

Diseño y evaluación de hormigones autocompactantes (HAC)

Design and evaluation of Self-consolidating Concrete (SCC)

Renato Vargas Salazar*, Rodrigo Sciaraffia Pérez**

* Instituto del Cemento y del hormigón de Chile, Universidad de Chile, CHILE

**Universidad Andrés Bello, CHILE

rvargas@ich.cl

Fecha de recepción: 10/ 10/ 2005

Fecha de aceptación: 10/ 04/2006

PAG. 57 - 100

Resumen

La innovación tecnológica en la industria química de aditivos, específicamente de los superplastificantes, dirigida hacia los materiales de construcción como el hormigón, hace posible la aparición, a finales de la década de los ochenta, de un revolucionario hormigón capaz de autoconsolidarse, siendo su designación más común la de Hormigón Autocompactante - HAC (Self-Consolidating- Concrete - SCC, según su sigla en inglés). La característica de la mezcla de hormigón autocompactante es su capacidad para llenar completamente y sin segregación la forma del moldaje y lograr consolidarse sin la necesidad de aplicar energía de vibración. En esta investigación se analiza previamente los diferentes procedimientos de diseño de mezclas y los equipos existentes para evaluar mezclas de hormigón autocompactante. Los resultados obtenidos permiten plantear un criterio efectivo de evaluación y control de los requisitos de autoconsolidación de las mezclas. Esta investigación se enmarca en el diseño de mezclas de hormigón autocompactante según una metodología secuencial de diseño, que comprende desde la obtención de la dosis óptima de aditivo para saturar una pasta hasta la evaluación de mezclas de hormigón con diferentes proporciones de árido grueso y fino, con ensayos que miden las diferentes propiedades básicas del HAC en estado plástico.

Palabras Clave: Hormigón autocompactante, diseño de mezclas, ensayos, súper plastificante, agente viscosante

Abstract

Technological innovations in the industry of chemical admixtures for construction materials as concrete, specifically of the superplasticizers, make possible the development at the end of the eighties, of a revolutionary concrete capable of auto consolidating, being commonly designated as Self-consolidating Concrete - SCC. The characteristic of the self compacting concrete is its ability to fill completely and without segregation the shape of formwork and get consolidation without need to apply vibration energy. In this research different procedures of mixtures design and existing equipments to evaluate self compacting concrete mixtures were analyzed. The obtained results allow to propose an effective evaluation and control criteria of the requirements of auto consolidation of self compacting concrete mixtures. This research is aimed to develop a design methodology for self compacting concrete mixtures following a sequential design procedure. First, to obtain an optimum dosage of chemical admixture to saturate the cement paste, then, to evaluate concrete mixtures with different proportions of coarse and fine aggregates, and finally, testing and measuring the different basic properties of the SCC in plastic state.

Keywords: Self-consolidating concrete, mixture desing testing, superplasticizers, viscosity agent

1. Introducción

El objetivo general de esta investigación fue desarrollar un procedimiento de diseño de mezclas de hormigón que logren un comportamiento autocompactante.

El logro de este objetivo requirió en primer término definir teóricamente el comportamiento del hormigón para ser considerado autocompactante y estudiar

los materiales, componentes y metodologías de diseño de un HAC. Luego se debió especificar las propiedades básicas que debe cumplir un hormigón para ser definido como autocompactante y evaluar diferentes procedimientos de ensayo para medir y controlar dichas propiedades. Finalmente, es posible definir los principios y una metodología de diseño de HAC.

2. Definición de hormigón autocompactante (HAC)

Hormigón autocompactante es aquel hormigón que en estado plástico fluye y consolida por efecto de su propio peso (gravedad), manteniendo su homogeneidad, sin segregación ni exudación, durante y después de su transporte, distribución y colocación. Logra llenar moldajes de cualquier forma geométrica sin necesidad de aplicación de energía externa de vibración embebiendo completamente la armadura y las instalaciones de servicios. Se abrevia HAC y en inglés se denomina Self-consolidating Concrete (SCC)(Sciaraffia, 2005).

3. Surgimiento del HAC

A principios de la década del 80 el problema de durabilidad de las estructuras de hormigón era un tema de gran interés en Japón, e incluso se le consideró un problema mayúsculo que enfrentaba la sociedad japonesa. La gradual reducción del número de trabajadores calificados en la industria de la construcción japonesa llevó a una reducción similar en la calidad de los trabajos de construcción, por lo que el desarrollo de un hormigón autocompactante fue en ese entonces una buena forma de garantizar estructuras de hormigón durables en el futuro y con menos mantenimiento (Okamura y Ouchi, 2003).

4. Motivación de la presente investigación

La motivación de la presente investigación se traduce en confeccionar un hormigón con un comportamiento en estado fresco de alto desempeño, prescindiendo de energía externa de vibración, mejorando la durabilidad de las estructuras, reduciendo ruido y con menor agotamiento y daño físico de los trabajadores en las actividades de hormigonado. Además, de materializar estructuras con un estándar de calidad superior, pero considerando una planificación compatible, que se logra con un mejor rendimiento en el tiempo, costo y calidad de la obra (SCIARAFFIA, 2005).

5. Ventajas de la construcción con HAC

Las tablas 1 a 5 resumen las ventajas técnicas y económicas del uso de HAC en construcción, según tipo de participación en el proceso constructivo: empresa constructora, premezcladoras, empresas de prefabricados, mandantes, especificadores y evaluadores de proyectos (Sciaraffia, 2005).

Tabla 1. Ventajas para empresa constructora

Ventajas técnicas	Ventajas económicas
<ul style="list-style-type: none"> • No requiere vibradores para consolidación del hormigón • Mayor velocidad de colocación • Menos puntos de colocación del hormigón • Menor trabajo de acabado superficial, especialmente en losas • Menor tiempo de uso de maquinarias y equipos en obra (distribución hormigón en obra) • Reducción de problemas en áreas de congestión de acero (garantía de llenado uniforme) • Mejor ambiente de trabajo (menos ruido y agotamiento físico) • Reducción de problemas en llenado de recubrimientos y partes inferiores de secciones, especialmente en pilares, dinteles y muros (nidos de piedra y huecos) • Aumento de productividad, por el menor tiempo consumido en actividades de manejo de hormigón. 	<ul style="list-style-type: none"> • Reducción de costos en equipos de compactación (arriendo/compra) y mantenimiento • Reducción de costos en mano de obra en actividades de compactación • Reducción de costos en arriendo de maquinaria por menos tiempo de uso (grúa, bombas de distribución de hormigón, etc.) • Reducción de costos en materiales y mano de obra para reparaciones superficiales y demoliciones • Reducción de costos en licencias por agotamiento físico y secuelas por actividades inherentes a la compactación. • Gran disminución de costos en ítem de reparación

Tabla 2. Ventajas para planta premezcladora

Ventajas técnicas	Ventajas económicas
<ul style="list-style-type: none"> • Mayor rotación de camiones mezcladores • Facilidad en el bombeo del HAC 	<ul style="list-style-type: none"> • Diferenciación de la competencia • Generación de negocios adicionales, ya sea por la posibilidad de atención a más clientes y/o acceder a proyectos cuya solución hace necesario un Hormigón con las características del HAC • Mejorar el cumplimiento de programación de obras

