

## HORMIGONES AUTOCOMPACTANTES (HAC)

### INTRODUCCIÓN

Los hormigones autocompactantes (HAC) presentan como una de sus características principales la capacidad de deformarse por acción de su propio peso sin necesidad de una energía externa, manteniendo la homogeneidad de la mezcla y la cohesión de sus componentes, y sin producir exudación significativa. Estas propiedades le permiten avanzar y completar moldes y encofrados sin necesidad de vibración interna o externa, eludiendo los obstáculos interpuestos en su avance sin segregación.

El desarrollo de los HAC comenzó en la década de 1980 bajo la dirección del profesor Okamura en la Universidad de Tokio (Japón), con el objetivo de aumentar la durabilidad de los hormigones, reducir los defectos de compactación y racionalizar los sistemas constructivos. En el año 1988, el profesor Ozawa logra el primer prototipo de HAC, y pronto la comunidad científica de todo el mundo comienza a emplear este nuevo desarrollo.

### VENTAJAS DE UN HAC

En relación a su uso, los HAC ofrecen diferentes ventajas respecto a un hormigón convencional, entre las cuales cabe destacar:

- Ausencia de necesidad de compactación externa, reduciendo el desgaste de moldes y encofrados, la contaminación sonora durante la construcción, y los defectos en el hormigón por compactación deficiente.
- Acabado arquitectónico uniforme de la superficie, sin macroporos ni oquedades.
- Reducción de los tiempos de hormigonado y los costos integrales de construcción.
- Colocación rápida y sencilla del hormigón, incluso en zonas con elevada congestión de armaduras.
- Mejoramiento de las condiciones de seguridad e

higiene en el trabajo, por ausencia de uso de herramientas eléctricas o neumáticas para la compactación, menor esfuerzo manual de los operadores, y menores emisiones sonoras.

### PARÁMETROS DE DISEÑO DE MEZCLAS DE UN HAC

De acuerdo con la experiencia, existe una amplia gama de parámetros de diseño para los HAC. Sin embargo, habitualmente los HAC son dosificados atendiendo las siguientes consideraciones básicas:

- El agregado grueso ocupa un volumen del 30 al 34% del hormigón.
- La relación agua/material fino pulverulento debe ser entre 0,8 y 1,2. Para mezclas que se elabora con AMV (Aditivos Mejoradores de Viscosidad) se utiliza el rango superior.
- Para mezclas sin AMV se utiliza un contenido de agua entre 160-180 kg/m<sup>3</sup>, mientras las mezclas con AMV, tal contenido se eleva hasta 200 kg/m<sup>3</sup>.
- El volumen de pasta (agua + cemento + adiciones minerales), sin incluir aire, es del orden de 340 a 390 dm<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>.

### EL HAC EN ESTADO FRESCO

El comportamiento en estado fresco es la característica de los HAC que los diferencia mayormente de los hormigones convencionales (HC), en particular en cuanto a su comportamiento reológico o respuesta a un esfuerzo.

Los HAC poseen un comportamiento similar a un fluido Newtoniano, para los que se puede considerar que la relación entre el esfuerzo o cizalla y velocidad de deformación es constante en el tiempo y lineal. De acuerdo con esto, la fuerza sobre el HAC queda definida por:

$$\frac{F}{A} = \eta \frac{v}{y}$$

Luego, expresada en términos de tensión tangencial ( $\tau$ ) y gradiente de velocidad ( $\dot{\gamma}$ ), se puede simplificar como:

$$\tau = \eta \dot{\gamma}$$

Donde,  $\eta$  es la constante de proporcionalidad, conocida como viscosidad.

