos de reacción y morfología del daño. R2 tuvo grandes expansiones las primeras semanas, con productos de RAS en la periferia de las partículas de roca, fisuras en interfaces y en el mortero con

y sin la presencia de gel. R3 muestra microfisuración difusa en su interior y gel en la periferia de los granos de arena. Por su parte en R4 fue difícil observar daño en el interior o grandes fisuras, lo cual fue atribuido a algún posible proceso de relajación [15]. Cuando en estos hormigones se midieron expansiones lineales del orden de 0,15 %, se realizaron ensayos de compresión que se compararon con la respuesta de C1 a la misma edad, a modo de referencia. La Figura 4 muestra las curvas tensión – deformación axial obtenidas donde se evidencian los efectos del daño: R2 y R3 no incrementaron su resistencia con respecto la medida en los mismos hormigones a los 28 días y presentaron grandes reducciones en el módulo de elasticidad; por el contrario, en R4 la evolución de resistencia a compresión fue comparable a la de C1, pero igualmente se redujo la rigidez. La Figura 5 compara las curvas volumétricas de C1 y R3 a edad avanzada. En forma similar a la Figura 3 que trataba el caso de EAT, la Figura 6 muestra el efecto del daño por RAS sobre las tensiones de iniciación y críticas y sobre la resistencia a compresión. Considerando las diferentes velocidades de reacción, los ensayos se realizaron a distintas edades de forma de analizar las propiedades mecánicas de los hormigones reactivos a niveles de expansión semejantes. El hormigón control se ensayó a tres edades de modo de abarcar el rango comprendido entre el primer y último ensayo de las mezclas con RAS.

Un estudio que analizó el desarrollo de la RAS bajo cargas de larga duración permite comparar la respuesta tensión – deformación en compresión de probetas mantenidas bajo carga y otras de referencia que permanecieron sin cargar, y apreciar el efecto de la orientación de las fisuras sobre las propiedades mecánicas. En la Figura 7 se muestran las curvas tensión – deformación de un hormigón sano y otro de iguales proporciones dañado por RAS. Las cargas permanentes provocaron diferencias en la orientación de las fisuras con sus consecuentes efectos en la respuesta mecánica. Las deformaciones correspondientes a la carga pico en compresión fueron notablemente mayores en el hormigón dañado, en especial en las probetas que no fueron sometidas a carga permanente. La existencia de fisuras preexistentes se refleja durante los ciclos de precarga del ensayo de compresión. En el hormigón sano la relación de deformaciones laterales/axiales se mantiene relativamente constante hasta grandes niveles de carga, mientras que en el hormigón dañado, y en particular en las muestras no sometidas a carga permanente, se verifica un continuo incremento de la relación de deforma-

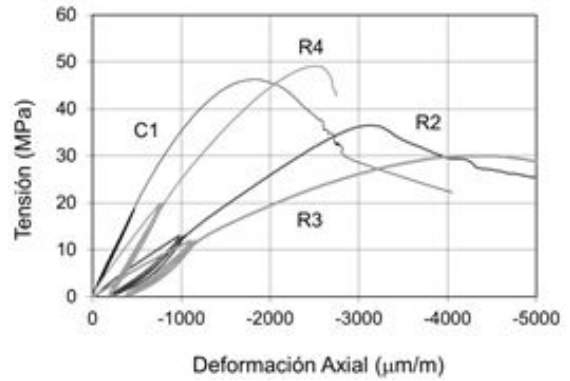


Figura 4. Efecto del daño por RAS sobre las curvas tensión – deformación.

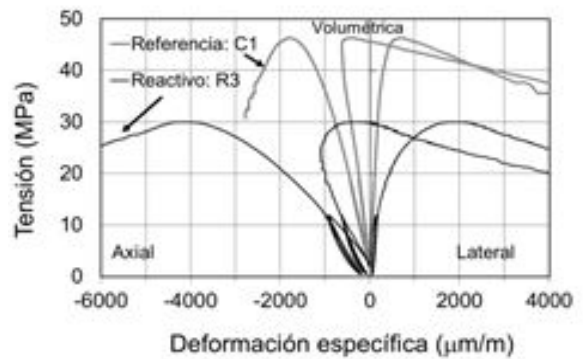


Figura 5. Curvas tensión-deformación volumétrica de hormigón sano (C1) y dañado por RAS (R3) a edad avanzada.

