

Desarrollo de hormigones autocompactables de resistencia media en Colombia

C.J. DE LA CRUZ¹

¹ Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Minas - Medellín, Colombia

RESUMEN

Los resultados obtenidos con el uso del HAC a nivel mundial, ha arrojado resultados convincentes para el empleo del mismo, evidenciando que es una alternativa que genera seguridad, eficiencia, rapidez y mejor ambiente de trabajo, proporcionando una economía significativa de diferentes formas, dentro del proceso constructivo.

La construcción civil en Colombia, exige la implementación de nuevas tecnologías eficientes y es así como los HAC de Resistencia Media-Baja (HAC-RM), se convierte en la primera herramienta que garantiza un hormigón fluido (H.F) sin problemas de segregación o exudación y principalmente por sus propiedades en estado fresco, las cuales son determinadas en el laboratorio y en obra, por medio de una serie de ensayos diseñados para tales fines, cuyos resultados permiten caracterizar cuantitativamente y cualitativamente la propuesta e implementación del nuevo HAC-RM en Colombia, siguiendo la metodología propuesta por De La Cruz (2006) [1] y aplicada ya en Medellín para algunos trabajos docentes y de grado, en el Laboratorio de Estructuras (LABEST) de la Facultad de Minas de la Universidad Nacional de Colombia (UNAL).

Palabras clave--Autocompactable, caracterización, exudación, fluidez, hormigón, resistencia, segregación.

I. INTRODUCCIÓN

Los resultados obtenidos con el uso del HAC a nivel mundial, han sido convincentes para el empleo del mismo, como una alternativa que genera seguridad, eficiencia, rapidez y mejor ambiente de trabajo; de ahí

que buscando mayor durabilidad en las estructuras y por tanto un material más denso y compacto, con mayor resistencia al ataque del medio ambiente, y a su vez, que demande un menor costo ante el mantenimiento y protección, por lo que se ha promovido el desarrollo de los HACs, con el objeto de hacerlos más competitivos a nivel industrial.

Es así, como se quiere dar a conocer una de las metodologías de procedimiento que se aplican a nivel mundial, para el diseño y fabricación de HAC-RM y presentar de manera simplificada y efectiva, el desarrollo y desempeño de los mismos en Colombia; con la debida caracterización de los materiales localmente disponibles. Al ofrecer una herramienta de estudio y aplicación, de una de las tendencias más importantes de los hormigones en la actualidad a nivel mundial, se permite contribuir a la formación académica de los futuros ingenieros civiles en la implementación de los nuevos materiales en la construcción y facilitar mediante la apropiación de una metodología eficaz, la actualización de los espacios de formación académica y profesional, con las últimas tendencias experimentales, ya implementadas en el mundo.

II. DETALLES EXPERIMENTALES

Teniendo en cuenta que, la estabilidad o resistencia a la segregación, está gobernada por la viscosidad y la cohesión de la mezcla y que se debe garantizar la estabilidad durante el transporte, colocación y puesta en obra; se utilizó la metodología propuesta por De La Cruz (2006) [1], para los HAC-RMs; que sugiere obtener este tipo de hormigones, sin el uso de adiciones o agentes modificadores de la viscosidad (AMVs), en el LABEST, teniendo en cuenta lo siguiente:

- Componentes localmente disponibles y utilizando el *Cono de Marsh*, se determina la dosis de saturación del aditivo *sp* en la pasta y en el mortero, con una relación A/C entre 0,40 y 0,45.
- Con el ensayo del *Mini-Slump*, se fija la relación Arena/cemento considerando una pasta de fluidez alta y cohesión moderada.
- Separadamente, se obtiene la relación arena/grava correspondiente a la combinación seca de estos componentes que da lugar al mínimo contenido de vacíos. Con esta relación arena/grava se fabrican hormigones con distintos volúmenes de pasta o mortero (con la dosis de saturación de *sp* y relación *Finos*/cemento determinados inicialmente).
- Se considera como mezcla optimizada la que, con el mínimo contenido de pasta o mortero, cumple los requisitos de autocompactabilidad y resistencia determinados por varios ensayos sobre el hormigón fresco.
- Un aspecto que no se debe olvidar para la selección del HAC-RM, además de las propiedades esperadas en estado fresco y endurecido, como las condiciones de costos, colocación, aplicación y durabilidad, entre otras; es el criterio del ingeniero, que es determinante para aceptarlo o rechazarlo.