En cambio, el comportamiento de un HC se asemeja a un fluido de Bingham, y se caracteriza por no fluir hasta que la tensión tangencial aplicada supera un umbral de tensión crítica ( $\tau_0$ ) mínimo. Sólo en ese momento la mezcla se comporta como un fluido que presenta una relación lineal entre la tensión aplicada ( $\tau$ ) y la velocidad de deformación ( $\dot{\gamma}$ ), quedando definida en consecuencia de la siguiente manera:

$$\tau = \tau_0 + \mu \dot{\gamma}$$

Donde  $\tau_0$  es la tensión crítica (Pa) y  $\mu$  es el coeficiente de viscosidad y se le denomina viscosidad plástica (Pa.s)

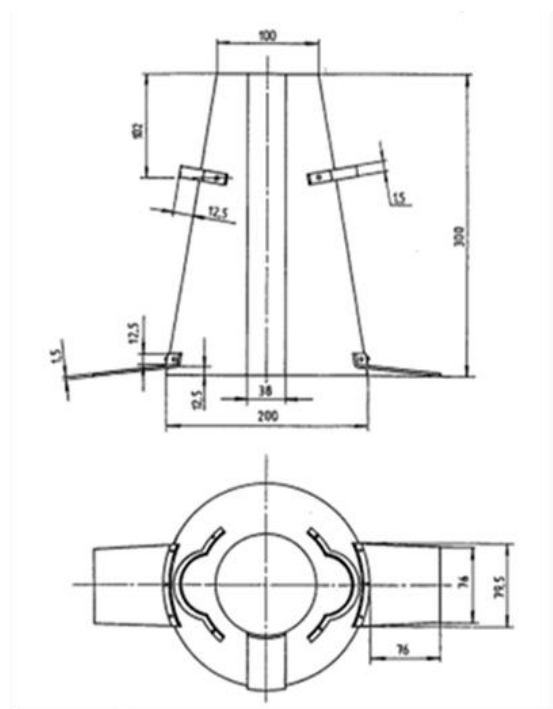
Esta diferencia en comportamiento reológico de los HAC respecto a los HC evidencia la necesidad de emplear para su caracterización en estado fresco y evaluación de aptitud de métodos de ensayo diferentes a los tradicionalmente utilizados.

Actualmente, en Argentina, se encuentran en redacción 2 normas relativas a establecer los métodos de ensayo aplicables a la determinación de la capacidad de llenado, la tendencia a la segregación y al bloqueo de un HAC. Los proyectos de normas en discusión han sido desarrollados en base a antecedentes de normas internacionales, y permiten valorar aspectos relativos al comportamiento reológico de los HAC.

A continuación se presentan los procedimientos o métodos sugeridos para evaluar estas propiedades, para su aplicación tanto en laboratorio como en obra, ya sea en operaciones de caracterización, clasificación y aceptación o rechazo.

## MÉTODO DE ENSAYO DE EXTENDIDO Y EL TIEMPO T50

Este método permite evaluar el comportamiento de la mezcla en lo relativo a la tensión crítica y la viscosidad plástica. Consiste en el llenado en una capa de un molde troncocónico y su levantamiento, para tomar luego el tiempo en el que la masa de hormigón se extiende hasta alcanzar un diámetro de 50 cm (Tiempo T50), así como medir posteriormente el diámetro final que alcanza la masa de HAC una vez detenido su avance (Extendido), determinado como el promedio de 2 medidas del diámetro en direcciones ortogonales.



**Figura 1.** Esquema del molde troncocónico, de idénticas medidas al empleado en el ensayo de asentamiento para hormigones convencionales (IRAM 1536).

El llenado del molde (Figura 1) se realiza sobre una superficie firme, no absorbente, plana, nivelada y pre-humedecida, colocando el molde en posición normal (el molde situado con su base de mayor diámetro en contacto con superficie de apoyo), o en posición invertida, siendo ésta última la más habitual y preferida. Si bien los resultados de ensayo para la determinación del extendido

no varían entre ambas opciones, la medición del tiempo T50 sí puede hacerlo, por lo que es necesario predefinir e informar la modalidad adoptada junto con los resultados.

El procedimiento de ensayo se debe concluir antes de alcanzar los primeros 150 s medidos desde el comienzo del llenado del molde troncocónico. Asimismo, para considerarse válido el valor del extendido informado, los valores individuales de la medición del diámetro final de la masa de hormigón deben diferir entre sí más de 5 cm. En la **Figura 2** se ilustra el procedimiento de medición del extendido.