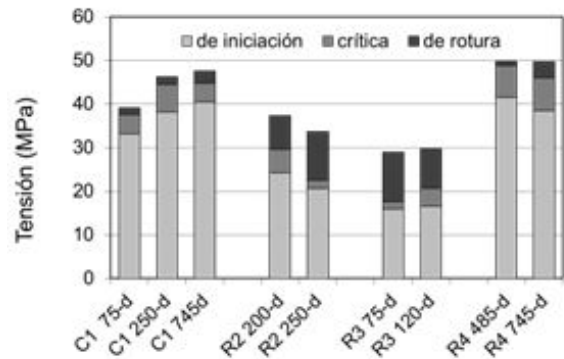


Figura 6. El efecto del daño por RAS sobre las tensiones de iniciación y críticas y la resistencia a compresión.

ciones laterales/axiales; inicialmente se cierran algunas fisuras normales a la dirección de la carga pero luego crecen en la dirección axial, lo que aumenta significativamente las deformaciones laterales. En el hormigón dañado el incremento en la relación de deformaciones laterales/axiales

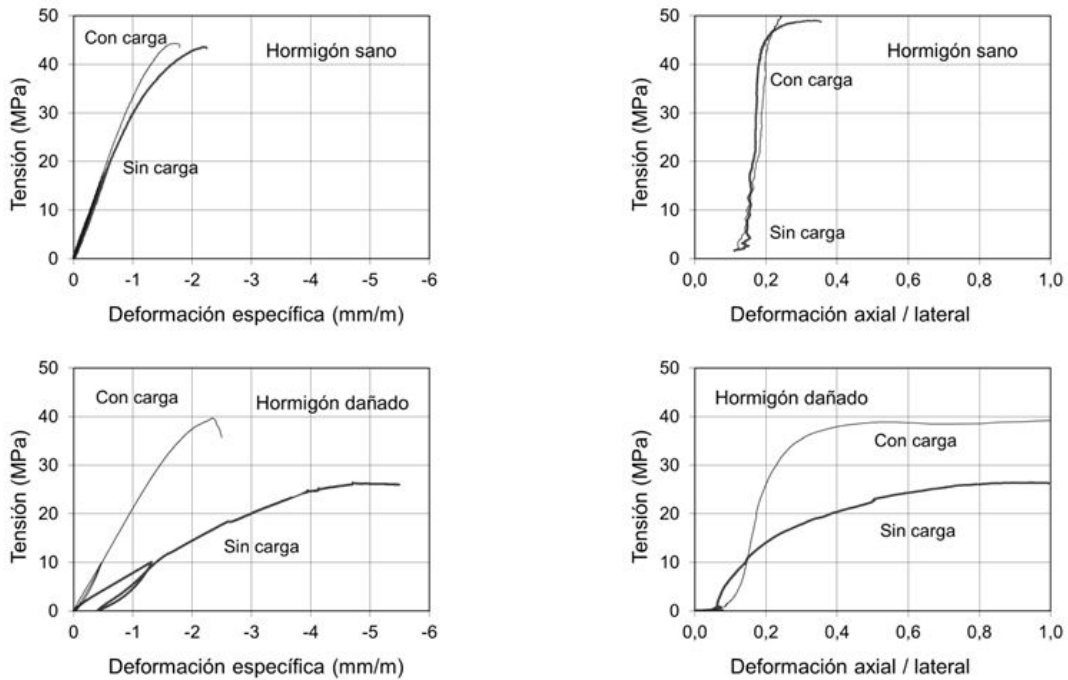


Figura 7. Efecto del daño por RAS y de las cargas sobre las curvas tensión – deformación del hormigón.

es mucho mayor. Por efecto de la consolidación creció la resistencia de las probetas cargadas de ambos hormigones, sano y dañado, sin embargo en el primero este aumento fue cercano al 10% mientras que en el dañado fue del orden del 60%. Las diferencias entre probetas cargadas y sin cargar en hormigón dañado son aún mayores si se analiza el módulo de elasticidad.

Los resultados confirman que el mecanismo de falla y el módulo de elasticidad bajo cargas de compresión están claramente afectados por la RAS. La forma de las curvas refleja la presencia de fisuras en el interior del material. Debido a los defectos el inicio y la propagación de fisuras comienzan antes, y si bien el periodo de propagación estable es menos afectado que el periodo de propagación inestable, este último incluso se extiende; el inicio prematuro de la fisuración hace que la capacidad de controlar la propagación de fisuras decrezca dando lugar a fallas prematuras. Frente al daño por RAS las fisuras se desarrollan conforme los esfuerzos en el interior del hormigón; en consecuencia la resistencia residual y la deformabilidad pueden variar substancialmente entre un hormigón bajo carga y otro sin cargar, hechos que deben ser tenidos en cuenta al evaluar estructuras dañadas.