Tabla 3. Ventajas para plantas de prefabricados

Ventajas técnicas	Ventajas económicas
<ul style="list-style-type: none"> • Diseño y producción de elementos más esbeltos, de formas complejas y de gran congestión de armadura • Proceso de producción más rápido de elementos simples (losas, muros, etc.) • Superficies más homogéneas • Mejoramiento de la geometría de las formas (tolerancias) • Incremento de la durabilidad de los elementos producidos • Reducción de ruido en la planta • Reducción de ruido en el entorno, especialmente en zonas urbanas 	<ul style="list-style-type: none"> • Mayor capacidad de producción por la mayor velocidad de colocación. • Reasignación de mano de obra a otras tareas. • Reducción de costos por eliminación de vibradores y su mantenimiento • En plantas nuevas no es necesario invertir en equipos de vibración

Tabla 4. Ventajas para el mandante, especificadores y evaluadores de proyectos

Ventajas técnicas	Ventajas económicas
<ul style="list-style-type: none"> • Más rápido desarrollo de proyectos • Nuevas posibilidades arquitectónicas • Optimización de diseño estructural por hormigones de mayor durabilidad. • Reducción de ruido implica posibilidad de extensión horaria de trabajos en zonas urbanas. • Optimización de espacio por menor bodegaje de materiales para revestimientos y relacionados. 	<ul style="list-style-type: none"> • Menor tiempo de proyectos se traduce en una recuperación más temprana de la inversión del capital. • Reducción de costos en proyectos. Ejemplo: materiales de revestimientos y reparaciones. • Más rápido desarrollo de proyectos. • Posibilidad de desarrollar más proyectos. • Desarrollo de proyectos complejos y arquitectónicos.

Tabla 5. Desventajas para empresa constructora y planta premezcladora

Desventajas Empresa Constructora	Desventajas Planta premezcladora
<ul style="list-style-type: none"> • Mayor costo del producto • Mayor costo en mano de obra en actividades de preparación e instalación de sistemas de moldajes. • Mayor costo por materiales que aumentan la estanqueidad de los moldajes. • Mayor costo de moldajes por reforzamiento y/o rediseños. • Mayor costo por capacitación de personal. • Reformulación de la programación de obra mediante una <i>PLANIFICACIÓN COMPATIBLE</i> 	<ul style="list-style-type: none"> • Mayor costo directo del hormigón por metro cúbico. • Mayor costo de producción: <ul style="list-style-type: none"> o Control de materiales en planta (contaminación) o Control de humedad más confiable o Inversión en silos o Inversión en estanques de aditivos o Dotación de personal de control de calidad del producto saliente de planta • Inversión en investigación y desarrollo. • Equivocadas políticas de difusión del producto al mercado.



6. Base teórica del comportamiento autocompactante

Los mecanismos del comportamiento del hormigón autocompactante en estado fresco son encontrados principalmente en la reología de las partículas en suspensión.

La pasta de cemento puede ser considerada por sí misma el medio de suspensión de las partículas de arena. Así mismo, el mortero es el medio de suspensión que contiene a los áridos gruesos. La Figura 1 muestra que la reología de la pasta es función de la reología del agua, la reología del mortero de la pasta y finalmente la reología del hormigón es función de la reología del mortero. Billberg (2001) indica que la reología del hormigón autocompactante debe ser optimizada desde la etapa de pasta y mortero hasta llegar al hormigón.

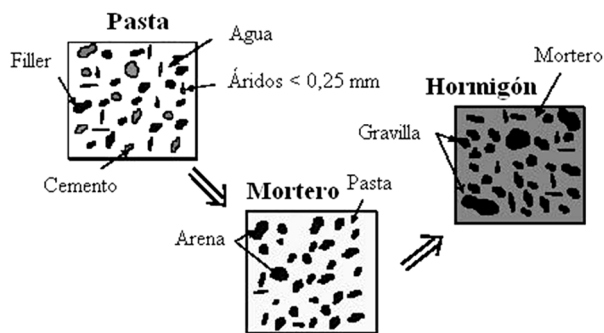


Figura 1. Reología de las fases del hormigón (Billberg, 2001)

Cuando el hormigón fluye a través de las barras de refuerzo (Figura 2), se cambia la ubicación relativa de las partículas de árido grueso en el espacio. Este desplazamiento relativo causa esfuerzos de corte en la pasta entre los áridos, además de esfuerzos de compresión. Por lo tanto, para que el hormigón fluya a través de los obstáculos sin segregación, el esfuerzo de corte generado debe ser suficientemente pequeño para permitir el desplazamiento relativo y no se produzca un grado de fricción e interferencia que evite el flujo y cause separación de los materiales, en especial los áridos gruesos del mortero (Ouchi y Edamatsu, 1999). En el diseño de HAC, el árido fino y/o aditivo viscosante confiere a la mezcla la capacidad de disminuir la segregación desarrollando en la pasta fuerzas cohesionantes y de compresibilidad. En resumen, se tiene que compatibilizar un alto grado de deformabilidad y baja viscosidad (bajando la razón agua/finos junto a mayores dosis de aditivo superplastificante), junto con la generación de una baja transferencia de presión en la pasta (limitando el contenido de árido grueso).

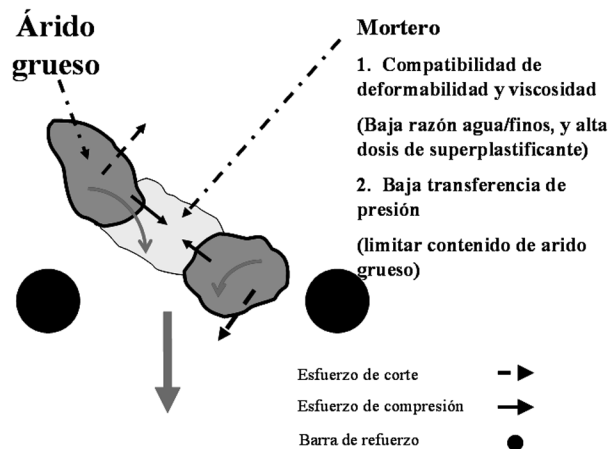


Figura 2. Generación de esfuerzos debido a desplazamiento relativo entre partículas de áridos gruesos

7. Materiales componentes para diseñar un HAC

Los materiales que componen un HAC son en general los mismos que se utilizan en los hormigones convencionales, a diferencia sólo del uso de arenas finas o filler y el uso de aditivos superplastificantes, viscosantes y eventualmente incorporadores de aire.

7.1. Cemento. Se utiliza la amplia variedad de cementos con y sin adiciones.

7.2. Áridos. Tanto chancados como rodados, pero limitando el tamaño máximo del árido. Por ejemplo, en Europa se utiliza comúnmente Dn 16 y 32 mm. En Japón, 20 mm y en ocasiones 40 mm. El estudio de arenas radica en mejorar la deformabilidad de la fase continua, principalmente, su forma, granulometría y finura.

7.3. Aditivos. Los principales aditivos utilizados en el diseño y confección de HAC son los superplastificantes y viscosantes. También, se utilizan los aditivos incorporadores de aire para mejorar la trabajabilidad.

