

# CARACTERIZACIÓN DE HORMIGONES ELABORADOS CON AGREGADO GRUESO RECICLADO



una empresa  InterCement

*Fib* Simposio "El hormigón estructural y el Transcurso del Tiempo", La Plata 2005

*Mmo. Claudio Hernández; Ing. Gastón Fornasier.*

*Asesoría Técnica – Centro Técnico LOMA NEGRA Av. Coronel  
Roca 6757 (C1439DWE)  
Ciudad Autónoma de Buenos Aires, República Argentina e-mail:  
gaston.fornasier@lomanegra.com.ar*

## RESUMEN

Sin ningún lugar a dudas la supervivencia del hombre en los próximos años estará fuertemente influenciada por el uso racional de los recursos naturales. Esta búsqueda implica, para la industria de la construcción, un claro vuelco a materiales y técnicas constructivas más "amigables" con el medio ambiente.

En este marco, la caracterización y utilización de hormigones elaborados con agregado grueso proveniente de la trituración de hormigón ha comenzado a convertirse en una alternativa viable en nuestro país [1]. Este trabajo intenta caracterizar el comportamiento resistente y de durabilidad de mezclas elaboradas con 100% de reemplazo del agregado grueso natural (AN) por agregado grueso reciclado proveniente de hormigones de diferente origen.

## ABSTRACT

Definetely, the rational use of natural resources will strongly influence the human being survival in the near future. That is the reason why, the construction industry tends to use "friendlier" raw materials and construction technics to the enviroment.

The aplication and characterization of recycled coarse aggregate concrete has become a viable solution in Argentina [1]. This paper tries to describe hardened and durability properties of recycled concrete in comparison with a conventional concrete. A fully replacement of granitic coarse aggregate was evaluated in both, durability and mechanical aspects.

## 1. INTRODUCCIÓN

La utilización de agregados reciclados para la elaboración de hormigones se ha convertido en una práctica habitual en los países industrializados donde existe un fuerte compromiso por el impacto ambiental y por la preservación de los recursos naturales [2]. En el presente trabajo se evalúa la factibilidad de utilizar un agregado grueso reciclado (AR) proveniente de la trituración de hormigones como reemplazo del agregado grueso granítico de uso habitual en la Ciudad de Buenos Aires (AN).

El estudio abarca, en primer lugar, una caracterización completa del material de acuerdo con la norma IRAM 1533 comparándolo con el agregado grueso granítico y analizando el cumplimiento de los límites especificados en el reglamento vigente. En segundo lugar fueron elaborados hormigones con diferentes

# CARACTERIZACIÓN DE HORMIGONES ELABORADOS CON AGREGADO GRUESO RECICLADO



una empresa InterCement

contenidos unitarios de material cementiceo con 100% de reemplazo del agregado grueso granfítico donde se evaluaron tanto las características en estado fresco (Asentamiento, Contenido de Aire, Peso de la Unidad de Volumen, etc.) como en estado endurecido (Resistencia a Compresión, Módulo de Elasticidad Estático y Dinámico, Succión Capilar, Penetración de Agua, Permeabilidad a los cloruros y Velocidad de Pulso Ultrasónico, etc.). Los resultados obtenidos permiten establecer claramente las ventajas y limitaciones de un material que podrá convertirse en una alternativa viable en nuestra industria en los próximos años.

## 2. MATERIALES UTILIZADOS

Fueron caracterizados de acuerdo con la norma IRAM 1533 un agregado grueso natural (Piedra Partida Granfítica de tamaño máximo nominal 19 mm identificado como AN) de uso habitual en la ciudad de Buenos Aires. Para los hormigones con agregado grueso reciclado fueron estudiados dos agregados procedentes de la trituración de hormigones. Las características de los mismos se indican en Tabla 1.

