

## EMPLEO DE DIFERENTES TIPOS DE AGREGADO GRUESO PARA LA ELABORACION DE HORMIGONES AUTOCOMPACTABLES

Tobes, J. M.<sup>1</sup>, López, A.<sup>2</sup>, Torrijos, M. C.<sup>1</sup>, Gamboa Alurralde, G.<sup>3</sup>, Giaccio, G.<sup>4</sup> y Zerbino, R.<sup>5</sup>

### RESUMEN

El diseño del hormigón autocompactable (HAC) ha sido un tópico largamente discutido desde el surgimiento de este tipo de mezclas hacia fines de los años '80. Sin embargo muchos estudios restringen sus resultados a los materiales utilizados en cada investigación, siendo difícil su adaptación de modo universal. Dada su extensión geográfica, Argentina posee una amplia disponibilidad de agregados para hormigones de diverso origen y características. En este trabajo se analizan los criterios de diseño y propiedades de HAC preparados con diferentes tipos de agregado grueso de uso frecuente en la Provincia de Buenos Aires, entre ellos se incluyen granitos y cuarcitas trituradas y cantos rodados de origen silíceo. Además de la caracterización en estado fresco se analizan para cada uno de los hormigones elaborados la influencia del tipo de agregado sobre la resistencia y homogeneidad en estado endurecido.

### INTRODUCCION

El hormigón autocompactable (HAC) posee propiedades singulares en estado fresco, fundamentalmente su capacidad de pasar a través de zonas densamente armadas y de fluir llenando los encofrados sin que se produzca la segregación de sus componentes (1). Recientemente se han propuesto clases de HAC en base a los resultados de los ensayos de escurrimiento, embudo en V y caja en L. De acuerdo con las características geométricas del elemento a llenar, se recomienda una clase de hormigón (2).

El proceso de diseño del HAC requiere, aún más que en otros hormigones, el cuidadoso estudio de las combinaciones de los materiales componentes ya que las características en estado fresco resultan determinantes de las propiedades finales del material en la estructura (1). Para ello se aplican ajustes previos, ya sea a nivel de pastas o de morteros, que permiten obtener las mejores combinaciones entre el cemento, las adiciones minerales, los aditivos químicos y los agregados finos empleando una menor cantidad de materiales y tiempo de ejecución.

Los ensayos sobre pastas permiten básicamente comprobar la compatibilidad entre el cemento, las adiciones y los aditivos, así como seleccionar entre los distintos tipos de superfluidificante disponibles o sus posibles combinaciones con aditivos modificadores de viscosidad, retardadores de fraguado, etc. La pasta de un HAC deberá cumplir con determinadas características de fluidez y viscosidad y ser incorporada al hormigón en un

---

<sup>1</sup> Becario CONICET, LEMIT. Docente Facultad de Ingeniería UNLP.

<sup>2</sup> Becaria CONICET, LEMIT. Docente Facultad de Ingeniería UTN Reg. Córdoba.

<sup>3</sup> Becaria Facultad de Ingeniería UNLP.

<sup>4</sup> Investigador CIC, LEMIT. Profesor Facultad de Ingeniería UNLP.

<sup>5</sup> Investigador CONICET, LEMIT. Profesor Facultad de Ingeniería UNLP.

volumen tal que permita llenar los vacíos del paquete granular para otorgar una adecuada movilidad al conjunto. Existen estudios que proponen valores de viscosidad y fluidez de la pasta para lograr autocompactabilidad con una dada combinación y tipo de agregados (3-4).

Sin embargo la práctica indica que muchas veces existen cambios en las partidas de agregados y, consecuentemente, es necesario replantear el diseño del HAC. Los ensayos sobre morteros parten de la base de considerar al hormigón como un sistema de dos fases. En dicho sistema las partículas de agregado grueso se encuentran suspendidas dentro de una matriz continua constituida por el mortero. Este último debe poseer las condiciones de fluidez y viscosidad que garanticen la autocompactabilidad.

Se ha demostrado que a través del ensayo de morteros se puede alcanzar un mejor ajuste de la dosis de superfluidificante requerida en el hormigón (5) ya que este sistema considera las características particulares del agregado fino. De este modo se ha podido, por ejemplo, ajustar las proporciones del HAC ante cambios en la distribución de tamaño de partículas de las arenas y evaluar los cambios en las propiedades reológicas del mortero que genera la incorporación de adiciones tipo "filler" o de pigmentos. Necesariamente, el volumen de pasta cambiará y se deberá modificar el volumen de arena, en general el volumen de agregado grueso queda fijo. Estudios previos han mostrado la utilidad de este procedimiento de diseño en el caso de HAC coloreados (6). También es de destacar que las evaluaciones sobre morteros permiten valorar la pérdida de autocompactabilidad debida al paso del tiempo, factor crítico para las tareas de transporte y colocación del hormigón (5).

Para caracterizar a los morteros se adoptan los ensayos de escurrimiento y embudo en V (ver Fig. 1). A partir del primero se obtiene el diámetro final (SF) con el que se calcula el Área relativa de flujo ( $\Gamma_m$ ). En el ensayo de embudo en V se mide el tiempo que tarda el mortero en pasar a través del embudo (FT) con el que se calcula la Velocidad relativa de flujo ( $R_m$ ) (7). Diversos autores recomiendan valores de  $R_m$  y  $\Gamma_m$  para lograr un HAC, en general dichos valores quedan limitados a los materiales utilizados en cada estudio (8, 9).

