

HAC2018 | V Congreso Iberoamericano de Hormigón Autocompactante y Hormigones Especiales

Valencia, 5 y 6 de Marzo de 2018

Desarrollo de hormigones autocompactables de resistencia media (HAC-RM) en Colombia

C.J. de la Cruz M. ⁽¹⁾ y A.F. Tamayo G. ⁽²⁾

⁽¹⁾ Ph.D. Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Minas - Medellín, Colombia.

⁽²⁾ Estudiante de Ingeniería Civil, Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Minas - Medellín, Colombia.

DOI: <http://dx.doi.org/10.4995/HAC2018.2018.5548>

RESUMEN

La necesidad de mayor durabilidad en las estructuras y por tanto, un material más denso y compacto, amigable con el medio ambiente, con menores costes de mantenimiento y protección, ha encontrado con el desarrollo del Hormigón Autocompactable (HAC) en el mundo, una excelente alternativa. El uso del HAC, arroja resultados convincentes, evidenciando eficiencia, rapidez, seguridad, sostenibilidad y economía en procesos constructivos y mejora del entorno laboral. Es así, como la construcción civil en *Colombia*, demanda la implementación de HACs de Resistencia Media-Baja (HAC-RM, 30MPa-45MPa), convirtiéndose en la primera opción que garantiza un hormigón fluido (H.F); sin problemas de segregación o exudación y principalmente por sus propiedades en estado fresco. De ahí que en *Colombia* y en el *Laboratorio de Estructuras (LABEST)* de la *Facultad de Minas* de la *Universidad Nacional de Colombia-Sede Medellín*, se promoviera el desarrollo del HAC-RM, con excelentes resultados validados para firmas como *ACCIONA de España*, *Expo-Camacol* en *Colombia*, entre otros; encontrándose hoy por hoy, en protección vía patente en *Superintendencia de Industria y Comercio*.

PALABRAS CLAVE: fluidez, hormigón, autocompactable, segregación, exudación.

1.- INTRODUCCIÓN

El HAC es extremadamente fluido y estable, se compacta por gravedad (cero (0) vibración), sin compactación externa; fluye hasta nivelarse sin segregación de sus componentes, ni bloqueo del material al pasar por el refuerzo. Debido a la necesidad de durabilidad de las estructuras y por tanto, un material más denso y compacto, más resistente al ataque del medio ambiente, y a su vez, con menores costos de mantenimiento y protección; con resistencias entre 30MPa y 45MPa, se han desarrollado los HAC-RM en el mundo [1]. Éste incrementa el rendimiento y efectividad en la fase de producción, facilita su transporte en estado fresco, optimiza el llenado de formaletas, reduce el ruido durante la colocación y facilita procesos sistemáticos en la prefabricación, entre otros. En el mundo, es una alternativa segura, eficiente y rápida, que mejora el entorno laboral y reduce costos del

proceso constructivo. El HAC-RM difiere del hormigón convencional (HC) y hormigón fluido (H.F), por sus propiedades en estado fresco; determinadas en laboratorio y obra, por ensayos que lo caracterizan cuantitativamente y cualitativamente. El HAC-RM en Colombia, se desarrolló en el *Laboratorio de Estructuras (LABEST)* de la *Universidad Nacional de Colombia-Sede Medellín*, con excelentes resultados validados para firmas como *ACCIONA de España*, *Expo-Camacol* en Colombia, entre otros; encontrándose hoy por hoy, en protección vía patente en *Superintendencia de Industria y Comercio* (N°15-171208) [1], [2], [3].

2.- GENERALIDADES

Una de las propiedades más importantes del HAC-RM, es la resistencia a la segregación, que está gobernada por la viscosidad y cohesión de la mezcla; otorgando al hormigón, la homogeneidad necesaria durante el transporte, colocación y puesta en obra. De ahí que sea necesario garantizar para los HACs-RM, la calidad de los componentes, tipo de mezcla, colocación (bombeo) y tipo de vibración [3].

