

## DEFORMABILIDAD EN HORMIGONES CON AGREGADOS RECICLADOS

Casuccio, M.L.<sup>1</sup>, Zega, C.J.<sup>2</sup>, Giaccio, G.<sup>3</sup> y Zerbino, R.<sup>4</sup>

### RESUMEN

Diversos trabajos han demostrado la factibilidad de elaborar hormigones con agregados reciclados, sin embargo sobre algunos aspectos poco explorados aún existen informaciones contrapuestas. Entre ellos se destacan el comportamiento diferido del hormigón (contracción y fluencia) y la capacidad de deformación en tracción (extensibilidad). Estas propiedades afectan directamente el grado de fisuración que puede tener una estructura de hormigón, lo que adquiere una significativa relevancia en la práctica, al considerar su vida en servicio. En este trabajo se presenta un estudio de la deformabilidad de hormigones que contienen 50 o 100 % de agregado grueso obtenido a partir de la trituración de losas de pavimento. Los resultados se comparan con los de otros dos hormigones elaborados con idénticas proporciones de materiales componentes variando el tipo de agregado grueso, piedra partida granítica o piedra partida cuarcítica. Se evaluaron la resistencia a tracción, la extensibilidad en flexión bajo cargas rápidas, y la fluencia en compresión. Bajo cargas de corta duración se encontró una deformabilidad creciente en el hormigón con mayor contenido de agregados reciclados, tanto en flexotracción como en compresión; también se midieron mayores valores de contracción libre y de fluencia. A partir de los resultados surge que es posible estimar la deformabilidad del hormigón con agregados reciclados siguiendo criterios similares a los aplicados en hormigones con agregados naturales; las diferencias de deformabilidad se pueden justificar considerando la menor rigidez del agregado reciclado.

### INTRODUCCION

El aprovechamiento y disposición de residuos constituye hoy en día un tema prioritario en todo el mundo. Al respecto se propicia el uso de diversos residuos de la industria de la construcción, aunque en sí mismos no poseen un impacto negativo tan marcado como los provenientes de otras industrias. En particular la obtención de agregados para la elaboración de nuevos hormigones a partir de hormigones de desecho, constituye una alternativa de interés.

Desde hace varios años se ha comprobado la factibilidad de empleo de Hormigón Reciclado; varios países han avanzado en la regulación de su uso (1-2). El LEMIT posee entre sus líneas de investigación el estudio de hormigones reciclados; ha efectuado numerosas contribuciones entre las que se incluyen el análisis de las propiedades mecánicas y, más recientemente, el estudio de propiedades de transporte vinculadas con la durabilidad de las estructuras (3-6).

---

<sup>1</sup> Becario CIC-LEMIT

<sup>2</sup> Becario CONICET-LEMIT

<sup>3</sup> Investigador CIC-LEMIT- Prof. Facultad de Ingeniería UNLP.

<sup>4</sup> Investigador CONICET-LEMIT- Prof. Facultad de Ingeniería UNLP.

zerbino@ing.unlp.edu.ar

Durante 2005 se desarrolló un trabajo conjunto con la Dirección de Vialidad de la Provincia de Buenos Aires sobre hormigones reciclados, a partir de una obra de pavimentación en el acceso al puerto Quequén en la ciudad de Necochea, provincia de Buenos Aires. Se obtuvieron agregados reciclados de las losas de hormigón que habían sido removidas con las consiguientes mejoras relacionadas con el impacto ambiental. Luego de un ajuste en laboratorio de las mezclas se construyeron a modo de prototipo algunas losas en la citada obra utilizando hormigón con agregados reciclados (7-8).

Se ha demostrado que los agregados reciclados se pueden emplear para elaborar hormigones estructurales y, si se toman los recaudos necesarios, hormigones con un grado de permeabilidad compatible con múltiples aplicaciones. Sin embargo en relación con la aplicación de hormigón reciclado existen aspectos menos explorados o sobre los cuales aparecen informaciones contradictorias. Hay incertidumbre en cuanto al comportamiento diferido (contracción y fluencia); tampoco existe mayor información sobre la extensibilidad (capacidad de deformación en tracción) del hormigón. Estas propiedades afectan directamente el grado de fisuración, lo que adquiere significativa relevancia en la práctica. La durabilidad de las estructuras de hormigón simple o armado resulta afectada por la presencia de fisuras y su tamaño, más allá del nivel de resistencia o permeabilidad del material. Por otro lado las deformaciones diferidas afectan directamente el comportamiento estructural, particularmente en el caso de elementos pretensados.

Este artículo presenta los resultados de un estudio de laboratorio destinado a aportar elementos sobre la deformabilidad del hormigón que incorpora agregados reciclados; el trabajo fue desarrollado sobre hormigones elaborados con el agregado reciclado proveniente de la remoción de losas de pavimento en la citada obra y sobre hormigones de iguales proporciones preparados con dos tipos de agregados naturales. En primer lugar se estudia el comportamiento en tracción y luego se presentan los resultados de fluencia y contracción.

