
LA ROBUSTEZ EN EL HORMIGÓN AUTOCOMPACTANTE

Carlos Bañuls Martínez

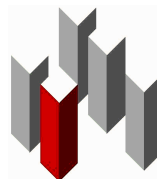
Proyecto Final de Grado

Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Edificación

Tutor: Luis V. García Ballester
José R. Albiol Ibáñez



Universidad
Politécnica de
Valencia



Escuela Técnica Superior
De Ingeniería de Edificación

Valencia 2011

ÍNDICE

1. Objetivos	6
2. Estado del arte	8
2.1. Introducción	9
2.2. Reseña histórica	9
2.3. Marco normativo	11
2.4. Principales ventajas de los HAC	13
2.5. Tipificación de los HAC	13
2.6. Materiales componentes de los HAC	15
2.6.1. Áridos	15
2.6.1.1. Humedad y densidad	15
2.6.1.2. Textura superficial	16
2.6.1.3. Porosidad	16
2.6.1.4. Forma	16
2.6.1.5. Ensayo de los áridos	16
2.6.1.6. Tamaño de los áridos	17
2.6.1.7. Análisis granulométrico de los áridos	18
2.6.2. Agua	18
2.6.3. Aditivos	19
2.6.3.1. Aditivo reductor de agua de alta efectividad/superplastificante	19
2.6.3.2. Agente modulador de la viscosidad (AMV)	20
2.6.4. Cemento	20
2.6.4.1. Componentes del cemento portland	21
2.6.4.2. Hidratación del cemento	21
2.6.4.3. Propiedades de los principales compuestos hidratados ..	22
2.6.5. Adiciones	23
2.6.5.1. Finos (fillers)	23
2.6.5.2. Cenizas volantes	24
2.6.5.3. Humo de sílice	24
2.6.5.4. Escoria granulada de alto horno	24
2.6.5.5. Otras adiciones	24
2.7. Propiedades de los HAC en estado fresco	24
2.7.1. Reología	25
2.7.2. Capacidad de relleno	25
2.7.3. Capacidad de paso	25
2.7.4. Resistencia a la segregación	25
2.7.5. Fiabilidad	25
2.7.6. Tiempo abierto	26
2.8. Propiedades de los HAC en estado endurecido	26
2.8.1. Propiedades físicas	26
2.8.1.1. Permeabilidad	26
2.8.1.2. Densidad	27
2.8.2. Propiedades mecánicas	27

2.8.2.1.	Resistencia a compresión.....	27
2.8.2.2.	Resistencia a tracción indirecta	27
2.8.3.	Propiedades reológicas	28
2.8.3.1.	Modulo de elasticidad	28
2.8.3.2.	Retracción	28
2.8.3.3.	Fluencia	29
2.9.	Durabilidad de los HAC	30
2.9.1.	Microestructura e hidratación del HAC	30
2.9.2.	Mecanismos de transporte	32
2.9.3.	Mecanismos de degradación	33
2.9.3.1.	Carbonatación	33
2.9.3.2.	Penetración del ión cloruro	33
2.9.3.3.	Ataque por sulfatos	34
2.9.3.4.	Ataque por ácidos y álcalis	35
2.9.3.5.	Retracción árido y álcali	35
2.9.3.6.	Hielo-deshielo	35
2.9.4.	Resistencia al fuego	36
3.	Programa experimental	37
3.1.	Introducción	38
3.2.	Primera toma de contacto	38
3.2.1.	Obtención de los materiales	38
3.2.2.	Análisis granulométrico	40
3.3.	Ajustes en la dosificación de partida	43
3.4.	Fases a seguir	44
3.5.	Materiales empleados	44
3.5.1.	Agua	44
3.5.2.	Áridos	44
3.5.3.	Cemento	44
3.5.4.	Aditivos	45
4.	Metodología de ensayo	46
4.1.	Introducción	47
4.2.	Desarrollo de la metodología	47
4.2.1.	Explicación para la elaboración de una amasada	47
4.2.2.	Explicación para romper a compresión las probetas a 28 d	52
5.	Ensayos, resultados y análisis	54
5.1.	Introducción	55
5.2.	Áridos	55
5.2.1.	Análisis de las arenas 0/4 y 0/5	59
5.2.2.	Análisis de la grava 6/12	61
5.2.3.	Composición del árido	61
5.3.	El HAC en estado fresco	64
5.3.1.	Ensayos, resultados y análisis iniciales	64
5.3.1.1.	1ª Serie de amasadas	64
5.3.1.2.	2ª Serie de amasadas	66
5.3.1.3.	3ª Serie de amasadas	67
5.3.1.4.	Serie de repetición de amasadas	69
5.3.2.	Ensayos, resultados y análisis corregidos	69
5.3.2.1.	1ª Serie de amasadas corregidas	69
5.3.2.2.	2ª Serie de amasadas corregidas	77
5.3.2.3.	3ª Serie de amasadas	83
5.3.3.	Media de los resultados finales corregidos	89

5.3.3.1. Ensayo de escurrimiento	90
5.3.3.2. Ensayo del anillo japonés	92
5.3.3.3. Ensayo del embudo en V	96
5.3.4. Comparación entre los resultados corregidos y sin corregir de los diámetros del ensayo de escurrimiento	98
5.4. El HAC en estado endurecido	99
5.4.1. Rotura a compresión tras 28 días	99
5.4.1.1. 1ª Serie de amasadas	99
5.4.1.2. 2ª Serie de amasadas	100
6. Conclusiones	102
7. Bibliografía	104
Anejos	107
Anejo 1. Ensayos para el HAC en estado fresco	108
Anejo 2. Ensayos para el HAC en estado endurecido	116
Anejo 3. Estadillos con los resultados de los ensayos	118

1. OBJETIVOS

Como objetivos y a modo de introducción, diremos que el presente proyecto, se a realizado para determinar la robustez que presenta un hormigón autocompactante con unas características y una dosificación determinadas.

Cuando utilizamos el termino “robustez” en un hormigón autocompactante hacemos referencia a la capacidad que tiene este, para mantener las propiedades que lo caracterizan lo mas inalterablemente posibles, tras sufrir pequeñas variaciones tanto a nivel de la dosificación de los diferentes materiales que lo componen, como a nivel de que estos materiales se vean sensiblemente alterados. Como pudiera ser por ejemplo los áridos, que tras sufrir cambios de temperatura pudiesen ver alterada su humedad.

Cabe suponer que los materiales componentes que se utilizan para el estudio de la robustez en un determinado HAC, proveerán siempre del mismo lugar, es decir, los áridos que se utilizan serán siempre de la misma cantera, los aditivos serán siempre de la misma casa comercial, el cemento será siempre del mismo tipo y de la misma casa comercial. Todo ello es evidente, pues si se cambiara radicalmente uno de sus componentes, esta claro que los resultados que se obtendrían se dispersarían para una misma dosificación, por lo que cabria buscar la dosificación que mas se ajustara a los nuevos componentes para obtener los mejores resultados posibles.

Cabe decir que la metodología principal que se utiliza para determinar la robustez del presente HAC, es la de realizar pequeñas variaciones en el porcentaje de agua de la dosificación inicial. Dichas variaciones van desde unos incrementos de agua de + 1,5%, + 3%, + 4,5% y + 6% sobre la cantidad de agua inicial, a sus análogas negativas, - 1,5%, - 3%, - 4,5% y - 6%. Estas variaciones del agua en la dosificación inicial suponen también variaciones en la dosificación de los áridos, puesto que al poseer estos humedad (es decir H₂O), si variamos la cantidad de agua de nuestra dosificación inicial, cabria añadir mas o menos cantidad de árido respecto a lo inicialmente calculado. Es decir, a mas cantidad de agua, menos cantidad de árido y viceversa. Los componentes que siempre se mantendrán en las mismas cantidades serán el cemento, y los aditivos, tanto el superplastificante como el AMV, los cuales van en proporción de la cantidad de cemento a utilizar.

Por ultimo, y una vez expuesto todo lo anterior, diremos que el objetivo principal de esta investigación es estudiar las propiedades en estado fresco y endurecido de un hormigón autocompactane realizando pequeñas variaciones respecto a una dosificación inicial dada. Para ello realizaremos diferentes ensayos (escurrimiento, anillo japonés y embudo en V) en estado fresco del hormigón, y en estado endurecido romperemos las probetas a 28 días de edad.

2. ESTADO DEL ARTE

2.1. INTRODUCCIÓN

Según la EHE-08 el hormigón autocompactante se define como:

Aquel hormigón que, como consecuencia de una dosificación estudiada y del empleo de aditivos superplastificantes específicos, se compacta por la acción de su propio peso, sin necesidad de energía de vibración ni de cualquier otro método de compactación, no presentando segregación, bloqueo de árido grueso, sangrado, ni exudación de la lechada.

Según las directrices europeas para el hormigón autocompactable, se define como:

Un tipo innovador de hormigón que no requiere vibración alguna para su colocación y compactación. El HAC fluye por su propio peso, ocupando completamente la forma del encofrado y alcanza una plena compactación, aún en presencia de una alta densidad de armaduras. Este hormigón endurecido es denso, homogéneo y tiene las mismas propiedades estructurales y una vida útil igual a la del hormigón convencional compactado por vibración.

Y según artículos importantes como puede ser el de la empresa Cemex España, se define como:

Un producto innovador que posee la capacidad de fluir de manera libre en estado fresco y de no necesitar ningún tipo de compactación en su colocación. Por la propia compactación gravitatoria es capaz de ocupar todos los rincones del encofrado, incluso en las partes horizontales, asegurándose de esta manera la homogeneidad y la buena calidad de la estructura.

La tecnología del hormigón autocompactante ha sido posible gracias al desarrollo que se ha producido en los aditivos superplastificantes en los últimos años.

En vista de estas definiciones, esta claro que todas ellas coinciden principalmente en los mismos aspectos que son:

- No requieren vibración, habilidad de fluir sin ayuda externa y llenar el encofrado
- Uso de aditivos superplastificantes
- Homogeneidad tanto en estado fresco como endurecido
- Presentan las mismas propiedades que los hormigones convencionales
- Uso de AMV para controlar mejor la segregación

2.2. RESEÑA HISTÓRICA

El hormigón autocompactante inicia su desarrollo en Japón, a mediados de los años 80, bajo la dirección del Profesor Okamura, de la Universidad de Tokio (Okamura, 1997). Previamente recibió el nombre de *High Performance Concrete* pasándose a denominar posteriormente Hormigón Autocompactante (*Self-Compacting Concrete*). El

objetivo del mismo era buscar un hormigón de calidad, compacto y durable para estructuras fuertemente armadas donde el proceso de vibración era complicado. Además, se pretendía encontrar un hormigón que no dependiese de la mano de obra en el proceso de ejecución porque, durante varios años, la calidad de las obras estaba disminuyendo debido a una compactación inadecuada por falta de mano de obra cualificada.

A partir de entonces, Ozawa y Maekawa (Okamura, 1997) llevaron importantes investigaciones sobre este tipo de hormigón en la Universidad de Tokio. En 1988, se realizó con éxito el primer prototipo de hormigón autocompactante. Este prototipo funcionó satisfactoriamente desde el punto de vista de la retracción, calor de hidratación, densidad y otras propiedades (Okamura et al., 1996).

A partir de entonces, el hormigón autocompactante se ha puesto en práctica en numerosas obras y en la industria del prefabricado. Se ha llevado a cabo una intensa investigación tanto en instituciones como en empresas a nivel internacional y, debido a este creciente interés científico y técnico, se han organizado congresos y simposios internacionales para el estudio de este hormigón especial, entre los que destacan los siguientes:

- En la *Segunda Conferencia del Pacífico y Este de Asia*, organizado por Ingeniería Estructural y Construcción (EASEC-2), celebrada en 1989, se presentó la primera ponencia sobre hormigón autocompactante realizada por Ozawa.

- En la *Conferencia Internacional de CANMET y ACI*, celebrada en 1992, se presentó el hormigón autocompactante.

- El RILEM formó un comité para el estudio del hormigón autocompactante en 1997. • Creación del proyecto *BriteEuram BE96-3801* dentro del Programa Marco Europeo en 1997.

- *Primer Simposio Internacional sobre hormigón autocompactante* organizado por RILEM celebrado en Estocolmo en 1999.

-4-Dosificación, propiedades y durabilidad en hormigón autocompactante para edificación.

- *Segundo Simposio Internacional sobre hormigón autocompactante* organizado por RILEM celebrado en Tokio en 2001.

- *Primera Conferencia Norteamericana sobre el Diseño y Aplicación del Hormigón Autocompactante*, celebrada en Chicago en 2002.

- *Tercer Simposio Internacional sobre hormigón autocompactante* organizado por RILEM celebrado en Islandia en 2003.

- *Segunda Conferencia Norteamericana sobre Hormigón Autocompactante*, celebrada en Chicago en 2005.
- *Primer Simposio Internacional sobre diseño, prestaciones y uso del hormigón autocompactante* organizado por RILEM celebrado en China en 2005.
- *Quinto Simposio Internacional sobre hormigón autocompactante* organizado por RILEM celebrado en Bélgica en 2007.
- *Primer Congreso Español sobre Hormigón Autocompactante*, celebrado en Valencia en 2008.
- *Tercera Conferencia Norteamericana sobre Hormigón Autocompactante*, celebrada en Chicago en 2008.

2.3. MARCO NORMATIVO

Actualmente no hay normativa específica para el HAC, aunque en los últimos años varios organismos han publicado recomendaciones de uso.

Es de destacar las normas UNE publicadas en el año 2007 sobre ensayos de caracterización del hormigón autocompactante en estado fresco así como el Anejo que incorpora la EHE vigente de recomendaciones para la utilización del HAC.

Antes de la publicación de las normas anteriores, se han utilizado las normas italianas, publicadas en marzo de 2003 y que son:

- UNI 11040-Marzo 2003. Especificaciones, características y control.
- UNI 11041-Marzo 2003. Determinación de la trabajabilidad y del tiempo de escurrimiento.
- UNI 11042-Marzo 2003. Determinación del tiempo de flujo en embudo.
- UNI 11043-Marzo 2003. Determinación del escurrimiento por confinamiento en un recipiente en L.

La normativa existente es:

- La reciente Instrucción Española de Hormigón Estructural (EHE-08) aprobada en el Real Decreto 1247/2008 de 18 de julio, incluye el Anejo 17 que es específico para la utilización del hormigón autocompactante.
- En febrero de 2007, AENOR publicó las cuatro normas UNE existentes de ensayos para la caracterización del comportamiento en estado fresco del hormigón autocompactante y que son las siguientes:

- UNE 83361:2007. Hormigón autocompactante. Caracterización de la fluidez. Ensayo de escurrimiento.
- UNE 83362:2007. Hormigón autocompactante. Caracterización de la fluidez en presencia de barras. Ensayo del escurrimiento con el anillo japonés.
- UNE 83363:2007. Hormigón autocompactante. Caracterización de la fluidez en presencia de barras. Método de la caja en L.
- UNE 83364:2007. Hormigón autocompactante. Determinación del tiempo de flujo. Ensayo del embudo en V.
- En la actualidad, existen diversas guías o recomendaciones que han publicado diversos organismos entre las que destacan las siguientes:
 - *Durability of Self-Compacting Concrete*. State of the Art Report of RILEM Technical Committee 205-SCC (De Schutter et al., 2007).
 - *Self-Consolidating Concrete*. American Concrete Institute (ACI) 237R-07. (ACI, 2007).
 - *Guía Práctica para la Utilización del Hormigón Autocompactante*. Instituto Español del Cementos y sus Aplicaciones (IECA) (Fernández et al., 2005).
 - *Guía Interna para el uso del Hormigón Autocompactante en hormigón prefabricado/pretensado*. Instituto Americano de Hormigón Prefabricado (PCI) (PCI, 2003).
 - *Especificaciones y Directrices para Hormigón Autocompactable*. Federación Europea dedicada a sistemas específicos de hormigón y productos químicos especializados para la construcción (EFNARC) (EFNARC, 2002).
 - *Hormigón Autocompactable: Recomendaciones Provisionales*. Asociación Francesa de Ingenieros Civiles (AFGC) (AFGC, 2002).
 - *Self-Compacting Concrete*. State of the Art Report of RILEM Technical Committee 174-SCC (Skarendahl et al., 2000).

Es importante mencionar que el HAC tiene que cumplir con las normativas vigentes aplicables al hormigón convencional. Las directrices arriba indicadas sirven sólo como guías complementarias.

2.4. PRINCIPALES VENTAJAS DE LOS HAC

Es evidente que la principal ventaja de este tipo de hormigón es que no necesitan vibrado, ello supone:

- A pesar de tener un coste de material mayor, se ve favorecido en la reducción de la mano de obra y equipos necesarios, debido a la elevada trabajabilidad que posee durante su colocación.
- Reducción del plazo de ejecución debido a su alta productividad.
- Se produce una mejora en la calidad del trabajo de los operarios, que no se ven obligados a acceder a puntos complicados para vibrar el hormigón. Se reducen los riesgos laborales relacionados con estos trabajos.
- Se mejora el impacto ambiental de la obra sobre el entorno, especialmente en entornos urbanos, al reducirse el ruido de vibrado.
- Facilita el hormigonado de estructuras más complejas o densamente armadas creando una mayor disposición de puntos de hormigonado. De esta manera se pueden diseñar elementos arquitectónicos y estructurales más complejos.
- Es más rentable cuando se considera el coste total de la obra.
- Se mejoran los acabados.

2.5. TIPIFICACIÓN DE LOS HAC

La tipificación de los hormigones autocompactantes es análoga a la de los hormigones de compactación convencional, sin más que utilizar como indicativo C de la consistencia las siglas AC, (como, por ejemplo, HA-35/AC/20/IIIa), de acuerdo con la siguiente expresión.

T-R/AC/TM/A

Siendo:

- T, el tipo de hormigón armado, en masa o pretensado
- R, la característica resistente
- TM, el tamaño máximo del árido
- A, el tipo de ambiente al que esta sometido

Alternativamente, se podrá definir la autocompactabilidad mediante la combinación de las clases correspondientes al escurrimiento (AC-E), viscosidad (AC-V) y resistencia al bloqueo (AC-RB), de acuerdo con la siguiente expresión:

T-R/(AC-E+AC-V+AC-RB)/TM/A

Donde, AC-E, AC-V y AC-RB representan las clases correspondientes a la clasificación de los ensayos:

Ensayo a escurrimiento AC-E

CLASE	Criterio, según UNE 83361
AC-E1	$550 \text{ mm} \leq d_f \leq 650 \text{ mm}$
AC-E2	$650 \text{ mm} < d_f \leq 750 \text{ mm}$
AC-E3	$750 \text{ mm} < d_f \leq 850 \text{ mm} (*)$

Ensayo a viscosidad AC-V

CLASE	Criterio por el ensayo de escurrimiento, según UNE 83361	Criterio alternativo por el ensayo del embudo en V según UNE 83364
AC-V1	$2'5 \text{ seg} < T_{50} \leq 8 \text{ seg}$	$10 \text{ seg} \leq T_V \leq 20 \text{ seg}$
AC-V2	$2 \text{ seg} < T_{50} < 8 \text{ seg}$	$6 \text{ seg} \leq T_V \leq 10 \text{ seg}$
AC-V3	$T_{50} \leq 2 \text{ seg} (*)$	$4 \text{ seg} \leq T_V \leq 6 \text{ seg} (*)$

Ensayo de resistencia al bloqueo AC-RB

CLASE	Exigencia de la característica	Criterio por el ensayo del anillo en J, según UNE 83362 (*)	Criterio por el ensayo de caja en L, según UNE 83363
AC-RB1	Exigible cuando el tamaño máximo del árido sea superior a 20 mm o el espesor de los huecos por los que pase el hormigón esté comprendido entre 80 y 100 mm	$d_{Jf} \geq d_f - 50 \text{ mm}$, con un anillo de 12 barras	$\geq 0,80$, con 2 barras
AC-RB2	Exigible cuando el tamaño máximo del árido sea igual o inferior a 20 o el espesor de los huecos por los que pase el hormigón esté comprendido entre 60 y 80 mm	$d_{Jf} \geq d_f - 50 \text{ mm}$, con un anillo de 20 barras	$\geq 0,80$, con 3 barras

(*) donde d_f representa el escurrimiento en el ensayo según UNE 83361 y

d_{Jf} representa el escurrimiento en el ensayo del anillo J, según UNE 83362

Dichos ensayos se encuentran desarrollados y definidos en los anejos del presente proyecto.