3.- DETALLES EXPERIMENTALES

El HAC y HAC-RM, utilizan en su composición básica los mismos materiales que un HC (agua, cemento, áridos, material fino), además de superplastificantes de última generación (sp) y agentes modificadores de la viscosidad (AMVs). Los HACs-RM, se han obtenido sólo con el uso de aditivos sps y sin el uso de adiciones. La metodología de dosificación de HACs-RM colombianos se describe a continuación [1], [3], [4], [5], [6], [7], [8]:

- Determinar la dosis de aditivo sp en la pasta y mortero, con componentes localmente disponibles usando el Cono de Marsh y relación agua/cemento (A/C) entre 0,30 y 0,60.
- Con el ensayo Mini-Slump, se fija A/C, considerando una pasta de fluidez alta y cohesión moderada. Separadamente, se obtiene la relación arena/grava (secos), dando lugar al mínimo contenido de vacíos y así fabricar hormigones con distintos volúmenes de pasta o mortero (sp y relación finos/cemento determinados inicialmente).
- Elegir la mezcla con contenido mínimo de pasta o mortero y que cumple requisitos de autocompactabilidad y resistencia, determinados por ensayos sobre el hormigón fresco.

En el LABEST, los criterios de diseño fueron [1], [8]:

1. Extensión de Flujo ó Escurrimiento entre 65 y 75 cm, con T50 de dos (2) a ocho (8) s.
2. Tiempo de descarga del HAC-RM, en el ensayo Embudo-V, de dos (2) a cinco (5) s.
3. CB para el ensayo Anillo de Barras o Extensión con Anillo de 0,8; y una diferencia de diámetro final (D_f) \leq cinco (5) cm con el D_f del ensayo de Escurrimiento.

El aspecto en estado fresco del HAC y HAC-RM, es igual, con los mismos criterios de diseño. Los HACs-RM, se usaron en vigas y columnas del mismo laboratorio y en prefabricados, como propuesta para mobiliario urbano en Colombia [7].

3.1.- Fase mortero

Ésta fase, compuesta por cemento, agua, arena y aditivo, es imprescindible para el diseño del HAC-RM, para determinar la compatibilidad entre el sp y la pasta de cemento y, la

cantidad óptima de sp para mantener las condiciones de autocompactabilidad en el hormigón, sin aumentar los costes. Ésta fase se determina con el ensayo Cono de Marsh o Fluidez, normalizado por la ASTM 939 [1], [3], [7], [8]; que junto con el ensayo Mini Slump, determinan la consistencia de la mezcla. Se debe definir la resistencia y A/C, con valores por debajo de 0,6; para garantizar que la fluidez no dependa de A/C altas.

3.1.1.- Resistencia y Relación A/C

La resistencia mecánica del hormigón endurecido, debe estar por debajo de 45MPa (resistencia media-baja en Colombia). En éste estado, no interesa si es autocompactable o no, comparado con un HC de la misma resistencia. Se define A/C, así Ec.(1), [5]:

$$A/C = \frac{K_1}{f'_{cr} * \ln K_2} \quad (1)$$

K_1 , K_2 : Factores dependientes de la resistencia a la compresión del cemento (NTC-220) [6] y son necesarios para obtener A/C. Se muestran en la Tabla 1.

Tabla 1. Valores para K_1 y K_2 según la resistencia del cemento [7].

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

3.1.2.- Definición de mortero

Los morteros se prepararon con 1000g de cemento, A/C=0,5 y se tuvo en cuenta el porcentaje de sólidos de aditivos sp_s en el cálculo del agua de amasado [1].

3.1.3.- Ensayo con el Cono de Marsh

La optimización del mortero es prioritaria para el diseño del HAC-RM y se basa en la medición del tiempo de fluidez a través del *Cono de Marsh*, como se presenta en la Fotografía 1. Existe un punto, a partir del cual, el aumento en la dosis de sp no aumenta la fluidez; por lo que se define como “*Punto de saturación*” del mortero [8].



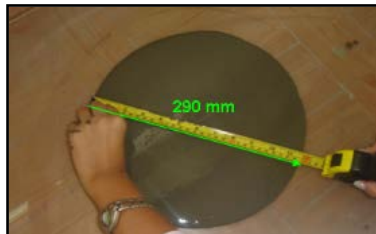
Fotografía 1. Ensayo de fluidez a través del Cono de Marsh

3.1.4.- Determinación cuantitativa del punto de saturación

Al variar los contenidos de sp del mortero, se puede determinar el punto de saturación, como se presenta en las figuras 1,2 y 3; que según la curva Log (tiempo[s]) vs. sp/c, permite obtener un ángulo de $140 \pm 10^\circ$, según De La Cruz (2006) [1] y Gomes (2002) [9].

