

**AÑO DE APROBACIÓN:**

**TESIS DE MAGÍSTER**  
**TECNOLOGÍA Y CONSTRUCCIONES DE**  
**HORMIGON**

**FACULTAD DE INGENIERIA, U.N.C.P.B.A.**

**C. A. P. FAVA**

**Tema: HORMIGÓN AUTOCOMPACTANTE**

***DESARROLLO Y CARACTERIZACION***

***Ing. Carlos A. P. Fava***

**Tesis presentada para el grado de Magíster**

**Facultad de Ingeniería, U.N.C.P.B.A.**

**Agosto de 2003**

***Director: Dr. Ing. Claudio Rocco***

# INDICE

<b>INTRODUCCION</b>	1
1. Alcance y justificación del tema	1
2. Objetivos	2
3. Metodología	2
4. Agradecimientos	3
<b>PARTE I</b>	4
<b>ANTECEDENTES</b>	
<b>1 PROPIEDADES EN ESTADO FRESCO</b>	5
1.1 Reología	5
1.2 Trabajabilidad	8
1.2.1 Capacidad de llenado	9
1.2.2 Resistencia a la segregación (estabilidad)	10
1.2.3 Capacidad de pasaje entre pequeñas aberturas	12
1.2.4 Resumen	12
1.3 Exudación y contracción plástica	13
<b>2 ENSAYOS SOBRE EL HORMIGON EN ESTADO FRESCO</b>	14
2.1 Introducción	14
2.2 Extendido y T50	14
2.3 Ensayo U-Test	16
2.4 Ensayo L-Box	17
2.5 Ensayo V-Funnel	18
2.6 Ensayos para evaluar la estabilidad estática	19
2.6.1 Ensayo de estabilidad GTM	19
2.6.2 Ensayo de sedimentación	19
<b>3 ANTECEDENTES SOBRE EL DISEÑO DE MEZCLAS</b>	21
3.1 Introducción	21
3.2 Método de Okamura et. al.	22
3.3 Método de Edmatsu et. al.	23
3.4 Método de Ouchi et. al.	23
3.5 Método de Petersson et. al.	24
3.6 Método de Bui et. al.	25
3.7 Método de Gomes et. al.	25
3.8 Método de Sendra y Larrard	26
3.9 Método de Saak et. al.	26
3.10 Parámetros de diseño basados en antecedentes internacionales	27
<b>4 PROPIEDADES EN ESTADO ENDURECIDO</b>	28
4.1 Microestructura	28
4.2 Resistencia y rigidez	28
4.3 Propiedades “in situ” – Uniformidad y resistencia	29
4.4 Adherencia con las armaduras	29
4.5 Contracción y fluencia lenta (creep)	29
4.6 Durabilidad y propiedades de transporte	30
4.7 Terminación superficial	31
4.8 Presión sobre los encofrados – Tixotropía	31

<b>5</b>	<b>APLICACIONES</b>	34
5.1	Generalidades	34
5.2	Experiencia Internacional	34
5.2.1	Túneles	34
5.2.2	Puentes y otras estructuras civiles	35
5.3	Elementos premoldeados	36
<b>PARTE II</b>		37
<b>PROGRAMA EXPERIMENTAL</b>		
<b>6</b>	<b>MATERIALES UTILIZADOS Y CONSTRUCCION DE EQUIPOS ESPECIALES</b>	38
6.1	Materiales.	38
6.2	Construcción de equipos.	41
<b>7</b>	<b>ETAPAS DEL DISEÑO DE MEZCLAS</b>	42
7.1	Introducción	42
7.2	Compatibilidad cemento – aditivo superfluidificante	42
7.3	Estudios sobre morteros	45
7.3.1	Resultados de los morteros estudiados	47
7.4	Estudio sobre hormigones	49
7.4.1	Contenido de agregado grueso y relación Ag. Fino / Ag. Total	49
7.4.2	Mezclas estudiadas	49
7.5	Resumen	51
<b>8</b>	<b>RESULTADOS EN ESTADO FRESCO</b>	51
<b>9</b>	<b>RESULTADOS EN ESTADO ENDURECIDO</b>	56
9.1	Parámetros resistentes y de deformación	56
9.2	Parámetros relativos a la durabilidad	60
9.2.1	Resultados - Serie A	63
9.2.2	Resultados - Serie B	66
<b>10</b>	<b>ESTUDIO DE SOLICITACIONES A TRACCION, DEFORMACIONES VOLUMETRICAS Y ENERGIA DE FRACTURA</b>	68
10.1	Introducción	68
10.2	Metodología de ensayo	69
10.2.1	Solicitaciones de compresión	69
10.2.2	Solicitaciones de tracción	70
10.3	Análisis de los resultados	70
10.3.1	Solicitaciones de compresión y tracción	71
10.3.2	Curvas tensión – deformación	72
10.3.3	Energía de fractura	74

<b>11 ENSAYOS A ESCALA INDUSTRIAL</b>	76
11.1 Introducción	76
11.2 Estado fresco	77
11.3 Estado endurecido	79
11.3.1 Resistencia – Rigidez	79
11.3.2 Aspectos relacionados a la durabilidad	80
11.3.3 Determinaciones realizadas “in situ”	81
<b>12 OBRAS</b>	87
12.1 Introducción	87
12.2 Obra 1 - Parque Industrial Pilar	88
12.3 Obra 2 – Bóveda de seguridad de un Banco	88
<b>13 HAC CURADO A VAPOR</b>	90
13.1 Estudios de laboratorio	90
13.2 Materiales y mezclas estudiadas	92
13.3 Equipos y metodología de ensayo	92
13.4 Análisis de resultados	94
13.4.1 HAC sometido a distintas condiciones de curado	94
13.4.2 Influencia de los distintos tipos de cemento	99
13.5 Consideraciones finales	100
<b>14 LOS HAC Y SU RELACION CON LAS REGLAMENTACIONES VIGENTES</b>	101
14.1 Discusión	101
<b>15 CONCLUSIONES</b>	103
15.1 Introducción	103
15.2 Diseño y estado fresco	103
15.3 Estado endurecido	105
15.4 HAC curado a vapor	107
15.5 Aplicación de Normas y Reglamentos vigentes	108
15.6 Consideraciones finales y necesidades futuras.	108
<b>16 REFERENCIAS Y ANTECEDENTES</b>	110
16.1 Referencias	110
16.2 Experiencias previas que se consideraron para el trabajo	114

## SIMBOLOGIA

HC	Hormigón convencional
HAC	Hormigón autocompactante o autocompactable.
HACF	Hormigón autocompactante con filler calcáreo
MACF	Mortero producto del tamizado del HACF
HACE	Hormigón autocompactante con escoria de alto horno
MACE	Mortero producto del tamizado del HACE
HACV	Hormigón autocompactante con AMV
HACSF	Hormigón autocompactante con humo de sílice
REF	Hormigón convencional de referencia
MREF	Mortero producto del tamizado del REF
SP	Aditivo superfluidificante
SP/P	Relación aditivo superfluidificante - polvo
AMV	Aditivo modificador de la viscosidad
W/MC	Relación agua – material cementicio.
W/P	Relación agua – polvo.
TMA	Tamaño máximo del agregado.
CPN	Cemento Portland Normal
CPC	Cemento Portland Compuesto
CAH	Cemento de Alto Horno
CUC	Contenido Unitario de Cemento
SC <sub>2</sub>	Silicato bicálcico
SC <sub>3</sub>	Silicato tricálcico
FAC <sub>4</sub>	Ferroaluminato tetracálcico
PUV	Peso en la Unidad de Volumen del Hormigón
As	Asentamiento con el cono de Abrams
$\Gamma_m$	Area de extendido relativa, en mortero.
$R_m$	Tiempo de escurrimiento relativo, en mortero.
ZIF	Zona interfacial.
$\tau$	Tensión tangencial
$\tau_0$	Umbral de cillazamiento o “Yield Stress”
$\mu'$	Viscosidad plástica para el cuerpo de Bingham
$\gamma$	Velocidad de deformación (o gradiente de velocidades)
$\eta$	Coefficiente de viscosidad para un Fluido Newtoniano.
E	Módulo de elasticidad estático
$E_d$	Módulo de elasticidad dinámico
$f'c$	Resistencia a compresión
$f'ch$	Resistencia a compresión del hormigón
$f'cm$	Resistencia a compresión del mortero.
$f_t$	Resistencia a tracción por compresión diametral
MR	Módulo de rotura con carga centrada
MRh	Módulo de rotura del hormigón.
MRm	Módulo de rotura del mortero.
$G_F$	Energía de fractura.
$l_{ch}$	Longitud característica.
$\sigma_{cr}$	Tensión crítica.
M	Función Madurez
$T_e$	Edad Equivalente
$a_3$	Coefficiente de succión capilar a las 3 horas
$a_{24}$	Coefficiente de succión capilar a las 24 horas
KT	Permeabilidad al aire del hormigón
KO	Permeabilidad al oxígeno del hormigón
ICR	Indice de Calidad del Recubrimiento

# INTRODUCCION

## 1. Alcance y justificación del tema.

Los hormigones autocompactantes (HAC), también denominados autocompactables, forman parte del grupo de los denominados hormigones de alto desempeño y poseen varias ventajas respecto de los hormigones convencionales (HC).

Su aspecto sobresaliente se relaciona con su condición en estado fresco. En efecto, se trata de un hormigón capaz de deformarse por acción de su propio peso, llenando todos los sectores del encofrado sin necesidad de vibración interna ni externa y con capacidad para sortear obstáculos sin dificultad (por ejemplo: armaduras de refuerzo). Naturalmente estas características deben lograrse sin que se produzca segregación de los materiales componentes.

Es especialmente apto para el hormigonado de elementos estructurales densamente armados, con formas complejas y de difícil acceso. Entre las ventajas más significativas respecto de los HC se pueden citar: una rápida y muy simple colocación, acceso a zonas con elevada congestión de armaduras, ausencia de compactación mecánica, excelente terminación superficial, posibilidad de reducción de costos globales (optimización de personal y equipos), incremento de la calidad y confiabilidad de las estructuras, y un mejoramiento de las condiciones de seguridad e higiene del trabajo por disminución de los niveles de ruido y polución.

A mediados de la década del 80 se iniciaron en la Universidad de Tokyo (Japón) y con la dirección del profesor Okamura, los primeros desarrollos de lo que hoy se conoce como Self Compacting Concrete (SCC). Surge como consecuencia de la necesidad de garantizar la obtención de estructuras durables (sin defectos de compactación) y por primera vez se alcanza con éxito su desarrollo en laboratorio en 1988 [1]. Recién a mediados de los 90 comenzó el proceso de expansión hacia algunos países nórdicos (especialmente Suecia) y a fines de esa misma década surge con impulso en los Estados Unidos con el nombre de Self Consolidating Concrete (se desecha el término "Compacting" ya que es utilizado en temas relacionados con la mecánica de suelos y sus aplicaciones en la ingeniería vial).

Como dato ilustrativo se puede mencionar que el gobierno japonés prevé para el año 2003, que el 50% del total del hormigón elaborado en dicho país sea del tipo autocompactante. Sin duda se trata de un material con enormes prestaciones y con un extenso campo de aplicación que no está lejos de nuestras posibilidades.

Sin embargo, la experiencia local todavía es limitada. Por tal motivo, a comienzos del año 2000, se inició en el Centro Técnico de la empresa Loma Negra un programa de estudios con el objeto de poder implementar a corto plazo la aplicación de este material.

Para la elaboración del presente trabajo se ha hecho uso de dichos estudios realizados por el autor junto con un importante grupo de trabajo durante su gestión como Líder del Centro Técnico (hasta Octubre 2001). Asimismo se suman otros efectuados con posterioridad a dicho cargo también en el Centro Técnico y en la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de La Plata.

Lo dicho implica un período de investigación que a la fecha completa casi tres años y cuyos resultados se resumirán en el presente proyecto.

## 2. Objetivos

El objetivo general de la tesis es efectuar el desarrollo y la caracterización de un HAC elaborado con materiales de uso corriente en el ámbito de la Capital Federal y Gran Buenos Aires, especialmente orientado a su aplicación en el mercado del hormigón elaborado. Para ello, los estudios incluyen la evaluación de las características en estado fresco y en estado endurecido, tanto a nivel de laboratorio como de obra. A continuación se resumen las distintas etapas que conforman el proyecto:

- Diseño de mezclas con materiales locales. Optimización de las metodologías de diseño más difundidas conforme al uso de materiales locales.
- Estudio de las propiedades en estado fresco. Construcción de equipos para su evaluación.
- Estudio de las propiedades físico-mecánicas en estado endurecido. Resistencia, cambios de volumen y parámetros de la mecánica de fractura.
- Estudio de propiedades relativas a distintos mecanismos de transporte, ligados a la durabilidad de las estructuras.
- Evaluación del comportamiento “in situ”. Resistencia efectiva y su relación con la resistencia potencial. Homogeneidad y su relación con la metodología de colocación.

## 3. Metodología

El enfoque del análisis teórico y experimental se estableció en un nivel de observación mesoscópico, en donde el material se considera constituido por una fase continua o matriz de pasta de cemento y una fase dispersa de agregados (inclusiones).

El programa experimental se desarrolló de modo tal que sea posible evaluar selectivamente las propiedades en estado fresco y endurecido de las diferentes fases.

Así fue como en el diseño de las mezclas y en algunas propiedades en estado endurecido, se evaluaron las siguientes fases:

- Estudio sobre pasta
- Estudio sobre mortero
- Estudio sobre hormigón

El trabajo se divide en dos partes.

La Parte I (Capítulos 1 al 5) abarca un estudio de los antecedentes internacionales en el tema y una profundización de conceptos teóricos, principalmente en lo que se refiere a las propiedades en estado fresco y endurecido.

La Parte II (Capítulos 6 al 16) incluye el programa experimental donde se resumen los estudios de los materiales constituyentes, influencia de aditivos y adiciones minerales en la reología de la pasta, mortero y hormigón, metodología para el diseño de las mezclas, evaluación de la trabajabilidad mediante la construcción de equipos especiales y la



evaluación de propiedades mecánicas del mortero y hormigón endurecido. Se incluyen también estudios de HAC curados a vapor a presión normal.

Se han realizado ensayos a escala de laboratorio, a escala industrial mediante la construcción de tabiques experimentales, y a escala de obra con la ejecución de dos estructuras de diferentes niveles de complejidad.

En la Parte II también se resumen las conclusiones generales del trabajo, las referencias y antecedentes de trabajos previos que contribuyeron al presente proyecto.

#### **4. Agradecimientos**

Quiero expresar mi más profundo agradecimiento a todas las personas involucradas en el presente proyecto, por su esfuerzo, tiempo y dedicación, consejo oportuno y amistad desinteresada, sin las cuales no hubiera sido posible la realización del trabajo.

A todos ellos mi reconocimiento profesional y personal.

Centro Técnico Loma Negra – Hormigones Lomax:

- Ing. Leonardo Zitzer
- Ing. Gastón Fornasier
- Sr. Tec. Claudio Hernandez
- Sr Tec. Adelino Ríos

Facultad de Ingeniería (UNLP):

- Ing. Leonardo Bergol (Dto de Construcciones)
- Ing. Federico Giangrasso (Dto. de Construcciones)
- Ing. Claudio Rimoldi (Dto. de Aeronáutica).
- Sr. Enrique Ferreyra Hirsch (Dto. de Construcciones)

# **PARTE I**

## **ANTECEDENTES**

# Capítulo 1 - PROPIEDADES EN ESTADO FRESCO

## 1.1 Reología

La propiedad básica que influye en el desempeño del hormigón en estado fresco es su comportamiento reológico.

La reología del hormigón, mortero y la pasta constituyen herramientas de mucho valor para comprender el comportamiento y la optimización en la etapa de diseño.

Para fijar ideas se dan a continuación algunos conceptos básicos sobre reología.

Se presenta en primer lugar el caso de un líquido sometido a una tensión tangencial  $\tau$ . El modelo más sencillo que representa el comportamiento de un líquido sometido a dicha tensión es el Fluido Newtoniano. Al aplicar la tensión el líquido sufrirá una deformación continua en el tiempo en la medida que dicha tensión permanezca aplicada (es decir, el líquido fluirá), sin importar lo pequeña que sea dicha tensión. En tal caso la tensión tangencial es proporcional a la velocidad de deformación o gradiente de velocidades  $\gamma$ , y la constante de proporcionalidad se denomina coeficiente de viscosidad  $\eta$ . Dicho coeficiente representa la pendiente de la recta que pasa por el origen de coordenadas que se observa en la Figura 1. En este caso la ecuación de la recta es la siguiente:

$$\tau = \eta\gamma$$

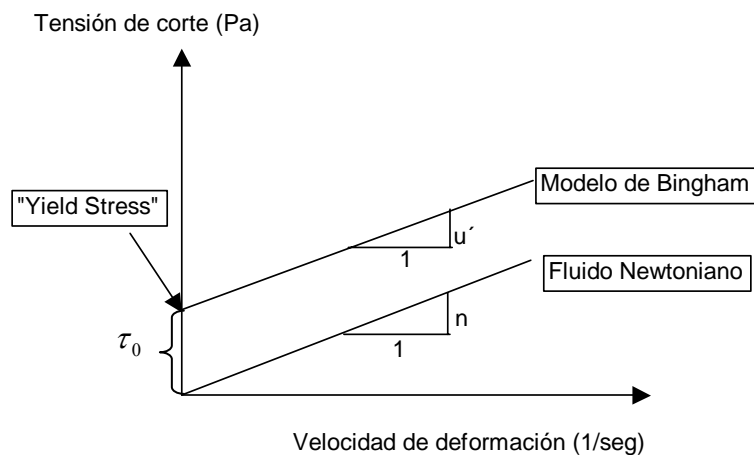


Fig. 1 – Comportamiento reológico

El hormigón fresco no se encuadra exactamente dentro del comportamiento descripto. Constituye una suspensión de sólidos en agua, existiendo importantes fuerzas de interacción entre las partículas, por lo que su comportamiento reológico es algo diferente. En realidad esta definición es algo más compleja debido a la gran variedad de tamaño de las partículas y a propiedades que dependen del tiempo conforme avanzan las reacciones de hidratación.

El modelo reológico más simple que se aplica al hormigón fresco es el modelo de Bingham. En este caso el hormigón se comporta como un sólido (es decir no fluye), hasta que la tensión tangencial aplicada supera un umbral o tensión crítica ( $\tau_0$ , en inglés

“yield stress”). En ese momento comienza a comportarse como un líquido presentando una relación lineal entre la tensión aplicada y la velocidad de deformación ( $\dot{\gamma}$ ). La ecuación de la recta en este caso es:

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

donde  $\dot{\gamma}$  es la velocidad de deformación (en 1/s),  $\tau_0$  es la tensión crítica o umbral de cizallamiento (en Pa) y  $\mu'$  es similar al coeficiente de viscosidad de los líquidos Newtonianos y se lo denomina “viscosidad plástica” (en Pa x seg.). La Figura 1 muestra la recta del modelo descrito en comparación con un fluido Newtoniano.

La experiencia muestra que las suspensiones de partículas en agua presentan una característica importante llamada “cohesión”. Esta propiedad está ligada principalmente a la distancia entre partículas y depende, entre otros, de la superficie específica del sólido y de la proporción de líquido de la suspensión. Esta “cohesión” se manifiesta principalmente por el umbral de cizallamiento  $\tau_0$  por debajo del cual la suspensión (pasta, mortero u hormigón) se comporta como un sólido cuasi - elástico.

El término “cohesión” puede llevar a una confusión. En efecto, en este caso se refiere a una característica reológica de la pasta u hormigón, es decir, la tensión que hay que provocar en el material para que comience a fluir. Hay que distinguirlo del término hormigón “cohesivo” que depende de otros factores y está asociado a la capacidad del hormigón para no segregar los materiales componentes.

Los antecedentes consultados [2][3][4][5] permiten, en caso de ser necesario, una profundización de los conceptos reológicos vertidos.

El HAC constituye un material que posee la deformabilidad necesaria como para poder llenar los encofrados sin necesidad de compactación mecánica interna ni externa, sin segregación de los materiales componentes y con un bajo riesgo de bloqueo con las armaduras.

El comportamiento reológico del hormigón queda definido entonces, de acuerdo a lo ya comentado, por dos variables: el umbral de cizallamiento ( $\tau_0$ ) o cohesión y la viscosidad plástica ( $\mu'$ ).

Para que el hormigón adquiera la propiedad de autocompactabilidad, deberá cumplirse un delicado equilibrio entre las dos variables reológicas mencionadas de la siguiente forma:

- ✓ Un valor muy pequeño o nulo del  $\tau_0$  (es decir que tenga una elevada fluidez), cercano a un fluido Newtoniano.
- ✓ Un valor moderado de  $\mu'$  con el fin de proveer una adecuada resistencia a la segregación de los materiales componentes.

Los antecedentes indican que el valor de  $\tau_0$  de la mezcla debe manejarse con los aditivos superfluificantes (SP), que son los responsables de dispersar las partículas de cemento. Pero la sola utilización de un aditivo SP no es suficiente ya que esto conduciría a la obtención de mezclas segregables.

Por tal motivo, con el objeto de controlar la segregación (actuar sobre la viscosidad plástica  $\mu'$ ) y evitar el bloqueo con las armaduras, la tendencia es la siguiente:

- Contenidos de finos o polvo (material menor a 74  $\mu\text{m}$  aportado por el cemento y las adiciones) elevados, en el orden de los 450 a 600  $\text{kg/m}^3$  de hormigón. Junto con el

cemento portland se pueden utilizar adiciones tales como: Escoria de alto horno molida, Filler calcáreo, Humo de sílice, Ceniza volante etc.

- Cuando no se utilicen estas adiciones, es necesaria la incorporación de un aditivo modificador de la viscosidad (AMV).
- Contenidos de agregado grueso inferiores a los hormigones convencionales con tamaños máximos menores (el tamaño máximo varía entre los 12,5 mm y 19 mm). Esto tiene como objeto disminuir la fricción entre las partículas de agregado, brindándole al hormigón la capacidad suficiente para sortear obstáculos sin mayores problemas.

Los factores predominantes que gobiernan el comportamiento reológico son la fricción entre partículas y el contenido de agua libre, ambos dependientes de la tensión superficial y de la dispersión de partículas.

Los parámetros reológicos característicos del hormigón, mortero y pasta, se pueden determinar con equipos denominados reómetros o viscosímetros. Entre los más usuales se pueden citar el BML, IBB y BTRHEOM. Sin embargo debe destacarse que el principio de medición de los parámetros es diferente en cada uno de ellos y por lo tanto sus resultados no son comparables. Esto es importante a tener en cuenta al momento de la interpretación de los resultados.

Existen antecedentes que muestran el detalle del funcionamiento de los reómetros mencionados y la relación existente entre los parámetros determinados y algunas propiedades en estado fresco de los HAC [6][7]. A continuación se da una breve introducción a los mismos.

El IBB fue desarrollado en Canadá y consiste en un recipiente cilíndrico donde se coloca el hormigón, con un impulsor (paleta) en forma de H que rota a velocidad variable. El torque generado por la resistencia de la muestra de hormigón se mide en unidades [N.m] y la velocidad de rotación en [rpm]. La relación entre ambos se aproxima a una recta cuya pendiente es la viscosidad plástica y la ordenada al origen es el umbral de cillazamiento. Resumiendo:

- $\mu'$  = viscosidad plástica [N x m x seg.]
- $\tau_0$  = umbral de cillazamiento [N x m]

El BML consiste en dos cilindros coaxiales. Uno externo rotatorio y uno interior fijo con una celda para medición del torque. En forma similar al viscosímetro anterior, se determina la recta de correlación con la siguiente ecuación y con idénticas unidades:

$$T = g + h * N$$

Donde:

- $h$  = viscosidad plástica [N x m x seg.]
- $g$  = umbral de cillazamiento [N x m]

El BTRHEOM es un reómetro de platos paralelos, uno fijo (el inferior) y el otro rotatorio a velocidad variable (el superior), de manera tal que la muestra de hormigón contenida entre los mismos es sometida a un esfuerzo de corte. Los parámetros

reológicos se pueden calcular mediante la ecuación de Bingham. Debido a la geometría del área de corte, es posible calcular los resultados en unidades fundamentales, es decir:

- $\mu'$  = viscosidad Plástica [Pa x seg.]
- $\tau_0$  = umbral de cillazamiento [Pa]

Los antecedentes consultados muestran alguna similitud en cuanto a los valores necesarios para obtener un HAC.

En efecto, en [6] los valores recomendados para obtener HAC en función de las experiencias realizadas con el BTRHEOM son:

$$\mu' < 200 \text{ [Pa x seg.]}$$

$$\tau_0 < 400 \text{ [Pa]}$$

Aquí cabe aclarar que si bien la fuente citada no especifica un valor mínimo de la viscosidad, un valor muy pequeño de la misma puede provocar segregación, sobre todo de las partículas más grandes.

Para otros [7], dichos valores (también evaluados con en BTRHEOM) deben ser:

$$100 \text{ [Pa x seg.]} < \mu' < 200 \text{ [Pa x seg.]}$$

$$\tau_0 < 200 \text{ [Pa]}$$

Puede resultar interesante la relación encontrada en [6], entre los parámetros reológicos y el ensayo de extendido (slump flow test) y tiempo T50 (ambos ensayos se describen en el Capítulo 2) a modo de modelo de predicción:

$$\mu' = \frac{M \times g}{10000} (0.026 \times Sl - 2.39) \times T50$$

Donde T50 se expresa en segundos, Sl es el valor del extendido en mm, M es la densidad del hormigón en Kg/m<sup>3</sup> y g es la aceleración de la gravedad. El error medio de la fórmula es 35 [Pa x seg.].

$$\tau_0 = (808 - Sl) \times \frac{M \times g}{11740}$$

El error medio de la fórmula en este caso es de 95 [Pa].

## 1.2 Trabajabilidad

En términos de trabajabilidad, se puede definir como “autocompactabilidad” a la habilidad que posee el hormigón para fluir luego de su descarga, solo por acción de su peso, y de llenar todos los espacios dentro del encofrado con el objeto de obtener un hormigón sin defectos y de calidad uniforme.

Para lograr dicha “autocompactabilidad”, se requiere que un HAC posea tres propiedades particulares:

- Capacidad de llenado
- Resistencia a la segregación - Estabilidad
- Capacidad de pasaje entre pequeñas aberturas - obstáculos

### 1.2.1 Capacidad de llenado

El HAC debe ser capaz de deformarse o cambiar de forma por acción de su peso propio.

El requerimiento de capacidad de llenado involucra:

- la capacidad de deformación, en términos de la distancia que puede fluir o desplazarse desde el punto de descarga, y
- la velocidad de deformación, en términos de la velocidad con la que puede fluir.

Para alcanzar una adecuada capacidad de llenado, deberá existir un adecuado equilibrio entre la capacidad de deformación y la velocidad de deformación.

Para fijar ideas, un hormigón de alta resistencia con baja relación agua/material cementicio (W/MC) y uso de aditivo SP, posee normalmente una elevada capacidad pero una muy baja velocidad de deformación, esto es una elevada viscosidad, hecho por el cual es necesaria una energía de compactación suficiente (vibración mecánica) para poder colocarlo en forma adecuada en el elemento estructural.

Por lo tanto, para alcanzar una buena capacidad de llenado, deberá existir un adecuado equilibrio entre la capacidad y la velocidad de deformación. Este equilibrio depende fuertemente de las características de la estructura a llenar, a saber: la cantidad de armadura, las dimensiones y tortuosidad del elemento estructural, la altura de caída, la importancia de la terminación superficial y la longitud a llenar a ser recorrida por el HAC. Una adecuada capacidad de llenado se puede obtener mediante:

- Una **reducción de la fricción** entre partículas sólidas que incluye no solo agregados gruesos y finos, sino también todo tipo de partículas finas de tamaño menor a  $74 \mu\text{m}$  (cemento y adiciones).

Esta reducción se puede lograr reduciendo el volumen de agregados (o aumentando el volumen de pasta) y utilizando una combinación de cemento y adiciones que resulten en una distribución continua de tamaños.

- Un **incremento de la deformabilidad de la pasta**.

Es importante lograr una elevada fluidez de la misma (bajo valor de  $\tau_0$ ) y una alta resistencia a la segregación (moderado valor  $\mu'$ ) para lograr una buena capacidad de llenado.

El incremento de la deformabilidad se puede lograr con la utilización de un aditivo SP (en general corresponden a los denominados de cuarta generación de base policarboxilato). A diferencia del agua, que reduce tanto el valor del  $\tau_0$  como de  $\mu'$ , la incorporación de un SP aumenta la fluidez (reduce el  $\tau_0$ ) y provoca una limitada reducción de  $\mu'$ . Se obtienen por lo tanto mezclas con elevada fluidez sin pérdida significativa de la viscosidad.

Por otra parte la reducción de la relación agua/polvo (W/P) puede limitar la deformabilidad de la pasta. Un incremento de dicha relación puede asegurar una alta deformabilidad pero también puede aumentar la posibilidad de segregación.

Es necesario entonces lograr un balance adecuado de la relación W/P.

### 1.2.2 Resistencia a la segregación (estabilidad)

El HAC no debe presentar las siguientes manifestaciones de segregación, ni en el estado estacionario ni en movimiento:

- Exudación de agua
- Segregación de la pasta y agregados
- Segregación del agregado grueso debido al bloqueo
- Distribución no uniforme de vacíos

Adicionalmente, debe mencionarse que existen dos tipos de segregación en este tipo de mezclas, a saber [8]:

A.- Segregación Dinámica: es aquella que se produce durante la colocación cuando el HAC debe fluir dentro de los encofrados. Es fácilmente detectable mediante la realización de los ensayos en estado fresco y debe corregirse durante la etapa de diseño.

B.- Segregación Estática: Es más difícil de evaluar y está asociada a los fenómenos de sedimentación que pueden producirse una vez que el hormigón se encuentra en reposo dentro de la estructura. Es factible que mezclas que muestren un adecuado comportamiento frente a la segregación dinámica presenten segregación en estado de reposo, como por ejemplo, la sedimentación del agregado grueso hacia la parte inferior del encofrado. Existen ensayos que permiten evaluar este comportamiento en forma cuantitativa que se describirán en el siguiente Capítulo.

Para evitar la segregación entre el agua y los sólidos, es esencial reducir la cantidad de agua que se puede “mover” en la mezcla (agua libre). Para ello se pueden disponer las siguientes acciones:

- Bajar el contenido de agua
- Bajar la relación agua/polvo (W/P)
- Utilizar adiciones o cemento con elevada superficie específica
- Utilizar agentes modificadores de la viscosidad (AMV)

Las otras categorías de segregación se pueden evitar diseñando una pasta que sea capaz de transportar las partículas de agregado y aire permitiendo solo un pequeño desplazamiento entre fase y fase (pasta – agregados). Esto puede lograrse mediante la reducción de la relación W/P o bien incorporando un AMV.

Por otra parte un hormigón con elevada viscosidad puede segregarse dado que no puede asegurar una deformación uniforme alrededor de obstáculos. Esto puede provocar la segregación de partículas de agregado grueso en las cercanías de espacios restringidos del encofrado. En tal caso, se podría corregir este comportamiento reduciendo el TMA y el volumen de agregados. En síntesis, para reducir la posibilidad de la separación o segregación de sólidos será necesaria la aplicación de las siguientes acciones que no siempre tienen un efecto equivalente:

- Limitar el contenido de agregados
- Reducir el TMA
- Reducir la relación W/P y/o utilizar AMV



La Tabla 1 [8] muestra un listado de las variables a tener en cuenta y su influencia sobre la estabilidad estática y dinámica del HAC.

**Tabla 1 – Influencia de diferentes parámetros sobre la estabilidad estática y dinámica de los HAC (adaptado de [8])**

<i>Variable 1: Materiales componentes</i>	<i>Efecto sobre la Estabilidad Dinámica</i>	<i>Efecto sobre la Estabilidad Estática</i>
Material Cementiceo	Provee viscosidad a la pasta con una baja tendencia a la segregación del agregado	Provee viscosidad a la pasta con una baja tendencia a la segregación del agregado
Agregado Grueso	El volumen de agregado grueso influye en la habilidad de pasaje por secciones restringidas	El volumen y el peso específico del AG pueden influir en la segregación estática. La granulometría influye sobre la exudación y la segregación.
Agregado Fino	Sin efectos nocivos si está bien balanceado con el volumen de agregado grueso	La distribución granulométrica puede aumentar el riesgo de segregación y exudación
Agua	Controla la viscosidad de la pasta afectando el riesgo de bloqueo	Controla la viscosidad de la pasta afectando el riesgo de segregación estática
Aditivos Superfluidificantes	Las sobredosis favorecen la inestabilidad de la mezcla	Las sobredosis favorecen la inestabilidad de la mezcla
Aire Incorporado	Provee volumen al hormigón, aumentando la distancia entre partículas de agregado y disminuyendo el riesgo de bloqueo	Ayuda a mantener suspendidas las partículas de agregado reduciendo el riesgo de segregación estática
<i>Variable 2: Comportamiento de la mezcla</i>		
Nivel de fluidez (Extendido)	Con las demás variables constantes, a mayor fluidez, mayor potencial de segregación	Con las demás variables constantes, a mayor fluidez, mayor potencial de segregación
<i>Variable 3: Características de la colocación</i>		
Congestión de Armaduras	Cuanto mayor es la restricción de pasaje, mayor es la tendencia al bloqueo	Mínimo
Distancia a recorrer por el HAC	Si las distancias son grandes, puede favorecerse la separación entre la pasta y el agregado grueso	Mínimo
Altura de caída libre	Cuanto mayor es la altura de caída, mayor es el riesgo de segregación	Mínimo
Dimensiones del encofrado (altura, ancho, tortuosidad)	Cuanto más estrecho e intrincado es el encofrado, mayor es el efecto pared y más alta la probabilidad de segregación dinámica	La altura del encofrado puede influir sobre el grado de segregación estática
Transporte sin agitación	La vibración puede causar la sedimentación de los agregados	Mínimo
Bombeo	La presión puede causar segregación en las tuberías	Mínimo

### 1.2.3 Capacidad de pasaje entre pequeñas aberturas

Se presentan casos en que el hormigón debe fluir a través de pequeñas aberturas en el encofrado o a través de una gran congestión de armaduras. En tales casos el HAC debe cumplir con un requisito adicional para poder evitar el bloqueo de los agregados gruesos en dichas aberturas.

Por tal motivo deberá existir una compatibilidad entre el tamaño y cantidad de partículas grandes en el HAC y el espacio libre entre barras de armaduras y aberturas de los encofrados a través de los cuales debe fluir el hormigón.

El mecanismo de bloqueo se puede explicar observando la Fig. 2. En cercanías de la abertura, se produce una colisión entre las partículas de agregado lo cual puede provocar lo que se denomina el “efecto arco” bloqueando de esta forma el paso del resto de las partículas. Para que esto ocurra se debe cumplir que el TMA sea muy grande y el contenido de partículas grandes de agregado sea muy elevado.

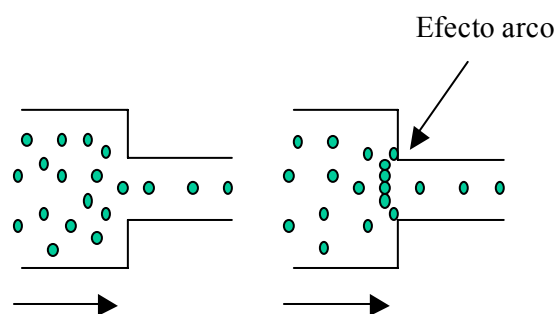


Fig. 2 - Mecanismo de bloqueo [12]

La tendencia al bloqueo se incrementa si el HAC es segregable. Por lo tanto el bloqueo en tales casos se puede producir de igual forma, aun si el TMA no es demasiado grande.

En síntesis para lograr una buena capacidad de pasaje entre aberturas se debe considerar:

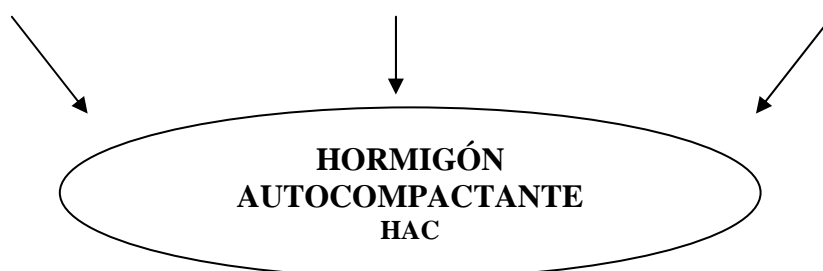
- Aumentar la resistencia a la segregación reduciendo la relación W/P o incorporando un AMV.
- Establecer una compatibilidad entre el espacio libre disponible para el pasaje del hormigón y las características de los agregados, reduciendo el volumen de agregados y el TMA.

### 1.2.4 Resumen

Un claro resumen de los requerimientos necesarios para obtener un HAC con condiciones adecuadas de trabajabilidad, es el cuadro que presentó Khayat [9] en la Universidad de Sherbrooke (Canadá) y que se muestra a continuación:

**Tabla 2.- Requisitos de trabajabilidad (adaptado de[9])**

<b>EXCELENTE DEFORMABILIDAD</b>	<b>BAJA O NULA TENDENCIA A LA SEGREGACIÓN (estabilidad)</b>	<b>RIESGO BAJO DE BLOQUEO</b>
<b>1. Incrementar la deformabilidad de la pasta:</b> a.- Utilización de SP b.- Relación W/P balanceada	<b>1.Reducir la segregación de sólidos</b> a.- Limitar el contenido de agregados b.- Reducir el TMA c.- Incrementar la viscosidad para lo cual hay dos caminos: <ul style="list-style-type: none"> <li>• Baja relación W/P</li> <li>• Utilización de un AMV</li> </ul>	<b>1.Reducir la separación de agregados mientras fluye la mezcla:</b> a.- Baja relación W/P b.- Utilizar AMV
<b>2. Reducir la fricción entre partículas:</b> a.- Se debe tener un volumen bajo de agregado grueso con un elevado volumen de pasta b.- Distribución continua de partículas.	<b>2.Minimizar la exudación (agua libre)</b> a - Bajo contenido de agua b - Baja relación W/P c - Utilización de polvos con una alta superficie específica d – Utilización de AMV	<b>2. Separación compatible entre las barras de armadura, el tamaño máximo y el contenido de agregado grueso:</b> a.- Bajo contenido de agregado grueso b.- Bajo TMA



### **1.3 Exudación y contracción plástica**

Dado que en general los HAC presentan un contenido de finos (polvo) sensiblemente mayor que en los HC, su capacidad de exudación se reduce notablemente. Si bien este hecho es beneficioso desde el punto de vista de su estabilidad estática (especialmente en elementos estructurales verticales), los hace especialmente susceptibles a la fisuración por contracción plástica en elementos de gran superficie expuesta con relación a su volumen (losas, tableros de puentes, etc.). Por tal motivo se debe prestar atención a la protección y curado de los mismos para evitar o disminuir el riesgo de fisuración.