- Los superplastificantes cumplen el objetivo de mejorar significativamente la trabajabilidad para un contenido de agua constante. Se utilizan: lignosulfonatos modificados, sales de condensado de melamina sulfonado y formaldehído, sales de condensado de naftaleno condensado y otros polímeros sintéticos, por ejemplo, los policarboxilatos.
- Los viscosantes cumplen el objetivo de aumentar la

viscosidad de la pasta y su mecanismo consiste en adherirse tanto a los granos del cemento como a las moléculas de agua. Son polímeros de un mayor peso molecular que los superplastificantes, cuya característica principal son la forma del polímero (largo y geometría de la cadena) y grado de solubilidad. Se utilizan: polímeros solubles en agua en base a celulosa, polímeros y biopolímeros solubles en agua en base acrílica, agentes viscosantes inorgánicos y polímeros solubles en agua en base a óxido de etileno.

- c) Los incorporadores de aire, en los hormigones autocompactantes, además de todas las propiedades conocidas, mejoran la trabajabilidad gracias a que las burbujas de aire formadas en el hormigón fresco actúan al mismo tiempo como un fluido, aumentando la docilidad de la mezcla y gracias a su tamaño, entre 25 y 250 micrones, su mejor coeficiente de forma y su elasticidad, permiten un deslizamiento con mínimo roce (comportamiento como rodamientos).

8. Clasificación de mezclas de HAC

Se puede clasificar las mezclas de HAC tanto por los materiales componentes como por la característica de la estructura a hormigón.

8.1. Clasificación del HAC según material componente

La Tabla 6 muestra un detalle de la clasificación del HAC establecida en esta investigación en base al contenido de finos, aditivo superplastificante y aditivo viscosante.

Tabla 6. Clasificación del HAC según material componente (Sciaraffia, 2005)

Tipo	Cemento	Finos	Aditivo	
			Superplastificante	Viscosante
1	Si	Si	Si	No
2		No	Si	Si

Finos: Partículas de árido sin poder cementante que pasa malla #100.

- a) Tipo 1. Diseño de mezcla en la que se reduce la razón A/C incrementando tanto el contenido de cemento como de finos, y que gracias al uso de un aditivo superplastificante y eventualmente incorporadores de aire, logra una alta fluidez y confiere una adecuada resistencia a la segregación. No se utilizan aditivos viscosantes.
- b) Tipo 2. Diseño de mezcla en la que se utiliza un aditivo viscosante, como función principal de reemplazo de

finos (cemento y/o filler). Este diseño requiere de una mayor cantidad de aditivo superplastificante o mayor razón A/C (leve aumento del contenido de agua) por el aumento de cohesión (viscosidad) aportada por el aditivo viscosante. Eventualmente, se agrega viscosante para controlar fluctuaciones en la humedad y granulometría de los áridos.

Por su parte, la Asociación Japonesa de Ingenieros en Hormigón hace mención a 3 tipos de mezclas de HAC, siendo la tercera una mezcla similar al tipo 1 pero con mínimas cantidades de viscosante para contrarrestar las fluctuaciones en la humedad y granulometría de los áridos.

8.2. Clasificación del HAC según característica de estructura

Esta clasificación propuesta por la asociación japonesa de ingenieros en hormigón (JSCE, Japanese Society Concrete Engineer) se basa en el espacio mínimo y la densidad de armaduras y en la geometría de la estructura, distinguiendo tres rangos de HAC:

- a) Rango 1. Estructuras con formas complicadas y secciones de espacio mínimo entre armaduras en el rango de 35 y 60 mm. Densidad de armadura mayor que 350 kg/m³ de hormigón.
- b) Rango 2. Elementos estructurales como muros, pilares, vigas, etc., con espacio mínimo entre armaduras en el rango de 60 y 200 mm. Densidad de armadura entre 100 y 350 kg de acero por m³ de hormigón.
- c) Rango 3. Elementos con grandes áreas, ejemplo losas, con espacio mínimo entre armaduras superior a 200 mm. Densidad de armadura menor que 100 kg/m³ de hormigón.

9. Propiedades que debe cumplir el HAC

El hormigón autocompactante se caracteriza porque debe compatibilizar la alta fluidez con la resistencia a la segregación y exudación. Para evaluar el comportamiento del hormigón se definen tres propiedades que deben cumplir las mezclas en estado fresco (Domone y Jin, 1999) y dos propiedades en estado endurecido (Sciaraffia, 2005).

9.1. En estado fresco :

- a) Habilidad para llenar el moldaje (Fluidez). Es la habilidad para fluir bajo su propio peso (gravedad), llenando completamente el moldaje (cualquier forma geométrica) y dejando embebidos las armaduras y

- demás accesorios de servicios (excelente deformabilidad). La propiedad se puede cuantificar por la magnitud del escurrimiento (diámetro de escurrimiento final, dependiente principalmente del esfuerzo de fluencia del material), y por la velocidad de deformación (dependiente principalmente de la viscosidad del material). Esta propiedad es de importancia en la definición de las técnicas de colocación, y distancias de escurrimiento en el moldaje.
- b) Habilidad para pasar a través de barras de refuerzo y secciones variables (Bloqueo). Es la habilidad para pasar a través de secciones estrechas del moldaje, áreas de gran congestión de armaduras, etc., sin que se produzca un bloqueo (trabazón entre partículas al llegar a estas zonas). Esta propiedad depende principalmente de la viscosidad de la mezcla, es decir, de la fricción de contacto entre partículas para permitir un movimiento relativo.
- c) Resistencia a la segregación (Estabilidad). Es la habilidad del hormigón en estado fresco de mantener su homogeneidad (sin segregación de sus componentes ni exudación) durante el proceso de distribución, colocación en obra y cuando el hormigón se mantiene en su lugar final. Esta propiedad es de importancia en la definición del sistema de colocación y altura de vaciado.

9.2. En estado endurecido:

Para esta investigación se establecen dos propiedades en estado endurecido. Aunque son características del comportamiento de la mezcla en estado fresco, el control se realiza en estado endurecido.

- a) Distribución de aire (porosidad interna y superficial). Capacidad del hormigón en su posición final, después de la colocación, de lograr una distribución homogénea del contenido de aire atrapado producto de la revoltura, entre los áridos y pasta y el creado mientras se coloca (caso con y sin aditivo incorporador de aire), con el fin de obtener un núcleo de mínima y distribuida porosidad y una superficie lisa sin porosidades.
- b) Resistencia al asentamiento plástico (relacionada con la adherencia). Capacidad del hormigón cuando llega a su punto final de colocación de lograr un reacomodo total de la mezcla sin dejar vacíos bajo y sobre la armadura u otro elemento.

10. Principios y metodologías de diseño de HAC

En un HAC las metodologías de diseño de mezclas se basan en:

- Pruebas de ensayo y error, evaluando el comportamiento reológico secuencialmente en pasta, mortero y hormigón, directamente en hormigón, utilizando uno o más equipos y realizando diferentes ensayos.
- Modelos estadísticos (Khayat et al., 1999) (factoriales) e incluso,
- Modelos Neuronales (Nehdi, 2001).

A nivel mundial se han generado diversos principios y metodologías de diseño de HAC importantes de señalar, siendo las siguientes las más conocidas y de mayor uso.