## ANTECEDENTES

Las interfaces de mayor tamaño, esto es, las que existen entre los agregados gruesos y el mortero, poseen un efecto marcado sobre el mecanismo de falla y sobre las propiedades de transporte del hormigón. Las características particulares del agregado reciclado favorecen una mayor adherencia en las zonas de transición. Esto se debe a varios factores, entre ellos la textura rugosa y porosa de las partículas incrementa la superficie de adhesión y favorece la absorción de la pasta, las menores diferencias de rigidez entre matriz e inclusiones con respecto a un hormigón convencional disminuyen la concentración de esfuerzos y, finalmente, en muchos casos, a que las formas de los agregados reciclados resultan menos angulosas que las partículas de muchos tipos de piedra natural triturada. Experiencias anteriores han confirmado la mayor adherencia relativa en las interfaces del agregado reciclado y sus efectos sobre el mecanismo de falla del hormigón (5, 9).

Al mismo tiempo como el agregado reciclado suele ser menos rígido que la gran mayoría de los agregados naturales, se obtiene un hormigón con menor módulo de elasticidad para el mismo nivel de resistencia, lo que aumentaría la capacidad final de deformación. En varias experiencias con agregados reciclados se han encontrado reducciones en la resistencia principalmente debidas al mayor requerimiento de agua de mezclado; este efecto es mucho menos importante cuando se emplea únicamente el

agregado grueso reciclado. El grado de afectación de la resistencia también varía conforme la calidad del hormigón original. De todos modos aún en el caso que no se produzcan reducciones en la resistencia a compresión se han encontrado disminuciones en el módulo de elasticidad.

Como consecuencia de la mayor adherencia de interfaces y del menor módulo de elasticidad del hormigón la extensibilidad debiera crecer. En estudios sobre diferentes tipos de rocas naturales se observaron aumentos de la capacidad de deformación en tracción para hormigones elaborados con agregados de mayor adherencia (10). Por otro lado si el uso de agregados reciclados provoca disminuciones de la resistencia, la extensibilidad debería disminuir, dado que la extensibilidad aumenta con el nivel de resistencia (11).

Con respecto a las deformaciones diferidas algunos trabajos dan cuenta de una mayor fluencia bajo cargas de compresión en hormigones con agregados reciclados. Sin embargo varios estudios comparan hormigones entre los que existen diferencias de resistencia o cambios importantes en los contenidos de pasta debidos a la necesidad de ajustar el contenido de agua para lograr la trabajabilidad deseada (12). En otro estudio reciente, un hormigón con 75 % del agregado grueso reciclado y 25 % de piedra partida granítica mostró ligeras reducciones en las deformaciones bajo carga y un claro decrecimiento de las deformaciones diferidas (disminución del coeficiente de fluencia) con respecto a un hormigón elaborado sólo con piedra granítica natural, esto fue atribuido al hecho de no haber incrementado el contenido de agua de mezclado y a que los niveles de resistencia a compresión eran muy similares (13).

Se ha encontrado que la contracción por secado aumenta al emplear agregados reciclados, esto puede justificarse considerando la menor rigidez de las partículas (14). En experiencias anteriores (13) se midieron marcadas diferencias en la contracción libre con respecto al hormigón con agregados naturales. El conocimiento y la capacidad de estimación de las deformaciones diferidas resultan indispensables para realizar el control de fisuras.

## **EXPERIENCIAS**

### **Materiales y mezclas**

Como fuera anticipado los agregados reciclados fueron obtenidos por trituración de un hormigón proveniente de losas de pavimentos removidas de una obra vial en la región litoral atlántica del sur de la provincia de Buenos Aires. Como agregados de referencia se seleccionaron dos piedras trituradas de origen natural, una piedra cuarcítica (Q) de la zona de Mar del Plata debido a que el hormigón original de las losas estaba elaborado principalmente con agregados de este origen y una piedra granítica (G) que fue la empleada en la nueva obra. En la Tabla 1 se indican algunas de las propiedades de los agregados gruesos utilizados, se incluyen la densidad, la absorción de agua durante 24 horas, y una estimación de la resistencia a compresión realizada mediante un ensayo de carga puntual empleado en rocas (15).

Se aprecia, como era de esperar, que el agregado reciclado posee mayor absorción y menor densidad que los agregados naturales. Asimismo comparado con los agregados naturales presenta menor resistencia.

Tabla 1. Propiedades de los agregados gruesos empleados.

Propiedad	Piedra granítica (G)	Piedra cuarcítica (Q)	Agregado reciclado (R)
Absorción (%)	0.5	2.2	6.7
Densidad	2.70	2.49	2.35
Resistencia estimada a compresión (MPa)	208	114	60

Para la elaboración de los hormigones se utilizó un cemento portland tipo CPN40 y arena silícea natural. Los agregados gruesos naturales y reciclados fueron empleados en estado saturado, para lo cual se mantuvieron sumergidos en agua durante 24 horas y luego se escurrieron al aire antes de preparar los hormigones.

Se elaboraron dos hormigones con agregados reciclados denominados R100 y R50, el primero contenía la totalidad del agregado grueso reciclado mientras que el segundo contenía partes iguales de agregado reciclado y de piedra granítica natural. Experiencias anteriores mostraron que se produce una reducción de la resistencia cuando se utiliza la totalidad de agregado grueso reciclado, mientras que esto no ocurre con sustituciones parciales (3). Aunque esto coincide con otra bibliografía no lo hace el porcentaje de reemplazo, algunos autores (16) encontraron diferencias a partir del 30 %, otros consideran óptimo no superar el 50 % (17), mientras que en las experiencias en el LEMIT los valores de resistencia se mantuvieron hasta con 75 % del agregado grueso reciclado.