## Capítulo 2 - ENSAYOS SOBRE EL HORMIGÓN EN ESTADO FRESCO

### 2.1 Introducción

Como se comentó en el Capítulo 1, existen equipos (reómetros) que permiten medir la tensión crítica ( $\tau_0$ ) y la viscosidad plástica ( $\mu'$ ) de hormigones, morteros o pasta de cemento portland, caracterizando de esta forma el comportamiento reológico de cualquier hormigón, y en particular de los HAC.

Para poder estimar estos parámetros sin necesidad de recurrir a equipos costosos y poco utilizables prácticamente, diferentes autores propusieron equipos especiales para evaluar en forma indirecta estas propiedades. Y fue en Japón donde surgieron estos desarrollos, sobre todo con los estudios realizados en la Universidad de Tokio por Okamura [1], Ouchi [10] y otros.

En el punto 1.2 se definió a la “autocompactabilidad” y se estableció que la misma se logra en función de tres requerimientos:

- Capacidad de llenado
- Resistencia a la segregación
- Capacidad de pasaje entre pequeñas aberturas

Estas propiedades no son independientes y se relacionan entre sí en mayor o menor grado. Debido a ello los métodos de ensayo en general no evalúan propiedades aisladas y cubren varios aspectos en forma simultánea.

A continuación, se hace una breve descripción de algunos de los equipos, según la experiencia japonesa [1] [10] y europea [11] [12].

### 2.2 Extendido (Slump Flow Test) y T50.

Son dos ensayos simultáneos que permiten estimar los dos parámetros que caracterizan el comportamiento reológico.

El extendido tiene por objeto evaluar la capacidad de fluir sin obstáculos y se realiza con el cono de Abrams, que se llena sin compactación. Luego de levantar el cono, se mide el diámetro alcanzado por la mezcla. Este valor, denominado extendido, tiene una buena correlación con el valor de  $\tau_0$  (tensión crítica) y son recomendables valores de  $65 \pm 5$  cm. Este rango de valores recomendado es sólo indicativo y en la práctica debe estar relacionado con el elemento a hormigonar. La Foto 1 muestra el aspecto de un extendido de 65 cm.



**Foto 1- Extendido 65 cm.**

Una propuesta muy interesante [13] para seleccionar el HAC más apropiado según el tipo de estructura a llenar, plantea la posibilidad de contar con 3 niveles de extendido posibilitando la obtención de HAC fuera del rango mencionado:

Tipo 1: Extendido menor a 56 cm

Tipo 2: Extendido entre 56 cm y 66 cm

Tipo 3: Extendido mayor a 66 cm

Asimismo y como parte del mismo ensayo de extendido, se mide el tiempo que tarda el hormigón, una vez que se levanta el cono, en alcanzar los 50 cm de extendido. Este valor permite evaluar cualitativamente la viscosidad plástica de la mezcla, recomendándose valores entre 2 y 5 segundos. De acuerdo al antecedente mencionado [13] pueden plantearse 3 niveles de T50:

Tipo A: T50 menor que 2 segundos (entiéndase una baja viscosidad)

Tipo B: T50 mayor que 2 segundos y menor que 4 segundos

Tipo C: T50 mayor que 4 segundos

Desde este punto de vista, existirán estructuras que por su nivel de complejidad necesiten ser coladas con un HAC que se adapte a la combinación 3-A (es decir HAC que tengan mucha fluidez y baja viscosidad) y otras para las cuales sea suficiente la combinación 1-C (HAC con menor fluidez y con mayor viscosidad plástica).

Adicionalmente, es muy importante también la inspección visual de la mezcla extendida puesto que esto permite observar la distribución del agregado grueso y la tendencia a la segregación de la pasta o mortero en el borde de ataque. La propuesta de varios autores [8] es definir un índice visual de estabilidad (en inglés VSI, Visual Stability Index) que asigna valores de 0 a 3. A las mezclas completamente estables se les asigna el valor 0 y las claramente inestables 3, siendo 1 y 2 valores intermedios. Las Fotos 2 y 3 muestran el aspecto de dos extendidos con comportamientos bien diferenciados.

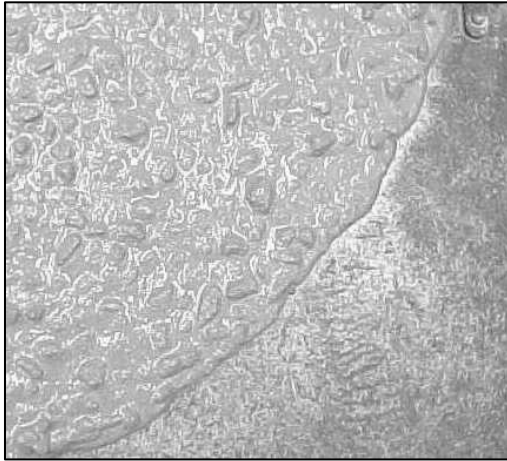


Foto 2. HAC Estable (VSI = 0).

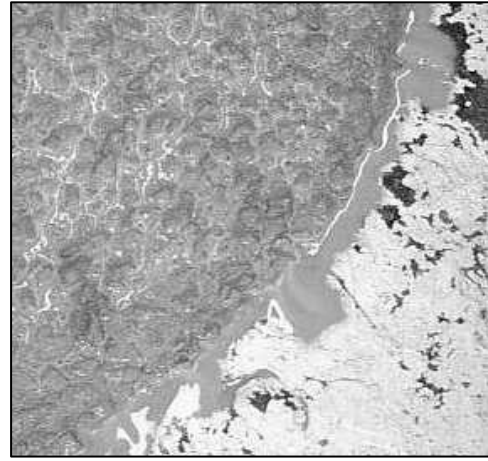


Foto 3. HAC Inestable (VSI = 3).

### 2.3 Ensayo U-Box

Este ensayo permite medir la capacidad de sortear obstáculos y la deformabilidad de la mezcla. Por lo tanto es una medida de la capacidad de llenado y de la capacidad de pasaje entre pequeñas aberturas.

El equipo tiene forma de letra U con una compuerta central con tres (3) barras de armadura. El ensayo consiste en llenar con hormigón uno de los lados (sección transversal: 200 mm x 280 mm, altura total del equipo: 700 mm) manteniendo cerrada la compuerta central. Luego del llenado, se levanta la compuerta ciega y el HAC debe ascender entre las armaduras por la otra mitad. Para que el ensayo se considere aceptable (buena capacidad de pasaje entre barras de armaduras), la altura alcanzada debe superar los 30 cm. La máxima altura que puede obtenerse (el hormigón debe autonivelarse) es de 35 cm. Las Fotos 4 y 5 muestran el aspecto del equipo.

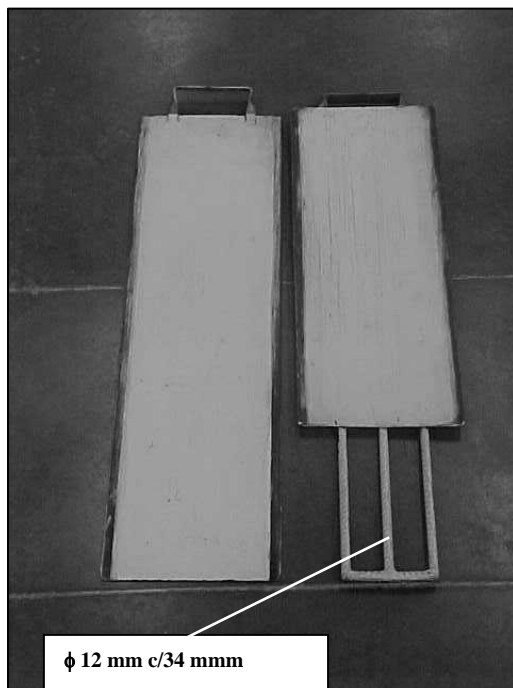


Foto 4. Compuertas Ensayo U-Box.



Foto 5. Equipo Ensayo U-Box.

En general y para evitar problemas con la comparación de resultados (el U-Box tiene diferentes alturas dependiendo del autor), no se informa la altura de ascenso de la mezcla sino que los requisitos se plantean en función de la diferencia de altura entre las dos ramas del equipo. Siguiendo los lineamientos de la bibliografía internacional [14] la diferencia entre las ramas debe ser menor o igual que 3 cm. En el trabajo citado en el punto anterior [13] se consideran tres niveles de congestión de armaduras para evaluar el riesgo de bloqueo:

U-Box Rank 1: Ventana con barras de armadura con escasa separación.

U-Box Rank 2: Ventana con barras de armadura de 12 mm de diámetro con una separación entre ellas de 34 mm. (Foto 4).

U-Box Rank 3: Ventana sin barras de armadura.

Con ello también se pretende diferenciar el tipo de HAC a utilizar según las características de la estructura.

## 2.4 Ensayo L-Box

Como dato anecdótico, este ensayo tuvo su origen en Suecia y no en Japón como la mayoría de estos métodos. Es un ensayo que ayuda a observar conjuntamente la capacidad de llenado, la capacidad para sortear un obstáculo (como en el caso del U-Box Test), la resistencia a la segregación y la capacidad de autonivelación de la mezcla. Se trata de un ensayo muy útil del que pueden extraerse varios datos. Las Fotos 6 y 7 muestran el equipo utilizado.

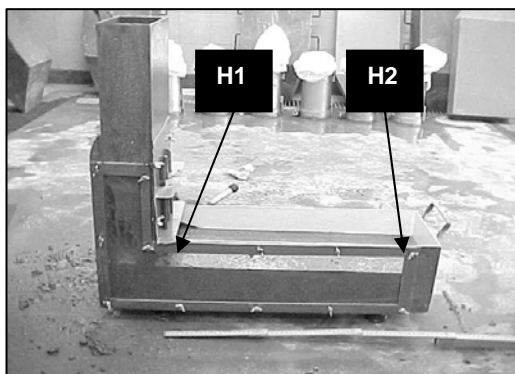


Foto 6: Ensayo L-Box.

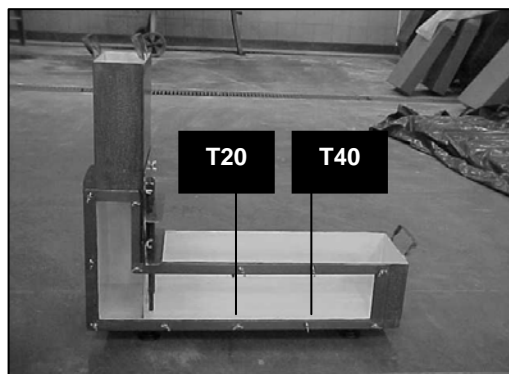


Foto 7. Equipo Ensayo L-Box.

El ensayo consiste en llenar con hormigón la rama vertical del equipo (sección transversal: 200 mm x 100 mm, altura: 600 mm) manteniendo cerrada la compuerta que la vincula con la rama horizontal (longitud: 700 mm). En la unión de las dos ramas, se colocan tres barras de armadura de 12 mm de diámetro con una distancia entre ellas de 34 mm. Estas barras se pueden cambiar por otras de mayor diámetro aumentando o disminuyendo la exigencia del ensayo. Luego se levanta la compuerta para dejar pasar el hormigón entre las barras de armadura.

En primer lugar se mide la diferencia de alturas que existe en los extremos de la rama horizontal una vez que el HAC deja de fluir: la relación  $H_2/H_1$  se aconseja que sea mayor a 0.80 (relación entre la altura final e inicial en la rama horizontal).

Como complemento, se mide el tiempo que tarda la mezcla en alcanzar 20 cm y 40 cm por la rama horizontal desde la compuerta de entrada (denominados T20 y T40). Ambos tiempos tiene relación con la viscosidad plástica como en el caso del T50, aunque no existen referencias comparativas consistentes.

## 2.5 V-Funnel para hormigones

Desarrollado por Okamura et al.[1], consta de un contenedor metálico en forma de V con una abertura con tapa en su parte inferior. El ensayo consiste en llenar el mismo con el HAC y luego medir el tiempo de descarga a través del orificio a partir de la apertura de la misma.

Se realiza tanto en mortero como en hormigón, siendo distintas las dimensiones del contenedor en cada caso. En el caso del V-Funnel para hormigón la sección transversal superior es de 75 mm x 490 mm y la inferior de 75 mm x 65 mm. La altura es de 575 mm (425 mm + 150 mm del tramo inferior). La Foto 8 muestra el equipo para hormigones.



Foto 8 – V-Funnel para hormigones.

Si el tamaño y cantidad de agregado grueso de la mezcla son suficientemente pequeños en relación con la abertura del equipo, la interacción y colisión entre las partículas más grandes será despreciable. En tal caso el tiempo de pasaje es un indicador de la viscosidad de la mezcla. Un tiempo de pasaje largo representa una mayor viscosidad de la mezcla (mayor resistencia a la segregación).



Por otro lado, si la cantidad y tamaño del agregado grueso es grande en relación al tamaño de la abertura, la interacción y colisión entre partículas será dominante en las características de fluidez de la mezcla. En estas condiciones, el ensayo de V-Funnel es útil para evaluar la capacidad de pasaje de la mezcla a través de pequeñas aberturas. Con estas características, una mezcla con baja viscosidad puede tener, ocasionalmente, un mayor tiempo de pasaje debido al predominio de la interacción entre las partículas grandes de agregado (bloqueo). Asimismo una viscosidad elevada también provoca un tiempo de pasaje elevado. Con esta condición de agregado dominante se requiere una viscosidad moderada para minimizar el problema.

Para el caso de hormigones se recomiendan valores de tiempos de escurrimiento que oscilan entre 5 y 10 segundos.

## **2.6 Ensayos para evaluar la estabilidad estática**

Para poder evaluar la estabilidad de los HAC en estado estacionario se pueden citar dos métodos:

### **2.6.1 Ensayo de estabilidad GTM**

Desarrollado en Francia, consiste en colocar unos 10 litros de hormigón en un recipiente y dejarlo en reposo por un período de tiempo suficiente como para que se produzca, si es el caso, la segregación interna (en general se adoptan 15 minutos).

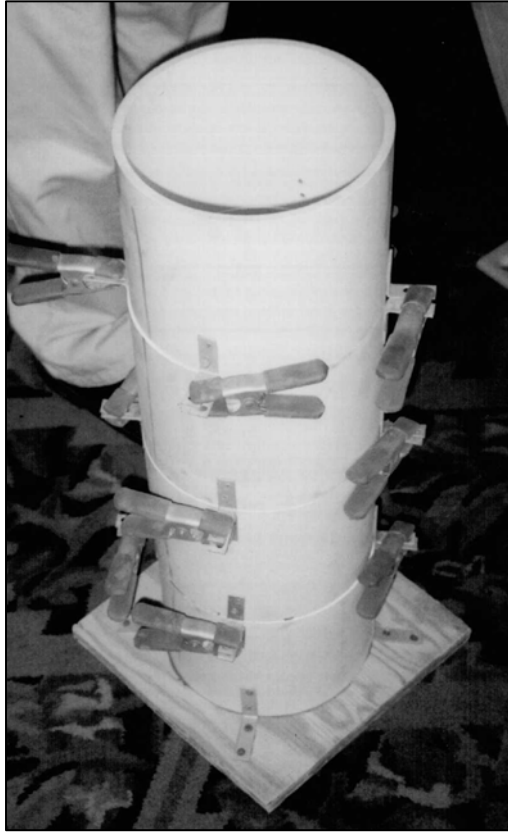
Luego se extraen 2 litros de la parte superior colocándose esta masa de hormigón sobre un tamiz de 5 mm (podría adoptarse el tamiz N°4). Se registra esta masa y luego se deja en reposo la mezcla de HAC durante 2 minutos sobre el tamiz. Después de pasados los 2 minutos se determina la masa de mortero que pasó a través de la malla, expresándola como porcentaje de la masa inicial de hormigón colocado sobre el tamiz. Esto se denomina “segregation ratio”.

Las observaciones empíricas permiten sugerir que los valores de ensayo son satisfactorios si la relación oscila entre el 5% y 15%. Por debajo de 5% la resistencia a la segregación es excesiva y puede afectar la terminación superficial de la pieza. Valores superiores al 15% y en particular mayores de 30% son inaceptables [14].

### **2.6.2 Ensayo de Sedimentación**

Este ensayo de origen alemán [15] consta de un tubo de 150 mm de diámetro y 500 mm de altura dividido en tres partes iguales. El ensayo consiste en llenar con el HAC en estudio el tubo y dejarlo en reposo durante 15 minutos (algunos autores sugieren 30 minutos). Después de transcurrido este período se divide el tubo con separadores metálicos en tercios y se realiza un lavado por el tamiz N° 4. De esta forma puede conocerse el contenido de agregado grueso en el tercio superior y en el tercio inferior del tubo.

La diferencia recomendada entre los contenidos de agregado grueso de las partes inferior y superior no debe superar un 10%. El equipo se puede observar en la Foto 9.



**Foto 9 - Ensayo de Sedimentación**

## Capítulo 3 ANTECEDENTES SOBRE EL DISEÑO DE MEZCLAS

### 3.1 Introducción

En el Capítulo 1 se vio que los HAC en su estado fresco deben cumplir tres requerimientos:

- Capacidad de llenado
- Resistencia a la segregación (en movimiento y en la condición estática)
- Capacidad de sortear obstáculos.

Tales requisitos de trabajabilidad traen como consecuencia el diseño de mezclas con un alto volumen de pasta que puede promover cambios de volumen en el estado endurecido tales como la contracción por secado y la fluencia lenta (creep).

Por otro lado la diversidad de componentes que están disponibles en el mercado, hacen complicado el procedimiento de diseño (agregados partidos o redondeados, cementos compuestos, adiciones minerales, aditivos SP de diferentes tipos, AMV, etc.).

La Fig. 3 muestra una aproximación para la obtención de los citados requerimientos. El contenido limitado de agregado grueso reduce la cantidad de colisiones entre partículas de modo tal de proveer capacidad para sortear obstáculos con el consecuente incremento del volumen de pasta. Baja relación W/P y el aditivo SP aportan resistencia a la segregación y fluidez, respectivamente. En este caso no se considera la utilización de un aditivo AMV.

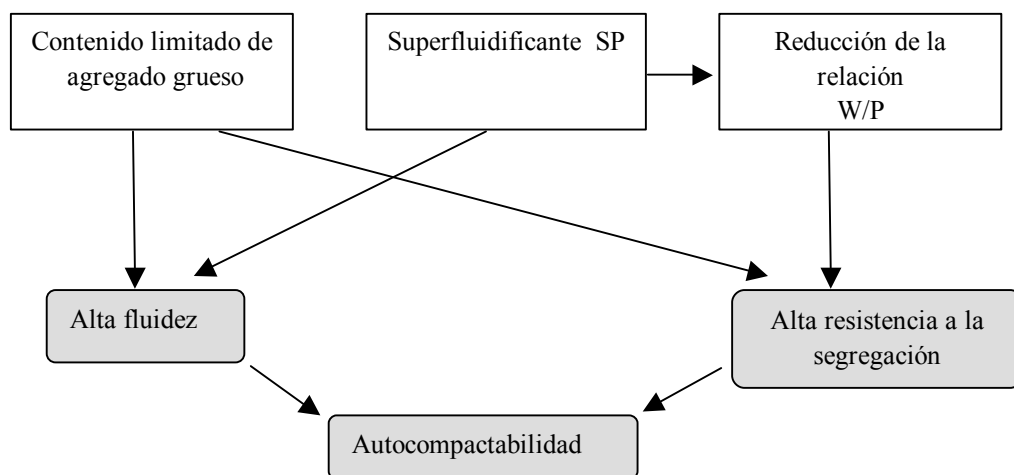


Fig.3. Metodología general para la obtención de HAC [12]

Se han desarrollado varios métodos de diseño, pero deben destacarse dos diferencias fundamentales que los distinguen a todos respecto del diseño de hormigones convencionales [12]:

1. La primera consideración a tener en cuenta en el diseño de un HAC es alcanzar propiedades satisfactorias desde el punto de vista de su autocompactabilidad. Dado que esta condición gobierna el contenido de pasta y a veces también la relación

W/P, en general la resistencia en estado endurecido se satisface para la mayor parte de los requerimientos estructurales. Esta condición de resistencia se puede controlar con una adecuada combinación de los diferentes tipos de materiales finos (polvo), tales como cemento portland, ceniza volante, escoria, filler calcáreo, etc.

2. La interacción entre los distintos materiales componentes (polvo, SP, AMV) es difícil de evaluar, por lo tanto es necesario en general, realizar como primer paso estudios sobre las fases pasta y mortero para disminuir luego la cantidad de ensayos a realizar sobre el hormigón.

Los métodos de diseño se pueden clasificar según los siguientes criterios:

- Aquellos donde la estabilidad se ajusta por medio del contenido de polvo, es decir, alto contenido de pasta.
- Aquellos donde la estabilidad se consigue por medio de AMV y por lo tanto, bajo contenido de pasta.
- Aquellos del tipo combinado, donde la estabilidad resulta de un ajuste del contenido de polvo y el AMV.

En general tienen limitaciones que se relacionan con los materiales para los cuales se pueden aplicar o la clase (resistencia) de hormigones que se pueden diseñar.

Algunos proponen un procedimiento paso a paso, y otros en cambio proponen límites a parámetros característicos de la mezcla (contenido de agregados, contenido de agua, etc.)

A continuación se enumeran los lineamientos de los procedimientos más difundidos. No se pretende dar una explicación detallada de cada uno de ellos, pudiéndose recurrir a las referencias para su profundización.

### **3.2 Método de Okamura et al [1]**

Fue desarrollado en la Universidad de Tokio y se lo conoce como el Método General. Corresponde a un método de los llamados “paso a paso” y es relativamente simple su aplicación.

El método considera que el hormigón está compuesto por dos fases (mortero y agregado grueso), es válido para agregado grueso de tamaño entre 5 y 20 mm y emplea adiciones para alcanzar la viscosidad adecuada (sin la utilización de AMV). Para el desarrollo se utilizaron cementos de bajo calor de hidratación (bajo contenido  $AC_3$  y  $FAC_4$ ) y también cementos ricos en belita ( $SC_2$ ), dado que los mismos favorecen la acción dispersante (efectividad) de los SP como así también inciden en forma positiva en ciertas propiedades del hormigón tales como: generación de calor, desarrollo de resistencia, contracción por secado, etc.

El volumen de agregado grueso se fija en el 50 % del volumen sólido mientras que el contenido de arena se fija en el 40 % del volumen del mortero (excluido el aire). El contenido de finos (partículas menores a 0.09 mm), agua y dosis de aditivos se determinan al nivel de mortero hasta lograr la suficiente viscosidad (medida con el V-Funnel) y una elevada fluidez (medida con el extendido).

Es un método general y sencillo, que da resultados muy seguros en cuanto al riesgo de bloqueo debido a que las mezclas resultan con un elevado contenido de pasta respecto del óptimo, y por lo tanto pueden ser anti - económicas y con mayor riesgo de fisuración.

Los detalles del método se dan más adelante (Capítulo 7) en ocasión de la explicación del diseño experimental de mezclas.

### **3.3 Método de Edmatsu et. al [16].**

El método es un derivado del método anterior y determina el contenido de arena (fijo en un 40 % del volumen de mortero en el método general) con diferentes tipos de arenas y material fino (polvo), incluyendo cemento, escoria, filler calcáreo y ceniza volante.

La relación mortero/agregado se evalúa mediante el V – Funnel para mortero y utilizando como agregado pequeñas bolillas de vidrio de 10 mm de diámetro.

La relación entre las velocidades de escurrimiento del mortero con y sin el 25 % en volumen de las citadas bolillas, tiene una buena correlación con la altura de llenado del hormigón medido en el U-Test. Esta relación (que la denomina  $R_{mb}/R_m$ ) es una buena medida de la interacción mortero/agregado, de manera tal que se puede elegir el valor necesario para alcanzar la altura adecuada en el U –Test, y optar por dicha relación para el diseño de la mezcla.

El método establece las relaciones entre este valor ( $R_{mb}/R_m$ ) y el contenido de arena de morteros conteniendo diferentes tipos de materiales finos (polvo). De esta forma se puede seleccionar la relación volumen de arena/volumen de mortero adecuado que cumpla con el requisito de autocompactabilidad del hormigón. Esta relación es en general mayor a 0.4.

### **3.4 Método de Ouchi et al [17].**

También es un método derivado del método general de Okamura. Propone un procedimiento más racional para la determinación de la relación W/P y la dosis de SP. Cada parámetro se determina en forma independiente, minimizando así el número de ensayos.

Se involucran aquí también los ensayos de extendido y V Funnel en morteros, expresando los resultados en la forma  $\Gamma_m$  (área de extendido relativa) y  $R_m$  (tiempo de escurrimiento relativo). Estos parámetros se detallan en el Capítulo 6, Punto 6.2, cuando se explican los ensayos en morteros.

Se realizaron gran cantidad de ensayos buscando la relación entre los citados parámetros encontrando:

- una relación lineal para cualquier valor de la relación dosis de aditivo superfluidificante / finos (SP/P) en peso, con la recta pasando por el origen, y
- una relación del tipo  $R_m = A \times \Gamma_m^{0.4}$  para cualquier valor de la relación W/P en volumen.

Se encuentra que hay una sola combinación de W/P y SP/P para cualquier combinación particular de  $R_m$  y  $\Gamma_m$ . Teniendo en cuenta los valores óptimos para estos parámetros

según el método de Okamura, (1 y 5 respectivamente), se pueden obtener los valores de diseño de W/P y SP/P con una cantidad mínima de ensayos.

El método no indica si es válido para mezclas que contienen un AMV.

### 3.5 Método de Petersson et al [18]

La diferencia más importante con los métodos anteriores basados en el método general de Okamura, es la forma de determinar el contenido de pasta (es decir, el contenido de agregados). El objetivo principal del método es el diseño de mezclas más eficientes, en términos del contenido de pasta.

Considera al hormigón compuesto por dos fases: una fase sólida (agregados finos y gruesos) y una fase líquida (incluye cemento, adiciones, aditivos, agua y aire).

El método está basado en un trabajo realizado por Tangtremsirikul y Bui [19] en donde se determina el volumen mínimo de pasta necesario para obtener un adecuado paso del hormigón por una determinada separación entre armaduras, sin riesgo de bloqueo, mediante la utilización del ensayo del L-Box. Es decir se evalúa el criterio de bloqueo de la fase sólida (agregados).

Dicho contenido mínimo de pasta (o volumen máximo de agregados) se determina para cada relación agregado grueso/agregado total gracias a una curva experimental realizada para agregados partidos y redondeados. Normalmente la relación agregado grueso/agregado total, en peso, se aproxima o es igual a la correspondiente al mínimo contenido de vacíos de la mezcla de agregados.

El criterio se basa en considerar la suma de las contribuciones de los distintos tamaños de partículas individuales al bloqueo del hormigón, cuando este trata de pasar a través del espacio entre armaduras.

El riesgo de bloqueo se determina realizando la suma de las relaciones de volumen de cada fracción de agregado (es decir, el volumen de agregado de cada fracción por unidad de volumen de hormigón) dividido por la relación de volumen de bloqueo (es decir, aquella relación que produce el bloqueo). Esta relación deberá ser menor o igual a uno para que no se produzca el bloqueo:

$$\text{Riesgo de bloqueo} = \sum (n_{ai}/n_{abi}) \leq 1$$

donde  $n_{ai}$  es la relación de volumen de cada fracción  $i$  de agregado, y  $n_{abi}$  es la relación de volumen que produce el bloqueo para esa misma fracción  $i$ .

Los valores de  $n_{ai}$  se determinan a partir de las curvas granulométricas, de la relación agregado grueso/agregado total y del volumen total de agregados. Por otro lado, los valores  $n_{abi}$  se determinaron experimentalmente para agregados partidos y redondeados, para valores de la relación espacio entre armaduras/tamaño de cada fracción de agregado, y para valores de la relación diámetro de la armadura/TMA.

Los contenidos de finos, agua y SP se ajustan para obtener la resistencia especificada y para lograr una viscosidad moderada y bajo “yield stress” (medidos con un viscosímetro coaxial) para el mortero que contiene partículas menores a 250  $\mu\text{m}$ .

En cuanto a los ensayos en hormigón recomendados para verificar el comportamiento a partir del diseño con el criterio comentado, son el extendido y el L-Box.

El método no da recomendaciones para el diseño de mezclas con AMV.

### 3.6 Método de Bui et. al [20]

Al igual que el método anterior, se basa en la determinación del contenido mínimo de pasta, pero en este caso en base a dos criterios en lugar de uno.

En primer lugar se determina el contenido mínimo de pasta (o máximo contenido de agregados) en base al criterio de bloqueo, idéntico al explicado en el punto anterior y que tiene foco en la fase sólida del hormigón (agregado grueso y fino).

El segundo criterio determina el contenido mínimo de pasta para lograr una determinada deformabilidad (extendido) sin segregación. Este criterio se concentra en la fase líquida (incluye cemento, adiciones, agua, aditivos y aire). Se basa en la determinación del contenido de pasta con una fórmula que calcula la distancia promedio entre partículas ( $D_{ss}$ ) a partir del volumen de pasta ( $V_{pw}$ ), volumen de vacíos del agregado compactado (Void), el volumen total del hormigón ( $V_t$ ) y del diámetro medio de partícula ( $D_{av}$ ). La fórmula surge a partir de cálculos volumétricos y considerando como hipótesis que todas las partículas son esféricas:

$$D_{ss} = D_{av} \times \left\{ \sqrt[3]{1 + \left( \frac{V_{pw} - Void}{V_t - V_{pw}} \right)} - 1 \right\}$$

Se proporciona un método para el cálculo del contenido mínimo de pasta a partir de la distancia mínima entre partículas necesaria para lograr las propiedades de autocompactabilidad evaluadas mediante los ensayos de extendido, T50 y penetración (ver [20]).

Se selecciona el contenido de pasta que cumpla con los dos criterios citados (fase sólida y fase líquida). Si el contenido de pasta resulta mayor de  $420 \text{ l/m}^3$ , entonces se deberá utilizar un menor TMA.

### 3.7 Método de Gomes et. al [21].

El método se basa en la optimización por separado de la composición de la pasta y del esqueleto granular de agregado. Al igual que en casos anteriores, la pasta está constituida por el agua, cemento, adiciones, SP y aire mientras que el esqueleto granular por arena y agregado grueso.

La composición de la pasta se estudia mediante la utilización del cono de Marsh para determinar la dosis de saturación del SP y la utilización del ensayo de mini-slump (medición del extendido y tiempo transcurrido para alcanzar un diámetro establecido) para determinar la dosificación de filler.

Dado que el método se refiere a la dosificación de hormigones de alta resistencia, utiliza humo de sílice (fijo en un 10 % del peso del cemento) y una relación W/MC inferior a 0.40 (función de la resistencia requerida en estado endurecido).

La composición del esqueleto granular se determina con la relación arena/agregado grueso, según el criterio de máxima compacidad en estado seco y sin compactar, a efectos de propiciar el contenido mínimo de vacíos.

Una vez determinada la composición de la pasta y la relación arena/agregado grueso, se determina el contenido óptimo de pasta (en volumen) necesario para satisfacer los

requisitos de resistencia y autocompactabilidad en el hormigón. Se elaboran hormigones con distintos contenidos de pasta, determinándose el contenido óptimo de la misma frente a cada aplicación (V – Funnel, L- Box, Tubo – U).

### **3.8 Método de Sedran y Larrard [22]**

Este modelo propone una aproximación teórica del comportamiento del HAC en estado fresco, que se utiliza como base para el diseño de mezclas mediante un soft.

Esta aproximación se basa en un modelo matemático llamado Modelo Compresible de Empaquetamiento (Compressible Packing Model) que permite optimizar el esqueleto granular del HAC. Difiere de otros métodos en que en el análisis del empaquetamiento se considera no solo los agregados sino también el cemento y el resto de adiciones minerales involucradas.

El modelo determina lo que se denomina la Densidad Virtual de Empaquetamiento, que se define como la máxima densidad que se puede obtener en un esqueleto granular con una cantidad infinita de energía de compactación. Se considera al hormigón como una suspensión en agua del esqueleto de sólidos (finos, arena y agregado grueso) y puede predecir ciertas propiedades en estado fresco tale como: “yield stress”, viscosidad, extendido y tiempo de escurrimiento, habilidad de llenado con el L –Box y segregación.

Los datos necesarios son la distribución granulométrica, densidad, pesos unitarios (packing density) de los constituyentes y punto de saturación del superfluidificante. El método es válido para cementos puros y sin aditivos modificadores de la viscosidad.

### **3.9 Método de Saak. et.al [23]**

La teoría de este método propone que la reología de la pasta de cemento influye principalmente en la resistencia a la segregación y trabajabilidad en el estado fresco del HAC, para una dada distribución y volumen de agregados.

El método se basa en el control de la segregación de las partículas dentro de la matriz cementicia bajo dos condiciones: estáticas y dinámicas.

Para ello hace un análisis de las fuerzas que actúan sobre una partícula tanto en condición estática como dinámica. Las fuerzas involucradas en el sistema son la fuerza gravitatoria, la flotabilidad (empuje) y la fuerza de restauración necesaria para establecer el equilibrio de fuerzas. En base a este análisis se realiza el estudio reológico de distintos tipos de pastas y se determina lo que denomina la Zona de Autofluidez (Self-Flow Zone) caracterizada por la densidad, “yield stress” y viscosidad de la pasta. Dicha zona incluye los valores críticos de los parámetros mencionados para los cuales se evita la segregación en el HAC, para un determinado tipo y distribución de agregados. La validez de los resultados en hormigón se comprobaron con el ensayo de U –Test.



### **3.10 Parámetros de diseño basados en antecedentes internacionales [12]**

La experiencia muestra que hay una amplia gama de diseños que pueden producir HAC de comportamiento satisfactorio, pero en general hay una serie de factores claves que varían dentro de ciertos límites.

A continuación se resumen algunos parámetros básicos recogidos de los distintos antecedentes internacionales disponibles, a modo de resumen de los métodos de diseño mencionados:

1. El volumen de agregado grueso es de 30-34 % del volumen de hormigón.
2. Relación agua/polvo en volumen entre 0.8 y 1.2. Las mezclas con agentes modificadores de la viscosidad se ubican en el rango superior.
3. El contenido de agua varía entre 155 y 175 litros / m<sup>3</sup> para mezclas sin agente modificador de la viscosidad, o hasta 200 litros /m<sup>3</sup> con dicho agente.
4. Volumen de pasta entre 34 y 40 % del volumen del hormigón.
5. Volumen de agregado fino de 40 a 50 % del volumen de mortero.

En las conclusiones (Capítulo 15) se verán los valores y rangos obtenidos en las mezclas diseñadas con agregados locales, conforme a la experiencia obtenida en el presente proyecto.

## Capítulo 4 - PROPIEDADES EN ESTADO ENDURECIDO

### 4.1 Microestructura

Recordamos que el hormigón considerado como material compuesto, está constituido por la pasta de cemento, los agregados y la zona de interfase pasta-agregado.

La zona interfacial (ZIF) presenta una gran importancia en el desempeño del hormigón en estado endurecido, en lo que se refiere a propiedades resistentes, de deformabilidad y durabilidad, y se caracteriza por ser más porosa que la matriz. El “efecto pared” provocado por los agregados genera un menor empaquetamiento de las partículas de cemento en la zona próxima a los mismos. Por otro lado, el crecimiento de los productos de hidratación (principalmente S-C-H), se produce en un solo sentido (en forma opuesta a la pared del agregado), lo que induce a su vez mayor porosidad. Se suma además un posible incremento en la cantidad de agua por fenómenos de exudación o por el grado de absorción del agregado. El espacio disponible posibilita el crecimiento de productos de mayor cristalinidad (principalmente hidróxido de calcio) y de menor aporte resistente, conduciendo a una mayor concentración de tal producto con formación de grandes cristales. Los mismos se encuentran orientados en forma paralela constituyendo planos preferenciales de clivaje [24].

Por sus características la ZIF constituye el vínculo más débil del hormigón, lugar por donde se inicia el desarrollo de fisuras y vía preferencial de difusión de sustancias agresivas.

En las mezclas de HAC la utilización de mayor cantidad de polvo (partículas inferiores a 74  $\mu\text{m}$ ) y/o la mayor estabilidad de las mismas en estado fresco, junto con la eliminación de la vibración mecánica, conducen a ZIF y pasta más densas debido a un empaquetamiento de partículas más eficiente y a la menor cantidad de agua disponible por exudación.

Algunos antecedentes demuestran que las ZIF alrededor de las armaduras y de partículas grandes de agregados son de menor espesor y más homogéneas que las correspondientes a hormigones convencionales vibrados. Asimismo se reporta menor cantidad de hidróxido de calcio [25][26].

En síntesis, la mayor calidad de la microestructura de la pasta y especialmente de la ZIF (mayor compacidad y homogeneidad), serían las responsables de las mejoras que se alcanzan en lo que se refiere a propiedades resistentes y de durabilidad.

### 4.2 Resistencia y rigidez

Debido a los beneficios citados en el punto anterior relacionados con la calidad de la microestructura de la pasta y de la ZIF, existen antecedentes que demuestran que los HAC pueden presentar similar o mayor resistencia bajo solicitaciones de compresión y tracción, que un HC de similar relación W/MC [12][27].

La rigidez, evaluada a través del módulo de elasticidad estático en compresión, presenta valores similares a los correspondientes HC de resistencias comparables. [12][28].

### **4.3 Propiedades “in situ” – Uniformidad y resistencia.**

Hay coincidencia en general sobre la mayor uniformidad de las propiedades “in situ” de los elementos construidos con HAC [12][29][30]. Las diferencias de resistencias entre la parte inferior y la superior de elementos verticales variaron entre el 8 % para tabiques de 1.5 metros de altura [31] y alrededor del 5 % para columnas de 1.4 metros de altura (versus 13 % obtenido con el HC de referencia) [30].

Asimismo, en columnas de 3 metros de altura las diferencias encontradas variaron entre el 3 y 15 % según el nivel de resistencia del hormigón [29].

Respecto de las diferencias entre la resistencia efectiva evaluada mediante la extracción de testigos y la resistencia potencial mediante probetas, se encuentran resultados dispares. En algunos casos se reporta que dicha diferencia es menor para los elementos con HAC [12][29][32] mientras que otros informan valores algo mayores [30]. Las relaciones encontradas entre la resistencia efectiva y potencial para los HAC varió entre el 80 y 100 % según [29][32] y alrededor del 90 % para [30][33].

Las experiencias citadas muestran en general una importante posibilidad de obtener estructuras más homogéneas y con menor probabilidad de aparición de defectos de colocación cuando se emplean HAC. Esto se debe principalmente a la eliminación de la variable “grado de compactación”, como factor de incertidumbre del procedimiento constructivo.

### **4.4 Adherencia con las armaduras**

Las características de los HAC en estado fresco, con una gran capacidad de deformación, estabilidad (menor tendencia a la segregación) y menor capacidad de exudación y asentamiento plástico, podría en primera instancia, mejorar las condiciones de adherencia entre el hormigón y las armaduras. Lo dicho sería especialmente cierto debido a la menor acumulación de agua que debería producirse debajo de las mismas por efecto de la exudación, en comparación con los HC.