2.6. MATERIALES COMPONENTES DE LOS HAC

2.6.1. Áridos

Como áridos se entiende que son productos “granulares inertes” naturales o artificiales, que intervienen como componentes del hormigón y que contribuyen a:

- La estabilidad del volumen
- La obtención de resistencias
- La escorrentía de los hormigones

Los áridos naturales provienen de rocas sedimentarias, ígneas o metamórficas, mientras que los áridos artificiales son materiales resultantes de procesos industriales que han sido sometidos a modificaciones físico-químicas para mejorar de forma significativa alguna propiedad.

2.6.1.1. Humedad y densidad

Los áridos se pueden encontrar en cuatro estados de humedad:

- Seco a estufa Ms (absorbe agua)
- Saco natural M (absorbe agua)
- Saturado especial Ma (saturado con superficie seca)
- Saturado con agua libre M (cede agua)

Coefficiente de absorción de agua % (Ab): $Ab = 100 \cdot (Ma - Ms) / Ms$

Humedad superficial % hs: $hs = h - Ab$

Las densidades a considerar en los áridos serán:

- Densidad absoluta
- Densidad real
- Densidad real del árido saturado con superficie seca
- Densidad aparente o de conjunto
- Compacidad (huecos intersticiales o entre granos)

Los áridos mas densos suelen ser mas resistentes. En el caso de las calizas “Duriez” establece la relación entre densidad y la resistencia a compresión.

Tipo de caliza	Débil	Menos débil	Semidura	Dura	Muy dura
Densidad Mg/m ³	1,47 a 1,84	1,84 a 2,15	2,15 a 2,35	2,35 a 2,58	2,58 a 2,73
R compresión MPa	4 a 10	10 a 30	30 a 50	50 a 110	110 a 360

En el caso de hormigones se deben de utilizar las calizas duras y muy duras.

Los áridos se pueden clasificar por su densidad en:

- Ligeros $< 2 \text{ Mg/m}^3 = \text{g/cm}^3$
- Normales $2 \text{ a } 3 \text{ Mg/m}^3$
- Pesados $> 3 \text{ Mg/m}^3$

Es importante conocer la humedad de los áridos en la fabricación del hormigón por la repercusión que tiene sobre la relación Agua/Cemento.

2.6.1.2. Textura superficial

Los áridos son de texturas variadas: vítrea, lisa, granular, áspera, cristalina, panal, etc.

Cuanto más rugosa es la superficie de los áridos mayor es la superficie de contacto con la pasta cementante y mejora la adherencia. La forma y la textura del árido fino influyen considerablemente en el requerimiento de agua de amasado.

2.6.1.3. Porosidad

La porosidad mejora la adherencia, además de influir en otras propiedades como la estabilidad química, la resistencia a la heladicidad y la resistencia a la abrasión.

2.6.1.4. Forma

La forma de los áridos puede ser:

- Redondeadas (rodados); dureza elevada, mejoran la trabajabilidad y requieren menor cantidad de agua.
- Angulosas (machaqueo); mejor trabazón, mayor adherencia, mayor resistencia a tracción y mayor dificultad de puesta en obra.
- Planos, laminares o aciculares; dificultan la trabajabilidad, menor compacidad y requieren gran cantidad de agua.

La forma del árido tiene mayor interés y repercusión en el árido grueso.

2.6.1.5. Ensayos de los áridos:

Métodos de muestreo (UNE-EN 932-1)

Las condiciones físico-mecánicas que deben de cumplir los áridos serán:

- Resistencia al desgaste (micro Deval EN 1097-1)
- Resistencia a la fragmentación del árido grueso (ensayo de Los Ángeles, EN 1097-2)
- Alteración de los áridos (Ensayo sulfato magnésico, EN 1367-2)

Las condiciones físico-químicas de los áridos:

- Azul de metileno (UNE-EN 933-9)
- Equivalente de arena (EN 933-8)
- Materia orgánica “contenido de humus” (EN 1744-1)
- Partículas blandas en áridos gruesos

2.6.1.6. Tamaño de los áridos

El tamaño máximo de árido para el hormigón autocompactante, se limita a 25 mm, siendo recomendable utilizar tamaños máximos comprendidos entre 12 mm y 20 mm, en función de la disposición de armaduras.

Los materiales fillers son unos áridos cuya mayor parte pasa por el tamiz 0’063 mm y que se obtienen por tratamiento de los materiales de los que provienen.

Son fillers adecuados aquellos que provienen de los mismos materiales que los áridos. De acuerdo con la Norma UNE EN 12620 la granulometría de un filler se define en la tabla siguiente:

Tamiz de tamaño (mm)	Porcentaje que pasa en masa
2	100
0,125	85 a 100
0,063	70 a 100

Los ensayos iniciales de tipo, el control de producción en fábrica y la certificación de dicho control, en cuanto al filler se refiere, se establecen en la Norma UNE EN 12620.

Se recomienda, exclusivamente para el caso de los hormigones autocompactantes, que la cantidad resultante de sumar el contenido de partículas de árido fino que pasan por el tamiz UNE 0,063 y la adición caliza, en su caso, del cemento no sea mayor de 250 kg/m³ de hormigón autocompactante.

Para el almacenamiento del filler se utilizarán medios similares a los utilizados para el cemento, debiéndose utilizar recipientes o silos impermeables que lo protejan de la humedad y de la contaminación.

La demanda de agua de los finos inertes que pasan por el tamiz UNE 0,063 se debe compensar mediante el empleo de aditivos superplastificantes adecuados que garanticen el cumplimiento de las relaciones agua/cemento, garantizando de este modo la durabilidad.

La influencia de los finos (grano inferior a 0,063 mm) en los hormigones tiene gran repercusión sobre la trabajabilidad del hormigón en estado fresco, y en estado endurecido, los finos calizos aportan siempre propiedades positivas mientras que los finos arcillosos son siempre desfavorables.

2.6.1.7. Análisis granulométrico de los áridos

Serie de tamices que las aberturas de mallas son el doble que las anteriores, de este modo, las diferencias de tamaño son constantes en escala logarítmica. Las curvas granulométricas se expresan poniendo en abscisas las aberturas en escala logarítmica y en ordenadas los porcentajes acumulados que pasaran por cada tamiz de la serie.

Tamizado EN 933-1; el proceso de tamizado puede considerarse terminado cuando el material retenido no varía en más de 1% en un minuto de tamizado.

Módulo de finura (MF) EN 12620; se calcula como la suma de los porcentajes acumulados de la masa retenida en los tamices siguientes (m), y se indica en forma de porcentaje.

El método utilizado consiste en llevar la muestra del árido y una vez ésta se haya secado, realizar un tamizado por vía seca.

La masa retenida en cada tamiz se expresará en porcentaje de la masa inicial del material, es decir, la masa seca total M1.

La muestra para el laboratorio será tal que permita obtener una masa de muestra de ensayo superior a la mínima, de acuerdo con la tabla siguiente:

TAMAÑO MÁXIMO ÁRIDO D mm	MASA MÍNIMA MUESTRA DE ENSAYO kg
63	40
31,5	20
16	2,6
8	0,6
≤ 4	0,2

La muestra de ensayo se secará, a 110 ± 5 °C, hasta masa constante y una vez fría, se pesará y se obtendrá la masa seca total M1. Si el secado pudiera producir efecto aglomerante, se prepararán dos muestras, secándose sólo una de ellas y el ensayo se realizará con ambas.

2.6.2. Agua

La calidad del agua de amasado para la producción de hormigón puede influir sobre el tiempo de fraguado, el desarrollo de resistencias mecánicas del hormigón y la protección de las armaduras contra la corrosión. Según el Art. 27 EHE-08 “No debe contener ningún ingrediente dañino en cantidades tales que afecten a las propiedades del hormigón o a la protección de las armaduras frente a la corrosión”.

EL agua necesaria para un hormigón depende del cemento (composición química y finura) y mucho del tipo de árido. Los valores habituales de A/C, en hormigones, oscila

desde A/C 0,6 para hormigones normales a 0,4 para hormigones de altas prestaciones (muy resistentes).

La cantidad de agua para un metro cúbico de hormigón varía entre 140 a 210 litros/m³ depende de: cemento, tipo de árido (machaqueo, rodado, finos, tamaño máx. etc.) y sobre todo del uso de aditivos reductores de agua.

2.6.3. Aditivos

Son básicos en las dosificaciones de hormigones. “Sin aditivos no se pueden fabricar hormigones de altas resistencias y altas prestaciones”. El uso de los superplastificantes se inicia en Alemania y Japón en 1964.

Los aditivos más empleados en fabricación de hormigones son los reductores de agua, su empleo permite hormigones fluidos, sin segregación y baja relación agua/cemento, u hormigones fluidos de baja retracción y alta o muy alta resistencia.

Según la EHE-08 se entiende por aditivos:

Aquellas sustancias o productos que, incorporados al hormigón antes del amasado (o durante el mismo o en el transcurso de un amasado suplementario) en una proporción no superior al 5% del peso del cemento, producen la modificación deseada, en estado fresco o endurecido, de alguna de sus características, de sus propiedades habituales o de su comportamiento.

El uso de un aditivo superplastificante es requisito fundamental en el hormigón autocompactante y, en ocasiones, puede ser conveniente el uso de un aditivo modulador de la viscosidad que minimiza los efectos de la variación del contenido de humedad, el contenido de finos o la distribución granulométrica, haciendo que el hormigón autocompactante sea menos sensible, en cuanto a la propiedad de autocompactabilidad se refiere, a pequeñas variaciones en la calidad de las materias primas y en sus proporciones.

Su empleo se realizará después de conocer su compatibilidad con el cemento y las adiciones, comprobando un buen mantenimiento de las propiedades reológicas durante el tiempo previsto para la puesta en obra del hormigón autocompactante, así como las características mecánicas correspondientes mediante la realización de ensayos previos.

Los aditivos cumplirán con la norma UNE-EN 934-2

2.6.3.1. Aditivo reductor de agua de alta efectividad/superplastificante

Aditivo que, sin modificar la consistencia, permite reducir fuertemente el contenido de agua de un determinado hormigón, o que, sin modificar el contenido de agua, aumenta considerablemente el escurrimiento, o que produce ambos efectos a la vez. Reducción de agua > 12%.

Aumentan significativamente, la trabajabilidad para una relación A/C dada; producen una reducción considerable de la relación A/C, para una determinada trabajabilidad u obtienen, simultáneamente ambos efectos.

La evolución de estos aditivos es la siguiente:

- Melaminas y Naftalenos (2ª Generación); Los polímeros de naftaleno-sulfonado son productos resultantes del proceso de refinado del carbón permite reducir aproximadamente un 20 % el agua de amasado. Tiene como efecto negativo que pueden ocluir aire en el hormigón, aunque en cantidades no demasiado elevadas.
Los condensados de melaminas-sulfonato están basados en polímeros sintéticos. La reducción de agua es similar a los naftalenos.
Estos superplastificantes tienen como efecto negativo principal, la pérdida de trabajabilidad del hormigón demasiado rápida.
- Copolímero de vinilo; Evolución de los naftalenos y melaminas, posee moléculas de mayor tamaño proporcionando un efecto plastificante mayor y más duradero. Permiten reducir el agua de amasado alrededor del 30%, es un aditivo de gran interés en hormigones de altas prestaciones.
- Policarboxilatos (3ª Generación); Químicamente se basan en copolímeros de ácido acrílico y grupos éter de ácido acrílico (tecnología de los éter policarboxílicos). Basan su efecto dispersante en importantes cadenas laterales y, mucho menos, en la pura repulsión electroestática.
Permiten reducciones de agua alrededor del 35% y el tiempo de manejabilidad es muy superior a los superplastificantes convencionales.

2.6.3.2. Agente modulador de la viscosidad

Los aditivos cohesionantes o agentes modificadores de viscosidad son compuestos químicos cuyo objetivo es modificar la cohesión de la mezcla de hormigón para evitar la segregación y la exudación del agua.

Su uso no es indispensable en la fabricación del hormigón autocompactante si se dispone de la cantidad de finos suficiente; en cambio son recomendables si no se dispone de los finos suficientes o si se tiene una arena con un contenido bajo de finos.

2.6.4. **Cemento**

Se pueden usar todos los cementos que cumplan con la UNE-EN 197-1 para la producción del HAC. La elección correcta del tipo de cemento está sujeta muchas veces a requisitos específicos para cada aplicación o el tipo usado por el productor, más que por requisitos específicos del HAC.

El cemento es un conglomerante hidráulico, que si se mezcla apropiadamente con áridos y agua, permite obtener resistencias elevadas a corto y medio plazo. Esta propiedad, es debida fundamentalmente a que tiene en su composición altos contenidos de silicato tricálcico.

2.6.4.1. Componentes del cemento portland

El cemento portland esta compuesto por:

- Clinker portland: mineral sintético reactivo con el agua. Resultado de combinaciones químicas de ciertos minerales naturales (calizas, margas y/o arcillas y pirita) a altas temperaturas, del orden de 1450 °C.
- Sulfato cálcico (Yeso); para retardar el proceso de fraguado
- Adiciones; Puzolanas escorias y caliza

2.6.4.2. Hidratación del cemento

El cemento finamente molido, amasado con agua forma una pasta que fragua y endurece por medio de reacciones y procesos de hidratación. Estas reacciones con el agua son de dos formas: captando agua “hidratación”, y disolviendo los compuestos para formar otros “hidrólisis”. Ha estos procesos se les conoce por hidratación.

Se diferencian tres etapas:

- Estado plástico: tiempo que permite la colocación.
- Fraguado: transición de plástico a endurecido, se caracteriza por la pérdida de trabajabilidad. La normativa define el ensayo para medir la rigidización de la pasta, que denomina principio de fraguado PF y final de fraguado FF.
- Endurecimiento: tiempo durante el cual se desarrollan las resistencias mecánicas de modo progresivo. Puede durar años, aunque aprox. el 80% se alcanza en un mes.

Hidratación de los compuestos mayoritarios (reacciones exotérmicas):

- Hidratación del silicato tricálcico (C_3S): Constituye la familia de la alita. Es cuantitativamente el constituyente más importante del Clinker, pero también desde el punto de vista de sus propiedades, en particular, el desarrollo de resistencias a corto y medio plazo (10-24 horas y 28 días). La reacción exotérmica es alta, 120 cal/g, y da dos productos hidratados: **gel C-S-H y portlandita**.
- Hidratación silicato bicálcico (C_2S): Constituye la familia velita. Existen al menos cuatro variedades distintas de silicato bicálcico. En su hidratación también da **gel C-S-H y portlandita**, pero esta, en menor proporción que el C_3S . Es de hidratación lenta, y de bajo calor de hidratación 62 cal/g. Contribuye poco a las resistencias a 1-2 días, algo más a las de 28 días, y mucho mas a largo plazo, 45-90 días e incluso hasta 5 años (o más).
- Hidratación del aluminato tricálcico (C_3A): En el proceso de hidratación el C_3A se combina con una parte de la portlandita formada, (de la hidratación de silicatos) dando lugar a aluminato de calcio hidratado $C_4A \cdot H_{13}$ (C-A-H). Tiene velocidad de hidratación muy rápida y un desprendimiento de calor altísimo 207 cal/g contribuye ligeramente a aumentar las resistencias a corto plazo.

- Ferritoaluminato tetracálcico (C_4AF): Tiene una velocidad de hidratación rápida, desprendiendo poco calor 120 cal/g, contribuye muy escasamente a las resistencias a cualquier edad. En presencia de sulfatos genera ettringita férrica menos expansiva que la del C_3A . Debe favorecerse su formación, en la fabricación de Clinker, cuando se requiera cementos de más resistencia a los sulfatos o de bajo calor de hidratación.

Hidratación de los compuestos secundarios:

- El óxido de magnesio MgO: Es inevitable por encontrarse en las materias primas. Ejerce una acción muy escasa sobre las resistencias. El Clinker se puede encontrar como óxido libre o formando disoluciones sólidas con otros compuestos. Si el óxido de magnesio está cristalizado en forma de periclase (por un enfriamiento lento del Clinker) puede causar expansión diferida por hidratación a largo plazo, formando brucita expansiva.
- Cal libre (CaO): Una clinkerización ajustada permite obtener CaO libre en el Clinker de 1 a 2 % que no causa ningún daño en la pasta cementante. Cuando el Clinker tiene un porcentaje mayor (>4), debido a una combinación incompleta de sus óxidos, las expansiones pueden ser muy dañinas. El CaO libre sobrecalentado ($\cong 1450^\circ C$) es de reacción lenta, incluso meses, y produce en la pasta endurecida un aumento de volumen cercano al 97%.
- Álcalis ($Na_2O + K_2O$): Tiene poca influencia sobre las resistencias mecánicas, pero en cualquier caso, los efectos dependen de la forma en que se encuentren combinados con el Clinker.
- Sulfato de calcio: Se añade a los demás componentes del cemento durante su fabricación para controlar el fraguado.

2.6.4.3. Propiedades de los principales compuestos hidratados:

- Gel C-S-H: Son mayoritarios y responsables de las principales propiedades de la pasta cementante, resistencia, durabilidad, etc. No es un único compuesto sino una familia de silicatos hidratados con relación cal/sílice que va 1 a 1,7. De estos silicatos es más estable, frente al ataque químico, el que tiene relación cal/sílice menor.
La cantidad de agua combinada de esta familia de silicatos también es variable y parte de ella la pierde por desecación. "El gel de C-S-H experimenta una considerable retracción cuando pierde su agua evaporable por secado, del orden de un 2% del volumen de partida, y da origen a la llamada retracción hidráulica"
- Portlandita CH $Ca(OH)_2$: No tiene propiedades conglomerantes, es el compuesto más cálcico y, más débil de la pasta de cemento frente al ataque químico. Crea en la pasta cementante de los hormigones un medio fuertemente básico (pH > 12) este valor alto de pH impide la corrosión del acero en el

hormigón. Esta protección de las armaduras contra la corrosión se puede perder con el tiempo, fundamentalmente por carbonatación.

2.6.5. Adiciones

Debido a las propiedades requeridas para el HAC en estado fresco, las adiciones hidráulicamente inertes o activas o puzolanas se usan a menudo para incrementar y mantener la cohesión y la resistencia a la segregación. Las adiciones regulan también el contenido de cemento para reducir el calor de hidratación y la retracción térmica.

Las adiciones se clasifican de acuerdo a su hidraulicidad:

TIPOS	CARACTERÍSTICAS	MATERIALES
TIPO 1	Inertes o seminertes	<ul style="list-style-type: none"> • Filler mineral (piedra caliza, dolomía etc.) • Pigmentos
TIPO 2	Puzolanas	<ul style="list-style-type: none"> • Cenizas volantes conforme la EN 450 • Humo de sílice conforme la PNE-prEN 13263
	Hidráulicamente activas	<ul style="list-style-type: none"> • Escoria granulada de alto horno (Si no se emplea un cemento compuesto acorde a la norma UNE-EN 197-1, se aplicará la normativa nacional hasta que no se publique la nueva norma PNE-prEN 15167)

En caso de usarse otras adiciones, que no sean las definidas para cementos compuestos en la norma para cementos UNE-EN 197-1, no podrá controlarse fácilmente la distribución de su tamaño de partícula y la composición de otros constituyentes del hormigón, por lo que será preciso aumentar los controles en las entregas.

El HAC se selecciona a menudo por su alta calidad de acabado y el buen aspecto superficial pero esto puede verse comprometido si la fuente de las adiciones no presentan una buena uniformidad en su color.

2.6.5.1. Finos (fillers)

La distribución del tamaño de partícula, la forma y la absorción de agua de los finos puede afectar a la demanda de agua y, por tanto, la trabajabilidad en la elaboración del HAC. Los finos con base de carbonato cálcico (fillers calizos) son ampliamente usados y pueden dar excelentes propiedades reológicas y un buen acabado. Lo ideal es que el tamaño sea menor de 0.125 mm y en general es deseable que >70% pase por el tamiz de 0.063 mm. Finos especialmente molidos para esta aplicación ofrecen la

ventaja de mejorar la uniformidad de la distribución del tamaño de partícula entre amasadas, dando un mayor control a la demanda de agua y siendo especialmente adecuados para el HAC comparado con otros materiales disponibles.

2.6.5.2. Cenizas volantes

Las cenizas volantes son una buena adición, puesto que se ha visto que aumentan la cohesión y reducen las variaciones de demanda de agua. Sin embargo, altos contenidos de cenizas volantes pueden provocar una fracción de pasta con tal cohesión que comporte una disminución de la fluidez.