Tabla 2. Proporciones ( $\text{kg/m}^3$ ) y propiedades en estado fresco de los hormigones.

Hormigón	PG	PQ	R50	R100
Agua	153	156	156	156
Cemento	346	346	347	347
Agregado fino	840	840	840	840
Piedra granítica	1040	-	525	-
Piedra cuarcítica	-	940	-	-
Agregado reciclado	-	-	450	900
Aditivo	0.9	1.0	1.0	1.0
Asentamiento (mm)	115	75	65	80
Aire (%)	3.3	3.2	2.8	3.0
Peso unitario ( $\text{kg/m}^3$ )	2380	2280	2320	2240

Además se elaboraron dos hormigones de referencia utilizando 100 % de piedra triturada natural como agregado grueso, el primero (PQ) con piedra cuarcítica y el restante (PG) con la misma piedra granítica utilizada para R50. En todos los casos se mantuvieron constantes el volumen de agregado grueso y la relación agua/cemento, que fue igual a 0.45.

En la Tabla 2 se presentan las proporciones de los hormigones y sus propiedades en estado fresco. Se observa para el hormigón reciclado una disminución del peso unitario con respecto al hormigón con piedra partida granítica (PG), mayor cuanto mayor fue el porcentaje de agregado reciclado utilizado. Asimismo, el hormigón PQ presentó una disminución del peso unitario con respecto al hormigón PG, estas variaciones son consistentes con la densidad de los agregados empleados.

### Programa y metodologías de ensayo

Con cada hormigón se moldearon 12 cilindros de 150 x 300 mm para evaluar el comportamiento del hormigón bajo cargas de compresión de corta y larga duración y 3 vigas de 150 x 100 x 900 mm para la evaluación del comportamiento en tracción. Las probetas fueron curadas en cámara húmeda hasta la edad de 28 días. A partir de ese momento todas las probetas fueron retiradas de cámara húmeda.

En primer lugar se realizaron ensayos de compresión sobre 4 cilindros de cada hormigón. Se empleó una máquina INSTRON de 1000 kN de capacidad con control de desplazamientos registrando la curva carga vs. deformación axial y se determinaron los valores de resistencia y módulo de elasticidad siguiendo los lineamientos de las normas ASTM C-39 y C-469 (ciclos de carga hasta el 40 % de la tensión de rotura).

Luego se realizaron ensayos de flexión con carga a los tercios, se dispuso un flexímetro (sensibilidad  $10^{-3}$  mm) en un dispositivo adecuado (base 250 mm) dentro del tercio medio de las vigas a la altura de la fibra externa más traccionada, con el propósito de valorar la extensibilidad. Se empleó una prensa AMSLER de tipo hidráulico sin control de desplazamientos utilizando una velocidad de 0,04 MPa/s. La extensibilidad fue calculada para niveles de carga iguales al 90 % del módulo de rotura en flexión.

Sobre las mitades resultantes del ensayo de las vigas se evaluó la resistencia a tracción por compresión diametral, obteniendo 6 valores para cada hormigón.

Durante el lapso que transcurrió desde la salida da cámara húmeda y la aplicación de las cargas de compresión de larga duración, los cilindros destinados a la evaluación de las deformaciones diferidas permanecieron en bolsas plásticas cuidadosamente cerradas dentro de la cámara seca ( $20 \pm 2$  °C y  $55 \pm 5$  % de humedad relativa) a fin de evitar cambios dimensionales por variaciones térmicas o pérdidas de humedad.

Se destinaron 4 cilindros para evaluar las deformaciones de fluencia bajo cargas de compresión y otros 4 para, en forma paralela, valorar la evolución de deformaciones libres de carga (contracción libre). Sobre tres generatrices dispuestas a  $120^\circ$  en el perímetro de cada cilindro se fijaron dos puntos de medición. Para medir las deformaciones diferidas se utilizó un deformómetro de láminas paralelas (Huggenberger, base  $10''$ , sensibilidad  $10^{-4}''$ ).

En los ensayos de fluencia se aplicaron cargas de compresión equivalentes al 30% de la resistencia a la edad de 28 días utilizando pórticos rígidos equipados con resortes para mantener la carga. Las cargas se ajustaron mediante un gato hidráulico previamente calibrado y fueron verificadas en forma periódica, dos veces durante la primera semana de ensayo, semanalmente durante el primer mes y una vez al mes durante el resto de la prueba. Las probetas destinadas a la medición de la contracción libre se ubicaron en posición horizontal en la misma cámara que los pórticos.

## ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

### Resistencia a compresión

La Fig. 1 muestra curvas típicas tensión – deformación, obtenidas en los ensayos de compresión uniaxial realizados a la edad de 28 días sobre cada uno de los hormigones. Surge con claridad una disminución de la rigidez en el hormigón que incorpora la totalidad de agregado reciclado como agregado grueso (R100) y un comportamiento similar en los restantes.

A partir de estos ensayos se calcularon los valores de resistencia a compresión y módulo de elasticidad que se incluyen en la Tabla 3. Para cada resultado se indican el valor promedio de cuatro cilindros y la desviación estándar (SD).