Sin embargo, los resultados hasta el momento son algo contradictorios. Si bien en la mayoría de los antecedentes estudiados se muestran mejoras del orden del 10 al 40 % en la adherencia de los HAC respecto de HC en términos relativos a su resistencia a la compresión [12][34][35], otros indican reducciones cercanas al 25 % [36].

Por otro lado [37], hay evidencias que en el ámbito de desplazamientos de hasta 0.2 mm en el ensayo, la adherencia relativa a la resistencia a compresión es mayor en los HAC que en los HC. La misma fuente indica que para valores límites (tensión máxima de adherencia) los HAC muestran valores inferiores en un orden del 15 % debido a elevado contenido de finos.

Hay coincidencia respecto de la incidencia de la posición de las armaduras. En efecto, la reducción de la adherencia en las barras superiores horizontales respecto de las inferiores es menor en los HAC que en los HC [12][37].

### **4.5 Contracción y fluencia lenta (creep)**

Los antecedentes disponibles sobre los cambios de volumen referidos a la contracción autógena, contracción por secado y fluencia lenta son algo contradictorios, reportando

en algunos casos valores mayores y en otros menores para los HAC respecto de los HC. Es válido aquí aclarar que posiblemente dichas contradicciones se deban a que las variables que influyen sobre dichos cambios de volumen son diversas y esto hace difícil la estricta comparación entre los distintos tipos de hormigones.

Algunos antecedentes muestran que la contracción autógena de los HAC puede ser superior a los HC de similar resistencia [38].

Respecto de la contracción por secado y la fluencia lenta, hay trabajos que indican que para hormigones de similar clase resistente, los HAC y los HC muestran valores similares [28][40].

En un mismo sentido, otros estudios han demostrado que en aplicaciones de hormigón pretensado, la pérdida de la fuerza de tesado a larga edad debido a los efectos combinados de deformaciones por contracción por secado y por fluencia lenta (creep), resultan similares en HAC y HC de similar nivel de resistencia [41].

La elección de los materiales componentes también influye en los cambios de volumen. En este sentido hay que tener en cuenta que el diseño de HAC con AMV implica en general un mayor contenido unitario de agua [12] y menor contenido de polvo (es decir, mayor relación W/P). Ambos factores influyen en el sentido de aumentar la contracción por secado. En particular el efecto de la relación W/P se puede explicar teniendo en cuenta que un aumento del contenido de polvo (menor W/P) puede ayudar a disminuir la porosidad y por lo tanto a reducir la difusión de vapor [38]. Existen antecedentes que confirman lo antedicho, mostrando que los HAC elaborados con adición de filler calcáreo de adecuada finura pueden reducir la contracción por secado [12][39].

## **4.6 Durabilidad y Propiedades de Transporte**

La durabilidad del hormigón está directamente relacionada con la estructura de poros y la posibilidad de ingreso de sustancias agresivas al mismo.

Los principales mecanismos de transporte que gobiernan la entrada de dichas sustancias agresivas (gases, agua, iones en solución acuosa) son tres:

- Transporte de un fluido debido a un gradiente de presión: Permeabilidad
- Transporte de un fluido debido a un gradiente de concentración: Difusividad
- Transporte de un fluido debido a la tensión superficial actuando en los capilares: Absorción capilar

En la práctica estos mecanismos no actúan en forma separada sino que se pueden dar en forma simultánea. El ingreso de fluidos dentro del hormigón se produce a través de la estructura de poros de la pasta de cemento, de la ZIF y de fisuras.

Es importante destacar que el mecanismo de transporte de fluidos no sólo depende del tamaño del sistema de poros sino también de su conectividad.

La ZIF presenta una gran importancia en los mecanismos de transporte del material compuesto. En efecto, tal como se adelantó en el Punto 4.1, dicha zona se caracteriza por tener mayor porosidad y una mayor proporción de hidróxido de calcio.

La estructura de poros depende principalmente de la relación W/MC, el grado de hidratación y el tipo y cantidad de cemento y adiciones minerales (activas o inertes). Como consecuencia, la durabilidad de los HAC depende fuertemente del diseño y tipo

de materiales componentes, pudiendo dar resultados diferentes según sean los mismos. En correspondencia con lo indicado en el Punto 4.1, los HAC conducen a ZIF y pasta más densas debido a un “empaquetamiento” de partículas más eficiente y a la menor cantidad de agua disponible por exudación.

Los resultados muestran que las ZIF alrededor de las armaduras y de partículas grandes de agregados son de menor espesor y más homogéneas que las correspondientes a hormigones convencionales vibrados [25][26][27]. Se puede decir entonces que en general, comparando HAC con HC de similar clase resistente, los primeros podrían evidenciar igual o mejor comportamiento que los segundos, tanto en lo que se refiere a propiedades resistentes como de durabilidad.

Como casos particulares relativos a la durabilidad de los HAC, se puede mencionar que no se han encontrado a la fecha antecedentes de estudios de la reacción álcali - sílice (RAS) en forma comparada con HC, y respecto de la capacidad de resistir los efectos de ciclos alternados de congelación y deshielo, los HAC podrían comportarse en forma similar que los HC, en la medida que los mismos posean un sistema de vacíos apropiado [42]. Sin embargo otros [43] indican que para el caso de HAC con filler calcáreo puede darse que el comportamiento en este sentido sea pobre, aún en el caso de tener un adecuado sistema de vacíos, si las partículas finas de filler no se dispersan en forma adecuada alrededor de los agregados debido a problemas de mezclado.

#### **4.7 Terminación superficial**

La utilización de HAC mejora fuertemente la posibilidad de obtener terminaciones sin defectos superficiales lo cual es beneficioso no solo desde el punto de vista estético sino también desde el aspecto económico, debido al menor costo de las reparaciones posteriores.

Varios son los factores que influyen. Entre ellos se pueden citar las propiedades del HAC en estado fresco (viscosidad, fluidez), el tipo de encofrados y sustancias desmoldantes y la forma de colocación (colocación desde arriba o desde la parte inferior de los encofrados) [27][44].

Quizás el factor dominante que controla la calidad superficial del HAC es su viscosidad. En efecto, si la viscosidad es baja la velocidad de eliminación (de ascenso a la superficie) de las burbujas de aire atrapadas se incrementa, mejorando su compactación y terminación superficial. Por otro lado, mezclas muy viscosas dificultan la eliminación de las burbujas hacia la superficie [45].

Adicionalmente, una excesiva viscosidad puede influir negativamente no sólo en la terminación superficial como se mencionó, sino también en la densidad y homogeneidad.

#### **4.8 Presión sobre los encofrados - Tixotropía**

La presión lateral sobre los encofrados depende principalmente de la forma y dimensiones de la estructura, las proporciones de la mezcla, la velocidad de llenado y la temperatura ambiente.

Los antecedentes indican que el cálculo de los encofrados, cuando se utiliza un HAC, debería basarse en la hipótesis que la presión ejercida por el mismo es aproximadamente igual a la presión hidrostática de un fluido con una densidad aproximada de  $2,4 \text{ kg/dm}^3$ . Esto es así, dado que los HAC se comportan en forma muy similar a un líquido Newtoniano, con muy bajo valor del “yield stress”, o tensión crítica.

Sin embargo, otros trabajos indican que las presiones medidas sobre los encofrados, resultaron inferiores a las hidrostáticas. Algunos justifican este comportamiento por la fricción del hormigón contra el encofrado [46] y otros por el comportamiento tixotrópico del mismo. En efecto, cuando la energía cinética del hormigón en estado fresco desaparece, el material desarrolla un cierto endurecimiento que hace que no se comporte más como un líquido. La tixotropía del material caracteriza la capacidad del mismo para “construir” en forma natural una red interpartículas cuando se encuentra en estado estático [12][47][48].

Según la norma British Standard BS 5618 (1976), se define a la tixotropía como “una disminución de la viscosidad bajo tensión de corte, seguida por una recuperación gradual de la misma cuando dicho esfuerzo desaparece”. El efecto depende del tiempo y es reversible [48].

La Figura 4 extraída de una experiencia sueca, muestra en forma comparada la presión medida de un HAC sobre un tabique de 5,5 metros de altura y la presión calculada para un hormigón vibrado convencional, siendo la primera bastante inferior a la segunda [12]. Resulta interesante también el estudio realizado por Khayat et al. [49], donde se analiza el desarrollo de la presión de encofrados en una columna de 3,6 metros de altura. En la Figura 5 se puede observar que la presión disminuye con el tiempo distinguiéndose claramente dos etapas. La primera hasta aproximadamente el 60 % de la presión inicial, gobernada principalmente por el fenómeno de tixotropía (efecto predominantemente físico). La segunda etapa en donde la velocidad de hidratación se incrementa y la presión disminuye a una velocidad inferior a la registrada en la primera etapa (efecto predominantemente químico). La presión se elimina finalmente en un período aproximado de 11 horas.

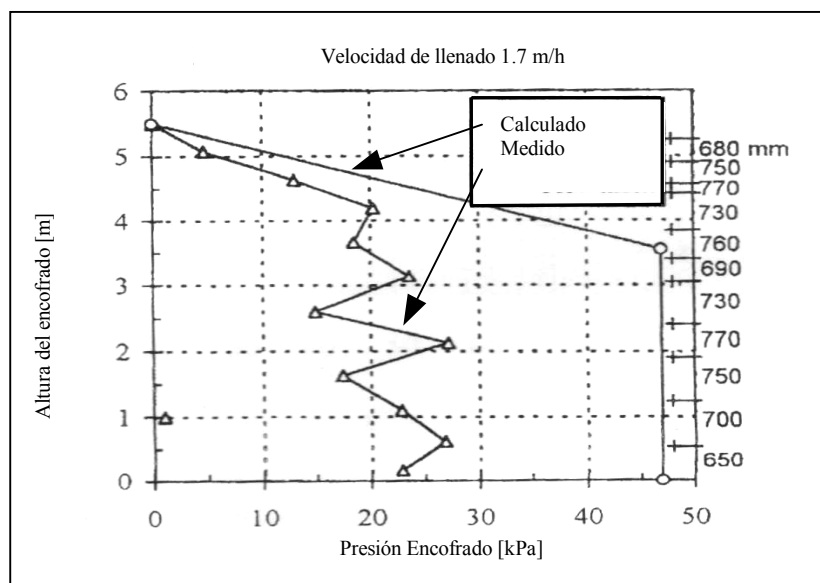


Fig. 4. Presión en el encofrado (adaptado de [12])

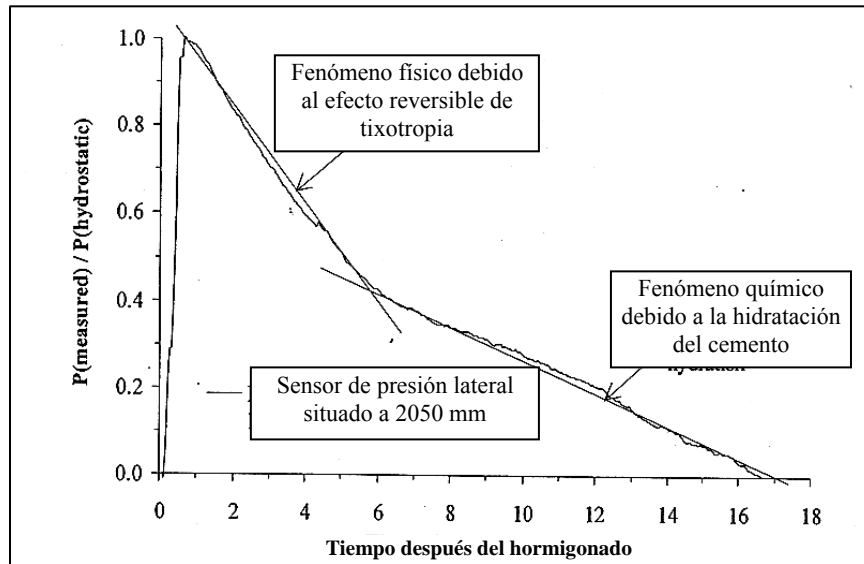


Fig. 5. Presión en el encofrado – Tixotropía (adaptado de [49])

## Capítulo 5 - APLICACIONES

### 5.1 Generalidades

Las primeras aplicaciones de HAC se llevaron a cabo a comienzos de los años 90 en Japón, con el objeto de salvar inconvenientes relacionados con la dificultad de acceso y problemas de congestión de armaduras.

Su uso se extendió durante el desarrollo de los años 90 a otros países (Suecia, Francia) debido especialmente a los beneficios derivados del incremento en la productividad, reducción de costos totales (mano de obra, equipos, etc.), y mejoras en el ambiente de trabajo (reducción de ruidos, vibración, polvo etc.). Sumado a las ventajas citadas, se deben mencionar la calidad de las superficies terminadas como así también la homogeneidad y mejoras de las propiedades en estado endurecido (resistencia, durabilidad).

A comienzos del año 2000 se extendió a otros países de Asia, Europa y América. Las principales aplicaciones de los HAC hasta la fecha se pueden resumir en:

- ✓ Puentes
- ✓ Túneles
- ✓ Columnas y tabiques de construcciones civiles
- ✓ Elementos premoldeados

A continuación se presentan algunas de las experiencias donde fueron utilizados.

### 5.2 Experiencia internacional

#### 5.2.1 Túneles

El llenado de las calotas de túneles presenta serias dificultades en lo referente a la colocación y compactación cuando son utilizados HC. El uso de los HAC en este tipo de obras resuelve fácilmente los problemas tradicionales mediante procesos constructivos que, además, aseguran una mejor calidad.

En las Fotos 10 y 11 se pueden observar dos modalidades para realizar el llenado de los encofrados curvos de los túneles. La Figura 6 muestra el esquema de llenado de un túnel realizado en Suecia desde múltiples posiciones de hormigonado (Sodra Lanken Project).

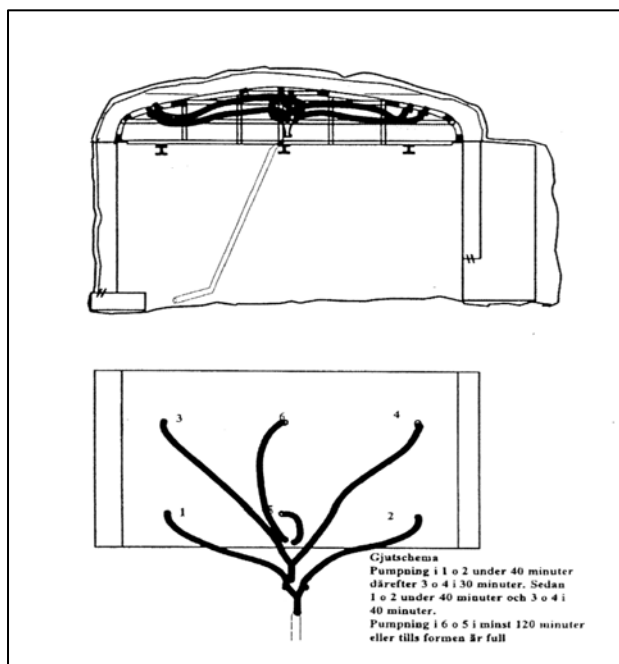


Foto 10. HAC en túneles con acceso exterior.



Foto 11. HAC en túneles con acceso interior.





**Fig.6. Esquema de llenado de un túnel.**

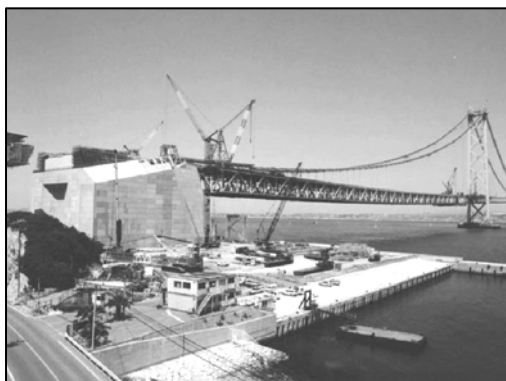
### 5.2.2 Puentes y Otras Estructuras civiles

En la actualidad es posible encontrar ejemplos de aplicación de estos hormigones en prácticamente todas las obras civiles. Se han construido puentes y tableros para puentes como así también se utilizó HAC en la construcción de muelles. Como obras paradigmáticas pueden citarse 2 grandes proyectos realizados en Japón. En primer lugar un tanque de almacenamiento de gas de 12000 m<sup>3</sup> de HAC clase H-60. Como aspecto singular de esta obra, puede citarse el hecho que fue posible una comparación directa del desempeño del HAC frente a un tanque similar realizado con HC, obteniéndose con el primero (HAC) reducciones de 4 meses en el tiempo de ejecución de la obra y ahorros del 8% en el costo global del proyecto (Foto 12).



**Foto 12. Tanque de gas en Osaka, Japón.**

En segundo término se destaca la utilización de HAC para construir los anclajes del puente suspendido más largo del mundo. Los anclajes del puente Akashi-Kaikyo, cuya luz libre es del orden de 1900 metros, fueron construidos utilizando cerca de 500.000 m<sup>3</sup> de HAC (Foto 13). En este caso la utilización de HAC resultó en un ahorro del período constructivo del orden del 20 %, de 2,5 años a 2 años.



**Foto 13- Anclajes puente Akashi-Kaikyo, Japón.**

### **5.3 Elementos premoldeados**

En los últimos años se incrementó notablemente el uso de HAC en las industrias de elementos premoldeados. Ya existen varios ejemplos de utilización en distintos países, en algunos de los cuales varias plantas han cambiado totalmente la utilización de HC por HAC [50][51][52].

La disminución de los tiempos de ejecución (permitiendo una mayor reutilización de los encofrados), las mejoras en el ambiente de trabajo (con menor emisión de ruidos, vibración y polvo), la homogeneidad conseguida en elementos densamente armados y de difícil acceso y la calidad de la terminación superficial favorecieron esta tendencia.

Otras ventajas que pueden citarse son la eliminación de elementos aislantes de vibración, estructuras para el soporte de los moldes más simples debido a la eliminación de vibración, obtención de colores más uniformes (elementos pigmentados), mayor flexibilidad de formas y elementos más esbeltos, entre otros [50].

Los antecedentes citados muestran en todos los casos, además de las ventajas técnicas detalladas, interesantes ahorros de costos.

## **PARTE II**

### **PROGRAMA EXPERIMENTAL**

## Capítulo 6 - MATERIALES UTILIZADOS Y CONSTRUCCION DE EQUIPOS ESPECIALES

### 6.1 Materiales

Para el estudio fueron utilizados materiales de uso habitual en el mercado del hormigón elaborado en el ámbito de la Capital Federal y Gran Buenos Aires.

Como agregado grueso se utilizó una piedra partida granítica de la zona de Olavarría (Pcia. De Buenos Aires) de tamaño máximo 13.2 mm y 19 mm con una densidad aproximada de 2.72 / 2.74 kg/dm<sup>3</sup>.

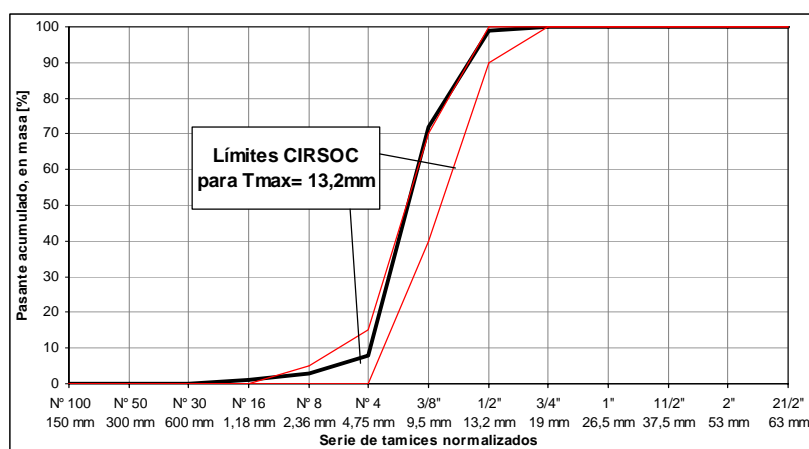
A continuación por Tablas 3 - 4 y Figuras 7 - 8 se muestran las características de los mismos.

**Tabla 3. Características del agregado grueso TMA 13,2 mm**

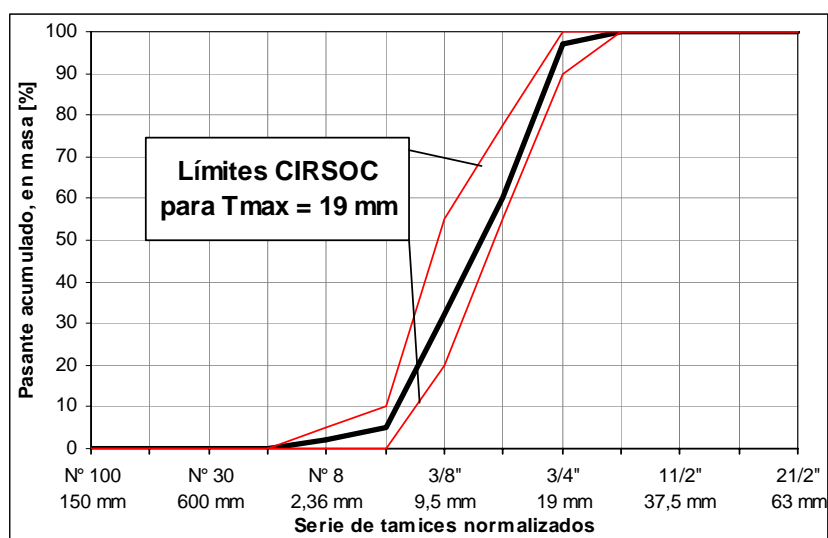
Ensayos	Valor	Unidad
Densidad Relativa Agregado SSS (IRAM 1533)	2,72	Kg/dm <sup>3</sup>
Densidad Relativa Agregado seco a peso constante (IRAM 1533)	2,71	Kg/dm <sup>3</sup>
Absorción de agua 24 horas (IRAM 1533)	0,40	(%)

**Tabla 4. Características del agregado grueso TMA 19 mm**

Ensayos	Valor	Unidad
Densidad Relativa Agregado SSS (IRAM 1533)	2,74	Kg/dm <sup>3</sup>
Densidad Relativa Agregado seco a peso constante (IRAM 1533)	2,73	Kg/dm <sup>3</sup>
Absorción de agua 24 horas (IRAM 1533)	0,20	(%)



**Fig.7. Curva granulométrica del agregado grueso, TMA 13,2 mm**



**Fig.8. Curva granulométrica del agregado grueso, TMA 19 mm**

El agregado fino utilizado se obtuvo por una mezcla de una arena fina del Río Paraná de módulo de finura 1.82 y una arena gruesa del Río Uruguay de módulo de finura 3.15. La mezcla de arenas resultante para las distintas dosificaciones tuvo un módulo de finura de 2.3 / 2.4 aproximadamente. Ambas arenas tienen una densidad de 2.63 / 2.64 kg/dm<sup>3</sup>.

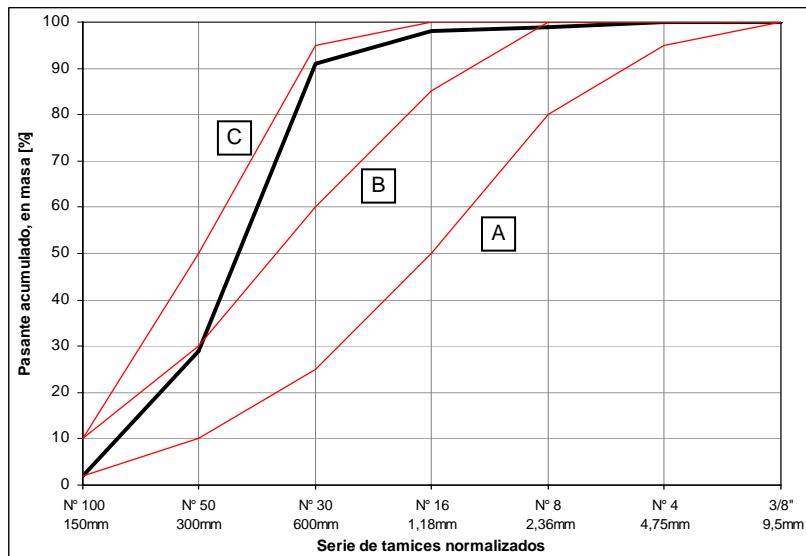
A continuación por Tablas 5 - 6 y Figuras 9 - 10 se muestran las características de las mismas.

**Tabla 5. Características de la arena fina.**

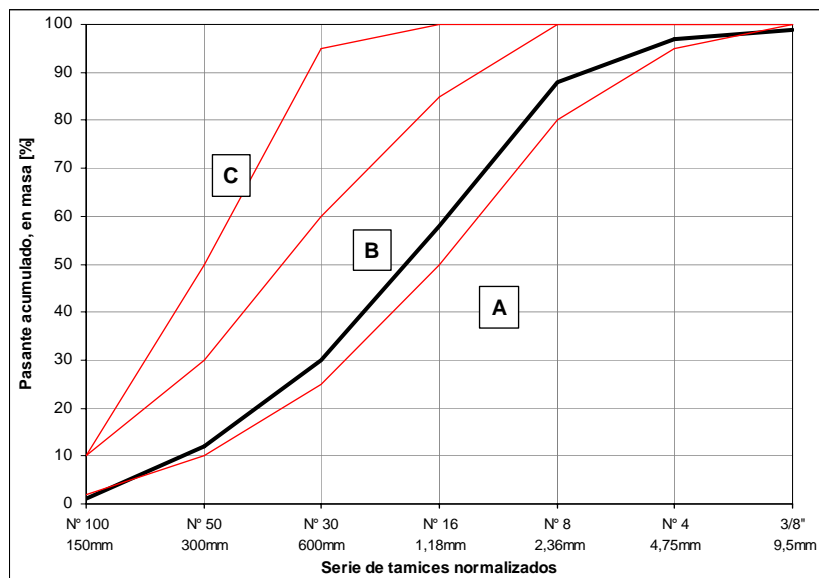
Ensayos	Valor	Unidad
Densidad Relativa Agregado SSS (IRAM 1520)	2,64	Kg/dm <sup>3</sup>
Densidad Relativa Agregado seco a peso constante (IRAM 1520)	2,63	Kg/dm <sup>3</sup>
Absorción de agua 24 horas (IRAM 1520)	0,20	(%)

**Tabla 6. Características de la arena gruesa.**

Ensayos	Valor	Unidad
Densidad Relativa Agregado SSS (IRAM 1520)	2,63	Kg/dm <sup>3</sup>
Densidad Relativa Agregado seco a peso constante (IRAM 1520)	2,62	Kg/dm <sup>3</sup>
Absorción de agua 24 horas (IRAM 1520)	0,40	(%)



**Fig.9. Curva granulométrica de la arena fina.**



**Fig.10. Curva granulométrica de la arena gruesa.**

Para la mayor parte de las mezclas diseñadas, fueron utilizados dos tipos de cemento Portland, un cemento Portland Normal (CPN40) y un cemento Portland Compuesto (CPC40) con adición de filler calcáreo y escoria granulada de alto horno, de acuerdo a la norma IRAM 50000. Para el estudio de curado a vapor se utilizó un cemento de alto horno (CAH40) según norma IRAM 50001. A continuación por Tabla 7 se muestran algunas características de los mismos (el CAH se detallará en el Capítulo 13).

**Tabla 7. Características de los cementos utilizados.**

Identificación	Superficie específica [m <sup>2</sup> /kg]	Resistencia mecánica			Peso Específico [kg/dm <sup>3</sup> ]
		2 días [MPa]	7 días [MPa]	28 días [MPa]	
CPN40	290	17.4	30.4	44.3	3.12
CPC40	420	15.0	32.6	47.8	3.05

Además, como agregado extra fino se utilizó Filler Calcáreo con una finura Blaine de 581 m<sup>2</sup>/kg y una densidad de 2.74 kg/dm<sup>3</sup>. En una etapa posterior se utilizó también escoria granulada de alto horno clasificada como Grado 100 de acuerdo a ASTM C 989, con una finura de 490 m<sup>2</sup>/kg., un índice de vitrificación de 98 % y una densidad de 2.91 kg/dm<sup>3</sup>.

En el caso de los aditivos se utilizaron en primera instancia 6 tipos de reductores de agua de alto rango (SP) del tipo policarboxilatos y un AMV. Estos aditivos forman parte de los denominados de cuarta generación, con rangos de reducción del contenido unitario de agua de hasta 35%, de acuerdo a la información proporcionada por los fabricantes. Las principales características de los mismos se resumen en la Tabla 8.

**Tabla 8 - Características de los aditivos químicos utilizados.**

Marca	Producto	Base química	Densidad	Rango de reducción de agua	Dosis recomendada [%CUC]	Denominación
A	Superfluidificante	Policarboxilato	1.06	10-35	0,2 - 0,7	A
B	Superfluidificante	Naftaleno	1.20	5-20	0,8 - 2,0	B1
B	Superfluidificante	Policarboxilato	1.11	10-35	0,6 - 1,5	B2
C	Superfluidificante	Policarboxilato	1.10	10-35	0,5 - 0,8	C1
C	Superfluidificante	Policarboxilato	1.05	10-25	0,5 - 1,5	C2
C	Modificador de viscosidad	Celulósico	1.20	--	0,3 - 1,5	V
C	Superfluidificante	Policarboxilato	1.10	10-35	0,5 - 0,8	C3

## 6.2 Construcción de equipos

Dado que para el diseño de las mezclas se adoptó como base el método general de Okamura [1] (ver Capítulo 7), para caracterizar y evaluar los HAC en estado fresco se construyeron los equipos utilizados por dicho método y que fueron descritos en el Capítulo 2 (Fotos 1-4-5-6-7-8). Por otra parte, dichos equipos son los de uso más difundido a nivel internacional y la mayoría de ellos son utilizados para la evaluación de las propiedades en los distintos métodos de diseño existentes, tal como se mencionó en la descripción de los mismos en el Capítulo 3.

Existen otros equipos diferentes a los mencionados, cuyas características se pueden obtener de la bibliografía consultada [11][14]. Por lo tanto, los equipos construidos en función de las razones expuestas, fueron los siguientes:

- V-Funnel para morteros
- Molde troncocónico para el Flow Test de morteros
- V-Funnel para hormigones
- Placa para Slump Flow Test en hormigones (extendido)
- U-Test
- L-Box

## Capítulo 7 - ETAPAS DEL DISEÑO DE MEZCLAS

### 7.1 Introducción

Al momento del inicio de los estudios, el método de diseño más difundido y pionero en el tema era el método general de la Universidad de Tokio [1]. Por tal motivo se adoptó al mismo como base para el diseño de las mezclas.

Como modificación inicial al método, se planteó el estudio de la compatibilidad de los aditivos y cementos a utilizar. Adicionalmente se realizó la determinación de la dosis de saturación para los aditivos finalmente seleccionados.

También se verá como, conforme a los resultados obtenidos en las distintas etapas, se fueron realizando otras modificaciones al método descrito.

Los pasos seguidos se detallan en los puntos siguientes.

### 7.2 Compatibilidad cemento - aditivo superfluidificante

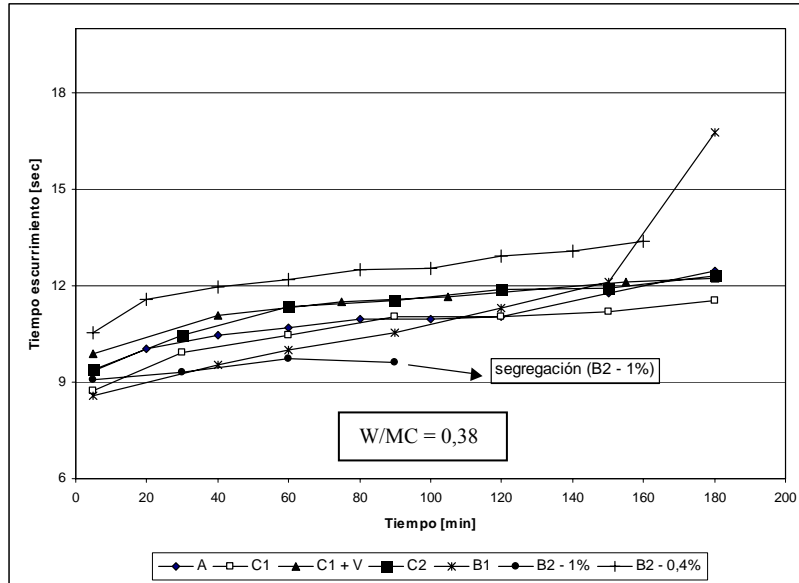
La compatibilidad entre aditivo superfluidificante y cemento fue evaluada de acuerdo al método propuesto por Aitcin [53]. En nuestro país el procedimiento fue estudiado por el Instituto del Cemento Portland Argentino [54]. Este método se planteó para poder seleccionar el aditivo que mejor se comporte con los cementos utilizados.

El método consiste en medir el tiempo que tarda en fluir 1 litro de pasta (cemento + agua + aditivo en estudio) por el denominado Cono de Marsh (Foto 14) con una boquilla de 5 mm de diámetro. Se analiza el tiempo de escurrimiento y la pérdida de fluidez en el tiempo para una relación W/MC predeterminada. En las Figuras 11 y 12 puede observarse el comportamiento del CPN y del CPC con los aditivos estudiados para una relación W/MC de 0.38 en peso. La dosis de aditivo utilizada inicialmente es la recomendada por cada fabricante.

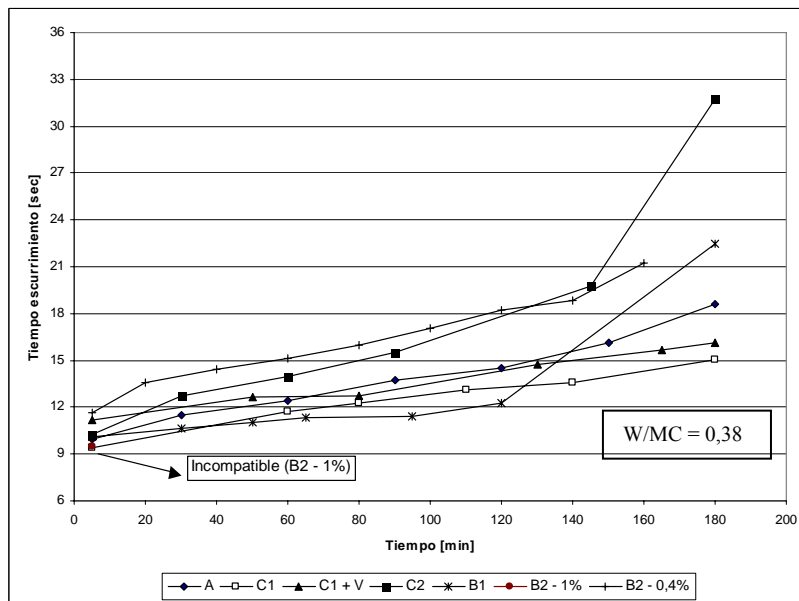


Foto 14- Ensayo de compatibilidad cemento – aditivo superfluidante.





**Fig.11. Compatibilidad con Cemento Normal.**



**Fig.12. Compatibilidad con Cemento Compuesto.**

El mezclado de los componentes se realizó con una licuadora de las que se utilizan en forma doméstica, puesto que es necesario un mezclado enérgico inicial, y luego se mantuvo agitada la mezcla a velocidad lenta con una mezcladora marca Hobart hasta la siguiente determinación.

Respecto de las combinaciones ensayadas, es válido realizar la siguiente aclaración:

- El aditivo B2 fue ensayado en primera instancia con una dosis de 1% (según la hoja técnica del fabricante). El comportamiento en pasta con esta dosis de aditivo no fue satisfactorio con CPN y CPC. Dicho comportamiento estuvo caracterizado por una segregación notable del agua respecto de los sólidos para el caso de CPN, y en un endurecimiento prematuro con elevación rápida de temperatura para el caso de CPC.

Se consultó con el fabricante y a sugerencia del mismo se repitió el ensayo con una dosis de 0,4% (menor que la dosis mínima indicada en la hoja técnica). Si bien en este caso el comportamiento mejoró, fue siempre inferior al resto de las combinaciones de aditivos estudiadas.

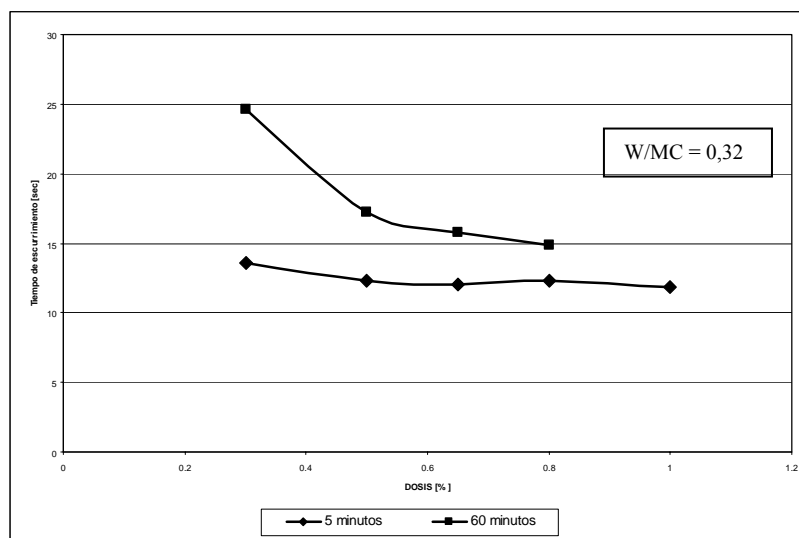
El análisis de los resultados se realiza teniendo en cuenta el tiempo de escurrimiento y el mantenimiento del mismo en el tiempo. Es decir, se selecciona la combinación que resulte con menor tiempo de escurrimiento y que lo mantenga por mayor tiempo. En base a los resultados obtenidos se puede concluir lo siguiente:

- ✓ Los aditivos C1 (sólo o combinado con el aditivo V) y A presentaron un muy buen comportamiento con los CPN y CPC. De los dos aditivos, el C1 muestra un comportamiento levemente superior.
- ✓ Los aditivos C2 y B1 mostraron comportamientos inferiores.
- ✓ El aditivo B2 utilizado con la dosis de 1% no mostró compatibilidad con los CPN y CPC.
- ✓ El aditivo B2 utilizado con la dosis de 0.4% tuvo un comportamiento bastante inferior respecto de los demás aditivos ensayados.
- ✓ Se selecciona el aditivo C1 (sólo o combinado con V) para continuar con los ensayos en morteros y hormigones. El aditivo C3 es el mismo C1, pero con menor capacidad de incorporación de aire (con un anti - espumígeno). Ambos con igual comportamiento desde el punto de vista de su compatibilidad con los cementos.