- a) Método de la Sociedad Japonesa de Ingenieros Civiles (Japanese Society of Civil Engineer). El diseño se basa en lograr la estabilidad de la mezcla ya sea a través de finos o agente viscosante, definiendo en forma inicial el volumen de áridos.
- b) Principio del Prof. Okamura de la Universidad de Tokio, Japón (Edamatsu et al, 1999). Método que asume que sólo el cemento es la fuente de finos. Se señala que con el método, si se satisfacen los requerimientos de autocompactabilidad, la resistencia y durabilidad requeridas serán generalmente logradas.
- c) Método de mínimo volumen de pasta para esqueleto granular (Petersson y Billberg, 1999) Determina un mínimo volumen de pasta, para un determinado esqueleto granular, que garantiza el paso de la mezcla de hormigón por una determinada separación entre armaduras en un equipo llamado Caja L, sin que se presente el bloqueo de la mezcla.
- d) Método computacional esqueleto granular compacto con mínimo de vacíos (Sedran y De Larrad, 1999). Establece un esqueleto compacto granular con el mínimo de vacíos, considerando el efecto pared y la viscosidad de la mezcla. En la dosificación se fija inicialmente el contenido de finos, en función de la resistencia y materiales disponibles, con el modelo matemático denominado CPM (Compressive Packing Model).
- e) Método de exceso de pasta (Oh et al., 1999). Se determina el contenido de pasta en exceso de la mezcla de hormigón según la granulometría de los áridos y un volumen de pasta de diseño iniciales obtenido de un modelo matemático.
- f) Método de exceso de agua (Midorikawa et al., 2001). Deducido del anterior pero considerando el exceso de agua.
- g) Método de saturación de pasta con aditivo superplastificante (Gomes et al., 2001). Se evalúa en

pastas el punto para el cual mayores dosis de aditivo superplastificante no causan una variación en la fluidez. Luego, con los resultados obtenidos en las pastas se evalúan hormigones.

h) Método teoría de empaquetamiento (Roshavelov, 1999). Se utiliza un modelo de empaquetamiento según estructuras cristalinas (Romboide). Se modela según fracción de volumen de los materiales componentes.

Se puede concluir de las anteriores, la búsqueda del mayor nivel de compacidad, utilizando modelos matemáticos y también la ejecución de ensayos que asemejan de la mejor forma las singularidades en una estructura.

11. Ensayos para evaluar las propiedades reológicas del HAC

La característica principal de los ensayos utilizados para evaluar el hormigón en estado fresco, es simular el flujo del hormigón a través de secciones estrechas, distribución de armaduras, cambio de dirección, distancias de escurrimiento y alturas de caída.

A la fecha no existen equipos de ensayo estandarizados para la evaluación del hormigón autocompactante, pero se puede encontrar una amplia y

gran cantidad de ensayos recomendados y utilizados mundialmente que simulan el flujo del hormigón por espacios reducidos, a través de armaduras y otras variables, siendo sus precursores comités técnicos formados en ASTM como también universidades y asociaciones asiáticas y europeas. Por lo tanto, los ensayos que a continuación se citan, por la variedad en sus formas y procedimientos de ensayo, están aún en etapa de perfeccionamiento y discusión para llegar a un consenso y factibilidad de estandarización. Se pueden señalar equipos y procedimientos para evaluación del HAC en estado fresco y endurecido y de uso tradicional y especiales.

A continuación se describen la mayoría de los equipos y procedimientos de ensayo de uso tradicional en estado fresco (Figura 3) (Sciaraffia, 2005).

11.1. Estado fresco

a) Cono truncado. La propiedad medida es la Habilidad para fluir sin obstáculos. Es utilizado para determinar el flujo libre horizontal del hormigón autocompactante en ausencia de obstáculos. El diámetro del círculo de hormigón es una medida de la habilidad de llenado del hormigón y la apreciación visual indica la resistencia a la segregación. Ver figura 3.

NOMBRE	VALÚA	NOMBRE	VALÚA	NOMBRE	VALÚA
CONO DE ABRAMS IPOSICIÓN NORMAL	HABILIDAD PARA LLENAR	CAJA L	HABILIDAD PARA PASAR	EMBUDO	HABILIDAD PARA PASAR
NOMBRE	VALÚA	NOMBRE	VALÚA	NOMBRE	VALÚA
TUBO U	HABILIDAD PA PASAR Y LLENAR	CAJA DE OBSTÁCULOS	HABILIDAD PARA PASAR Y LLENAR	COLUMNA DE SEGREGACIÓN	RESISTENCIA A LA SEGREGACIÓN

Figura 3. Equipos de mayor uso para medición de propiedades reológicas del hormigón autocompactante en estado fresco.

Existen diferentes tamaños de conos truncados. En Tabla 7 se resumen los utilizados en investigaciones con HAC.

Tabla 7. Tipos de conos truncados en diseños de HAC (Sciaraffia, 2005)

Geometría		Unidad	Tipo Cono Truncado			
			1	2	3	4*
Diámetro	Superior	(cm)	10	17	13	-
	Inferior	(cm)	20	22,5	20	-
Altura		(cm)	30	12	20	-
Capacidad		(litros)	5,5	3,7	4,3	8,0

- Posición del cono para el ensayo. El ensayo se puede ejecutar en sus dos posiciones, normal e invertida y el procedimiento se realiza sin varillar la mezcla.

En el método con posición invertida del cono, el hormigón está sometido a una mayor presión en la parte inferior del cono, producto de la disminución en forma paulatina del diámetro. El hormigón fluye por dos efectos, tanto el peso propio como la presión por efecto de la disminución del diámetro de salida, produciendo una obligada alteración de la mezcla cuando fluye a través del cono, si se considera a esta conformada por discos o capas. Se estima que el material podría encontrarse confinado evitando un asentamiento del material más grueso, aspecto que no sería observable al final del vaciado. Lo anterior puede ser causa de que al momento de empezar el flujo existe una mayor probabilidad de que la mezcla ruede y comparta parte de pasta y áridos, ocultando una visible segregación en los bordes del diámetro de escurrimiento. Además, la variabilidad de la altura de vaciado durante el ensayo que influye en la energía potencial y cinética de la mezcla al levantar el cono. En resumen, el ensayo en forma invertida impediría visualizar la capacidad del hormigón para deformarse sólo por efectos de la gravedad.

En el método con posición normal del cono, al momento de levantar el cono el hormigón fluirá bajo efecto de su propio peso, no produciendo una alteración de las capas de la mezcla. Mientras el hormigón se encuentra en el cono, podría existir una mayor probabilidad que para una leve tendencia a la segregación el árido grueso descienda en el cono mientras se llena el equipo, fenómeno que se visualizará en el borde del diámetro de escurrimiento. Además, se ha notado que la mezcla de hormigón no colapsa necesariamente con la cronología referida a la posición

de las capas asignadas para representar las diferentes ubicaciones en altura, siendo causa principal la falta de fluidez.