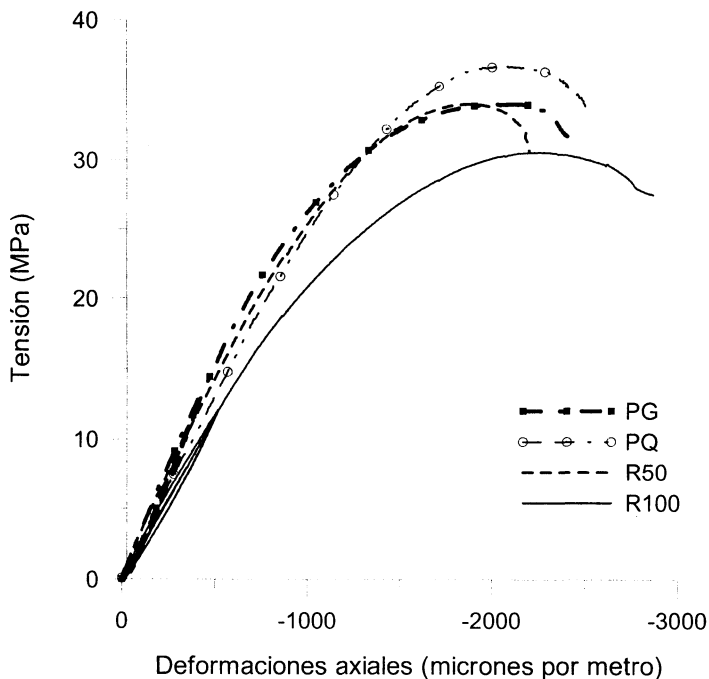


Figura 1. Curvas típicas tensión – deformación en ensayos de compresión.

Tabla 3. Propiedades mecánicas.

Hormigón		PG	PQ	R50	R100
Resistencia a Compresión	$f'_c$ (MPa)	33.4	37.1	35.8	32.1
	SD (MPa)	1.3	3.0	2.3	2.2
Módulo de elasticidad	E (GPa)	32.2	28.2	29.7	23.5
	SD (GPa)	1.5	1.8	1.6	1.1
Módulo de rotura en flexión carga a los tercios	MR (MPa)	4.8	4.4	4.0	3.7
	SD (MPa)	0.1	0.2	0.4	0.3
Resistencia a tracción por compresión diametral	fcd (MPa)	3.1	3.3	3.0	2.5
	SD (MPa)	0.2	0.5	0.1	0.2
Extensibilidad	$e_{90}$ ( $10^{-6}$ )	150	150	160	185
Extensibilidad estimada	$e_{90t}$ ( $10^{-6}$ )	135	140	120	145
Valores relativos	$fcd/f'_c$	0.09	0.09	0.08	0.08
	$E/(f'_c)^{0.5}$	5.58	4.64	4.97	4.15
	$MR/f'_c$	0.14	0.12	0.11	0.12
	$MR/fcd$	1.6	1.3	1.3	1.5
	$e_{90}/e_{90t}$	1.12	1.07	1.35	1.29

Se observa que los valores de resistencia son similares, aunque los mayores corresponden al hormigón que incorpora piedra cuarcítica. Esto se puede justificar considerando que dicho agregado desarrolla mayor adherencia de interfaces y posee una buena compatibilidad elástica con la matriz (mortero). Existen antecedentes de hormigones con diferentes agregados donde para niveles de resistencia convencionales como los aquí analizados se obtuvo la mayor resistencia empleando este tipo de agregado convenientemente acondicionado (lavado) (18). De todos modos debido a sus características existe bastante variabilidad en la resistencia de diferentes rocas clasificadas como cuarcitas. Algunas experiencias desfavorables en el uso de los agregados de este origen deben relacionarse con la presencia de partículas muy finas (pasa tamiz #200) originadas en el mayor desgaste de este agregado o en la contaminación con arcillas, estos factores sumados a la absorción propia del tipo de roca pueden incrementar la demanda de agua si no se toman las debidas precauciones.

También se aprecia que la resistencia fue en R50 algo mayor a la del hormigón PG y ambos, mayores que R100. Esto concuerda con experiencias previas donde se mantenían los niveles de resistencia para reemplazos de hasta el 75 % del agregado grueso.

En cuanto al módulo de elasticidad se observa, como era previsible, que la mayor rigidez corresponde a PG, seguido por R50 y PQ, y como fuera anticipado, la menor

aparece en el hormigón R100. Cabe notar que si bien en PQ la resistencia fue mayor a la de PG, con el módulo de elasticidad ocurrió lo contrario. Existen fórmulas de estimación del módulo de elasticidad basadas en el concepto de hormigón como material compuesto por una fase mortero y una fase agregado. En este caso la fase mortero es muy similar entre los cuatro hormigones estudiados por lo que las diferencias residen principalmente en los agregados gruesos empleados. Los modelos de estimación varían conforme el grado de adherencia asumido para las interfaces. El modelo de Hirsch (19) estima el módulo de elasticidad del hormigón ( $E_c$ ) según:

$$E_c^{-1} = x \cdot (V_p \cdot E_p + V_a \cdot E_a)^{-1} + (1 - x) \cdot (V_p / E_p + V_a / E_a)$$