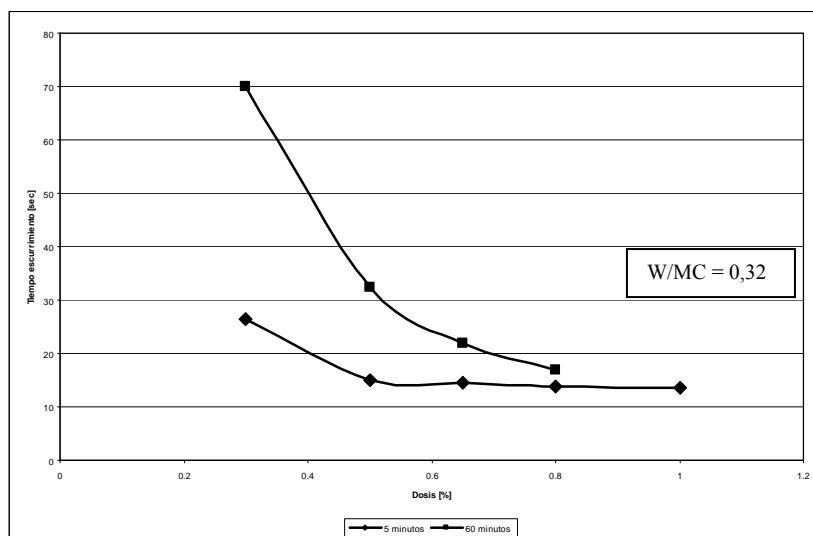
Con el aditivo a utilizar ya seleccionado se determinó la dosis de saturación del mismo con el CPN y CPC.

Si se mantiene fija la relación agua/cemento y se varía la dosis de aditivo, puede obtenerse la dosis de saturación correspondiente al conjunto aditivo-cemento.

En las Figuras 13 y 14 se pueden observar las curvas para los dos cementos. Para el ensayo se utilizó una relación agua/cemento de 0.32.



**Fig.13. Dosis de Saturación (Cemento Normal + Aditivo C1)**



**Fig.14. Dosis de Saturación (Cemento Compuesto + Aditivo C1)**

El objetivo es encontrar la dosis de saturación, es decir, aquella dosis que al ser superada no produce ningún incremento en la fluidez de la pasta.

Para ello se mide el tiempo de escurrimiento por el cono de Marsh a los 5 y 60 minutos de la puesta en contacto entre el agua y el cemento.

Las figuras mencionados permiten obtener el valor de la dosis de saturación. Respecto de la compatibilidad mostrada por ambos cementos con el aditivo elegido y de acuerdo a la bibliografía consultada [53][55], se puede decir que presentan un comportamiento intermedio entre lo que se define como compatibilidad total e incompatibilidad.

La compatibilidad total se pone de manifiesto cuando la curva de 5 minutos se asemeja mucho a la de 60 minutos y el punto de saturación queda claramente definido.

En base a lo observado en los gráficos correspondientes puede decirse que:

- ✓ Para ambos cementos la dosis de saturación varía entre 0.6% y 0.65% (en peso del cemento).
- ✓ Se confirma que existe una buena compatibilidad entre los dos tipos de cemento y el aditivo seleccionado.

### 7.3 Estudios sobre morteros

Una vez establecido el par aditivo SP – cemento, la siguiente etapa consistió en la obtención de un mortero con adecuadas características de fluidez y viscosidad.

Para ello se siguieron las recomendaciones hechas por Okamura [1] en su propuesta como método de dosificación.

En dicho método se utilizan dos ensayos que tienen buena correlación con los dos parámetros reológicos característicos según se detalló en el Capítulo 1: el “yield stress” ( $\tau_0$ ) y la viscosidad plástica ( $\mu'$ ). Dichos ensayos se describen a continuación.

- El extendido, que consiste en llenar sin compactación un tronco de cono (diámetro menor: 70 mm; diámetro mayor: 100 mm; altura: 60 mm) con el mortero en estudio y medir el diámetro de la mezcla extendida luego de retirarlo. Este ensayo presenta una buena correlación con el “yield stress” y Okamura propuso en su método de dosificación la obtención de un extendido de 24,5 cm aproximadamente ( $\Gamma_m = 5$ ), necesario para obtener las características deseadas.

Siendo:

$$\Gamma_m = \left( \frac{\text{Diámetro extendido}^2}{100} \right) - 1$$

- El denominado “V-Funnel” para mortero, que se realiza con un equipo similar al correspondiente a hormigón [sección transversal superior: 30 mm x 270 mm; sección transversal inferior: 30 mm x 30 mm; altura: 300 mm (240 + 60)]. El ensayo consiste en llenar con mortero el equipo y medir el tiempo que tarda en pasar la mezcla desde la apertura de la compuerta inferior. Este segundo ensayo en mortero tiene una correlación con la viscosidad plástica. En este caso Okamura propuso la obtención de un tiempo de pasaje de 10 segundos ( $R_m = 1$ ).

Siendo:

$$R_m = \frac{10}{\text{Tiempo pasaje (seg)}}$$

El objetivo, entonces, consistió en obtener un mortero con las características mencionadas de fluidez y viscosidad, conforme a lo propuesto por el método.

Las variables estudiadas para obtener los requisitos planteados fueron las siguientes:

- A.- La dosis de aditivo SP, que actúa casi exclusivamente sobre la fluidez (“yield stress”).
- B.- La utilización de dos componentes para poder modificar la viscosidad plástica de la mezcla. En primer lugar, la utilización de un AMV (a pesar que no está considerado su utilización en el método original) y en segundo lugar el empleo de una adición como el filler calcáreo (considerado solo en una versión posterior del método [17]).
- C.- La relación W/MC o W/P según corresponda, que tienen influencia sobre ambos parámetros. La influencia de la relación W/P es importante recalcarla, ya que un aumento de la misma se refleja en una disminución del “yield stress” (es decir, mayor fluidez) y al mismo tiempo favorece la segregación (disminuye la viscosidad plástica).

Por lo tanto se buscaron, por medio de la elaboración de pastones de prueba, distintas combinaciones de las variables planteadas (dosis de SP y AMV, % de filler calcáreo, relación W/P) con el objeto de obtener los parámetros de diseño planteados por el método (es decir,  $\Gamma_m = 5$  y  $R_m = 1$ ).

Como constante en cada tipo de mortero se utilizó una relación volumétrica del agregado fino respecto del mortero de 0.40, entendiéndose como relación volumétrica al cociente entre el volumen de agregado fino y el volumen de mortero excluyendo el aire.

El valor de 0.40 se corresponde con lo investigado por Okamura, que señaló que una relación mayor a 0.50 trae aparejados riesgos de bloqueo y excesiva viscosidad plástica.

Se obtuvieron, por lo tanto, morteros autocompactantes con las dos variantes planteadas:

- Utilización de CPN y CPC combinado con un SP y un AMV.
- Utilización de CPN y CPC más filler calcáreo combinado sólo con un aditivo SP.

Como se indicó anteriormente los aditivos utilizados surgieron del estudio de compatibilidad cemento – aditivo SP (C1 y V).

### **7.3.1 Resultados de los morteros estudiados**

En la Tabla 9 se muestran 25 mezclas de mortero donde se buscó ajustar la/s dosis de aditivo/s, la relación W/P y el contenido de filler calcáreo para obtener los valores propuestos.

Del estudio surge que en general los resultados más satisfactorios (los que se acercaron en mayor medida a los parámetros buscados) se obtuvieron con las mezclas con CPC. Si bien alguna combinación con CPN se acercó a los parámetros de diseño, se optó en definitiva por seleccionar las variantes con CPC, dado que la tendencia de la industria es la producción de este tipo de cementos con adiciones. En este punto también fue importante el aspecto visual de los morteros, especialmente la conformación del borde de ataque con límites definidos y sin tendencia a la segregación. Por lo tanto los morteros que mejor se ajustaron a las pautas de diseño fueron los siguientes:

- ✓ Las mezclas M.16 y M.18 obtenidas como combinación del aditivo superfluidificante C1 y un agente modificador de la viscosidad (AMV).
- ✓ Las mezclas M.21 y M.23 obtenidas como combinación del aditivo C1 y la incorporación de filler calcáreo.

Esto permitió definir en primera instancia las dosis de aditivos, el porcentaje de filler y la relación W/P y obtener así un punto de partida para comenzar los ajustes en hormigón. En efecto, las variables mencionadas y utilizadas finalmente en hormigón se ajustaron en forma bastante aproximada a lo obtenido en la etapa previa de estudio sobre mortero (para el AMV la dosis resultó algo inferior a la del mortero). La relación W/MC o W/P según corresponda, puede requerir un ajuste en función del nivel de resistencia especificado.

**Tabla 9 – Ensayos en Morteros**

Identificación	Tipo de cemento	Relación agua/polvo	%Filler	%Arena (Fina/Gruesa)	Aditivo 1		Aditivo 2		Flow Test		V-Funnel	
		en peso			Marca	Dosis [%]	Marca	Dosis [%]	[cm]	Gm	[seg]	Rm
M.1	Normal	0.35	0	40 (50/50)	--	--	--	--	10.0	0.00	30.15	0.33
M.2	Normal	0.40	0	40 (50/50)	--	--	--	--	15.2	1.31	4.25	2.35
M.3	Normal	0.32	0	40 (50/50)	C1	0.60	--	--	31.5	8.92	2.84	3.52
M.4	Normal	0.27	0	40 (50/50)	C1	0.60	--	--	15.6	1.43	7.36	1.36
M.5	Normal	0.27	0	40 (30/70)	C1	0.60	--	--	21.3	3.54	5.86	1.71
M.6	Normal	0.28	0	40 (30/70)	C1	0.60	--	--	22.8	4.20	4.27	2.34
M.7	Normal	0.28	0	40 (30/70)	C1	0.70	--	--	28.7	7.24	3.16	3.16
M.8	Normal	0.24	0	40 (30/70)	C1	0.80	--	--	15.5	1.40	12.55	0.80
M.9	Normal	0.23	0	40 (30/70)	C1	0.70	--	--	10.3	0.06	11.54	0.87
M.10	Normal	0.32	0	40 (30/70)	C1	0.50	--	--	28.3	7.01	2.16	4.63
M.11	Normal	0.32	0	40 (30/70)	C1	0.50	V	0.96	15.5	1.40	77.84	0.13
M.12	Normal	0.28	34	40 (30/70)	C1	0.50	--	--	21.8	3.75	4.52	2.21
M.13	Normal	0.28	39	40 (30/70)	C1	0.50	--	--	22.8	4.20	5.31	1.88
M.14	Normal	0.30	40	40 (40/60)	C1	0.40	--	--	24.3	4.90	5.72	1.75
M.15	Normal	0.27	43	40 (40/60)	C1	0.45	--	--	22.6	4.11	10.24	0.98
M.16	Compuesto	0.38	0	40 (30/70)	C1	0.65	V	1.44	24.5	5.00	7.80	1.28
M.17	Normal	0.38	0	40 (30/70)	C1	0.60	V	0.96	24.0	4.76	5.11	1.96
M.18	Compuesto	0.38	0	40 (30/70)	C1	0.60	V	1.44	23.3	4.43	9.64	1.04
M.19	Normal	0.40	0	40 (30/70)	C1	0.60	V	1.44	24.7	5.10	5.42	1.85
M.20	Normal	0.40	0	40 (30/70)	C1	0.60	V	1.20	25.5	5.50	4.54	2.20
M.21	Compuesto	0.27	30	40 (40/60)	C1	0.45	--	--	23.0	4.29	10.24	0.98
M.22	Compuesto	0.30	29	40 (40/60)	C1	0.45	--	--	27.5	6.56	3.19	3.13
M.23	Compuesto	0.30	29	40 (40/60)	C1	0.40	--	--	24.5	5.00	5.72	1.75
M.24	Compuesto	0.30	29	40 (40/60)	C1	0.35	--	--	23.8	4.66	6.76	1.48
M.25	Compuesto	0.30	29	40 (40/60)	C1	0.50	--	--	29.5	7.70	2.75	3.64

## 7.4 Estudios sobre hormigones

### 7.4.1 Contenido de agregado grueso y relación Ag. Fino/ Ag. Total

Para la determinación del contenido de agregado grueso, el método de Okamura propone que la relación volumétrica relativa del agregado grueso (denominada G/Glim) debe ser 0.50 (50 % del volumen sólido). Esta relación nos permite obtener el volumen de agregado grueso por metro cúbico de hormigón (G). Como el valor de Glim es la relación entre el peso unitario volumétrico compactado y el peso específico, el volumen de agregado grueso (G) debería ser, para el caso de la piedra partida utilizada, de 260/270 litros por metro cúbico de hormigón. Este valor es significativamente menor al de un hormigón convencional que oscila entre los 370 y 420 litros por metro cúbico.

Por consiguiente, el estricto seguimiento de los lineamientos propuestos por el método de Okamura, ha permitido concluir que la mezcla resulta antieconómica y con un contenido muy elevado de pasta (reducido volumen de agregados), con el consiguiente riesgo de inestabilidad volumétrica en estado endurecido.

Teniendo en cuenta lo antedicho y recogiendo la experiencia de otros países (en Europa, EE.UU y Asia) [11][12][18][19][20][21][22][23][56][57], se incrementó el contenido de agregado grueso entre un 15% y un 30% respecto del resultado que surge del cumplimiento del método de general. De este modo se disminuyó el contenido de pasta y luego se verificó que con dichos contenidos se satisfacen los requerimientos de los ensayos del hormigón en estado fresco (extendido, V-Funnel, L-Box).

Conforme a la metodología detallada, se planteó el siguiente objetivo para esta etapa:

***Obtener hormigones autocompactantes de clases resistentes similares con las dos variantes ajustadas en mortero, es decir, una combinación de un superfluidificante con un modificador de la viscosidad (SP + AMV) y la utilización de un superfluidificante con la adición de filler calcáreo como agregado extra fino (SP + Filler).***

Como paso previo a la realización de las mezclas de hormigón, se realizó la determinación de la relación Ag. Fino /Ag. Total, en peso, que diera como resultado la menor cantidad de vacíos. Para los agregados y combinaciones utilizados (relación arena fina/ arena gruesa entre 40/60 y 50/50, TMA 12.5 mm y 20 mm), dicha relación resultó entre 0.50 y 0.53. Este valor se mantuvo aproximadamente constante para todas las mezclas realizadas.

El peso unitario volumétrico necesario para la obtención del contenido de vacíos, se determinó en la condición seco y suelto.

Este paso es similar al propuesto recientemente en [21], detallado en el Capítulo 3, Punto 3.7.

### 7.4.2 Mezclas estudiadas

El estudio en hormigones se realizó únicamente con CPC, dejando de lado la utilización de CPN. Esto surgió como consecuencia de dos razones:

- Los resultados de la fase mortero detallados en el Punto 7.3.1.
- La tendencia de la industria del cemento en el sentido de incrementar la producción del cemento compuesto en detrimento de los cementos sin adiciones.

La Tabla 10 muestra las dosificaciones realizadas con dos tipos de combinaciones de materiales componentes, a saber:

- CPC combinado con dos aditivos, un SP (seleccionado del estudio de compatibilidad) y un AMV (como control de la segregación).
- CPC con la adición de filler calcáreo con la utilización de un aditivo SP y (opcionalmente) un AMV.

El análisis de resultados se hará tomando como referencia dos mezclas elaboradas con CPC con las dos combinaciones mencionadas anteriormente, comparándolas con un hormigón patrón de similares niveles resistentes.

Asimismo, estas dos mezclas se reprodujeron posteriormente a escala industrial, observándose su comportamiento mediante el llenado de dos tabiques experimentales.

Los dos hormigones mencionados se identifican en la Tabla 10 como HACV y HACF. Los hormigones convencionales tomados como referencia se denominan REF1 y REF2. La mezcla denominada REF1 se utilizó como referencia cuando se analiza el comportamiento resistente, mientras que la mezcla REF2 se adoptó para la comparación en los aspectos relacionados con la durabilidad del hormigón.

**Tabla 10 - Dosificaciones con CPC40**

Identificación		HACV	HACF	REF1	REF2
Cemento	Tipo	Compuesto	Compuesto	Compuesto	Compuesto
	Contenido [kg/m <sup>3</sup> ]	430	370	380	422
Filler Calcáreo	Contenido [kg/m <sup>3</sup> ]	0	240	0	0
Agua	Contenido [lts/m <sup>3</sup> ]	190	173	164	169
Relación W/MC	En peso	0.44	0.47	0.43	0.40
	En volumen	1.35	1.43	1.34	1.22
Relación W/P	En peso	0.44	0.28	0.43	0.40
	En volumen	1.35	0.83	1.34	1.22
Agregado Fino	Contenido [kg/m <sup>3</sup> ]	900	762	810	772
Agregado Grueso	Contenido [kg/m <sup>3</sup> ]	810	840	1016	1010
TMA	[mm]	12.5	12.5	19.0	19.0
Relación Arena Fina/Gruesa		40-60	50-50	50-50	50-50
Aditivo 1	Marca	C1	C1	C (Fluidificante)	--
	Dosis [%Polvo]	0.65	0.55	0.35	--
Aditivo 2	Marca	V	V	--	--
	Dosis [%Polvo]	0.78	0.06	--	--
Slump Flow Test / Asentam.	[cm]	68.0	67.0	As = 16	As = 7,5
T50	[seg]	4.40	2.8	--	--
U-Test	[cm]	34.5	34.0	--	--
L-Box	H2/H1	0.93	0.96	--	--
	T20 [seg]	1.2	0.9	--	--
	T40 [seg]	2.9	1.9	--	--
V-Funnel	[seg]	7,8 ± 1,0	7,0 ± 0,4	--	--
Aire	[%]	1.7	1.3	3.0	2.5
PUV	[kg/m <sup>3</sup> ]	2361	2383	--	--
Tiempo Fraguado	Inicial [h:m]	7:20	4:05	--	--
	Final [h:m]	8:50	5:10	--	--
V Funnel Mortero	[seg]	5.0	5.7	--	--
Flow Test Mortero	[cm]	26.0	26.7	--	--
Exudación	[%]	0.0	0.1	--	--



Todas las mezclas fueron diseñadas para que resulten hormigones de características resistentes comparables (similar clase resistente), entre 45 y 50 MPa. Por este motivo fue necesario modificar levemente las relaciones W/MC y/o W/P de ambas mezclas respecto de las que se habían obtenido en la fase mortero.

Como se adelantó, los estudios realizados en mortero permitieron ajustar en forma bastante aproximada las dosis de aditivos, contenido de filler calcáreo y relación W/MC o W/P necesarios para obtener un comportamiento óptimo desde el punto de vista del comportamiento del HAC en estado fresco.

## 7.5 Resumen

A continuación se realiza un resumen de los pasos seguidos para la dosificación, a partir del método general de la Universidad de Tokio y de las modificaciones realizadas al mismo:

- Determinación de la compatibilidad cemento - aditivo (SP y SP + AMV) y de la dosis de saturación del aditivo SP mediante el procedimiento que utiliza el Cono de Marsh.
- Estimación de las dosis de aditivos SP y AMV (expresadas en peso en relación al contenido de cemento + adición), del contenido de adiciones minerales (en este caso Filler Calcáreo) y de la relación W/P mediante el procedimiento propuesto por el método general de Okamura, a nivel mortero. Para ello se deberá cumplir que:

$$\Gamma_m = 5 \text{ y } R_m = 1 \text{ (determinados como se explicó en el Punto 7.3)}$$

- La relación W/MC o W/P puede requerir un ajuste en función de las especificaciones de resistencia y durabilidad. Se recuerda en este punto que se define como polvo a las partículas de cemento y adiciones que pasan el tamiz de 74  $\mu\text{m}$ .
- Determinación de la relación agregado fino/agregado total, en peso, que resulte con el menor contenido de vacíos de la mezcla de agregados (esto implica propiciar el menor contenido de pasta). Para ello los pesos unitarios de los agregados se determinan en la condición seco y suelto.
- Determinación del máximo contenido de agregados (o mínimo contenido de pasta) necesario para que el hormigón cumpla los requerimientos de "autocompactabilidad" mediante la comprobación con ensayos en estado fresco (extendido, V-Funnel y L-Box). De acuerdo a la experiencia con los materiales utilizados en este proyecto, dicho contenido de pasta (excluido el aire) no debe ser inferior a 340 litros/m<sup>3</sup>.

En el Capítulo 15 - Conclusiones - se resume una guía general con valores orientativos de los requisitos en estado fresco y de algunos parámetros de diseño básicos que se deben cumplir para obtener un HAC, como consecuencia de las mezclas que han presentado mejor desempeño tanto en laboratorio como en obra.

## Capítulo 8 - RESULTADOS EN ESTADO FRESCO

En este Capítulo se hace referencia a los ensayos en estado fresco realizados sobre las mezclas HACV y HACF, cuyas dosificaciones y resultados se muestran en la Tabla 10.

Los ensayos y el comentario de los resultados obtenidos se detallan a continuación:

- Ensayo de extendido. (*Slump Flow Test*)
- Tiempo transcurrido para alcanzar los 50 cm de extendido (*T50*).
- Relación de alturas en el *L-Box* (*H2/H1*)
- Tiempo transcurrido para alcanzar los 20 cm en el *L-Box* (*T20*).
- Tiempo transcurrido para alcanzar los 40 cm en el *L-Box* (*T40*).
- Altura alcanzada en el *U-Test*.
- Tiempo de escurrimiento en el *V-Funnel* de hormigones.
- Contenido de aire de la mezcla fresca (IRAM 1602).
- Determinación del peso de la unidad de volumen (IRAM 1562)
- Capacidad de exudación (IRAM 1604)
- Tiempo de fraguado (IRAM 1662)
- Evolución del *Slump Flow Test* y *T50* en el tiempo (medición cada 10 minutos), sometiendo la mezcla a velocidad de agitación (6 r.p.m.) entre cada medición.

### - Ensayo de extendido (*Slump Flow Test*)

El valor del extendido se adoptó de acuerdo a los antecedentes consultados. El entorno de valores en el cual se encuentra el requisito para el extendido es de  $65 \pm 5$  cm.

Las mezclas diseñadas en laboratorio se ajustaron para obtener un extendido dentro del rango propuesto, aunque como valores más adecuados se consideraron extendidos cercanos al límite superior (entre 67 y 70 cm).

Las dos mezclas consideradas presentaron extendidos similares del orden de los 68 cm.

### - Dosis de aditivos

#### a) Aditivo Superfluidificante (SP)

El extendido de estos tipos de hormigones es muy sensible a la acción del aditivo superfluidificante.

En las mezclas estudiadas se observa que la cantidad de aditivo por metro cúbico de hormigón es menor en el hormigón HACV ( $2.8 \text{ kg/m}^3$ ) que en la mezcla HACF ( $3.4 \text{ kg/m}^3$ ).

### *b) Aditivo Modificador de la viscosidad (AMV)*

Las dosis de este tipo de aditivo difieren significativamente entre los dos hormigones estudiados.

La mezcla HACV tiene una dosis elevada de AMV, necesaria para evitar la segregación de la mezcla. Esto se debe a que sólo tiene  $430 \text{ kg/m}^3$  de polvo, un valor escaso para estos tipos de hormigones que en general se diseñan con contenidos de polvos más elevados ( $450$  a  $600 \text{ kg/m}^3$ ).

En la mezcla HACF se utilizó una dosis muy pequeña de este aditivo para mejorar levemente la resistencia a la segregación de la misma (el uso del AMV en esta mezcla es optativo).

#### *- Segregación*

Ambas mezclas presentaron un muy buen comportamiento en este aspecto, apreciado visualmente por la uniforme distribución del agregado grueso en el ensayo de extendido y la uniformidad del borde externo en dicho ensayo.

#### *- Tiempo transcurrido para alcanzar los 50 cm de extendido (T50).*

El ensayo de T50, según los antecedentes consultados, se correlaciona en forma aceptable con la viscosidad plástica de las mezclas autocompactantes. Una mezcla que demore más tiempo en alcanzar los 50 cm de extendido será, sin duda, más viscosa que otra mezcla que demore menos tiempo.

Este parámetro permitió establecer la primera diferencia notoria entre las dos mezclas. La mezcla HACV tiene un T50 de 4.4 segundos y la mezcla HACF de 2.8 segundos. Por lo tanto la mezcla HACV resultó con mayor viscosidad que la mezcla con adición de filler, a pesar de tener extendidos similares.

#### *- Ensayo L-Box (H2/H1, T20 y T40)*

Los tiempos T20 y T40 brindan una información similar que el ensayo de T50 y los valores obtenidos para estos dos tiempos se alinean con lo mencionado en el punto anterior: la mezcla HACV presenta una mayor viscosidad.

Respecto de la diferencia de alturas medidas en los extremos del aparato (parámetro que nos permite evaluar la habilidad para sortear obstáculos de las mezclas), ambas mezclas mostraron un muy buen desempeño, con valores entre 0.93 y 0.96.

Es importante mencionar que se considera aceptable que tal relación H2/H1 sea mayor o igual a 0.80.

#### *- Altura alcanzada en el U-Test.*

Este tipo de ensayo es similar al L-Box, buscando medir de alguna forma la habilidad de las mezclas autocompactantes de sortear obstáculos o barras de armaduras. Tanto el HACV como el HACF mostraron alturas de ascenso de 34,0 cm, superando ampliamente los 30 cm establecidos como límite inferior recomendado y alcanzando prácticamente valores de autonivelación.

*- Tiempo de escurrimiento en el V-Funnel de hormigones.*

Alineándose con las determinaciones de T50, T20 y T40 (L-Box), el V-Funnel es un ensayo que nos da una idea de la viscosidad de la mezcla. Los resultados obtenidos muestran que la mezcla HACV es más viscosa (7.8 seg.) que la mezcla HACF (7.0 seg.), en forma similar a lo evidenciado con los tres ensayos mencionados anteriormente (T50, T20 y T40).

*- Contenido de aire de la mezcla fresca (IRAM 1602)*

Ambas mezclas incorporaron un contenido de aire del orden de 1.5%.

*- Capacidad de exudación (IRAM 1604)*

La capacidad de exudación de ambos hormigones es nula.

*- Tiempo de fraguado (IRAM 1662)*

Existe una diferencia importante entre las dos mezclas comparadas. En efecto, la mezcla HACV tuvo un tiempo de fraguado inicial de 7 horas y 20 minutos mientras que en el HACF el tiempo inicial fue de aproximadamente 4 horas (una diferencia de poco más de tres horas).

La tendencia observada se corresponde con lo mostrado por la bibliografía consultada. La utilización de filler calcáreo influye sobre el tiempo de fraguado del hormigón.

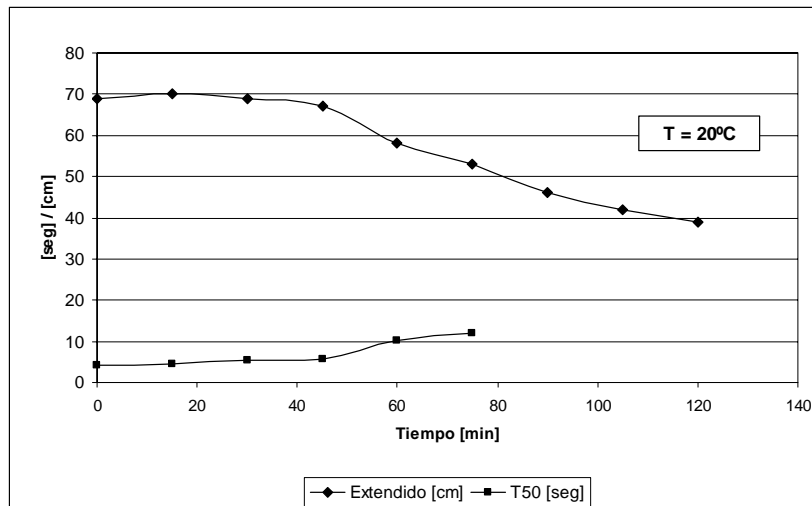
*- Evolución del Extendido y T50 en el tiempo (medición cada 10 minutos), sometiendo la mezcla a velocidad de agitación (6 rev./min) entre cada medición.*

Las Figuras 15 y 16 muestran el comportamiento de las dos mezclas estudiadas.

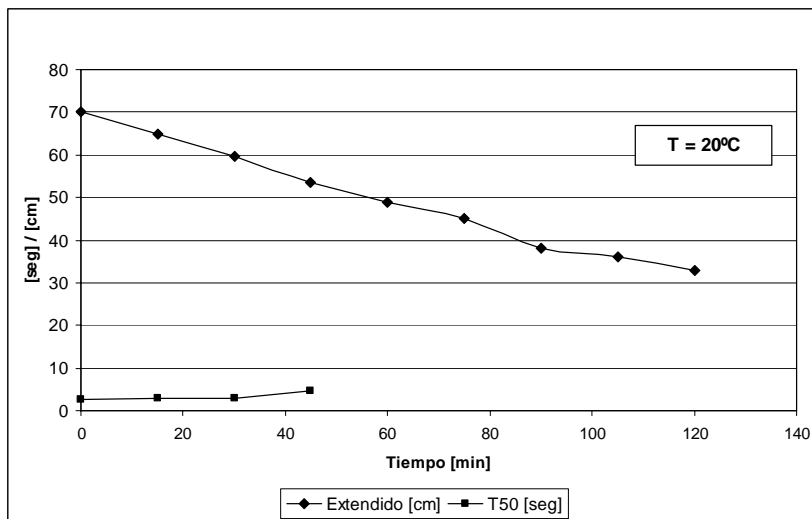
En estas figuras se observa que la mezcla HACV tiene un comportamiento superior al de la mezcla HACF (mayor mantenimiento en el tiempo).

En el caso del hormigón HACV, el extendido se encuentra en el límite inferior recomendado (60 cm) luego de transcurridos casi 60 minutos. En cambio en la mezcla HACF este límite inferior se verifica aproximadamente a los 30 minutos de iniciado el mezclado.

Posteriormente se mostrará un comportamiento muy similar de la mezcla HACF, pero ya probada a escala industrial mezclada en camión motohormigonero.



**Fig. 15 - Comportamiento en el tiempo - Hormigón HACV.**



**Fig. 16 - Comportamiento en el tiempo - Hormigón HACF**

## Capítulo 9 - RESULTADOS EN ESTADO ENDURECIDO

### 9.1 Parámetros resistentes y de deformación

Los parámetros resistentes y de deformación evaluados fueron los siguientes:

- Resistencia a compresión a 3, 7, 14, 28 y 56 días (IRAM 1546)
- Resistencia a tracción por compresión diametral a 7 y 28 días (IRAM 1658)
- Determinación del módulo de elasticidad estático (ASTM C 469-94)
- Determinación del módulo de elasticidad dinámico (IRAM 1693)
- Contracción por secado (IRAM 1597)

Para el moldeo de las probetas no se utilizó ningún tipo de vibración, ni interna ni externa, introduciendo el hormigón en los moldes con una cuchara tipo “almacenero” desde una altura que en ningún caso superó los 5 cm respecto del borde superior del molde, y procediendo luego al enrase con una llana o cuchara de albañil.

A continuación se hace un breve comentario sobre los resultados obtenidos en cada uno de los ensayos.

- *Resistencia a compresión (IRAM 1546)*

En la Tabla 11 se informan los resultados obtenidos para las dos mezclas seleccionadas comparadas con el hormigón de referencia REF.1. Se puede observar que el objetivo del diseño de ambas mezclas fue el de obtener niveles de resistencia similares que están en correspondencia, aproximadamente, con un hormigón clase H-38 según el Reglamento CIRSOC 201.

**Tabla 11. Características en Estado Endurecido.**

Identificación	HACV	HACF	REF1	
Resistencia a compresión	3 días [MPa]	25.4	27.7	--
	7 días [MPa]	34.0	39.1	36.8
	14 días [MPa]	40.4	43.4	--
	28 días [MPa]	45.7	47.6	50.3
	56 días [MPa]	48.6	50.9	--
Resistencia a tracción	7 días [MPa]	2.73	3.30	--
	28 días [MPa]	3.27	3.56	--
Relación $f_t/f'_c$	7 días	8.0%	8.4%	--
	28 días	7.2%	7.5%	--
Módulo de Elasticidad Estático	7 días [GPa]	27.8	28.7	33.9
	28 días [GPa]	31.4	32.4	37.3
Módulo de Elasticidad Dinámico	7 días [GPa]	37.0	37.9	44.6
	28 días [GPa]	40.3	40.6	47.0
Velocidad del pulso ultrasónico	7 días [m/s]	4345	4560	--
	28 días [m/s]	4520	4650	--

(\*) No se realizó el ensayo.

En la Figura 17 se observa la evolución de la resistencia en el tiempo de los dos hormigones. Se puede observar que la mezcla HACF tiene un crecimiento de resistencia a edades tempranas superior al hormigón HACV que no contiene filler calcáreo como adición.

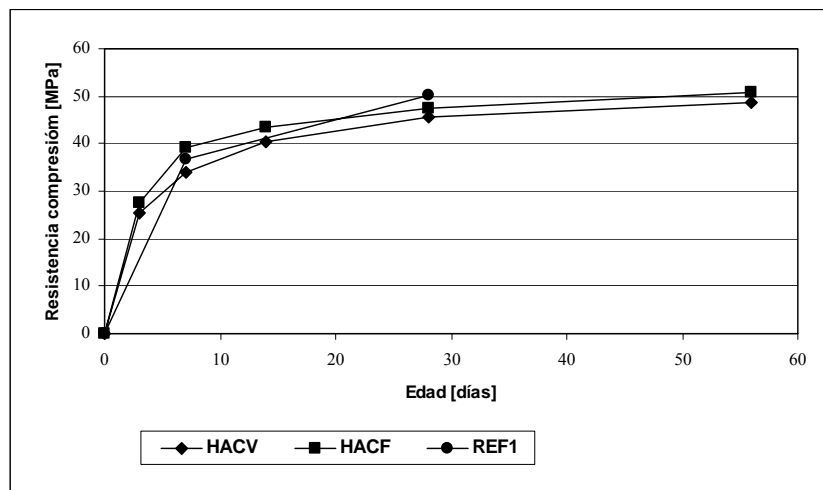


Fig. 17 - Evolución de la resistencia a la compresión

El crecimiento de resistencia de 7 a 28 días para la mezcla HACF es de casi 22%. En cambio, la mezcla HACV presenta un crecimiento superior, del orden del 35%, hecho que demuestra que la ganancia inicial de resistencia de la mezcla HACF por “efecto filler” se traduce luego en una menor ganancia de resistencia a edades tardías.

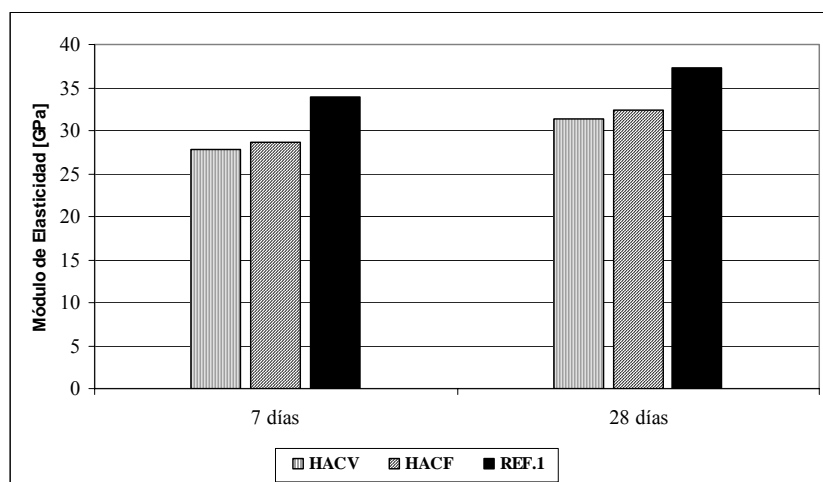
#### - Resistencia a tracción por compresión diametral (IRAM 1658)

La resistencia a la tracción por compresión diametral es superior para la mezcla HACF tanto a 7 como a 28 días.

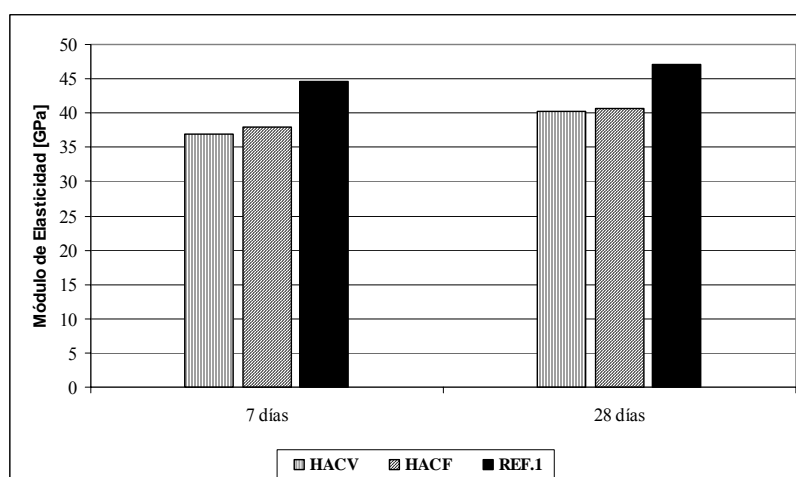
A su vez, la relación entre la resistencia a tracción por compresión diametral y la resistencia a compresión puede observarse en la Tabla 11. Esta relación se mantiene aproximadamente constante para las dos mezclas y para las dos edades evaluadas entre un 7% y un 8%.

#### - Determinación del módulo de elasticidad estático (ASTM C469) y dinámico (IRAM 1693).

En la Tabla 11 se informan los resultados obtenidos. Los módulos de elasticidad obtenidos son similares para los HAC, pudiéndose observar que a los 7 días no es tan marcado el efecto observado en el crecimiento de la resistencia a la compresión. Dichos valores resultan inferiores (en un orden cercano al 16 %) a los obtenidos con el hormigón convencional REF1 de similares características resistentes, debido al menor volumen y menor TMA de los HAC. Las Figuras 18 y 19 muestran comparativamente los resultados obtenidos.



**Fig.18 - Módulo de Elasticidad Estático.**



**Fig.19 - Módulo de Elasticidad Dinámico.**

En este punto también se comentarán los resultados correspondientes a las mezclas utilizadas para evaluar parámetros de durabilidad, detalladas en el Punto 9.2 y en la Tabla 12. Para la Serie A (niveles de resistencia entre 45 MPa y 50 MPa) se observa una disminución en el módulo de elasticidad estático en un orden cercano al 18 %, especialmente para los hormigones HACV y HACF, también influenciado por el menor contenido de agregado grueso y el menor TMA utilizado respecto del hormigón REF2.

Para la Serie B (niveles de resistencia entre 65 MPa y 70 MPa) las diferencias en el módulo de elasticidad estático entre las mezclas HAC y de referencia REF3 son similares o menores a las observadas en la Serie A (Tabla 12), un orden cercano al 7 %. Lo dicho se debe presumiblemente a que en este caso el TMA de las mezclas es similar (19 mm).