Otro caso interesante surge de un estudio donde la RAS fue generada por partículas de cenizas de

cáscara de arroz obtenidas sin quema controlada ni molienda posterior. Se elaboraron tres hormigones, uno de referencia sin cenizas (A1) y dos reemplazando 15% de cemento en peso por cenizas, sea con ceniza molida (A2) o con la ceniza en estado natural (A3); el mayor tamaño de partículas de esta última favorece la RAS. En todas las mezclas se incorporaron álcalis hasta alcanzar un total de Na_2O_{eq} de $5,25\text{ kg/m}^3$ [16], con ellos se elaboraron tres losas de 0,20 m de espesor y probetas para evaluación de expansión y resistencia. A los 28 días los hormigones alcanzaron resistencias a compresión iguales a 31,6, 31,0 y 32,7 MPa respectivamente. La Figura 8 muestra el aspecto de las muestras y compara las curvas tensión – deformación en compresión de los hormigones A1, A2 y A3 luego de 4 meses, donde ya se evidencia en forma notable el daño en A3. En A1 y A2 la resistencia a compresión evolucionó con respecto a la alcanzada a 28 días, superando los 56 MPa luego de tres años; por el contrario, en A3 sólo se alcanzaron 36 MPa. También se verificó un fuerte decrecimiento en la rigidez. Comparando A3 y A1 a la edad de 3 años, el módulo de elasticidad disminuyó cerca del 70%, lo que se atribuye a la presencia de fisuras, mientras que la diferencia en resistencia a compresión fue del 35%. Asimismo, la figura evidencia una gran deformación residual luego del primer ciclo de carga y que la deformación correspondiente a la carga pico superó el 0,5 % en el hormigón A3.

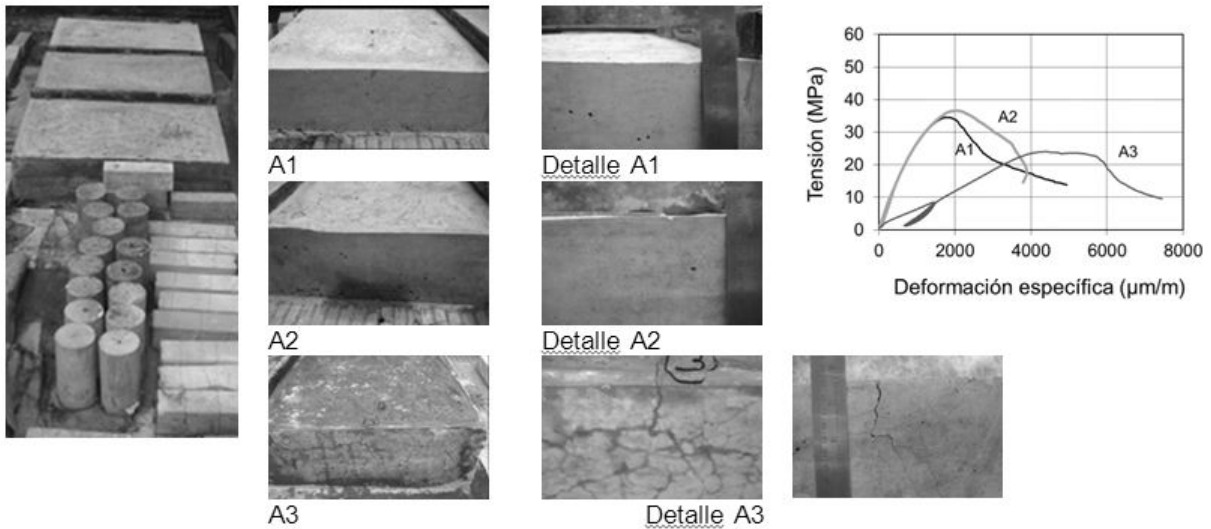


Figura 8. Aspecto de las losas de hormigón y curvas tensión – deformación en compresión de los hormi-gones A1, A2 y A3 luego de 4 meses.

Sobre la estimación del módulo de elasticidad

En ocasiones, la rigidez del hormigón puede ser determinante para valorar la funcionalidad de algunas estructuras. Al respecto, los resultados antes presentados indican que el módulo de elasticidad resulta mucho más afectado que la resistencia a compresión en hormigón dañado. Por ello es fácil comprender que si se modifica la relación entre estas propiedades no es posible aplicar las tradicionales fórmulas de estimación, tan frecuentes en códigos y reglamentos. La Figura 9 representa la relación entre el módulo de elasticidad y la resistencia a compresión para los hormigones analizados en el apartado anterior correspondientes a los casos de daño por RAS. La relación entre dichas propiedades se aleja notablemente de la obtenida en los hormigones sanos (Control), y varía con el nivel de daño.

Sobre la estimación de la resistencia a partir de testigos

La resistencia a compresión se suele evaluar sobre probetas cilíndricas de relación de esbeltez (h/d) 2. Cuando se ensayan testigos se suele aplicar una corrección por esbeltez para estimar la resistencia. Es importante destacar que dicha corrección que aparece frecuentemente en la bibliografía e incluso en algunos reglamentos es producto de ajustes empíricos de hormigones convencionales. Se ha comprobado que existen variables que modifican estos factores de co-

rrección, por ejemplo, no es igual el caso de un hormigón convencional que un hormigón de alta resistencia donde los agregados pueden fracturarse; también se modifica a medida que se varía el tamaño máximo de los agregados [17]. El tamaño de agregado y la geometría de las probetas influyen sobre los resultados de resistencia a compresión de un mismo hormigón, y ello se debe a la influencia de los agregados y sus interfaces sobre la propagación de fisuras. Y en el caso de un hormigón dañado, aún no muy severamente, también se pueden modificar las relaciones entre probetas de diferente esbeltez por lo que no es recomendable aplicar los habituales factores de corrección. Como ejemplo, la Tabla 1 muestra el efecto de la microfisuración (por secado) sobre la resistencia del hormigón medida en cubos de