En trabajos anteriores se ha estudiado y discutido la influencia del cambio de la distribución granulométrica del agregado fino sobre el diseño de HAC. Como conclusión se destaca que tanto los valores de los parámetros  $R_m$  y  $\Gamma_m$ , como la cantidad de superfluidificante, el volumen de pasta y el contenido máximo de agregado grueso se ven necesariamente modificados (5,10) ante la variación del agregado fino.

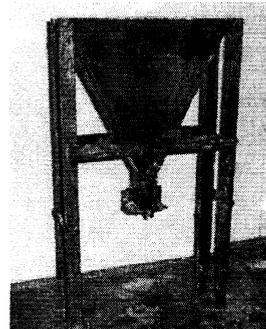


Figura 1. Ensayos para la caracterización de morteros.  
Izquierda. Escurrimiento; derecha: Embudo en V.

Otra metodología propuesta para diseñar HAC considera el uso de los parámetros reológicos (umbral de cizallamiento y viscosidad) de la pasta de cemento, definiendo una zona, "self-flow zone", donde no se produce la segregación de las partículas de los agregados (3). Bui et. al. han ampliado dicho modelo incluyendo el efecto de la interacción entre los agregados; en este nuevo modelo, variables como la relación entre agregado fino y grueso, la granulometría y la forma de las partículas son tenidas en cuenta a través de dos parámetros, el contenido de vacíos y el diámetro medio de las partículas (11). El estudio determina para la pasta un mínimo de extendido, una viscosidad aparente mínima y una relación óptima fluidez - viscosidad para alcanzar una adecuada capacidad de fluir y llenar los moldes sin segregación. Estos valores se relacionan con el diámetro medio de las partículas de agregado ( $D_{av}$ ) y con el espaciamiento promedio entre agregados ( $D_{ss}$ ); sin embargo, el modelo no tiene en cuenta las características superficiales del agregado.

Un cambio en las características del agregado grueso implicará necesariamente cambios cualitativos y/o cuantitativos en la matriz (mortero) si se desean obtener HAC con un comportamiento similar. Por un lado, habrá que considerar el efecto de la forma y textura del agregado, como así también factores que tengan en cuenta la distribución de tamaños, porcentaje de vacíos y el volumen de agregado grueso a incorporar. Sin embargo, existe limitada información sobre los efectos de las características de los agregados gruesos sobre la autocompactabilidad, lo que puede resultar de gran relevancia en países como Argentina donde, incluso en una misma región, existe una gran variedad de agregados disponibles.

Este trabajo tiene como objetivo analizar la influencia de las características del agregado grueso en las propiedades del HAC y los cambios que implicarían a nivel de diseño de mezclas. Se presentan HAC elaborados con agregados gruesos con marcadas diferencias en sus valores de absorción, contenido de vacíos, forma y textura; a partir de estas experiencias se discute el efecto de los agregados sobre la capacidad de fluir y la estabilidad de los hormigones.

## EXPERIENCIAS

Se seleccionaron tres tipos de agregado grueso de uso frecuente en la Provincia de Buenos Aires con diferencias significativas en su forma y textura. Los hormigones fueron realizados manteniendo constante el volumen de todos los materiales y cambiando solamente el tipo de agregado grueso utilizado. A su vez se estudió el efecto del cambio de la energía y volumen de mezclado. Luego y en base a los resultados obtenidos, se efectuaron correcciones con el objeto de lograr hormigones autocompactables de características similares. La caracterización de los hormigones comprendió en estado fresco la evaluación de la autocompactabilidad y en el hormigón endurecido, además de determinar las propiedades mecánicas, se estudió específicamente la homogeneidad de la distribución de agregados dentro de la estructura interna del hormigón.

## Materiales

Se utilizaron como materiales finos un cemento portland con "filler calcáreo" (IRAM 50000), de superficie específica Blaine 337  $m^2/kg$  y 3.11 de densidad y un filler calcáreo de densidad 2.8. El aditivo superfluidificante empleado tiene una densidad de 1.09 y un contenido sólido de 18 %. La arena empleada es una combinación de arenas silíceas naturales (densidad: 2.60, pasa #200: 0.4%, módulo de finura: 2.39, vacíos: 30 %).

Tabla 1. Propiedades del agregado grueso.

Piedra	G	Q	R
Densidad	2.76	2.49	2.58
Absorción (%)	0.40	2.13	0.90
Módulo de finura	6.53	6.73	6.59
PUV (kg/m <sup>3</sup> )	1440	1300	1600
PUV compactado (kg/m <sup>3</sup> )	1580	1430	1660
Porcentaje de vacíos (%)	48	49	38
Porcentaje de vacíos-compactado (%)	43	42	36
Forma	Irregular	Irregular	Redondeada
Textura	Rugosa	Rugosa	Lisa
Tamiz (mm)	% que pasa		
19.0	100	100	100
12.7	61	54	54
9.5	41	27	35
4.8	6	0	6

Se emplearon tres tipos de agregado grueso de tamaño máximo 19 mm, piedra partida granítica (G), piedra partida cuarcítica (Q) y canto rodado (R). La piedra partida granítica es de forma irregular, textura rugosa y de baja absorción. La piedra partida cuarcítica también tiene textura rugosa, forma irregular, pero la absorción mucho mayor. Por su parte el canto rodado presenta una textura lisa y partículas redondeadas. Las propiedades de los agregados y sus granulometrías se presentan en la Tabla 1.