Al no existir elementos suficientes para afirmar cual posición es la correcta al evaluar alguna propiedad principal del HAC, resulta ser técnicamente más favorable el ensayar en la posición normal, debido a que cuando el hormigón se encuentra en el moldaje, ya habiendo sido colocado, será su propio peso el factor fundamental para que pueda fluir hacia el punto más lejano del moldaje y llenar el último espacio entre moldaje y armadura, como así también, garantizar el embeber las armaduras y servicios.

- Tiempo de reposo para el ensayo. Existe también el ensayo con cierto tiempo de reposo. Por ejemplo, la Asociación Japonesa de Ingenieros Civiles define un ensayo de flujo normal y otro definido como flujo estático. En el primero el hormigón se mantiene en reposo un determinado tiempo en la betonera antes del ensayo de flujo con el cono y en el segundo, el hormigón, inmediatamente terminada su revoltura, se vacía en el cono, se cubre y se mantiene en reposo un determinado tiempo antes del ensayo de flujo.
 - Diámetro de fluidez en función del tipo de diseño de la mezcla. El diámetro de fluidez que se extiende al realizar el ensayo del cono depende de los materiales que se utilicen en el diseño de la mezcla, es decir, para un mismo tipo de cono truncado existe un amplio rango de resultados que señalan si la mezcla tiene un comportamiento autocompactante. Por ejemplo, en Japón, el uso masificado de aditivos viscosantes con un mayor contenido de aditivos superplastificantes en el diseño de HAC, provoca la disminución del uso de áridos finos. Esto define un menor volumen de material como medio para la suspensión, obteniéndose diámetros de fluidez entre 57 y 65 cm. En Europa, contrariamente, el uso masificado es de áridos finos que junto sólo a aditivos superplastificantes provoca un volumen mayor que la industria asiática, lográndose un rango más amplio en el diámetro de fluidez, entre 65 y 85 cm. De lo anterior, debemos señalar que el diseño y materiales utilizados fijan los valores de control relativos para un cono truncado en particular.
 - Criterio visual. Se desarrolla un criterio para determinar si una mezcla muestra en su diámetro de fluidez segregación de pasta, mortero y/o áridos. Dackzo y Phillips (2001) proponen un ranking visual de estabilidad estática con una escala de 0 a 3.
- b) Ensayo con Caja L. La propiedad medida es la habilidad para pasar (a través de obstáculos o armadura). Se

- evalúa el flujo del hormigón pasando a través de barras que simulan un bloqueo. El aparato consiste en una caja de sección rectangular en forma de L, con una sección vertical y otra horizontal separadas por una compuerta movable, frente a la cual se coloca una determinada cantidad de barras de acero fijadas a la caja en la sección horizontal y en posición de 90 grados respecto al sentido del flujo. Se calcula el Índice de Bloqueo ($IB = H_{Final}/H_{Inicial}$) que debe ser mayor que 0,8, aunque hay especificaciones con 0,75 e incluso 0,9. Existen 12 variedades del equipo. Ver Figura 3.
- c) Ensayo con Embudo. La propiedad medida es la habilidad para pasar. El ensayo es usado para determinar la habilidad de llenado del hormigón con un tamaño máximo de agregado de 20 mm (caso de la mayoría de los equipos que bordea los 10 litros de capacidad y tienen una geometría similar). El embudo se llena con hormigón y se toma el tiempo en que el hormigón se vacía del equipo. Además, algunas metodologías de ensayo evalúan el tiempo de pasada después de 5 minutos con el objetivo de medir el nivel de segregación. El tiempo de pasada debe estar en el rango de 5 a 12 segundos. Existen 14 variedades del equipo. Ver Figura 3.
- d) Ensayo con el Tubo U. La propiedad medida es la habilidad para pasar y llenar. El aparato consiste en un sifón que está dividido en la parte media por una compuerta. En la pasada inferior se colocan barras de acero ubicadas a 90 grados según el sentido del flujo. Se mide la diferencia de altura entre ambas porciones de hormigón, la cual debe ser menor a 30 mm. Existen 16 variaciones del equipo. Ver Figura 3.
- e) Ensayo con Caja de obstáculos. La propiedad medida es la habilidad para pasar y llenar. Llamado comúnmente Test de Kajima, es usado para medir la habilidad de pasada y, en forma secundaria, la habilidad de llenado de una mezcla de hormigón con Dn de árido de 20 mm. El aparato consiste en un contenedor transparente de acrílico. Contiene 35 obstáculos (tubos de PVC) con un diámetro de 20 mm y una distancia entre centros de tubos de 50 mm. En la parte superior se ubica un tubo de llenado con un diámetro de 100 mm y altura de 500 mm con un embudo de 100 mm. Se llena con hormigón a través de este tubo de llenado y se obtiene la capacidad de llenado, como una relación entre la altura de hormigón en ambos extremos del contenedor, y cuyo valor debe ser mayor a 90%. Ver Figura 3.
- f) Ensayo de Anillo. La propiedad medida es la habilidad para pasar. El equipo consiste en un anillo conformado por barras de acero ubicadas según el Dn del árido de la mezcla. Se considera apropiado una distancia entre barras igual a 3 veces el Dn. El diámetro del anillo es de 300 mm y la altura de 100 mm. Los resultados cuando se realiza con el cono de Abrams deben indicar diferencias del flujo con y sin anillo, menores o iguales a 30 mm.
- g) Ensayo con Orímetro. La propiedad medida es la habilidad para pasar y llenar. Consiste en un tubo que se ubica en forma vertical para el ensayo. La operación consiste en llenar el tubo y medir el tiempo que demora en vaciarse. Usualmente el orificio tiene un diámetro interno de 80 mm para Dn de 20 mm. También existen diámetros de 70 y 90 mm. Debe entregar valores menores o iguales a 5 segundos.
- h) Ensayos de estabilidad en malla. La propiedad medida es la resistencia a la segregación. El ensayo consiste en tomar una muestra de hormigón y mantenerla en reposo en un tamiz de abertura 5 mm durante un determinado tiempo y evaluar el porcentaje de mortero que pasa. Es una buena forma de evaluar la estabilidad de las mezclas, sin embargo, es un ensayo que toma tiempo y precisión. Se compara la masa de hormigón que pasa respecto a la fracción de mortero inicial del hormigón total de la muestra; los valores deben quedar en el rango de 5 a 15%.
- i) Ensayo con Columna y cilindro de segregación. La propiedad medida es la resistencia a la segregación. Se evalúa la distribución del material grueso en un elemento vertical por medio del lavado y tamizado de las muestras del HAC. Ver Figura 3.
- j) Ensayo de tixotropía. El ensayo considera medir el tiempo de reconstrucción de la estructura. Se determina aplicando un esfuerzo de corte con una varilla a la mezcla del hormigón, midiendo la capacidad del hormigón de "soldar" las capas. También llamado Groove in fresh SCC, entrega una medida de la tixotropía del HAC cuando se mantiene en reposo.

Entre los equipos especiales hay creaciones, modificaciones o adaptaciones de los anteriormente señalados, por ejemplo:

- Equipos con el mismo principio que la Caja L, con una mayor distribución de barras y mallas a lo largo de la sección horizontal del equipo, además de la modificación del largo a 2 y 3 veces el largo original.
- Equipos con el mismo principio de la Caja de obstáculos, con forma de bota e incluso con la colocación de un

12. Metodología de diseño

embudo en la parte superior para medir dos ensayos a la vez.