En el Laboratorio de Estructuras de la Facultad de Minas-Universidad Nacional de Colombia (LABEST), se eligieron para la caracterización en estado fresco, las pruebas de Ecurrimiento, Embudo V y Anillo de Barras o Extensión con Anillo de Barras [2] y como valores límites en las propiedades esperadas, las que se mencionan a continuación:

1. Una Extensión de flujo ó Ecurrimiento (Numeral 3.2) de 65 a75 cm, para un T_{50} de dos (2) a ocho (8) segundos.
2. Tiempo de descarga del HAC-RM, en el ensayo del Embudo-V, de dos (2) a cinco (5) segundos.
3. Un CB para el ensayo del Anillo de Barras o Extensión con Anillo (Numeral 3.4) de 0,8; con una diferencia de diámetro D_p igual o menor de cinco (5) cm, con el D_p del ensayo de Ecurrimiento.

Con base en los criterios aquí señalados, se procedió a la fabricación de varios hormigones de prueba; uno de los HAC-RM se utilizó para unas aplicaciones estructurales; específicamente, en vigas y columnas en el mismo laboratorio y en la fabricación de prefabricados (TECNNOVA y Expo-Camacol), como propuesta para mobiliario urbano en Colombia [3].

En la *Fase Mortero*, (cemento, agua, arena y aditivo), se determina la compatibilidad que hay entre el superplastificante (*sp*) y la pasta de cemento y la cantidad óptima de *sp* para mantener las condiciones de autocompactabilidad en el hormigón sin aumentar indiscriminadamente los costos.

Fase Mortero:

Esta fase se determina mediante el ensayo del Cono de Marsh o de Fluidez normalizado por la ASTM 939[3], que es el que nos permite determinar la fluidez; en asocio con el ensayo del Mini Slump, que determina la consistencia de dicha mezcla. Inicialmente se debe definir la resistencia y la relación agua/cemento (A/C), con valores por debajo de 0,6. Con el objeto de garantizar que la fluidez, no dependerá de relaciones A/C altas.

a) *Resistencia y Relación A/C:* La resistencia mecánica del hormigón endurecido, debe estar entre los 25 y 35 MPa (resistencia media-baja en Colombia). Se parte del precedente que en estado endurecido, no interesa si es autocompactable o no, en comparación con un HC de la misma resistencia mecánica. Para definir la relación A/C, se parte de la ecuación de Abrams[2][3] [4]; pues dicha ecuación, muestra la dependencia que existe entre la resistencia y la relación A/C.

$$f'_{cr}(MPa) = \frac{K_1}{K_2^{w/c}} \text{ Donde: } w/c: \text{ Relación A/C, } K_1, K_2: \text{ dependen de la resistencia a la compresión del cemento empleados (NTC-220)[4].} \quad (1)$$

$$w/c = \frac{K_1}{f'_{cr} * \ln(K_2)} \quad K_1 \text{ y } K_2 \text{ fueron los correspondientes a la Tabla 1, que se presenta a continuación:} \quad (2)$$

Tabla 1. Valores para K_1 y K_2 según la resistencia del cemento [5]

Resistencia del cemento (MPa)	K_1	K_2
<20	75,00	14,50
25-30	90,00	13,00
30-35	110,00	12,50
35-40	130,00	11,00
>40	145,00	10,50

b) *Definición del Mortero:* Todos los morteros se prepararon en una mezcladora mecánica del LABEST,

de dos (2) velocidades, teniendo en cuenta los tiempos que se presentan en la siguiente Tabla 2.