De acuerdo con el resultado obtenido de diámetro final del extendido, y el tiempo de escurrimiento T50, la norma UNE establece como referencia una clasificación según se informa en las **Tablas 1 y 2**.

**Tabla 1.** Tipo de estructuras para uso de HAC según la clasificación UNE 83.361.

Clase	Clasificación según UNE 83.361, en base al extendido final	Tipo de estructuras
AC-E1	$55\text{ cm} \leq df \leq 65\text{ cm}$	Adecuada para la mayor parte de los elementos.
AC-E2	$65\text{ cm} \leq df \leq 75\text{ cm}$	
AC-E3	$75\text{ cm} \leq df \leq 85\text{ cm}$	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Fuertemente armadas</li> <li>• Difícil llenado de encofrados</li> <li>• Importante la nivelación</li> </ul>

**Tabla 2.** Viscosidad de HAC según la clasificación UNE 83.361.

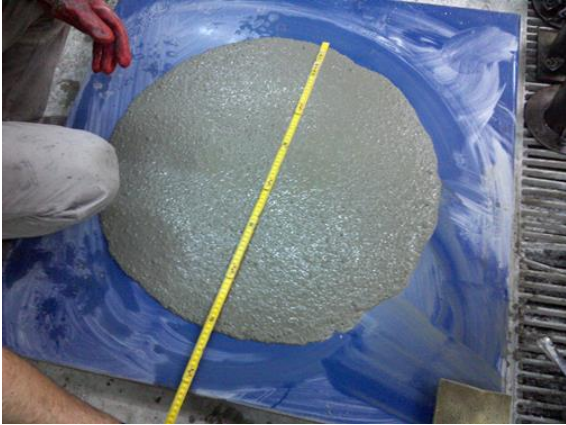
Clase	Clasificación según UNE 83.361, en base a tiempo T50
AC-V1	$2,5\text{ seg} < T_{50} \leq 8\text{ seg}$
AC-V2	$2\text{ seg} < T_{50} \leq 8\text{ seg}$
AC-V3	$T_{50} \leq 2\text{ seg}$

En forma complementaria a lo anterior, a los efectos de evaluar la estabilidad de la mezcla frente a posibles efectos de segregación, es posible también evaluar el **Índice de Estabilidad Visual (IEV)**, sobre la misma porción de hormigón y una vez efectuado el ensayo de extendido. Para ello, el operador debe inspeccionar visualmente la masa de hormigón, observando la distribución del agregado grueso y la fracción de mortero en la masa de hormigón.

En la **Tabla 3** se describen las características de los 4 niveles de IEV preestablecidos para la clasificación, y en las Figuras 3a/b/c/d se ilustra cada uno de los casos.

**Tabla 3.** Valores del Índice de Estabilidad Visual (IEV).

Valor IEV		Criterios
0	Muy estable	Sin evidencia de segregación o exudación.
1	Estable	Sin evidencia de segregación, leve exudación observada como un brillo en la superficie y el borde de la masa del hormigón.
2	Inestable	Leve aureola de mortero de ancho < 10 mm en el borde de la masa de hormigón, y/o acumulación de agregados en el centro de la masa de hormigón.
3	Muy inestable	Signos e segregación significativa por presencia de una aureola de mortero de ancho > 10 mm en el borde de la masa de hormigón, brillo en superficie y/o acumulación de agregados en el centro de la masa de hormigón.



**Figura 3.** Ilustración del procedimiento de medición del extendido.



**Figura 3b.** IEV=1 El hormigón muestra una leve exudación, observada como un brillo en la superficie.



**Figura 3a.** IEV=0 La masa de hormigón es homogénea y no evidencia exudación.



**Figura 3c.** IEV=2 Evidencia de aureola de mortero y brillo en la superficie.



Figura 3d. IEV=3 Concentración de agregado grueso en el centro de la masa de hormigón y presencia de aureola de mortero.

Imágenes ilustrativas extractadas de: “RMCAO. Ready Mixed Concrete Association of Ontario. Best Practices Guidelines for Self-Consolidating Concrete. January 2009.”