### Detalles experimentales

La dosificación de los hormigones se realizó siguiendo un procedimiento basado en los resultados de los ensayos de escurrimiento y embudo en V para morteros, como paso previo a la realización de los hormigones (5). El mortero seleccionado presentó para una dosis de aditivo de 0.25 % (peso sólido respecto del peso del cemento), un diámetro en el ensayo de escurrimiento igual a 280 mm y un tiempo de pasaje a través del embudo en V de 4 segundos. Se evaluó la pérdida de fluidez con el tiempo (45 minutos), obteniéndose diferencias menores del 10 % para ambos ensayos. La relación agua / cemento fue fijada en 0.50. El volumen de pasta respecto del volumen total de mortero fue de 57 %, lo que implica una relación filler /cemento igual a 0.90.

Se realizaron tres hormigones variando únicamente el tipo de agregado grueso y manteniendo constante su volumen (31 % del volumen total). Los agregados fueron utilizados en condición saturado a superficie seca, con el objeto de minimizar efectos debidos a la absorción o aporte de agua. Las dosificaciones se detallan en la Tabla 2, los hormigones se identifican de acuerdo con el agregado grueso utilizado: H-G, H-Q, H-R. En base a los resultados obtenidos se elaboró un segundo hormigón con piedra partida granítica (H-Gb) agregando 0.9 kg/m<sup>3</sup> de superfluidificante y un segundo hormigón con canto rodado (H-Rb), aumentando el volumen de piedra a 34 %.

Tabla 2. Hormigones.

Hormigón	H-Ga	H-Gb	H-Q	H-Ra	H-Rb
Cemento (kg/m <sup>3</sup> )	332	331	332	332	317
Filler (kg/m <sup>3</sup> )	299	298	299	299	285
Agua (kg/m <sup>3</sup> )	166	166	166	166	158
Arena (kg/m <sup>3</sup> )	745	745	745	745	710
Agregado grueso (kg/m <sup>3</sup> )	855	855	770	800	875
Volumen agregado grueso (%)	31	31	31	31	34
Superfluidificante (kg/m <sup>3</sup> )	4.6	5.5	4.6	4.6	4.4

Tabla 3. Propiedades de las combinaciones de agregados utilizadas y estimación del espaciamiento medio de los agregados.

	G	Q	Ra	Rb
Volumen de pasta (litros)	384	384	384	366
Vol. Agr. grueso / Vol. Agr. fino	1.08	1.08	1.08	1.24
Módulo de finura	4.60	4.59	4.56	4.70
Dav (mm)	6.4	6.7	6.5	6.8
PUV compactado (kg/m <sup>3</sup> )	2095	1980	2075	2070
Porcentaje de vacíos	22.1	22.5	20.2	20.4
Dss (mm)	0.517	0.530	0.584	0.540

La Tabla 3 muestra las principales propiedades de las combinaciones de agregados grueso y fino utilizadas en este trabajo. Se informan resultados de diámetro medio de agregados ( $D_{av}$ ) y espaciamiento medio entre agregados ( $D_{ss}$ ), calculados como:

$$D_{av} = \frac{\sum d_i * m_i}{\sum m_i} \quad D_{ss} = D_{av} \left\{ \sqrt[3]{1 + \frac{V_p - V_{oid}}{V_c - V_p}} - 1 \right\}$$

donde  $d_i$  es el tamaño medio del agregado retenido en la fracción  $i$  y  $m_i$  es el porcentaje retenido entre los tamices de la fracción  $i$ .  $V_p$  es el volumen de pasta,  $V_c$  el volumen de hormigón y  $V_{oid}$  es el volumen de vacíos en el agregado compactado (11).

Existen diferencias en el espaciamiento medio que, como se puede observar en la ecuación anterior, depende por un lado del  $D_{av}$ , pero también del volumen de pasta y del contenido de vacíos de la combinación de agregados utilizada.

Con el propósito de evaluar también el efecto del volumen y energía de mezclado, el trabajo se dividió en dos etapas. La primera comprende pastones de 40 litros (grupo H1) mientras que la segunda pastones de 100 litros (grupo H2). En estado fresco se realizaron ensayos de escurrimiento, embudo en V, escurrimiento con anillo y contenido de aire incorporado (3, 12, 13). La temperatura del agua utilizada fue de  $20 \pm 1$  °C, mientras que la temperatura ambiente fue de 23 °C.

Se moldearon cilindros de 100 x 200 mm y vigas de 150 x 100 x 900 mm que fueron curados en cámara húmeda hasta la edad de ensayo. En todos los hormigones se determinó la resistencia a compresión y el módulo de elasticidad; en el grupo H1 se evaluó la resistencia a tracción por compresión diametral, mientras que en el grupo H2 se midieron el módulo de rotura y la extensibilidad para una carga igual al 90 % de la carga máxima.

Además, para evaluar la resistencia a la segregación (homogeneidad) se moldearon tubos de 100 mm de diámetro. Con los pastones de 40 litros (H1) se llenaron tubos de 1 m de altura que, una vez endurecido el material, fueron cortados longitudinalmente para relevar la distribución de agregados. Con los pastones de mayor volumen (H2) se llenaron tubos en forma de U de 1.90 m de altura y 0.70 m de base que fueron cortados en forma transversal de manera de obtener cilindros de aproximadamente 0.40 m de longitud; sobre estos últimos se evaluaron la velocidad de pulso ultrasónico, el peso unitario y, sobre los cortes, el área de los agregados visibles. En la Fig. 2 se muestra el esquema de obtención de las muestras de los tubos en U, donde se diferencian los cilindros correspondientes a la entrada, base y salida. De esta forma se complementa la información referida a las condiciones de autocompactabilidad suministrada por los ensayos en estado fresco.

