

CARACTERIZACIÓN DEL HORMIGÓN AUTOCOMPACTANTE EN ESTADO FRESCO

Autores: Msc. Ing. Silvia Beatriz Palazzi * – Ing. Hugo Daniel Anaya ** – Daniel Rodrigo Isas Pedraza ***

Lugar de residencia: San Miguel de Tucumán – Tucumán

Entidad: Laboratorio de Ensayo de Materiales – Departamento de Construcciones y Obras Civiles – Facultad de Ciencias Exactas y Tecnología – Universidad Nacional de Tucumán

(*) Profesor titular con dedicación exclusiva en área Tecnología de los Materiales.

(**) Profesor adjunto con dedicación exclusiva en área Tecnología de los Materiales.

(***) Estudiante de la carrera de Ingeniería Civil desarrollando su Proyecto Final sobre el tema Hormigones Autocompactantes.

Desarrollan tareas de investigación y extensión a través Laboratorio de Ensayos de Materiales.

RESUMEN

En el hormigón autocompactante (HAC) es importante desarrollar al máximo sus propiedades en estado fresco con el fin de optimizar su calidad y aprovechar sus bondades desde el punto de vista estructural, arquitectónico, económico y social.

El HAC se destaca por su alta fluidez y gran resistencia a la segregación especialmente durante su transporte y colocación, que lo hace especial para estructuras estrechas y con áreas densamente armadas. Estas características se ponen de manifiesto en el estado fresco del hormigón por lo que cobran vital importancia todos los ensayos necesarios para caracterizarlo en esta etapa, como ser los de Extendido, J-Ring y V-Funnel.

El objetivo de este trabajo es realizar un estudio comparativo entre estos ensayos para evaluar cual de ellos tiene aplicación más sencilla en la industria de la prefabricación, con miras a elaborar recomendaciones para una futura normalización, hoy inexistente en el país.

Para ello se realizaron numerosas pruebas de laboratorio con diferentes dosificaciones, empleando materiales locales y aditivos superfluidificantes y/o modificadores de la viscosidad, tomando como patrón los requisitos que debe cumplir el hormigón para un elemento estructural para prefabricación.

En base a los resultados obtenidos se logra caracterizar al HAC en función del elemento estructural para el cual se dosifica y diseña la mezcla.

TITLE: *“Characterization of the self-compacting concrete in fresh state”*

ABSTRACT

In the Self-Compacting Concrete (SCC) it is important to develop to the maximum its properties in fresh state with the purpose of optimizing its quality and taking advantage of its kindness from the point of view structural, architectonic, economic and social.

The SCC specially stands out by their high fluidity and great resistance to the segregation during their transport and positioning, that makes special for narrow structures and with densely armed areas. These characteristics are shown in the fresh state of the concrete reason why all the tests necessary receive vital importance to characterize it in this stage, like being those of Slump flow, J-Ring test and V-Funnel test.

The objective of this work is to make a comparative study between these tests to evaluate as of them it has simpler application in the industry of the premanufacture, with a view to elaborating recommendations for a future normalization, today nonexistent in the country.

For it numerous laboratory tests with different meterings were made, using the material premises and superplasticiser additives and/or modifiers of viscosity, taking like pattern the requirements that must fulfill the concrete for a structural element for premanufacture.

On the basis of the obtained results it is managed to characterize to the SCC based on the structural element for which the mixture is dosed and designed.

INTRODUCCIÓN

En la actualidad, al hablar de “calidad del hormigón” es necesario tener en cuenta de que este término no solo implica, que sea capaz de resistir las acciones previstas para el período de construcción y de servicio, sino también permanecer inalterable durante su vida útil. Es decir no solo se busca que el hormigón sea resistente, sino también durable. Estos dos conceptos, *resistencia* y *durabilidad*, son premisas fundamentales a la hora de diseñar, dosificar y elaborar un hormigón.

Desde el trabajo en gabinete, los requisitos de resistencia y durabilidad son perfectamente controlables, pero una puesta en obra deficiente puede generar una pérdida de las propiedades deseadas para el hormigón, teniendo en cuenta que la tarea de colocación es realizada por operarios que muchas veces desconocen los parámetros que pueden afectar positiva o negativamente al hormigón que manipulan.