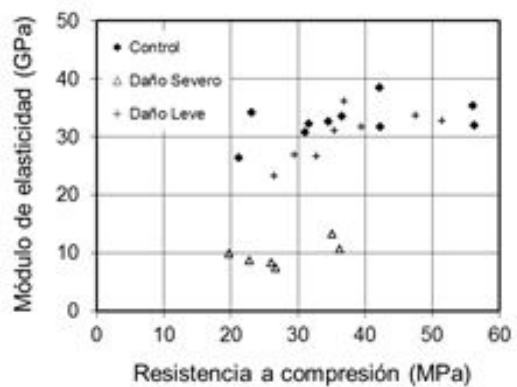


Figura 9. Relación entre el módulo de elasticidad y la resistencia a compresión para hormigones dañados RAS.

Tabla 1. Resistencia a compresión (MPa) medida sobre probetas de diferente tamaño.

Material	Grupo A 7 días en cámara húmeda			Grupo B 173 días en cámara húmeda + 7 días en agua			Grupo C 7 días en cámara húmeda + 166 días en cámara seca + 7 días en agua		
	2	1	1 / 2	2	1	1 / 2	2	1	1 / 2
Mortero	18.8	19.3	1.03	31.6	30.4	0.96	28.4	30.8	1.08
C25	16.7	20.0	1.20	31.5	32.9	1.04	28.5	31.5	1.11
C50	17.0	21.1	1.24	29.1	33.7	1.16	25.6	29.3	1.14

2: cilindros de 150x300 mm, h/d=2, promedio de 4 ensayos.
1: cubos de 230 mm, h/d=1, promedio de 6 ensayos.

230 mm de lado y sobre cilindros de 150x300 mm. Se presentan resultados obtenidos sobre un mortero (M) y dos hormigones de 25 y 50 mm de tamaño máximo de agregado (C25, C50) todos elaborados con la misma relación agua / cemento, incluyendo tres grupos de probetas: el grupo A de menor resistencia que fue curado en cámara húmeda 7 días y luego ensayado; el grupo B mantenido durante 173 días en cámara húmeda y luego bajo agua durante 7 días; y el grupo C que luego de 7 días en cámara húmeda fue expuesto en cámara seca durante 166 días (55% RH, 20°C) para concluir con otros 7 días bajo agua. En este último grupo se midieron valores de contracción por secado a la edad de 180 días iguales a 500, 260 y 220 microstrains, para M, C25 y C50 respectivamente. Si bien la contracción del mortero es mayor, la restricción de los agregados gruesos induce mayor microfisuración, tanto más cuanto mayor es el tamaño máximo. Cuando existe menor esbeltez la capacidad de control del crecimiento de fisuras por parte de los agregados gruesos aumenta. Comparando los grupos A, B y C, la resistencia sobre los cilindros decreció con el tamaño máximo del agregado, mientras que en los cubos la resistencia creció con el tamaño máximo cuando no había microfisuración, pero en las muestras expuestas a ambiente seco, la resistencia creció para C25 y decreció en C50. Por lo tanto no deben usarse sin las debidas precauciones los coeficientes para corregir un testigo de menor esbeltez al valor de resistencia que tendría una probeta normalizada, ya que diversos factores pueden modificar los resultados.

Sobre la estimación de resistencia a compresión mediante ensayos no destructivos

Como se observó previamente, el módulo de elasticidad es más afectado que la resistencia a compresión ante la EAT, aún para temperaturas no demasiado elevadas. La gran sensibilidad ante la fisuración hace que el módulo de elasticidad resulte particularmente apto para detectar zonas

dañadas; las propiedades residuales dependen del cuadro de fisuración, el que a su vez se modifica conforme el tipo de enfriamiento. Por tal motivo, si bien no es posible estimar la resistencia residual en estructuras EAT mediante un método no destructivo como la velocidad de pulso ultrasónico (VPU), el mismo es muy eficiente para detectar zonas afectadas [18]. En hormigón dañado, los valores residuales de velocidad suelen disminuir mucho más que los de la resistencia a compresión.