Tabla 1. Características de los agregados empleados

Tipo	Identif.	Procedencia	Trituración	Fracciones
Natural	AN	Olavarría	Industrial	6-20 mm
Reciclado	AR1	Trituración de probetas de hormigón de diferente origen	Laboratorio	0-20 mm.
Reciclado	AR2	Trituración de hormigón de pavimento de 15-20 años de antigüedad	Industrial.	0-6 mm 6-20 mm 10-30 mm

Como puede observarse, los agregados reciclados provienen de dos fuentes claramente diferentes. En primer término, el agregado AR1 fue obtenido a escala de laboratorio con una trituradora de mandíbulas marca Gilson Comban Inc Modelo LC-34. Para ello fueron trituradas probetas de hormigón de resistencias variables entre H-17 y H-47 obteniéndose un agregado que posee un 72% de material retenido en el tamiz de 4,75 mm. Este material pasante por el tamiz de 4,75 mm fue descartado para este estudio por su elevada absorción de agua y por contener una gran cantidad de material pulverulento. De esta forma se obtuvo un agregado grueso reciclado fracción 6-20 mm. En la Tabla 2 se muestran las características físicas comparadas de cada fracción.

Tabla 2. AR1. Propiedades físicas luego del tamizado.

Material	Ensayo	Resultados	Norma IRAM
Material Retenido # N#4	Densidad SSS	2,49	1533
	Absorción de agua 24 hs	5,0%	
	Material Pasante #200	0,6%	1540
Material Pasante # N#4	Densidad SSS	2,30	1520
	Absorción de agua 24 hs	9,4%	
	Material Pasante #200	3,6%	1540

# CARACTERIZACIÓN DE HORMIGONES ELABORADOS CON AGREGADO GRUESO RECICLADO



una empresa  InterCement

En segundo lugar, el agregado AR2 proviene de un productor de hormigón elaborado que realiza una trituración a nivel industrial de hormigón obtenido de la reparación y rotura de pavimentos de diferente origen, tipo, resistencia y edad. Este agregado es separado por el mismo productor en las fracciones indicadas en la Tabla 1. Para este estudio fue caracterizada la fracción de 6-20 mm. En la Tabla 3 se pueden observar los 3 agregados empleados (AN, AR1 y AR2) caracterizados según lo indica la norma IRAM 1533 y sus complementarias.

Tabla 3. Caracterización de los agregados utilizados según IRAM 1533.

Ensayo	AN	AR1	AR2	Unidad	Norma IRAM
Densidad SSS	2,72	2,49	2,41	--	1533
Absorción 24 hs	0,5	5,0	5,1	%	1533
Material Pasante #200	0,4	0,6	1,4	%	1540
PUV seco y suelto	1520	1255	1204	kg/m <sup>3</sup>	1548
Índice de Lajosidad	21	16	18	g/100g	1687 Parte 1
Índice de Elongación	10	17	12	g/100g	1687 Parte 2
Desgaste Los Ángeles	19	32	40	%	1532
Módulo de Finura	6,69	6,67	6,56	--	1505

### 3. PROGRAMA EXPERIMENTAL

Para evaluar el comportamiento mecánico y de durabilidad fueron elaborados hormigones con tres contenidos unitarios de material cementíceo (CUMC). Dicho material cementíceo está compuesto por la mezcla de un 70% de cemento Pórtland normal CPN40 y un 30% de escoria granulada de alto horno molida (EAH), incorporándose ambos componentes por separado durante el mezclado. En la Tabla 4 se pueden observar algunas características físicas, químicas y mecánicas del cemento y de la escoria de alto horno.

La EAH fue caracterizada de acuerdo con la norma IRAM 1667, determinándose la relación de óxidos ( $\text{CaO}+\text{MgO}+\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$ ), el contenido de sulfuros y los índices de hidraulicidad y de vitrificación. Adicionalmente se determinó la finura Blaine de la misma. En el caso del cemento Pórtland, se presentan de forma indicativa algunos de los ensayos descriptos como requisitos en la norma IRAM 50000.