3.1.5.- Ensayo en el Mini Slump

Se determina el diámetro final como se presenta en la Fotografía 2; después de desmoldar y debe estar entre 280 ± 20 mm [1], [2].



Fotografía 2. Diámetro Final

3.1.6.- Toma de datos en el LABEST

Se presentan tablas y figuras correspondientes a la definición de puntos de saturación con tres (3) tipos de aditivos sp, con diferentes porcentajes de sólidos, disponibles en Medellín, obtenidos con el Cono de Marsh y Mini Slump, En la Tabla 2 y Fig. 1, están los resultados del punto de saturación con un aditivo sp con 36% de contenido de sólidos [7].

Tabla 2. Optimización del sp con 36% de sólidos.

Aditivo (%)	Sólido sp (g)	Líquido sp (g)	Agua (g)	Tiempo Marsh (s)	Log(TM _{Marsh})	Diámetro (mm)
0,045	1,30	0,85	399,20	7,39	0,87	290
0,050	1,40	0,90	399,10	7,06	0,85	315
0,060	1,70	1,10	398,90	6,95	0,84	393
0,075	2,10	1,35	398,70	6,73	0,83	396
0,085	2,40	1,55	398,50	5,92	0,77	420

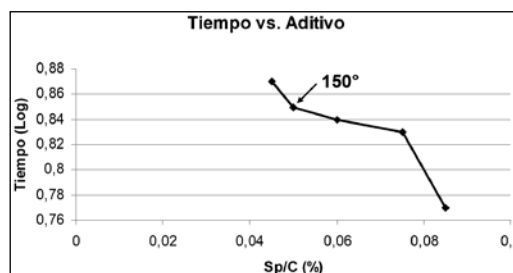


Figura 1. Punto de Saturación (sp 36% de sólidos).

En la Tabla 3 y Fig. 2 están los resultados para un aditivo sp con 32% de sólidos [7].

Tabla 3. Optimización del sp con el 32% de sólidos.

Aditivo (%)	Sólido sp (g)	Líquido sp (g)	Agua (g)	Tiempo Marsh (s)	Log(T Marsh)	Diámetro (mm)
0,050	1,60	1,10	398,90	11,71	1,07	190
0,060	1,90	1,30	398,70	10,70	1,03	205
0,070	2,50	1,70	398,30	9,07	0,96	265
0,095	3,00	2,05	398,00	8,82	0,95	240
0,100	3,10	2,10	397,90	8,48	0,93	235

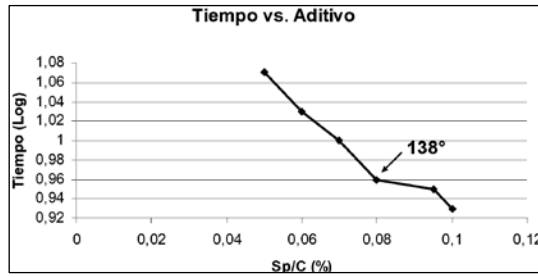


Figura 2. Punto de Saturación (sp 32% de sólidos).

En la Tabla 4 y en la Figura 3, están los resultados para un aditivo sp 28% de sólidos [7], y se puede observar el ángulo de 146°.

Tabla 4. Optimización del sp con el 28% de sólidos.