Desde la incorporación adicional de agua para facilitar su colocación, hasta un defectuoso o excesivo vibrado, son algunos de los problemas más comunes que el ingeniero debe minimizar a los efectos de no perjudicar al hormigón y desde luego la estructura.

A mediados de 1980 en la Universidad de Tokio (Japón) a cargo del Prof. Okamura, respondiendo a esta necesidad de conseguir estructuras durables y sin imperfecciones debido a la deficiente colocación, comienzan las primeras

investigaciones para lograr un hormigón de fácil colocación. Surge así la idea de conseguir un *hormigón autocompactante* (HAC) o *autocompactable*.

En 1988 nace el HAC e inicia una carrera exitosa. A comienzos del año 2000 llega a nuestro país y desde entonces es objeto de investigaciones de los profesionales de nuestro medio.

El HAC es un hormigón capaz de fluir dentro de los encofrados, sorteando los obstáculos sin que se produzca la segregación de sus componentes, compactándose por la acción de su propio peso.

En esta nueva generación de hormigones las principales virtudes se manifiestan en el estado fresco del mismo, ya que reduce notablemente los tiempos de ejecución de una obra por su rápida y sencilla colocación, además permite el acceso a zonas de elevada congestión de armaduras sin necesidad de realizar el trabajo de compactación logrando una excelente terminación superficial.

A pesar de ser un hormigón con una elevada demanda de cemento por metro cúbico, los costos globales de obra se reducen sensiblemente por su incidencia directa en la reducción de equipos y mano de obra.

Otra virtud importante a tener en cuenta es la reducción de ruidos que se logra con el uso de este hormigón, debido a la ausencia de equipos necesarios para la vibración, mejorando las condiciones ambientales y eliminando los riesgos laborales atribuibles al trabajo de la compactación.

Desde el punto de vista reológico, el HAC es un material que posee una *tensión umbral de cizallamiento* (τ_0) muy baja (capacidad de fluir) y una *viscosidad plástica* (μ') capaz de garantizar el transporte, llenado de los encofrados y posterior endurecimiento del mismo sin que hayan segregado sus materiales componentes. Estos son los parámetros reológicos que gobiernan el comportamiento del HAC.

Estas particularidades en estado fresco del HAC, llevaron a proponer diversos y novedosos métodos de ensayos tendientes a evaluar indirectamente las propiedades que caracterizan el comportamiento reológico de este hormigón que responde al *modelo de Bingham*.

Para lograr los valores adecuados de τ_0 y μ' se requiere conocer en detalles los materiales disponibles a fin de optimizar el diseño de la mezcla de hormigón.

Actualmente se disponen de aditivos químicos capaces de modificar la viscosidad cuando exista el problema de insuficiente cantidad de finos. Si este no fuera el caso, el uso de un aditivo superfluidificante sería suficiente.

Este trabajo, que integra uno mas completo sobre los HAC elaborados con materiales del Noroeste argentino (NOA), estudia los parámetros reológicos, caracterizados indirectamente mediante los ensayos de Extendido, J-Ring y V-Funnel, de los hormigones HAC con y sin empleo de puzolanas cuando se elaboran con aditivo modificador de la viscosidad y/o con aditivo superfluidificante.

MATERIALES

En la elaboración de las mezclas se utilizó un cemento Pórtland normal (CPN40)

Se empleó un agregado grueso con tamaño máximo 9,5mm (3/8") y una arena con módulo de fineza de 3,0. Ambos agregados son precedentes de una cantera sobre el Río Salí de la provincia de Tucumán.

Atendiendo la necesidad de inhibir la reacción álcalis sílice de los agregados procedentes de la cuenca del río Sali-Dulce se usó una adición mineral activa (puzolana natural) procedente de Tafí del Valle (provincia de Tucumán), ya probada como agente inhibidor de dicha reacción con los agregados de la zona¹

Se utilizaron dos aditivos químicos cuyas características se describen en la Tabla N°1

Tabla N°1. Descripción de los aditivos químicos em pleados

ADITIVO	Descripción	Densidad (kg/dm ³)	Dosis recomendada(*) (%)
A**	Hiperplastificante de tipo éter carboxílico	1,09 ± 0,02	0,2 – 0,8
B***	Superplastificante de tipo policarboxilato	1,07 a 1,09	0,4 - 1,5

(*) Referido al peso de cemento

(**) Aditivo superplastificante.