2.6.5.3. Humo de sílice

El elevado nivel de finura y la forma prácticamente esférica del humo de sílice da una buena cohesión y aumenta la resistencia a la segregación. No obstante, aunque el humo de sílice es muy efectivo en la reducción o eliminación de exudación, puede aumentar los problemas de endurecimiento rápido superficial. Esto puede crear juntas frías o defectos de superficie si hay interrupciones en el suministro de hormigón y también disminuir la calidad del acabado superficial.

2.6.5.4. Escoria granulada de alto horno

La escoria granulada de alto horno es un elemento hidráulicamente activo, muy fino, con bajo calor de hidratación. Algunos cementos CEM II y CEM III contienen escoria granulada de alto horno pero también está disponible como adición en algunos países por lo que puede ser añadida a la mezcla. Elevadas proporciones de escoria granulada de alto horno afectan al HAC, con bajos niveles de estabilidad, con problemas de control de la consistencia, mientras que su lento fraguado puede incrementar el riesgo de segregación. Las escorias granuladas de alto horno están disponibles en algunos países como adiciones tipo I.

2.6.5.5. Otras adiciones

Metacaolin, puzolana natural, vidrio granulado, escoria refrigerada por aire y otros finos pueden ser usados o considerados como adiciones para el HAC pero deberán ensayarse minuciosamente y de forma individual los efectos en el hormigón a corto y largo plazo.

2.7. PROPIEDADES DE LOS HAC EN ESTADO FRESCO

La autocompactabilidad es la principal propiedad en estado fresco del hormigón autocompactante, y que lo diferencia del hormigón convencional.

La evaluación de las propiedades en estado fresco del hormigón autocompactante se puede realizar de dos maneras. La primera es mediante el estudio de los parámetros reológicos y, la segunda es mediante la realización de ensayos.

Las características en estado fresco que se deben de cumplir simultáneamente en un hormigón son las siguientes:

- Capacidad de relleno.
- Resistencia al bloqueo o capacidad de paso.
- Resistencia a la segregación.

2.7.1. Reología

La reología es la ciencia que estudia la deformación y el flujo de materiales sometidos a tensiones. La reología estudia la deformación del hormigón endurecido y el comportamiento del hormigón fresco y el de las lechadas y pastas de cemento.

En el caso del hormigón fresco, se consideran como propiedades reológicas:

- Docilidad y trabajabilidad
- Compactabilidad
- Estabilidad

Se puede decir que la trabajabilidad es el conjunto de propiedades del hormigón fresco que determinan el mantenimiento de la homogeneidad y la capacidad de ser colocado compactado y acabado. Mientras que la docilidad es el conjunto de cualidades que condicionan la aptitud al transporte y puesta en obra adecuada del hormigón sin producirse la segregación envolviendo completamente las armaduras e introduciéndose en los rincones del encofrado.

2.7.2. Capacidad de relleno

La capacidad de relleno o capacidad de fluir es la capacidad que tiene el hormigón de fluir y rellenar un encofrado bajo la acción de su propio peso sin ayuda externa. Las armaduras deben de quedar perfectamente recubiertas y no deben producirse coqueas. Para que la capacidad de relleno sea adecuada se tiene que reducir la fricción entre las partículas y conseguir una adecuada deformabilidad en la mezcla.

2.7.3. Capacidad de paso

La capacidad de paso o resistencia al bloqueo es la capacidad que tiene el hormigón de pasar entre las armaduras, estrechamientos o cualquier obstáculo sin que se produzca un bloqueo de los áridos.

Esta propiedad del hormigón depende tanto de la geometría de la pieza y distribución de las armaduras como de la cantidad y tamaño de árido grueso en el hormigón.

2.7.4. Resistencia a la segregación

La resistencia a la segregación es la capacidad del hormigón de mantenerse homogéneo sin que se produzca la separación de los áridos o exudación del agua. Esta propiedad del hormigón está relacionada con la estabilidad y con la viscosidad de la mezcla porque si se tiene una viscosidad adecuada, la composición de la mezcla se mantiene homogénea.

2.7.5. Fiabilidad

Es la capacidad del hormigón de mantener sus características en estado fresco dentro de los rangos especificados cuando se producen pequeñas variaciones en las propiedades de los componentes, la variación de la temperatura o una combinación de ambos (ACHE, 2008).

2.7.6. Tiempo abierto

Se define tiempo abierto al lapso de tiempo desde la fabricación durante el cual se mantienen las características de autocompactabilidad de dicho hormigón (ACHE, 2008). Al igual que en el hormigón convencional influyen la temperatura, las condiciones climáticas o los aditivos, entre otros factores.

2.8. PROPIEDADES DE LOS HAC EN ESTADO ENDURECIDO

2.8.1. Propiedades físicas

2.8.1.1. Permeabilidad

El hormigón endurecido no es impermeable, si bien es posible reducir esta permeabilidad hasta un mínimo que permita un comportamiento correcto de aquél.

El agua es el líquido que habitualmente puede penetrar en el hormigón. Esta penetración puede realizarse por dos métodos:

- Presión
- Capilaridad

Un hormigón será más impermeable por presión cuanto menores sean los poros que se formen y más alejados estén de la superficie exterior. Así mismo, la impermeabilidad frente a la capilaridad será mayor cuanto menor sea la red capilar que se forme y aumentara si esta se interrumpe por los poros de mayor diámetro.

Los factores que influyen sobre la formación de la red capilar y los poros son:

- La relación A/C
- La granulometría del cemento y de los áridos
- El desarrollo del gel del cemento
- El tiempo de curado

2.8.1.2. Densidad

El hormigón endurecido se puede clasificar en función de su densidad en:

- Hormigón normal 2000 a 2800 kg/m³
- Hormigón pesado >2000 kg/m³
- Hormigón ligero <2000 kg/m³

Los hormigones autocompactantes se pueden considerar de una forma similar a los hormigones convencionales pudiéndose aplicar las mismas formulaciones del hormigón convencional, pero teniendo en cuenta que son aproximativas.

Debido a las diferencias en dosificación entre el hormigón autocompactante y el convencional, en los últimos años se han realizado diversas investigaciones sobre las propiedades en estado endurecido del hormigón autocompactante. Hay que destacar que cuando se compara un hormigón autocompactante con uno convencional en estado endurecido, se hace con hormigones de resistencias similares.

2.8.2. **Propiedades mecánicas**

2.8.2.1. Resistencia a compresión

La resistencia a compresión es una de las propiedades más importantes del hormigón donde la relación agua/cemento juega un papel decisivo, pero en el autocompactante influyen otros factores como son: una microestructura más densa, el tamaño máximo del árido, la ausencia de vibración, el empleo de adiciones activas o una baja relación agua/finos entre otros factores (Skarendahl, et al., 2000; Klug et al., 2003; Georgiadis et al., 2007; Agranati, 2008) que hacen que, de forma general, se pueda decir que la resistencia a compresión es mayor en un hormigón autocompactante que en uno convencional, ambos con igual relación agua/cemento.

La vibración puede ser también un factor importante porque si un hormigón convencional tiene una mala vibración se producen coqueas en su interior y, por lo tanto, no se desarrollan adecuadamente sus propiedades. En cambio, en el hormigón autocompactante este problema desaparece.

Otro de los posibles factores que pueden influir notablemente en el desarrollo de resistencias son los superplastificantes de tipo policarboxilatos. Según la ACI (2007), este tipo de aditivos hacen que se mejore la resistencia a compresión sobre la que se tendría si se usasen otro tipo de aditivos en el hormigón autocompactante. Además, también recomienda determinar la resistencia a compresión a 91 días debido a que se mejoran las propiedades del hormigón autocompactante por el mayor contenido de material cementante.

2.8.2.2. Resistencia a tracción indirecta

La resistencia a tracción indirecta está muy relacionada con la resistencia a compresión, de tal manera que un aumento de la resistencia a compresión conlleva un

aumento de la resistencia a tracción indirecta. En el hormigón convencional uno de los factores que influyen en la resistencia a tracción indirecta es la adherencia entre el cemento y los áridos dentro de la zona de transición (Mehta, 1993), pero en el autocompactante influyen otros factores como la microestructura, el proceso de microfisuración o las características de la zona de transición (Agranati, 2008).

2.8.3. Propiedades reológicas

2.8.3.1. Módulo de elasticidad

El módulo de elasticidad es un parámetro del hormigón que está relacionado con las deformaciones y depende básicamente de tres factores en el hormigón convencional: árido, pasta y la zona de transición entre la pasta y el árido. Dichos factores también son válidos para el caso del hormigón autocompactante.

El primer factor es el árido. Se puede considerar que la naturaleza del árido en ambos hormigones es igual pero varía el volumen del mismo, ya que en el hormigón autocompactante se reduce el volumen del árido grueso por lo que conlleva una disminución del módulo de elasticidad.

El segundo factor es la pasta. El hormigón autocompactante tiene un alto contenido de adiciones y un volumen elevado de pasta y esto crea comportamientos inversos debido a que el primero aumenta el módulo de elasticidad, pero el gran volumen de pasta disminuye el módulo.

Por último, la zona de transición entre la pasta y el árido es la zona más débil del hormigón donde puede aparecer microfisuración. Es la zona más importante para el desarrollo de las propiedades mecánicas del hormigón.

En general, se relaciona el módulo de elasticidad con la resistencia a compresión en la mayoría de las formulaciones existentes para el hormigón convencional y que, en principio, son aplicables al hormigón autocompactante. Pero estas fórmulas habituales sobrevaloran el valor del módulo de elasticidad para el caso del autocompactante entre un 7 y un 15% (AFGC, 2002; Grupo de Proyecto Europeo (GPE), 2005; ACHE, 2008), no siendo importantes estas diferencias.

En general se puede decir que el módulo de elasticidad del hormigón autocompactante es menor respecto al del convencional.

2.8.3.2. Retracción

La retracción se produce por la pérdida de agua y se puede dividir en dos tipos. El primer tipo es la retracción endógena que se da en las primeras edades del hormigón debido a la pérdida de agua que se ha consumido en la fase de hidratación del cemento. El segundo tipo es la retracción por secado que se produce a largo plazo debido a la pérdida de agua por evaporación.

Debido a que el hormigón autocompactante tiene un mayor volumen de pasta respecto al hormigón convencional, la retracción endógena es ligeramente superior en el primero. En cambio, la retracción por secado es inferior en el hormigón autocompactante respecto al convencional.

En los últimos años se han desarrollado numerosos estudios sobre la retracción en el hormigón autocompactante y sobre la forma en que afecta la dosificación de la mezcla a esta propiedad, teniendo en cuenta desde la naturaleza y tipo de la adición, cemento y áridos hasta las relaciones entre agua/cemento y agua/finos.

En el caso del hormigón autocompactante, la relación de agua/finos y el contenido de árido influyen de forma opuesta sobre la retracción. Al reducir el contenido de árido, la retracción debe de aumentar y, por el otro lado, la elevada relación agua/finos de la mezcla contribuye a una disminución de la misma (Agranati, 2008).

Los modelos de cálculo de retracción existentes se pueden aplicar en los hormigones autocompactantes debido a que no se aprecian diferencias destacables en el cálculo de la retracción entre los hormigones autocompactantes y los convencionales como se reflejan en diversas investigaciones, pero hay que tener en cuenta que sí que existen diferencias de precisión entre los diferentes modelos de cálculo.

2.8.3.3. Fluencia

La fluencia es el aumento de la deformación que se produce en el hormigón cuando está sometido a una tensión constante. Es un proceso complejo y está relacionado con la retracción por lo que los factores que influyen sobre ambas son similares.

Cuando se aplica una tensión sobre el hormigón, este experimenta una deformación elástica y otra plástica, esta segunda deformación es la fluencia. Es complejo determinar exactamente la deformación elástica porque ésta depende de la velocidad de puesta en carga del hormigón (Fernández Cánovas, 2007).

La fluencia solamente ocurre en la pasta del cemento, por lo que depende en gran medida de la relación agua/cemento y del contenido de cemento. La función del árido es retener las deformaciones por lo que a mayor volumen de árido grueso, la fluencia será menor. Debido a que en el hormigón autocompactante se reduce el volumen de árido grueso respecto al convencional, es de esperar que la fluencia en el primero será mayor que en el segundo. Otro de los factores de los que depende la fluencia es la resistencia a compresión, a mayor resistencia, menor es la fluencia que presenta el hormigón.

En los últimos años se han desarrollado numerosas investigaciones en el estudio de la fluencia de hormigones autocompactantes y, en ellos se recomienda seguir los modelos de cálculo de fluencia de los hormigones convencionales ya que no se aprecian diferencias significativas.

2.9. DURABILIDAD DE HORMIGONES AUTOCOMPACTANTES

Según el Artículo 37o de la Instrucción EHE-08, la durabilidad de una estructura de hormigón es su capacidad para soportar, durante la vida útil para la que ha sido proyectada, las condiciones físicas y químicas a las que está expuesta, y que podrían llegar a provocar su degradación como consecuencia de efectos diferentes a las cargas y sollicitaciones consideradas en el análisis estructural.

Los principales factores que afectan a la durabilidad son el transporte de fluidos, la temperatura y la humedad, según el Código Modelo CEB-FIP (1990). El transporte de fluidos está condicionado, entre otros factores, por la microestructura y por la zona de transición entre la pasta y el árido.

Según el Anejo 17 de la Instrucción EHE-08, en su Artículo 37.3o, la zona de transición en un hormigón autocompactante es más densa en comparación con el hormigón convencional y ello conlleva la reducción de la velocidad de penetración de los agentes agresivos. Por esta razón y a raíz de las investigaciones publicadas se podría decir que el hormigón autocompactante presenta una durabilidad igual o superior con respecto a un hormigón convencional de resistencia a compresión similar (Zhu et al., 2002; Boel et al., 2006; Audenaert et al., 2006; Assié et al., 2007).

2.9.1. Microestructura e hidratación del hormigón autocompactante

En la estructura del hormigón endurecido se consideran tres fases: el árido, el cemento hidratado y la zona de transición entre ambas. La hidratación se produce a través de un proceso complejo al ponerse en contacto el cemento con el agua, siendo la misma responsable del endurecimiento y fraguado del hormigón.

La fase de cemento hidratado está compuesta principalmente de cuatro fases sólidas que son las siguientes:

- Hidrato de silicato de calcio (CSH) o gel de sílice, representa entre el 50 y el 60% del volumen total de la pasta.
- Hidróxido de calcio o portlandita que supone entre un 20 y 25% del total.
- Fases alumínicas y ferríticas, como la formación de etringita o Sal de Friedel, que constituyen entre un 15 y un 20% del volumen total de pasta.
- Granos de clínker no hidratados.

La fase del árido supone entre un 70 y 80% del hormigón. La zona de transición entre el árido y la pasta tiene un espesor entre 10 y 50 μm .

Las características de las tres fases y su interacción entre ellas son las responsables de las propiedades mecánicas del hormigón.

Una de las características más importantes de la microestructura es la porosidad caracterizada por el tamaño, forma y distribución de los poros. La Unión Internacional de Química Pura y Aplicada (IUPAC por sus siglas en inglés) clasifica los poros por su tamaño en: *micro-poros* ($\varphi < 2$ nm), *capilares o meso-poros* (2 nm $< \varphi < 50$ nm) y *macro-poros* ($\varphi > 50$ nm). Estos dos últimos son los que suelen afectar a la durabilidad del hormigón y, especialmente, los *mesoporos* determinan el comportamiento permeable del hormigón por su mayor conexión (Aligizaki, 2006; De Schutter et al., 2008).

La microestructura del hormigón autocompactante es diferente a la del hormigón convencional cuyas principales diferencias se deben principalmente a:

- La composición de la mezcla es diferente, especialmente debido al uso de adiciones y a la disminución del volumen y tamaño del árido grueso. Cuanto más grande es el tamaño del árido grueso, la zona de transición es más débil. Además al tener más partículas finas y un tamaño de árido menor, se mejora la granulometría de la mezcla.
- La baja relación agua/finos permite reducir la porosidad.
- Alto contenido de superplastificantes.
- Ausencia de vibración evitando la formación de coqueas por una mala compactación.

La principal razón de estos cambios en la microestructura del hormigón autocompactante podrían ser debidos a que los procesos de hidratación son diferentes en ambos hormigones, tradicionales y autocompactantes. La hidratación del hormigón autocompactante no sólo depende del tipo de cemento sino que también influye la adición que se añada (De Schutter et al., 2007).

La adición de filler calizo se usa para obtener unas adecuadas propiedades en estado fresco pero cuando se emplea en grandes cantidades, el proceso de hidratación puede ser acelerado y, en algunas ocasiones, modificado como se ha demostrado experimentalmente en investigaciones realizadas que se encuentran relacionadas en la bibliografía (Poppe et al., 2001b, 2005b; Xiong et al., 2003a, 2003b; Poppe A., 2004; Ye et al., 2007; De Schutter et al., 2007, 2008).

El proceso de hidratación de las adiciones (ceniza volante o puzolana) depende del tipo y de la naturaleza de las mismas. La principal diferencia del proceso de hidratación de éstas con el cemento, es que en las primeras la reacción es mucho más lenta que en el cemento. La presencia de las adiciones activas afectan en los siguientes aspectos de la hidratación (De Schutter et al., 2007, 2008):

- La cinética de la reacción.
- La formación de portlandita.
- La composición de los hidratos.

El proceso de hidratación de la escoria es más complejo en comparación con el filler calizo o las adiciones puzolánicas. La reacción de la escoria está activada principalmente por la cal disponible durante el proceso de hidratación del cemento portland, pero este proceso es más lento en presencia del agua (De Schutter et al., 2007, 2008).

Existen amplios estudios que demuestran la importancia de la microestructura y de los procesos de hidratación para el desarrollo de las propiedades mecánicas, el transporte y la durabilidad en los hormigones. En general se considera que en el hormigón autocompactante la microestructura es más densa que en el hormigón convencional, y la porosidad debería ser más baja. Esto podría ser debido a la ausencia de vibración y a la composición del hormigón autocompactante así como el alto contenido de finos y superplastificante y a la reducción del tamaño máximo del árido.

En general, no existe una amplia investigación en microestructura e hidratación de los hormigones autocompactantes.

2.9.2. Mecanismos de transporte

Los mecanismos de transporte determinan la velocidad de entrada de agentes agresivos en el hormigón a través de su estructura porosa y, por lo tanto, determinan el deterioro del mismo. Los agentes agresivos pueden ser líquidos o gaseosos o estar en forma de iones disueltos en la fase acuosa. Existen diversos tipos de mecanismos de transporte (difusión, absorción capilar, permeabilidad, migración iónica y convección) que se diferencian entre ellos según la forma de actuar.

Las investigaciones que se han realizado sobre los mecanismos de transporte en el hormigón autocompactante son limitadas, por lo que no se sabe con seguridad qué efectos tienen la dosificación y compactación del hormigón en los mismos ni tampoco su relación con la microestructura.

Debido a que existe un gran número de parámetros que influyen sobre los mecanismos de transporte, la comparación de los mismos entre el hormigón autocompactante y el hormigón convencional dependerá de diversos factores como la selección de materiales, la relación agua/cemento o el contenido de cemento entre otros.

Todo ello conlleva la dificultad de analizar y entender cómo funcionan los mecanismos de transporte en el hormigón autocompactante porque, además de que existen poco

resultados, hay discrepancias entre ellos.

2.9.3. Mecanismos de degradación

2.9.3.1. Carbonatación

La carbonatación es la reacción que se produce entre los componentes de la pasta y el CO₂ atmosférico que penetra, a través de su estructura porosa, en el hormigón. La reacción que se produce es la siguiente:



Para que se produzca esta reacción (1.11) es necesaria la presencia de agua. El pH del hormigón es básico, pero el CaCO₃ disminuye el pH del hormigón y esta reducción conlleva la pérdida de pasividad de las armaduras, es decir, perdiendo parte de la protección que el hormigón les aporta frente a una posible corrosión.

De las investigaciones existentes se puede concluir que la carbonatación en un hormigón autocompactante es similar o menor a la de un hormigón convencional, siendo necesaria una investigación más profunda en este aspecto.

El proceso de carbonatación depende fundamentalmente de la velocidad de carbonatación del CO₂, pero existen otros factores como la estructura de poros (microestructura), la humedad, el tipo de cemento y el tipo y cantidad de adiciones.

2.9.3.2. Penetración del ión cloruro

La penetración del ión cloruro a través de los poros del hormigón da lugar a un ataque químico que se produce por la acción de dicho ión, normalmente disuelto en el agua, sobre el hormigón. Dependiendo de la concentración de iones de cloruros en la fase acuosa de los poros, el cemento se combinará o no con ellos. Siempre existirá un equilibrio de disolución entre los cloruros libres y los combinados. La concentración de cloruros disminuye hacia el interior del hormigón.

