

# HORMIGONES AUTOCOMPACTANTES: ALTERNATIVA DE UTILIZACION EN ELEMENTOS ESTRUCTURALES VIALES

Ing. Leonardo Bergol, Ing. Gastón Fornasier e Ing. Carlos Fava.  
Centro Técnico Loma Negra SA

## RESUMEN

Los hormigones autocompactantes, desarrollados en la década del '90 en Japón, comenzaron a estudiarse hace más de un año y medio en el Centro Técnico de Loma Negra.

Dentro de las posibles aplicaciones que pueden tener este tipo de hormigones en la industria de la construcción y orientándolos especialmente a estructuras viales, se puede destacar su utilización en estructuras densamente armadas (Ej. Anclajes), de difícil acceso (ej. Túneles) y en elementos premoldeados pretensados y postesados (ej. Vigas premoldeadas para puentes). Al tratarse de un material que se coloca en la pieza sin necesidad de compactación mecánica interna ni externa presenta, sin lugar a dudas, enormes ventajas comparativas tales como: gran velocidad de ejecución, habilidad de la mezcla para fluir en zonas densamente armadas, excelente terminación superficial, durabilidad superior respecto de hormigones convencionales de similares niveles de resistencia y eliminación del ruido de los equipos de compactación en las plantas de prefabricación.

En la primera parte del trabajo se explican las características principales del diseño de este tipo de hormigones y la evaluación de sus propiedades en estado fresco. En la segunda parte, se muestra la utilización de estos hormigones con ejemplos de aplicación tanto en estructuras viales como en industrias de elementos premoldeados. Finalmente, se presentan los resultados obtenidos en laboratorio, donde estos hormigones fueron sometidos a diferentes ciclos de curado a vapor usualmente aplicados en la industria. También fueron correlacionados ensayos no destructivos (esclerometría, madurez) con la resistencia a compresión con el fin de permitir la obtención de estimadores de validez general.

Los resultados obtenidos permiten asegurar que, tal como sucede en países como Francia, Suecia, Japón o Italia, los hormigones autocompactantes se presentan como una opción a tener muy en cuenta para su utilización en elementos estructurales viales.

## 1.- GENERALIDADES

### 1.1.- Materiales

Para el estudio fueron utilizados materiales de uso común en el mercado del hormigón. Como agregado grueso se utilizó una piedra partida granítica de la zona de Olavarría de tamaño máximo 12.5 mm. El agregado fino utilizado se obtuvo por la mezcla de una arena fina del Río Paraná y una arena gruesa del Río Uruguay. Se emplearon tres tipos de cementos, un Cemento Portland Compuesto (CPC40), un Cemento Portland Normal (CPN40) y un Cemento de Alto Horno (CAH40), de acuerdo a la norma IRAM 50000. Además, como adición fue utilizado Filler Calcáreo. Las características de los materiales se muestran en la Tabla 1.

Ensayo	Unidades	CPC	CPN	CAH	FILLER
Blaine	[m <sup>2</sup> /kg]	420	303	484	590
2 días	[MPa]	15.0	19.7	15.6	-
28 días	[MPa]	47.8	42.6	50.7	-

Los aditivos empleados fueron superfluidificantes de cuarta generación (base policarboxilato) y un aditivo modificador de la viscosidad (polímero celulósico).

### 1.2.- Equipos y metodología de ensayo

El equipamiento utilizado y la metodología de ensayos adoptadas fueron las siguientes:

- Curado a vapor

Cámara para la simulación de ciclos de curado a vapor, con una capacidad útil de 0,5 m<sup>3</sup>. En la foto 1 se puede observar el equipo utilizado, que permite modelar cualquier ciclo de curado a presión normal.



- Esclerometría

Para la determinación del índice esclerométrico se utilizó un esclerómetro digital. Se tomó el promedio de 10 determinaciones realizadas en cada probeta como se observa en la Foto 2. El ensayo se efectuó con el esclerómetro en posición horizontal y aplicando sobre la probeta una carga del 15 al 20 % de la carga estimada de rotura. Como la edad de las probetas no superó los 56 días, se despreció el efecto de la carbonatación superficial.



- Madurez

Es sabido que para un hormigón que ha sido colocado, compactado y curado, su resistencia será función de la edad y de la temperatura a la que ha sido expuesto. Y que a tempranas edades, la temperatura tiene gran influencia en el desarrollo de la resistencia.