### MÉTODO DE ENSAYO PARA DETERMINAR LA CAPACIDAD DE PASAJE POR ANILLO J

La capacidad de pasaje se refiere al atributo que le permite al HAC fluir entre barras de refuerzo u otros objetos interpuestos en su avance, sin bloqueos o segregación de sus componentes. Para su evaluación, se compara el resultado del extendido obtenido de acuerdo con el procedimiento descrito en el punto anterior, y el extendido que se obtiene replicando el procedimiento de ensayo con un anillo J interpuesto en forma concéntrica con el cono.

Para este ensayo se utiliza el mismo molde troncocónico empleado en el ensayo de extendido (Figura 1), y un anillo metálico conformado por barras cilíndricas, cuyo diámetro y separación pueden variar a lo largo del anillo en función a la norma de ensayo que se especifique, o las condiciones especiales que se especifiquen. En la Figura 4 se presentan las dimensiones correspondientes al anillo J que especifica la norma ASTM C1621, ante la ausencia de una norma IRAM. En las Figuras 5a y b se ilustra el procedimiento de ensayo.

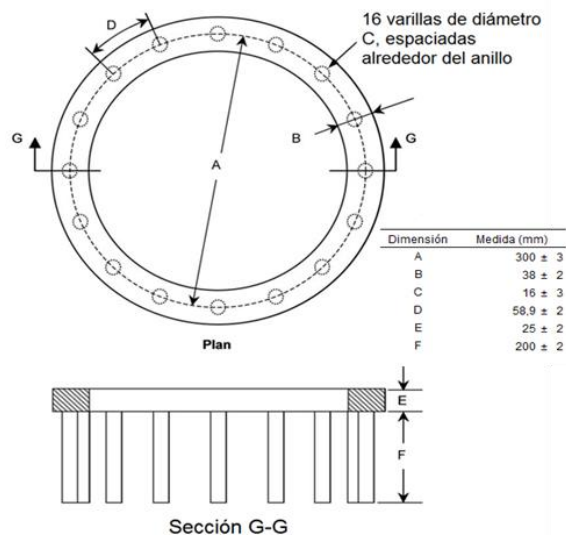


Figura 4. Anillo J de acuerdo con la norma ASTM C 1621, para evaluación de la capacidad de pasaje del HAC.



Figura 5a y b. Ilustración del procedimiento de medición del extendido con el Anillo J.

## EL HAC EN ESTADO ENDURECIDO

Cabe destacar que estas particularidades en el comportamiento reológico del HAC conllevan también algunas diferencias sobre otras propiedades particulares de desempeño importantes, tales como:

- Zona de interfase más densa debido a un mayor grado de empaquetamiento de partículas y a una menor cantidad de agua disponible para exudación, lo que infiere una mayor adherencia al refuerzo.
- Ventajas microestructurales del HAC que le aportan beneficios en cuanto a deformabilidad y durabilidad.
- Resistencia a la compresión y a la tracción similares o mayores que en un hormigón convencional de igual relación a/c (agua/material cementante).
- Módulo de elasticidad estático en compresión similar o inferior a hormigón convencional.

Las propiedades en estado endurecido que se evalúan para los HAC son las mismas que para los HC. Los ensayos de evaluación se realizan de igual manera, con la salvedad que la preparación de las probetas de ensayo se realiza sin requerir ningún tipo de compactación manual ni mecánica.

Con relación a la durabilidad de estos hormigones, debido a la amplia posibilidad de diseños de mezclas para un HAC, no se han encontrado resultados concluyentes respecto a si los HAC ofrecen, genéricamente, mejores características durables respecto a los HC. Sin embargo, en el caso de los mecanismos de ataque asociados al ingreso externo de agresivos, es esperable que en el caso de los HAC la porosidad y la capacidad de transporte de fluidos resulte equivalente o menor en comparación a los HC, bajo condiciones de evaluación comparables, en virtud a un mayor uso de material fino en las mezcla de HAC (incluyendo, en muchos casos, un mayor contenido de cemento y/o de adiciones minerales activas), a una zona de

interfase más densa, y a condiciones de llenado y compactación sin defectos. Para casos específicos, es necesario realizar evaluaciones de ensayo particulares.