(***) Aditivo superplastificante y modificador de la viscosidad.

Todos los materiales empleados cumplen con los requisitos de calidad según Normas IRAM.

DOSIFICACIÓN DE LA MEZCLA

Teniendo en cuenta que las variables a considerar para lograr la autocompactabilidad del hormigón son de una amplia gama, se recurrió a distintas recomendaciones, productos de la experiencia nacional e internacional, para elaborar la dosificación sobre la cual se realizarán las determinaciones en estado fresco.

Desde el nacimiento del HAC se han propuestos diversos métodos para la dosificación de los mismos. Podemos hablar de métodos racionales y métodos empíricos. A pesar de que existe una tendencia a introducir métodos de dosificación fundados en el análisis teórico, la gran mayoría de los métodos hoy utilizados recurre al empirismo y a la experiencia de quien diseña el hormigón.

Se mantienen aún premisas fundamentales para su diseño como ser las propiedades en estado fresco que debe cumplir el hormigón, atendiendo a las necesidades según el elemento estructural a llenar, como así también las técnicas de colocación disponibles. Es por ello que, en base a distintos estudios previos, se resumen a continuación consideraciones básicas tenidas en cuenta para la dosificación del hormigón a analizar, según la Guía Europea para el Hormigón Autocompactante²

- Dado que se debe conseguir una mezcla fluida, se limita el volumen de agregado grueso a los fines de obtener una menor fricción entre las partículas de mayor tamaño y por tanto mayor fluidez en la mezcla. Es por esto también que se reduce considerablemente el tamaño máximo del agregado grueso; entonces se

recomienda que el volumen de agregado grueso sea del orden del 27% al 36% del volumen de hormigón.

- Si bien la mezcla debe ser fluida, debe tener la viscosidad necesaria para evitar la segregación de sus componentes. Al ser la viscosidad controlada por la cantidad de material fino (polvo), se recomienda que el contenido total de finos sea entre 380 a 600 kilos por metro cúbico. Si la cantidad de polvo no es suficiente para regular la viscosidad deseada se debe recurrir a aditivos químicos modificadores de la viscosidad (agentes modificadores de la viscosidad, AMV).

- Asimismo la relación agua / polvo en volumen (a/p) debe ser entre 0,85 y 1,10.

- Un factor muy importante a tener en cuenta para el control de la fluidez y la viscosidad es la cantidad de pasta (cemento, adición mineral y agua) sin aire, y desde luego la cantidad de agua. Las recomendaciones actuales son de 300 a 380 litros de pasta sin aire por metro cúbico de hormigón, siendo entre 160 a 180 litros de agua en el caso de que no se haya incorporado un AMV a la mezcla, y hasta 200 litros de agua para el caso en que se haya usado un AMV.

- El contenido de arena equilibra el volumen de los demás componentes.

Se propusieron las siguientes dosificaciones las que se repitieron para cada aditivo:

Tabla 2. Dosificación del hormigón con puzolana – HAC CP

DOSIFICACION 1	
<i>Material</i>	<i>Dosaje en peso (kg)</i>
Cemento	440
Puzolana	110
Agua	182
Ag. Grueso	725
Ag. Fino	900

Tabla 3. Dosificación del hormigón sin puzolana – HAC SP

DOSIFICACION 2	
<i>Material</i>	<i>Dosaje en peso (kg)</i>
Cemento	550
Puzolana	---
Agua	182
Ag. Grueso	725
Ag. Fino	900

Las cuatro mezclas estudiadas se denominaron de la siguiente manera:

- **HAC CP-A** → Dosificación Pastón 1 usando el Aditivo A.
- **HAC CP-B** → Dosificación Pastón 1 usando el Aditivo B.
- **HAC SP-A** → Dosificación Pastón 2 usando el Aditivo A.
- **HAC SP-B** → Dosificación Pastón 2 usando el Aditivo B.

Para cada una de estas dosificaciones se estudiaron distintas dosis de aditivo teniendo en cuenta los valores recomendados en las fichas técnicas de los mismos.