Aditivo (%)	Sólido sp (g)	Líquido sp (g)	Agua (g)	Tiempo Marsh (s)	Log(T Marsh)	Diámetro (mm)
0,60	2,14	1,54	398,46	10,70	1,03	250
0,07	2,50	1,80	398,20	10,10	1,00	260
0,08	2,86	2,06	397,94	9,10	0,96	270
0,09	3,21	2,31	397,69	8,90	0,95	280
0,10	3,39	2,44	397,56	9,10	0,96	280

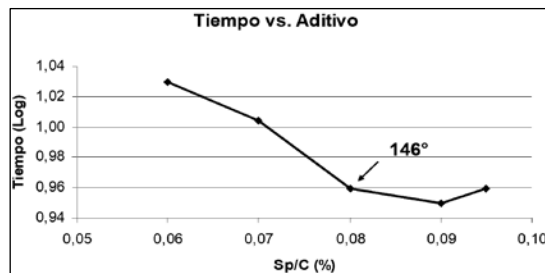


Figura 3. Punto de Saturación (sp 28% de sólidos).




Se diseñó el HAC-RM usando el aditivo sp con 28% de contenido de sólidos; pues el mortero presentó mejor consistencia. Para definir de manera contundente el mejor HAC-RM, es imprescindible definir el *Esqueleto Granular* [1], [3], [7], [8].

3.2- Esqueleto granular

3.2.1.- Estabilización granulométrica

La estabilidad del esqueleto granular depende de la distribución de diferentes tamaños y forma de las partículas, peso volumétrico, fricción interna y cohesión. En la Tabla 5, se presentan tres (3) estados físicos del esqueleto granular y algunas propiedades físicas [8].

Tabla 5. Características del Esqueleto Granular.

<i>Características</i>	
Agregados sin finos. Contacto grano a grano. Peso volumétrico variable, se dificulta su compactación.	
Agregados con finos suficientes para una alta densidad. Contacto grano a grano, incremento en la resistencia, mayor peso volumétrico. Moderadamente difícil de compactar. Éste estado disminuye su peso volumétrico.	
Agregados con una gran cantidad de finos. No hay contacto grano a grano, encontrándose dentro de una matriz de finos. No se dificulta su compactación.	

Con una granulometría continua y agregados equidimensionales, Fuller propone: Ec.(2), [8]

$$P = 100 * \frac{(d)^n}{(D)^n} \quad (2)$$

Donde:

P: porcentaje en peso de un cierto tamaño *d*

d: cierto tamaño granulométrico

D: tamaño máximo del esqueleto a evaluar

n: exponente que depende de la forma de la curva granulométrica

Si $n=0,5$ se tiene la mejor distribución de tamaños y por ende el máximo peso volumétrico. Si el tamaño máximo de las partículas es $\frac{3}{4}$ ", entonces de acuerdo con Ec.(2), se tendría que por la *malla N° 200* debería pasar 6,2%. Sin embargo, debido a que en la práctica los agregados no se acomodan con una perfecta distribución de tamaños, sino que tienden a formar vacíos, se hace necesario ajustar la granulometría [10]. Dichos ajustes consisten en incrementar el contenido de finos del esqueleto granular, para obtener el máximo peso volumétrico.

3.2.1.- Optimización del esqueleto granular

La determinación del esqueleto granular resulta ser la fase más importante de la dosificación del HAC-RM, pues minimiza la relación de vacíos de los materiales a emplear.

Para la optimización del esqueleto granular, se ajustó la granulometría de los materiales, a la curva teórica de máxima densidad de Fuller (Fig. 4).

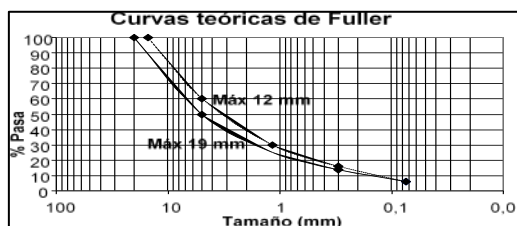


Figura 4. Curvas teóricas de máxima densidad de Fuller [8].

Los áridos empleados fueron locales y sus características físicas cumplen las especificaciones colombianas [6]. Se definieron para efectos de trabajo, como árido fino-medio (arena de 2-5 mm); y como árido grueso, árido grueso de tamaño máximo 3/8" (5-12 mm) y árido grueso de tamaño máximo 3/4" (12-19 mm). En la Tabla 6, se presentan los resultados de los ensayos físicos necesarios para dosificar el HAC-RM en el LABEST y en la Fig. 5, se presentan las curvas granulométricas de los áridos empleados.

Tabla 6. Ensayos Físicos de los Áridos.