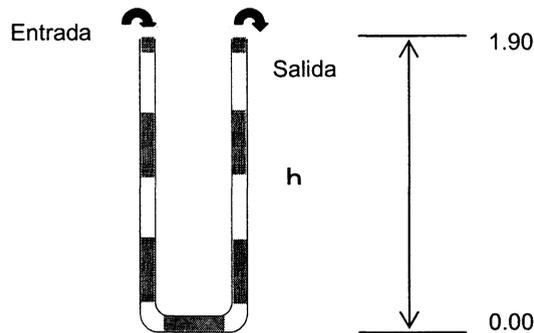


Fig. 2. Esquema del tubo en U empleado para el estudio de la estabilidad del HAC.

## RESULTADOS Y DISCUSION

### Propiedades en estado fresco

En la Tabla 4 se presentan las propiedades en estado fresco de los hormigones, se incluyen los resultados de los ensayos de escurrimiento ( $D_f$  y  $t_{50}$ ), embudo en V ( $T_V$ ) y escurrimiento con anillo ( $D_i$ ), además del contenido de aire. En los hormigones del grupo H1 (pastones de 40 litros), elaborados con la misma dosis de aditivo superfluidificante, los diámetros finales variaron entre 655 y 710 mm, a excepción del H1-Ga que sólo alcanzó los 605 mm. El máximo valor se obtuvo utilizando canto rodado, posiblemente debido a la forma y textura superficial de sus partículas (14, 15). En los pastones de mayor volumen (H2) todos los extendidos fueron similares (680 – 700 mm). De acuerdo con ASTM C1611 (12) el índice de estabilidad visual (VSI) de todas las mezclas fue igual a 0, lo que corresponde a un hormigón estable sin evidencias de segregación o exudación. En la Fig. 3 se observa el aspecto del HAC luego del ensayo de escurrimiento, se aprecia por un lado la capacidad de escurrir y por otro la estabilidad del HAC, evidenciada en una distribución homogénea del agregado grueso en todo el material y la ausencia de pasta concentrada en la periferia.

Tabla 4. Propiedades del hormigón fresco.

HAC	$t_{50}$ (s)	$D_f$ (mm)	$T_V$ (s)	$D_j$ (mm)	$D_f - D_j$ (mm)	Aire (%)
pastones de 40 litros						
H1-Ga	3.1	605	11.0	525	80	-
H1-Gb	2.3	710	7.1	680	30	5.7
H1-Q	3.6	655	14.0	650	5	4.5
H1-Ra	2.3	685	7.0	650	35	5.0
H1-Rb	1.6	700	6.1	670	30	2.0
pastones de 100 litros						
H2-Gb	1.4	700	4.8	-	-	6.5
H2-Q	1.5	680	5.2	-	-	6.0
H2-Ra	1.5	680	4.6	-	-	4.5

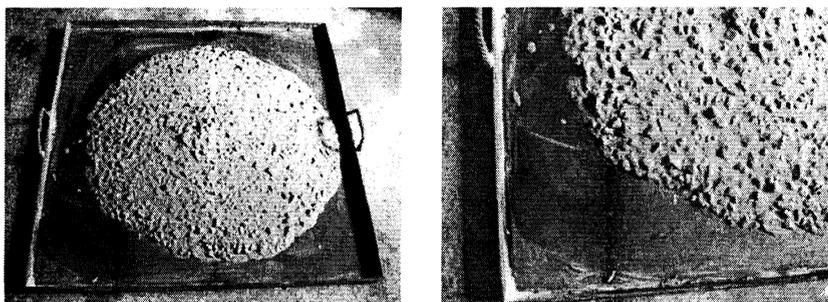


Figura 3. Ensayo de escurrimiento.

Los tiempos de pasaje a través del embudo en V variaron desde 7 a 14 segundos en el grupo H1. El  $T_V$  más elevado corresponde a la piedra cuarcítica, mientras que el menor se dio con el canto rodado. H1-Q también presentó el mayor  $t_{50}$ , lo que evidencia una mayor viscosidad plástica. Sin embargo en los pastones de 100 litros no se encontraron mayores diferencias en los tiempos  $T_V$  o  $t_{50}$ . De lo expuesto surge que el cambio de volumen y energía de mezclado parece afectar en particular a la viscosidad del HAC.

El ensayo de Escurrimiento con Anillo mide la resistencia al bloqueo del hormigón. Según lo propuesto por la norma ASTM (13) la mezcla es adecuada si el diámetro obtenido comparado con el Escurrimiento difiere en menos de 25 mm, mientras que si la diferencia entre ambos supera los 50 mm el hormigón tiene riesgo de bloqueo. La Tabla 4 muestra que todos los HAC presentaron un comportamiento adecuado, a excepción de H1-Ga.

Cabe destacar que en el HAC con piedra granítica fue necesario adicionar 0.05 % de superfluidificante para lograr un comportamiento en el estado fresco similar al de las otras mezclas. Por otro lado, con el canto rodado la incorporación de un volumen mayor de agregado no afectó los resultados de manera significativa. En este último caso, y debido por

un lado al menor porcentaje de vacíos del agregado y por otro a su forma y textura que mejoran la trabajabilidad, fue posible reducir el volumen de pasta sin comprometer la capacidad de fluir del hormigón ni aumentar el riesgo de bloqueo.