- Tubos U modificados. Tubos de diferente largo, alto y sección, además con armaduras y mallas dispuestas tanto en la parte horizontal como vertical.
- Equipos para evaluar la fricción de la mezcla. El equipo considera una caja sumergida en una muestra de hormigón, la cual se levanta y se mide la fuerza y fricción para levantarla fuera de la mezcla. La caja de control posee barras.
- Cilindro de fluidez. Es un cilindro con el concepto del cono y orímetro, pero de mayor tamaño y volumen. Se puede lograr diámetros de fluidez de 1300 mm.
- Ensayo de penetración. Se mide la penetración de un elemento, placa, bola u otro a una mezcla.

Cabe señalar que existe también una gran cantidad de viscosímetros y reómetros para medir propiedades de las pastas, como la viscosidad, esfuerzos de corte, etc.

11.2 Estado endurecido

En estado endurecido se han desarrollado equipos y procedimientos para evaluar la distribución de árido, la terminación superficial, medición de la adherencia con ensayos "pull out" (arrancamiento) y el asentamiento del hormigón en muestras con y sin barras que simulan refuerzo en una estructura (Sciaraffia, 2005).

- a) Asentamiento sin barras. El equipo consiste en un cilindro y los accesorios para realizar una medición milimétrica del asentamiento del hormigón una vez finalizado el fraguado.
- b) Asentamiento con barras. Es igual al anterior pero con la incorporación de barras de diferentes diámetros y a diferentes alturas. Después del ensayo se puede observar la terminación superficial y el nivel de llenado del hormigón alrededor de las barras, tanto por el manto como por la parte interior (cortes).
- c) Ensayos de adherencia. Ensayos de arrancamiento (normalizados y propuestos) considerando la evaluación de mezclas de HAC en estado fresco a diferentes alturas de vaciado como también distancias de escurrimiento.
- d) Distribución de áridos y terminación superficial. En probetas u otros elementos se realizan mediciones para evaluar la distribución de árido y terminación superficial.

En la metodología de diseño se definen dos etapas principales. En Etapa A (Figura 4) se determina el punto de saturación en pasta con aditivo superplastificante, siendo la pasta el primer medio (fase continua) para conocer la compatibilidad del aditivo superplastificante y los diferentes áridos finos y cemento. Posteriormente, en Etapa B (Figura 4) se evalúan las mezclas de hormigón con la pasta diseñada en Etapa A considerando diferentes proporciones de árido grueso y arenas. Este diseño tiene su fundamento gracias a tener la ventaja que permite conocer la mezcla desde su constitución más elemental (pasta), pasando por el mortero, hasta llegar al hormigón.

12.1. Etapas de diseño

- a) Punto de saturación de la pasta con aditivo superplastificante con/sin aditivo viscosante. Posteriormente a la definición de la resistencia mecánica requerida con razón A/C, se plantea como primer objetivo el obtener el punto de saturación de la pasta con aditivo. Esto se logra determinando el punto de saturación con un ensayo efectuado en embudo según NCh 2257/4. Los resultados del ensayo indicarán que la viscosidad disminuye para incrementos de la dosis de aditivo superplastificante, hasta que se alcanza una determinada cantidad de aditivo a la que posteriores adiciones no significarán una reducción significativa de la viscosidad de la mezcla. El mismo procedimiento se aplica para el aditivo viscosante cuando se requiera técnicamente. Una vez determinadas las cantidades óptimas de aditivo para las cuales no se genera un aumento de la fluidez, se diseñan hormigones considerando como base del diseño la pasta con la cantidad de aditivo obtenida. El punto de saturación está relacionado directamente con la razón A/C y contenido de finos de la pasta (cemento más arenas finas), siendo la etapa de selección de materiales (según disponibilidad y requerimientos específicos de la estructura) la fase de optimización de ésta para el posterior diseño del HAC.
- b) Mezclas de hormigón con diferentes proporciones de arena y árido grueso. En función del elemento a hormigonar y considerando la altura del elemento, distancia de escurrimiento definida operacionalmente en el proyecto, espacio mínimo entre armaduras y densidad de armadura, se eligen los ensayos para evaluar las mezclas de hormigón. El Cono de Abrams, por su internacionalización, será siempre considerado ya que entrega los resultados más prácticos e

inmediatos, pero que solo pueden ser bien interpretados a falta de algunos de los otros equipos, por un profesional idóneo. Por ejemplo, para diseñar hormigones autocompactantes para un pilar o losa se puede recomendar la ejecución de los siguientes ensayos:

- **Diseño para pilar.** En orden de importancia, los ensayos son: Columna de Segregación, Embudo y Caja L. Será predominante en el diseño un mayor volumen de mortero con un menor volumen de árido grueso. El tamaño máximo del árido puede ser igual a 20 mm, o menor, en los casos de alta densidad de armadura.

Los temas principales del diseño son estabilidad y habilidad para pasar.

- **Diseño para losa.** En orden de importancia, los ensayos son: Caja L, Tubo U y Embudo. Será predominante en el diseño un mayor volumen de mortero con un mayor volumen de árido grueso. El tamaño máximo del árido puede ser 20 mm o mayor, en los casos de baja densidad de armadura. Los temas principales del diseño son habilidad para fluir y pasar. Se debe aplicar semejante proceder para el diseño de hormigón para muros, vigas y otros. La Figura 5 muestra un rango de resultados a obtener según el diseño requerido.

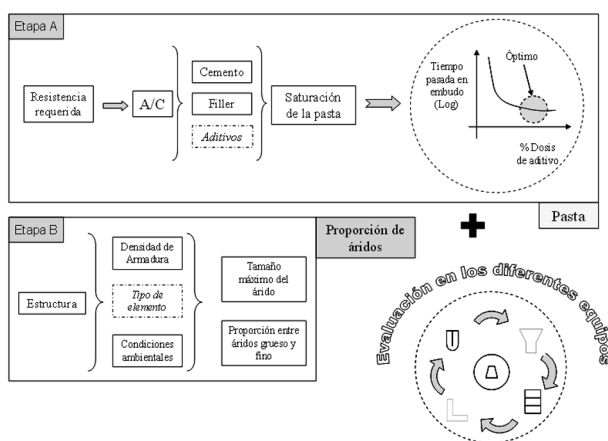


Figura 4. Esquema de diseño y evaluación para un HAC. Etapas A. Punto de saturación de pasta con aditivo superplastificante con/sin aditivo viscosante y Etapa B. Diseño y evaluación de mezclas de hormigón con diferentes proporciones entre árido grueso y fino.