ENSAYOS EN ESTADO FRESCO

Como bien se mencionara, desde el punto de vista reológico, la autocompactibilidad del hormigón depende de τ_0 y μ' . Si bien existen equipos diseñados para la determinación de estos parámetros de forma directa, se evaluarán y cuantificarán las propiedades en estado fresco del hormigón vinculadas a los parámetros reológicos en forma indirecta a través de equipos mucho más simples.

La importante aceptación de estos ensayos dentro de la comunidad científica radica en que estos equipos son fácilmente reproducibles en obra y en laboratorio a un bajo costo.

ENSAYO DE EXTENDIDO

Este ensayo permite evaluar de forma cualitativa la fluidez del hormigón y la viscosidad plástica del mismo.

Se realiza llenando el cono de Abrams invertido y sin compactar la mezcla. Luego se levanta el cono y se miden dos diámetros perpendiculares entre si y se calcula el valor promedio de ambos. Este valor se denomina **Extendido de la mezcla (d_f)** existiendo una buena correlación entre éste y el umbral τ_0 . De esta manera se evalúa la fluidez del hormigón.

Otro ensayo importante que se realiza dentro de este mismo, consiste en medir el tiempo que demora el hormigón en alcanzar los 50cm de extendido medido desde el instante en que se levanta el cono de Abrams. Este valor se denomina T_{50} y existe una buena correlación entre este valor y la viscosidad plástica (μ') y permite evaluar de forma cualitativa este parámetro reológico.

Asimismo, con la realización de estos ensayos se debe realizar una inspección visual del hormigón pudiendo analizar a simple vista si existe o no segregación de sus componentes. Esto se hace observando los bordes del extendido.

Una buena dosificación, junto con la correcta energía de mezclado durante el tiempo de amasado necesario no debiera permitir la segregación del hormigón. Es por ello que una vez realizado el extendido, el material granular debería llegar hasta los bordes de la mezcla. Esta inspección visual sobre el ensayo de *Extendido* permite calificar la estabilidad de la mezcla.

ENSAYO J-RING

Este ensayo permite evaluar la capacidad de pasaje del hormigón a través de las armaduras.

El equipo consiste en una especie de jaula metálica construida con barras que simulan la presencia de la armadura. El diámetro de la armadura como así también la separación entre las mismas depende de las exigencias del proyecto.

El ensayo se realiza de igual manera que el extendido y las determinaciones son idénticas, solo que ahora el hormigón debe fluir a través de los espacios libres entre la armadura. De las determinaciones se obtiene el *Extendido con "jaula"*.

Estos dos ensayos, Extendido y J-Ring, permiten obtener conclusiones muy importantes, dado que grandes diferencias de diámetros de extendido entre uno y otro ensayo puede significar que a pesar de ser un hormigón con suficiente fluidez, al no poseer la capacidad de pasaje entre las armaduras, no puede ser considerado como un hormigón autocompactante.

Actualmente se recomienda que la diferencia de diámetros sea inferior a 50mm, siendo un valor óptimo inferior a 25mm.³

ENSAYO V-FUNNEL

Este es un ensayo indicador de la viscosidad plástica.

Consiste en una caja metálica en forma de "V" con una abertura en la parte inferior. Para realizar este ensayo se llena el equipo con el hormigón. Luego se libera la tapa de la abertura y se mide el tiempo de descarga del hormigón a través de la abertura.

Comparativamente este ensayo es un equivalente al ensayo de Cono de Marsh para pastas de cemento y morteros.

El resultado obtenido se denomina **Tiempo de pasaje (T_v)** y permite evaluar cualitativamente la viscosidad plástica del hormigón, ya que a mayores valores del tiempo de pasaje, mayor es la viscosidad.