# CARACTERIZACIÓN DE HORMIGONES ELABORADOS CON AGREGADO GRUESO RECICLADO



una empresa  InterCement

Tabla 4. Características del cemento y la escoria de alto horno

Cemento CPN40	Valor	Escoria de alto horno (EAH)	Valor	Requisito IRAM 1667
Finura Blaine	412 m <sup>2</sup> /kg	Relación de Oxidos	1,70	>1,00
Pérdida por Calcinación	1,77%	Sulfuros	0,31 g/100g	<1,50
Óxido de Sodio Equivalente	0,63%	Índice Hidráulico Principal	0,93	>0,70
Resistencia 2 días	25,9 MPa	Índice de Vitricificación	97,9%	>90%
Resistencia 28 días	51,2 MPa	Finura Blaine	472 m <sup>2</sup> /kg	-

# CARACTERIZACIÓN DE HORMIGONES ELABORADOS CON AGREGADO GRUESO RECICLADO



una empresa InterCement

Asimismo, como agregado fino fue utilizada una mezcla de arena fina procedente del Río Paraná (MF = 1,90 y densidad SSS = 2,63) con arena gruesa procedente del Río Uruguay (MF = 3,05 y densidad SSS = 2,63). En la Tabla 5 se detallan los principales parámetros de las mezclas estudiadas, destacándose que la variable de ajuste entre las mezclas con 300 y 350 kg/m<sup>3</sup> de material cementíceo fue la de modificar el contenido unitario de agua (CUA) de forma de mantener el asentamiento en el cono de Abrams en un rango de 7,0 ffl 1,5 cm. En cambio, los hormigones elaborados con 400 kg/m<sup>3</sup> de aglomerante presentan un contenido de agua constante y la consistencia se obtuvo modificando la dosis de aditivo superfluidificante.

Tabla 5. Características de los hormigones estudiados

Identificación	CUMC <sub>3</sub> [kg/m <sup>3</sup> ]	Contenido de Agua [lts/m <sup>3</sup> ]	Agregado Grueso	Agregado Fino [%]	Dosis Aditivos [%CUMC]
REF-300	300	162	100% AN	45%	No utilizado
REF-350	350	167		42%	No utilizado
REF-400	400	148		40%	0,20% (SF)
R1-300	300	172	100% AR1	45%	No utilizado
R1-350	350	171		42%	No utilizado
R1-400	400	148		40%	0,43% (SF)
R2-300	300	168	100% AR2	45%	No utilizado
R2-350	350	173		42%	No utilizado
R2-400	400	148		40%	0,61% (SF)

## 4. RESULTADOS OBTENIDOS

### 4.1. Estado Fresco

En la Tabla 6 se muestran los resultados obtenidos de las determinaciones en estado fresco de los hormigones estudiados. Como fue mencionado anteriormente, el contenido unitario de agua fue ajustado para asentamiento constante en las mezclas 300 y 350, mientras que en las mezclas 400, el ajuste fue realizado variando la dosis de aditivo SF.

Tabla 6. Propiedades en estado fresco

Propiedad y/o Ensayo	Unidad	CUMC 300			CUMC 350			CUMC 400		
		REF	R1	R2	REF	R1	R2	REF	R1	R2
Asentamiento	cm	5,5	5,5	6,0	7,5	8,0	7,5	7,5	8,0	8,5
Peso Unitario PUV	kg/m <sup>3</sup>	2395	2295	2261	2403	2302	2267	2439	2338	2308
Contenido de Aire	%	1,5	2,0	1,8	1,3	1,6	1,6	1,8	2,0	1,8

De los resultados en estado fresco se observa que, como era previsible, los hormigones elaborados con 100% de reemplazo del agregado grueso natural presentan, para obtener una misma trabajabilidad, contenidos de

# CARACTERIZACIÓN DE HORMIGONES ELABORADOS CON AGREGADO GRUESO RECICLADO



una empresa InterCement

agua (o de aditivo superfluidificante) algo superiores respecto de la mezcla patrón. También se verifica un menor peso unitario y un leve aumento del contenido de aire. Sin embargo debe destacarse que el aspecto visual de los hormigones elaborados y su terminación superficial son totalmente comparables, siendo muy difícil establecer y distinguir entre las mezclas elaboradas con agregados reciclados y la mezcla patrón con agregado natural.