En este ataque se produce la formación de Sal de Friedel que es expansiva y, además se produce la despasivación de las armaduras, cuando la concentración de iones cloruros entorno a ellas supera un valor umbral, dando lugar a su corrosión por picadura.

De las investigaciones existentes se puede predecir que la penetración del ión cloruro en un hormigón autocompactante es similar o menor que la que se produce en un hormigón convencional. Debido a la elevada cantidad y naturaleza de los finos, el tipo de cemento y a los aditivos, puede que el comportamiento frente a este ataque de los hormigones autocompactantes, sea diferente al del hormigón convencional pudiendo deberse esta diferencia a la diferente microestructura y composición iónica de los

mismos, así como al mayor volumen de pasta que presenta.

De forma general, se puede decir que el empleo de adiciones y el decremento de la porosidad, reducen la penetración del ión cloruro en los hormigones autocompactantes (De Schutter et al., 2008). Además el coeficiente de difusión de cloruros depende principalmente del tiempo (De Schutter et al., 2008).

2.9.3.3. Ataque por sulfatos

El ataque por sulfatos es uno de los ataques más agresivos que se pueden producir en el hormigón ya que dan lugar a la desintegración del material dado que las reacciones producidas son expansivas. Este ataque se produce en ambientes húmedos debido a la reacción del ión sulfato con diferentes componentes del cemento portland. Se puede producir por tres vías:

- Transformación del hidróxido de calcio en sulfatos de calcio hidratado. El producto resultante está cristalizado lo que conlleva un incremento de volumen y rotura del material.
- Reacción con los aluminatos hidratados generando productos expansivos que disgregan el hormigón.
- Descomposición de los silicatos de calcio hidratados produciendo una pérdida de resistencia en el hormigón.

Uno de los principales productos que se originan es la etringita, pudiendo formarse también yeso y taumasita. La etringita es altamente expansiva, lo que genera tensiones de tracción internas suficientes para producir la fisuración del hormigón.

Uno de los factores que influyen en este ataque, al igual que en los anteriores, es la velocidad con que el ión sulfato se introduce en el hormigón, por lo que el hormigón autocompactante debería de presentar un comportamiento similar o mejor al del hormigón convencional dada su menor capacidad de transporte debido a los factores vistos anteriormente y a su alto contenido de finos.

Supuestamente la formación de etringita en el hormigón autocompactante es menor debido a la presencia de las adiciones, a que su inicio se produce a mayor edad que en el hormigón convencional, y a que su estructura porosa es más cerrada. Existen contradicciones en la bibliografía respecto al comportamiento del hormigón autocompactante con elevado contenido de filler calizo expuesto al agua de mar, donde se debería de considerar el efecto conjunto de los iones sulfato y cloruro (ACHE, 2008) debido a que esta adición es más susceptible para la formación de taumasita. Para prevenir este problema sería recomendable el empleo de humo de sílice, ceniza volante o escoria con el objetivo de densificar la estructura porosa y reducir los poros capilares (De Schutter et al., 2007).

2.9.3.4. Ataque por ácidos y álcalis

La pérdida de durabilidad en el hormigón por el ataque de ácidos y álcalis depende fundamentalmente de la permeabilidad, al igual que en los casos anteriores, y de las características del hormigón.

Hasta ahora existen muy poco resultados en la bibliografía sobre estos ataques químicos en hormigones autocompactantes. El ataque por ácidos en el hormigón autocompactante parece similar al hormigón convencional siempre que la porosidad capilar sea similar (De Schutter et al., 2008).

2.9.3.5. Reacción árido-álcali

La reacción árido-álcali engloba tres tipos de reacciones diferentes: álcali-sílice, álcali-carbonato y álcali-silicato.

La característica común entre las tres reacciones es que obedecen a un proceso lento por lo que suelen aparecer cuando el hormigón ya ha alcanzado varios años de edad. Para que se produzcan estas reacciones es necesaria la presencia de minerales reactivos en los áridos además del aporte externo de humedad.

En general, los cementos con adición puzolánica tienen un mejor comportamiento frente a esta reacción que los cementos portland puros, debido a que la reacción puzolánica disminuye la presencia de álcalis disueltos en los poros e intersticios (ACHE, 2008).

Las investigaciones sobre esta reacción árido-álcali en hormigones autocompactantes son escasas pero se supone que las consideraciones y el comportamiento debe ser el mismo que para el hormigón convencional, ya que depende del árido que se use y de su calidad, del tipo y contenido de cemento y de las condiciones ambientales. Al igual que en el hormigón convencional, el uso de puzolana o ceniza volante reducen la velocidad del proceso expansivo (ACHE, 2008).

2.9.3.6. Hielo-deshielo

El proceso de deterioro en el hormigón debido al hielo-deshielo es un proceso complejo que se debe fundamentalmente al aumento de volumen del agua de los poros al congelarse por el descenso de la temperatura. El agua al congelarse y al no tener espacio suficiente para su nuevo estado, genera tensiones internas que se van acumulando por la repetición de los ciclos hielo-deshielo y que provocan el deterioro del hormigón.

Según el Anejo 17 de la Instrucción EHE-08, en su Artículo 37.3o, el comportamiento de un hormigón autocompactante frente a los ciclos helo-deshielo es similar al del convencional, por lo que deben de tomarse las mismas precauciones como el uso de

un aditivo aireante y por ello, habría que hacer ensayos de compatibilidad entre este aditivo y el superplastificante que lleva el hormigón autocompactante.

El incremento de una buena resistencia al hielo-deshielo se puede conseguir con una baja relación agua/cemento, una baja relación agua/finos, el uso de ceniza volante o el empleo de un cemento con una elevada finura, entre otros factores. Una relación agua/cemento elevada es el factor más perjudicial que tiene el hormigón autocompactante frente al convencional. Cuando los requerimientos (máxima relación agua/cemento, mínimo contenido de cemento, mínima resistencia) son apropiados, el hormigón autocompactante tiene una mejor resistencia al hielo-deshielo frente al convencional, además es posible crear un hormigón con un buen comportamiento, sin el uso de aireantes, pero la relación agua/cemento debe ser lo suficientemente baja.

2.9.4. Resistencia al fuego

En general, si se compara el hormigón con otros materiales, se observa que éste presenta una buena resistencia al fuego debido a que es un material incombustible y posee una baja conductividad térmica. No obstante, su composición sufre cambios importantes por la acción del fuego. Así, cuando se alcanzan temperaturas superiores a la de ebullición, el agua libre contenida en el hormigón se evapora generando una presión de vapor en el interior de los poros del mismo. La presión será tanto mayor cuanto mayor sea la temperatura. Si los poros no están interconectados y la presión no disminuye, se generan fenómenos de desconchamiento explosivos en el hormigón, disminuyendo su sección y por tanto su capacidad estructural y de aislante térmico (ACHE, 2008). Por debajo de los 300oC, los efectos en el hormigón son leves, pudiendo producirse alguna fisuración; en cambio, por encima de esta temperatura se pueden producir daños importantes en el material como la pérdida de resistencias, pero éstas van a depender de la composición del hormigón, así por ejemplo un árido calizo posee un coeficiente de dilatación térmico menor que un árido silíceo.

Según el Anejo 17 de la Instrucción EHE-08, en su Artículo 37.3o, el planteamiento de la resistencia al fuego en el hormigón autocompactante puede ser el mismo que para el hormigón convencional. Si se utiliza humo de sílice como adición, el comportamiento del hormigón autocompactante será similar al de un hormigón de alta resistencias pero con un mayor riesgo de desconchamiento explosivo del recubrimiento, en función de la cantidad de sílice activa adicionada, salvo que se hayan tomado las precauciones adecuadas como la incorporación de fibras adecuadas, por ejemplo de polipropileno (ACHE, 2008).

Aunque existen pocos trabajos de investigación sobre este tema, cabe decir que un hormigón autocompactante presenta un comportamiento similar que un hormigón convencional con equivalente resistencia a compresión. Se supone que el coeficiente de dilatación térmica del hormigón autocompactante debe ser superior al del hormigón convencional debido a que su estructura es más densa.

3. PROGRAMA EXPERIMENTAL

3.1. INTRODUCCIÓN

No debemos de olvidar que el objetivo de este proyecto era determinar la robustez de un determinado HAC, aplicando pequeñas variaciones del porcentaje de agua en su dosificación inicial.

Por tanto para ello partimos de una dosificación conocida. La experiencia que teníamos de dicha dosificación era que había sido utilizada por un profesor de la ETSIE en un proyecto suyo en el cual utilizaba también HAC aunque con otros fines.

3.2. PRIMERA TOMA DE CONTACTO

3.2.1. Obtención de los materiales

En un principio se trato de localizar una cantera la cual nos proporcionara los áridos. Una vez localizada la cantera CARASOLES S.A. esta nos suministro tres tipos diferentes de áridos:

- X toneladas de grava de tamaño máximo 12,5 mm
- X toneladas de arena 0/2 de tamaño máximo 2 mm
- X toneladas de arena 0/4 de tamaño máximo 4 mm



Una vez contábamos con el árido, se trato de conseguir el cemento. Para ello nos pusimos en contacto con la empresa CEMENTVAL MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN S.L. y nos suministro dos pales de sacos de 25 kg de CEM II/B-M (S-L) 42,5 R.

LA ROBUSTEZ EN EL HORMIGÓN AUTOCOMPACTANTE



Por último se consiguió los aditivos, tanto el superplastificante como el retenedor de agua (AMV). Ambos aditivos pertenecen a la casa Sika, S.A.U.



La elección de todos estos materiales y no otros, se debe fundamentalmente a dos aspectos:

- Dichos materiales son aptos para la fabricación de HAC
- Las empresas suministradoras nos han prestado ayuda o incluso nos han regalado los productos.

3.2.2. Análisis granulométrico

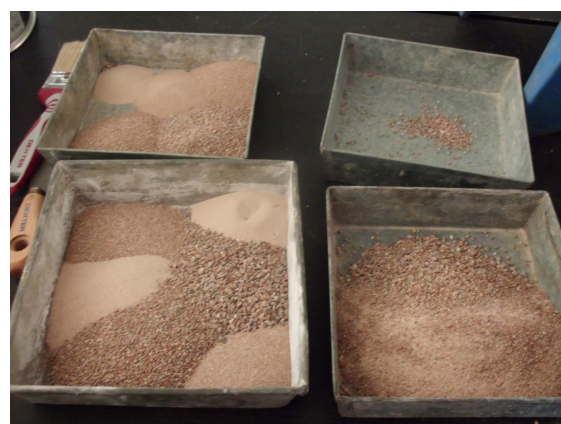
El análisis granulométrico era fundamental, para conocer el contenido de finos de las muestras de áridos, además de ser útil para determinar que porcentaje de cada uno de ellos aplicaríamos sobre nuestra dosificación.

La masa de la muestra que prepararemos para el laboratorio será:

- Para el tamaño de 12,5 mm 2,6 kg
- Para el tamaño de 4 mm 0,2 kg
- Para el tamaño de 2 mm 0,2 kg

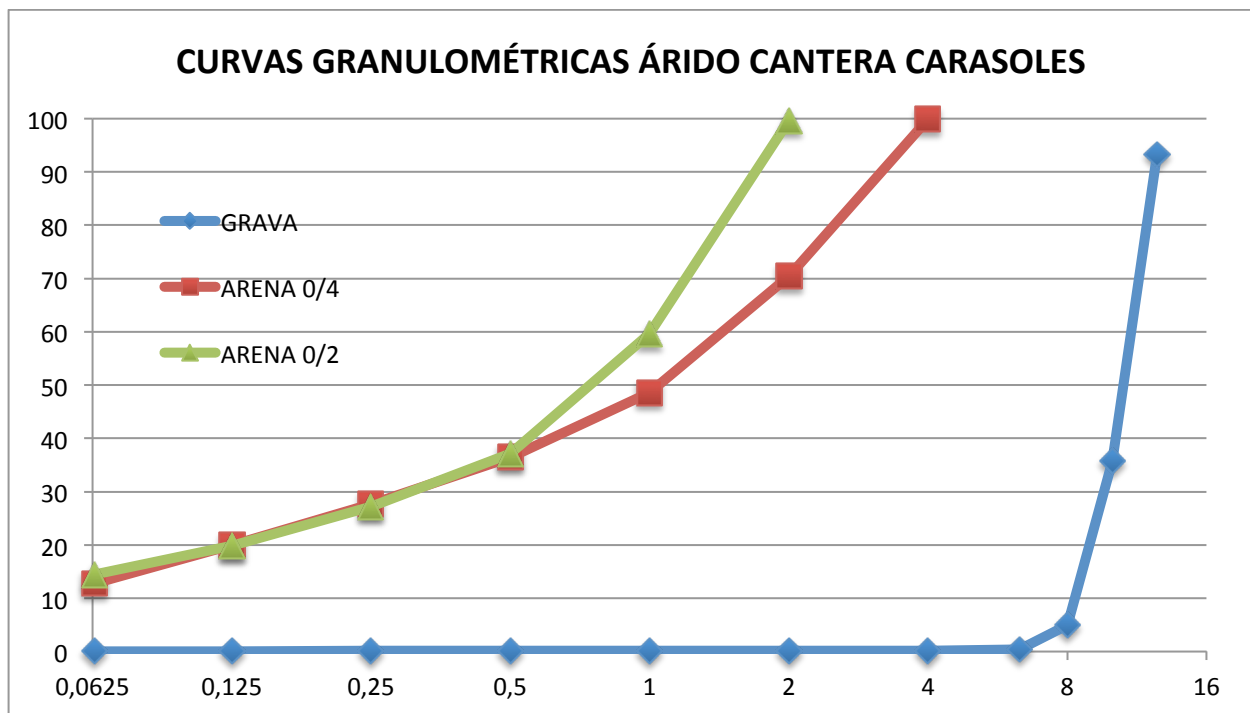
El procedimiento que se llevo a cabo fue:

- Lavado: tiene por objeto eliminar las partículas de tamaño menor que 0,063 mm. Para ello se hace pasar una corriente de agua por el tamiz 0,063 mm de forma que vaya arrastrando los finos, hasta que fluya a través del tamiz clara. A continuación se secaron a $110 \pm 5^\circ\text{C}$, para una vez fríos, pesarlos y determinar la masa M.
- Tamizado: una vez se peso la muestra, esta se tamizo, manualmente, por una columna de tamizado, compuesta, como mínimo, por la serie básica de tamices, en nuestro caso se utilizaron los tamices 20 16 14 12,5 10 8 6,3 4 2 1 0,5 0,25 0,125 0,063, que son con los que cuenta el laboratorio. La fracción que pasaba se llevaba al tamiz de la abertura de malla inferior, donde se vuelve a tamizar y así sucesivamente.
- Pesaje: al terminar cada tamizado, se pesaba el árido retenido en cada tamiz y se anotaban estas cantidades, obteniendo los R_i . También se peso, P, y se anotaba lo que quedaba en la bandeja del fondo. Estos valores se pasaron a % y se obtuvieron los % retenidos en cada tamiz, % R_i , y % de retenidos-acumulados, %RAC y % que pasan, %P.

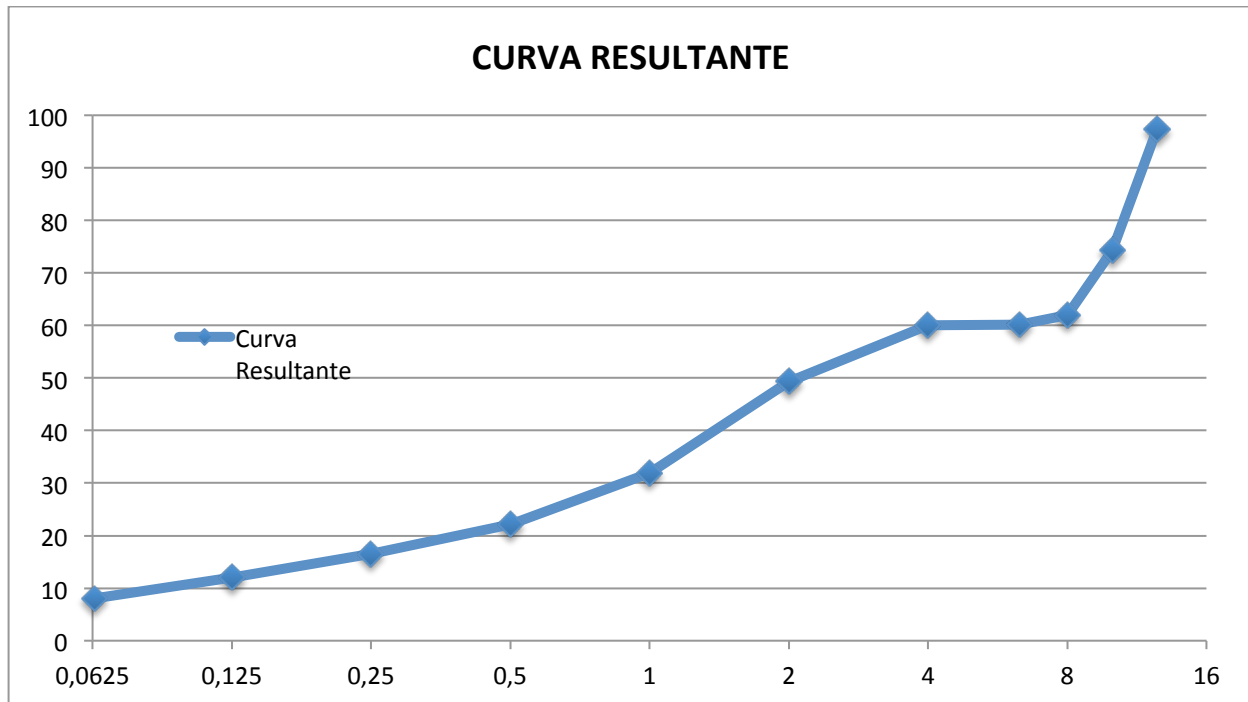




Una vez se hizo el análisis granulométrico, estábamos en disposición de poder representar las diferentes curvas granulométricas a partir de los resultados obtenidos.



Con la ayuda de estas curvas y teniendo en cuenta las especificaciones de la EHE-08 y de los diferentes métodos de composición de los áridos, se obtuvo la curva granulométrica resultante la cual nos daba un 40% de grava, un 36% de arena 0/4 y un 24% de arena 0/2.



Los principales métodos de composición de áridos que tuvimos en cuenta fuerón:

- Método por tanteos
- Método matemático
- Curva de Fuller
- Curva de Bolomey
- Husos granulométricos

Como características generales, en un hormigón autocompactante el contenido total de los finos (tamaño de partícula $<0,125\text{mm}$), es decir, el cemento, las adiciones y fillers, se encuentra en el intervalo de 450-600 kg/m^3 (180 a 240 litros/ m^3). El contenido de cemento está en el rango de 250 a 500 kg/m^3 . El volumen de pasta (agua, cemento, adiciones minerales activas, fillers y aditivos) se encuentra habitualmente por encima de los 350 litros/ m^3 .

Teniendo en cuenta que es básicamente la pasta la encargada de proporcionar la fluidez y arrastrar el árido, resulta lógico pensar en una granulometría continua y, más allá de las condiciones de espaciamiento entre barras, un tamaño máximo de árido no superior a los 25 mm. El volumen de árido grueso resulta menor en el hormigón autocompactante que en el hormigón de compactación convencional, generalmente no superando el 50% del total de áridos.

3.3. AJUSTES EN LA DOSIFICACION DE PARTIDA

Como se ha dicho anteriormente, la dosificación de la que partíamos era una dosificación conocida, con la cual ya se había realizado HAC, pero no para el estudio de la robustez. Además cabe tener en cuenta que en nuestro caso los áridos eran procedentes de otra cantera.

Por lo tanto se hizo una amasada inicial con atendiendo a la dosificación prestada, se realizó únicamente el ensayo de escurrimiento con lo que se pretendía valorar si dicha dosificación nos servía o debíamos de realizar alguna modificación.

En vista de los resultados, punto 5 del presente proyecto, se tubo que ir modificando milimétricamente las cantidades de los aditivos, se partió de un % de superplastificante respecto a la cantidad de cemento de un 1,5% y de % de AMV respecto a la cantidad de cemento de un 0,55%, dichos valores se fueron ajustando tras realizar diversas amasadas hasta obtener los siguientes porcentajes:

- 1,65% de superplastificante sobre la cantidad de cemento.
- 0,3% de retenedor de agua (AMV) sobre la cantidad de cemento.