### Propiedades mecánicas

Las Tablas 5.a y 5.b muestran los resultados de la caracterización mecánica de los HAC. El hormigón con piedra cuarcítica alcanzó la mayor resistencia a compresión ( $f'_c$ ) a las edades de 7 y 28 días pero, como era de esperar considerando la rigidez de la roca de origen, presentó el menor módulo de elasticidad (E). El HAC con canto rodado presentó los valores más bajos de módulo de rotura en flexión (MR) y resistencia a tracción por compresión diametral ( $f_t$ ). Por otro lado la incorporación de un volumen mayor de agregados en el hormigón H1-Rb no produjo cambios importantes en las propiedades mecánicas. Con respecto a la forma de fractura, en el ensayo de tracción por compresión diametral se observaron superficies planas en el hormigón con piedra cuarcítica, en este caso todas las partículas del agregado aparecieron fracturadas. Contrariamente, el hormigón con canto rodado presentó gran cantidad de fallas de adherencia, agregados despegados y una superficie de fractura irregular, este comportamiento puede explicarse considerando la alta resistencia de la roca original y la menor resistencia de la zona de transición con respecto a la de los agregados triturados. Finalmente, la piedra granítica mostró un comportamiento intermedio, con fallas de adherencia y agregados fracturados.

La deformabilidad en flexión (extensibilidad al 90 % de la carga de rotura,  $e_{90}$ ) fue mayor con agregados triturados que con canto rodado; esto puede justificarse considerando la menor adherencia de este último (ver Tabla 5.b). En H2-Gb y H2-Q se alcanzaron deformaciones de 130 y 125  $\mu\text{m/m}$  mientras que en H2-R fue igual a 95  $\mu\text{m/m}$ . Estos valores son comparables con los de un hormigón convencional con este nivel de resistencia y tamaño de agregados; además son coherentes con las estimaciones realizadas a partir del módulo de elasticidad (extensibilidad teórica,  $e_{t90}$ ).

Tabla 5.a. Propiedades mecánicas (pastones de 40 litros).

Hormigón	Edad (días)	$f'_c$ (MPa)	E (GPa)	$f_t$ (MPa)
H1-Gb	7	41.6	30.1	3.7
H1-Q		42.7	25.4	3.6
H1-Ra		37.0	32.6	3.1
H1-Rb	28	46.3	36.8	3.3

Tabla 5.b. Propiedades mecánicas (pastones de 100 litros).

Hormigón	Edad (días)	$f'_c$ (MPa)	E (GPa)	MR (MPa)	$e_{90}$ ( $\mu\text{m/m}$ )	$e_{t90}$ ( $\mu\text{m/m}$ )
H2-Gb	28	47.5	32.5	4.9	130	135
H2-Q		48.2	27.1	4.7	125	155
H2-Ra		42.4	34.9	3.6	90	95

Finalmente cabe indicar que, considerando los distintos tipos de agregados utilizados, las diferencias observadas en las propiedades mecánicas son consistentes con estudios previos sobre hormigones convencionales y de alta resistencia (15) y se pueden justificar en base a los cambios de adherencia en la zona de transición y las características propias de cada agregado.

### Estudio de la estabilidad y distribución de agregados en el hormigón endurecido

En este apartado se presenta el estudio desarrollado para valorar la homogeneidad del HAC en estado endurecido, que adquiere relevancia en relación a la estabilidad del hormigón, un aspecto muy importante de la autocompactabilidad. Como fuera dicho, se moldearon para este fin tubos de diferentes dimensiones con los hormigones H1 y H2. El análisis de la distribución de los agregados en la mesoestructura del hormigón que se describe a continuación, complementa las observaciones realizadas sobre el material en estado fresco.

En primera instancia (H1-Gb, H1-Q y H1-Ra) se buscó obtener una visión cualitativa de la estabilidad de cada HAC llenando tubos de 1 metro de altura que, una vez endurecido el material, fueron aserrados en forma longitudinal. La Fig. 4 muestra el aspecto de los mismos donde se aprecia que todos hormigones presentaron una distribución homogénea de las partículas de agregado.

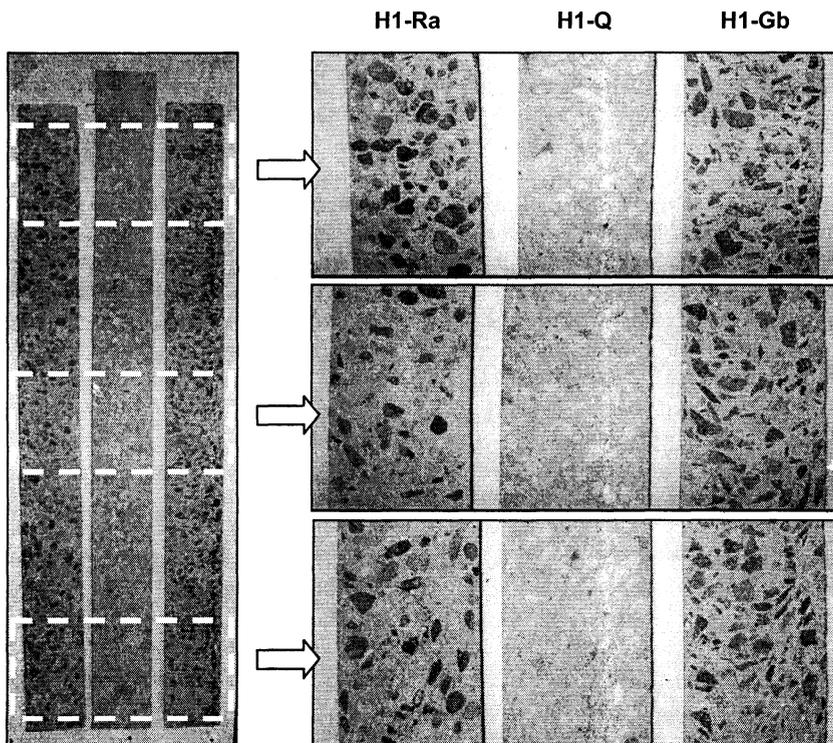


Figura 4. Distribución de agregados en tubos rectos de 1 metro de altura.