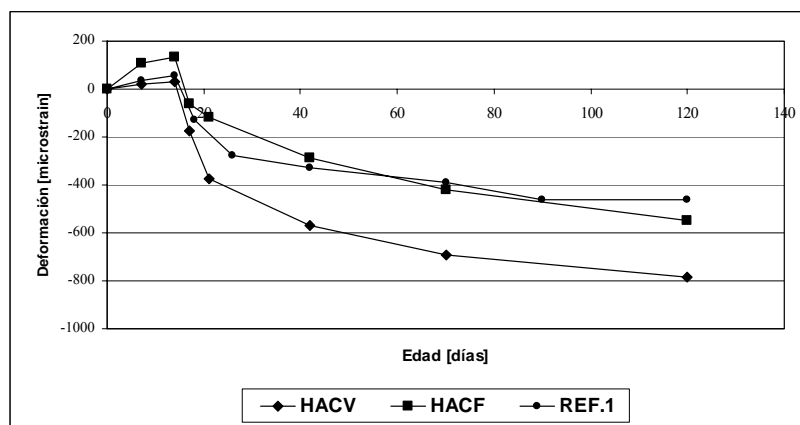


- *Velocidad del pulso ultrasónico (ASTM C597)*

Los resultados obtenidos muestran que la mezcla HACF tiene mayor velocidad de pulso ultrasónico, hecho que se comprobó posteriormente con el análisis realizado sobre el tabique experimental.

- *Contracción por secado (IRAM 1597)*

La Fig. 20 muestra la contracción de las dos mezclas autocompactantes (HACV y HACF) comparadas con el hormigón REF1.



**Fig.20 - Resultados de Contracción por Secado.**

La contracción por secado se considera fundamental en estos tipos de hormigones con bajo contenido de agregado grueso. El ensayo (teniendo como referencia la Norma IRAM 1597) consistió en moldear probetas de 75 x 75 x 250 mm que fueron curadas en cámara húmeda durante 14 días. Luego se colocaron en un ambiente seco a  $21^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$  de temperatura con una humedad relativa ambiente de  $50\% \pm 10\%$  y se determinó el cambio de longitud hasta una edad de 120 días. La lectura inicial de referencia se realizó a las 24 horas luego del moldeo y previo al curado húmedo. Esto justifica la expansión inicial que se observa en la Figura 20 debido al “hinchamiento” producido por absorción de agua.

Los resultados obtenidos muestran que el hormigón HACF tiene un comportamiento similar al de la mezcla de referencia REF1. En cambio la mezcla HACV tiene una contracción por secado sensiblemente mayor, lo cual es atribuible en principio a dos factores: en primer lugar la mezcla HACV tiene un mayor contenido unitario de agua (190 litros por metro cúbico contra 173 litros de la mezcla HACF) y en segundo lugar, dicha mezcla tiene un contenido unitario de cemento superior ( $430\text{ kg/m}^3$  contra  $370\text{ kg/m}^3$  de la mezcla HACF).

Adicionalmente es importante comentar la influencia de la relación W/P en la contracción. La mezcla HACV posee una relación W/P sensiblemente mayor y este factor también puede aumentar la contracción. El efecto de la relación W/P se puede explicar teniendo en cuenta que un aumento del contenido de polvo (menor W/P) puede ayudar a disminuir la porosidad y por lo tanto a reducir la difusión de vapor [38]. Existen antecedentes que confirman lo antedicho, mostrando que los HAC elaborados con adición de filler calcáreo de adecuada finura pueden reducir la contracción por secado [12].

## 9.2 Parámetros relativos a la durabilidad

Con el objetivo de evaluar comparativamente desde el punto de vista de la durabilidad los HAC y HC, fueron elaboradas mezclas adicionales a las ya presentadas HACV y HACF, cuyas proporciones y características en estado fresco y endurecido (resistencia y módulo estático) se muestran en la Tabla 12.

**Tabla 12 - Dosificaciones para ensayos de durabilidad.**

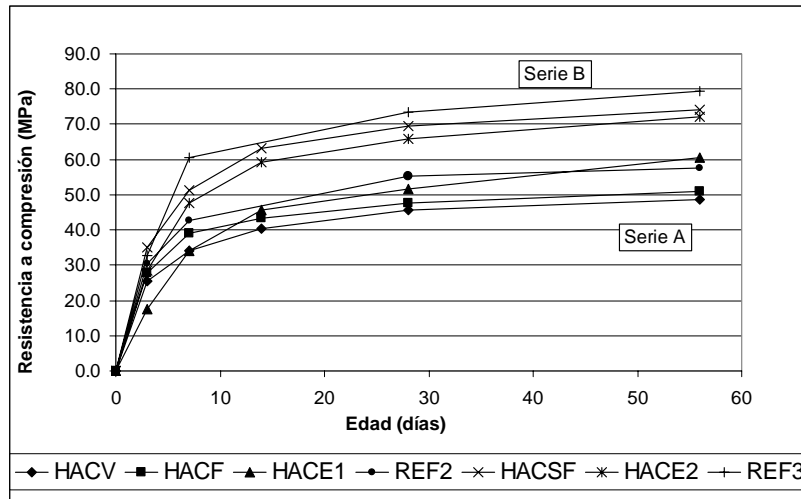
Material	Serie A				Serie B			Unidad
	HACV	HACF	HACE1	REF 2	HACSF	HACE2	REF3	
CPC40	430	370	250	420	460	350	470	kg/m <sup>3</sup>
Escoria	-	-	200	-	-	200	-	kg/m <sup>3</sup>
Filler	-	240	-	-	-	-	-	kg/m <sup>3</sup>
Humo de Sílice	-	-	-	-	25	-	-	kg/m <sup>3</sup>
W/MC	0.44	0.47	0.40	0.40	0.33	0.33	0.30	-
WP	0.44	0.28	0.40	0.40	0.33	0.33	0.30	-
Aire	1.7	1.3	2.0	2.5	3.0	1.8	3.5	%
Agregado fino	900	762	865	772	910	831	757	kg/m <sup>3</sup>
Agregado grueso	810	840	870	1010	822	822	1046	kg/m <sup>3</sup>
TMA	12.5	12.5	12.5	19.0	19.0	19.0	19.0	mm
<b>Estado Fresco</b>								
Asentamiento	-	-	-	7.5	-	-	19.5	cm
Extendido (Slump Flow)	68.0	67.0	69.5	-	69.0	67.5	-	cm
Tiempo T50	4.4	2.8	1.7	-	3.0	3.1	-	seg
Tiempo V Funnel	7.8	7.0	5.3	-	6.1	7.5	-	seg
<b>Estado Endurecido</b>								
f'c- 7 días	34.0	39.5	34.1	42.7	51.3	47.7	60.4	MPa
f'c- 28 días	45.7	47.6	50.6	55.1	69.5	65.8	73.4	MPa
E - 7días	27.8	28.7	32.7	35.6	36.5	34.2	37.6	GPa
E - 28días	31.4	32.4	37.4	38.5	42.2	37.9	40.6	GPa

Las mezclas fueron divididas básicamente en dos Series denominados A y B que se diferencian entre sí por el nivel de resistencia alcanzado a la edad de diseño (28 días).

La Serie A incluye a los dos HAC presentados (HACV y HACF), un HAC con adición de escoria (HACE1) y un hormigón de referencia (REF2), todos con niveles de 45-50 MPa a los 28 días (para REF2 el nivel es algo mayor, cercano a los 55 MPa).

La Serie B abarca a dos HAC, uno con adición de humo de sílice (HACSF), otro con adición de escoria (HACE2) y un hormigón de referencia (REF3) cuyos niveles de resistencia oscilan entre 65-70 MPa (para REF3 es cercano a los 73 MPa).

La evolución de la resistencia en el tiempo de cada uno de estos hormigones se presenta en la Figura 21 donde se observa claramente la mencionada clasificación.



**Fig. 21 - Resultados de Resistencia a Compresión.**

Los aspectos relacionados con la durabilidad de este tipo de hormigones que fueron evaluados son los siguientes:

- Permeabilidad a los cloruros (Método Rápido) (ASTM C1202-91; AASHTO 277-831)
- Perfil de penetración de cloruros (Método Normal)
- Coeficiente de succión capilar (Swiss Standard 162/1)
- Permeabilidad al aire (Método TORRENT)
- Absorción Total (ASTM 642-90)
- Comportamiento frente a ciclos de congelamiento y deshielo (ASTM C666-92)
- Penetración de agua a presión (IRAM 1554; CIRSOC 256)
- Elevación adiabática de temperatura (NT-BUILD 388)
- Contracción por secado (IRAM 1597)

Los resultados se muestran en la Tabla 13. A continuación se hace el análisis de los mismos.

**Tabla 13 – Parámetros de durabilidad**

Ensayo		Serie A				Serie B			Unidad
		HACV	HACF	HACE1	REF2	HACSF	HACE2	REF3	
Carga Pasada ASTM C1202	28 días	6605	4984	804	6034	785	1008	3324	coulomb
	56 días	5398	4502	536	4074	639	935	2687	coulomb
Coeficiente de Succión Capilar SIA 162 - a <sub>3</sub>	28 días	11.3	10.3	7.1	12.6	7.3	7.7	8.1	g/m <sup>2</sup> *seg <sup>0,5</sup>
	56 días	10.5	8.8	8.3	8.6	5.6	7.8	6.6	g/m <sup>2</sup> *seg <sup>0,5</sup>
Coeficiente de Succión Capilar SIA 162 - a <sub>24</sub>	28 días	7.2	6.8	4.4	7.4	3.7	3.9	4.4	g/m <sup>2</sup> *seg <sup>0,5</sup>
	56 días	6.4	5.6	4.0	5.2	3.1	3.7	3.9	g/m <sup>2</sup> *seg <sup>0,5</sup>
Absorción Total ASTM C642	28 días	6.3	6.0	5.5	5.9	4.4	5.4	4.3	%
	56 días	5.9	6.0	4.9	5.3	3.7	4.7	4.1	%
Permeabilidad al Aire KT Método TORRENT	28 días	0.140	0.144	-	-	-	-	-	10 <sup>-16</sup> m <sup>2</sup>
	56 días	0.129	0.108	-	0.047	-	-	-	10 <sup>-16</sup> m <sup>2</sup>
Penetración de Agua DIN 1048; 28 días	Medio	17	23	13	16	13	11	14	mm
	Max.	24	40	32	33	25	24	28	mm
Calorimetría NT BUILD 388	T 300 hs	54	46	48	51	52	57	49	° C
Coeficiente de Difusión de Cloruros	120 días	6.12	9.91	-	5.47	2.60	2.59	-	10 <sup>-12</sup> m <sup>2</sup> /s
Contracción por Secado	120 Días	783	550	344	460 (1)	361	420	351	u/m
Cong. y Deshielo ASTM C666 (Met. A) Nº Ciclos para alcanzar 50 % E inicial		36	80	-	-	-	-	250	Nº Ciclos

(1) Corresponde a REF1

### 9.2.1 Resultados - Serie A

Los resultados de durabilidad evidencian claramente que la adición de escoria de alto horno como adición de polvo en este tipo de mezclas autocompactantes impacta positivamente sobre todos los aspectos de durabilidad evaluados.

Lo dicho se aprecia principalmente en los valores de permeabilidad al ion cloruro y de succión capilar.

A continuación se presenta el detalle de cada uno de los resultados de ensayo.

- *Permeabilidad a los cloruros (Método Rápido) (ASTM C1202-91; AASHTO 277-831)*

El método genera un flujo no estacionario de iones cloruros (Non Steady State Migration Test) a través del hormigón mediante la aplicación de un potencial eléctrico externo de 60 V. De esta forma los cloruros son forzados a migrar desde la celda catódica (que contiene una solución de NaCl al 3 % peso en volumen) hacia la celda anódica (que contiene Na(OH) con una concentración 0.3 N) [43].

La Figura 22 presenta comparativamente los resultados de las mezclas (carga pasada en coulombs).

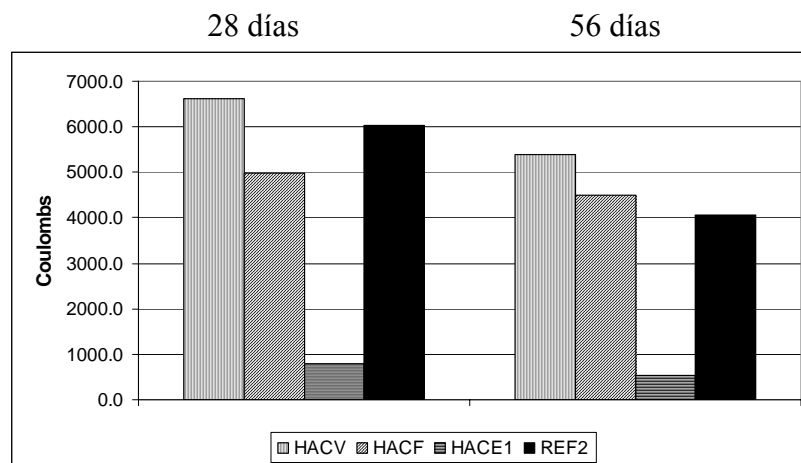


Fig. 22 - Resultados de Permeabilidad a los Cloruros (Met. Rápido) - Serie A.

La permeabilidad al ion cloruro tanto para las mezclas HACV y HACF como para la mezcla REF2 arrojaron valores considerados Altos (> 4000 coulombs) según la clasificación de la norma ASTM 1202-97. En cambio la mezcla HACE1 con adición de escoria mostró valores drásticamente inferiores (inferiores a 1000 coulombs) calificándose la permeabilidad como Muy Baja según el mismo criterio. Esto se debe fundamentalmente a que la escoria genera un refinamiento del sistema de poros. La fijación de cloruros en este tipo de ensayo es menor al producido en un ensayo de difusión normal, donde la penetración de cloruros se debe únicamente a un gradiente de concentraciones (potencial químico) [58].

Por otra parte se observa que el hormigón HACF presenta un mejor comportamiento respecto de la mezcla HACV. Los resultados obtenidos en las dos mezclas autocompactantes son comparables con la mezcla de referencia, aunque debe destacarse

que la disminución de carga pasada es más notoria en la mezcla REF2 entre los 28 y 56 días de edad.

Se muestra a continuación la Tabla 14 dada por ASTM C1202 para la clasificación de la permeabilidad.

**Tabla 14. Permeabilidad al ión cloruro. ASTM C1202.**

Carga Pasada [Coulombs]	Permeabilidad al Ión Cloruro
> 4000	Alta
2000 – 4000	Moderada
1000 – 2000	Baja
100 – 1000	Muy Baja
< 100	Despreciable

*- Perfil de penetración de cloruros (Método de Difusión Normal)*

El ensayo fue realizado sobre probetas cilíndricas de 100 mm de diámetro y 100 mm de altura que fueron curadas en cámara húmeda normalizada hasta la edad de 7 días. Las probetas fueron impermeabilizadas en todas sus caras menos una de forma tal de generar un flujo unidireccional de cloruros a lo largo del eje de la misma. Las muestras fueron sumergidas durante 120 días en una solución de cloruro de sodio 0.5 M. La concentración de cloruros fue determinada por análisis químico a partir de muestras de polvo extraídas a diferentes profundidades y el coeficiente de difusión fue calculado ajustando el perfil de penetración de acuerdo a la 2<sup>da</sup> ley de Fick.

Los coeficientes de difusión de cloruros son algo superiores para las mezclas HACV y HACF (especialmente este último) respecto de REF2. Si bien todos los valores se consideran relativamente bajos.

*- Coeficiente de succión capilar (Swiss Standard 162/1) y Permeabilidad al aire (Método TORRENT)*

En cuanto a los valores de succión capilar a 24 horas para la mezcla HACE1, tanto a 28 como 56 días, arrojaron valores de aproximadamente  $4 \text{ g/m}^2 \cdot \text{sec}^{0.5}$ . Para tener un elemento de referencia y a modo comparativo, se realiza un análisis según el criterio Torrent [59], que relaciona dichos coeficientes con la permeabilidad al oxígeno (KO) según el método del Cembureau (ver Fig. 23). En función de los valores obtenidos y teniendo en cuenta dicha relación, corresponden a un Índice de Calidad del Recubrimiento (ICR) calificado entre 1 y 2 (Calidad Muy Buena y Excelente, según Tabla 15 adjunta).

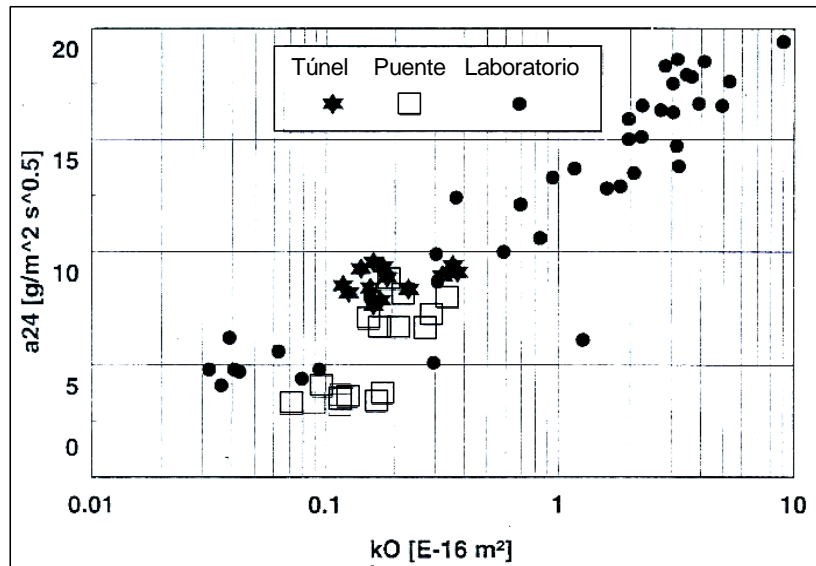


Fig. 23 - Relación entre Succión Capilar y Permeabilidad al oxígeno [59]

Para las mezclas HACV y HACF, si se correlacionan los valores obtenidos de succión capilar ( $a_{24}$ ) con los valores de permeabilidad al oxígeno con la misma figura, se observa que  $kO$  oscila entre  $0.1$  y  $0.3 \cdot 10^{-16} \text{ m}^2$ . De acuerdo a la Tabla 15 [59], que muestra la relación entre la permeabilidad al aire ( $KT$ ) y la permeabilidad al oxígeno, el ICR es 2 (Calidad Muy Buena).

Tabla 15. Relación entre permeabilidad y calidad del hormigón de recubrimiento [59]

ICR	$KO [10^{-16} \text{ m}^2]$	$KT [10^{-16} \text{ m}^2]$	Calidad
1	< 0.1	< 0.01	Excelente
2	0.1 – 0.5	0.01 – 0.1	Muy Buena
3	0.5 – 2.5	0.1 – 1	Mediana
4	2.5 – 12.5	1 – 10	Pobre
5	> 12.5	> 10	Muy Pobre

Por otro lado, los resultados de permeabilidad al aire obtenidos para el HACV y HACF tanto a 28 como a 56 días se encuentran cerca del límite entre un índice de calidad de recubrimiento (ICR) 3 y 2 (Mediana y Muy Buena).

- Absorción Total (ASTM C642-90)

La absorción total muestra un valor bastante constante del orden del 6% para las mezclas HACV, HACF y REF2, independientemente de la edad considerada (algo inferior a 56 días para REF2). En el caso de la mezcla HACE1 el valor es significativamente menor a las anteriores, tanto a 28 como 56 días.

- *Comportamiento frente a ciclos de congelamiento y deshielo (ASTM C666-92)*

Solo las mezclas HACV y HACF fueron evaluadas en este aspecto. Los resultados no fueron satisfactorios debido a la no incorporación de aire en forma intencional y al escaso contenido de aire de las dos mezclas (1.3% para la mezcla HACF y 1.7% para la mezcla HACV).

En el caso del HACV, la frecuencia de resonancia inferior al 50 % de la inicial se alcanzó luego de 36 ciclos (el ensayo tiene una duración de 300 ciclos). Para la mezcla HACF dicho valor se alcanzó a los 80 ciclos. En ambos casos se interrumpió el ensayo cuando la frecuencia de resonancia cae por debajo del 50% de la inicial.

Tanto HACV como HACF evidenciaron un elevado grado de destrucción. Será necesario continuar estos estudios para confirmar esta tendencia y evaluar mezclas HAC con un adecuado sistema de vacíos (con incorporación intencional de aire). De acuerdo a los antecedentes consultados [42] en este caso los HAC pueden comportarse en forma similar a los HC.

- *Penetración de agua a presión (IRAM 1554; CIRSOC 256)*

La edad de ensayo adoptada fue de 28 días, mostrando todos los HAC penetraciones menores a los 50 mm especificados por el Reglamento CIRSOC 201 (artículo 6.6.5.2) para hormigones de elevada impermeabilidad. Los valores obtenidos son comparables con la mezcla de referencia REF2.

- *Elevación adiabática de temperatura (NT-BUILD 388)*

La elevación adiabática de temperatura se determinó mediante un calorímetro semi-adiabático 4C-Heat Box de acuerdo con la norma finlandesa NT-BUILD 388 [60][61].

Se observa que la elevación adiabática de temperatura de la mezcla HACV es superior respecto a las mezclas HACF, HACE1 y REF 2 (8 ° C, 6 ° C y 3 ° C, respectivamente). Lo dicho se debe al contenido unitario de material cementicio de HACV y a las diferentes relaciones W/MC (ver detalle en [60]).

- *Contracción por secado (IRAM 1597)*

Tal como se mencionó en el punto 9.1, la mezcla HACV es notablemente superior al resto de las mezclas posiblemente por su mayor contenido de agua (190 litros/m<sup>3</sup>). Esta mezcla HACV es la única mezcla autocompactante obtenida a partir de la combinación de un aditivo SP de base policarboxilato con un AMV. Cabe aclarar que los valores se comparan en este caso con la mezcla REF1, no con REF2.

## **9.2.2 Resultados - Serie B**

- *Permeabilidad a los cloruros (Método Rápido) (ASTM 1202-91; AASHTO 277-831)*

La permeabilidad al ion cloruro para las mezclas HACSF y HACE2 arrojaron valores inferiores 1000 coulombs, calificándose la permeabilidad como Muy Baja según el criterio ASTM. Esto se debe fundamentalmente a la adición del humo de sílice y la escoria, respectivamente.



Por otra parte se observa que el hormigón REF3 presenta una permeabilidad considerada Moderada.

*- Perfil de penetración de cloruros (Método de Difusión Normal)*

Los coeficientes de difusión de cloruros obtenidos para las mezclas HACSF y HACE2 son considerados muy bajos.

*- Coeficiente de succión capilar (Swiss Standard 162/1)*

Los valores de succión capilar a 24 horas para las tres mezclas HACSF, HACE2 y REF3, tanto a 28 como 56 días, arrojaron valores entre 3 y 4  $\text{g/m}^2 \cdot \text{sec}^{0,5}$ , aproximadamente. Según el criterio Torrent [59] que relaciona dichos coeficientes con la permeabilidad al oxígeno KO (Fig.23), dicho valor oscila entre 0.08 y  $0.2 \cdot 10^{-16} \text{ m}^2$ , correspondiendo una calidad del hormigón de recubrimiento calificada como Muy Buena a Excelente (ICR 1 / 2).

*- Absorción Total (ASTM C642-90)*

La absorción total muestra un valor para todas las mezclas comprendido entre 4 % y 5 %, independientemente de la edad considerada. No se observan diferencias significativas entre los HAC y el REF3.

*- Comportamiento frente a ciclos de congelamiento y deshielo (ASTM C666-92)*

En este caso el único hormigón evaluado fue el REF3 con resultado no satisfactorio debido a la no incorporación de aire en forma intencional y al escaso contenido de aire. La frecuencia de resonancia inferior al 50 % de la inicial se alcanzó luego de 250 ciclos.

*- Penetración de agua a presión (IRAM 1554; CIRSOC 256)*

Al igual que con los valores correspondientes a la Serie A, tanto los HAC como REF3 mostraron penetraciones muy inferiores a los 50 mm especificados por el Reglamento CIRSOC 201 para hormigones de elevada impermeabilidad.

*- Elevación adiabática de temperatura (NT-BUILD 388)*

Se observa que la elevación adiabática de temperatura de la mezcla HACE2 es superior respecto a las mezclas HACSF y REF3 ( $5^\circ \text{C}$  y  $8^\circ \text{C}$ , respectivamente). Al igual que en la Serie A, lo dicho se debe al contenido unitario de material cementicio de HACE2 y a la influencia de las diferentes relaciones W/MC (ver detalle en [60]).

*- Contracción por secado (IRAM 1597)*

No se observan grandes diferencias entre los HAC y REF3, siendo algo superior la contracción para HACE2 debido a su mayor contenido unitario de agua ( $180 \text{ litros/m}^3$ ) y mayor contenido de material cementicio ( $550 \text{ Kg/m}^3$ ).

# Capítulo 10 – ESTUDIO DE SOLICITACIONES A TRACCION, DEFORMACIONES VOLUMETRICAS Y ENERGIA DE FRACTURA

## 10.1 Introducción

Tal como se mencionó en capítulos anteriores, el hormigón considerado como material compuesto, está constituido por una fase continua (matriz) que rodea un conjunto de inclusiones de forma y tamaño variados. La fase continua e inclusiones poseen propiedades diferenciadas entre sí y con respecto al compuesto. La interacción entre las fases se desarrolla a través de la ZIF. En este punto el material puede ser considerado como constituido por agregados gruesos (mayores a 4 mm) embebidos en una matriz de mortero (pasta de cemento más agregado fino) [62]. El comportamiento del hormigón está íntimamente ligado a las características de las fases componentes y su interacción en la ZIF.

La presencia de poros, fisuras, inclusiones etc., es considerada en el mesonivel, donde se asume al hormigón como material compuesto por una matriz porosa que rodea a un conjunto de inclusiones de diferente tamaño y rigidez.

Las fisuras se originan en la ZIF y luego se introducen en la matriz hasta provocar un cuadro de fisuración múltiple que conduce a la fractura del material. Por sus características, la ZIF constituye el vínculo más débil del hormigón lugar por donde se inicia el desarrollo de fisuras y vía preferencial de difusión de sustancias agresivas.

Un factor importante a tener en cuenta en el comportamiento de la ZIF, es la presencia de adiciones minerales activas e inertes. En efecto, la presencia de las mismas produce un incremento de la adherencia en dicha zona, debido a una disminución de la concentración de hidróxido de calcio, un aumento en la cantidad de silicatos hidratados y/o un empaquetamiento de partículas más eficiente.

Dada la importancia de la ZIF en el comportamiento del compuesto, en el presente capítulo se describen experiencias vinculadas a caracterizar el proceso de deformación y rotura bajo solicitaciones de compresión y tracción de los HAC en relación con un HC de referencia. Estos estudios evalúan las mezclas HACF y HACE1 en comparación con la mezcla REF2, cuyas dosificaciones y características se resumen nuevamente en la Tabla 16 (corresponden a un moldeo diferente). Si bien las denominaciones de las mezclas de HAC son iguales a las previamente estudiadas (HACF y HACE1), en este caso y para efectuar un análisis comparativo más consistente, se modificó la granulometría del agregado grueso de las mismas de forma tal que las tres mezclas posean igual TMA (20 mm). Como se comentó en las experiencias anteriores, estos hormigones son todos de similar clase resistente, con resistencias a compresión a 28 días cercanas a 50 MPa (REF2 con un valor algo superior, de 54 MPa).

Existen en nuestro medio antecedentes sobre el estudio de las interfaces y su influencia en el mecanismo de rotura [63][64][65].

Para estas experiencias se adopta como hipótesis de trabajo que el material está compuesto por una matriz de mortero y por agregados gruesos como inclusión.

**Tabla 16 - Mezclas para ensayos de tracción, deformación volumétrica y energía de fractura**

	HACF	HACE1	REF2	UNIDAD
<b>Tipo Cemento</b>	CPC40	CPC40	CPC40	
<b>Agua</b>	172	180	169	kg/m <sup>3</sup>
<b>Cemento</b>	367	250	420	kg/m <sup>3</sup>
<b>Filler</b>	238	0	0	kg/m <sup>3</sup>
<b>Escoria</b>	0	200	0	kg/m <sup>3</sup>
<b>Arena Fina</b>	372	515	396	kg/m <sup>3</sup>
<b>Arena Gruesa</b>	368	342	395	kg/m <sup>3</sup>
<b>Piedra 6-12</b>	597	609	694	kg/m <sup>3</sup>
<b>Piedra 6-20</b>	256	261	307	kg/m <sup>3</sup>
<b>Aire</b>	2.0	2.2	2.0	%
<b>Dosis Aditivo</b>	0.46	0.46	-	%
<b>Tipo Aditivo</b>	C3	C3	-	-
<b>PUV</b>	2370	2357	2400	kg/m <sup>3</sup>
<b>W/MC</b>	0.47	0.40	0.40	-
<b>W/P</b>	0.28	0.40	0.40	-
<b>Volumen Pasta</b>	379	331	307	dm <sup>3</sup>
<b>Volumen Mortero</b>	661	657	607	dm <sup>3</sup>
<b>Volumen Ag Grueso</b>	318	324	373	dm <sup>3</sup>
<b>Extendido/As</b>	70.0	70.5	7.5	cm
<b>T50</b>	2.0	1.7	-	seg
<b>H2/H1 LBOX</b>	0.95	0.96	-	-

## 10.2 Metodología de ensayo

Dada la importancia de las características de las fases, además de evaluar las propiedades físico - mecánicas del hormigón, se evaluaron las propiedades del mortero.

En todos los casos, el mortero utilizado para la confección de las probetas moldeadas para evaluar la matriz, fue obtenido por tamizado del hormigón fresco por el tamiz de 4.8 mm (N°4).

### 10.2.1 Solicitaciones de compresión

Las propiedades determinadas fueron las siguientes:

- ✓ Resistencia
- ✓ Deformaciones longitudinales y transversales
- ✓ Módulo de elasticidad estático
- ✓ Coeficiente de Poisson
- ✓ Tensiones Críticas

La evaluación de las deformaciones volumétricas permitió evaluar las propiedades elásticas del material y además se utilizó como metodología para inferir las

características del mecanismo de propagación de fisuras a través de las tensiones críticas.

Durante el ensayo de compresión uniaxial, el coeficiente de Poisson comienza a crecer para una tensión relacionada con la propagación interna de microfisuras, que se denomina tensión de iniciación. Luego se desarrolla un crecimiento rápido de fisuras y la curva de deformaciones volumétricas alcanza un mínimo y a partir de allí comienza a crecer debido a una extensa fisuración interna. La tensión para la cual se produce este cambio en el volumen aparente, se denomina tensión crítica ( $\sigma_{cr}$ ) y corresponde al inicio de una propagación inestable de fisuras a través de la matriz [66].

Para el cálculo de las curvas de deformaciones volumétricas no se realizaron precargas.

Por razones de programación de ensayos, la determinación de la curva tensión - deformación se realizó en todos los casos a la edad de 21 días en probetas cilíndricas de 100 x 200 mm en una máquina de carga controlada. Los ensayos a 28 días se realizaron en probetas cilíndricas de 150 x 300 mm. Las deformaciones se midieron con diales micrométricos (0.001 mm.)

### **10.2.2 Solicitaciones de tracción**

Las propiedades determinadas fueron las siguientes:

- ✓ Módulo de rotura con carga centrada
- ✓ Tracción por compresión diametral
- ✓ Energía de fractura

La evaluación de las sollicitaciones en tracción resultan de interés en todos los casos en que interesa el control de fisuración y para el caso de la evaluación de la adherencia de la ZIF.

El ensayo de energía de fractura ( $G_f$ ) se realizó conforme a la norma RILEM [67], en probetas prismáticas de 75 x 100 x 400 mm con una entalla aserrada igual a la mitad de la altura y una luz de ensayo de 360 mm. Se utilizó una máquina Instron de deformación controlada y las deformaciones se midieron con extensómetros eléctricos. Se registró en cada ensayo la flecha y la apertura de fisura ( $w$ ).

Los ensayos de tracción por compresión diametral y de módulo de rotura con carga centrada, se realizaron en probetas que se obtuvieron por corte con sierra a partir de las mitades de vigas provenientes del ensayo de energía de fractura.

Las probetas de compresión diametral resultaron prismas de 100 x 100 x 75 mm y las de módulo de rotura prismas de 75 x 50 x 200 mm, con una luz entre apoyos de 160 mm.

### **10.3 Análisis de los resultados**

En el análisis de resultados hay que tener en cuenta que la comparación de los HAC se ha realizado con un HC de referencia de consistencia plástica (7.5 cm de asentamiento). Se resalta el hecho dada la importancia que tiene el grado de fluidez y cohesión de la mezcla en la adherencia entre la matriz y los agregados. Mezclas de mayor fluidez mejoran la adherencia [64].

### 10.3.1 Solicitaciones de compresión y tracción

La Tabla 17 muestra un resumen de los resultados obtenidos en los ensayos de compresión y tracción.

**Tabla 17 - Solicitaciones en compresión y tracción**

	HACF	MACF	HACE1	MACE1	REF2	MREF2	UNIDAD
$f'_c$ 28 d (15 x 30)	48.5	--	51.2	--	54.1	--	[MPa]
E 28 d (15 x 30)	35.4	--	38.3	--	39.8	--	[GPa]
$f'_c$ 21 d (10 x 20)	50.4	55.2	48.8	53.5	53.0	58.5	[MPa]
E 21 d (10 x 20)	34.3	33.6	39.8	33.7	40.0	34.8	[GPa]
$f_t$ 21 d	3.83	3.67	4.72	5.16	4.03	4.58	[MPa]
MR 21 d	7.48	7.53	8.97	11.10	7.44	8.47	[MPa]
$f_t/f'_c$	7.6	6.6	9.7	9.6	7.6	7.8	[%]
MR/ $f'_c$	14.8	13.6	18.4	20.7	14.0	14.5	[%]
$f'_{ch}/f'_{cm}$	91.3	--	91.2	--	90.6	--	[%]
$f_{th}/f_{tm}$	104.4	--	91.5	--	88.0	--	[%]
MRh/MRm	99.3	--	80.8	--	87.8	--	[%]

En primer lugar se debe destacar que en los tres casos analizados, las resistencias a compresión del hormigón evaluadas tanto en probetas de 150 x 300 mm a 28 días, como en probetas de 100 x 200 mm a 21 días, son similares entre sí y cercanas a 50 MPa (para REF2 es algo superior, 54 MPa). Lo mismo ocurre con la resistencia de la matriz con valores similares para HACF y HACE1 cercanos a 55 MPa y algo superior para REF2 (58 MPa). En todos los casos se observa que la resistencia a compresión de la matriz es superior a la del compuesto, con una relación hormigón / matriz cercana al 91 %.

El análisis de los resultados en tracción (compresión diametral y flexión), indica que tanto para la matriz como para el compuesto el HACE1 presenta valores significativamente mayores que HACF y REF2.

Si se comparan los resultados en hormigón entre HACF y REF2, se observa que tanto en compresión diametral como en flexión, los valores son similares. Vale aquí recordar que las relaciones W/MC entre los hormigones son diferentes (0.47 y 0.40 para HACF y HACE1-REF2, respectivamente).

Es interesante destacar las relaciones encontradas entre los valores del compuesto y la matriz para el caso del HACF (para las sollicitaciones de tracción), alcanzando resultados cercanos al 100 %, es decir, siendo prácticamente iguales los valores alcanzados en hormigón y en mortero. No ocurre lo mismo con HACE1 y REF2 donde las citadas relaciones son similares o inferiores al 90 %.

Resulta entonces importante el desempeño mostrado por HACF y HACE1, con valores para las características evaluadas en tracción, iguales o superiores a REF2.

En cuanto a la rigidez, se observa que tanto HACE1 como REF2 poseen valores similares, a pesar que el volumen de agregado grueso de REF2 (37 %) es superior a HACE1 (32 %). En cuanto a HACF el módulo de elasticidad es algo inferior a los anteriores, pero en este caso se destaca que el contenido de pasta de este es mayor (38 % HACF, 33 % HACE1 y 31 % REF2). Todos tienen igual TMA.

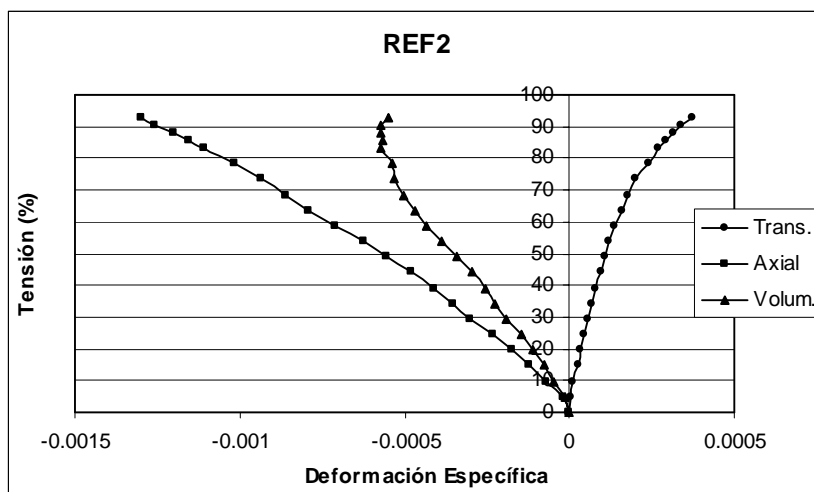
### 10.3.2 Curvas tensión – deformación

La Tabla 18 muestra los parámetros característicos que se obtienen de las curvas tensión – deformación en compresión.

**Tabla 18 - Deformaciones volumétricas y energía de fractura**

Propiedad	Mezcla					
	HACF	MACF	HACE1	MACE1	REF2	MREF2
$f'c$ (MPa)	50.4	55.2	48.8	53.5	53.0	58.5
$f_t$ (MPa)	3.85	3.65	4.70	5.15	4.00	4.60
E (GPa)	34.3	33.6	39.8	33.7	40.0	34.8
Mod. Poisson	0.16	0.18	0.17	0.17	0.19	0.20
Tensión crítica (% carga máxima)	>96,0		> 93,0		90.0	
Tensión crítica (MPa)	> 46,7		> 46,0		47.1	
Linealidad (% carga máxima)	47.0	42.0	45.0	43.0	45.0	50.0
Gf (N/m)	154.0	67.0	155.0	77.0	157.0	71.0
lch (mm)	356	167	277	97	387	118

En las Figuras 24, 25 y 26 se puede observar curvas típicas de las distintas mezclas en fase hormigón. El análisis de la tensión crítica en hormigón, indica que los HAC poseen una tensión al menos similar a REF2, tanto en valores porcentuales de la carga de rotura como en valor absoluto. Vale recordar que el nivel de tensión crítica indica un proceso de propagación de fisuras inestable con aparición de macrofisuras y que su valor no solo depende de la adherencia matriz – agregado, sino que desciende con el incremento del volumen y tamaño de agregados.