Una vez resuelto el problema, ya se pudo iniciar la fabricación del HAC en amasadas de 15 l, y se pudo realizar los diferentes ensayos.

Dosificación Inicial:

a/c=0,6	kg/m3	Densidad	Volumen
CEM	350,0	3,00	116,7
Agua	210,0	1,00	210,0
Sp 1,5	5,3	1,05	5,0
Mv 0,55	1,9	1,03	1,9
Ar 0/2 24%	439,8	2,65	
Ar 0/4 36%	659,7	2,65	691,5
Grava 40%	733,0	2,65	
	2399,6		1025,0

Dosificación resultante:

a/c=0,6	kg/m3	Densidad	Volumen
CEM	350,0	3,00	116,7
Agua	210,0	1,00	210,0
Sp 1,65	5,8	1,05	5,5
Mv 0,3	1,1	1,03	1,0
Ar 0/2 24%	440,0	2,65	
Ar 0/4 36%	660,0	2,65	691,8
Grava 40%	733,3	2,65	
	2400,1		1025,0

3.4. FASES A SEGUIR

- Cálculo de la humedad de los áridos al inicio de cada jornada
- Ejecución de diferentes amasadas de 15 litros de HAC a partir de la dosificación obtenida.
- Realizar 2 probetas de cada amasada para su posterior rotura a compresión a los 28 días.
- Modificar las cantidades de agua en las diferentes amasadas para el estudio de su comportamiento a través de los diferentes ensayos a realizar.
- Refrentado y rotura a compresión tras los 28 días.
- Estudio y análisis de los resultados obtenidos
- Conclusiones

3.5. MATERIALES EMPLEADOS

3.5.1. Agua

Era la proveniente de una toma situada en el laboratorio de materiales, dicha toma procedía de la red general de abastecimiento, por lo tanto no tenía ningún tipo de inconveniente, además de cumplir con las especificaciones de la EHE-08.

3.5.2. Áridos

Eran los aportados por la cantera CARASOLES S.A. dichos áridos presentaban una composición caliza, una densidad normal (entre 2 y 3 kg/dm³) y una procedencia de machaqueo (de superficie rugosa y caras angulosas).

Además cumplían con las especificaciones de la EHE-08, tanto para el árido grueso, el cual presentaba un tamaño máximo de 12,5 mm < 25 mm, como para la arena y los fillers.

3.5.3. Cemento

El cemento que se utilizó para el estudio de la robustez fue un:

CEM II/B-M (S-L) 42,5 R

- CEM: cemento portland sujeto al marco CE
- B: porcentaje de adiciones alto (21-35%)
- M: tipo de adición mixta
- S: escorias
- L: caliza
- 42,5: resistencia compresión nominal a 28 d en MPa
- R: alta resistencia inicial

Dicho cemento de densidad 3 g/cm³ fue estudiado por el técnico del laboratorio Rafael Calabuig Pastor. Calabuig basándose en la norma EN 196-1 Resistencia a compresión, lo que pretendía era valorar las resistencias a corto plazo, largo plazo, altas, bajas, etc.

Realizo 9 probetas prismáticas de 40x40x160 mm, con una pasta de mortero normalizado relación agua/cemento 0,3. Posteriormente fue curado en agua a 20 °C hasta su rotura a 2, 7 y 28 días, obteniéndose los siguientes resultados:

- A 2 días 28,57 MPa
- A 7 días 42,91 MPa
- A 28 días 55,58 MPa

De las 9 probetas, tres se rompieron a los 2 días, otras tres se rompieron a los 7 días, y las otras tres se rompieron a los 28 días.

Como se pudo observar en los resultados, el cemento cumplía con su resistencia a 28 días al ser esta de 55,58 MPa > 42,5 MPa.

3.5.4. Aditivos

En todas las dosificaciones se emplearon los mismos aditivos, superplastificante Sika Viscocrete 3425, de tipo policarboxilato modificado en base acuosa y retenedor de agua T-4 Sika Stabilizer 4R, de tipo polisacárido.

Sika Viscocrete 3425		
Peso 25kg	LOTE:399/111009-1	
CE 9099	Norma: EN-934-2:2001	
	0099/CPA/A45/0001	
	03	
RETARDADOR DE FRAGUADO/ REDUCTOR DE AGUA DE ALTA ACTIVIDAD/ SUPERPLASTIFICANTE		
Función principal: SUPERPLASTIFICANTE DE ALTAS PRESTACIONES.		Función secundaria: GRAN REDUCTOR DE AGUA.
LIQUIDO/Color: Incoloro	Densidad: 1'06 kg/l	Contenido en cloruros: ≤0'10% mg/l
		Contenido de alcalinos: ≤3%
Dosificación para trabajabilidad media 0'2-0.8% del cemento. Para ALTA TRABAJABILIDAD y HORMIGON AUTOCOMPACTANTE 1-1'5% del cemento		

4. METODOLOGÍA DE ENSAYO

4.1. INTRODUCCIÓN

Dentro de este apartado desarrollaremos las fases que se siguieron para llevar a cabo el programa experimental definido en el apartado anterior.

En estos momentos disponemos de unos materiales conocidos: cemento, áridos, aditivos y agua; una dosificación ajustada a nuestros nuevos materiales, una granulometría ajustada al tipo de árido que tenemos y de todos los instrumentos del laboratorio para llevar a cabo los oportunos ensayos.

4.2. DESARROLLO DE LA METODOLOGÍA

El proceso a seguir era sencillo, únicamente consistía en elaborar amasadas de hormigón en la amasadora de 15 litros de que dispone el laboratorio. De cada amasada se realizaban dos probetas cilíndricas de 15 cm de diámetro por 30 cm de altura para su rotura a los 28 días. Para llevar a cabo una serie completa de amasadas era necesario realizar 9 amasadas, una para la dosificación inicial (variación del agua = 0%) y luego otras 8 amasadas para las variaciones de agua que iban desde -1,5%, -3%, -4,5%. -6% a sus análogas positivas.

Con esas 9 amasadas obteníamos una serie completa, pero para que los resultados fuesen fiables fue preceptivo elaborar un total de tres series de 9 amasadas mas 10 amasadas complementarias que se tuvieron que repetir por dispersarse mucho de el resto de resultados.

De cada una de las amasadas, se realizaban los ensayos de Ecurrimiento, Anillo Japonés y Embudo en V. También se realizaban 2 probetas por amasada las cuales se conservaron en la cámara húmeda durante 28 días para su posterior rotura a compresión. El procedimiento de dichos ensayos se desarrolla en los anejos del presente proyecto.

Se anotaban todos los resultados obtenidos en cada uno de los ensayos, para con su análisis poder justificar y sacar las conclusiones oportunas a cerca de su robustez. También se realizaban fotos, las cuales servirían de información visual, muy útil en este tipo de ensayos.

4.2.1. Explicación para la elaboración de una amasada

En primer lugar se sacaba la humedad de las arenas, tanto la del 0/4 como la del 0/2. Siempre se disponía dentro del laboratorio de la suficiente cantidad de arena a utilizar en un día, puesto que entrar arena de fuera suponía cambios muy significativos de la humedad. El procedimiento para sacar la humedad era sencillo, primero removíamos toda la arena para compensar las posibles variaciones de humedad, a continuación pesábamos únicamente la sartén (R), a continuación pesábamos la sartén + una muestra de aprox. 100 g de arena húmeda (R+M+A), y por ultimo tras secar la muestra

pesábamos la sartén mas la muestra seca (R+M) y realizábamos la siguiente operación:

$$\% \text{humedad de la arena} = 100 \times A/M$$

A este resultado le restábamos siempre un 1% de agua que es la que se considera intrínseca en el árido.

En el caso de la grava únicamente teníamos la precaución de que se mantuviese húmeda, para ello se humedecía con la manguera a ser posible a ultimas horas de la tarde del día anterior.



Tras obtener la humedad nos dirigíamos a la tabla de Excel donde disponíamos de la dosificación y le aplicábamos la humedad obtenida, dicha tabla estaba programada para realizar los ajustes necesarios y darnos la dosificación corregida.

Una vez corregida la dosificación con la humedad de ese día y obtenidas también el resto de dosificaciones para 15 litros de los diferentes porcentajes de agua, nos disponíamos a pesar las cantidades de todos los componentes y a echarlos en la amasadora. El proceso era el siguiente:

1. Pesábamos los áridos y el cemento y los vertíamos en la amasadora, hasta el punto de que se homogeneizaran.
2. Añadíamos la mitad del agua de amasado.
3. La otra mitad, la mezclábamos con el superplastificante y la vertíamos al minuto de haber vertido la primera mitad.
4. A los 4 minutos de haber vertido toda el agua, echábamos el retenedor de agua (AMV).

5. Dejábamos amasar durante otros 4 minutos. Y aproximadamente a los 9 minutos deteníamos la amasadora y realizábamos los ensayos.





Una vez realizados los tres ensayos llenábamos dos probetas cilíndricas y el hormigón que sobraba lo vertíamos en el contenedor.





Dichas probetas se marcaban y se cubrían con bolsas. Se desencofraban al día siguiente, trasladándose a la cámara húmeda durante 28 días.





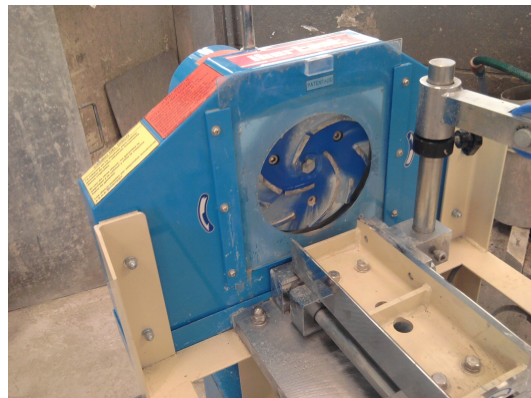
Por último, y no menos importante, había que limpiar bien todos los instrumentos y aparatos utilizados para poder ser utilizados con la misma fiabilidad en otras ocasiones, además de dejar todo en sus respectivos lugares.

4.2.2. Explicación para romper a compresión las probetas a 28 d

Tras haber transcurrido 28 días, nos dirigíamos a la cámara húmeda, sacábamos las probetas y nos dirigíamos a pulir sus caras para poder realizar la rotura a compresión de una manera fiable.

Las caras se pulían con la ayuda de una maquina, que a través de un disco situado sobre un brazo con un movimiento ondulatorio simple, lograba pulir la probeta de manera muy eficaz. Una vez teníamos todas las probetas listas nos dirigimos a la maquina para realizar las compresiones. De cada una de las compresiones anotábamos la fuerza que se aplicaba hasta el punto de rotura, y esta fuerza la obteníamos tanto en kN como en MPa. Había que tener en cuenta las probetas que no habían salido bien ejecutadas (como coqueras, exceso de poros, etc.), las cuales se desechaban por dar valores poco fiables.

Una vez rotas todas las probetas, tirábamos los desechos al contenedor y limpiábamos bien toda la zona.





5. ENSAYOS, RESULTADOS Y ANÁLISIS

5.1. INTRODUCCIÓN

En este apartado, desarrollaremos los ensayos que se han utilizando, indicando los resultados obtenidos y analizaremos minuciosamente dichos resultados con la ayuda de la normativa aplicable (EHE-08, Directrices Europeas para el HAC y las Normas UNE correspondientes) y con gráficas, tablas, estadillos y demás sistemas de análisis.

El procedimiento que se seguirá en este apartado será en primer lugar el análisis de los áridos, a continuación se analizaran los resultados del HAC en estado fresco y por ultimo se analizara el HAC en estado endurecido.

5.2. ÁRIDOS

Los áridos, además de cumplir con las especificaciones de la HEH-08 (Anejo 17, Capítulo VI) y las especificaciones de las DEHAC, deberán ajustarse a las normas UNE siguientes:

- UNE-EN 12620: 2003 ÁRIDOS PARA HORMIGÓN
- UNE 146121: 2000 ÁRIDOS PARA LA FABRICACIÓN DE HORMIGONES. ESPECIFICACIONES PARA LOS ÁRIDOS UTILIZADOS EN LOS HORMIGONES DESTINADOS A LA FABRICACIÓN DE ELEMENTOS DE HORMIGÓN ESTRUCTURAL.
- UNE-EN 932-1:1997 PARTE 1: MÉTODOS DE MUESTREO.

Nota: existen más normas UNE las cuales hacen referencia a los áridos como son las normas UNE para determinar las propiedades geométricas, normas UNE para determinar propiedades mecánicas y física, normas UNE para determinar propiedades térmicas y de alteración, y normas UNE para determinar propiedades químicas. Pero dichas normas no son competencia del estudio de este proyecto.

Tras realizar el análisis granulométrico de los áridos, tal y como se explica en el apartado 3.2.2 del presente proyecto, los resultados obtenidos fueron los siguientes:

GRANULOMETRÍA ÁRIDOS CANTERA CARASOLES	
FECHA ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO:	11/05/11
ÁRIDO	Grava 6/12

TAMIZ MM	grs Retenidos	% R	% RAC	% PASA
63				
50				
31,5				
22,5				
20				
16				
14				
12,5	226,20	6,71	6,71	93,29
10	1.940,10	57,59	64,30	35,70
8	1.033,40	30,68	94,98	5,02
6,3	156,00	4,63	99,61	0,39
4	6,40	0,19	99,80	0,20
2	0,40	0,01	99,81	0,19
1	0,40	0,01	99,82	0,18
0,5	0,40	0,01	99,84	0,16
0,25	0,40	0,01	99,85	0,15
0,125	2,00	0,06	99,91	0,09
0,063	3,10	0,09	100,00	0,00
Pasa				

MÓDULO GRANULOMÉTRICO	6,94
PESO MUESTRA	3409,7 g
PESO SECO	3368,8 g
Contenido de finos	1,20 g

GRANULOMETRÍA ÁRIDOS CANTERA CARASOLES	
FECHA ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO:	11/05/11
ÁRIDO	Arena 0/4

TAMIZ MM	grs Retenidos	% R	% RAC	% PASA
63				
50				
31,5				
22,5				
20				
16				
14				
12,5				
10				
8				
6,3				
4	0,70	0,09	0,09	99,91
2	220,70	29,50	29,59	70,41
1	163,00	21,79	51,38	48,62
0,5	91,30	12,20	63,59	36,41
0,25	65,00	8,69	72,27	27,73
0,125	57,50	7,69	79,96	20,04
0,063	54,70	7,31	87,27	12,73
Pasa	95,23	12,73		
	652,90			

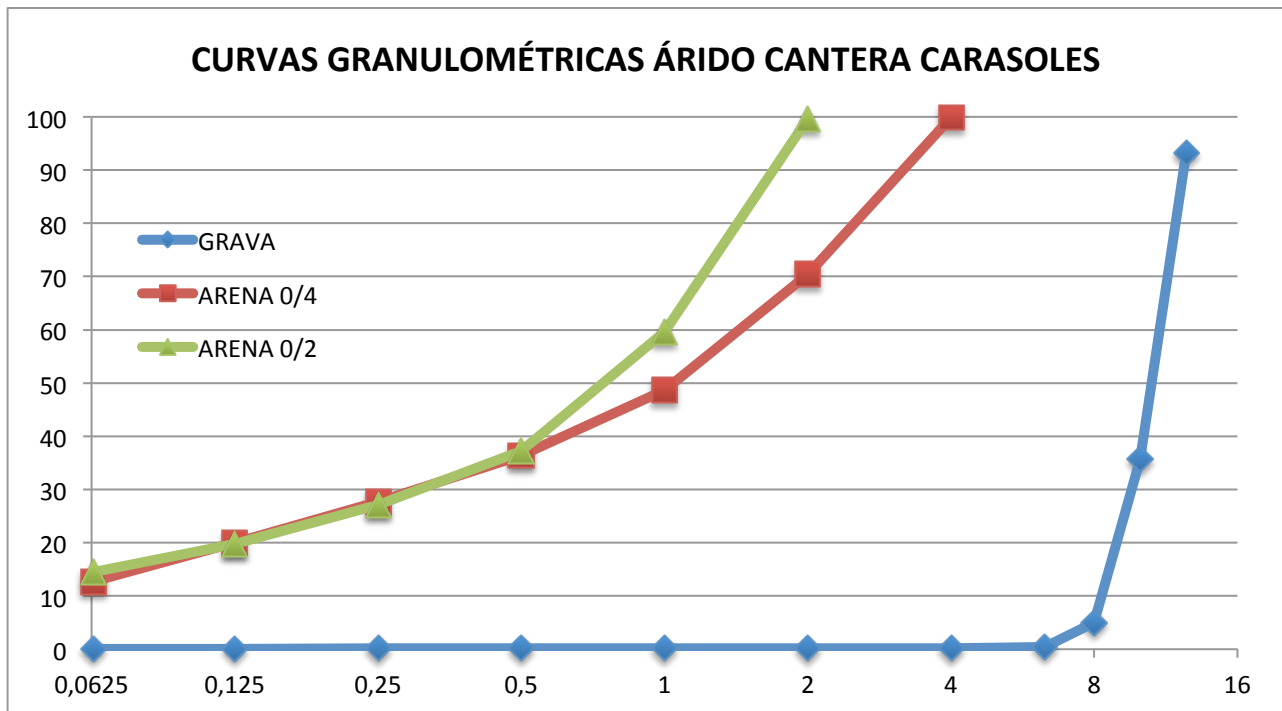
MÓDULO GRANULOMÉTRICO	2,97
PESO MUESTRA	1549,7 g
PESO SECO	1352,3 g
Contenido de finos	12,74 g

GRANULOMETRÍA ÁRIDOS CANTERA CARASOLES	
FECHA ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO:	11/05/11
ÁRIDO	Arena 0/2

TAMIZ MM	grs Retenidos	% R	% RAC	% PASA
63				
50				
31,5				
22,5				
20				
16				
14				
12,5				
10				
8				
6,3				
4				
2	1,90	0,37	0,37	99,63
1	206,00	40,05	40,42	59,58
0,5	115,10	22,38	62,80	37,20
0,25	51,60	10,03	72,84	27,16
0,125	37,80	7,35	80,19	19,81
0,063	27,60	5,37	85,55	14,45
Pasa	74,31	14,45		
	440,00			

MÓDULO GRANULOMÉTRICO	2,57
PESO MUESTRA	1928,6 g
PESO SECO	1649,8 g
Contenido de finos	14,46 g

Una vez realizados dichos análisis, se realizaron las diferentes graficas granulométricas de cada uno de los áridos para poder determinar visualmente la curva granulométrica que forma cada árido.



- Arena 0/2: Como podemos observar se trata de una granulometría continua con un modulo de granulométrico de 2,57. El contenido de finos es de 14,46 g.
- Arena 0/4: La curva que describe es semejante a la arena 0/2 en su tramo inicial, eso indica que poseen unos porcentajes muy semejantes de arena fina (< 0,5 mm), se diferencian mas a partir del tamiz 0,5 mm en que el % que pasa de arena 0/4 va siendo menor hasta alcanzar un tamaño máximo de 4mm. El modulo granulométrico de esta arena es de 2,97, y su contenido de finos es de 12,74 g.
- Grava 6/12: Se trata de una granulometría la cual describe una curva con un contenido elevado de árido grueso (tamaño máximo 12mm) y su contenido de finos es insignificante. El modulo granulométrico de esta curva es 6,94.

5.2.1. Análisis de las arenas 0/2 y 0/4

Las arenas además de cumplir con toda la normativa citada anteriormente, es importante que se ajusten a los husos granulométricos que confiere la EHE-08 para las arenas.