CLASIFICACIÓN DEL HAC

Existe una diversidad de clasificación del HAC teniendo en cuenta el trabajo realizado por los investigadores internacionales y de nuestro medio. A los efectos de esta investigación se presenta la siguiente clasificación⁴:

En la Tabla N°4 se puede observar la clasificación del HAC en función de la fluidez (según el diámetro de *Extendido* d_f) y la viscosidad (según los tiempos T_{50} y T_v)

Tabla N°4. Clasificación del HAC en función de d_f y T_{50}

Parámetro	Categoría	Valor
d_f	AC1	$550\text{mm} \leq d_f < 650\text{mm}$
	AC2	$650\text{mm} \leq d_f < 750\text{mm}$
	AC3	$750\text{mm} \leq d_f < 850\text{mm}$
T_{50}	AC1	$5\text{seg} < T_{50} \leq 8\text{seg}$
	AC2	$2\text{seg} < T_{50} \leq 5\text{seg}$
	AC3	$T_{50} \leq 2\text{seg}$

Una misma categoría, determinada en función del parámetro d_f , puede coexistir con cualquiera de las tres categorías determinadas en función del parámetro T_{50} .

En la Tabla N°5 se presentan tres categorías en función del tiempo T_V .

Tabla N°5. Clasificación del HAC en función de T_V

Parámetro	Categoría	Valor
T_V	AC1	$10\text{seg} < T_V \leq 20\text{seg}$
	AC2	$6\text{seg} < T_V \leq 10\text{seg}$
	AC3	$4\text{seg} \leq T_V < 6\text{seg}$

Los parámetros T_{50} y T_V miden de igual manera la viscosidad plástica del HAC. Es por ello que a un hormigón autocompactante al que le corresponde una categoría determinada mediante el ensayo T_{50} , le corresponde la misma categoría determinada mediante el ensayo T_V .

De esta clasificación surge un diámetro de extendido superior a 55cm para que el hormigón en estudio se considere autocompactantes en términos de su fluidez.

La elección del hormigón más apropiado se determinará en función de las exigencias del proyecto, atendiendo a los requerimientos que debe cumplir el hormigón según el elemento estructural a llenar, teniendo en cuenta la densidad de armaduras, la posibilidad de transporte del hormigón, los tiempos de transportes, las condiciones climáticas, etc. A partir de los valores buscados de fluidez y viscosidad y realizando un análisis exhaustivo de todas estas variables el proyectista deberá dosificar el hormigón que optimice la ejecución de la obra.

En el presente estudio se busca determinar la dosis de aditivo necesaria para pasar de una clase a otra de HAC según la fluidez y la viscosidad de la mezcla para las dos dosificaciones adoptadas.

RESULTADOS OBTENIDOS

En las Tablas 6 a 9 se presentan los resultados obtenidos en cada ensayo realizado sobre cada uno de los pastones de prueba.

Tabla N°6. Resultados de ensayos realizados a HAC C P-A

Dosis de aditivo (%)	Extendido (cm)	J-Ring (cm)	V-Funnel (seg)
0,30	45,0	35,0	19,6
0,40	62,0	61,5	5,8
0,50	69,0	69,8	6,2

Tabla N°7. Resultados de ensayos realizados a HAC S P-A

Dosis de aditivo (%)	Extendido (cm)	J-Ring (cm)	V-Funnel (seg)
0,35	53,0	48,0	8,3
0,50	65,3	64,0	6,1
0,65	73,3	74,3	5,9

Tabla N°8. Resultados de ensayos realizados a HAC C P-B

Dosis de aditivo (%)	Extendido (cm)	J-Ring (cm)	V-Funnel (seg)
0,60	64,0	64,0	9,0
0,70	66,0	65,5	12,6
0,90	70,5	68,3	17,6

Tabla N°9. Resultados de ensayos realizados a HAC S P-B

Dosis de aditivo (%)	Extendido (cm)	J-Ring (cm)	V-Funnel (seg)
0,50	56,5	56,0	4,6
0,70	68,0	71,0	5,1
0,90	80,0	80,0	6,5

Las dosis de aditivos son referidos al peso de *cemento* o *cemento + puzolana* según corresponda.

En las figuras 1 a 6 se presentan los resultados obtenidos mediante gráficos donde se muestra la variación de los diámetros de Extendido y J-Ring y los tiempos de pasaje en el ensayo V-Funnel para los hormigones con y sin puzolana, para ambos aditivos.

Figura N°1. Ensayo Extendido – Aditivo superfluidificante.