Tabla 2. Tiempo y velocidades del mortero en la mezcladora[3]

Tiempo (s)	Componentes	Velocidad
30	Finos y cemento	Lenta
60	90% del agua	Lenta
60	Parar y raspar	0
30	Resto del agua con el aditivo	Lenta
150	Mortero	Rápido

Se mantuvo constante el contenido de cemento ((1000g, por obvias razones de capacidad de la mezcladora), para una A/C=0,5. Para el cálculo del agua de amasado se tuvo en cuenta el % de sólidos de los aditivos sp_s (De La Cruz, 2006)[1].

Ensayo con el Cono de Marsh (ASTM C-939)[6]: El mortero influye de manera determinante en la consistencia y fluidez del hormigón fresco, como también sobre las propiedades mecánicas y de durabilidad del hormigón endurecido. Su optimización es prioritaria para el diseño de los HAC-RM, para evaluar las características de cada tipo de mortero (agua+cementantes+aditivos), y que se basa en la medición del tiempo de fluidez a través del Cono de Marsh. Existe un punto, a partir del cual, el aumento en la dosis de sp no provoca un aumento significativo de la fluidez; por lo que se define este punto como el “*punto de saturación*” del mortero (De La Cruz, 2006) [1].

Determinación cuantitativa del punto de saturación: Al variar los contenidos de sp en el mortero se obtienen diferentes tiempos y al disminuir el tiempo se aumenta la fluidez. Con este ensayo y distintos porcentajes de aditivo se puede determinar el punto de saturación y que según la curva Log (tiempo(s)) vs. sp/c, permita obtener un ángulo de $140^\circ \pm 10^\circ$, como lo sugieren Gomes, 2003 y De La Cruz, 2006 [1].

Ensayo en el Mini Slump: El ensayo del Mini Slump, permite determinar la consistencia del mortero, donde también se puede observar bajo valoración visual, si se presenta segregación y/o exudación. El Mini Slump se puede asociar con la colocación y consolidación (De La Cruz, 2006) [1] sin vibración. En este ensayo se determina el diámetro final, después de desmoldar. El diámetro debe estar entre 280 ± 20 mm (De La Cruz, 2006) [1][3].

Toma de datos en el LABEST: A continuación se presentan las figuras 1, 2 y 3, que corresponden a la definición de los puntos de saturación con tres (3) tipos

de aditivos sps con diferentes porcentajes de sólidos, disponibles en la ciudad de Medellín [3].

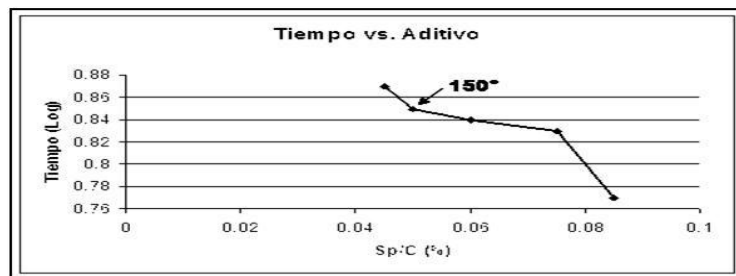


Fig1. Punto de saturación (sp 36% de sólidos)

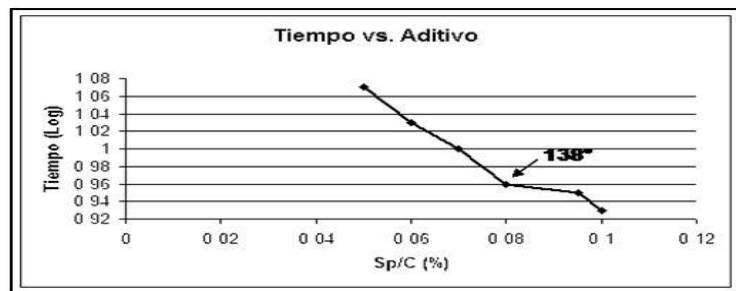


Fig 2. Punto de saturación (sp 32% de sólidos)