La ecuación incluye como variables los volúmenes de pasta ( $V_p$ ) y agregados ( $V_a$ ) y sus respectivas rigideces ( $E_p$  y  $E_a$ ); el valor de  $x$  suele adoptarse igual a 0.5 (para adherencia perfecta entre ambas fases el valor es 1 y si no existe adherencia igual a 0). En este caso tomando el volumen de mortero igual a 0.38,  $x = 0.5$  y estimando los módulos de elasticidad de los agregados G y Q iguales a 80 y 65 respectivamente (18), se logra un buen ajuste cuando el módulo de elasticidad en las partículas del agregado reciclado es igual a 30 GPa y el módulo de elasticidad para la matriz (mortero) es igual a 20 GPa,

En la Tabla 3 se indican algunos valores relativos entre diferentes propiedades; se incluye la relación entre el módulo de elasticidad y la raíz cuadrada de la resistencia, tal como emplean las fórmulas de estimación de varios reglamentos. Es posible verificar cómo este factor se reduce para R100, incluso más que para PQ, lo que implica una vez más que la reducción en rigidez no sólo se relaciona con una caída en la resistencia, sino principalmente con las características de las partículas de agregado. Por su parte si se considera R50 se aprecia que la variación respecto al hormigón PG es menor que la de PQ; de esto surge que el uso de agregado reciclado puede dar lugar a cambios de rigidez similares a los que provoca un cambio en el tipo de agregado, por lo que pueden desarrollarse criterios de estimación adecuados.

## Resistencia a tracción y extensibilidad

En la Tabla 3 también se informan los resultados de resistencia a flexión (módulo de rotura con carga a los tercios) y resistencia a tracción por compresión diametral. Los valores son consistentes con la tendencia observada en los ensayos de compresión. De todos modos si se consideran las relaciones tracción / compresión, el módulo de rotura en flexión resulta ligeramente favorecido en los hormigones con agregados naturales en especial con la piedra granítica. A la vez no surgen mayores diferencias entre los diferentes agregados si se analiza la resistencia a tracción por compresión diametral.

La Fig. 2 muestra curvas típicas carga – deformación de las fibras traccionadas obtenidas sobre vigas ensayadas con carga a los tercios. Se observa que los hormigones con agregados reciclados poseen una mayor deformabilidad relativa comparados con los hormigones con agregados naturales. Considerando los valores experimentales de extensibilidad ( $e_{90}$ ) al 90 % del módulo de rotura de cada hormigón (Tabla 3), se observa que la capacidad de deformación crece aproximadamente un 10 % en R50 y algo más aún en R100 a pesar de que existe una reducción en la resistencia a flexión.



Dado que el comportamiento en tracción del hormigón es básicamente lineal hasta altos porcentajes de la carga máxima, es posible estimar la extensibilidad a partir de los resultados de módulo de rotura y módulo de elasticidad en compresión (10-11). La extensibilidad teórica ( $e_{90t}$ ) estimada es un 10 % menor a los valores experimentales para los hormigones PG y PQ, tal relación concuerda con experiencias previas (10), sin embargo en el caso de los hormigones con agregados reciclados la relación  $e_{90}/e_{90t}$  asciende a 1.3.

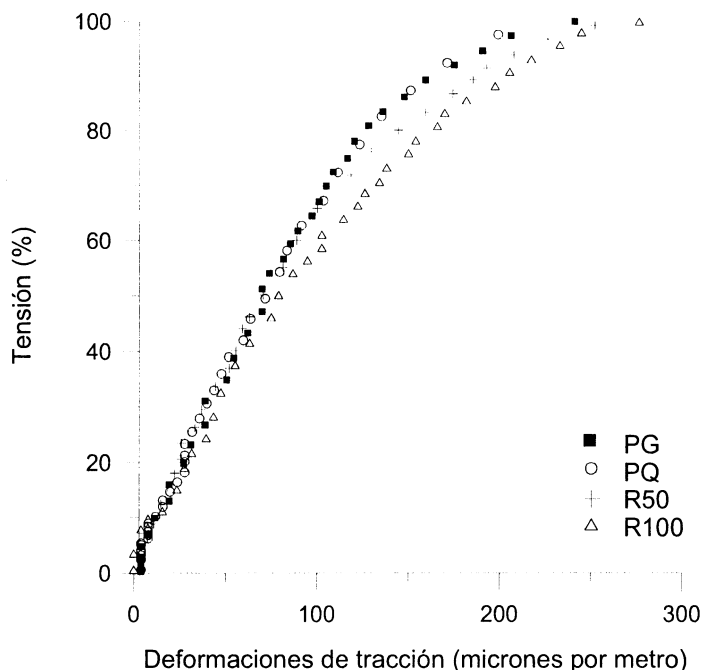


Figura 2. Curvas típicas tensión – deformación de las fibras extremas traccionadas, obtenidas en ensayos de vigas cargadas a los tercios.

### Fluencia en compresión

En la Fig. 3 se muestran las deformaciones totales bajo carga medidas durante cinco meses para cada uno de los hormigones, como así también la evolución de las deformaciones libres correspondientes a las probetas que permanecieron sin cargar.

Se observa en las probetas sin carga (L) que la mayor contracción se produce en los hormigones con agregado reciclado, en especial en R100. Por su parte considerando las probetas sometidas a cargas de larga duración se aprecia que las deformaciones totales (T) de R50 fueron similares a las de PQ y que se produjo un aumento bastante importante en R100. Como era de esperar las menores deformaciones corresponden al hormigón PG que contiene el agregado de mayor rigidez.