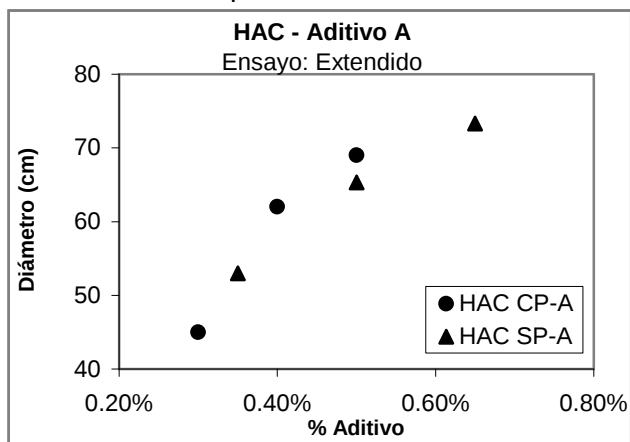


Figura N°2. Ensayo de Extendido – Aditivo superfluidificante y modif. de la viscosidad

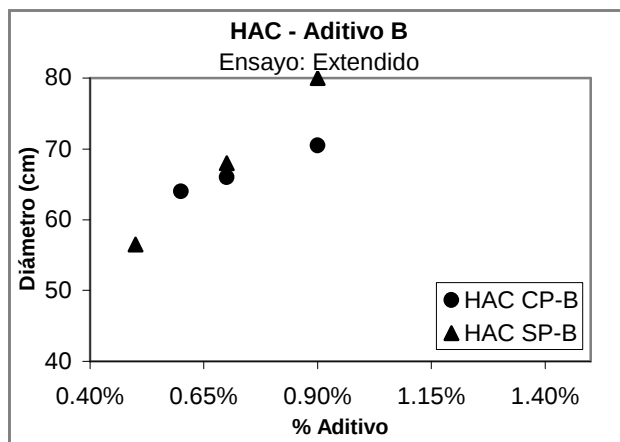


Figura N°3. Ensayo J-Ring – Aditivo superfluidificante.

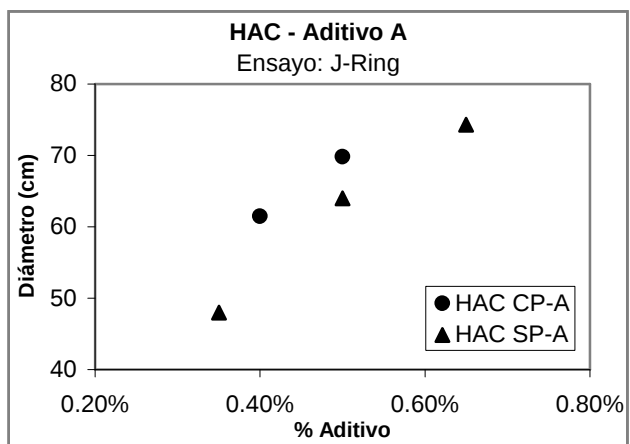


Figura N°4. Ensayo J-Ring – Aditivo superfluidificante y modif. de la viscosidad

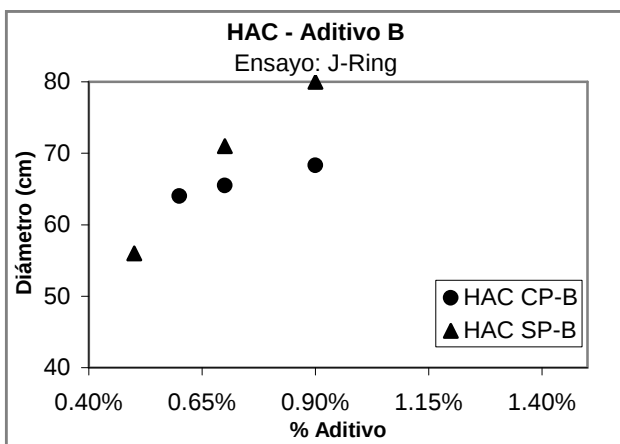


Figura N°5. Ensayo V-Funnel – Aditivo superfluidificante.