Propiedad	Arena (2-5mm)	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

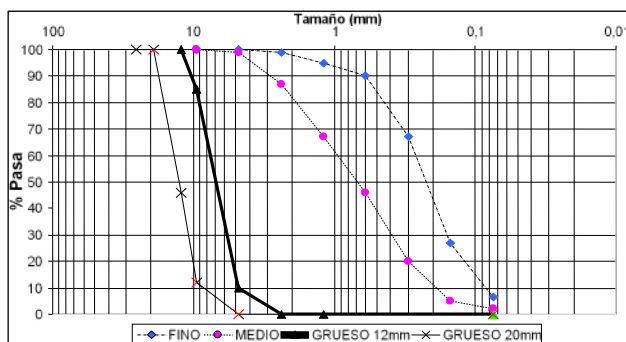


Figura 5. Curva Granulométrica de cuatro (4) materiales de cantera

Con porcentajes de áridos gruesos 3/4" como tamaño máximo y, con finos N° 4, como tamaño nominal empleados para este ensayo; se logró minimizar el volumen de vacíos hasta 34%. Lo anterior implica altos contenidos de cemento en la fase mortero del diseño y en el volumen de pasta de la mezcla definitiva. Por lo tanto, se decidió realizar el análisis granulométrico para este punto de máxima compacidad [1], [7], [8] y se superpuso con la curva teórica de máxima densidad de Fuller, donde se observó que el material disponible, tenía un bajo contenido de finos, como se presentan en las Fig. 6. y 7 respectivamente.

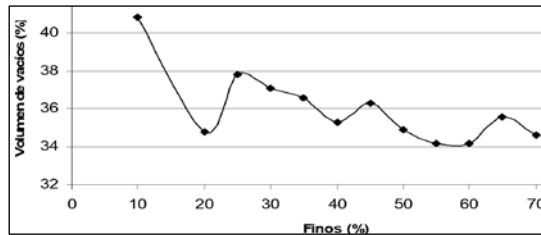


Figura 6. Máxima Compacidad con dos (2) materiales.

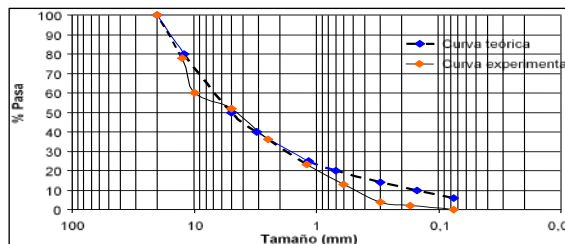


Figura 7. Superposición Curva Teórica de Fuller y Curva Experimental (dos (2) materiales).

La idealización de la curva en el LABEST, permitió una relación de vacíos del 28%; una vez las condiciones de tamizado y mezcla de áridos, se realiza de manera controlada (situación que se hace más compleja industrialmente o en cantera). Luego se realizó el ensayo de máxima compacidad con un material más fino (0-2mm), con los porcentajes de cada material granular disponible; que para efectos de trabajo, se han discriminado como Finos, Medios y Gruesos. Finalmente con esta combinación, se logró una relación de vacíos de 29,3%, como se observa en la Fig. 8 y Fig. 9.

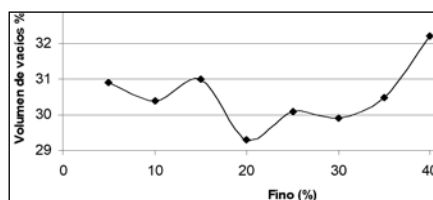


Figura 8. Máxima Compacidad con tres (3) materiales.

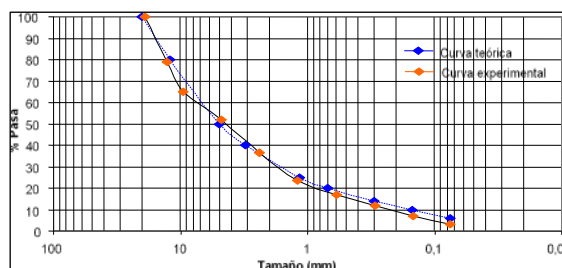


Figura 9. Superposición Curva Teórica de Fuller y Curva Experimental (tres (3) materiales).