## 4.2. Características mecánicas

Fueron realizados ensayos de compresión (RC), tracción por flexión (MRF), módulo de elasticidad dinámico ( $E_d$ ) y estático (E), velocidad de pulso ultrasónico (VPU) y esclerometría (IE). Los resultados obtenidos se pueden observar en la Tabla 7.

Tabla 7. Propiedades mecánicas de los hormigones estudiados.

Ensayo	Edad [días]	CUMC 300			CUMC 350			CUMC 400		
		REF	R1	R2	REF	R1	R2	REF	R1	R2
Resistencia a la Compresión [MPa]	3	13,8	12,6	12,7	18,3	17,9	16,1	32,0	31,7	30,6
	7	20,8	19,3	18,9	26,1	24,1	22,8	46,8	41,9	40,6
	28	30,0	29,3	28,3	36,9	35,5	35,2	61,4	51,9	50,6
	56	36,6	34,4	32,1	41,4	40,5	42,8	67,2	60,8	58,5
Módulo de rotura a flexión [MPa]	7	2,75	2,60	2,65	3,90	3,45	3,70	5,60	5,30	5,20
	28	4,50	3,90	3,70	5,10	4,70	4,60	6,95	6,35	5,90
Resistencia tracción comp. diametral [MPa]	7	1,60	1,60	1,70	2,20	1,95	1,90	3,95	3,65	3,80
	28	2,50	2,45	2,80	3,10	2,85	2,90	5,05	4,50	4,70
Módulo Elasticidad Estático [GPa]	7	32,5	25,6	25,1	32,9	25,1	24,1	40,5	31,2	30,2
	28	39,0	31,2	28,8	41,7	32,4	28,7	43,3	34,8	35,6
Módulo Elasticidad Dinámico [GPa]	7	39,5	33,2	30,9	40,9	33,6	31,2	47,0	38,5	37,2
	28	44,9	37,2	33,9	45,4	38,1	35,2	49,4	42,0	39,5
Velocidad de pulso ultrasónico [m/seg]	7	4610	4240	4140	4740	4250	4235	4920	4520	4535
	28	4795	4510	4390	4830	4450	4430	5010	4700	4660
Índice Esclerométrico	7	25,1	22,0	23,3	26,9	26,1	25,9	35,1	32,8	32,1
	28	31,8	28,2	29,5	34,5	31,8	31,6	43,3	42,8	42,4

En primer lugar, puede observarse que los niveles de resistencia a la compresión de las mezclas de 300 y 350  $\text{kg/m}^3$  son comparables y no se aprecian diferencias sustanciales entre los hormigones con AN (REF) y AR (R1 y R2). Sin embargo, analizando los resultados de resistencia a compresión de las mezclas de 400  $\text{kg/m}^3$  de material cementíceo se observa que el desarrollo resistente de los hormigones R1-400 y R2-400 es sensiblemente inferior comparado con el hormigón REF-400 elaborado con agregado natural.

En lo que se refiere a resistencia a tracción (por flexión y por compresión diametral), se observa que, sobre todo a los 28 días, los hormigones R1 y R2 presentan resultados inferiores respecto de las mezclas patrón REF. De acuerdo a la forma de la rotura observada, se evidencia el agregado reciclado fracturado, con mayor frecuencia en las mezclas más ricas en cemento. Esto está directamente influenciado por la composición

# CARACTERIZACIÓN DE HORMIGONES ELABORADOS CON AGREGADO GRUESO RECICLADO



una empresa  InterCement

misma del agregado reciclado, cuyas partículas están compuestas por trozos de agregado grueso natural que presenta adherido, en porcentajes variables, mortero del hormigón original. Asimismo, el módulo de elasticidad del agregado reciclado es, obviamente, inferior al del agregado natural granítico utilizado. El hecho de emplear un agregado grueso de menor módulo de elasticidad es determinante y se traduce en el hecho que los hormigones R1 y R2 presentan disminuciones del orden de 25 a 30% tanto en el módulo estático como dinámico, en comparación con las mezclas de referencia REF.