En el trabajo se adoptan las dos formulaciones más conocidas para predecir el nivel de resistencia, en función de la historia térmica a la que ha sido expuesto el hormigón:

#### a) Método de Madurez (Fórmula de Nurse - Saul) [1]

Este método intenta predecir el nivel de resistencia que alcanza el hormigón en función de la madurez, sobre la base del siguiente principio:

"Hormigones de igual composición y que posean igual valor de madurez, tendrán aproximadamente igual resistencia; cualquiera haya sido la combinación de edad y temperatura que hayan experimentado".

La expresión propuesta para el cálculo de la madurez es:

$$M = \sum (T - T_0) \Delta t$$

(Ec. 1)

Siendo:

M: Madurez. (°C hs.)

T: Temperatura promedio del hormigón en el lapso de tiempo Dt.

$T_0$ : Temperatura de referencia, adoptada en - 10°C.

$\Delta t$ : Intervalo de tiempo considerado.

#### b) Método de Edad Equivalente (Fórmula de Arrhenius) [1]

La edad equivalente de un hormigón, representa el tiempo de curado equivalente necesario (a una temperatura de referencia  $T_s$ , generalmente adoptada en 20°C), para obtener un valor de resistencia igual al que resulta de haber curado al hormigón con la historia térmica que en la realidad experimentó. Este método se encuentra basado en la ley de Arrhenius, la cual establece la influencia que posee la temperatura sobre la velocidad de una reacción química. Para su aplicación, en el caso de la hidratación del cemento, presenta la siguiente ecuación:

$$T_e = \sum e^{-Q(1/T_a - 1/T_s)} \Delta t$$

(Ec. 2)

Siendo:

$T_e$ : Edad equivalente referida a la temperatura de referencia  $T_s$ , en días u horas.

Q: Energía de Activación dividido por R la constante universal de los gases (8,314 J/°K mol), en grados °K.

$T_a$ : Promedio de temperaturas del hormigón durante el intervalo de tiempo Dt, en grados °K.

$T_s$ : Temperatura de referencia, en °K.

$\Delta t$ : Intervalo de tiempo adoptado, en días u horas.

La ecuación anterior presenta la dificultad de la determinación de la Energía de Activación. Esta energía representa la sensibilidad del hormigón al aumento de temperatura. Es una constante que depende del tipo de cemento, finura, relación a/c, grado de hidratación y temperatura. En laboratorio se procedió a la determinación de dicha constante bajo los procedimientos descritos por la norma NT BUILD 476. [1] [2] [18]

#### • Calorímetro semiadiabático

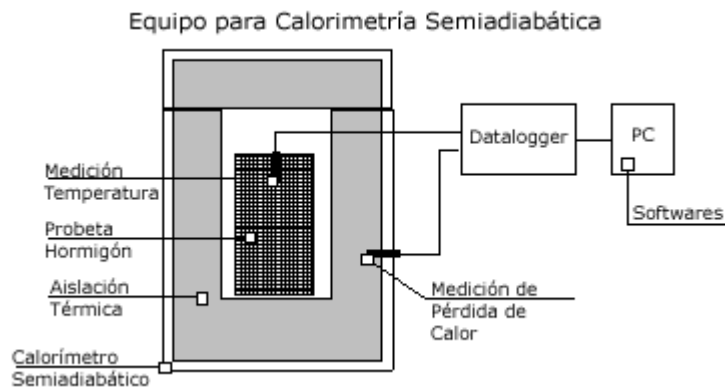
El equipo con el que se realizó la determinación de la energía de activación [3] se observa en el Esquema 1 y en la Foto 3, y está integrado por:

**Calorímetro:** recipiente en el cual se generan las condiciones semiadiabáticas de la probeta, por medio de una aislación de heno. Además, posee un dispositivo

para evaluar la temperatura del hormigón (termocupla) y otro para medir la pérdida de calor a través de sus paredes.

**Datalogger:** dispositivo electrónico cuya función es almacenar automática y ordenadamente los datos medidos en el calorímetro.