En la Fotografía 3, se puede observar el aspecto del HAC-RM, en la prueba de *Escurrecimiento*.



Fotografía 3. Prueba de *Escurrecimiento* en el LABEST

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

La Tabla 7, se presenta tres (3) de las mejores dosificaciones de prueba del HAC-RM con *Cemento Portland Tipo I*. La dosificación tres (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* (*TECNOVA* y *Expo-Camacol*, 2008) [7].

Tabla 7. Mezclas y resultados de los hormigones HAC-RM, en el LABEST.

<i>Dosificaciones</i>		1	2	3
Temperatura °C		17	19	17
% de sólido del HAC.RM con sp		32	36	28
% de pasta (Densidad de la pasta 1750kg/m ³)		35	36,5	37
<i>Composición(kg/m³)</i>				
Pasta	Cemento Tipo 1	388	431	447
	Agua añadida	250	273	283
Esqueleto granular	Arena 0-2mm	537	538	539
	Arena 0-5mm	586	532	510
	Grava 5-12mm	601	546	524
<i>Resultados de los ensayos</i>				
Escurrecimiento	T ₅₀ (s)	2,00	1,50	2,00
	Df (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.

5.- CONCLUSIONES

- Se comprobó que la metodología propuesta por *De La Cruz* (2006) [1], es de fácil aplicación y permite obtener resultados acordes con la reglamentación establecida en *Colombia* y cumple con las expectativas de seguridad, funcionalidad y economía.

- La infraestructura adoptada por el LABEST, ofrece una herramienta eficaz y contundente para las prácticas docentes y servicios de *Extensión e Investigación*; para la implementación de los HACs-RM en *Colombia*.
- La caracterización de los materiales utilizados para la dosificación de los HACs-RM [1], define la aplicabilidad de los mismos, de una manera eficiente.
- La aplicabilidad de los HACs-RM en *Medellín, Colombia*; sentó un precedente de la actualidad de los hormigones de alta competitividad en el país.
- La apropiación y aplicación de la metodología propuesta por *De La Cruz (2006)* [1], para la fabricación de HACs-RM; ofrece una alternativa eficaz, actualizada, eficiente y de última generación, en espacios de formación académica y profesional, ya implementadas en otros países.
- Se comprobó en las aplicaciones realizadas, que los tiempos de ejecución y costos de un metro cúbico de HAC-RM, puesto en obra, tiene una reducción de hasta un 40% y 16% respectivamente.

REFERENCIAS

- [1] De La Cruz, C. Hormigones Autocompactables de Resistencia Media para Aplicaciones Estructurales. Tesis Doctoral, 2006.
- [2] De La Cruz et al. Ensayos a Cortante de Vigas de Hormigón Estructural. Revista DYNA N° 159, (76). pp. 36-41, 2009.
- [3] De La Cruz et al. Evaluación de la Retracción y la Fluencia en el Hormigón Autocompactable de Resistencia M. Revista DYNA N° 175, (Año 79). pp. 120-127, 2012.
- [4] Ortiz, J. Estudio experimental sobre la influencia de la temperatura ambiental en la resistencia del hormigón preparado. Tesis Doctoral, 2005.
- [5] Giraldo B. O. Guía Práctica para el Diseño de Mezclas de Hormigón. Centro de Publicaciones de la Universidad Nacional. pág. 24, 1988.
- [6] Normas Técnicas Colombianas para la Construcción. ICONTEC. Bogotá. Págs. 383
- [7] De La Cruz, C. Desarrollo de HAC-RMs, en Colombia. Trabajo de Promoción a Profesora Titular. Universidad Nacional de Colombia. Medellín, 2009.
- [8] Herrera y Úsuga. Caracterización de Hormigones Autocompactables en Colombia. T.D.G., 2009.
- [9] Gomes, P. Optimization and Characterization of High-Strength Self-Compacting Concrete. Tesis Doctoral, Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona, 139 p., 2002.
- [10] Ortiz L, J. “Análisis Granulométricos a los Áridos”. Tesis Doctoral. Universidad Politècnica de Catalunya. Barcelona, 2005.