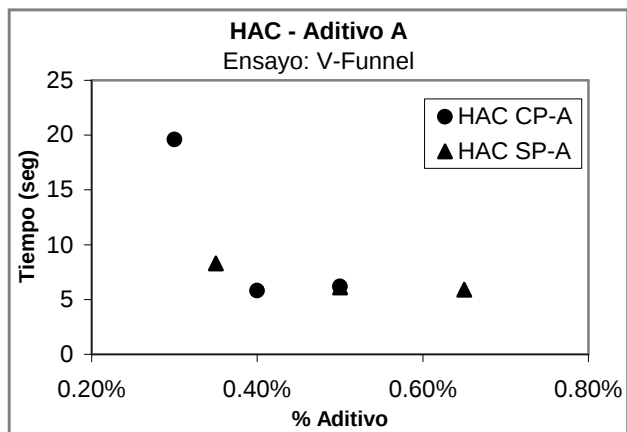
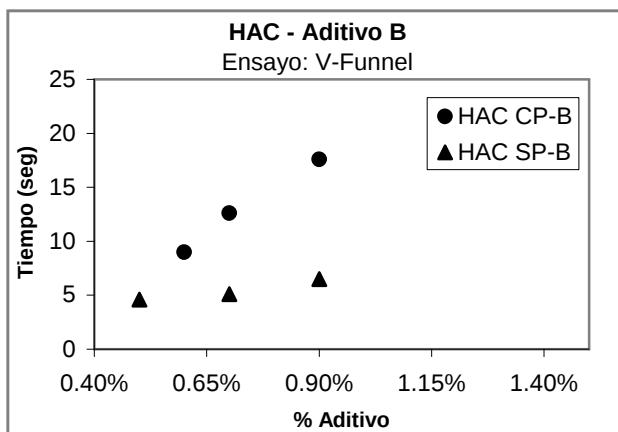


Figura N°6. Ensayo V-Funnel – Aditivo superfluidificante y modif. de la viscosidad.



ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

- Aditivo A (Superfluidificante)

- ✓ Para igual dosis de aditivo la incorporación de puzolana produce hormigones con mayor extendido (mayor fluidez).

- ✓ La incorporación de la puzolana no provoca modificaciones sensibles de la *viscosidad plástica*, medida a través del ensayo V Funnel, con el aumento de la dosis de aditivo.

- ✓ La *capacidad de pasaje* evaluada a través del ensayo J Ring es satisfactoria en todos los casos.

- Aditivo B (Superplastificante y modificador de la viscosidad)

- ✓ Para igual dosis de aditivo la incorporación de puzolana produce hormigones con menor extendido (menor fluidez) y mayor tiempo Tv (mayor viscosidad), siendo las diferencias sensiblemente superiores en este último

- ✓ La *capacidad de pasaje* evaluada a través del ensayo J Ring es satisfactoria en todos los casos.

CONCLUSIONES

Los ensayos de Extendido, V Funnel y J Ring permiten evaluar las propiedades reológicas de los hormigones autocompactantes de un modo sencillo y confiable. siempre que se asegure la repetitividad de los ensayos.

AGRADECIMIENTOS

- Sika Argentina S.A.I.C.
- MBT Argentina S.A.
- Tensolite S.A.
- Loma Negra C.I.A.S.A

REFERENCIAS

1. Anaya D., Leiva L., Castría N. "Usos de adiciones minerales activas del NOA para inhibir la reacción álcalis – sílice en hormigones locales" – Memorias XIV Reunión Técnica de la AATH, año 2003.

2. Directrices Europeas para el Hormigón Autocompactante – Especificaciones, producción y uso – Febrero 2006
3. Tobes J. M., Giaccio G., Torrijos M. C., Zerbino R. “Ensayos sobre morteros para el diseño de hormigón autocompactante” – Memorias XVI Reunión Técnica de la AATH, año 2006
4. Anejo 21. Recomendaciones para hormigón autocompactante.

BIBLIOGRAFÍA

- Zerbino R. “Caracterización reológica de hormigones autocompactables” – III Simposio Internacional sobre Concretos Especiais, año 2006
- “Hormigones especiales” – Asociación Argentina de Tecnología del Hormigón.
- The European Guidelines for Self Compacting Concrete (E.G.S.C.C.)
- 14º Reunión Técnica de la Asociación Argentina de Tecnología del Hormigón.