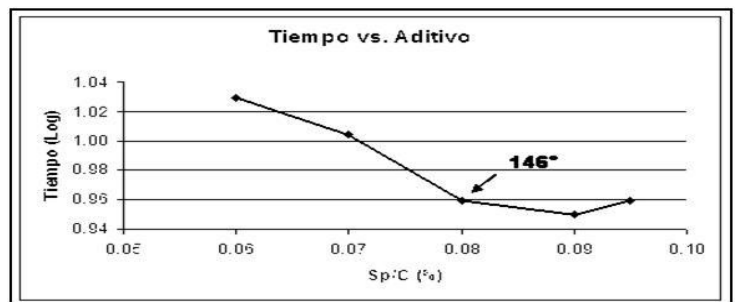


Fig 3. Punto de saturación (sp 28% de sólidos)

Para el diseño de mezclas de los HAC-RM, se utilizó el aditivo sp, con 28% de contenido de sólidos; pues presentaba una mejor consistencia y mejor compatibilidad..

Definida la *Fase Mortero*, se debe definir también el *Esqueleto Granular* [7]:

a) Optimización del Esqueleto granular: Para la optimización del esqueleto granular, se ajustó la granulometría de los materiales empleados a la curva teórica de máxima densidad de Fuller De La Cruz (2008) [6]. Por lo que se realizó el ensayo de máxima compacidad (De La Cruz, 2006) [1].

Los áridos empleados en este trabajo fueron los disponibles en las canteras de la ciudad de Medellín. Se definieron para efectos de trabajo, como *árido fino-*

medio (arena de 2-5 mm); y como *árido grueso*, en dos proporciones, *árido grueso* de tamaño máximo 3/8" (5-12 mm) y *árido grueso* de tamaño máximo 3/4" (12-19 mm). En la siguiente Tabla 3, se presentan los resultados de los ensayos físicos necesarios para dosificar el HAC-RM en el LABEST.

Tabla 3. Ensayos Físicos de los Áridos (Según NTC-237)[4]

Propiedad	Arena (2-5 mm)	Árido 3/8"	Árido 3/4"
Densidad SSS (g/cm ³)	2,67	2,65	2,72
Densidad Seca g/cm ³	2,62	2,63	2,66
Porcentaje de Absorción	1,70	1,01	2,00

Máxima Compacidad: De La Cruz (2006) [1], el volumen de vacíos fue de un 34% como se muestra en la Figura 4. A pesar de ser un valor relativamente bueno implicaba altos contenidos de cemento en la fase mortero del diseño y en el volumen de pasta de la mezcla definitiva[3].

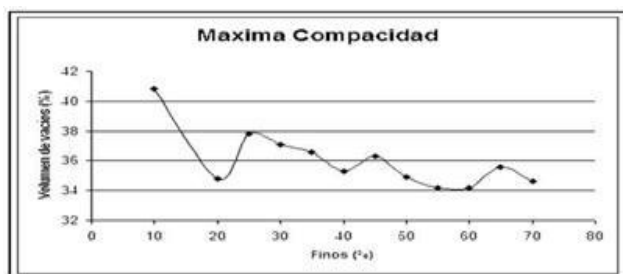


Fig 4. Máxima Compacidad con dos (2) materiales

Para obtener una relación de vacíos que nos permitiera trabajar el desarrollo de un HAC-RM con el mínimo volumen de vacíos, se decidió realizar una curva ideal y de ésta manera economizar costos en la mezcla final. La idealización de está curva se realizó en el LABEST, obteniendo una relación de vacíos del 28%.

Para encontrar el menor contenido de vacíos y a nivel de experimentación en el laboratorio, se generaron las condiciones de tamizado y mezcla de los áridos de manera controlada. Esta situación se hace más compleja a nivel industrial o mejor a nivel de cantera; por lo que no es posible conseguir comercialmente una curva que cumpla exactamente con las características de la curva teórica de Fuller[6]; pero si con cierta aproximación. Por lo que se decidió realizar el ensayo de máxima compacidad con otro material más fino (0-2mm, obtenido del tamizado en el LABEST), con los porcentajes de cada material granular; que para efectos de trabajo, se han discriminado como *Finos*, *Medios* y *Gruesos*. Finalmente con esta combinación se logró optimizar la relación de vacíos llegando a 29,3% de vacíos.