Con los hormigones H2 se realizaron tubos en U de 1.90 m de altura y 0.70 m de base, obteniendo muestras en distintos sectores a lo largo del tubo. Los primeros 100 mm de cada extremo del tubo U fueron descartados; la rama del tubo por donde fue vertido el HAC se indica como entrada, la base horizontal como medio y la rama opuesta como salida, además los cortes se identifican según su altura. Sobre cortes de 0.40 m de longitud se determinaron la variación de la velocidad de pulso ultrasónico (VPU) y el peso unitario (PU). En la Fig. 5 se muestran los resultados obtenidos, las diferencias encontradas fueron menores al 3%, lo que refleja la homogeneidad y buena capacidad de llenado de los hormigones. Conforme el tipo de agregado utilizado los valores promedio de velocidad fueron 4.56, 4.54 y 4.27 km/s para los hormigones H2-Gb, H2-Ra y H2-Q, respectivamente.

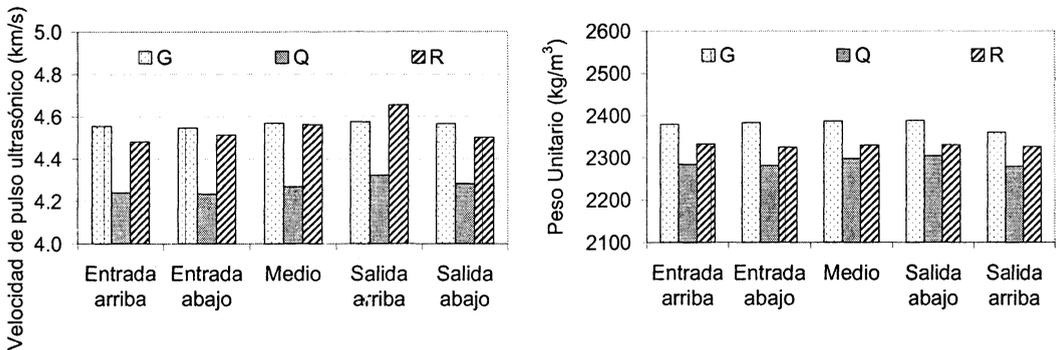


Figura 6. Variación de la velocidad de pulso ultrasónico y peso unitario a lo largo del tubo en U en HAC elaborados con diferentes tipos de agregado grueso.

El método de relevamiento utilizado para evaluar la densidad de agregados se describe someramente a continuación. En primer lugar sobre cada cara de corte se calcó en un papel transparente el perímetro de los agregados; sólo se consideraron aquellas partículas cuya dimensión mínima fuera superior a 5 mm. Luego se escaneó el papel transparente para obtener las imágenes en formato digital; se utilizó un escáner y dos software de procesamientos de imágenes, el primero para acondicionar las imágenes y el segundo para calcular el área, perímetro y tamaño de los agregados relevados.

La Fig. 7 presenta imágenes del relevamiento de agregados para los tres hormigones en diferentes secciones a lo largo del tubo U. Por su parte la Fig. 8 representa la variación de la densidad de agregados.

En la Tabla 6 se presentan los resultados obtenidos. La densidad de agregados se calcula como la relación entre la suma del área de los agregados y el área del corte analizado. También se informan el número y porcentaje de partículas en cada sección para tres rangos de tamaños: mayores a 15 mm, entre 15 y 10 mm y entre 10 y 5 mm. La densidad promedio de agregados para los tubos elaborados con granito, cuarcita y canto rodado es igual a 0.27, 0.31 y 0.32 respectivamente, estas diferencias de densidad son poco significativas. A la vez, al observar las densidades determinadas en las distintas secciones a lo largo del tubo tampoco aparecen variaciones importantes, la desviación estándar en el caso del granito y la cuarcita fue del orden de 0.05 y en el rodado de 0.08.

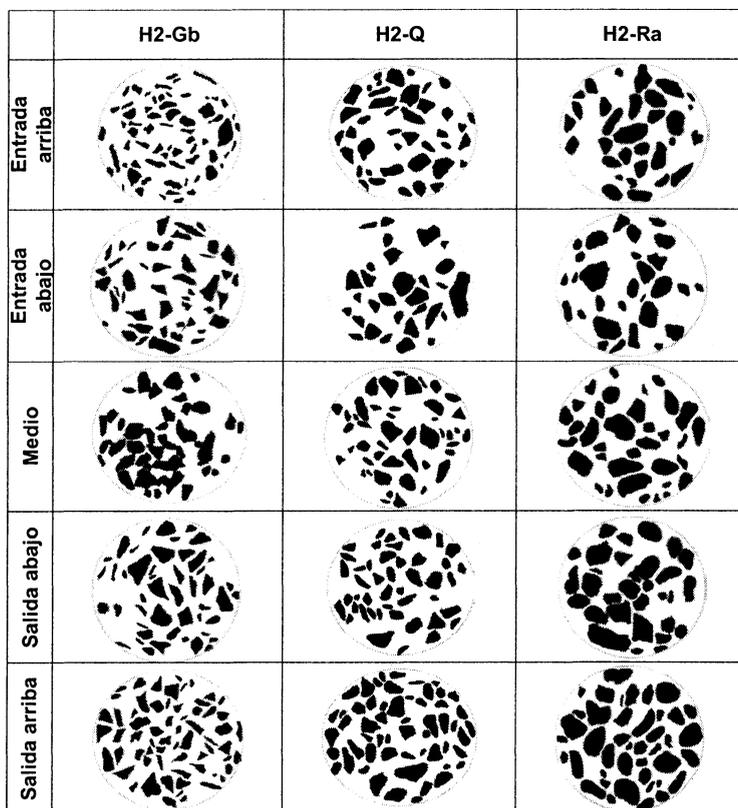


Figura 7. Relevamiento de agregados en secciones de los tubos U.