## 4.3. Aspectos relacionados con la durabilidad

### 4.3.1 Discusión

Más allá de las propiedades mecánicas de los hormigones estudiados, es fundamental analizar los aspectos relacionados con la durabilidad del hormigón con agregado reciclado. Este análisis es más que importante si tenemos en cuenta que las mezclas R1-300, R2-300, R1-350 y R2-350 presentan, en lo que hace al nivel de resistencia a la compresión, resultados similares a la mezcla de referencia correspondiente (REF-300 y REF-350). Si a este comportamiento le sumamos el hecho que las mezclas de CUMC 300 se encuadran dentro de la clasificación de hormigones clase H-21 y las mezclas con CUMC 350 de hormigones clase H-30, surge el siguiente planteo: ¿El agregado reciclado puede emplearse para elaborar hormigones estructurales o su implementación se encuentra asociada únicamente a hormigones de relleno y/o de baja calidad?. Sin ningún lugar a dudas, la respuesta surgirá no sólo del comportamiento mecánico de estos hormigones sino también de su capacidad de resistir acciones externas que afecten la durabilidad de las estructuras.

### 4.3.2 Resultados obtenidos

En la Tabla 8 se presentan algunos parámetros evaluados que intentan definir a los hormigones con agregado reciclado desde el punto de vista de la durabilidad. Para ello se realizaron los siguientes ensayos:

- Determinación de la permeabilidad al ión cloruro por el método acelerado ASTM C-1202.
- Determinación de la capacidad (Cs) y de la velocidad (S) de succión capilar de acuerdo con la norma IRAM 1871-04.
- Determinación de la penetración de agua a presión de acuerdo con la norma IRAM 1554.
- Determinación de la absorción total del hormigón endurecido de acuerdo con la norma ASTM C-642.
- Determinación del desgaste superficial del hormigón adaptando el ensayo de desgaste Dorry empleado para baldosas aglomeradas con cemento.

El ensayo de desgaste Dorry fue adaptado del ensayo especificado en la norma IRAM 1522 para evaluar la resistencia al deterioro superficial del hormigón. Para ello se cortan prismas de 5 cm de espesor y de 10 cm de lado por 5 cm de ancho y se ensaya la muestra para un recorrido de 500 metros. El desgaste es medido como la diferencia de alturas y de peso de la probeta antes y después del recorrido sobre el abrasivo especificado. La Foto 1 muestra una vista del equipo empleado mientras que en la Foto 2 se muestran las probetas de hormigón utilizadas.

Respecto de la succión capilar (evaluada según norma IRAM 1871-04), se aprecia que las mezclas con agregado reciclado presentan una velocidad de succión capilar sensiblemente mayor que los hormigones de

# CARACTERIZACIÓN DE HORMIGONES ELABORADOS CON AGREGADO GRUESO RECICLADO



una empresa InterCement

referencia correspondientes. Este comportamiento es, sin dudas, una limitante respecto cómo funciona uno de los mecanismos de transporte de sustancias externas a la masa del hormigón reciclado.

Tabla 8. Propiedades durables de los hormigones estudiados.

Ensayo	Edad [días]	CUMC 300			CUMC 350			CUMC 400		
		REF	R1	R2	REF	R1	R2	REF	R1	R2
Permeabilidad al ión cloruro. ASTM C1202	28	3594	5021	4343	2952	4079	4209	1989	3122	3195
	56	2000	2944	3349	1886	2634	3030	1326	2598	2704
Carga pasada [coulombs]	28	4405	-	6497	4159	-	6044	1464	1907	2364
	56	2958	-	6228	2271	-	5828	1127	1428	2026
Capacidad de Succión Capilar ( $C_s$ ) <sup>2</sup> [g/m]	28	9,71	-	16,82	5,83	-	15,81	2,45	3,81	5,12
	56	4,14	-	13,33	3,75	-	11,32	1,90	2,82	4,23
Velocidad de Succión Capilar (S) <sup>2</sup> <sup>1/2</sup> [g/m/seg]	28	20	20	21	17	15	16	13	13	14
Penetración agua a presión Promedio [mm]	28	2,42	2,33	2,29	2,44	2,35	2,31	2,45	2,38	2,34
Densidad [kg/dm <sup>3</sup> ]	28	5,4	9,2	9,2	5,2	8,6	9,0	4,7	7,6	7,7
Absorción Total [%]	28	0,8	1,0	1,1	0,5	0,8	0,9	0,3	0,4	0,6
Desgaste Dorry [mm]	28									