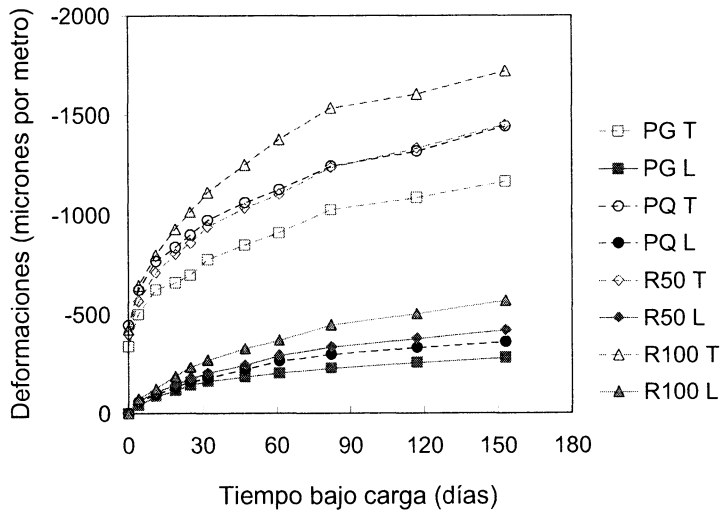


Figura 3. Desarrollo de las deformaciones totales bajo carga (T) y de las deformaciones de contracción libre (L) en las probetas que permanecieron sin cargar.

Tabla 4. Deformaciones en los ensayos de fluencia.

Hormigón	PG	PQ	R50	R100
Resistencia a compresión (MPa)	33.4	37.1	35.8	32.1
Módulo de elasticidad (GPa)	32.2	28.2	29.7	23.5
Tensión aplicada (MPa)	10.1	11.0	11.0	10.1
Tensión (% $f'c$ )	30.1	29.8	30.8	31.3
Deformaciones elásticas				
medidas ( $10^{-6}$ )	341	446	398	426
estimadas ( $10^{-6}$ )	312	391	372	428
medidas/ estimadas	1.09	1.14	1.07	1.00
Contracción libre (5 meses) ( $10^{-6}$ )	283	362	421	570
Deformaciones de fluencia (5 meses)				
deformación total – contracción ( $10^{-6}$ )	888	1083	1033	1152
deformaciones diferidas ( $10^{-6}$ ) *	548	638	634	726
fluencia específica ( $10^{-6}/MPa$ ) #	54	63	63	72
* Deformación total, menos contracción libre, menos deformación elástica.				
# Deformaciones diferidas/tensión aplicada				

En la Tabla 4 se resumen los resultados obtenidos en los estudios de fluencia en compresión. En ella se reiteran a modo de referencia los valores de resistencia a compresión y módulo de elasticidad determinados a la edad de 28 días y se indican los niveles de carga aplicada a cada hormigón. Se intercalaron las cuatro probetas de cada uno de los hormigones PG y R100 en dos pórticos y las correspondientes a PQ y R50 en otros dos, de forma tal que las cargas sostenidas se apartaran lo menos posible del 30 % de la resistencia a compresión.

Además en la Tabla 4 se indican las deformaciones medidas inmediatamente después de cargar y las deformaciones elásticas estimadas a partir de la tensión aplicada y el módulo de elasticidad. Es posible observar que las deformaciones iniciales decrecen a medida que crece la rigidez del agregado empleado, las deformaciones estimadas fueron en general del orden del 10 % menores a las medidas salvo en el caso de R100 donde fueron coincidentes. Finalmente la misma tabla muestra la magnitud de las deformaciones bajo carga (deformaciones totales menos contracción) y el valor de la contracción libre luego de 5 meses de exposición en cámara seca ( $20 \pm 2$  °C y  $55 \pm 5$  % HR). En base a estos valores se han calculado las deformaciones diferidas (deformación total menos contracción libre menos deformación inmediatamente después de cargar) y la fluencia específica (deformaciones diferidas/tensión aplicada). Este último parámetro permite comparar los valores sin perjuicio del pequeño cambio en el nivel de tensión aplicada entre los cuatro hormigones.

Se comprueba que las deformaciones diferidas aumentan cuando los agregados poseen menor rigidez, en este caso por la misma causa las deformaciones de fluencia también aumentaron con el contenido de agregado reciclado. El hormigón R100 presentó la mayor contracción libre y la mayor deformación bajo carga. Los resultados consignados en la Tabla 4 y la Fig. 3 muestran que el hormigón con piedra partida cuarcítica (PQ) tuvo un comportamiento similar al hormigón con 50% de agregado reciclado (R50).