La Figura 10 representa la relación entre la resistencia a compresión y la VPU obtenida en hormigones de diversas relaciones agua/cemento que incorporan un mismo tipo de piedra partida granítica de 19 mm de tamaño máximo, que fueran expuestos a diferentes temperaturas y enfriados al aire (a) o mediante rociado con agua (w). Aunque el rango de resistencia a compresión es bastante amplio las variaciones en VPU para el hormigón sin dañar (Control) son mucho menores en términos relativos si se las compara con los cambios que provoca la EAT, incluso en algunos casos la resistencia apenas cambia pero la VPU puede reducirse en 50 % o más. La Figura 11 representa para las mismas mezclas la relación entre la resistencia a compresión y el módulo de elasticidad, confirmando que la relación entre estas propiedades cambia en forma notable en hormigón dañado. Sin embargo, como la VPU depende del módulo de elasticidad, al representar la vinculación entre ambas propiedades se obtiene una única curva, a pesar de que las muestras poseen niveles de daño notablemente diferentes. En consecuencia, además de detectar zonas dañadas, para un dado hormigón es posible inferir en forma bastante precisa su rigidez en diferentes sectores de una estructura.

Finalmente, resulta interesante comparar los mismos resultados obtenidos sobre mezclas con piedra partida granítica con experiencias similares de EAT realizadas sobre hormigones con otros agregados gruesos (basaltos B, cuarcitas

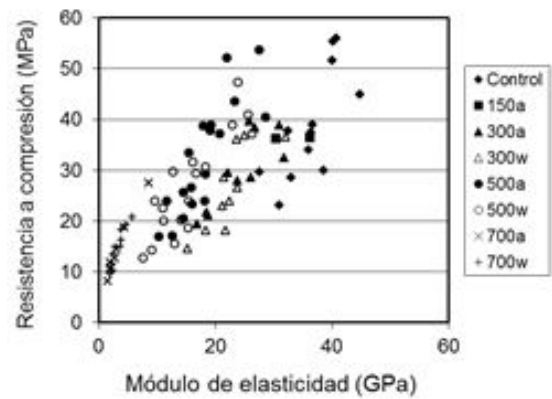
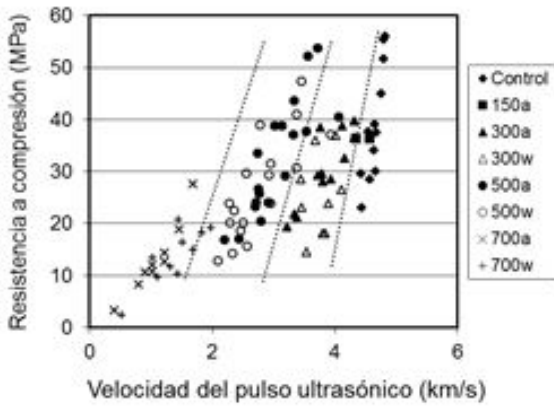


Figura 10. Relación entre resistencia a compresión y velocidad del pulso ultrasónico en hormigones con piedra partida granítica de 19 mm de tamaño máximo expuestos a diferentes temperaturas y velocidades de enfriamiento (a: lento al aire, w: rápido con agua).

Figura 11. Relación entre resistencia a compresión y módulo de elasticidad en hormigones con piedra partida granítica de 19 mm de tamaño máximo expuestos a diferentes temperaturas y velocidades de enfriamiento (a: lento al aire, w: rápido con agua).

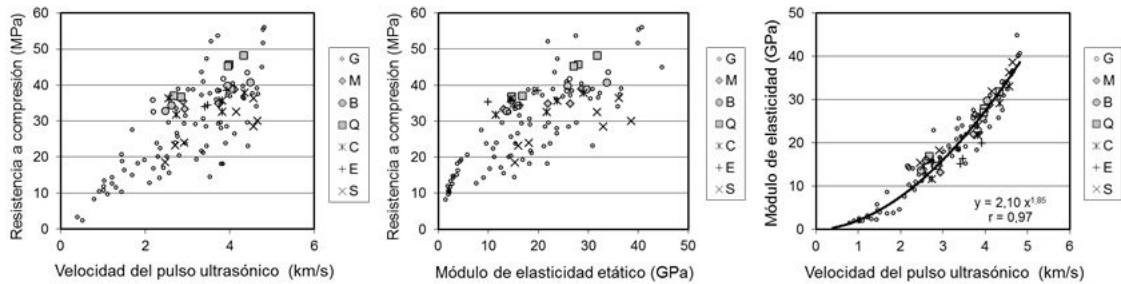


Figura 12. Relaciones resistencia a compresión vs VPU, resistencia a compresión vs módulo de elasticidad y módulo de elasticidad vs VPU para hormigones EAT elaborados con diferentes tipos de agregados. M: mortero, G: granito, B: basalto, Q: cuarcita, C: caliza E: arcilla expandida, S: rodados silíceos.

Q, calizas C, arcillas expandidas E, rodados silíceos S). Las Figuras 12.a, 12.b y 12.c representan respectivamente las relaciones resistencia a compresión vs. VPU, resistencia a compresión vs. módulo de elasticidad y módulo de elasticidad vs. VPU incluyendo como referencia los resultados de los hormigones presentados en las Figuras 10 y 11 con agregados graníticos G. Nuevamente, y a pesar de las diferencias en densidad y petrografía de los agregados, todos ajustan en forma aceptable a la misma curva módulo de elasticidad vs. UPV. Resultados obtenidos en base a testigos de prototipos EAT fabricados con hormigones con piedra granítica de 19 y de 38 mm de tamaño máximo confirmaron que, aún cambiando el tamaño y volumen de agregados, se mantenían las relaciones entre módulo de elasticidad y VPU antes obtenidas [18].