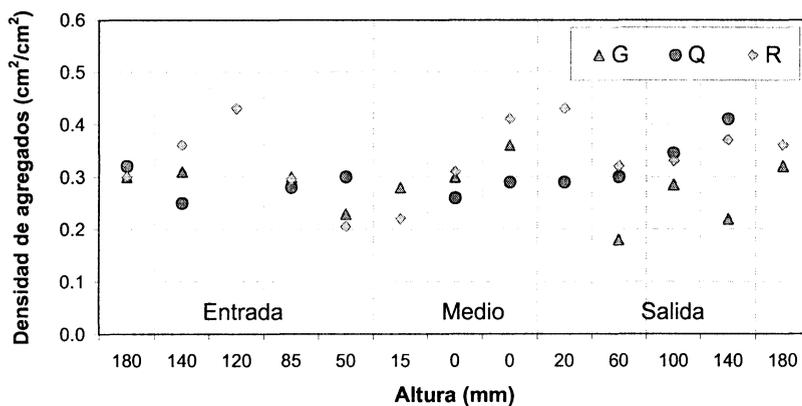


Figura 8. Variación de la densidad de agregados a lo largo del tubo en U.

Tabla 6. Relevamiento de la densidad y número de agregados en los tubos U.

		Altura (cm)	Densidad (cm <sup>3</sup> /cm <sup>3</sup> )	Número de agregados				% número de agregados			
				>15 mm	15 - 10 mm	10 - 5 mm	Total	>15 mm	15 - 10 mm	10 - 5 mm	
<b>H2-Gb</b>	Entrada	180	0.30	19	6	9	34	56	18	26	
		140	0.31	11	12	12	35	31	34	34	
		85	0.30	12	14	18	44	27	32	41	
		50	0.23	10	13	23	46	22	28	50	
		15	0.28	18	16	11	45	40	36	24	
	Medio	0	0.30	11	9	10	30	37	30	33	
		0	0.36	13	9	22	44	30	20	50	
	Salida	60	0.18	6	17	16	39	15	44	41	
		100	0.28	12	13	20	45	27	29	44	
		140	0.22	7	17	22	46	15	37	48	
		180	0.32	15	23	25	63	24	37	40	
	<b>H2-Q</b>	Entrada	180	0.32	14	14	15	43	33	33	35
140			0.25	14	5	18	37	38	14	49	
85			0.28	8	15	7	30	27	50	23	
50			0.30	8	12	25	45	18	27	56	
Medio		0	0.26	13	11	8	32	41	34	25	
		0	0.29	7	14	21	42	17	33	50	
Salida		20	0.29	14	16	19	49	29	33	39	
		60	0.30	10	14	20	44	23	32	45	
		100	0.34	14	15	18	47	30	32	38	
		140	0.41	6	22	27	55	11	40	49	
<b>H2-Ra</b>		Entrada	180	0.30	10	0	10	20	50	0	50
			140	0.36	9	14	7	30	30	47	23
	120		0.43	17	5	5	27	63	19	19	
	85		0.30	8	8	8	24	34	33	33	
	50		0.20	3	8	12	23	13	34	53	
	15		0.22	1	10	13	24	4	42	54	
	Medio	0	0.31	14	5	5	24	58	21	21	
		0	0.41	18	7	1	26	35	35	29	
	Salida	20	0.43	14	10	4	28	39	48	13	
		60	0.32	6	8	10	24	25	33	42	
		140	0.35	6	9	14	29	21	31	48	
		180	0.36	7	11	7	25	28	44	28	

Finalmente, sobre el hormigón H1-Rb elaborado con el fin de considerar las posibilidades de incrementar el volumen de canto rodado, se evaluó la resistencia a la segregación llenando otro tubo en U de menores dimensiones, 1 m de altura y 0.40 m de base. Los resultados obtenidos se presentan en la Fig. 9 incluyendo las variaciones de VPU y PU en diferentes secciones del tubo. A partir de los mismos surge que aún aumentando un 3% el volumen de este agregado grueso no se evidencian signos de segregación, confirmando los resultados del hormigón fresco donde se había observado un comportamiento satisfactorio. Obsérvese que el PU promedio fue igual a  $2385 \text{ kg/m}^3$  y la VPU promedio a  $4.72 \text{ km/s}$ , mayores que los determinados en H1-Ra, lo que es consistente con el mayor contenido de agregado grueso incorporado a este HAC.

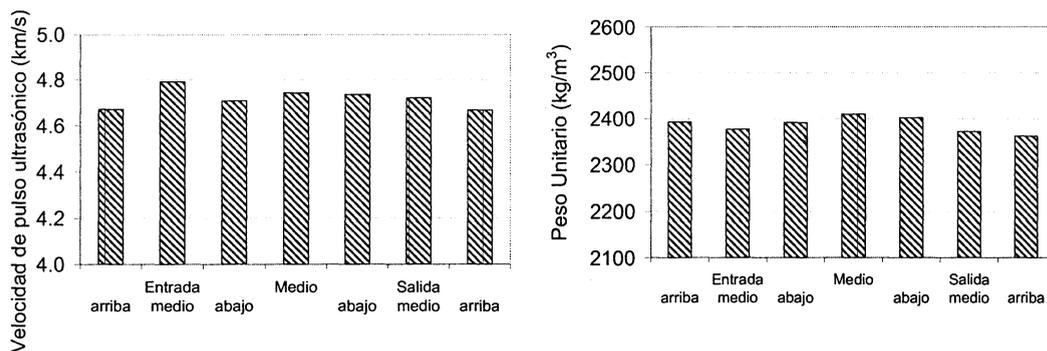


Figura 9. Variación de la velocidad de pulso ultrasónico y peso unitario a lo largo del tubo en U. Hormigón H1-Rb.