**Fig. 24 - Relación tensión - deformación para REF2.**

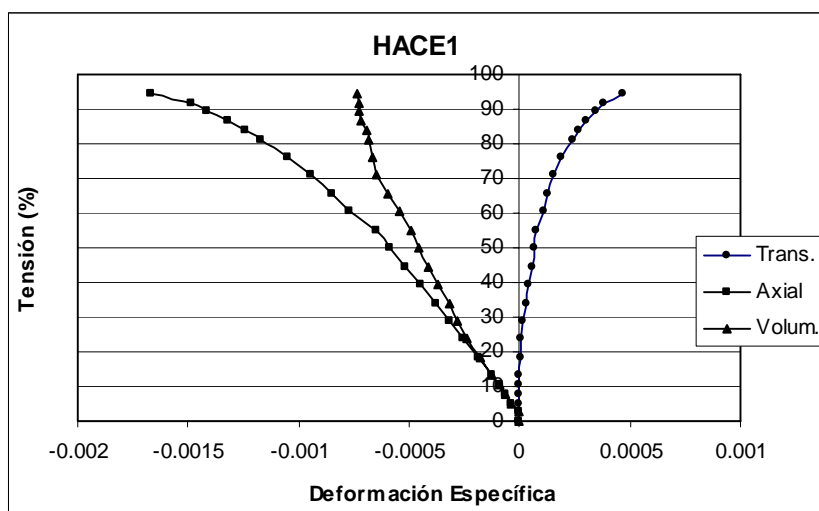


Fig. 25 - Relación tensión - deformación para HACE1

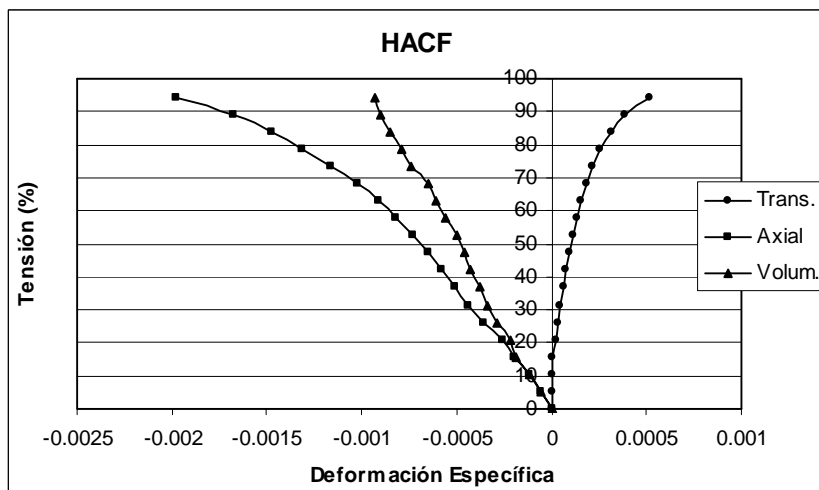
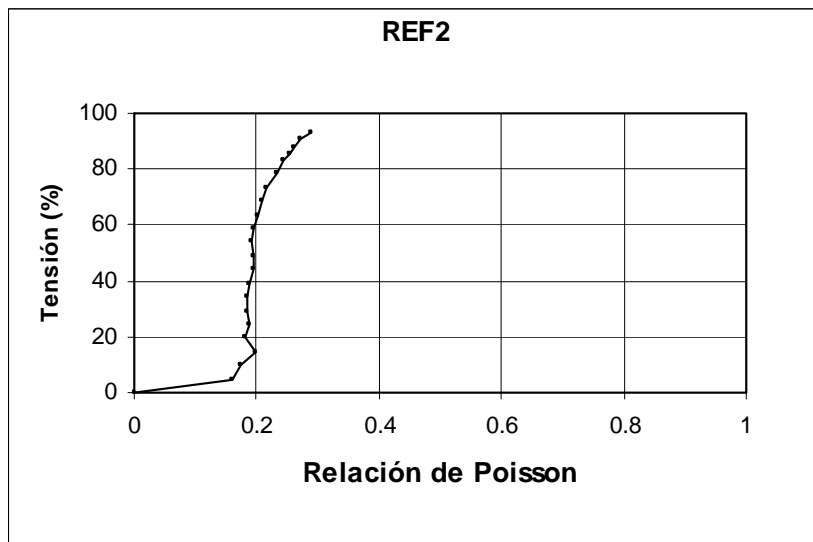


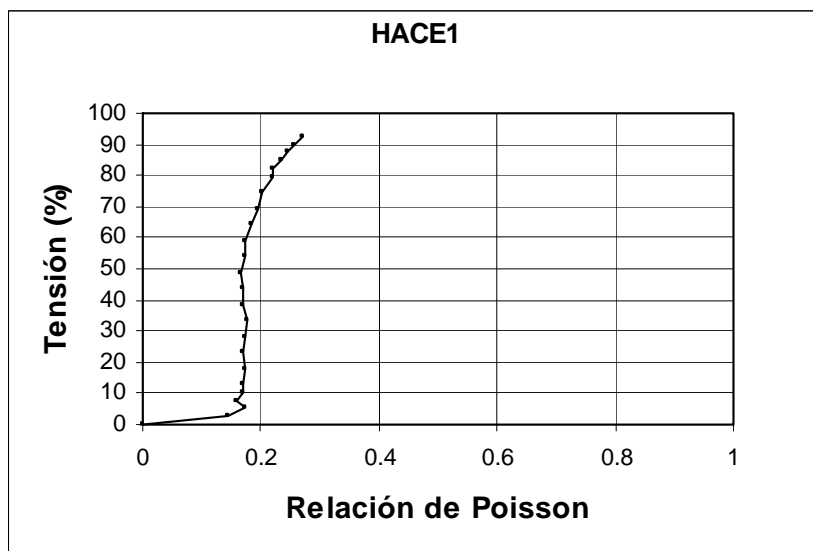
Fig. 26 - Relación tensión - deformación para HACF.

En cuanto a la linealidad del hormigón en porcentaje de la carga máxima, se observa que es similar para todas las mezclas y se ubica en el rango de 45 al 47 %.

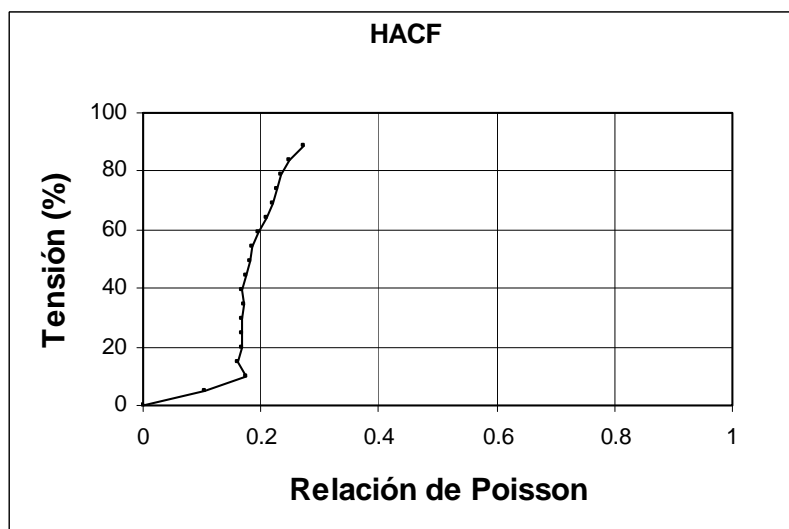
Respecto de la relación de Poisson se aprecia que para las mezclas HACF y HACE, es inferior a la REF2. En efecto, resultó del orden de 0.17 en hormigón y 0.17/0.18 en mortero para los HAC, mientras que para REF2 fue de 0.19 y 0.20, respectivamente. Las Figuras 27,28 y 29 muestran las curvas obtenidas para los distintos hormigones.



**Fig. 27 -Relación de Poisson para REF2**



**Fig. 28 - Relación de Poisson para HACE1**



**Fig. 29 - Relación de Poisson para HACF**



### 10.3.3 Energía de fractura

Las curvas carga – desplazamiento en flexión que se obtienen del ensayo de energía de fractura en vigas entalladas, tal como se detalló anteriormente, brindan nuevos elementos para el análisis del mecanismo resistente y de fisuración del hormigón. En efecto, además de evaluar la carga máxima, permite un seguimiento del comportamiento postpico y una evaluación del mecanismo del control de fisuración.

La Tabla 18 muestra un resumen de los parámetros obtenidos de dichos ensayos y la Fig. 30 las curvas típicas para los distintos hormigones.

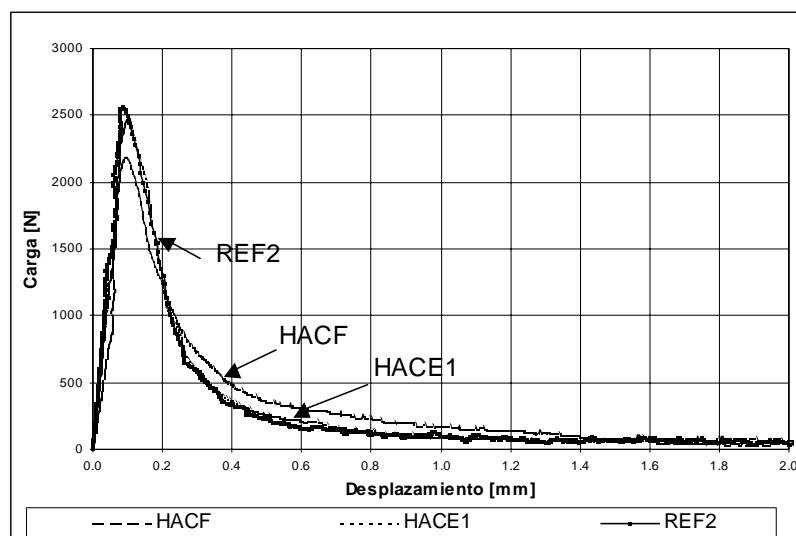


Fig. 30 - Relación Carga-Desplazamiento (flecha)

El análisis de los resultados muestra que dichas curvas son similares y por lo tanto la energía de fractura también lo es. Estos valores varían entre 155 y 160 N/m aproximadamente para los hormigones y entre 67 y 77 N/m para los morteros. Estos valores indican un mecanismo de control de la fisuración similar en las mezclas estudiadas.

Este hecho también surge de la observación de las superficies de fractura de las vigas. Las mismas muestran una relación entre la superficie real y aparente de fractura similar, con un porcentaje de partículas fracturadas (agregados gruesos) que en todos los casos varió entre un 65 y 75 %, aproximadamente.

Otro parámetro que caracteriza el proceso es la longitud característica ( $l_{ch} = E \times G_f / ft^2$ ), que se vincula con el tamaño de la zona de fractura. Es habitual considerar a este como una propiedad intrínseca del material, que da una medida de su fragilidad (menor valor indica un comportamiento más frágil). Los valores obtenidos son similares para HACF y REF2 (en el rango de 360/390 mm) y menor para HACE1 (del orden de 280 mm).

## Capítulo 11 - ENSAYOS A ESCALA INDUSTRIAL

### 11.1 Introducción

Con el objeto de evaluar las propiedades “in situ” de los HAC, se realizaron dos pruebas a escala industrial mediante la construcción de dos tabiques experimentales. Para ello se utilizaron las mezclas denominadas HACV y HACF, que fueron descritas y evaluadas en laboratorio en los capítulos anteriores.

Los hormigones fueron elaborados en una planta de hormigón elaborado del tipo dosificadora. Luego fueron mezclados y transportados mediante un camión motohormigonero con aproximadamente 3 m<sup>3</sup> de material. Los tabiques se ubicaron dentro del predio de la planta, de manera tal que el tiempo de transporte no superó los 5 minutos.

Ambos tabiques tenían las mismas dimensiones, de 2,40 metros de altura por 1,65 metros de ancho y un espesor de 0,25 metros, con una armadura que consistió en 2 mallas de hierros  $\phi$ 12 mm cada 0,15 metros.

Se utilizó un encofrado metálico con una boca de entrada en la parte inferior, sobre uno de los laterales del mismo. Esta forma de llenado exigía aún más a la mezcla que debía recorrer el ancho del encofrado y luego ascender entre las barras de armadura. La colocación se realizó mediante bomba y el tiempo de llenado fue inferior a cinco minutos.

Las dosificaciones utilizadas se muestran en la Tabla 19 comparadas con las mezclas de laboratorio y los resultados obtenidos tanto en estado fresco como endurecido (se moldearon probetas a pie de obra) se muestran en las Tablas 19 y 20.

**Tabla 19 – Comparación de mezclas a escala industrial y de laboratorio**

Identificación		HACV		HACF	
		Tabique	Laboratorio	Tabique	Laboratorio
Cemento	Tipo	Compuesto	Compuesto	Compuesto	Compuesto
	Contenido [kg/m <sup>3</sup> ]	430	430	370	370
Filler Calcáreo	Contenido [kg/m <sup>3</sup> ]	0	0	240	240
Agua	Contenido [lts/m <sup>3</sup> ]	182	190	179	173
Relación W/MC	En peso	0.42	0.44	0.48	0.47
	En volumen	1.29	1.35	1.48	1.43
Relación W/P	En peso	0.42	0.44	0.29	0.28
	En volumen	1.29	1.35	0.86	0.83
Agregado Fino	Contenido [kg/m <sup>3</sup> ]	899	900	762	762
Agregado Grueso	Contenido [kg/m <sup>3</sup> ]	812	810	840	840
Relación Arena Fina/Gruesa		40-60	40-60	50-50	50-50
Aditivo 1	Marca	C1	C1	C1	C1
	Dosis [%Polvo]	0.50	0.65	0.51	0.55
Aditivo 2	Marca	V	V	V	V
	Dosis [%Polvo]	0.52	0.78	0.06	0.06
Slump FlowTest	[cm]	65.0	68.0	68.0	67.0
T50	[seg]	4.8	4.40	1.8	2.8
U-Test	[cm]	30,5 (*)	34.0	34.0	34.0
L-Box	H2/H1	0.88	0.93	0.94	0.96
	T20 [seg]	1.6	1.2	--	0.9
	T40 [seg]	3.4	2.9	0.9	1.9
V-Funnel	[seg]	--	7,8 ± 1,0	--	7,0 ± 0,4
Aire	[%]	2.8	1.7	1.0	1.3
PUV	[kg/m <sup>3</sup> ]	2343	2361	2390	2383
Resistencia a compresión	3 días [MPa]	25.6	25.4	28.4	27.7
	7 días [MPa]	38.5	34.0	39.8	39.1
	14 días [MPa]	--	40.4	47.4	43.4
	28 días [MPa]	49.6	45.7	53.1	47.6
	56 días [MPa]	53.3	48.6	57.6	50.9

(\*) Se llenó 10 cm por debajo del borde superior. La altura máxima en este caso es de 31,0 cm

Tabla 20 - Resultados de probetas moldeadas al pie de los tabiques

Identificación		HACV		HACF	
Resistencia a compresión	3 días [MPa]	25,6		28,4	
	7 días [MPa]	38,5		39,8	
	14 días [MPa]	--		47,4	
	28 días [MPa]	49,6		53,1	
	56 días [MPa]	53,3		57,6	
Módulo de Elasticidad Estático	7 días [GPa]	26,0		29,6	
	28 días [GPa]	30,3		33,8	
	56 días [GPa]	30,6		34,9	
Módulo de Elasticidad Dinámico	7 días [GPa]	36,4		38,4	
	28 días [GPa]	40,2		42,2	
	56 días [GPa]	41,7		44,3	
Velocidad del pulso ultrasónico	7 días [m/s]	4390		4470	
	28 días [GPa]	4425		4650	
	56 días [m/s]	4505		4715	
Carga Pasada [Coulombs]	28 días	7436		6951	
	56 días	5559		6523	
Profundidad de Penetración [mm]	28 días	31,5		32,9	
	56 días	24,5		26,8	
Coeficiente de Succión Capilar [gr/m <sup>2</sup> *seg <sup>1/2</sup> ]		a <sub>3</sub>	a <sub>24</sub>	a <sub>3</sub>	a <sub>24</sub>
	28 días	11,3	7,5	9,0	6,4
	56 días	10,8	6,7	8,5	5,5
Absorción Total [%]	28 días	5,9		6,3	
	56 días	5,8		5,6	
Permeabilidad al Aire KT [10 <sup>-16</sup> m <sup>2</sup> ]	28 días	0,119		--	
	56 días	0,078		--	

## 11.2 Estado Fresco

- Ensayo de extendido (*Slump Flow Test*)

Se ajustaron las dosis de aditivo de forma tal de obtener un extendido dentro de los límites propuestos. En el caso de la mezcla HACV el extendido fue algo inferior al obtenido en laboratorio, mientras que la mezcla HACF tuvo un extendido similar al de laboratorio.

Ambas mezclas tuvieron a su llegada al pie del tabique, extendidos dentro del rango impuesto de  $65 \pm 5$  cm.

- *Dosis de aditivos*

*a) Aditivo Superfluidificante (SP)*

Las dosis ajustadas resultaron menores a las obtenidas en el laboratorio. En efecto, el hormigón HACV mostró una disminución del orden del 23% en la dosis de SP, mientras que en la mezcla HACF la disminución fue sólo del 7%.

*b) Aditivo Modificador de la viscosidad (AMV)*

También hubo variaciones en la dosis del AMV pero sólo para el hormigón denominado HACV, donde se disminuyó la cantidad de agente viscoso de manera considerable (33% menos de aditivo).

- *Segregación*

Si bien ambas mezclas mostraron una buena estabilidad, la mezcla HACV resultó algo superior en este aspecto.

- *Tiempo transcurrido para alcanzar los 50 cm de extendido (T50).*

Las diferencias encontradas en laboratorio en este aspecto se acentuaron en las pruebas a escala. La mezcla HACV se mostró más viscosa (es decir que aumentó el T50), mientras que el hormigón HACF tuvo una viscosidad menor (disminuyó el tiempo T50). Esta diferencia en la viscosidad plástica de las mezclas influyó de manera significativa en la densidad, homogeneidad y terminación superficial, tal como se verá posteriormente.

- *Ensayo L-Box (H2/H1, T20 y T40)*

Los tiempos T20 y T40 muestran la misma tendencia observada con el T50. La relación de alturas H2/H1 es similar a la obtenida en laboratorio para la mezcla HACF observándose una mayor diferencia en el caso de la mezcla HACV.

- *Altura alcanzada en el U-Test.*

Los resultados son similares para las dos mezclas estudiadas respecto de lo obtenido en el laboratorio.

- *Tiempo de escurrimiento en el V-Funnel de hormigones.*

No fue realizado a pie de obra.

- *Contenido de aire de la mezcla fresca (IRAM 1602)*

En el caso de la mezcla HACV el aire medido en obra resultó mayor al obtenido en el laboratorio (2.8% en obra y 1.7% en laboratorio).

La mezcla HACF tuvo contenidos de aire similares tanto en obra como en laboratorio, del orden del 1.2%.

- *Comportamiento en el tiempo*

Si bien no se tenía como objetivo medir este parámetro, en el caso de la mezcla HACF, razones de fuerza mayor permitieron obtener el extendido y el T50 en tres puntos.

En efecto, un desperfecto en la boca de entrada del hormigón al tabique obligó a un retraso en la colocación de la mezcla, quedando la misma dentro del camión a velocidad de agitación durante 40 minutos aproximadamente.

Los extendidos y T50 medidos se observan en la siguiente Tabla 21.

**Tabla 21. Extendido y T50 en función del tiempo.**

Tiempo [min]	Extendido [cm]	T50 [seg]
0	68	1.83
30	60	2.00
50	52	2.10

La colocación del hormigón comenzó aproximadamente a los 40 minutos del inicio del mezclado, con un extendido entre 55 y 60 cm. Los resultados obtenidos se corresponden con lo obtenido en laboratorio (Ver Fig. 16) y el inconveniente surgido en la boca de entrada de la bomba no influyó en el correcto hormigonado del tabique experimental.

## 11.3 Estado Endurecido

### 11.3.1 Resistencia - Rigidez

- *Resistencia a compresión (IRAM 1546)*

En la Tabla 20 se pueden observar los resultados obtenidos.

Si analizamos el hormigón HACV, la evolución de resistencia de la mezcla de obra es algo superior a la obtenida en laboratorio debido a que existe una diferencia en la relación W/MC (0.42 en obra, 0.44 en laboratorio).

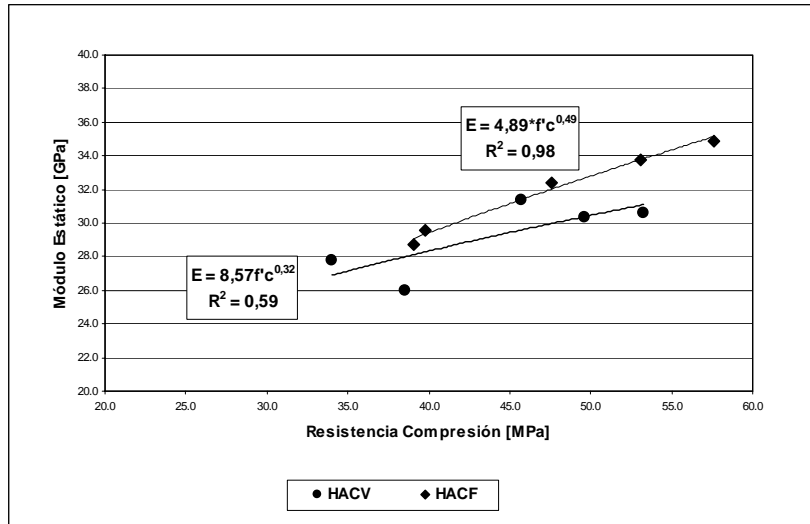
En el caso de la mezcla HACF, si bien las relaciones W/MC son similares, la evolución de resistencia de la mezcla de obra muestra un desarrollo de resistencia superior a partir de los 14 días de edad. Puede observarse que el crecimiento de resistencia entre 7 y 28 días es de 33% en las probetas moldeadas en obra, mientras que sólo crece 21% en las probetas de laboratorio.

- *Determinación del módulo de elasticidad estático (ASTM C469) y dinámico (IRAM 1693).*

También en la Tabla 20 se observan los resultados obtenidos a 7, 28 y 56 días de edad. Se observa que la mezcla HACF tiene un mayor módulo de elasticidad a todas las edades evaluadas.

La correlación entre el módulo de elasticidad estático y la resistencia a la compresión se muestra en la Figura 31, donde se incluyen valores de laboratorio y obra para las distintas edades evaluadas.

Se puede observar una muy buena correlación en los resultados de la mezcla HACF mientras que en el caso de la mezcla HACV la correlación es pobre.



**Fig. 31 - Relación Resistencia a Compresión / Módulo Elástico en probetas**

*- Velocidad del pulso ultrasónico en probetas (ASTM C597)*

Los resultados obtenidos muestran que la mezcla HACF tiene mayor velocidad de pulso ultrasónico a las tres edades evaluadas en coincidencia con lo obtenido en laboratorio y, como se comprobó posteriormente, con los resultados de ultrasonido medidos in situ.

**11.3.2 Aspectos relacionados con la durabilidad**

*- Permeabilidad a los cloruros (Método Rápido) (ASTM 1202-91; AASHTO 277-831)*

En la Tabla 20 se observan los resultados obtenidos.

Se puede apreciar una diferencia importante entre los resultados de las probetas moldeadas en obra (promedios de 3 probetas) y las probetas de laboratorio (promedio de 6 probetas de pastones distintos) (ver Tabla 13).

A pesar de ello se observa que la mezcla HACV disminuye en mayor proporción la carga pasada entre los 28 y 56 días respecto de la mezcla HACF.

La diferencia más importante respecto de lo obtenido en laboratorio (del orden de un 40%) se observa en los resultados de la mezcla HACF.

Es importante mencionar que más allá de las diferencias encontradas entre los resultados de obra y los de laboratorio, todos los resultados obtenidos se encuentran en un rango de permeabilidad a los cloruros que se clasifica como Alta según ASTM 1202.

*- Coeficiente de succión capilar (Swiss Standard 162/1), Absorción Total (ASTM 642-90) y Permeabilidad al aire (Método TORRENT)*

En la Tabla 20 se muestran los resultados obtenidos.

El coeficiente de succión capilar es similar para las mezclas de laboratorio y las mezclas probadas a escala para las dos edades evaluadas.

La absorción total se mantiene para los dos tipos de mezclas y para probetas de obra y de laboratorio en valores del orden del 6.0%, no evidenciando variaciones significativas entre los 28 y los 56 días de edad.

En el caso de la permeabilidad al aire, la mezcla HACV probada a escala mostró valores algo inferiores a los de laboratorio, pero siempre dentro de la clasificación mencionada en los puntos anteriores (índice de calidad de recubrimiento (ICR) entre 3 y 2 (Mediana y Muy Buena)).

No se realizaron ensayos de permeabilidad al aire de la mezcla HACF.

### 11.3.3 Determinaciones realizadas “in situ”

- *Determinación de la velocidad del pulso ultrasónico del tabique*

En ambos tabiques se trazó una malla de 20 cm de ancho por 40 cm de altura con el objeto de evaluar la homogeneidad del mismo midiendo la velocidad del pulso ultrasónico.

En las Tablas 22 y 23 se muestran los valores obtenidos en cada uno de los puntos de medición. En las Tablas 24 y 25 se informan los resultados promedio, desvío y coeficiente de variación de ambos tabiques.

**Tabla 22 – Velocidad de pulso ultrasónico IN SITU  
Tabique HACV**

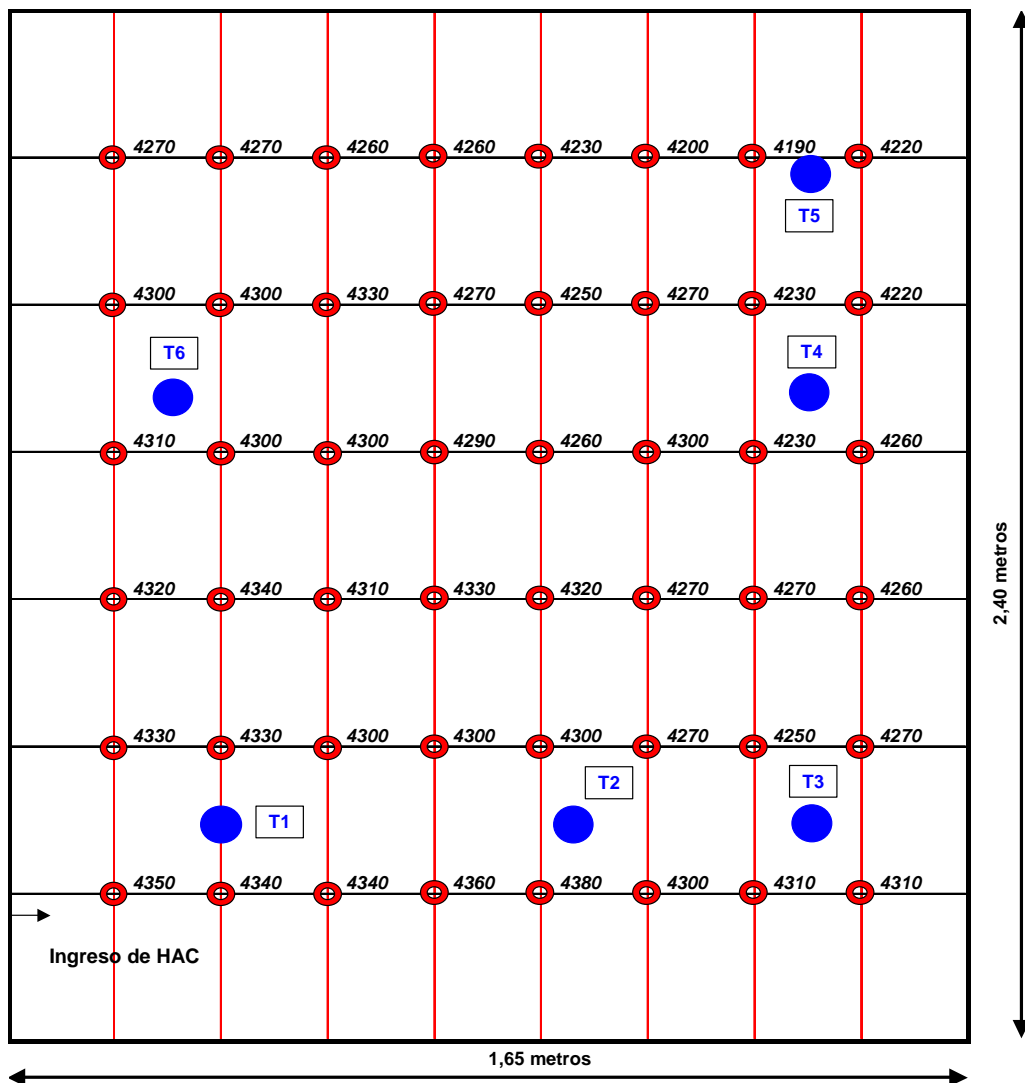


Tabla 23 – Velocidad de pulso ultrasónico IN SITU  
Tabique HACF

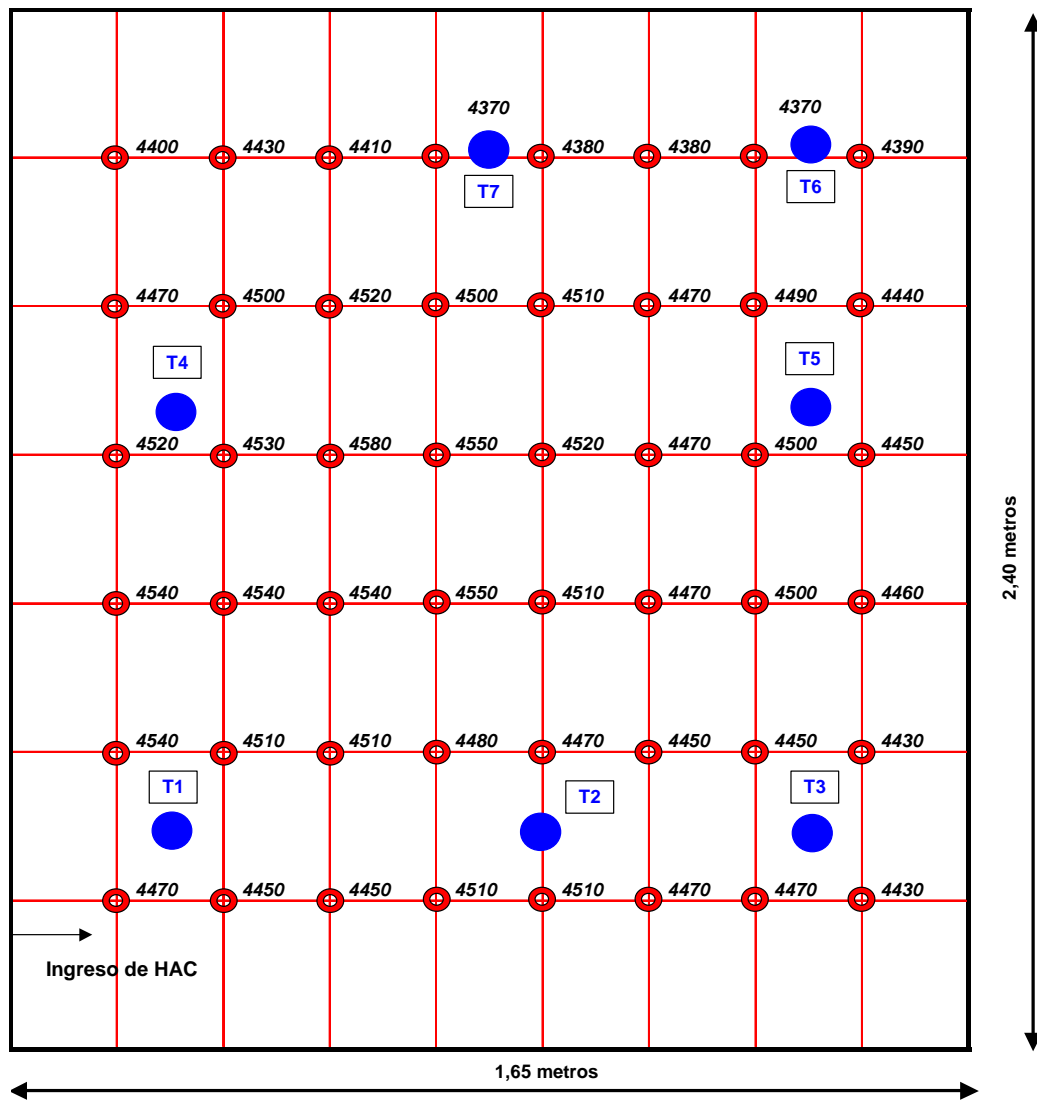


Tabla 24 – Resultados de velocidad de pulso ultrasónico IN SITU  
Tabique HACV

<i>Total determinaciones</i>	<i>Promedio</i>	<i>Desviación Standard</i>	<i>Coefficiente de variación</i>
48	4290 m/s	42 m/s	0.99%

Tabla 25 – Resultados de velocidad de pulso ultrasónico IN SITU  
Tabique HACF

<i>Total determinaciones</i>	<i>Promedio</i>	<i>Desviación Standard</i>	<i>Coefficiente de variación</i>
48	4475 m/s	52 m/s	1.16%



Se observa que el tabique hormigonado con la mezcla HACF presenta valores de ultrasonido sensiblemente superiores al realizado con la mezcla HACV.

Como era previsible, ambos tabiques mostraron velocidades de pulso mayores en la zona inferior del lado de la boca de llenado, verificándose los menores valores de pulso ultrasónico en la zona superior alejada de la boca de entrada. En el tabique HACV la tendencia es más acentuada.

A pesar de ello, los coeficientes de variación global obtenidos (de aproximadamente el 1%) son relativamente bajos según antecedentes de obra [68].

#### *- Aspecto visual*

La apreciación visual de la terminación superficial de los tabiques experimentales mostró una diferencia significativa. En efecto, el tabique elaborado con el hormigón HACF tuvo una excelente terminación superficial, difícil de obtener con hormigones convencionales.

El tabique HACV, en cambio, presenta una terminación superficial de inferior calidad con algunos defectos sobre todo en la zona más alejada de la boca de acceso.

Sin duda, una viscosidad elevada de la mezcla (a pesar de obtener la fluidez proyectada en el ensayo de extendido) lleva a inconvenientes de este tipo.

#### *- Determinación de la velocidad del pulso ultrasónico en el lugar de extracción*

En las Tablas 26 y 27 se informan los resultados obtenidos de velocidad de pulso ultrasónico en el lugar de extracción (promedio). La determinación se realizó inmediatamente antes de la extracción del testigo.

Este resultado es el promedio de 5 valores obtenidos en el centro y los cuatro costados del lugar donde posteriormente se extrajo el testigo. También se informa el coeficiente de variación para cada uno de los testigos extraídos.

En las mismas planillas se informan los valores de velocidad de pulso ultrasónico de los testigos medidos en laboratorio a los 28 días de edad.

Los resultados de ultrasonido en el lugar de extracción se corresponden con los valores obtenidos en el tabique, mostrando bajos coeficientes de variación.

**Tabla 26 – Determinaciones realizadas sobre los testigos extraídos.  
Tabique HACV**

<b>Identificación Testigo</b>	<b>Edad de ensayo</b>	<b>Resistencia corregida</b>	<b>Módulo elasticidad dinámico</b>	<b>Ultrasonido en el lugar de extracción</b>	<b>Coefficiente de Variación</b>	<b>Ultrasonido en laboratorio</b>	<b>Densidad</b>	<b>Absorción</b>
T1	28	50.0	37.2	4360	0.58	4400	2368	6.2
T2	28	49.1	37.2	4370	0.13	4370	2373	6.3
T3	28	42.8	34.0	4300	0.86	4360	2363	6.9
T4	28	40.5	34.3	4310	0.52	4340	2362	6.3
T5	28	36.3	31.7	4260	0.60	4270	2325	7.1
T6	28	43.6	35.6	4340	0.30	4320	2371	6.1
<b>Unidad</b>	<b>[días]</b>	<b>[MPa]</b>	<b>[GPa]</b>	<b>[m/s] (Promedio)</b>	<b>[%]</b>	<b>[m/s]</b>	<b>[kg/m<sup>3</sup>]</b>	<b>[%]</b>

**Tabla 27 – Determinaciones realizadas sobre los testigos extraídos.  
Tabique HACF**

<b>Identificación Testigo</b>	<b>Edad de ensayo</b>	<b>Resistencia corregida</b>	<b>Módulo elasticidad dinámico</b>	<b>Ultrasonido en el lugar de extracción</b>	<b>Coefficiente de Variación</b>	<b>Ultrasonido en laboratorio</b>	<b>Densidad</b>	<b>Absorción</b>
T1	28	51.3	40.0	4490	0.37	4630	2414	5.6
T2	28	54.7	41.5	4480	0.19	4600	2401	5.6
T3	28	51.0	39.5	4430	0.30	4620	2408	5.2
T4	28	52.7	40.8	4520	0.33	4640	2408	5.2
T5	28	51.6	40.4	4465	0.20	4570	2410	5.1
T6	28	46.6	37.2	4325	0.35	4470	2340	6.1
T7	28	47.7	37.3	4340	0.68	4440	2326	6.4
<b>Unidad</b>	<b>[días]</b>	<b>[MPa]</b>	<b>[GPa]</b>	<b>[m/s] (Promedio)</b>	<b>[%]</b>	<b>[m/s]</b>	<b>[kg/m<sup>3</sup>]</b>	<b>[%]</b>

### - Extracción de testigos

Se extrajeron testigos en distintos sectores de los tabiques experimentales, con el objeto de evaluar la homogeneidad del hormigón colocado en los mismos. La ubicación de los testigos se muestra en las Tablas 22 y 23, mientras que en las Tablas 26 y 27 se informan los resultados de resistencia a la compresión y módulo de elasticidad dinámico determinados en laboratorio.

Los testigos del tabique HACV fueron extraídos a los 19 días de la fecha de hormigonado y los correspondientes a HACF fueron extraídos a los 13 días. Luego fueron dejados al aire en ambiente de laboratorio hasta la edad de ensayo.

A continuación se detallan los resultados de ensayos realizados sobre los mismos.

- Resistencia a la compresión

En el caso del tabique HACV, la resistencia de los testigos osciló entre los 50.0 MPa (Testigo T1) y los 36.3 MPa (Testigo T5), lo cual representa un rango de variación significativo. El coeficiente de variación de los valores de resistencia efectiva es de casi un 12 %, mientras que la relación entre la resistencia efectiva promedio (43.7 MPa) y la resistencia potencial obtenida en probetas (49.6 MPa) es de 88 %. Analizando las diferencias entre la parte inferior y la superior, las mismas varían entre el 13 y 15 %.

En el tabique HACF los resultados de resistencia presentan una variación sensiblemente inferior que en el tabique HACV. El coeficiente de variación de la resistencia a la compresión es de 5.5% lo que demuestra una homogeneidad superior al tabique elaborado con la mezcla HACV. Por otra parte, la relación entre la resistencia efectiva promedio (50.8 MPa) y la resistencia potencial (53.1 MPa) es de 95.5 %. Las diferencias entre la parte inferior y la superior fueron del orden del 9 %.

Tanto las relaciones encontradas entre resistencia efectiva y potencial como las diferencias entre la parte inferior y superior de los tabiques, son comparables con las mostradas en otros antecedentes y analizadas en el Capítulo 4 (Punto 4.3) de la Parte I.

Las diferencias encontradas entre la parte inferior y superior del tabique, son similares o inferiores a las obtenidas en columnas de 2 metros de altura con HC [63]. Dichos valores variaron entre un 7 % y un 30 % para HC con distintas capacidades de exudación (3.5 % y 8 %, respectivamente).

- Módulo de elasticidad dinámico

Los resultados obtenidos se correlacionan con los valores de resistencia a la compresión en la Figura 32 para ambos tabiques experimentales.

Las correlaciones obtenidas son muy buenas para los dos tipos de hormigones evaluados.