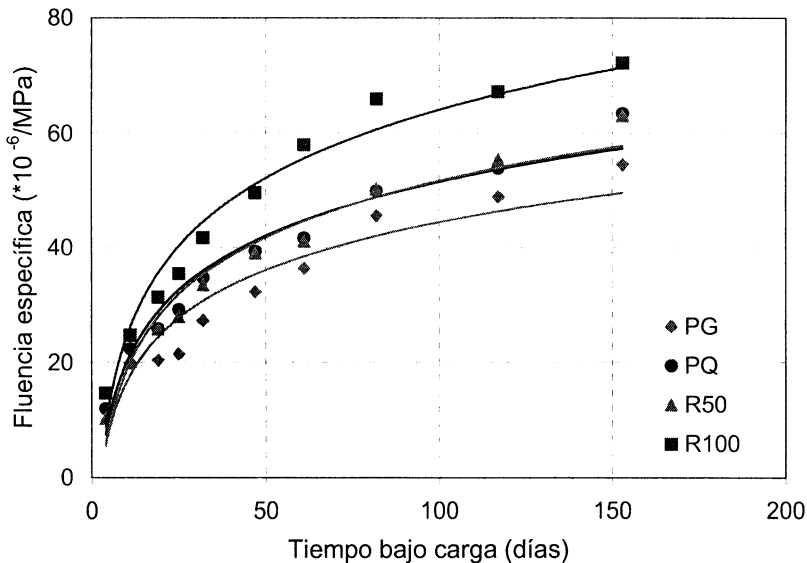


Figura 4. Fluencia específica.

En la Fig. 4 se presenta la evolución de la fluencia específica. Se observa que la misma crece a medida que aumenta el porcentaje de agregado reciclado utilizado, los menores valores corresponden al hormigón PG, mientras que los valores de PQ y R50 son coincidentes (ver Tabla 4).

Una forma de estimar las deformaciones de fluencia es a través del Coeficiente de fluencia ( $\Phi$ ), que se define como la relación entre la fluencia específica ( $c$ ) a una dada edad  $t$  para una carga aplicada a una edad  $t_0$  y la deformación elástica inicial para una tensión unitaria a la edad  $t_0$ . Ya que la deformación elástica inicial es la recíproca del módulo de elasticidad  $E(t_0)$ , se puede expresar:

$$\Phi(t, t_0) = c(t, t_0) \cdot E(t_0)$$

Si se analiza el coeficiente de fluencia y se considera el módulo de elasticidad de cada hormigón las diferencias entre los hormigones se reducen sensiblemente. En efecto, en la Fig. 5 se muestra la evolución del coeficiente de fluencia utilizando para su cálculo los valores del módulo de elasticidad determinados a la edad de 28 días. Es posible apreciar cómo los valores resultan muy similares por lo que puede asumirse que las diferencias en la deformabilidad bajo cargas de larga duración dependen principalmente de los cambios en rigidez generados por el cambio del agregado grueso utilizado.

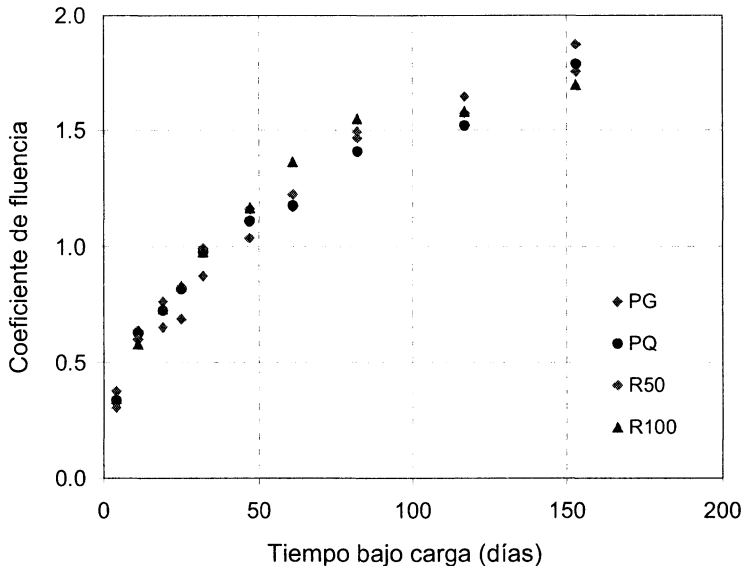


Figura 5. Coeficiente de fluencia.

## CONCLUSIONES

En este trabajo se analizó la deformabilidad en hormigones con agregados reciclados. Se evaluó el comportamiento frente a sollicitaciones de tracción de corta duración y de compresión de larga duración, comparando hormigones con agregados naturales y hormigones con distintos contenidos de un agregado grueso reciclado obtenido de la trituración de losas de pavimentos. Las principales conclusiones se indican a continuación.

El uso de agregado reciclado provocó una reducción de la rigidez del hormigón, en especial cuando se empleó la totalidad de agregado grueso reciclado. En este último caso también se observó una ligera reducción en la resistencia. Las diferencias de rigidez entre los hormigones estudiados se pueden justificar y estimar considerando los volúmenes y rigidez de las fases componentes. Es de destacar que los cambios de rigidez no son mucho más significativos que los que se producen entre hormigones elaborados con diferentes tipos de agregados naturales.

Bajo solicitaciones de tracción se verificaron las reducciones en rigidez, también se observó mayor extensibilidad para mayor contenido de agregado reciclado; esta última se relaciona en parte con un mayor desarrollo de adherencia en las interfaces. En hormigones con agregados naturales la extensibilidad estimada a partir de los resultados de módulo de rotura y módulo de elasticidad fue un 10 % menor a la medida experimentalmente, mientras que para los hormigones con agregados reciclados la diferencia llegó al 30 %.