**Software:** programas para registrar, monitorear y controlar procesos de medición.



Esquema 1



Foto 3

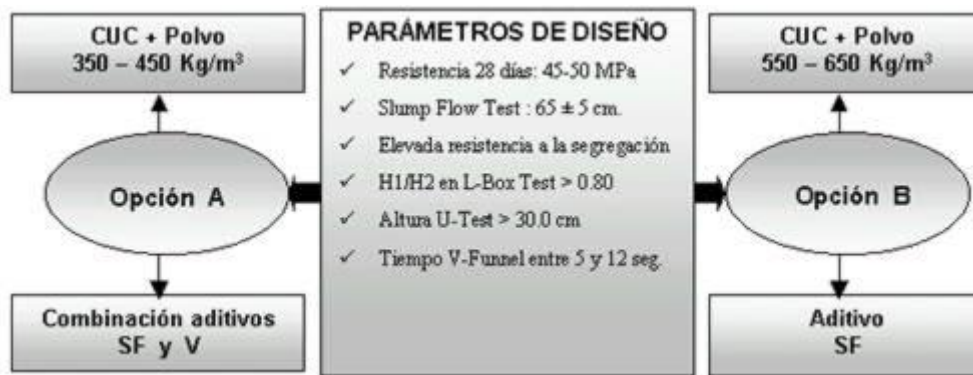
## 2.- DISEÑO DE LA MEZCLA Y COMPORTAMIENTO EN ESTADO FRESCO

### 2.1.-Introducción

Partiendo de los estudios previos en pasta y mortero se obtuvieron hormigones autocompactantes que finalmente fueron probados a escala industrial. En estos hormigones de alto desempeño la condición en estado fresco es el parámetro más importante para el diseño de las mezclas. Considerando al hormigón como un fluido tipo Bingham [13] [15], en el estado fresco es necesario combinar una elevada fluidez (asegurando una excelente deformabilidad) con una moderada viscosidad plástica (evitando la segregación y el riesgo de bloqueo). Para ello se utilizan contenidos de agregados grueso algo inferiores [9] en comparación con los hormigones convencionales, existiendo básicamente dos caminos para obtener este tipo de comportamiento en estado fresco, tal como se muestra en el Esquema 2 [11] [13] [14] [16]. Una primera opción (Opción A) es utilizar contenidos unitarios de cemento + polvo (finos que pasan los 90 micrones) del orden de los 350 a 450 Kg/m<sup>3</sup> combinando un aditivo superfluidificante [SF] con un aditivo modificador de la viscosidad [V].

La otra variante (Opción B) es utilizar elevados contenidos unitarios de cemento + polvo (550 a 650 Kg/m<sup>3</sup>) con la incorporación de un aditivo superfluidificante [SF] solamente. Esta alternativa es la adoptada en este trabajo donde se empleó cemento portland compuesto (CPC40) y la adición de filler calcáreo como material pulverulento.

Luego, para evaluar la influencia del tipo de cemento en el comportamiento del hormigón en estado endurecido, se tomó como base la dosificación mencionada, realizándose hormigones autocompactantes con cemento portland normal (CPN40) y cemento de alto horno (CAH40). Las tres mezclas estudiadas corresponden a hormigones de características resistentes comparables.



Esquema 2. Tipos de mezclas diseñadas

## 2.2.- Comportamiento de las mezclas en estado fresco

Para poder considerar que un hormigón es autocompactante, las características en estado fresco son fundamentales y las exigencias de los ensayos planteados por diferentes autores así lo justifican. El simple cono de Abrams como única medida de la trabajabilidad de una mezcla queda relegado para este tipo de hormigones. Para ello fue necesario construir una serie de equipos especiales que comentaremos a continuación explicando en detalle que se intenta medir con cada uno de ellos y cuáles son los valores óptimos que se buscan para el diseño de la mezcla.

### Extendido (Slump Flow Test) y Tiempo T50

Son dos ensayos casi simultáneos que intentan medir indirectamente dos parámetros: la fluidez y la viscosidad plástica del hormigón. El extendido se realiza con el cono de Abrams, que se llena sin compactación. Al levantar el cono, se mide el diámetro alcanzado por la mezcla. Se recomiendan valores de 65+/- 5 cm. (Foto 4) [10] [17].