Respuesta tensión – deformación en tracción y energía de fractura

Otra singularidad del hormigón dañado es que bajo esfuerzos de tracción las propiedades residuales resultan aún más afectadas que en el caso de compresión. El daño en la estructura favorece la propagación de fisuras y esto se refleja en la forma de las curvas carga – flecha. La Figura 13 muestra las propiedades residuales en flexión de hormigones EAT de igual relación agua/cemento preparados con piedra granítica de 19 de tamaño máximo. Se aprecia la caída de resistencia respecto a la muestra sin dañar (Control), una rama ascendente menos lineal y una rama postpico menos abrupta y de mayor extensión. La no linealidad se vincula directamente con la existencia de

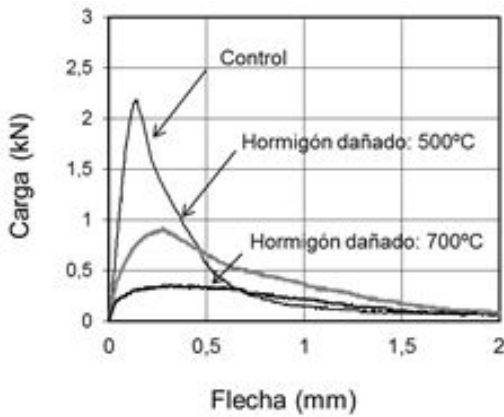


Figura 13. Propiedades residuales en flexión de hormigones con diferente nivel de daño por EAT.

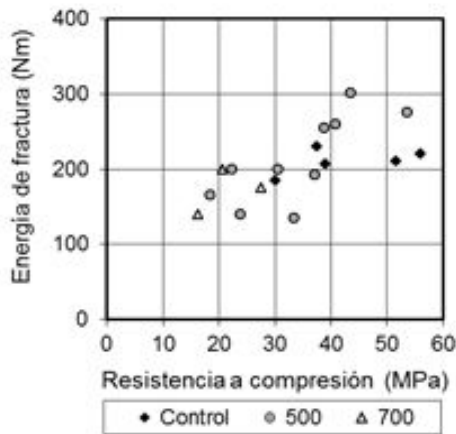


Figura 14. Variación de la energía de fractura residual con la resistencia a compresión de hormigones con diferente nivel de daño por EAT.

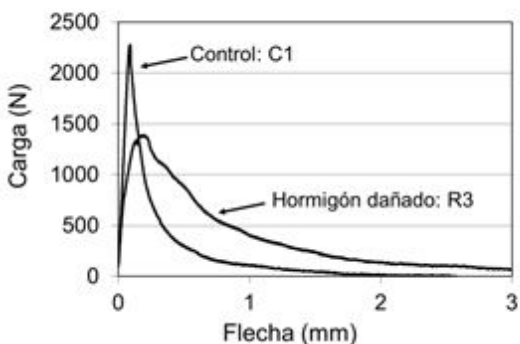


Figura 15. Curvas carga-flecha de hormigón sano (C1) y dañado por RAS (R3) a edad avanzada.

fisuras previas que crecen con facilidad. La energía de fractura puede asociarse con el área bajo la curva; en la Figura 14 se representan valores residuales de la energía en función de la resistencia a compresión. La energía de fractura resulta menos sensible al daño presente en el hormigón puesto que si bien disminuye la capacidad resistente, una microfisuración generalizada favorece el desvío y ramificación de las fisuras durante su propagación resultando una rama descendente menos abrupta; la zona de fractura resulta más extendida que en el hormigón sano.

En forma similar al caso de EAT, las diferencias en el cuadro de fisuración entre hormigón sano y dañado por RAS se reflejan en las curvas carga – flecha, tanto antes como después de la carga pico. En la Figura 15 se verifica un crecimiento en la no linealidad inicial y una rama de ablandamiento más extendida. La variabilidad también aumenta en los casos de RAS de cinética más rápida. Las propiedades mecánicas decrecen a medida que aumenta el daño. Sin embargo, experiencias con agregados reactivos de diferente cinética o concentración del daño dentro de la estructura interna del hormigón (interfaces agregado grueso, intercrystal en el interior de los agregados, mortero o pasta) muestran que no existe una relación directa entre los niveles de expansión y los cambios en las propiedades mecánicas, ya que dichos cambios dependen de los materiales y mecanismos involucrados.