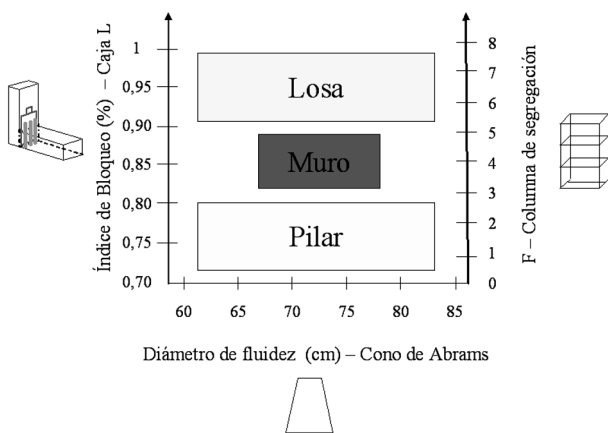


Figura 5. Rango de resultados para el diseño de HAC según tipo de estructura. Caja L (Índice de Bloqueo), Columna de segregación (Factor F) y Cono de Abrams (Diámetro de fluidez) (SCIARAFFIA, 2005)

c) Análisis de los resultados y especificación para la colocación en obra. Los resultados obtenidos en cada uno de los ensayos deben ser analizados en correlaciones. El análisis de sensibilidad de los parámetros de diseño y resultados de ensayos permitirá identificar, interpretar y analizar su influencia en las mezclas de HAC logrando optimizar la mezcla requerida según el tipo de estructura. Posteriormente y teniendo la mezcla de mejor comportamiento en laboratorio se deberá verificar varios aspectos en planta y terreno, por ejemplo, la invariabilidad de los áridos, cemento, agua y aditivos, limpieza del mixer, tiempo de transporte, personal o laboratorio de control capacitado para la recepción en obra, tipo de distribución y colocación en la obra.

12.2. Ejemplo numérico de diseño de HAC.

Las Tablas 8 a 10 indican los valores obtenidos para el diseño del hormigón para un pilar.

La tabla 8 resume los valores obtenidos en pastas, con cada uno de los porcentajes de saturación de aditivo para mezclas con un contenido de finos de 500, 550 y 600 kg/m³, en A, B y C, respectivamente. En la misma Tabla 8 se tabula una proporción entre árido grueso y fino igual a 0,7.

La Tabla 9 muestra los parámetros de diseño de las mezclas de Tabla 8, por ejemplo, la relación entre arena y el mortero y volumen de pasta.

La Tabla 10 muestra los resultados de los ensayos de hormigón fresco de las 3 mezclas en diferentes equipos.

Tabla 8. Diseño de Hormigón. Se incluyen registros de pasta

MATERIALES	UNIDAD	A	B	C
CEMENTO	kg/m ³	400	400	400
A/C	%		0,4	
AGUA	kg/m ³	160	160	160
MATERIAL FINO. EJEMPLO: FILLER	kg/m ³	73	138	203
CONTENIDO DE FINOS < #100 + Cem	kg/m ³	500	550	600
ADITIVO PUNTO SATURACIÓN PASTA	% P.cem	0,7	1,3	1,7
GRAVILLA/ARENA	%	0,7	0,7	0,7
GRAVILLA	kg/m ³	722	692	663
ARENA	kg/m ³	1031	989	947
D.REAL GRAVILLA	t/m ³	2,72	2,72	2,72
D.REAL ARENA	t/m ³	2,68	2,68	2,68
D.REAL EJ.: FILLER	t/m ³	2,45	2,45	2,45
D.CEMENTO	t/m ³	2,87	2,87	2,87
AIRE DE DISEÑO	litros	20	20	20
DENSIDAD TEÓRICA	kg/m ³	2405	2399	2392

Tabla 9. Características del diseño de HAC

MATERIALES	A	B	C
A/C (PESO)	0,4	0,4	0,4
A/C (VOLUMEN)	1,15	1,15	1,15
FINOS <0.150 UM (PESO)	500	550	600
ARENA/ÁRIDO TOTAL (PESO)	0,56	0,54	0,52
GRAVILLA/ÁRIDO TOTAL (PESO)	0,40	0,38	0,37
VOLUMEN PASTA (LITROS)	0,36	0,38	0,40
VOLUMEN MORTERO (LITROS)	0,72	0,73	0,74
ARENA/ÁRIDO TOTAL (VOLUMEN)	0,57	0,54	0,52
GRAVILLA/ÁRIDO TOTAL (VOLUMEN)	0,39	0,37	0,36
ARENA/MORTERO (VOLUMEN)	0,53	0,50	0,48

Tabla 10. Resultados de ensayos de hormigón fresco del HAC

ENSAYOS		UNIDAD	A	B	C	
AIRE	HAC	%	2,8	2,3	1,5	
	HAC (COMPACTADO)	%	1,7	1,6	-	
DENSIDAD	HAC	kg/m ³	2391	2387	2390	
DIÁMETRO DE FLUIDEZ	INVERTIDO	PROM	cm	65	67	68
	NORMAL	PROM	cm	64	67	67
CONO DE ABRAMS	SEGREGACION	si/no	si(-)	no	no	
	EXUDACION	si/no	no	si	no	
TIXOTROPÍA		seg.	8	7	5	
CAJA L	IB	%	0,76	0,94	1	
TUBO U	DIFERENCIA ALTURA	mm	35	42	29	
EMBUDO	TIEMPO VACIADO	seg.	5	7	5	
COLUMNA SEGREGACIÓN	% SEGREGACIÓN RET. TAMIZ 9,5 MM	M1	%	37	33	35
		M2	%	34	36	33
		M3	%	29	31	32
MALLA ESTABILIDAD MORTERO	% SEGREGACIÓN MALLA #4	SM	%	4,5	4,9	6,2



Para el caso del ejemplo citado de las mezclas A, B y C, se utiliza aditivo superplastificante existente en el mercado. Los resultados indican que la mezcla C aprueba la totalidad de los ensayos. Al analizar los resultados de Tabla 9, se observa un mejor comportamiento en el ensayo de la columna de segregación de la mezcla C (valor de control de 33% para cada nivel) con un nivel de segregación alto en la mezcla A. El porcentaje de mortero medido en malla es mayor en mezcla C, principalmente por el mayor contenido de finos de la mezcla. En el ensayo de la Caja L, las mezclas B y C sobrepasan el Índice de Bloqueo 0,8 e incluso 0,9, lo cual indica una gran capacidad de fluir. En el ensayo de embudo los tiempos son similares y rápidos explicados principalmente por el aditivo utilizado. En ensayo de tubo U las diferencias de altura son bajas lo que indica una gran capacidad para autonivelarse.

Es decir, con una base de datos de varios ensayos se podrá declarar a una mezcla con mejor comportamiento que otra y determinar cual será capaz de autocompactarse.

Para el caso de hormigones de obras civiles de mayor complejidad, por ejemplo, puentes, vigas pre y post tensadas, estanques, túneles y cualquier estructura compleja, se deben realizar ensayos, preferentemente, tanto a escala real como con la utilización de los equipos conocidos, pero que en forma conjunta permitan simular las mismas condiciones de esa estructura en particular.

12.3. Discusión del comportamiento autocompactante

En la Figura 6 se muestra una situación hipotética que se puede generar tanto por un diseño de HAC como por procedimientos de colocación incorrectos, donde se puede generar un descenso del hormigón bajo las barras, parcial, que se incrementa por el diferencial de altura del elemento.