Foto 1. Equipo para desgaste Dorry



Foto 2. Probetas para ensayo Dorry



# CARACTERIZACIÓN DE HORMIGONES ELABORADOS CON AGREGADO GRUESO RECICLADO



una empresa  InterCement

Como aclaración importante vale decir que el comportamiento mecánico de estos hormigones será variable y dependerá fuertemente del tipo y calidad del hormigón que se tritura para la obtención del agregado reciclado. Debido a ello, las conclusiones del presente estudio son válidas únicamente para el conjunto de materiales empleados y la utilización de agregados provenientes de la trituración de agregados deberá ser evaluada en cada caso en particular.

## 5. CONCLUSIONES

Analizando los resultados obtenidos en el presente estudio, se concluye lo siguiente:

Los resultados de la caracterización de los agregados reciclados presentan diferencias respecto de los de origen natural. Sin embargo, los métodos de ensayo indicados en la norma IRAM 1533 son aplicables a estos agregados sin ningún tipo de restricción y deberá considerarse en el futuro la inclusión de este tipo de agregados en normas y reglamentos.

El reemplazo total de agregado grueso natural por agregado grueso reciclado en diferentes tipo de hormigones es factible técnicamente. Los hormigones evaluados presentan una demanda de agua (Mezclas CUMC de 300 y 350  $\text{kg/m}^3$ ) o una demanda de aditivo superfluidificante (Mezclas CUMC 400  $\text{kg/m}^3$ ) levemente superior a lo obtenido en los hormigones de referencia.

Los niveles de resistencia a compresión de las mezclas 300 y 350 son comparables con las mezclas de referencia a todas las edades. Sin embargo, las mezclas con CUMC de 400  $\text{kg/m}^3$  con agregado grueso reciclado presentan, especialmente para niveles de resistencia superiores a 40 MPa, una resistencia a la compresión sensiblemente inferior respecto del hormigón de referencia.

La deformabilidad de los hormigones elaborados con agregado grueso reciclado es mayor respecto de los hormigones con agregado natural. Esto se observa en el módulo de elasticidad con reducciones del orden del 25% al 30% tanto a 7 como a 28 días.

Respecto de los parámetros durables evaluados en este estudio, las mezclas elaboradas con agregado grueso reciclado evidencian un hormigón más poroso, más susceptible de ser atacado y por ende menos resistente a los factores externos. Esto implica que las mezclas R1 y R2 de 300 y 350  $\text{kg/m}^3$  de material cementíceo son más susceptibles desde el punto de vista de la durabilidad aún cuando los niveles de resistencia a compresión son comparables a los hormigones REF-300 y REF-350 (H-21 y H-30 respectivamente).

## 6. AGRADECIMIENTOS

Al personal del Centro Técnico, especialmente a Adelino Ríos, Diego Ríos, Diego Mantegna y Patricio Corallo. Al Ing. Masciotra por su desinteresada colaboración.

## 7. REFERENCIAS

- [1] Di Maio A., Giaccio G., Zerbino R., (2004) "Hormigón con agregados reciclados: Resistencia, Módulo de Elasticidad y Fluencia bajo cargas de compresión", Revista Hormigón N° 40 pp 37-49
- [2] Liu, T, Meyer C. (2004) "Recycling Concrete and other materials for sustainable development" SP-219. American Concrete Institute.