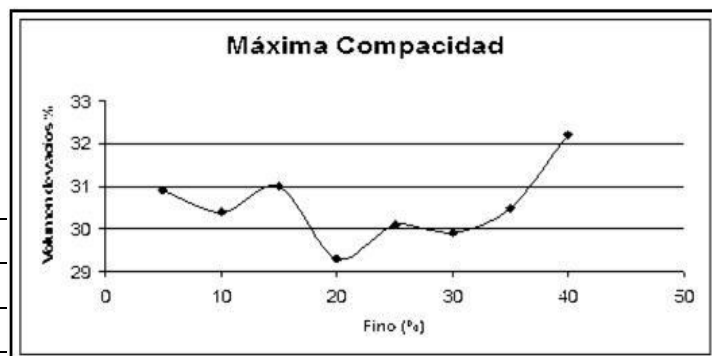


Fig5. Máxima Compacidad con tres (3) materiales

III. DOSIFICACIONES DE HAC-RM CON CEMENTO PÓRTLAND TIPO I, EN COLOMBIA

En la Tabla 4, se presentan algunas de las mejores dosificaciones de prueba del HAC-RM con Cemento Pórtland Tipo I [3][7]. La dosificación 3, se utilizó en la fabricación de vigas, columnas y prefabricados en el LABEST a nivel de prácticas docentes y participación en eventos en la Ciudad de Medellín (TECNNOVA y Expo-Camacol).

Vale la pena destacar el buen desempeño y acabado de los elementos estructurales y de mobiliario urbano fabricados en la ciudad de Medellín; como el interés despertado por el público y el gremio de la construcción en dos (2) de los eventos más destacados en lo que a términos de la construcción en Colombia se refiere; al punto tal, que dichos elementos fueron donados como material dentro de la infraestructura en el Palacio de Exposiciones de Medellín.

Tabla 4. Mezclas y resultados de los hormigones HAC-RM, en el LABEST

DOSIFICACIONES	1	2	3	
TEMPERATURA °C	17	19	17	
HAC-RM- con sp con % SÓLIDO =	32	36	28	
PORCENTAJE DE PASTA densidad de la Pasta (1750 kg/m ³)	35%	36,5%	37%	
COMPOSICIÓN (kg/m³)				
Pasta	Cemento Tipo I	388	431	447
	Agua añadida	250	273	283
Esqueleto	Arena 0-2	537	538	539

Granular	mm			
	Arena 0-5 mm	586	532	510
	Grava 5-12 mm	601	546	524
RESULTADOS DE LOS ENSAYOS				
Escurrecimiento	T ₅₀ (s)	2,00	1,50	2,00
	D _r (mm)	750	750	650
Embudo-V	T(s)	2,14	2,50	2,25
Extensión con Anillo	C.B	0,90	0,88	0,90
P. U (real)	Kgf/m ³	2366	2380	2400
Resistencia (28 días)	MPa	26	27	30

*Resultados de Resistencia, promedio de tres (3) cilindros con neopreno

IV. CONCLUSIONES

Los resultados confirman que es posible colocar el HAC-RM en estructuras densamente armadas, sin peligros de segregación, dando lugar a un material homogéneo de fácil y rápida colocación.

Se hace prioritario dotar el LABEST, de toda la infraestructura necesaria para la caracterización en estado fresco de los HAC-RMs; pues al existir algunas normativas universalmente aceptadas para su uso, Colombia no puede quedarse atrás en el reconocimiento de una nueva alternativa económica de fabricación de hormigones de última generación.

Tres (3) de las propiedades principales (capacidad de relleno, habilidad de paso y estabilidad frente a la segregación) de los HAC-RMs, fueron verificadas en el LABEST. Lo que permite concluir, que hay buena compatibilidad de los materiales localmente disponibles en Medellín.

En las aplicaciones realizadas en el LABEST; cabe anotar que el uso de HAC-RMs permite una mejor y más rápida colocación, con menor esfuerzo y operadores, como también ausencia de macro-defectos.