Si se parte de la hipótesis de la Figura 7, que considera al hormigón como una masa compuesta de capas laminares horizontales de diferente espesor, largo y ancho, se puede explicar que existe un asentamiento en el espacio de todas las capas, tanto sobre, bajo y lateralmente a las barras, considerando a las barras o cualquier otro elemento fijo como un obstáculo. La fluidez, para el relleno de los espacios y, la viscosidad, para mantener la mezcla sin riesgo de mayor fricción y choque interpartículas y con una buena reconstrucción de la estructura (Tixotropía), permitirán disminuir el riesgo de asentamiento plástico en toda la masa del HAC. (Sciaraffia, 2005). Tiene sentido si se compara con un hormigón vibrado donde el asentamiento se produce por obstáculos de barras o áridos gruesos y que se puede

prevenir usando mezclas más secas, mejor compactación y no permitiendo que exista una reconstrucción tan rápida de la estructura de la mezcla (Neville, 1996). Las investigaciones relacionadas con ensayos de pull-out (arrancamiento) en HAC, lamentablemente, se han realizado en elementos de control de alturas pequeñas, no logrando dilucidar la problemática y manteniendo cierta incertidumbre al respecto.

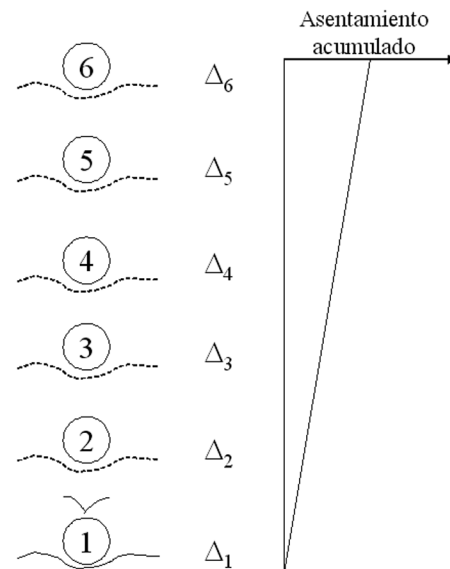


Figura 6. Esquema del asentamiento parcial bajo las barras y acumulativo por diferencial de altura del elemento

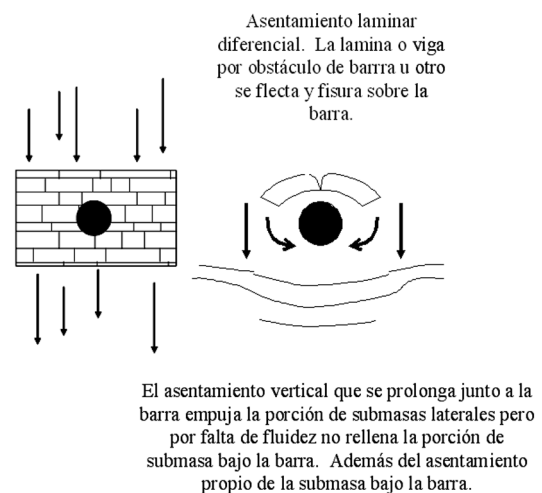


Figura 7. Hipótesis fenómeno de asentamiento plástico, flexión y fisuración producto de la viscosidad y fluidez del HAC.

12.4. Limitaciones del uso del HAC

Las principales limitaciones para el uso masivo del HAC son el costo directo del material, que en la actualidad llega a ser hasta un 40% mayor que un hormigón vibrado, cuando se compara con un hormigón fluido de similar resistencia. En obra, la implementación de moldajes más estancos y resistentes y, en las plantas de premezclados, mayor logística y control de áridos y aditivos.

13. Conclusión

La factibilidad de diseñar un hormigón con un comportamiento autocompactante es real. Cada diseño debe ser realizado en base a una síntesis para evaluar el comportamiento desde la pasta hasta la mezcla de hormigón. Lo anterior es clave para conocer el comportamiento de uno de los materiales claves de la mezcla, el aditivo. Además, es necesario llevar a cabo una exhaustiva y correcta elección de los ensayos, tanto en estado fresco y endurecido, con los diferentes equipos, con el objetivo de discriminar la importancia particular de cada uno de ellos según el elemento a hormigonar. Finalmente, el valor agregado del HAC debe permitir mejoras en la obra para reducir costos especialmente en tiempo, calidad y reparaciones.

14. Referencias

- Billberg P. (1999), Some rheology aspects on fine mortar part of concrete (SCC). Licentiatavhandling, Bulletin 51, 1999, Byggekonstruktion, KTH.
- Dackzo J. y Phillips S. (2001), Self-compacting concrete in under ground and mining applications, Proceedings of the Second International Rilem Symposium on Self compacting Concrete, Japan.
- Edamatsu Y., Nishida N. y Ouchi M. (1999), A rational mix-design method for self-compacting concrete considering interaction between coarse aggregate and mortar particles, Proceedings of the First International RILEM Symposium of Self-compacting concrete, Stockholm, Sweden.
- Gomes P. Gettu R., Agulló L. y Bernad C. (2001), Experimental optimization of high-strength Self-compacting concrete, Proceedings of the Second International Symposium of Self-Compacting concrete, Tokyo, Japan.
- Khayat K.H., Ghezal A., y Hadriche M.S. (1999), Utility of statistical models in proportioning Self-compacting concrete, Proceedings of the First International RILEM Symposium of Self-compacting concrete, Stockholm, Sweden.
- Midorikawa, T., Pelova, G., Walraven, J. (2001), Application of "the water Layer Model" to self compacting mortar with different size distribution of fine aggregate, Proceedings of the Second International Symposium of Self-Compacting concrete, Tokyo, Japan.
- Nehdi M., El Chabib H., y El Naggar H. (2001), Predicting performance of Self-Compacting concrete mixtures using Artificial Neural Networks, ACI Materials Journal, Sept-Oct.
- Neville A. (1996), Properties of concrete, Fourth Edition. John Wiley & Sons, Inc.
- Oh S.G., Noguchi T. y Tomosawa F. (1999), Toward mix design for rheology of Self-compacting concrete, Proceedings of the First International RILEM Symposium of Self-compacting concrete, Stockholm, Sweden.
- Okamura H. y Ouchi M. (2003), Self-compacting concrete, Journal of Advanced concrete technology, Vol.nº1, April.
- Ouchi M. y Edamatsu Y. (1999), A simple evaluation method for interaction between coarse aggregate and mortar particles in self-compacting concrete, Proceedings of the First International RILEM Symposium of Self-compacting concrete, Stockholm, Sweden.
- Petersson Ö., y Billberg P. (1999), Investigation on blocking of Self-compacting concrete with different maximum aggregate size and use of viscosity agent instead of filler, Proceedings of the First International RILEM Symposium of Self-compacting concrete, Stockholm, Sweden.
- Roshavelov T. (1999), Concrete mixture proportioning with optimal dry packing, Proceedings of the First International RILEM Symposium of Self-compacting concrete, Stockholm, Sweden.
- Sciaraffia R. (2005), Diseño y evaluación del Hormigón Autocompactante. Tesis para optar al Título de Ingeniero Civil mención Civil, Profesores Guía, Ing. Renato Vargas S. e Ing. Arturo Holmgren G., Facultad de Ingeniería y Construcción Civil, Escuela de Ingeniería Civil, Universidad Andrés Bello. Chile.
- Sedran T., y De Larrad F. (1999), Optimization of Self-compacting concrete thanks to packing model, Proceedings of the First International RILEM Symposium of Self-compacting concrete, Stockholm, Sweden.