Se verificó un incremento de contracción en los hormigones con agregados reciclados que también parece relacionarse con la rigidez de las partículas de agregado.

Las deformaciones diferidas bajo cargas de compresión de larga duración crecieron en los hormigones con agregado reciclado, la fluencia específica se redujo substancialmente en el hormigón con 50 % de agregado grueso reciclado comparada con la del hormigón con 100 % de agregado reciclado. Sin embargo si se comparan los coeficientes de fluencia, las diferencias entre los hormigones estudiados son pequeñas por lo que se considera que los cambios de deformabilidad están directamente relacionados con la rigidez de las partículas del agregado grueso utilizado.

En base a estas observaciones se concluye que para los niveles de resistencia estudiados (del orden de 30 MPa) es posible estimar con buena aproximación la deformabilidad de un hormigón elaborado con agregados reciclados siguiendo criterios similares a los aplicados en hormigones con agregados naturales. Los cambios de deformabilidad (en general un aumento) se justifican en base a la menor rigidez de las partículas del agregado reciclado y se pueden valorar a través de un ensayo relativamente sencillo como es la determinación del módulo de elasticidad en ensayos de compresión de corta duración.

## REFERENCIAS

- (1) RILEM Recommendation: 121-DRG Guidance for demolition and reuse of concrete and masonry. specifications for concrete with recycled aggregates, Materials & Structures, Vol. 27, 1994, pp 557-559.
- (2) ACI Committee 555: Removal and reuse of hardened concrete, ACI Materials J. Vol. 99, N° 3, 2002, pp 300-325.
- (3) Di Maio, A., Giaccio, G. y Zerbino, R., "Hormigones con agregados reciclados", Ciencia y Tecnología del Hormigón, N° 9, 2002, pp. 5-10.
- (4) Di Maio, A., Gutiérrez, F. y Traversa, L. P., "Comportamiento físico mecánico de hormigones elaborados con agregados reciclados", 14° Reunión Técnica AATH, 2001, Olavarría, Argentina, pp. 37-44.

- (5) Casuccio, M., Torrijos, M. C., Giaccio, G. y Zerbino, R., "Mecanismo de rotura en tracción de hormigones elaborados con agregados reciclados", Jornadas SAM/CONAMET, 2005, en CD, Trabajo 248.
- (6) Di Maio, A., Zega, C., Taus, V. y Traversa, L. "Durability of recycled concretes", National conference In situ Behaviour of constructions, Bucarest, Rumania, 2004, pp. 31-37.
- (7) Zerbino, R., Giaccio, G., Casuccio, M., Zega, C., Martín, R., Perera, E. y Héctor, S. "Caracterización en laboratorio de hormigón reciclado para su aplicación en obra". 16ª Reunión Técnica AATH, 2006, Mendoza, Argentina, pp. 55-62.
- (8) Zerbino, R., Giaccio, G., Casuccio, M., Zega, C., Martín, R., Perera, E. y Héctor, S., "Empleo de hormigón reciclado para la construcción de losas de pavimento urbano", 16º Reunión Técnica AATH, 2006, Mendoza, Argentina, pp. 63-70.
- (9) Casuccio, M., Giaccio, G. y Zerbino, R. "Adherencia matriz-agregado en hormigón reciclado" Ciencia y Tecnología del Hormigón, N° 11, 2004, pp. 23-28.
- (10) Zerbino, R., "Adherencia Matriz - Agregado y Extensibilidad del Hormigón". Ciencia y Tecnología del Hormigón, N° 4, 1997, pp. 59-71.
- (11) Giovambattista, A., Violini, D. y Zerbino, R. "Extensibility of High Strength Concretes". Materials & Structures, Vol. 25, 1992, pp. 552-557.
- (12) Gómez-Soberón, J. M. "Creep of concrete with substitution of normal aggregate by recycled concrete aggregate" ACI SP-209-25, 2002, pp. 461-474.
- (13) Di Maio, A., Giaccio, G. y Zerbino, R., "Hormigón con agregados reciclados: resistencia, módulo de elasticidad y fluencia bajo cargas de compresión", Revista Hormigón, N° 40, 2004, pp. 37-50.
- (14) Gómez-Soberón, J. M. "Shrinkage of concrete with replacement of aggregate with recycled concrete aggregate" ACI SP-209-26, 2002, pp. 475-495.
- (15) Int. Soc. for rock mechanics "Suggested method for determining point load strength", Int. J. Rock Mech, Min, Sci & Geomech, Vol. 22, N° 2, 1985, pp. 51-60.
- (16) Gómez, J. M.; Agulló, L. y Vasquez, E., "Cualidades físicas y mecánicas de los agregados reciclados de concreto", Construcción y Tecnología, Vol. XIII, N° 157, 2001, pp. 10-22.
- (17) Poon C. S., Shui Z. H., Lam L., Fok H. and Kou S. C., "Influence of moisture states of natural and recycled aggregates on the slump and compressive strength of concrete", Cement and Concrete Research, Vol. 34, 1, 2004, pp. 31-36.
- (18) Zerbino, R. "Rol de la adherencia matriz - agregado en el comportamiento del hormigón". Tesis doctoral, 1998, Facultad de Ingeniería UNLP, 142 p.
- (19) Mindess, S. and Young, J. F., "Concrete", Prentice Hall, NJ USA, 1981, 671 p.