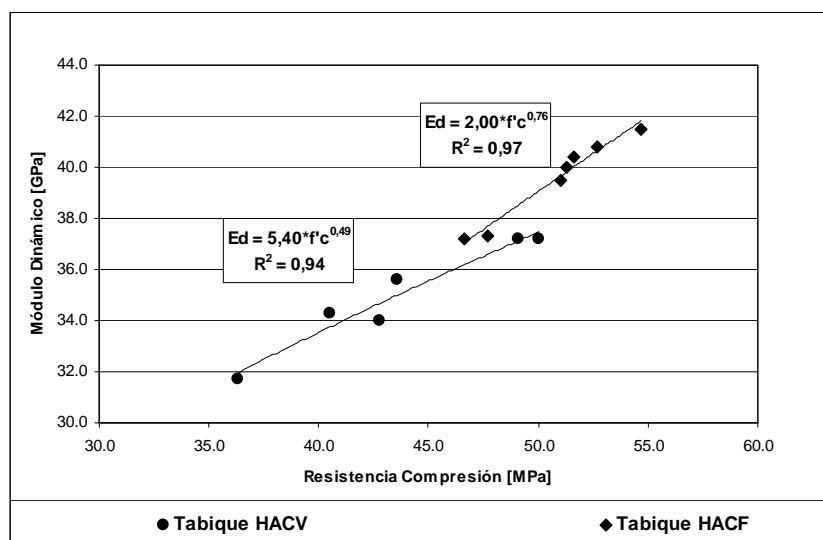


Fig. 32 - Relación Resistencia a Compresión / Módulo Dinámico en Testigos.

- Densidad y Absorción

Los resultados obtenidos (informados en las Tablas 25 y 26) se alinean con los otros parámetros evaluados. El tabique HACF es algo más denso (aproximadamente  $2400 \text{ kg/m}^3$  contra  $2350 \text{ kg/m}^3$  del tabique HACV) y los testigos extraídos presentan menores valores de absorción (5.5 % contra 6.3% del tabique HACV).

Por otra parte, los valores de absorción obtenidos en testigos no difieren sustancialmente de los resultados de laboratorio.

## Capítulo 12 - OBRAS

### 12.1 Introducción

La mezcla denominada HACF fue seleccionada para realizar dos obras en el ámbito de la Capital Federal y Gran Buenos Aires. La Tabla 28 muestra la composición, resultados de ensayo efectuados y su comparación con la mezcla de laboratorio. Las diferencias principales consisten en que en la Obra 2, en lugar de CPC se utilizó un CPN, resultando en este último caso con una dosis de aditivo SP levemente inferior al de la Obra 1. En ambos casos el aditivo SP utilizado fue el mismo que en laboratorio.

**Tabla 28 - Mezcla HACF utilizada en obra**

Material	HACF			Unidad
	Laboratorio	Obra 1	Obra 2	
CPC40	370	370	-	kg/m <sup>3</sup>
CPN40	-	-	370	kg/m <sup>3</sup>
Filler	240	240	240	kg/m <sup>3</sup>
Humo de Sílice	-	-	-	kg/m <sup>3</sup>
W/MC	0.47	0.47	0.47	-
W/P	0.28	0.28	0.28	-
Contenido de aire	1.3	1.4	1.4	%
Contenido de agregado grueso	840	840	840	kg/m <sup>3</sup>
TMA	12.5	12.5	12.5	mm
Dosis aditivo SP	0.55	0.51	0.48	% polvo
<b>Estado Fresco</b>				
Extendido (Slump Flow )	67.0	68 ± 3	66 ± 5	cm
Tiempo T50	2.8	1,8 ± 0,5	-	seg
Nº de camiones controlados	-	25	8	-
Dosis adicional a pie de obra	-	10 ± 4	No necesario	% Dosis inicial
<b>Estado Endurecido</b>				
f'c a 7 días	39.5	37.8	40.1	MPa
Desvío standard a 7 días	-	2.4	5.6	MPa
f'c a 28 días	47.6	49.8	48.7	MPa
Desvío standard a 28 días	-	4.7	6.1	MPa
Permeabilidad al aire Torrent, 28 días	0.144	0,070 (*)	-	10 <sup>-16</sup> m <sup>2</sup>
Permeabilidad al aire Torrent, 56 días	0.108	-	-	10 <sup>-16</sup> m <sup>2</sup>

(\*) Valor medio de 4 determinaciones

Como aclaración, es importante mencionar un aspecto que hace a la implementación en obra de ambas mezclas estudiadas. En el hormigón HACV el orden de ingreso de aditivos impone que el AMV sea el último componente que se adiciona a la mezcla, impidiendo de esta forma que la misma pueda modificarse sustancialmente como consecuencia del efecto “impermeabilizante” que produce dicho aditivo (dificulta un ajuste de la dosis de SP a pie de obra). Esto significa un inconveniente para el hormigón HACV puesto que su utilización puede requerir un ajuste muy preciso a escala de obra. En cambio, la mezcla HACF no presenta el mismo problema y se pueden manejar los ajustes en planta y en obra de la misma forma que los que se realizan para un HC. Lo dicho fue comprobado en las dos obras ejecutadas.

Las características de estas dos obras merecen ser comentadas debido a las complicaciones y exigencias que inclinaron la decisión de utilización de HAC pese a existir una diferencia del orden del 25% en el costo del material respecto de un hormigón convencional de similar nivel de resistencia.

## 12.2 Obra 1 – Parque Industrial Pilar

Se trata de una estructura para almacenar alimentos formada por tabiques de 4,20 metros de altura y 0,25 metros de espesor. Estos tabiques forman compartimentos cuyo lado mayor tiene una longitud de unos 10 metros y el lado menor unos 4 metros. El tiempo de transporte a la obra (60 minutos) fue una exigencia adicional para el control del hormigón fresco. Esto obligó a una re – dosis del aditivo SP (del orden del 10 % de la dosis inicial) tal como se evidencia en la Tabla 28.

Como datos importantes deben mencionarse que la mano de obra disminuyó un 70% (7 personas para el hormigón convencional y 2 para el HAC), el tiempo de ejecución fue un 25% menor y la terminación superficial fue muy superior a la obtenida con el hormigón convencional. En la Foto 15 pueden observarse algunos detalles de la obra.

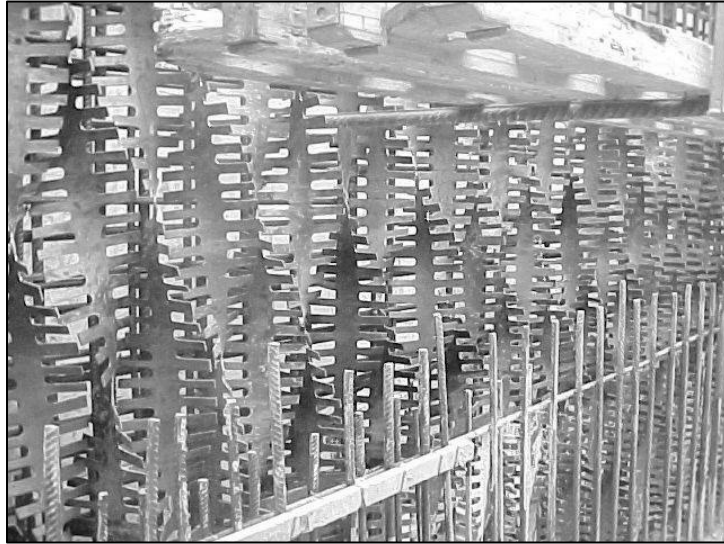
La permeabilidad al aire medida in situ (método Torrent) evidenció una muy buena homogeneidad del hormigón de recubrimiento y sus resultados fueron superiores a los obtenidos en laboratorio. Sin embargo debe aclararse que el contenido de humedad del hormigón de obra era superior a las muestras de laboratorio acondicionadas al efecto, hecho que disminuye la permeabilidad al aire del hormigón (el agua contenida en la estructura de poros dificulta el paso del aire a través de la misma).



Foto 15 – Obra Planta Industrial.

## 12.3 Obra 2 – Bóveda de seguridad de un Banco

Se trata de una estructura de tabiques de 3 m de altura y un espesor de 45 cm. La decisión de utilizar un HAC se basó en la gran densidad de armadura de los mismos compuesta por la armadura convencional y una armadura helicoidal de seguridad. Dicha congestión imposibilitaba la compactación mediante vibradores internos. A pesar de la extrema dificultad de colocación, la estructura terminada mostró una muy buena terminación superficial, sin oquedades ni defectos importantes. El aspecto de la gestión de armaduras se muestra en la Foto 16.



**Foto 16 – Bóveda de seguridad de un banco.**

## Capítulo 13 - HAC CURADO A VAPOR

### 13.1 Estudios de laboratorio

En los últimos años se incrementó notablemente el uso de HAC en la industria de elementos premoldeados. Ya existen varios ejemplos de utilización en distintos países, en algunos de los cuales varias plantas han cambiado totalmente la utilización de HC por HAC [50][51][52].

La disminución de los tiempos de ejecución (permitiendo una mayor reutilización de los encofrados), las mejoras en el ambiente de trabajo (con menor emisión de ruidos, vibración y polvo), la homogeneidad conseguida en elementos densamente armados y de difícil acceso y la calidad de la terminación superficial favorecieron esta tendencia.

Otras ventajas que pueden citarse son la eliminación de elementos aislantes de vibración, estructuras para el soporte de los moldes más simples debido a la eliminación de vibración, obtención de colores más uniformes (elementos pigmentados), mayor flexibilidad de formas y elementos más esbeltos, entre otros [50].

Los antecedentes citados muestran en todos los casos, además de las ventajas técnicas detalladas, interesantes ahorros de costos.

En el estudio de la aplicación de HAC a la industria del hormigón del premoldeado, es válido plantear el interrogante si el desarrollo de resistencia a temprana edad es suficiente para alcanzar las necesidades de la industria. El alto contenido de adiciones de los HAC y las dosis de SP, pueden afectar el tiempo de fraguado y la ganancia de resistencia inicial. Por este motivo se comenzó un programa de estudios con el objetivo de analizar el comportamiento de este material en ese sentido. El primer objetivo fue estudiar el comportamiento de un HAC con CPC40 y adición de filler calcáreo sometido a distintos ciclos de curado a vapor. El segundo fue estudiar la influencia del tipo de cemento utilizado en HAC curados bajo un determinado ciclo de curado a vapor a presión normal.

Las condiciones de curado utilizadas en este trabajo fueron las siguientes:

- *Curado normalizado*

Luego del moldeo y durante las siguientes 24 hs, las probetas permanecieron en ambiente de laboratorio. Luego, el curado se efectuó según IRAM 1534.

- *Curado a vapor a presión normal*

Se efectuó la elección de 3 ciclos de curado a vapor, tratando de abarcar rangos de operación comúnmente utilizados en las industrias. Los ciclos de curado a vapor utilizados se realizaron para obtener valores de madurez que oscilen entre 500 °C - hs. y 1500 °C - hs. Una vez concluido el llenado y durante las siguientes 2 horas, las probetas fueron dejadas en ambiente de laboratorio a una temperatura de 23 °C ± 2° C. Este período generalmente se denomina “período de descanso”. Luego fueron llevadas a la cámara de curado a vapor sometiendo al hormigón a los ciclos que se detallan a continuación en Tabla 29 y Figura 33.



Tabla 29 – Detalle ciclos.

Período	Unidad	C1	C2	C3
1	[hs]	2		
Temp. Inicial	[°C]	23		
2	[°C/hs]	17		
Temp. Máxima	[°C]	75		
3	[hs]	1	7	13
4	[°C/hs]	17		
Temp. Final	[°C]	23		
Tiempo Total	[hs]	9	15	21
Madurez	[°C hs]	505	1015	1525

CICLO TIPO

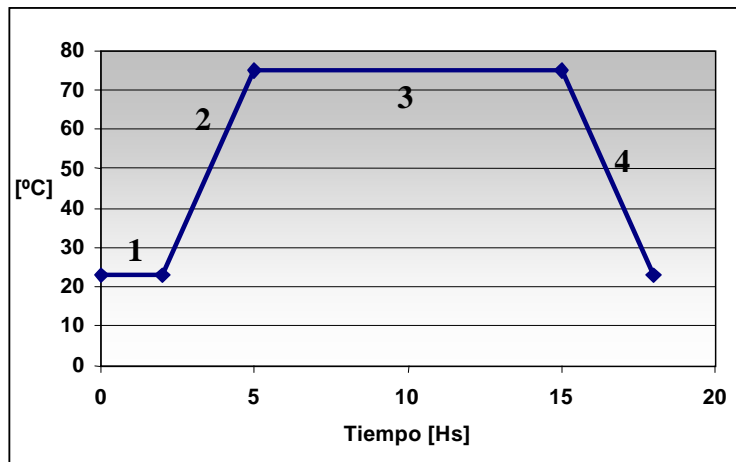


Fig.33 – Ciclo Tipo

Como se puede observar, los tres ciclos de curado acelerado poseen períodos de descanso, gradientes térmicos y temperatura máxima de exposición similares. Como única variable se impuso el tiempo de permanencia a la temperatura máxima.

Una vez concluido el ciclo en la cámara de curado a vapor, las probetas continuaron su curado hasta el momento del ensayo, al aire y en ambiente de laboratorio, a una temperatura de  $23\text{ °C} \pm 2\text{ °C}$  y humedad relativa del  $60\% \pm 10\%$ .

## 13.2 Materiales y mezclas utilizadas

Se utilizó como mezcla base el HACF descrito en la Tabla 10. Para el estudio de la influencia del tipo de cemento, se emplearon tres tipos: un Cemento Portland Compuesto (CPC40), un Cemento Portland Normal (CPN40) y un Cemento de Alto Horno (CAH40) de acuerdo a las normas IRAM 50000 y 50001. Además, como adición se utilizó Filler Calcáreo, tal como se adelantó en el diseño de la mezcla HACF. Las características de los cementos se muestran en la Tabla 30.

**Tabla 30 – Curado a vapor.  
Características de los cementos y filler utilizados**

Ensayo	Unidad	CPC40	CPN 40	CAH40	Filler
Sup. Esp. Blaine	[m <sup>2</sup> /Kg]	420	303	484	590
Resistencia a 2 días	[MPa]	15	19.7	15.6	-
Resistencia a 28 días	[MPa]	47.8	42.6	50.7	-

## 13.3 Equipos y metodología de ensayo

El equipamiento utilizado y la metodología de ensayos 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>. El equipo utilizado permite modelar cualquier ciclo de curado a presión normal.

- *Madurez*

Se adoptaron 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) Fórmula de Nurse – Saúl [69]

En 1951 Saúl [70] enuncia lo que hoy se conoce como La regla o Principio de Madurez. Este principio, utilizado como base para la estimación de la resistencia del hormigón, se expresa de la siguiente forma:

“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:

$$M = \sum (T - T_0) \Delta t \quad (1)$$

Siendo:

M: Madurez. (°C hs.)

T: Temperatura promedio del hormigón en el lapso de tiempo  $\Delta t$ .

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

$\Delta t$ : Intervalo de tiempo considerado.

b) Fórmula de Arrhenius [69] (Método de Edad Equivalente)

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 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:

$$T_e = \sum e^{-Q(1/T_a - 1/T_s)} \Delta t \quad (2)$$

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  $\Delta t$ , en grados °K.

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

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

La ecuación (2) presenta la dificultad de la determinación de la energía de activación, la cual representa la sensibilidad del hormigón al aumento de temperatura. Es una constante que depende del tipo de cemento, finura, relación W/MC, 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. [61] [71] [72].

- *Calorímetro semiadiabático*

El equipo con el que se realizó la determinación de la energía de activación [71] se observa en el esquema adjunto 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.

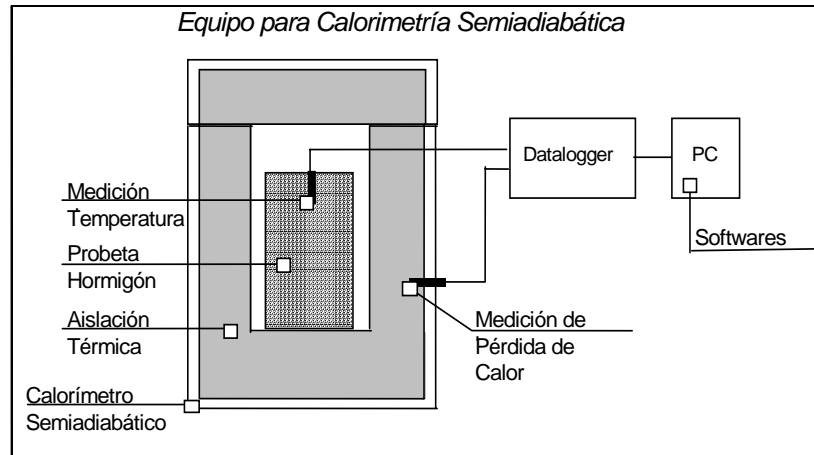


Fig.34 - Equipo de calorimetría semi-adiabática.

## 13.4 Análisis de Resultados

### 13.4.1 HAC sometido a distintas condiciones de curado

- Evolución de la resistencia en el tiempo

En la Figura 35 se observan las resistencias a compresión obtenidas para cada condición de curado en función de la edad.

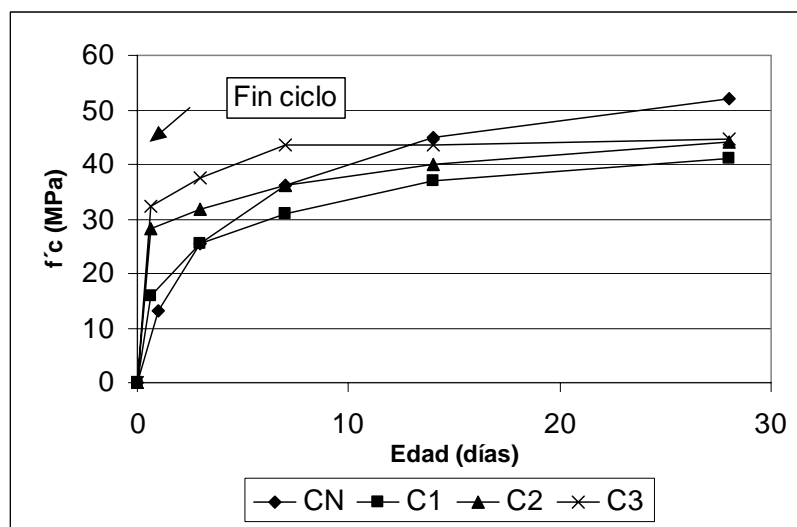
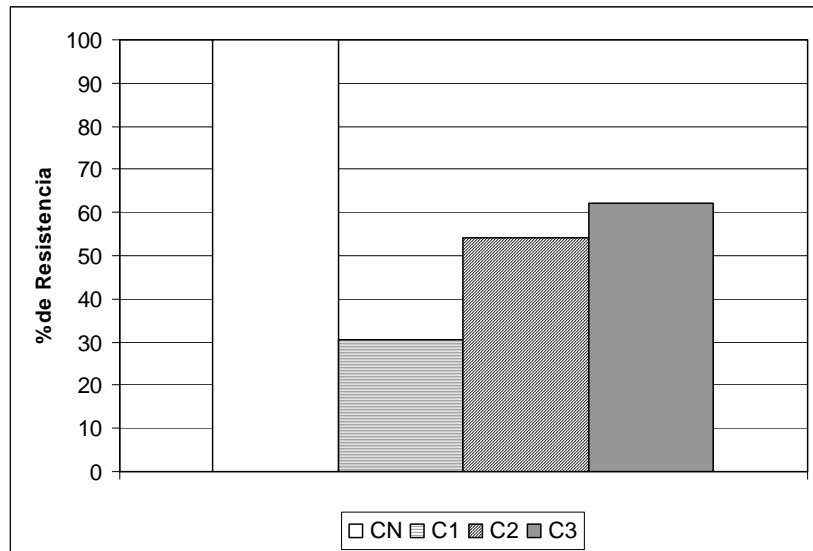


Fig.35 - Resistencia a Compresión para distintos ciclos de curado.

El análisis de estos valores conduce a las siguientes conclusiones:

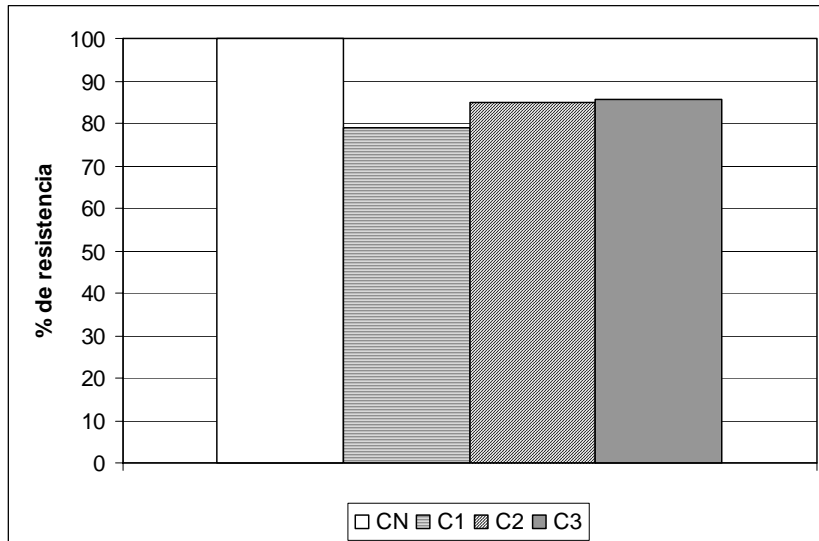
- Al finalizar los ciclos C2 y C3 es posible obtener niveles de resistencia superiores a 28 MPa.
- Se deduce que a mayor tiempo de exposición a la temperatura máxima, menor es el crecimiento de resistencia en el tiempo.
- A mayor tiempo de exposición a la temperatura máxima, mayor resistencia inicial.

La Figura 36 compara porcentualmente la resistencia a la compresión a 28 días con curado normalizado, con las resistencias que se obtienen al final de cada uno de los ciclos de curado a vapor. Cabe destacar que en los ciclos C2 y C3, se alcanzan resistencias a la compresión superiores al 50% de la resistencia a 28 días con curado normalizado.



**Fig.36 - % Resistencia inicial vs Resistencia a 28 días.**

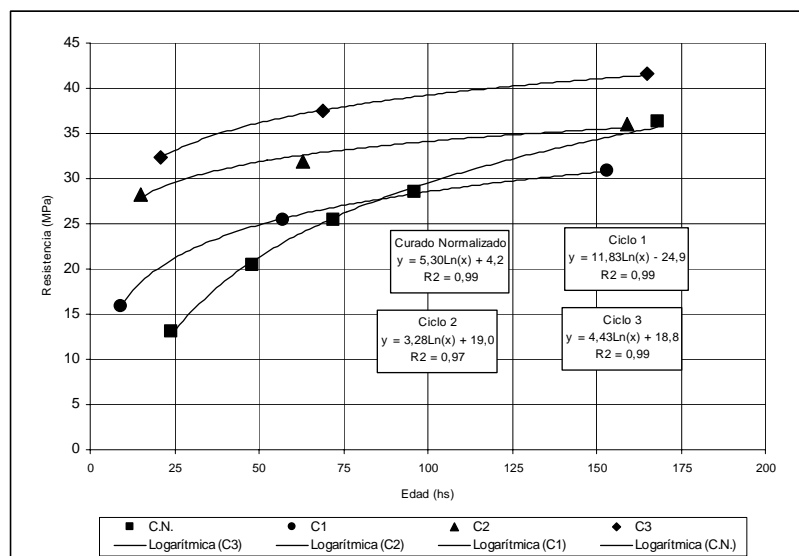
Por otra parte, en la Figura 37, se realiza una comparación porcentual entre la resistencia a la compresión a 28 días con curado normalizado, con las resistencias que se obtienen a esa edad en los hormigones curados a vapor. Como se puede observar, la resistencia a la compresión a 28 días de las probetas curadas a vapor, oscila en un 80 % de la obtenida con curado normalizado.



**Fig.37 - % Resistencia final vs Resistencia a 28 días.**

De la comparación de las Figuras 36 y 37 se desprende que la elección del ciclo de curado influye, en forma notoria, en las resistencias a tempranas edades. Sin embargo, parecería no influir demasiado en los niveles de resistencia hallados a 28 días. Este comportamiento brinda la posibilidad de elegir un ciclo que se ajuste sólo a los requerimientos resistentes a edades tempranas ya que la resistencia a 28 días no varía significativamente con el ciclo de curado a vapor elegido.

Es sabido que el período de utilización de los moldes y encofrados queda determinado por la resistencia del hormigón al momento del desmolde. Las curvas y las ecuaciones de la Figura 38 permiten mostrar que es posible optimizar el proceso constructivo conociendo las correlaciones entre la resistencia a compresión y la edad expresada en horas. Para obtener una mayor precisión, el gráfico se realizó hasta los 7 días de edad. La correcta utilización de este gráfico nos permite interpolar, con buena aproximación, la resistencia del hormigón a una edad determinada. Por lo tanto, según el ciclo de curado elegido, es posible conocer qué resistencia tendrá el elemento estructural en el momento del desmolde, movimiento de la pieza o aplicación de la fuerza de tesado.



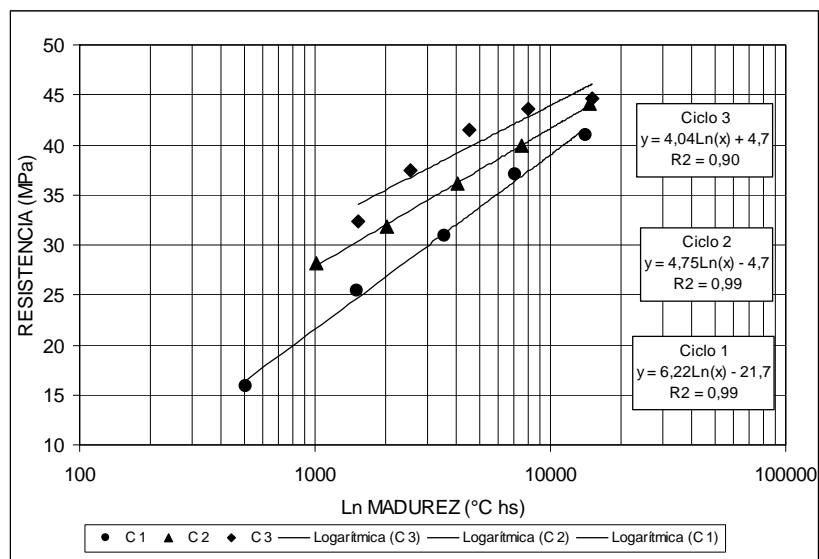
**Fig.38 - Evolución Resistencia hasta los 7 días de edad.**

- *Madurez y Edad Equivalente*

a) *Fórmula de Nurse - Saúl*

Adoptando la mencionada ecuación de Nurse-Saúl (1) se procedió al cálculo de la madurez para cada una de las edades de los ciclos de curado a vapor.

En la Figura 39, se observa la relación hallada entre la resistencia a compresión del hormigón y la madurez expresada en escala logarítmica. Se observa que las ecuaciones propuestas se encuentran muy bien correlacionadas para cada ciclo de curado. Sin embargo, no se cumple el principio de Nurse-Saúl ya que hormigones con igual madurez no tienen la misma resistencia. Esto podría deberse a que la formulación matemática (1) no refleja adecuadamente el efecto de las altas temperaturas a edades tempranas [72].



**Fig.39 - Correlación Resistencia - Madurez.**

La discrepancia observada respecto del Principio de Madurez y de la función de Nurse – Saul (Ec.1), radica en el hecho que la ganancia de resistencia está fuertemente influenciada por la temperatura de curado, especialmente a cortas edades.

Para que se cumpla la relación planteada entre Madurez y Resistencia, el valor de madurez debería “interpretar” el efecto de las condiciones térmicas durante el curado sobre el desarrollo de la resistencia del hormigón.

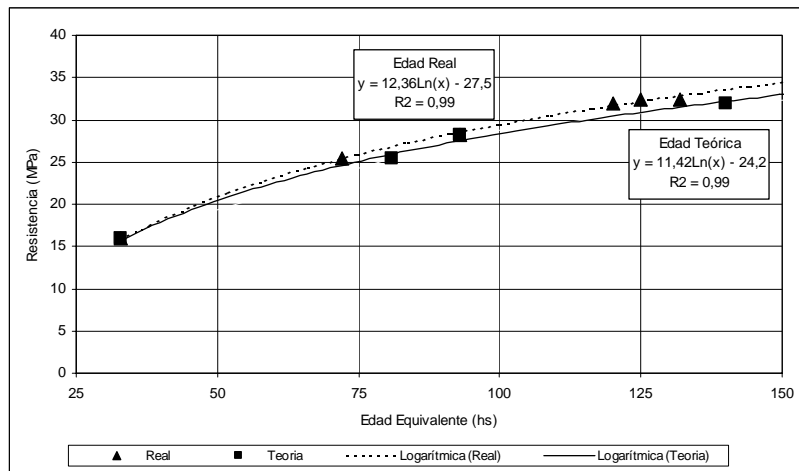
La influencia de la temperatura sobre la evolución de la resistencia está vinculada con las características de los componentes resultantes de la hidratación del cemento, los cuales son dependientes de la velocidad con que se produce la reacción de hidratación.

La aplicación de la función de Nurse –Saul para la estimación de la resistencia, asume una relación lineal entre el aumento de temperatura y la ganancia de resistencia. Si bien un aumento de temperatura durante el curado del hormigón es seguido por un desarrollo resistente acelerado, el valor del incremento que experimenta la resistencia no es directamente proporcional a dicho aumento de temperatura.

*b) Fórmula de Arrhenius (Método de Edad Equivalente)*

La energía de activación para el HAC con CPC40, fue de 34500 J/mol [61] [71]. Por lo tanto, el valor de la constante Q de la ecuación de Arrhenius es 4150 °K. Luego, se procedió al cálculo de la edad equivalente para cada una de las probetas ensayadas (Ec. 2). En forma paralela fueron ensayadas a distintas edades probetas con curado normalizado para la verificación de los resultados obtenidos. En la Figura 40 se distinguen dos curvas:

- Edad Teórica: es el resultado de todas las probetas curadas a vapor bajo los tres ciclos estudiados (C1, C2 y C3) con la energía de activación obtenida.
- Edad Real: es el resultado de las probetas sometidas a curado normalizado.



**Fig. 40- Correlación Resistencia - Edad Equivalente**

Analizando la Figura 40 se observa que el método de Arrhenius establece una excelente correlación con los valores de resistencia a primeras edades. La utilización de este método permite obtener una relación única, válida para los tres ciclos de curado adoptados, entre la resistencia y la edad equivalente. Esto implica que es posible determinar la edad equivalente necesaria para la resistencia solicitada independientemente del ciclo de curado a vapor utilizado.

*c) Comparación de los métodos de madurez*

A la luz de las experiencias realizadas, se puede comprobar que el método de la edad equivalente presenta una base teórica cuya formulación logra interpretar, de mejor manera, el comportamiento del material. La ecuación de Nurse-Saul (Ec. 1) permite establecer correlaciones diferentes para cada ciclo de curado a vapor, hecho que no ocurre con la correspondiente a Edad Equivalente de Arrhenius (Ec. 2) que tiene validez para todos los ciclos estudiados. La observación de las Figuras 39 y 40 permite confirmar lo antedicho.



### 13.4.2 Influencia de los distintos tipos de cemento.

Otro de los objetivos del trabajo fue comparar la influencia del tipo de cemento en los HAC sometidos al ciclo C2 de curado a vapor a presión normal descrito anteriormente. Tomando como base la misma dosificación, se realizaron pruebas con cemento portland normal (CPN40) y cemento de alto horno (CAH40) además de lo realizado con el cemento CPC40.

#### - Evolución de la resistencia en el tiempo

En la Fig. 41 se muestra la evolución de la resistencia en el tiempo de los tres hormigones. Se evidencia que es posible con cualquiera de los tres cementos obtener niveles de resistencia mayores de 28 MPa al fin del ciclo de curado a vapor. También se incluye como dato adicional importante el módulo de elasticidad estático al final del ciclo.

Se destaca la notable eficiencia del curado a vapor en el hormigón con el cemento de alto horno. Los niveles resistentes desarrollados se deberían al efecto de la temperatura sobre la hidratación de la escoria.

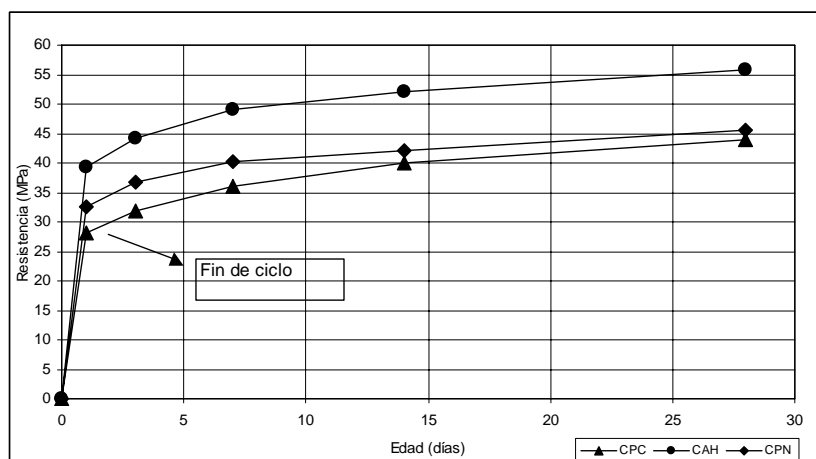


Fig. 41 - Resistencia - Edad para distintos tipos de cemento

Tabla 31 – Módulo de elasticidad estático al fin del ciclo.

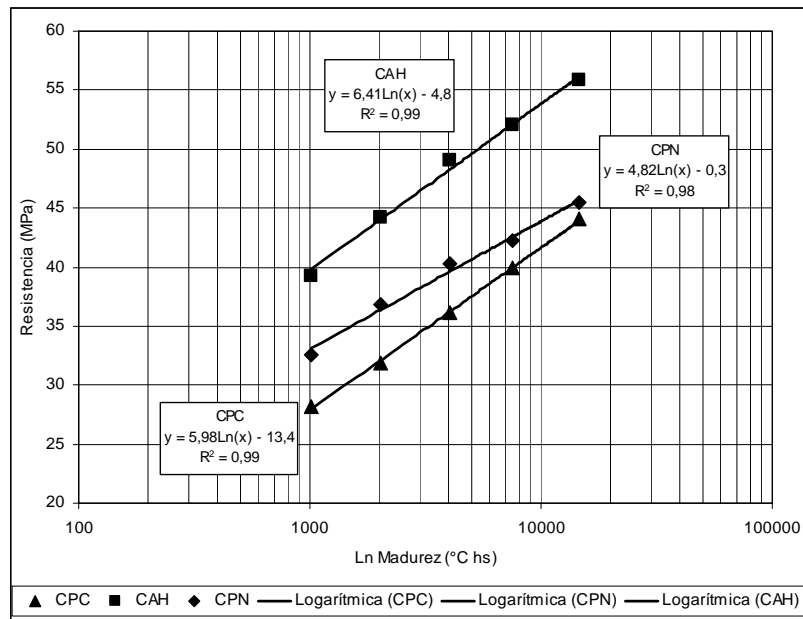
	CPC	CAH	CPN
E Fin de ciclo [GPa]	26.2	31.3	24

#### - Método de Madurez

Mediante el uso de la fórmula de Nurse-Saúl (Ec. 1) se efectuó el cálculo de la madurez para cada una de las edades de los hormigones estudiados.

De acuerdo al principio enunciado los resultados obtenidos no podrían compararse ya que los hormigones son distintos. Sin embargo, un objetivo del trabajo es observar la influencia del tipo de cemento mediante el uso de este método.

Como se desprende de la Fig. 42, para una dada madurez, la resistencia muestra variaciones de más de 10 MPa, lo cual se explica por la influencia del tipo cemento utilizado.



**Fig. 42- Resistencia - Madurez para distintos tipos de cemento**

### 13.5 Consideraciones finales

De los resultados obtenidos surgen las siguientes consideraciones:

- Los HAC se presentan como una alternativa válida para su utilización en plantas de premoldeados con curado a vapor.
- Los HAC estudiados elaborados con CPC evidenciaron un muy buen comportamiento frente a ciclos de curado a vapor a presión normal, alcanzándose niveles de resistencia al final de los ciclos C2 y C3 superiores a los 28 MPa.
- La evaluación de la madurez con la formulación propuesta por Nurse- Saul no refleja adecuadamente el comportamiento del hormigón sometido a distintos ciclos de curado a vapor.
- El método de la edad equivalente (fórmula de Arrhenius) muestra una muy buena correlación con la resistencia a compresión, pudiendo utilizarse como estimador independientemente del ciclo de curado utilizado. Sin embargo, ofrece como dificultad la determinación de la energía de activación.
- Si bien es conocido que el tipo de cemento influye significativamente en la evolución de resistencia, en particular el CAH mostró un comportamiento destacable frente al curado a vapor. Esto se justificaría por la activación temprana de la escoria por efecto de las altas temperaturas (en los CAH la energía de activación es mayor que en los CPN y CPC) y también por la mayor finura de este respecto de los otros cementos utilizados en la comparación.

## Capítulo 14 - LOS HAC Y SU RELACIÓN CON LAS REGLAMENTACIONES VIGENTES.

### 14.1 Discusión

La durabilidad de una estructura no solo depende de la calidad potencial del material sino también de la metodología de colocación del mismo, que hace a las características de la estructura terminada.

La utilización de este nuevo material elimina en parte la incertidumbre que puede provocar el error humano durante la colocación, con lo cual las estructuras terminadas tendrían mayor grado de confiabilidad.

Asimismo, la disminución de la probabilidad de fallas por colocación como así también la mayor homogeneidad que se logra en las estructuras terminadas, no solo debe tenerse en cuenta para valorar su durabilidad, sino también para considerar posibles modificaciones en los procedimientos de cálculo, especialmente lo relacionado con los coeficientes de seguridad aplicados. Es decir, su consideración debería tenerse en cuenta en el coeficiente parcial de minoración de resistencia ( $\gamma_m$ ) utilizado por los reglamentos de origen europeo, y en el coeficiente de reducción global de resistencia ( $\phi$ ) adoptado por el código ACI 318 y por el reglamento CIRSOC 201 (2002), actualmente en período de revisión. Dichos coeficientes tienen en cuenta los posibles factores que pueden incidir desfavorablemente en la colocación del hormigón en la obra, y la relación entre la resistencia potencial y la resistencia efectiva de la estructura.

Se ha comprobado [73] que la falta adecuada de compactación ha provocado importantes reducciones de resistencia del hormigón colocado en obra, que puede variar entre un 8 y 30 %. Dicho rango se puede extender hasta el 60 % si se trata de hormigones de bajo asentamiento, como algunos que se emplean en la industria del premoldeado. Naturalmente esos valores resultarán significativamente menores con el uso de HAC.

La utilización de nuevas tecnologías requieren la adaptación y/o modificación de normas y reglamentos de seguridad vigentes. Al respecto se puede mencionar que estos últimos han evolucionado en el tratamiento de los conceptos de durabilidad y vida en servicio.