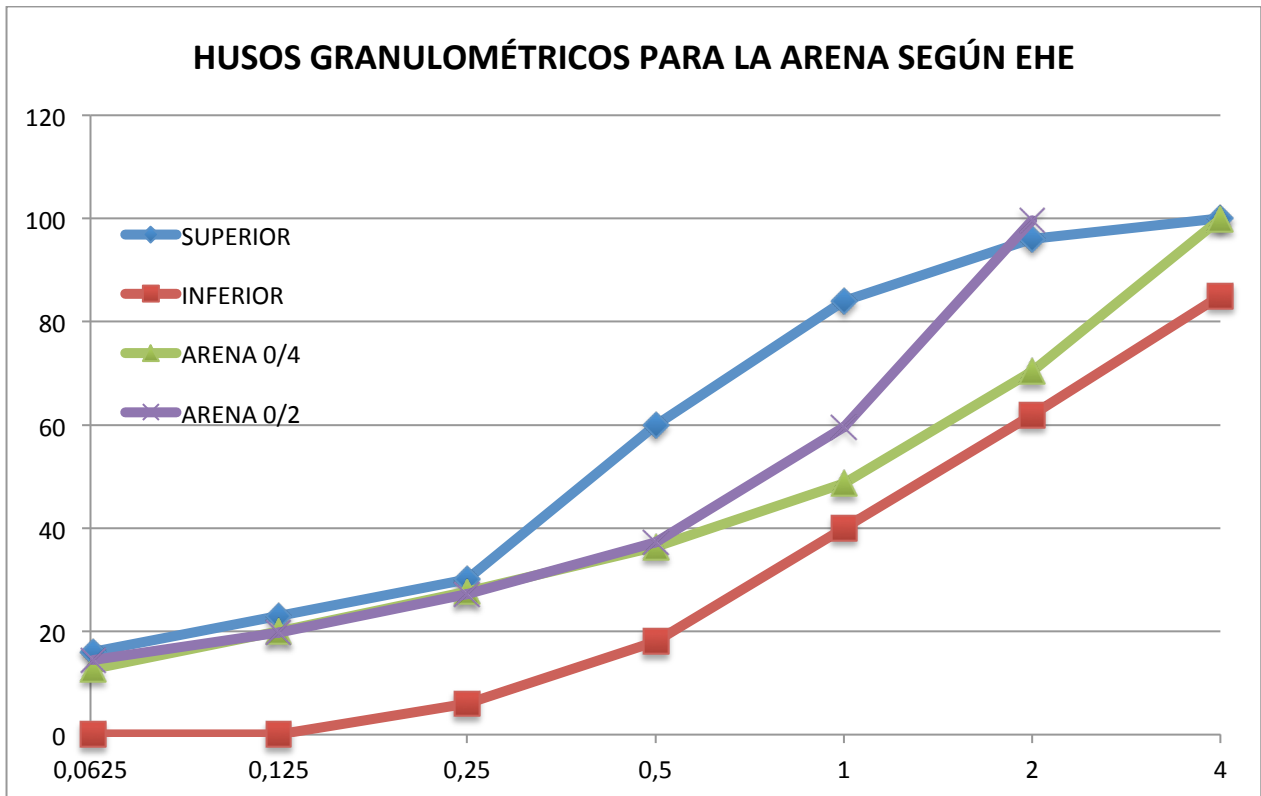
Estos husos vienen recogidos en las tabla siguiente:

HUSOS GRANULOMETRICOS PARA LA ARENA SEGÚN EHE				
TAMIZ mm	LIMITES			
	SUPERIOR		INFERIOR	
	% RAC	% PASA	% RAC	% PASA
4	0	100	15	85
2	4	96	38	62
1	16	84	60	40
0,5	40	60	82	18
0,25	70	30	94	6
0,125	77	23	100	0
0,063	84	16	100	0

La siguiente tabla recoge los % que pasan por cada tamiz tanto de los husos granulométricos de la EHE-8 como de las arenas de que disponemos:

TAMIZ mm	SUPERIOR	INFERIOR	ARENA 0/4	ARENA 0/2
	% PASA	% PASA	% PASA	% PASA
4	100	85	99,91	
2	96	62	70,41	99,63
1	84	40	48,62	59,58
0,5	60	18	36,41	37,20
0,25	30	6	27,73	27,16
0,125	23	0	20,04	19,81
0,063	16	0	12,73	14,45

En la grafica siguiente se observa como las arenas de las que disponemos se encuentran dentro de los limites de los husos granulométricos que especifica la EHE-08 por lo que ambas arenas son aptas para formar parte de la composición granulométrica del HAC que pretendemos estudiar.



5.2.2. Análisis de la grava 6/12

Las gravas al igual que las arenas deberán cumplir también con toda la normativa citada anteriormente. La curva granulométrica de la grava esta definida en el punto 5.2. de este proyecto.

Como recordatorio cabria mencionar que era importante humedecer estos áridos puesto que perdían la humedad con gran facilidad, y se corría el riesgo de que absorbieran agua de amasado, lo cual perjudicaría seriamente el proceso.

5.2.3. Composición del árido

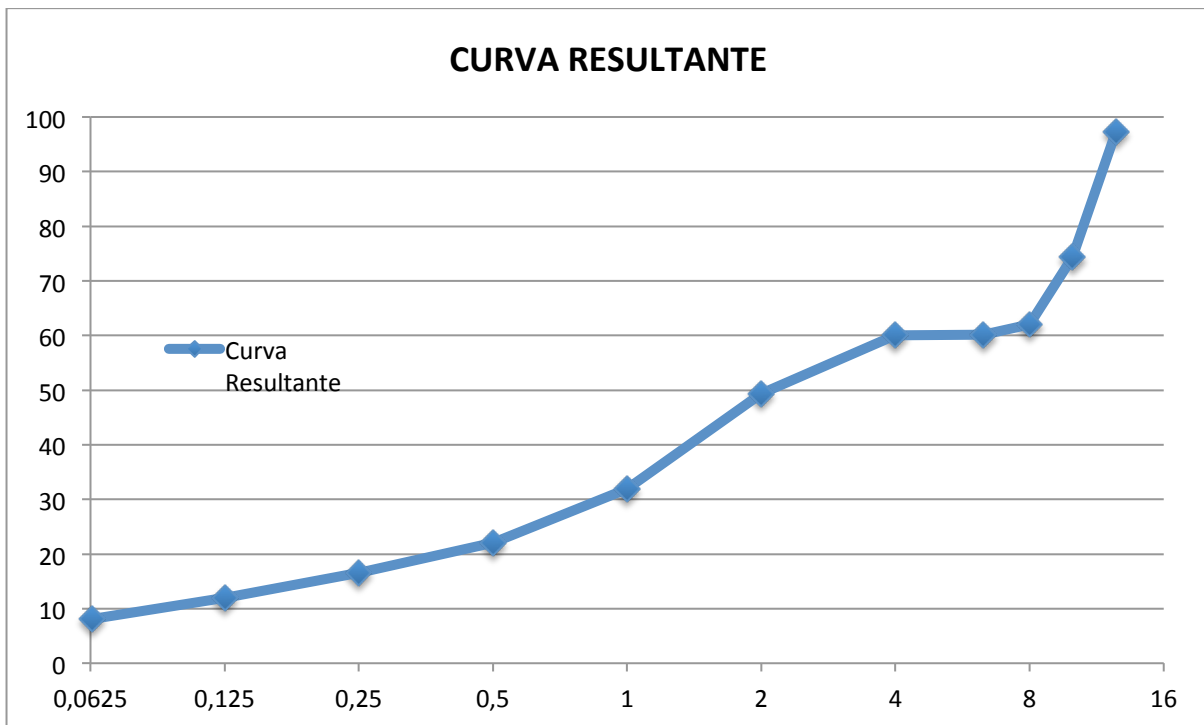
La composición del árido resultante se hizo a partir de la dosificación de la cual partíamos. A dicha dosificación se le realizaron unos pequeños ajustes los cuales por el método de tanteos se obtuvieron los siguientes porcentajes:

- Grava 6/12 40%
- Arena 0/4 36%
- Arena 0/2 24%

Con estos porcentajes de cada árido, obtenemos los siguientes valores:

TAMIZ mm	GRAVA		ARENA 0/4		ARENA 0/2		CURVA RESULTANTE	
	% PASA	% RAC	% PASA	% RAC	% PASA	% RAC	% PASA	% RAC
20								
16								
14								
12,5	93,29	6,71	100,00	0,00	100,00	0,00	97,31	2,69
10	35,70	64,30	100,00	0,00	100,00	0,00	74,28	25,72
8	5,02	94,98	100,00	0,00	100,00	0,00	62,01	37,99
6,3	0,39	99,61	100,00	0,00	100,00	0,00	60,16	39,84
4	0,20	99,80	99,91	0,09	100,00	0,00	60,05	39,95
2	0,19	99,81	70,41	29,59	99,63	0,37	49,33	50,67
1	0,18	99,82	48,62	51,38	59,58	40,42	31,87	68,13
0,5	0,16	99,84	36,41	63,59	37,20	62,80	22,10	77,90
0,25	0,15	99,85	27,73	72,27	27,16	72,84	16,56	83,44
0,125	0,09	99,91	20,04	79,96	19,81	80,19	12,01	87,99
0,063	0,00	100,00	12,73	87,27	14,45	85,55	8,05	91,95

Con lo que la curva resultante sería la siguiente:



Dicha curva presenta un pequeño escalón entre los tamices de 4 a 6,3 mm, por tanto se trataría de una granulometría discontinua la cual presenta ausencia de granos intermedios en este intervalo. Esta discontinuidad es poco significativa con lo cual no tiene el porque de producir errores en presente estudio.

El modulo granulométrico de la composición de árido resultante es de 4,21.

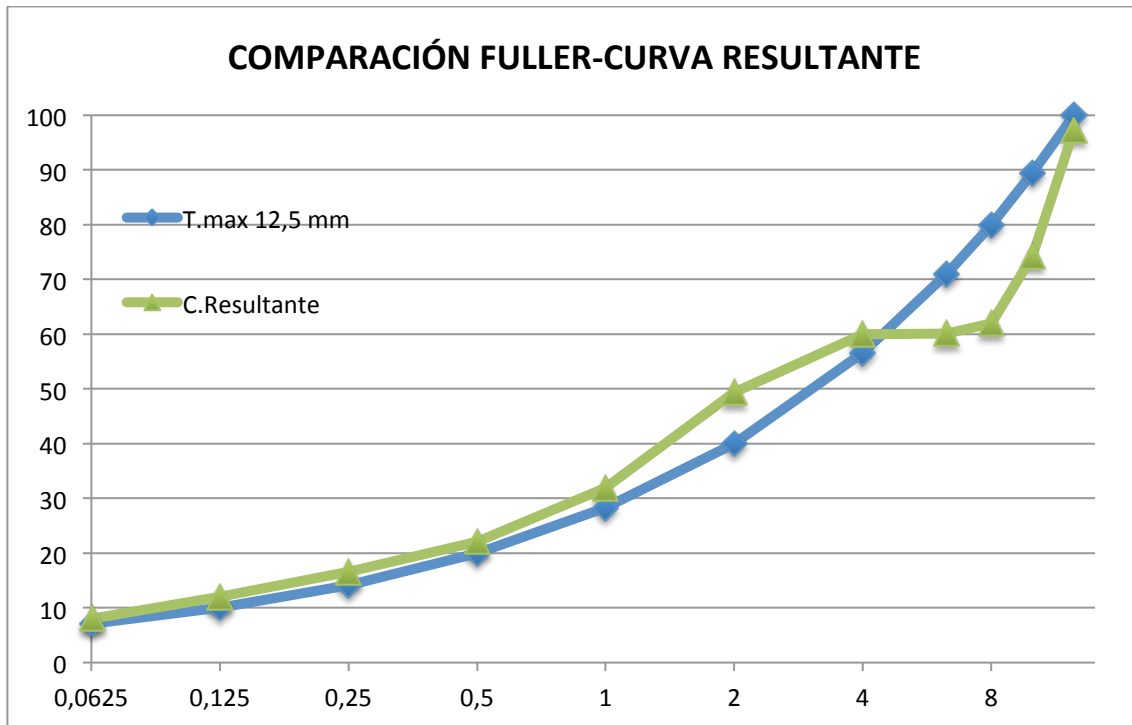
Como aclaración cabe decir que las granulometrías discontinuas permiten obtener hormigones más compactos y más económicos, pero son más sensibles a las variaciones de dosificación o relación A/C. Exige un mayor control de su dosificación, pero el control de su granulometría es mucho más simple que el de las granulometrías continuas.

Para justificar que la curva resultante era coherente y que se ajustaba a algún tipo de curva teórica como puedan ser las curvas teóricas de Fuller o de Bolomey, o a algún tipo de Huso granulométrico, lo que se hizo fue calcular la curva teórica de Fuller para tamaño máximo de árido 12,5 y un modulo granulométrico de 4,51 y compararla con nuestra curva resultante.

La siguiente tabla contiene los valores de la curva teórica de Fuller:

TAMIZ mm	FULLER T.máx. 12,5 mm	
	% PASA	%RAC
12,5	100,00	0,00
10	89,44	10,56
8	80,00	20,00
6,3	70,99	29,01
4	56,57	43,43
2	40,00	60,00
1	28,28	71,72
0,5	20,00	80,00
0,25	14,14	85,86
0,125	10,00	90,00
0,063	7,10	92,90

La siguiente tabla contiene la comparación entre la curva teórica de Fuller y nuestra curva resultante:



Como se puede observar en la gráfica, nuestra curva resultante se ajusta bien a la curva teórica de Fuller, la mayor discrepancia la podemos encontrar en el escalón comentado anteriormente, pero podríamos decir que está compensado puesto que de los tamices 0,5 a 4 la curva resultante se encuentra por encima de la curva teórica de Fuller, y de los tamices 4 a 12,5 se encuentra por debajo.

5.3. EL HAC EN ESTADO FRESCO

Los ensayos que se realizaron al HAC en estado fresco fueron los ensayos de escurrimiento, anillo japonés y embudo en V, dichos ensayos se encuentran desarrollados en los anejos del presente proyecto y viene recogidos en las normas UNE siguientes:

- UNE 83361 Ensayo del escurrimiento
- UNE 83362 Ensayo del escurrimiento con anillo japonés
- UNE 83364 Ensayo del embudo en V

Además de las especificaciones de estas normas, el HAC deberá de cumplir también con lo dispuesto en el EHE-08 y en las Directrices Europeas para HAC.

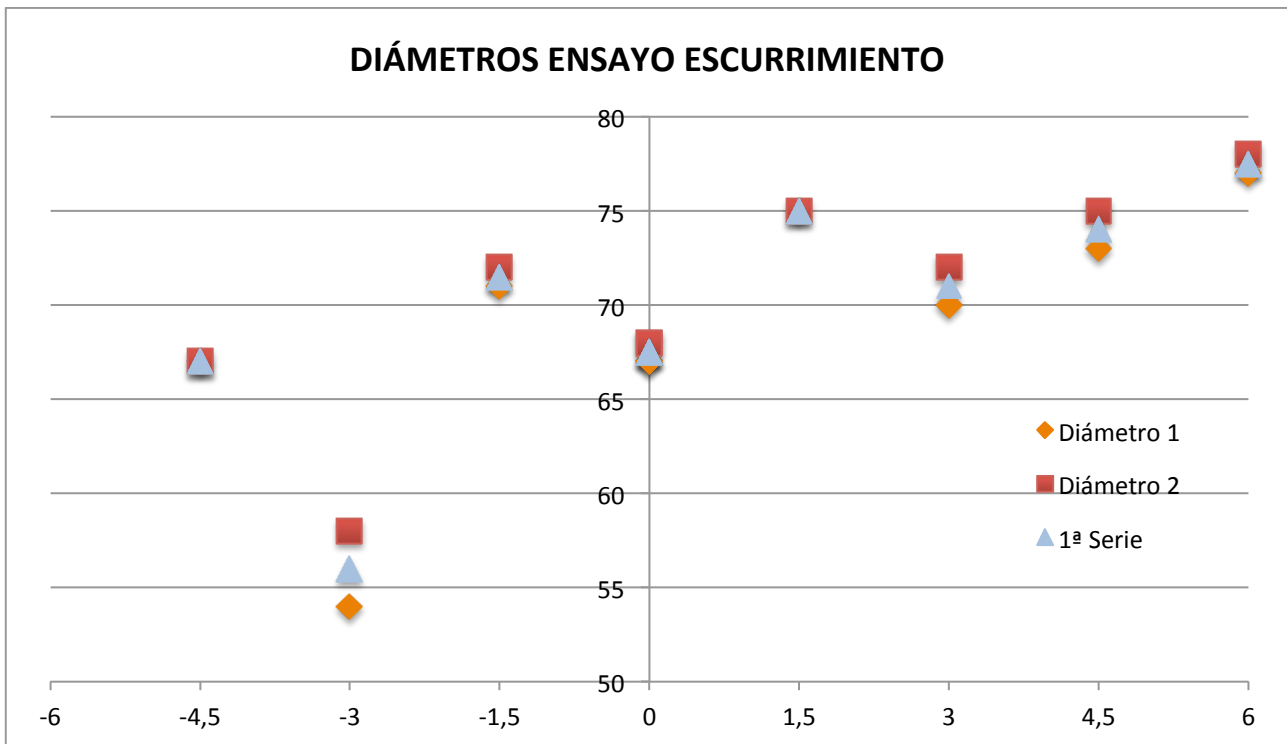
5.3.1. Ensayos, resultados, y análisis iniciales

5.3.1.1. 1ª Serie de amasadas (16/05/2011)

El estadillo con los resultados correspondientes a esta serie de amasadas se haya adjunto en los anejos del presente proyecto.

Pinche aquí para dirigirse al estadillo.

Para el estudio y análisis de los resultados fue preceptivo elaborar gráficas que representaran estos resultados, las cuales nos facilitarían la interpretación de dichos resultados. En este caso únicamente nos basto con representar gráficamente los diámetros obtenidos en el ensayo de escurrimiento. La gráfica con dichos valores es la siguiente:



La gráfica anterior contiene los siguientes valores numéricos:

% de Agua	Ø 1 (cm)	Ø 2 (cm)	1ª media Ø
0	67	68	67,5
1,5	75	75	75
3	70	72	71
4,5	73	75	74
6	77	78	77,5
-6			
-4,5	67	67	67
-3	54	58	56
-1,5	71	72	71,5

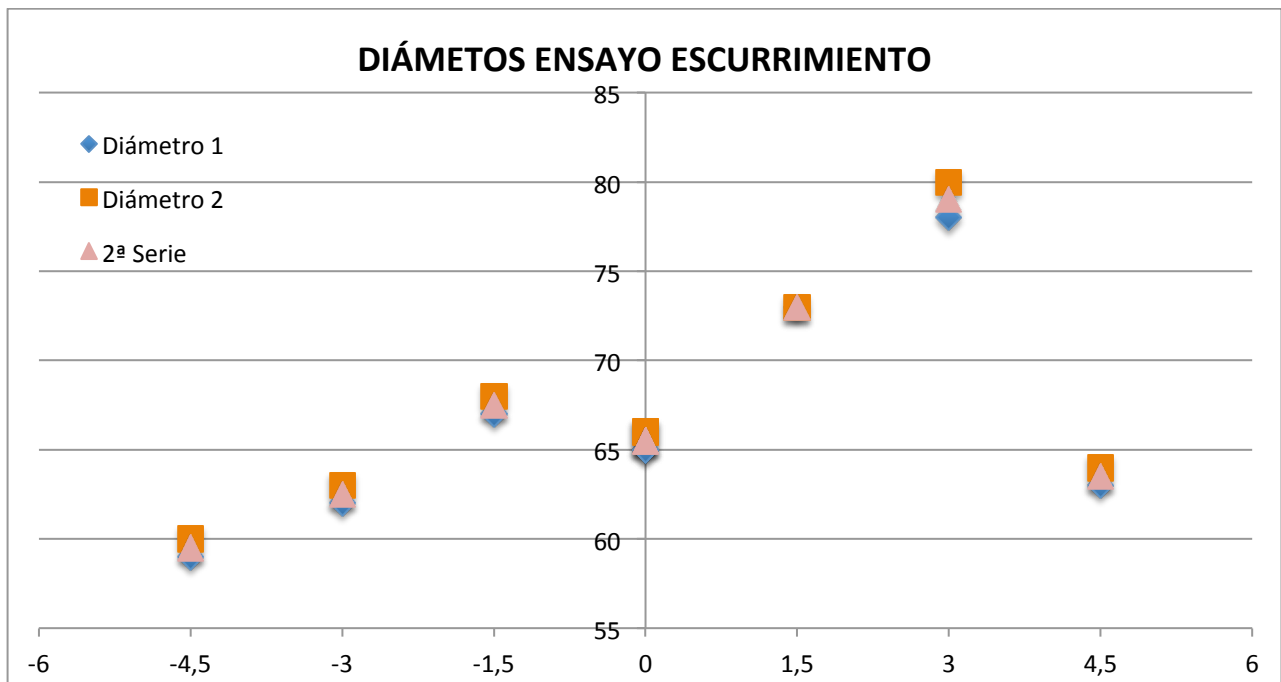
Como se puede observar en la gráfica hay valores que se dispersan mucho respecto a la línea de tendencia, estos valores son los correspondientes a las amasadas de -1,5% -3% -6% y +1,5%. Por tanto estas amasadas fueron repetidas y nuevamente analizadas como mas adelante veremos.