De la aplicación en la fabricación del mobiliario urbano (Expo-Camacol-2008), y hoy ubicado en el Palacio de Exposiciones de la ciudad de Medellín, se puede decir, que se encuentra en perfectas condiciones, sin evidencias de coqueas, manchas o desgaste superficial. Pues es hormigón a la vista sin ningún tipo de acabado adicional.

Una sola prueba para la caracterización del HAC-RM en estado fresco no es suficiente. Por lo tanto se deben determinar qué ensayos serán los encargados de caracterizar el hormigón en estado fresco, dependiendo lógicamente de las condiciones de colocación, aplicación y durabilidad que debe cumplir.

Reconociendo las ventajas del HAC, el interés del sector de la construcción en este material ha crecido de forma significativa en los últimos años, de ahí que se encuentre en la literatura técnica cada vez más información de la aplicación del HAC, para la construcción y rehabilitación de estructuras.

El Grupo de investigación del LABEST, ya hace parte a nivel mundial de un equipo de trabajo para normalizar el uso de los HACs. Pretenden dar una respuesta eficaz a los nuevos retos estructurales, como estructuras fuertemente armadas, formas geométricas complejas, donde las dificultades de compactación pueden originar serios problemas de calidad del hormigón.

El contenido de sólidos en los aditivos sps empleados en el LABEST, en algunos casos es casi el doble de los empleados en Barcelona (España). Por lo que la cantidad de sp necesaria para lograr la alta fluidez (sin segregación) de los HAC-RMs en Medellín, es mucho menor

Con el estudio del estado del arte de los HACs, entre los que se incluye los HAC-RMs, se pone de manifiesto, la gran actividad realizada en los últimos años en el campo del desarrollo de técnicas experimentales con base científica, que permiten ser empleadas tanto para los diseños de mezclas, como para la calidad del hormigón producido.

En el medio de la construcción colombiana existe la necesidad de desarrollar, validar y sistematizar métodos de dosificación para HACs de resistencia media y baja (p.e., entre 30 y 45 MPa).

Pruebas pilotos son necesarias para verificar las prestaciones de los HAC-RMs, verificando su efectividad en producción a nivel industrial.

Es de gran interés verificar los valores de Fluencia y Retracción para los HAC-RM que se desarrollen en Colombia; a fin de proponer un modelo matemático apropiado para su determinación. Pues el buen desempeño y durabilidad de este nuevo tipo de hormigones, debe estar completamente garantizado y validado.

V. BIBLIOGRAFÍA

- [1]. De la Cruz M, C.J., Desarrollo de Hormigones Autocompactables de Resistencia Media para Aplicaciones Estructurales. Tesis Doctoral. Universidad Politècnica de Catalunya. Barcelona., 2006.
- [2]. Bravo, M., “Caracterización y Utilización del Hormigón Autocompactable”. Projecte o Tesina d’Especialitat. Enginyerie de la Construcció. EscolaTècnica Superior d’Enginyers de Camins, Canals I Ports de Barcelona. 2004.
- [3].De la Cruz M, C.J., MANUAL DE LABORATORIOAPLICADO A LA FABRICACIÓN Y DESARROLLO DE HORMIGONES AUTOCOMPACTABLES DE RESISTENCIA MEDIA (HAC-RM). Medellín. 2014.
- [4]. Normas Técnicas Colombianas de la Construcción-NTC- Ministerio de Educación Nacional, 6° Edición., 2006
- [5].Giraldo B, O., “Guía Práctica para el Diseño de Mezclas de Hormigón”. Medellín, 1999.
- [6].ASTM Designation: C 300-91 “Standard Practice for Mechanical Mixing of Hydraulic Cement Pastes and Mortars of Plastic Consistency. 1991.
- [7]. De la Cruz M, C.J., Desarrollo de Hormigones Autocompactables de Resistencia Media (HAC-RMs), en Colombia. Trabajo de Promoción a Profesora Titular. Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Minas. Medellín, Colombia., 2009.