Conviene aquí diferenciar los distintos niveles de reglamentos de acuerdo al grado de avance o evolución que se está registrando en el mundo [74]:

#### ➤ El diseño prescriptivo tradicional

Este tipo de reglamentos imponen requisitos en la dosificación (máxima relación agua/cemento, mínimo contenido de cemento, tipo de cemento etc.), niveles admisibles de sustancias agresivas que se pueden incorporar en la mezcla, recubrimientos mínimos, fisuración admisible, etc.

Los reglamentos prescriptivos surgen de los resultados de investigaciones tecnológicas y experiencias de obras en servicio. Dicha información depende de las condiciones locales del medio y de los materiales con los cuales se realizaron las obras. Por lo tanto su extrapolación a otros medios puede ser inadecuada. Esto incluye nuevas tecnologías que conducen a comportamientos diferentes respecto de los hormigones convencionales, como puede ser el HAC.

➤ El diseño prescriptivo avanzado

Estos reglamentos combinan requisitos prescriptivos similares a los del primer nivel, con requisitos prestacionales tales como la resistividad eléctrica, la absorción capilar, la permeabilidad a gases y líquidos, etc. Dichas evaluaciones se pueden realizar tanto en laboratorio como en la obra propiamente dicha. Este es el caso del Código Modelo CEB-FIP (1990), normas de la CEE (Eurocódigo 2-1992) y ACI 318 (2000).

➤ El diseño prestacional

Este nivel está en desarrollo y se basa en la determinación de la vida en servicio. Para ello se debe tener en cuenta, entre otros, el uso de un modelo matemático de predicción probado, que tiene en cuenta la formulación científica del mecanismo de deterioro o una aproximación tecnológica sencilla y acotada. Además el comportamiento y el mantenimiento de la estructura durante su vida en servicio deben estar claramente indicados.

Los códigos o reglamentos orientados hacia el criterio prestacional (desempeño) permiten una más rápida adaptación a los nuevos desarrollos que en el caso de los prescriptivos. Por otra parte, con reglamentos como estos últimos (prescriptivos) se corre el riesgo que el propio reglamento se constituya en un obstáculo para el desarrollo de nuevas tecnologías más que un incentivo para el mismo.

Conforme se avance en las investigaciones y se incremente el conocimiento y la experiencia adquirida en obras, estos conceptos deberían volcarse a las reglamentaciones vigentes para obtener el máximo provecho de esta nueva tecnología. Esto es, la producción de mezclas con menor contenido de ligantes o bien el aumento de la vida en servicio de las estructuras (concepto de sustentabilidad).

Por último, y quizás como una necesidad urgente, es indispensable la normalización de los procedimientos y técnicas de ensayo sobre el hormigón en estado fresco, para fijar los criterios de aceptación y rechazo.

## Capítulo 15 - CONCLUSIONES

### 15.1 Introducción

La revisión de los antecedentes disponibles a la fecha indica claramente que la aplicación de los HAC involucra no sólo aspectos relacionados con el diseño de la mezcla, sino también con otras etapas del proyecto y proceso constructivo que resultan diferentes respecto de las prácticas tradicionales. En efecto, las partes involucradas deberán tener en cuenta las siguientes consideraciones:

- *Los propietarios de las obras:* deberán tener en cuenta las ventajas asociadas a la reducción de tiempos constructivos y la obtención de estructuras con menos defectos y por consiguiente más confiables.
- *Los ingenieros y arquitectos que diseñen la estructura:* deberán tener en cuenta sus propiedades en estado endurecido (durabilidad, módulo estático, creep, adherencia, terminación superficial, etc.)
- *Los encargados de ejecutar la obra:* deberán tener en cuenta la optimización de la mano de obra, la disminución de defectos de compactación y las mejoras asociadas con menores niveles de ruido y polución (los HAC se encuentran dentro de los hormigones considerados ambientalmente “amigables”)

Por los motivos expuestos, es posible considerar al HAC no solo como un hormigón de alto desempeño que puede cambiar la Tecnología del Hormigón en los próximos años, sino más aún, considerarlo en sí mismo como una Tecnología Constructiva diferente.

Ahora bien, al momento de hacer una evaluación de los resultados que se obtienen con los HAC, es necesario resaltar que su diseño se puede alcanzar siguiendo diferentes caminos y con una significativa diversidad de materiales componentes que están disponibles en el mercado (agregados partidos o redondeados, cementos compuestos, distintas adiciones minerales, aditivos SP de diferentes tipos, AMV, etc.). Naturalmente, dependiendo de los materiales utilizados, los resultados pueden ser diferentes.

Por lo tanto, las conclusiones que surgen del presente proyecto, deberán considerarse teniendo en cuenta que las mismas son válidas para el conjunto de materiales utilizados, recordando que si se modifica alguno de ellos los resultados pueden variar significativamente. Sin embargo, como se verá en el desarrollo de algunos puntos, ciertas conclusiones o conceptos tienen validez general, es decir, son independientes de los materiales utilizados.

### 15.2 Diseño y estado fresco

Respecto del método de diseño seleccionado (método general de Okamura), se puede decir que los ensayos previos en pasta y mortero de acuerdo a los parámetros propuestos, permitieron acortar significativamente los tiempos necesarios para optimizar las mezclas. En efecto, con estos estudios fue posible definir con bastante aproximación las dosis de aditivos SP y AMV, el porcentaje de filler calcáreo y la relación W/P que fueran compatibles con una adecuada “autocompactabilidad” del hormigón. Sin embargo, los ajustes posteriores en hormigón siguiendo los lineamientos del método, resultaron en mezclas con elevados contenidos de pasta. Debido a ello se optó por no seguir el mismo a partir de este punto (fase hormigón) y efectuar la

selección del contenido de agregado grueso de manera tal que la mezcla resultante verifique satisfactoriamente los requisitos de “autocompactabilidad”, mediante la ejecución de distintos ensayos en estado fresco.

A modo de resumen, la Tabla 32 muestra parámetros reológicos y de diseño generales *orientativos*, como consecuencia de las mezclas que han arrojado los mejores resultados, tanto en laboratorio como en obra. En algunos casos dichos valores son similares a los recopilados de los antecedentes internacionales, mientras que otros difieren significativamente. Naturalmente, los mismos resultan válidos únicamente para los materiales y el tipo de estructuras que han sido ejecutadas en estas experiencias.

**Tabla 32 - Parámetros reológicos y de diseño orientativos**

Parámetro	Unidad	Rango	OBS
Tamaño máximo del agregado	[mm]	12,5 - 19	
Volumen de agregado grueso	[lts/m <sup>3</sup> ]	300-330	
Relación Ag. Fino/Ag. Total	En peso	0,50 - 0,53	
Contenido de agua	[lts/m <sup>3</sup> ]	160-180	[1]
Volumen de pasta (excluido el aire)	[lts/m <sup>3</sup> ]	340 - 390	
Relación agua/polvo	En volumen	0,8 - 1,2	[2]
Relación Ag. Fino / Mortero (excluido el aire)	En volumen	0,43 - 0,50	
Slump Flow Test	[cm]	65 -70	
T50	[seg]	1,8 -3,5	
U-Test	[cm]	> 30	
L-Box	H2/H1	> 0,80	
V-Funnel	[seg]	5 - 8	
Aire	[%]	1,5 -3,0	
"Yield Sress"	[Pa]	220 - 280	[3]
Viscosidad Plástica	[Pa x s]	70 - 120	[3]

**Observaciones:**

[1] Hasta 190 lts para HAC con AMV

[2] Hasta 1,35 para HAC con AMV

[3] Valores obtenidos con ecuaciones de correlación del Capítulo 1-Punto 1.1- (viscosímetro BTRHEOM)

En efecto, vale aquí resaltar el hecho que cada HAC deberá ser diseñado teniendo en consideración que su condición en estado fresco debe interactuar con aspectos relacionados al tipo de estructura y las técnicas de colocación disponibles (dimensiones del elemento, forma, cuantía de armadura, colocación con bomba desde la parte inferior o superior de los encofrados, etc.). Es decir, se deben relacionar las características en estado fresco evaluadas mediante ensayos (por ejemplo: extendido, T50, etc.) con las características del elemento a hormigonar.

Por lo tanto, los pasos detallados en el Punto 7.5 conforman una guía de diseño sencilla que, junto con los parámetros informados en la Tabla 32, posibilita reducir

significativamente el número de pastones de prueba necesarios para la obtención de un HAC.

Desde el punto de vista de la composición de las mezclas obtenidas, resulta significativa la diferencia entre los contenidos de agua necesarios para obtener extendidos similares en la mezcla HACV (190 lts) y en la mezcla HACF (173 lts). Este comportamiento está en línea con los antecedentes internacionales consultados, es decir, las mezclas con AMV requieren mayor contenido de agua para similares requisitos de trabajabilidad en estado fresco.

Respecto de los ensayos de evaluación, la experiencia recogida mostró que la utilización combinada de los ensayos de extendido (con evaluación del T50) y del L-Box, resulta adecuada y suficiente para evaluar las características de los HAC durante el control de recepción, tanto por su simplicidad de ejecución como por la representatividad y repetibilidad de los resultados.

Con relación a su implementación, la mezcla HACF (es decir, elaborada con CPC en combinación con SP más la adición de filler calcáreo) presentó ventajas respecto de la mezcla HACV (elaborada con CPC en combinación con SP y AMV). En el hormigón HACV el orden de ingreso de aditivos impone que el AMV sea el último componente que se adiciona a la mezcla, impidiendo de esta forma que la misma pueda modificarse sustancialmente como consecuencia del efecto “impermeabilizante” que produce dicho aditivo (dificulta un ajuste de la dosis de SP a pie de obra). Esto puede significar un inconveniente para la aplicación de HAC con AMV. En cambio, la mezcla con adición de filler calcáreo resultó más “versátil” permitiendo efectuar ajustes en obra en la misma forma que los que se realizan para un HC.

Otro aspecto importante a considerar es la capacidad de exudación prácticamente nula de los HAC. Si bien este aspecto favorece la estabilidad en estado fresco de las mezclas (en particular la segregación estática) y la consecuente influencia en las características de la ZIF en agregados y armaduras, también es cierto que los hace especialmente susceptibles a la fisuración por contracción plástica, en particular en elementos de gran superficie expuesta con relación a su volumen (losas, tableros de puentes, etc.). Por tal motivo se debe prestar atención a la protección y curado de los mismos para evitar o disminuir el riesgo de fisuración por dicha causa.

### **15.3 Estado endurecido**

Desde este punto de vista se observa en general que los parámetros resistentes y de durabilidad evaluados en todos los HAC, son similares y en algunos casos superiores a los HC de referencia. Debe recordarse al momento de realizar la evaluación, que el estudio experimental se realizó tomando como punto de partida que todos los hormigones a comparar, ya sea autocompactantes o convencionales, posean igual clase resistente. Las relaciones W/MC resultantes difieren entre sí, cumpliéndose en todos los casos, que los HAC tienen valores de W/MC iguales o superiores a los respectivos HC.

En el análisis de las solicitaciones en tracción se puede observar que el hormigón con adición de escoria (HACE1) presenta una resistencia a la tracción (tracción indirecta) superior al HC, mientras que en el caso del hormigón autocompactante con adición de filler (HACF), esta resistencia es inferior. Este comportamiento se encuentra controlado principalmente por las propiedades en tracción de la matriz. En efecto, los resultados de las resistencias a la tracción de los respectivos morteros muestran un comportamiento similar al observado con la resistencia a la tracción del hormigón. Se destaca en este sentido que el HAC con adición de filler calcáreo (HACF) presentó propiedades

mecánicas de sus fases constituyentes más homogéneas, comparadas con las correspondientes al HACE1 y HC.

Respecto de los parámetros de fractura, se observa que los HAC estudiados presentan valores de energía específica de fractura ( $G_f$ ) y de longitud característica ( $l_{ch}$ ) que se encuentran dentro del rango de valores típicos correspondientes a HC de similar nivel de resistencia. En base a estos resultados, se puede decir que el comportamiento estructural y el mecanismo de control de propagación de fisuras de los HAC son similares al de un HC. Cabe indicar que el análisis “postmortem” de las superficies de fractura permitió determinar que el porcentaje de partículas de agregado grueso fracturadas y de fallas de interfase en los HAC fue también similar que en el HC.

En cuanto a la relación de Poisson, se verificó que en los HAC resultó algo inferior (0,17) al HC (0,19), siendo esa disminución poco significativa y no importante desde el punto de vista de su aplicación práctica.

En el análisis de la rigidez, es razonable esperar una disminución del módulo de elasticidad de los HAC debido a su mayor contenido de pasta respecto de los HC. En las experiencias realizadas los valores de E resultaron similares o inferiores (máxima diferencia del orden del 18 %), dependiendo principalmente del TMA y del tipo de adición mineral empleado. En efecto, las mezclas con escoria y humo de sílice (HACE y HACSF), evidenciaron valores de E del mismo orden o levemente inferiores que los HC, aún para el caso de poseer menor TMA (Serie A).

Desde el punto de vista de la durabilidad, si bien en general los HAC presentaron resultados similares o en algunos casos superiores al HC, se evidenció claramente la influencia del tipo de componentes en el comportamiento de las propiedades evaluadas. Por ejemplo, la adición de escoria como material extra fino ha influido positivamente sobre todos los aspectos estudiados. Estas diferencias a favor de los HAC con escoria, podrían originarse como consecuencia de una reducción y/o modificación (refinamiento) notoria del sistema de vacíos de la matriz (pasta) y de las mejoras a nivel interfase.

Como aspectos negativos se pueden mencionar el mayor coeficiente de difusión de cloruros obtenido para la mezcla HACF (con adición de filler calcáreo) y la mayor contracción por secado evidenciada por la mezcla HACV, ambos comparados con el HC de referencia. No debe perderse de vista en este análisis, que ambos HAC poseen mayor relación W/MC que los HC y para el caso particular del HACV, un contenido unitario de agua significativamente mayor que el HC. También vale destacar el severo deterioro sufrido por los HAC ensayados a ciclos alternados de congelación y deshielo, aunque es de esperar que con un sistema de vacíos que asegure un factor de espaciamiento adecuado (con aire intencionalmente incorporado), puedan comportarse en forma similar a un HC con un sistema de vacíos también adecuado.

Las circunstancias citadas, es decir, las propiedades mecánicas bajo sollicitaciones de tracción, las propiedades en fractura evaluadas y los parámetros de durabilidad, permitirían inferir mejoras a nivel interfase y pasta de los HAC. Esto es especialmente cierto si se tiene en cuenta que todos los HAC poseen relaciones W/MC iguales o superiores a los HC de referencia. Las características mencionadas deberán confirmarse con estudios adicionales tales como porosimetría y microscopía electrónica.

El comportamiento descrito podría tener su origen en la adición de partículas extra finas tales como el filler calcáreo o la escoria, ya que estas pueden modificar la estructura la pasta y de la ZIF debido a varios factores [75][76][77][78]:



- Reducción de la exudación
- Disminución del contenido de hidróxido de calcio.
- Disminución de la orientación preferencial de los cristales de hidróxido de calcio como consecuencia del funcionamiento de las partículas finas actuando como sitios de nucleación de dichos cristales en la ZIF.
- Mayor compacidad y homogeneidad de la ZIF.

En cuanto al comportamiento “in situ”, tanto a nivel de tabiques experimentales como de obra, los resultados fueron muy satisfactorios. En particular, la mezcla con adición de filler calcáreo (HACF) presentó una terminación superficial excelente con resultados de resistencia efectiva, módulos de elasticidad dinámico y absorción que denotan una muy buena homogeneidad del elemento. Las diferencias encontradas para el tabique HACF entre la resistencia potencial y la resistencia efectiva (del orden del 5 %) son inferiores a las correspondientes a HC en los niveles de resistencia evaluados. Lo mismo ocurre con el coeficiente de variación de los testigos (también del orden del 5 %) y las diferencias entre las resistencias en la parte inferior y superior del elemento (aproximadamente 9 %). Lo dicho muestra la posibilidad de obtener estructuras más homogéneas y con menor probabilidad de aparición de defectos de colocación.

No resultó equivalente el resultado obtenido con la mezcla HACV (con adición de AMV), con una terminación superficial de inferior calidad y con parámetros en estado endurecido que señalan una heterogeneidad mayor. En este sentido, se evidenció la importancia que posee la viscosidad plástica de la mezcla en las características en estado endurecido. La experiencia con la mezcla HACV demostró que una elevada viscosidad influye negativamente en la densidad, homogeneidad y terminación superficial. Si bien en este caso los valores de T50 (cerca de 5 segundos) resultaron dentro del rango propuesto por los antecedentes estudiados, la experiencia realizada ha demostrado que los mismos influyeron negativamente y que deben ser más bajos (ver Tabla 32).

Por otro lado y como aspecto a resaltar, los HAC son potencialmente más aptos para soportar condiciones rigurosas de colocación debido a congestión de armaduras y altura de caída libre elevada, sin que se produzca segregación. En las experiencias efectuadas se han colocado HAC desde alturas mayores a 3 metros en elementos fuertemente armados sin que se apreciaran signos de segregación.

## **15.4 HAC curado a vapor.**

Los HAC se presentan como alternativa muy interesante para plantas de premoldeados con curados a vapor. Se ha demostrado que aún con elevados contenidos de adiciones minerales es posible alcanzar niveles de resistencia adecuados para la industria, con ciclos de curado a vapor a presión normal iguales o inferiores a 21 horas. En particular se puede destacar el desempeño de la mezcla elaborada con cemento de alto horno (CAH) frente a los otros dos cementos (CPC y CPN), alcanzando una resistencia a compresión cercana a los 40 MPa al fin del ciclo de 15 horas.

Como dato complementario que surge del estudio, cabe mencionar que para el caso de predicción de resistencias mediante la madurez del hormigón, el método de la edad equivalente (fórmula de Arrhenius) mostró una muy buena correlación con la resistencia a compresión, pudiendo utilizarse como estimador, independientemente del ciclo de curado utilizado. No ocurrió lo mismo con la fórmula de Nurse-Saúl debido a las

deficiencias que posee la misma para interpretar en forma adecuada el efecto de la variación de temperatura sobre la resistencia, especialmente a temprana edad.

### **15.5 Aplicación de Normas y Reglamentos vigentes**

Tal como se mencionó, la calidad de la microestructura de la pasta y especialmente de la ZIF, serían responsables de las mejoras que se pueden alcanzar en lo que se refiere a propiedades resistentes y de durabilidad. Asimismo, la disminución de la probabilidad de fallas por colocación como así también la mayor homogeneidad que se logra en las estructuras terminadas, deberían considerarse en los procedimientos de cálculo, especialmente lo relacionado con los coeficientes de seguridad aplicados.

Por lo antedicho, la utilización de reglamentos y normas que imponen requisitos de composición en lugar de requisitos de desempeño o prestación, pueden conducir a no considerar las ventajas comparativas señaladas en relación con un hormigón convencional.

Conforme se avance en las investigaciones y se incremente el conocimiento y la experiencia adquirida en obras, estos conceptos deberían volcarse a las reglamentaciones vigentes para obtener el máximo provecho de esta nueva tecnología. Esto es, la producción de mezclas con menor contenido de ligantes o bien el aumento de la vida en servicio de las estructuras (concepto de sustentabilidad).

Por último, y quizás como una necesidad urgente, es indispensable la normalización de los procedimientos y técnicas de ensayo sobre el hormigón en estado fresco, para fijar los criterios de aceptación y rechazo.

### **15.6 Consideraciones finales y necesidades futuras.**

Si bien el presente trabajo abarca el estudio de gran parte de las propiedades y características de los HAC, es necesario continuar las investigaciones para confirmar algunas de las tendencias aquí evidenciadas. Lo dicho vale especialmente para el estudio de la microestructura de la pasta de cemento y de la zona de interfase mediante la técnica de microscopía electrónica, DRX, porosimetría y profundización de los estudios de mecánica de fractura.

También se considera de importancia la necesidad de evaluar el creep (fluencia lenta) y la adherencia con las armaduras, ya que pueden constituir un parámetro determinante para su aplicación práctica y comportamiento estructural. Si bien existen antecedentes al respecto (algunos con resultados contradictorios), tal como se reflejó en el Capítulo 4, no hay experiencia con materiales locales.

Existen otros temas que también deberían estudiarse entre los cuales pueden citarse:

- Profundización del estudio de las características de los materiales adicionales y cementos (finura, distribución granulométrica, forma, etc.). Su influencia sobre los parámetros reológicos en estado fresco y sobre el diseño y optimización de mezclas según su uso o destino.
- Influencia de distintos materiales componentes en la tixotropía del material y su relación con la presión de encofrados.
- Técnicas de reparación y refuerzo de estructuras.

Los temas y necesidades de estudio citados no son excluyentes. Todavía hay varios aspectos que deben profundizarse para entender el comportamiento y sacar el máximo provecho de este material.

Sin embargo, aparece como un gran desafío para evaluar el potencial futuro de esta tecnología, la optimización de las mezclas, el análisis y optimización de los aspectos constructivos y las mejoras en la relación beneficio/costo. Desde este punto de vista es fundamental, al momento de una evaluación económica, considerar no sólo el costo del material sino también los beneficios que se pueden extraer de su utilización (optimización de la mano de obra, reducción de tiempos de ejecución, seguridad e higiene, etc.).

En definitiva, hay grandes posibilidades para que esta tecnología tenga un rol protagónico en la industria de la construcción en los próximos años. Para ello es condición indispensable lograr que la transferencia tecnológica desde los centros de estudio e investigación hacia la industria se realice en el menor tiempo posible. Surge entonces este concepto como un desafío para los próximos años.

## Capítulo 16 - REFERENCIAS Y ANTECEDENTES

### 16.1 Referencias

- [1] Okamura, Ozawa, "Mix design for self-compacting concrete". Concrete Library of JSCE N° 25, Junio, 1995, pp. 107-120.
- [2] de Larrard, F., "Concrete mixture proportioning". Modern Concrete Technology 9. E & FN Spon, 1999, pp. 77-125.
- [3] Torrent R., "Aspectos reológicos del hormigón fresco y su aplicación a la bombeabilidad". Revista Hormigón, AATH, N° 9, 1983, pp. 9-20.
- [4] Nico A., "Influencia de las puzolanas en la reología de las pastas". Revista Hormigón, AATH, N° 11, 1983, pp. 53-63.
- [5] Tattersall G., "The workability of concrete". Cement & Concrete Assoc, Wexham Springs, 1978, pp. 138.
- [6] Rational Production and Improved Working Environment Through Using SCC – Brite-EuRam Project BRPR-CT96-0366. Report Task 4, 2000, pp. 1-20.
- [7] Ferraris, Brower, Ozyildirim, Daczko, "Workability of SCC", International Symposium on High Performance Concrete, Septiembre, 2000.
- [8] Daczko. "Stability of Self Consolidating Concrete, Assumed or Ensured?" First North American Conference on the Design and Use of Self Consolidating Concrete, USA, 2002, pp. 245-251.
- [9] Khayat: "Workability, Testing and performance of Self Compacting Concrete". ACI Materials Journal, Mayo-Junio, 1999, pp. 346-353.
- [10] Ouchi, Masahiro, "State of the art report: self- compactability evaluation for mix proportioning and inspection". International Workshop on Self-Compacting Concrete. Kochi, Japón. Agosto, 1998, pp.115-136.
- [11] Billberg, Peter. "Self compacting concrete for civil engineering structures – The swedish experience". Rapport Report, 1999, pp. 145-163.
- [12] Technical Committee 174 – SCC - RILEM Report 33, 2000.
- [13] Constantiner, Daczko "Not all applications are created equal: Selecting the appropriate SCC performance targets" First North American Conference on the Design and Use of Self Consolidating Concrete, USA, 2002, pp. 179-184.
- [14] EFNARC "Specification & Guidelines for Self compacting Concrete" EFNARC Publications, 2002.
- [15] Brameshuber, Uebachs "The application of Self compacting Concrete in Germany under special considerations of rheologica aspects". First North American Conference on the Design and Use of Self Consolidating Concrete, USA, 2002, pp. 225-233.
- [16] Edamatsu, Nishida, Ouchi, " A rational mix-design method for SCC considering interaction between coarse aggregate and mortar particles". Proceedings of 1<sup>st</sup> International RILEM Symposium on SCC, Estocolmo, Suecia. Septiembre 1999, pp. 309-320.
- [17] Ouchi, Hibino, Okamura, "Efect of Superplasticizer on Self Compactability of Fresh Concrete", Transportation Research Record N° 1574, 1997, pp. 37-40.

- [18] Petersson, Billberg, "Investigation on blocking of SCC with different maximum aggregate size and use of viscosity agent instead of filler". Proceedings of 1<sup>st</sup> International RILEM Symposium on SCC, Estocolmo, Suecia. Septiembre 1999, pp. 333-344.
- [19] Tangtremisirikul, Bui, "Blocking criteria for aggregate phase of self compacting high performance concrete" Proceedings of Regional Symposium on Infrastructure Development in Civil Engineering, Bangkok, Thailandia. Diciembre, 1995, pp. 58-69.
- [20] Bui, Montgomery, "Mixture proportioning method for self compacting high performance concrete with minimum paste volume". Proceedings of 1st International RILEM Symposium on SCC, Estocolmo, Suecia. Septiembre 1999, pp. 373-384.
- [21] Gomes, Gettu, Agulló, Bernard, "Diseño de hormigones autocompactables de alta resistencia. Procedimiento para su dosificación y métodos de caracterización" Cemento-Hormigón, España. Febrero, 2002, pp. 30-42
- [22] Sedran, Larrard, "Optimization of SCC thanks to packing model". Proceedings of 1st International RILEM Symposium on SCC, Estocolmo, Suecia. Septiembre, 1999, pp. 321-332.
- [23] Saak, Jennings, Shah "New methodology for designing SCC", ACI Materials Journal, Nov-Dec, 2001, pp. 429-439.
- [24] Subramanian, "Interfaces in concrete – Achieving performance". International Seminar "Creating with Concrete – Role of Interfaces in Concrete", University of Dundee, UK, Septiembre, 1999, pp. 97-109.
- [25] Tragardh, "Microstructural features and related properties of SCC". Proceedings of 1st International RILEM Symposium on SCC, Estocolmo, Suecia. Septiembre 1999, pp. 175-186.
- [26] Zhu, Quinn, Bartos, "Transport properties and durability of self compacted concrete". Second International Symposium on Self Compacted Concrete, Tokyo, Japón. Octubre, 2001, pp. 451-458.
- [27] Skarendall "Market acceptance of SCC, the Swedish experience". Second International Symposium on Self Compacted Concrete, Tokyo, Japón. Octubre, 2001, pp. 1-12.
- [28] Persson, "Creep, shrinkage and elastic modulus of SCC". Proceedings of 1st International RILEM Symposium on SCC, Estocolmo, Suecia. Septiembre 1999, pp. 239-261.
- [29] Zhu, Gibbs, Bartos, "Uniformity of in situ properties of SCC in full scale structural elements", Cement & Concrete Composites 23, 2001, pp. 57-64.
- [30] Khayat, Paultre, Tremblay, "Structural performance and in-place properties of self consolidating concrete used for casting highly reinforced columns", ACI Materials Journal, Sep-Oct, 2001, pp. 371-378.
- [31] Khayat et al, "In situ Mechanical Properties of Wall Elements Cast Using SCC", ACI Materials Journal, Nov-Dic, 1997, pp. 491-500.
- [32] Sonebi, Bartos, "Flexural response and performance of reinforced beams cast with SCC". Second International Symposium on Self Compacted Concrete, Tokyo, Japón. Octubre, 2001, pp. 517-526.

- [33] Sonebi, Rooney, Bartos, "In situ compressive strength of SCC". Concrete, UK, Marzo, 2002, pp. 48-49.
- [34] Sonebi, Bartos, "Hardened SCC and its bond with reinforcement". Proceedings of 1st International RILEM Symposium on SCC, Estocolmo, Suecia. Septiembre, 1999, pp. 275-289.
- [35] Sonebi, Zhu, Gibbs, "Bond of reinforcement in SCC". Concrete, UK, Julio/Agosto, 2001, pp. 26-28.
- [36] Khayat, Bickley, Lessard, "Performance of self-consolidating concrete for casting basement and foundation walls". ACI Materials Journal, Mayo/ Junio, 2000, pp. 374-380.
- [37] Konig, Holschemacher, Dehn, Weibe, "SCC-Time development of material properties and bond behaviour". Second International Symposium on Self Compacted Concrete, Tokyo, Japón. Octubre, 2001, pp. 507-516.
- [38] Turcry, Loukili, Haidar, "Mechanical Properties, Plastic Shrinkage and Free Deformations of Self Consolidating Concrete", Proc. First North American Conference on the Design and Use of Self Consolidating Concrete, USA, 2002, pp. 335-340.
- [39] Bui, Montgomery, "Drying Shrinkage of SCC containing milled limestone". Proceedings of 1st International RILEM Symposium on SCC, Estocolmo, Suecia. Septiembre 1999, pp. 227-250.
- [40] Brameshuber, Uebachs "Practical experience with the application of SCC in Germany". Second International Symposium on Self Compacted Concrete, Tokyo, Japón. Octubre, 2001, pp. 687-696.
- [41] Attiogbe, See, Daczko, "Engineering Properties Of SCC", Proc. First North American Conference on the Design and Use of Self Consolidating Concrete, USA, 2002, pp. 371-376.
- [42] Rougeau, Maillard, Dippe, "Comparative Study on Properties of SCC and High Performance Concrete". Proceedings of 1st International RILEM Symposium on SCC, Estocolmo, Suecia, Septiembre, pp. 251-261, 1999.
- [43] Petersson O., "Limestone Powder as Filler in SCC – Frost Resistance, Compressive Strength and Chloride Diffusivity", Proc. First North American Conference on the Design and Use of Self Consolidating Concrete, USA, 2002, pp. 391-396.
- [44] Heimdal, Mathisen, "Use of SCC to achieve improved concrete surfaces". Second International Symposium on Self Compacted Concrete, Tokyo, Japón. Octubre, 2001, pp. 609-616.
- [45] Billberg, "Influence of filler characteristics on SCC rheology and early hydration". Second International Symposium on Self Compacted Concrete, Tokyo, Japón. Octubre, 2001, pp. 285-294.
- [46] Vanhove, Djelal, Magnin, Martin, "Study of SCC pressure on formwork". Second International Symposium on Self Compacted Concrete, Tokyo, Japón. Octubre, 2001, pp. 585-594
- [47] Toussaint, Juge, Laye, Pellerin, "Assessment of thixotropic behavior of self compacting microconcrete". Second International Symposium on Self Compacted Concrete, Tokyo, Japón. Octubre, 2001, pp. 89-98.

- [48] Billberg, Osterberg, “Thixotropy of SCC”. Second International Symposium on Self Compacted Concrete, Tokyo, Japón. Octubre, 2001, pp. 99-108.
- [49] Khayat, Assaad, Mesbah, “Variations of Formwork Pressure of Self Consolidating Concrete – Effect of Section Width and Casting Rate”, Proc. First North American Conference on the Design and Use of Self Consolidating Concrete, USA, 2002, pp. 295-302.
- [50] Walraven, “State of the art on SCC in the Netherlands”. Second International Symposium on Self Compacted Concrete, Tokyo, Japón. Octubre, 2001, pp. 13-24.
- [51] Bennenk, “SCC as applied in the Dutch precast concrete industry”. Second International Symposium on Self Compacted Concrete, Tokyo, Japón. Octubre, 2001, pp. 625-632.
- [52] Hauke, “SCC for precast concrete products in Germany”. Second International Symposium on Self Compacted Concrete, Tokyo, Japón. Octubre, 2001, pp.633-642.
- [53] Aïtcin, “High Performance Concrete”. Modern Concrete Technology 5. E & FN Spon. 1998.
- [54] Fernández Luco, Ameijeiras, Balzamo, “Método para evaluar la compatibilidad superfluidificante cemento para hormigones de alto desempeño”, 1º Congreso Internacional de Tecnología del Hormigón. Buenos Aires, Junio, 1998, pp 61-67.
- [55] Rixom, Mailvaganam, “Chemical admixtures for concrete”, 3º Edición. E & FN Spon. 1999.
- [56] Wallevik, Saasen, “Effect of Filler Materials on the Rheological Properties of Fresh Concrete”. ACI Materials Journal, September / October, 1995.
- [57] Domone, “Self-compacting concrete”. Department of Civil and Environmental Engineering, University College, London. Concrete Society Seminar, April, 1999.
- [58] Fornasier, Fava C., “Ensayo rápido de permeabilidad al ión cloruro: Evaluación de hormigones con escoria de alto horno” 14º Reunión Técnica AATH. Olavarría, Argentina, Octubre, 2001, pp. 89-96.
- [59] Torrent, R., “Un enfoque innovador para asegurar la durabilidad de las estructuras”, 1º Congreso Internacional de Tecnología del Hormigón. Buenos Aires, Junio, 1998, pp. 253-266.
- [60] Corallo, Fava C., “Desarrollo de calor en hormigones estructurales – Influencia de distintos parámetros” 14º Reunión Técnica AATH. Olavarría, Argentina, Octubre, 2001, pp. 123-130.
- [61] NT BUILD 388 Concrete Standard: Heat Development.
- [62] Giaccio, Zerbino, “La estructura del hormigón”. Ciencia y Tecnología del Hormigón. Año 2, N° 3, 1994, pp 5-36.
- [63] Zerbino, Giaccio, “Influencia de la adherencia matriz-agregado sobre el comportamiento del hormigón”. Revista Hormigón, AATH, N° 15, 1986, pp. 23-30.
- [64] Giaccio, Giovambattista, Zerbino, “Adherencia en las interfaces agregado matriz”. Revista Hormigón, AATH, N° 18, 1990, pp. 19-30.

- [65] Giaccio, Rocco, Zerbino, “Evaluaciones de la energía de fractura en hormigones de alta resistencia”. Revista Hormigón, AATH, N° 21, 1992, pp. 5-15.
- [66] Shah, Chandra, “Critical stress, volume change and microcracking of concrete”, ACI Materials Journal, V 65, N° 9, 1968, pp 770-781.
- [67] RILEM 50-FMC Committee, “Determination of the fracture energy of mortar and concrete by means of three point bend tests on notched beams”, Materials and Structures, RILEM, Paris, V 18, N° 106, 1985, pp.285-290.
- [68] Klaric, Fava C., “Parámetros de referencia para la evaluación del hormigón en estructuras mediante ultrasonido”. 8° Reunión Técnica AATH. Córdoba, 1989, pp. 235-252.
- [69] ASTM C1074-93, “Standard Practice for Estimating Concrete Strength by the Maturity Method”.
- [70] Saul A., “Principles underlying the steam curing of concrete at atmospheric pressure”, Magazine & Concrete Research, 2 (6), 1951, pp. 127.
- [71] NT BUILD 476 Concrete Standard: Initial setting time and Activation Energy during setting.
- [72] D’Aloia, L., “Meeting compressive strength requirements at early age by using numerical tools – Determination of apparent activation energy of concrete”. Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, Francia.
- [73] Bellander Ulf, “Strength in Concrete Structures”, Swedish Cement and Concrete Research Institute, Report N° 1. Estocolmo, Suecia, 1978.
- [74] Giovambattista A. “ El diseño por durabilidad de las estructuras de hormigón y los reglamentos de seguridad: Soluciones actuales y en desarrollo”, Seminario de Durabilidad, AATH. Olavarría, Argentina. Octubre, 2001, pp. 259-306.
- [75] Detwiler, Krishnan, Metha, “Effect of granulated blast furnace slag on the transition zone in concrete”. SP – 100, ACI, 1987, pp. 63-72.
- [76] Larbi, Bijen, “Effect of mineral admixtures on the cement paste – aggregate interface”. SP – 132-36, ACI, 1992, pp. 655-667.
- [77] Saito, Kawamura, “Effect of fly ash and slag on the interfacial zone between cement and aggregate”. SP – 114-32, ACI, 1989, pp. 669-688.
- [78] Ping, Beaudoin, Brousseau, “Effect of aggregate size on the transition zone properties at the portland cement paste interface”. Cement and Concrete Research, Vol. 21, 1991, pp. 999-1005.

## 16.2 Experiencias previas que se consideraron para el trabajo

1. Klaric M, Fava C. “Parámetros de referencia para la evaluación del hormigón en estructuras mediante ultrasonido”. 8ª Reunión Técnica A.A.T.H. Carlos Paz, Argentina, 1987.
2. Fornasier G., Fava C. “Ensayo Rápido de Permeabilidad al Ión Cloruro: Evaluación de Hormigones con Escoria de Alto Horno” 14 Reunión Técnica AATH. Olavarría, Argentina, 2001.



3. Corallo P., Fava C., Becker E., “Desarrollo de Calor en Hormigones Estructurales – Influencia de Distintos Parámetros” 14 Reunión Técnica AATH. Olavarría, Argentina, 2001.
4. Fornasier G., Fava C., Zitzer L., “Desarrollo y Caracterización de Hormigones Autocompactantes” 14 Reunión Técnica AATH. Olavarría, Argentina, 2001.
5. Corallo P., Fava C., Zitzer L., “Hormigones Clase H-60 – Desarrollo y Aplicación en Obra”. 14 Reunión Técnica AATH, Olavarría, Argentina, 2001.
6. Fornasier G., Fava C., Zitzer L., “Primera Presentación de un Hormigón Autocompactante Desarrollado en Argentina”. Memorias del 43 Congreso Brasileiro do Concreto (IBRACON). Foz do Iguazú, Brasil. 2001.
7. Corallo P., Fava C., Zitzer L., “Caracterización de Hormigones de Alto Desempeño Clase H-60”. Memorias del 43 Congreso Brasileiro do Concreto (IBRACON). Foz do Iguazú, Brasil. 2001.
8. Di Noia V., Fava C., Zitzer L., “Hormigones de Rápida Habilitación al Tránsito – Comportamiento con Distintos Tipos de Cementos”. Memorias del XIII Congreso Argentino de Vialidad y Tránsito. Buenos Aires, Argentina, 2001.
9. Bergol L., Fornasier G., Fava C., “Hormigones Autocompactantes: Alternativa de Utilización en Elementos Estructurales Viales”. Memorias del XIII Congreso Argentino de Vialidad y Tránsito. Buenos Aires, Argentina, 2001.
10. Fornasier G., Fava C., Zitzer L., “Self Compacting Concrete in Argentina – The First Experience”. 2<sup>nd</sup> International Symposium on Self Compacting Concrete. University of Tokyo, Japan, 2001.
11. Bergol L., Fornasier G., Fava C., “Hormigones Autocompactantes: Desarrollo y Alternativas de Utilización”. Revista Hormigón, N°38, AATH, 2001.
12. Fornasier G., Fava C. Luco L., Zitzer L., “Design of Self Compacting Concrete for Durability – Application of Prescriptive vs. Performance Based Specifications”. Six CANMET/ACI International Conference on Durability of Concrete, Thessaloniki, Greece, 2003.
13. Fava, Bergol, Fornasier, Giangrasso, Rocco, “Fracture Behaviour of Self Compacting Concrete”, Proc. 3<sup>rd</sup> International Symposium on Self Compacting Concrete, Reykjavik, Islandia, 2003.