5.3.1.2. 2ª Serie de amasadas (18/05/2011)

El estadillo con los resultados correspondientes a esta serie de amasadas se haya adjunto en los anejos del presente proyecto.

Pinche aquí para dirigirse al estadillo.

Del mismo modo que en la primera serie de amasadas, se realizo la gráfica representativa de los diámetros que se obtuvieron en el ensayo de escurrimiento. La gráfica con dichos valores es la siguiente:



La gráfica anterior contiene los siguientes valores numéricos:

% de Agua	Ø 1 (cm)	Ø 2 (cm)	2ª media Ø
0	65	66	65,5
1,5	73	73	73
3	78	80	79
4,5	63	64	63,5
6			
-6			
-4,5	59	60	59,5
-3	62	63	62,5
-1,5	67	68	67,5

Como se puede observar en la gráfica los valores que mas se dispersan a la línea de tendencia son los que corresponden a las amasadas de 0% 3% 4,5% y -4,5%. Los dos valores extremos $\pm 6\%$ directamente se repitieron porque durante la ejecución de la segunda serie de amasadas no fueron preceptivos realizarlos puesto que los resultados de los dos últimos valores que les precedían ya se dispersaban de los límites que nos marca la normativa. El resto de amasadas simplemente se repitieron por dispersarse de la línea de tendencia además de que en algunos casos la masa de hormigón producía evidencias de no cumplir con las características de un HAC como eran la segregación y la exudación.

5.3.1.3. 3ª Serie de amasadas (08/06/2011)

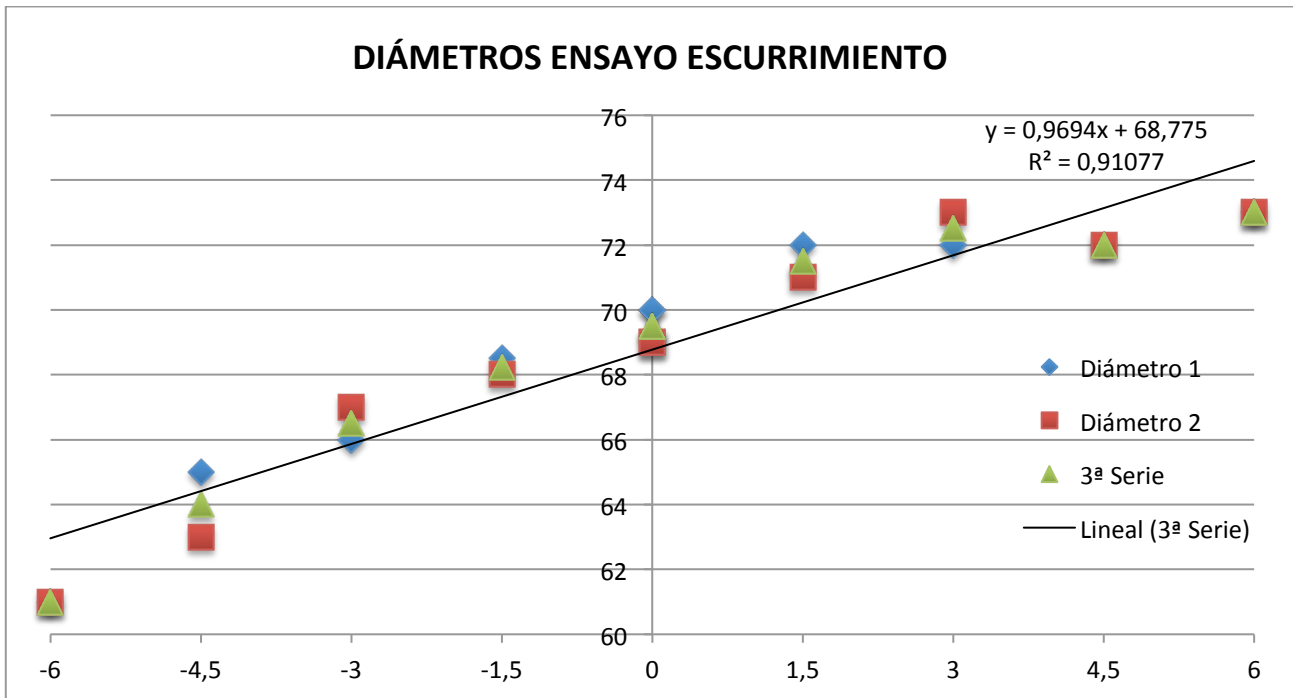
En esta ultima serie de amasadas, no fue necesario repetir ninguna amasada, puesto que los resultados fueron coherentes y se ajustaban a lo esperado.

El estadillo con los resultados correspondientes a esta serie de amasadas se haya adjunto en los anejos del presente proyecto.

[Pinche aquí para dirigirse al estadillo.](#)

En este caso si que se analizaron todos los resultados correspondientes a los diferentes ensayos, al ver que, tras analizar los resultados correspondientes a los diámetros de la torta en el ensayo de escurrimiento, se ajustaban a su línea de tendencia. En este apartado únicamente analizaremos los resultados correspondientes a los diámetros de la torta del ensayo de escurrimiento, el resto de resultados y análisis se desarrollaran a más adelante junto a las dos primeras series de amasadas corregidas.

La siguiente gráfica correspondientes a los diferentes diámetros de torta en el ensayo de escurrimiento:



La gráfica anterior contiene los siguientes valores numéricos:

% de Agua	Ø 1 (cm)	Ø 2 (cm)	3ª media Ø
0	70	69	69,5
1,5	72	71	71,5
3	72	73	72,5
4,5	72	72	72
6	73	73	73
-6	61	61	61
-4,5	65	63	64
-3	66	67	66,5
-1,5	68,5	68	68,25

Como se puede observar en la gráfica, todos los valores se aproximan a la línea de tendencia, por lo tanto, no fue necesario repetir ninguna amasada de esta serie.

Analizando visualmente su comportamiento frente a la exudación y segregación, se puede decir que para los valores negativos, es decir con menos agua de amasado, las tortas de HAC no segregaban ni producían exudación (imagen 1), y en el caso de los valores positivos y teniendo en cuenta los resultados de esta 3ª serie de amasadas, los resultados fueron muy óptimos puesto que únicamente se produjeron unas leves segregaciones en los valores más altos de 4,5% y 6% (imagen 2).



Imagen 1



Imagen 2

5.3.1.4. Serie de repetición de amasadas (09/06/2011)

Se llevaron a cabo la repetición de las amasadas citadas anteriormente, por los motivos ya expuestos y con el fin de mejorar y de ajustar los resultados de los ensayos a unos valores coherentes.

Para desarrollar los resultados y análisis todas estas amasadas se expondrán igual que se han expuestos anteriormente pero en estos casos las series de amasadas con sus estadillos correspondientes se encuentran ya corregidas. Además se analizaran todos los resultados obtenidos de todos los ensayos realizados en cada una de las amasadas, puesto que ahora ya procede su estudio y análisis más exhaustivo a sabiendas de que los resultados de los diámetros en el ensayo de escurrimiento son coherentes.

El estadillo con los resultados de la repetición de estas amasadas se haya adjunto a los anejos del presente proyecto.

[Pinche aquí para dirigirse al estadillo.](#)

5.3.2. Ensayos, resultados, y análisis corregidos

5.3.2.1. 1ª Serie de amasadas corregidas (16/05/2011 + 09/06/2011)

El estadillo con los resultados correspondientes a esta serie de amasadas se haya adjunto en los anejos del presente proyecto.

[Pinche aquí para dirigirse al estadillo.](#)

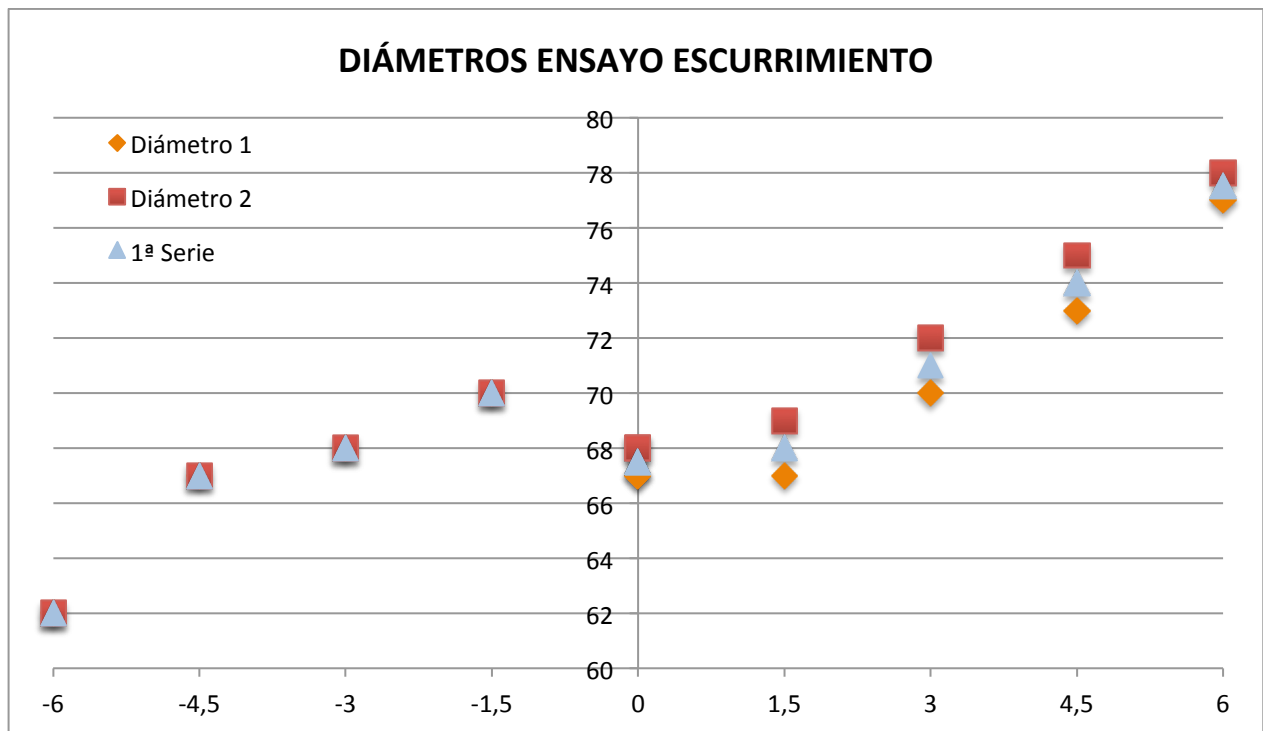
El orden a seguir para el estudio y análisis de todos los resultados en esta serie de amasadas y el las siguientes será el siguiente:

- 1) Ensayo de escurrimiento:
 - i) Diámetros de las tortas
 - ii) Tiempos del ensayo
- 2) Ensayo anillo japonés:
 - i) Diámetros de las tortas
 - ii) Tiempos de escurrimiento
 - iii) Coeficientes de bloqueo
- 3) Ensayo embudo en V
 - i) Tiempos de flujo

Ensayo de escurrimiento

- Diámetros de las tortas

Tras añadir las amasadas repetidas a los resultados iniciales, se obtuvieron los siguientes resultados. La gráfica representativa de los diámetros de este ensayo es la siguiente:



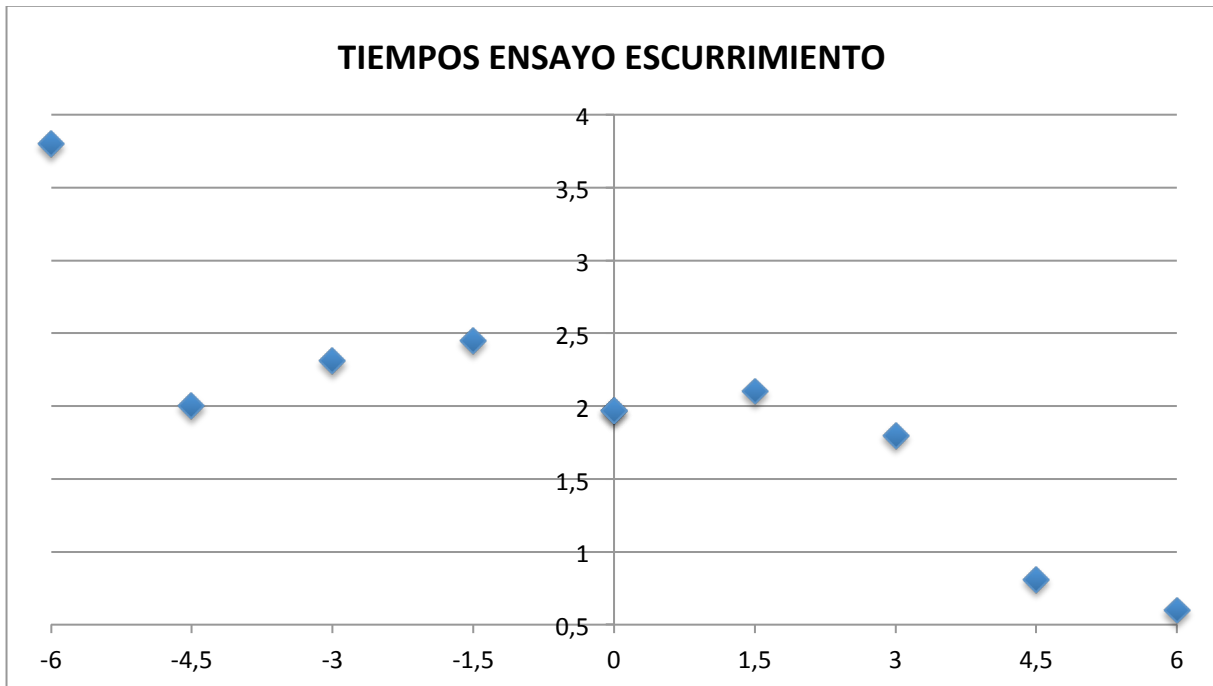
La gráfica anterior contiene los siguientes valores numéricos:

% de Agua	Ø 1 (cm)	Ø 2 (cm)	1ª media Ø
0	67	68	67,5
1,5	67	69	68
3	70	72	71
4,5	73	75	74
6	77	78	77,5
-6	62	62	62
-4,5	67	67	67
-3	68	68	68
-1,5	70	70	70

Como se puede observar en la gráfica los valores se encuentran próximos a la línea de tendencia. También podemos observar que los valores que corresponden a los % de agua negativos son un poco mas altos en relación con el resto de resultados, pero hay que tener en cuenta que estas amasadas se realizaron un día diferente, la cual cosa supuso pequeñas variaciones, principalmente en la humedad de los áridos o la temperatura ambiental, que por pequeñas que sean, siempre producen alteraciones en los resultados.

- Tiempos del ensayo

La gráfica representativa de los tiempos en el ensayo de escurrimiento es la siguiente:



La gráfica anterior contiene los siguientes valores numéricos:

% AGUA	TIEMPO (seg)
0	1,97
1,5	2,1
3	1,8
4,5	0,81
6	0,6
-6	3,8
-4,5	2
-3	2,31
-1,5	2,45

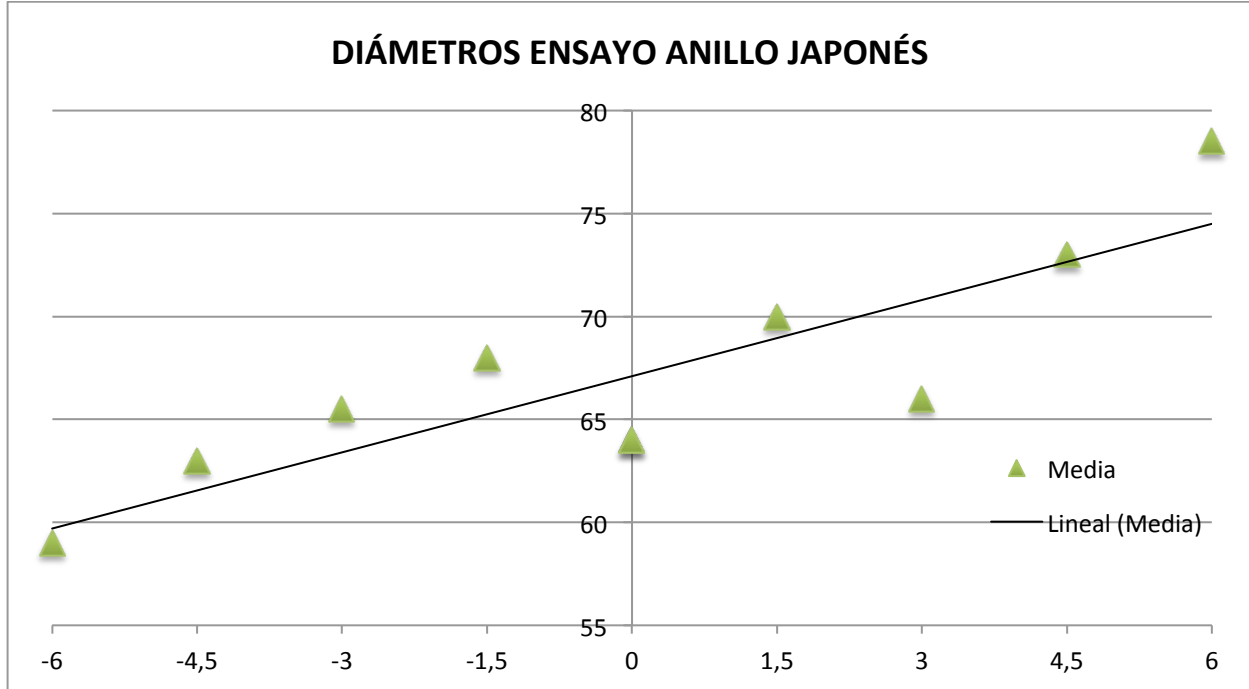
Como se puede observar, los tiempos de escurrimiento disminuyen a medida que aumentamos el % de agua de la dosificación. Es evidente que a más agua de amasado y con las mismas proporciones de superplastificante y AMV, la torta de HAC cada vez dará más fluida, con lo que escurrirá más rápidamente y también sufrirá más riesgo de segregación o exudación.

La mayor parte de los resultados se ajustan a la línea de tendencia, y la mayor discrepancia la encontramos en el valor de -4,5%, dicha discrepancia es debida a lo mismo que en el caso de los diámetros. Es decir, dicha amasada pertenece a la inicial, y la que le precede como la que le sigue fueron repetidas. Este hecho supone como se ha dicho antes, pequeñas variaciones principalmente en la humedad de los áridos, la cual cosa se ve repercutida sensiblemente en los resultados.

Ensayo del anillo japonés

- Diámetros de las tortas

Los resultados de los diámetros obtenidos en esta serie de amasadas vienen recogidos en la siguiente gráfica:



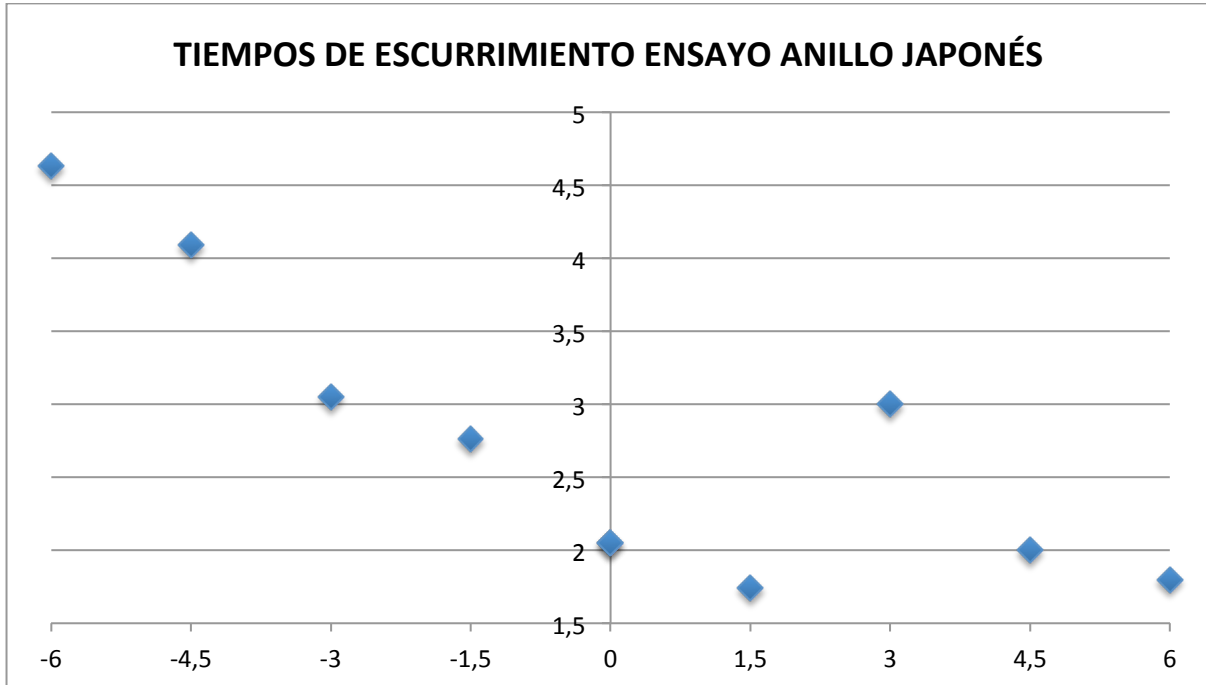
La gráfica anterior contiene los siguientes valores numéricos:

% AGUA	Ø 1 (cm)	Ø 2 (cm)	MEDIA
0	64	64	64
1,5	70	70	70
3	65	67	66
4,5	72	74	73
6	78	79	78,5
-6	59	59	59
-4,5	62	64	63
-3	65	66	65,5
-1,5	68	68	68

Como se puede observar en esta gráfica, pasa algo semejante a los diámetros de el ensayo de escurrimiento, es decir, los valores de las amasadas repetidas difieren de el resto de valores, pero todo ello se debe a lo explicado anteriormente. Además se puede decir que los valores obtenidos se encuentran próximos a la línea de tendencia que sigue la gráfica.