## CONCLUSIONES

En este trabajo se estudia el efecto del tipo de agregado en el hormigón autocompactable (HAC). Con este propósito se elaboraron mezclas con diferentes tipos de agregados gruesos de uso frecuente en la Provincia de Buenos. Se seleccionaron agregados de 19 mm de tamaño máximo que difieren significativamente en su forma y textura superficial: piedra partida granítica, piedra partida cuarcítica y canto rodado silíceo. A partir del trabajo experimental surgen las siguientes conclusiones.

Se comprueba que el método de diseño basado en el ajuste previo sobre morteros constituye una herramienta muy recomendable para el diseño de HAC, habiéndose obtenido mezclas con las características de autocompactabilidad deseadas. También existen otros parámetros que brindan información útil para optimizar el proceso de diseño del HAC, como lo son el tamaño medio y el espaciamiento del paquete granular; los mismos se calculan a partir del tamaño de partículas y proporciones de los agregados fino y grueso.

En cuanto al efecto del tipo de agregado sobre el hormigón fresco se observaron modificaciones principalmente en la viscosidad del material, las mismas se manifestaron en diferente grado conforme la energía de mezclado impartida. Todos los hormigones cumplieron con la premisa de estabilidad, lo que merece destacarse considerando que se utilizaron agregados de tamaño máximo 19 mm con marcadas diferencias de densidad. La estabilidad observada sobre el hormigón fresco fue verificada mediante ensayos no destructivos y estudios de la distribución de agregados sobre cortes de hormigón.

Las diferencias observadas en las propiedades mecánicas de los hormigones autocompactables elaborados con diferentes tipos de agregado grueso son consistentes con estudios previos sobre hormigones convencionales y de alta resistencia y se pueden justificar en base a los cambios de adherencia en la zona de transición y las características propias de cada agregado.

## AGRADECIMIENTOS

A Cementos Avellaneda S.A. y a BASF S:A: por su colaboración con el suministro de materiales para el desarrollo del programa experimental.

## REFERENCIAS

- (1) Concrete Society, "Self-Compacting Concrete – A review". Tech Report 62, 2005, 80 p.
- (2) SCCEPG 2005 The European Guidelines for Self-Compacting Concrete Specification, Production and Use, <http://www.efnarc.org/pdf/SCCGuidelinesMay2005.pdf>
- (3) Saak, A.W., Jennings, H.M. and Shah, S.P., "New methodology for designing self-compacting concrete", ACI Materials Journal, November-December 2002, pp. 549-559.
- (4) Gomes, P.C., "Optimization and characterization of high strength self-compacting concrete", Doctoral Thesis, Universidad Politécnica de Catalunya, 2002. 140 p.
- (5) Tobes, J.M., Giaccio, G., Barragán, B. and Zerbino, R. "Mortar-based design for self compacting concrete", fib Symp, Concrete Structures - Stimulators of Development, Dubrovnik, Croatia, 2007, pp. 435-442.
- (6) López, A., Tobes, J.M., Giaccio, G., Positieri, M., Oshiro, A, Zerbino, R. and Barragán, B. "Design and characterization of coloured self-compacting concrete", fib Symp, Concrete Structures - Stimulators of Development, Dubrovnik, Croatia, 2007, pp. 443-450.
- (7) Okamura, H. and Ouchi, M., "Self-compacting concrete", Journal of Advanced Concrete Technology, Vol. 1, N° 1, 2003, pp. 5-15.
- (8) Yahia, A., Tanimura M. and Shimoyama, Y. "Rheological properties of highly flowable mortar containing limestone filler - effect of powder content and W/C ratio", Cement and Concrete Research, Vol. 35, N° 3, 2005, pp. 532-539.
- (9) Brouwers, H.J.H. and Radix, H.J. "Self Compacting Concrete: Theoretical and experimental study" Cement and Concrete Res. Vol. 35, N° 11, 2005, pp. 2116-2136.
- (10) Tobes, J.M., López, A, Giaccio, G, Barragán, B, and Zerbino, R. "Effect of sand particle size distribution on fluidity and passing ability of highly flowable mortars", 5<sup>th</sup> Int. RILEM Symposium on SCC, Ghent, Belgium, 2007, (in press).
- (11) Bui, V., Akkaya, Y. and Shah, P., "Rheological model for self-consolidating concrete", ACI Materials Journal Vol. 99, N° 6 Nov-Dec 2002, pp 549-559.
- (12) ASTM Standards, Test Method for Slump Flow of Self-Consolidating Concrete C 1611/C 1611M – 05, 2005.
- (13) ASTM Standards, Test Method for Passing Ability of Self-Consolidating Concrete by J-Ring Designation: C 1621/C 1621M – 06, 2006.
- (14) Xie, Y., Li, Y. and Long, G., "Influence of aggregate on properties of self-consolidating concrete" in Design, Performance and Use of Self-Consolidating Concrete (SCC'2005-China), 2005, pro 042-016.
- (15) Giaccio, G. and Zerbino, R., "Failure mechanism of concrete: combined effects of coarse aggregates and strength level" Advanced Cement Based Materials, Evanston Illinois, Elsevier Ed. USA, Vol. 7, N° 1, 1998, pp. 41-48.