Propiedades de transporte

Como era previsible, la micro y macro fisuración también afecta las propiedades de transporte en el hormigón, pero su incidencia varía conforme el mecanismo involucrado. Los efectos sobre la permeabilidad al agua o a los gases, o sobre la absorción capilar o la absorción en agua pueden ser distintos [19-20]. La Figura 16 presenta a modo ejemplo la variación de algunas de estas propiedades la densidad de fisuras. La velocidad de absorción capilar muestra una respuesta tipo pesimum, crece con la densidad hasta alcanzar un máximo y luego vuelven a disminuir. Por su parte la permeabilidad al agua muestra una relación directa con el nivel de daño creciendo en forma continua. Asimismo, las propiedades de transporte pueden variar si las cargas aplicadas modifican la orientación de las fisuras. Así como ocurre con las propiedades mecánicas, la variabilidad de resultados para distintas propiedades de transporte, también es mayor en hormigón dañado que en el hormigón sano.

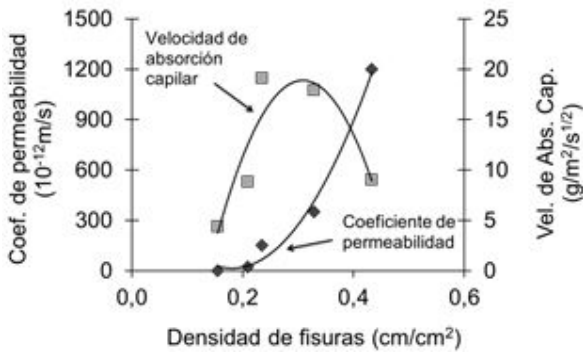


Figura 16. Variación de la velocidad de absorción capilar y la permeabilidad con la densidad de fisuras en hormigón EAT.

Cabe observar, para finalizar, que es posible que existan fisuras que modifiquen sensiblemente las propiedades de transporte pero no generen cambios en la resistencia a compresión [21].

CONCLUSIONES

En este artículo se discutieron aspectos referidos al comportamiento residual de hormigones dañados, tomando ejemplos de hormigones de diferentes características expuestos a altas temperaturas (EAT) o afectados por la reacción álcali - sílice (RAS). A partir de esta revisión de numerosos trabajos se puede concluir que:

La presencia de defectos en el hormigón no sólo afecta la resistencia a compresión sino también (y en diferente medida) la rigidez, la resistencia a tracción, la energía de fractura y las propiedades de transporte.

Si bien el nivel de daño producido se vincula con las propiedades residuales del hormigón, existen numerosos factores que conducen a cuadros de fisuración diferentes que modifican la respuesta del material. En el caso de EAT, la temperatura máxima alcanzada, el tiempo de exposición, la velocidad de enfriamiento y la composición del hormigón en particular los agregados, serán determinantes del daño producido. En el caso de RAS, además del contenido de álcalis y material reactivo, el tipo de agregado y cinética de reacción y la aplicación de cargas, constituyen variables muy significativas. Como en el hormigón dañado se modifican las propiedades físicas y mecánicas en distinta magnitud, es posible que al evaluar una estructura no se detecten muchos cambios en la resistencia a compresión pero existan cambios importantes en la rigidez y permeabilidad.

Al ser el módulo de elasticidad uno de los parámetros más afectados por la microfisuración, el uso de la velocidad de pulso ultrasónico o de otros ensayos que involucren medidas de propagación de una onda resulta una herramienta interesante para detectar zonas dañadas y más efectiva que otros métodos que solo evalúan el estado superficial.

El uso de la resistencia a compresión para estimar el módulo de elasticidad o el uso de la velocidad de pulso ultrasónico para estimar la resistencia resultan improcedentes en el caso de hormigones dañados.

La presencia de fisuras también puede modificar en distinto grado la resistencia a compresión obtenida del ensayo de probetas de distinta esbeltez, por lo que las correcciones por esbeltez pueden cambiar con respecto a lo habitualmente observado en hormigón sano, y esto debe ser tenido en cuenta al evaluar una estructura dañada.

En relación al cuadro de fisuración, la orientación de las fisuras incide en las propiedades residuales, e incluso lo hace en modo diferente sobre la resistencia y el módulo de elasticidad. Asimismo, es posible que haya fisuras que no afecten la resistencia pero modifiquen en gran medida otras propiedades como la permeabilidad.

Bajo sollicitaciones de tracción las propiedades residuales resultan más afectadas que en el caso de compresión. Al aumentar el nivel de daño la carga pico disminuye, la curva carga - flecha presenta una rama ascendente menos lineal y un postpico menos abrupto y de mayor extensión. La no linealidad se vincula directamente con la existencia de fisuras. La energía de fractura resulta menos sensible al daño puesto que si bien disminuye la capacidad resistente, la microfisuración generalizada suele dar lugar a una mayor deformabilidad; por ello la zona de fractura resulta más extendida que en el caso del hormigón sano.