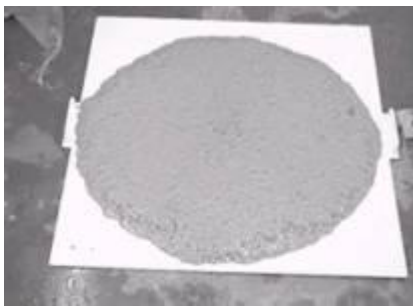


Foto 4

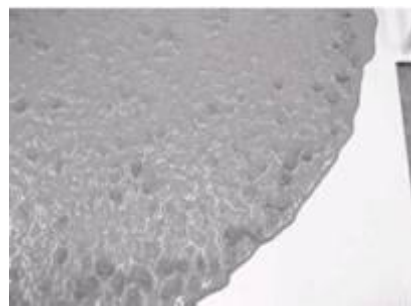


Foto 5

Como parte del mismo ensayo se mide el tiempo que tarda el hormigón, una vez que se levanta el cono, en alcanzar los 50 cm de extendido. Esto nos permite estimar la viscosidad de la mezcla y son recomendables valores entre los 2 y 5 segundos. Es importante la inspección visual de la mezcla extendida ya que permite observar la correcta distribución del agregado grueso y la tendencia a la segregación de los materiales en el borde de ataque. (Foto 5).

### Ensayo U (U-Test)

Este exigente ensayo permite evaluar la fluidez y el riesgo de bloqueo con las armaduras. El equipo tiene forma de letra U con una compuerta central con

barras de armaduras (Foto 6) [9] [10] [17].

El ensayo consiste en llenar con hormigón uno de los lados manteniendo cerrada la compuerta central. Una vez lleno de hormigón, se abre dicha compuerta y la mezcla debe ascender entre las armaduras por la otra mitad una altura tal que supere los 30 cm para que el ensayo se considere correcto. La máxima altura que se puede alcanzar es de 35 cm. (Foto 7).



Foto 6



Foto 7

### Ensayo L (L-Box)

Es un ensayo que nos ayuda a observar la capacidad del hormigón de sortear un obstáculo permitiendo apreciar también la autonivelación de la mezcla. Este ensayo nos proporciona varios datos de interés. En primer lugar se mide la diferencia de alturas que existe en los extremos del equipo: la relación  $H2/H1$  debe ser superior a 0,80 (Foto 8). Como dato adicional se mide el tiempo que tarda la mezcla en alcanzar 20 y 40 cm desde la compuerta de entrada (Foto 9). Ambos tiempos nos dan una idea de la viscosidad como en el caso del T50. [13] [14] [16] [17].

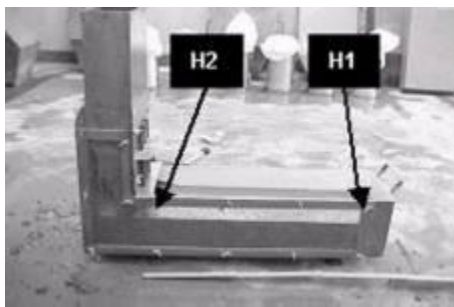


Foto 8

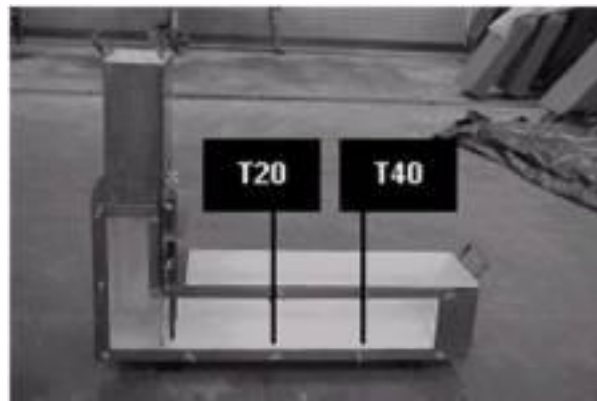


Foto 9

### Ensayo V-Funnel

El ensayo consiste en llenar con hormigón el equipo que se muestra en las Fotos 10 -11 y medir el tiempo que tarda en pasar la totalidad de la mezcla desde la apertura de la compuerta inferior. El tiempo de pasaje está muy bien correlacionado con la viscosidad plástica de la mezcla. Los tiempos obtenidos oscilan entre los 4 y 10 segundos. [10]



Foto 10



Foto 11

### **2.3.- Características de la mezcla**

En la Tabla 2 se muestran las características principales del hormigón estudiado y los resultados obtenidos de los ensayos en estado fresco con los equipos especiales descritos anteriormente.

### **2.4.-Preparación de probetas**

El llenado de los moldes se realizó vertiendo el hormigón desde la mezcladora de volteo hacia los mismos. Es importante aclarar que se utilizaron moldes metálicos y que el llenado se realizó sin compactación. Finalmente, las superficies de las probetas fueron enrasadas cuidadosamente y cubiertas con una bolsa plástica para evitar la pérdida de humedad.