En síntesis, en hormigón dañado el cuadro de fisuración en el interior del material, incluyendo las interfaces y la matriz se refleja en las curvas carga - deformación tanto antes como después de alcanzar la carga máxima. Las mayores reducciones de resistencia aparecen bajo cargas de tracción, seguidas por la resistencia a compresión y la energía de fractura, la cual incluso podría aumentar.

Dada la influencia de los defectos en el mecanismo de falla del hormigón se considera relevante asumir a las microfisuras y fisuras como características determinantes de la estructura interna

del material. Las curvas tensión - deformación se modifican fuertemente en hormigones dañados según la distribución, tamaño y orientación de las fisuras. Esto se debe tener en cuenta al evaluar estructuras, por ejemplo si se requiere estimar el módulo de elasticidad o se propone un plan de extracción de testigos para caracterizar el material de la estructura.

REFERENCIAS

- [1] Giaccio G, Zerbino R (1998) *Failure mechanism of concrete: combined effects of coarse aggregates and strength level*, Advanced Cement Based Materials 7 (1): 41-48.
- [2] Shah SP, Chandra S. (1968) *Critical stress, volume change, and microcracking of concrete* ACI Mat J 65 (9): 770-781.
- [3] Giaccio G, Giovambattista A. (1986) *Bleeding: evaluation of its effects on concrete behavior*, Materiaux et Construction 19 (112):265-271.
- [4] Abrams MS. (1971) *Compressive strength of concrete at temperatures to 1600 °F*, en Temperature and concrete, ACI SP 25 pp.33-58.
- [5] Mohamedbhai GTG. (1986) *Effect of exposure time and rates of heating and cooling on residual strength of heated concrete* Mag Conc Res 38 (136):151-158
- [6] Morley PD, Royles R. (1983) *Response of bond in reinforced concrete to high temperatures* Mag Conc Res 35 (123):67-74.
- [7] Bazant Z, Kaplan M, (1996) *Concrete at High Temperatures* 1st Ed (Longman, Essex, UK).
- [8] Harada T, Takeda J, Yamane S, Furumura F. (1972) *Strength, elasticity and thermal properties of concrete subjected to elevated temperature*, en Concrete for Nuclear Reactors, ACI SP-34, USA, V1 pp. 377-406.
- [9] Philleo R (1958) *Some physical properties of concrete at high temperature* ACI Mat J 29 (10): 857-864.
- [10] Bertero VV, Polivka M (1972) *Influence of thermal exposures on mechanical characteristics of concrete*, en Concrete for Nuclear Reactors, ACI SP-34, V1 pp.505-531.
- [11] Maréchal JC (1972) *Variations of the modulus of elasticity and Poisson's ratio with temperature*, en Concrete for Nuclear Reactors, ACI SP-34, USA, V1 pp.495-503.
- [12] Barragán B, Di Maio A, Giaccio G, Traversa L, Zerbino R. (2000) *Effects of high temperature on residual, mechanical, and transport properties of concrete*. En Fifth CANMET/ACI Int. Conf. on Durability of concrete. ACI SP-192, Ed. VM Malhotra, ACI Int Michigan USA, pp.983-1000.
- [13] Barragán B, Giaccio G, Zerbino R (2001), *Fracture and failure of thermally damaged concrete under tensile loading*, Materials & Structures 34 (239):312-319
- [14] Ponce JM, Batic OR. (2006) *Different manifestations of the alkali-silica reaction in concrete according to the reaction kinetics of the reactive aggregate*, Cem Conc Res 36 (6):1148-1156.
- [15] Giaccio G, Zerbino R, Ponce JM, Batic OR (2008) *Mechanical behavior of concretes damaged by alkali silica reaction*, Cem Conc Res 38:993-1004.
- [16] Zerbino R, Giaccio G, Isaia GC (2012) *Alkali-silica reaction in mortars and concretes incorporating natural rice husk ash*, Const Build Mat 36.796-806.
- [17] Di Maio A, Giaccio G, Zerbino R. (1996) *Failure mechanism of concrete, combined effects of coarse aggregate and specimen geometry*. Const Build Mat 10 (8):571-575.
- [18] Di Maio A, Giaccio G, Zerbino R (2002) *Non-destructive tests in the evaluation of concrete exposed at high temperatures* ASTM J Cement, Concrete and Aggregates 24 (2):58-67.
- [19] Torrijos MC, Giaccio G, Zerbino R, (2010) *Internal cracking and transport properties in damaged concretes*, Materials & Structures 43 (1):109-131.
- [20] Torrijos MC, Giaccio G, Zerbino R. (2008) *Relación entre la mesoestructura y las propiedades mecánicas y de transporte en hormigones dañados*, en III Cong Int y 17° Reunión Técnica AATH, Córdoba, Argentina, Eds. V Rahhal y J. Sota, 527-534.
- [21] Di Maio A, Giaccio G, Zerbino R. (1999) *High-performance concrete: relationship between strength and other physical properties related with service life*, L'Industria del Cemento, Italia. año LXIX (10): 766-775.