- Tiempos de escurrimiento

La gráfica representativa de los tiempos de escurrimiento es la siguiente:



La gráfica anterior contiene los siguientes valores numéricos:

% AGUA	TIEMPO (seg)
0	2,05
1,5	1,74
3	3
4,5	2
6	1,8
-6	4,63
-4,5	4,09
-3	3,05
-1,5	2,76

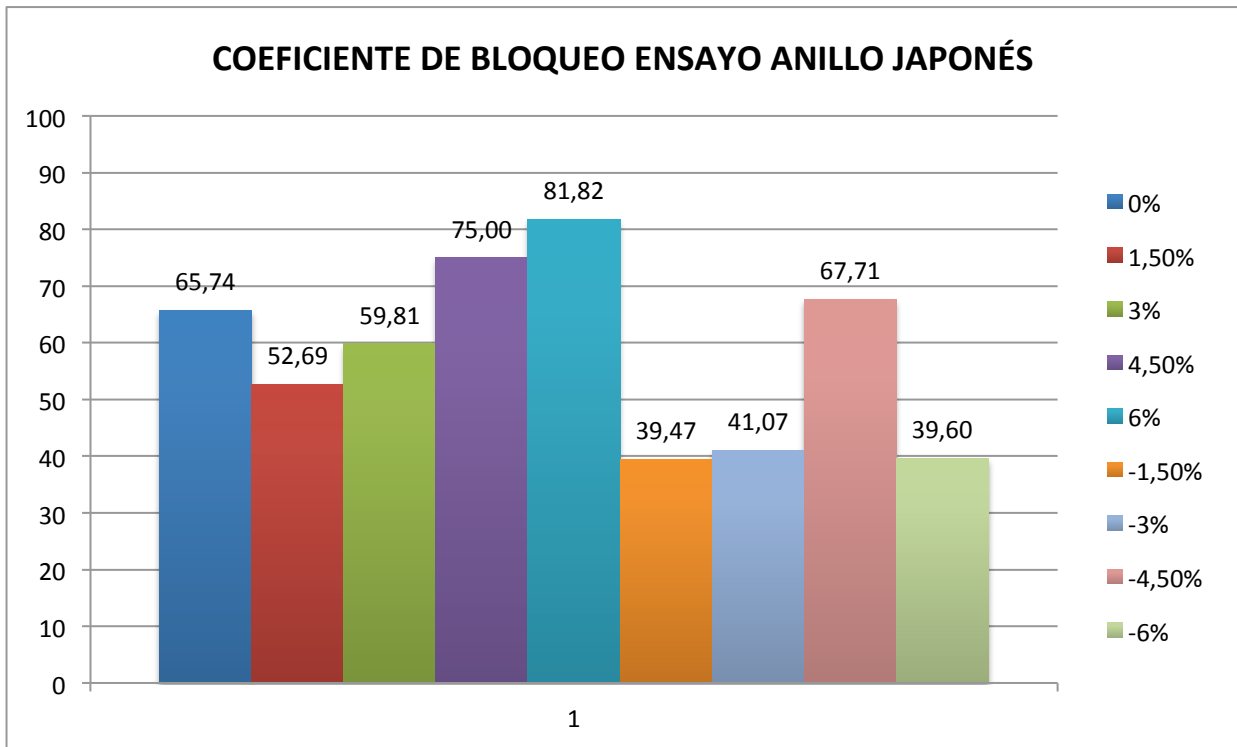
En este caso se aprecia lo mismo que el caso del ensayo de escurrimiento, y es que a medida que aumentamos la cantidad de agua de amasado, disminuyen los tiempos de escurrimiento. También podemos observar que, a pesar de que para realizar este ensayo se coloca un anillo con barras que teóricamente refrenan el avance de la masa de HAC, los tiempos son ligeramente mas altos con respecto a el ensayo de escurrimiento. Por ultimo cabria destacar la dispersión que se produjo en la amasada 3%, dicha amasada se dispersa notablemente de la línea de tendencia, este hecho se

debe principalmente a lo mismo que los anteriores casos de dispersiones, y es que al haber amasadas repetidas, estas fueron elaboradas en condiciones ligeramente variables, como pudo ser la humedad de los áridos, o la temperatura ambiental, etc.

- Coeficientes de bloqueo

Los coeficientes de bloqueo representan la resistencia al paso que supondrían las armaduras de una estructura. Dichos coeficientes se determinan a partir del ensayo del anillo japonés tal y como se describe en los anejos del presente proyecto.

La gráfica que representa dichos coeficientes es la siguiente:



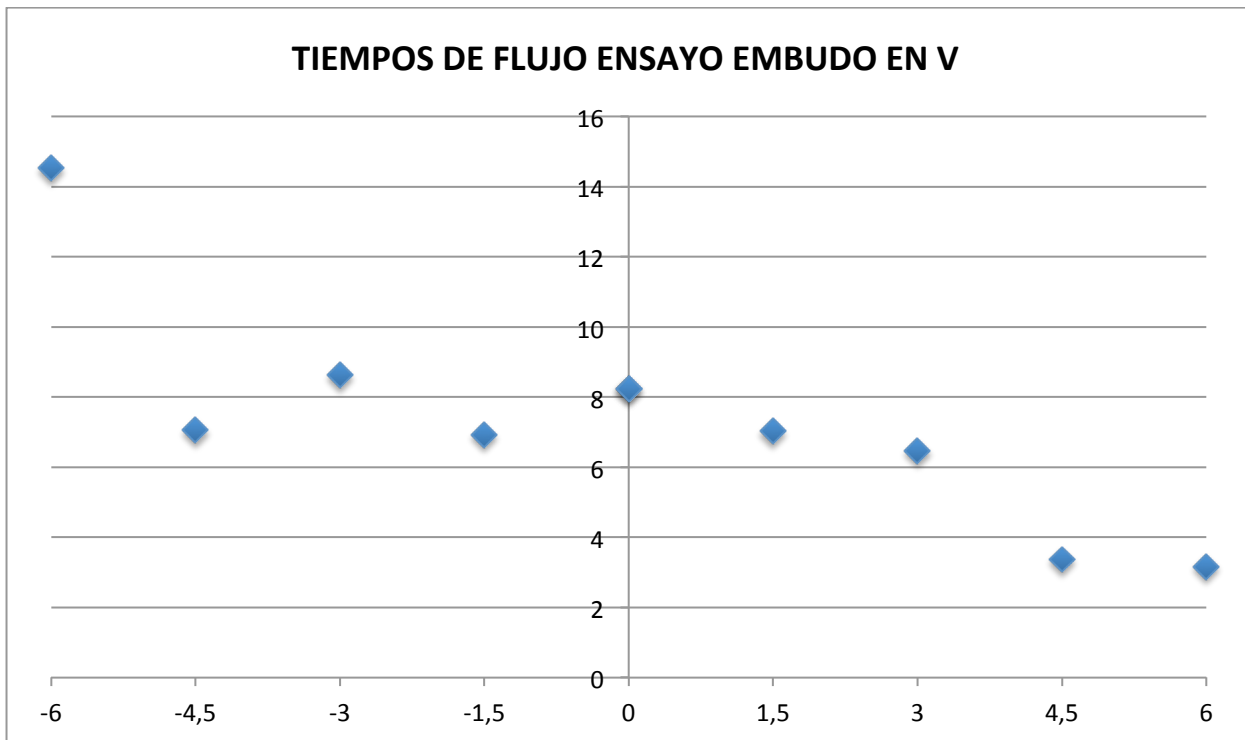
Como se observa en la gráfica a medida que aumentamos los porcentajes de agua de amasado, los coeficientes de bloqueo aumentan, y para los valores negativos de % de agua los resultados de los coeficientes son mucho menores, por debajo del 50%, excepto en el caso de la amasada -4,5% de agua, la cual fue una amasada no repetida y los resultados difieren de sus compañeras las cuales si que fueron repetidas.

Ensayo del embudo en V

- Tiempos de flujo

El ensayo del embudo en V evalúa la capacidad de relleno y la capacidad de paso por aberturas estrechas del hormigón autocompactante. Además mide indirectamente la viscosidad plástica del material. Para analizarla se toma el tiempo que tarda en vaciarse dicho embudo. Este ensayo se desarrolla en los anejos del presente proyecto.

La gráfica que representa dichos tiempos es la siguiente:



La gráfica anterior contiene los siguientes valores numéricos:

% AGUA	TIEMPO (seg)
0	8,25
1,5	7,03
3	6,47
4,5	3,37
6	3,16
-6	14,52
-4,5	7,06
-3	8,63
-1,5	6,93

De esta grafica al igual que con las otras graficas de tiempos, lo que podemos destacar es que a más agua de amasado menor tiempo. El hecho es evidente, puesto que, a más agua de amasado y con las mismas proporciones de superplastificante y AMV, el HAC se vuelve más fluido, eso facilita su paso a través de la abertura del embudo en V. También cabe decir que un HAC más fluido, corre más riesgo de segregación y de exudación.

5.3.2.2. 2ª Serie de amasadas corregidas (18/05/2011 + 09/06/2011)

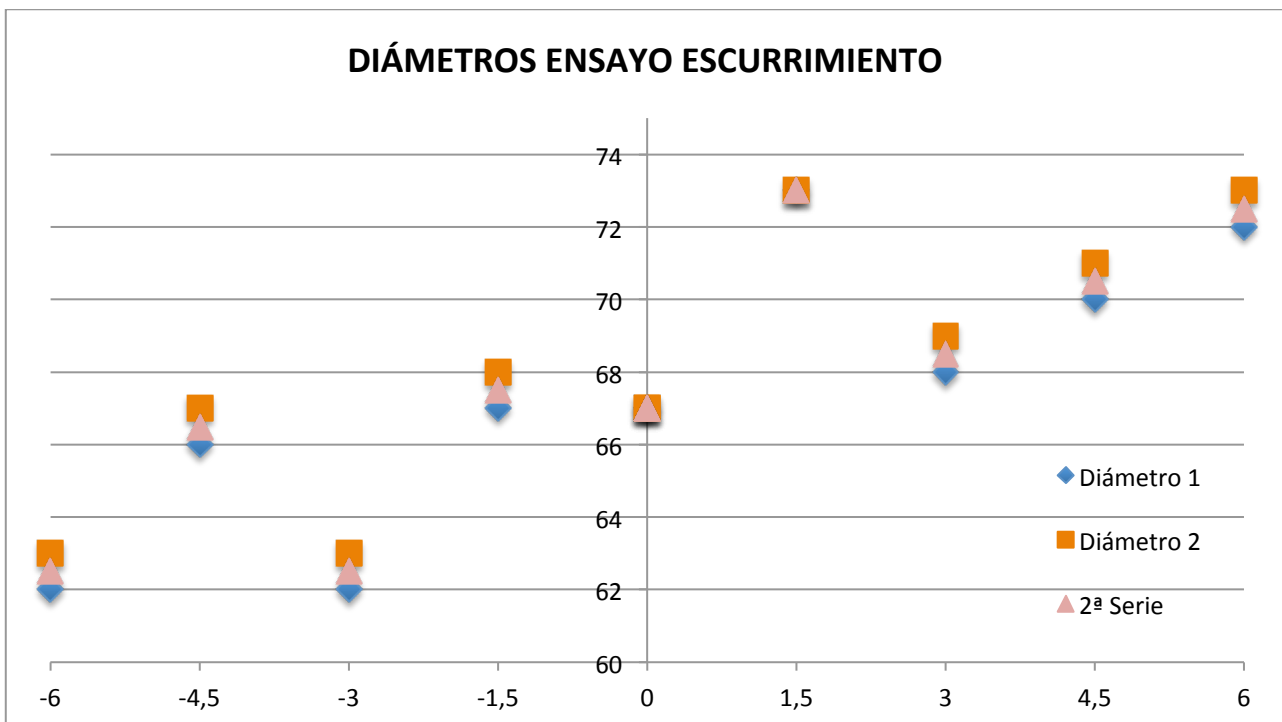
El estadillo con los resultados correspondientes a esta serie de amasadas se haya adjunto en los anejos del presente proyecto.

Pinche aquí para dirigirse al estadillo.

Ensayo de escurrimiento

- Diámetros de las tortas

Tras añadir las amasadas repetidas a los resultados iniciales, se obtuvieron los siguientes resultados. La gráfica representativa de los diámetros de este ensayo es la siguiente:



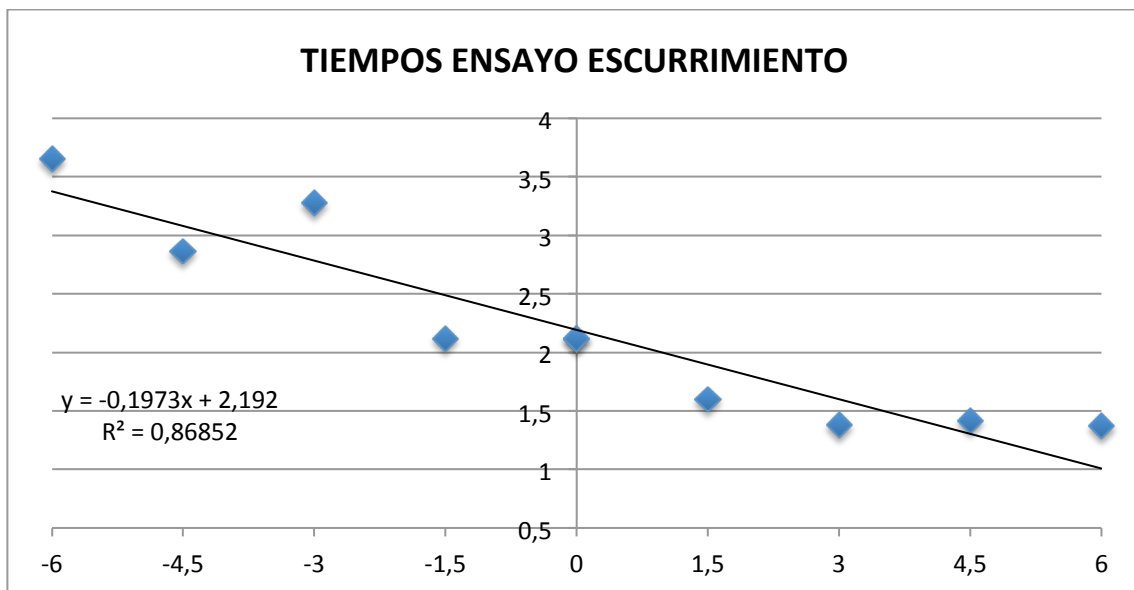
La gráfica anterior contiene los siguientes valores numéricos:

% de Agua	Ø 1 (cm)	Ø 2 (cm)	2ª media Ø
0	67	67	67
1,5	73	73	73
3	68	69	68,5
4,5	70	71	70,5
6	72	73	72,5
-6	62	63	62,5
-4,5	66	67	66,5
-3	62	63	62,5
-1,5	67	68	67,5

Como podemos observar en la gráfica, la mayor parte de los resultados se encuentran próximos a la línea de tendencia. Pero hay valores que difieren significativamente de esta línea como es la amasada de 1,5%, además hay otros valores que se encuentran por debajo de la línea de tendencia (-3%) y sus consecutivos (-4,5% y -1,5%) se encuentran por encima, representando una curva demasiado pronunciada. Estos hechos y como se ha tratado de explicar a lo largo del proyecto, son producidos principalmente por las amasadas que se repitieron y se añadieron a las iniciales. En este caso las repetidas fueron las de -6% -4,5% 0% 3% 4,5% y 6%. Y si nos fijamos, las mayores discrepancias se producen de las amasadas iniciales a las repetidas.

- Tiempos del ensayo

La gráfica representativa de los tiempos en el ensayo de escurrimiento es la siguiente:



La gráfica anterior contiene los siguientes valores numéricos:

% AGUA	TIEMPO (seg)
0	2,12
1,5	1,6
3	1,38
4,5	1,42
6	1,37
-6	3,65
-4,5	2,86
-3	3,28
-1,5	2,12

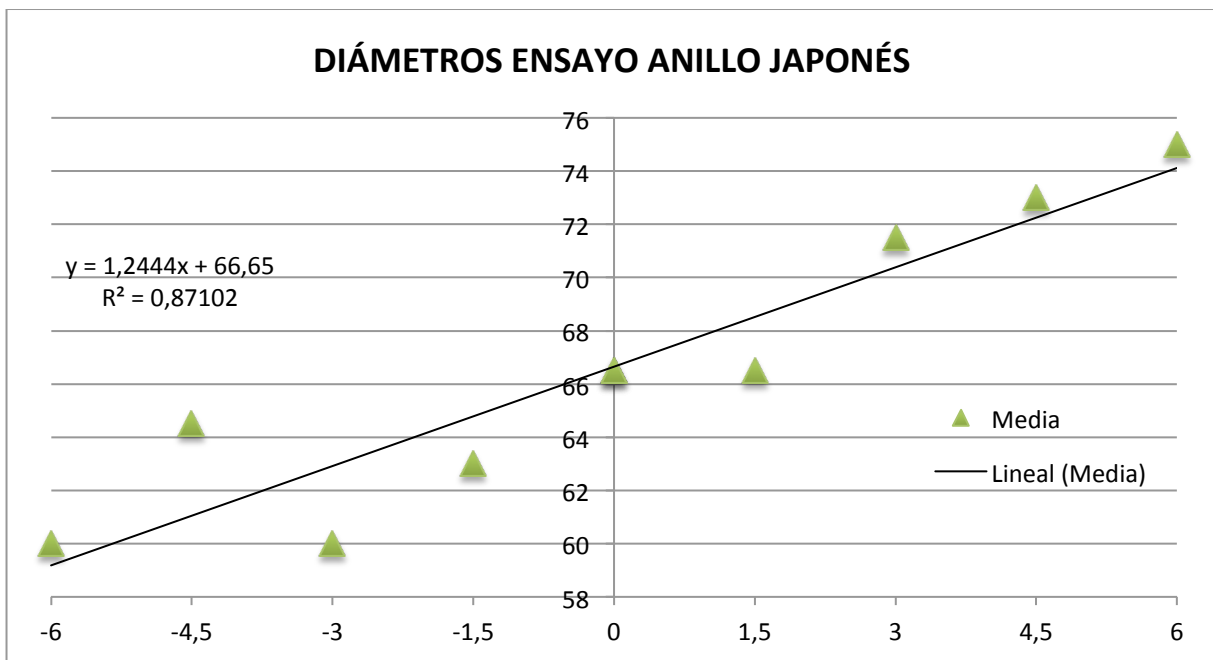
Como se puede observar, los tiempos de escurrimiento disminuyen a medida que aumentamos el % de agua de la dosificación. Es evidente que a más agua de amasado y con las mismas proporciones de superplastificante y AMV, la torta de HAC cada vez dará más fluida, con lo que escurrirá más rápidamente y también sufrirá más riesgo de segregación o exudación.

Los resultados se ajustan significativamente a la línea de tendencia.

Ensayo del anillo japonés

- Diámetros de las tortas

Los resultados de los diámetros obtenidos en esta serie de amasadas vienen recogidos en la siguiente gráfica:



La gráfica anterior contiene los siguientes valores numéricos:

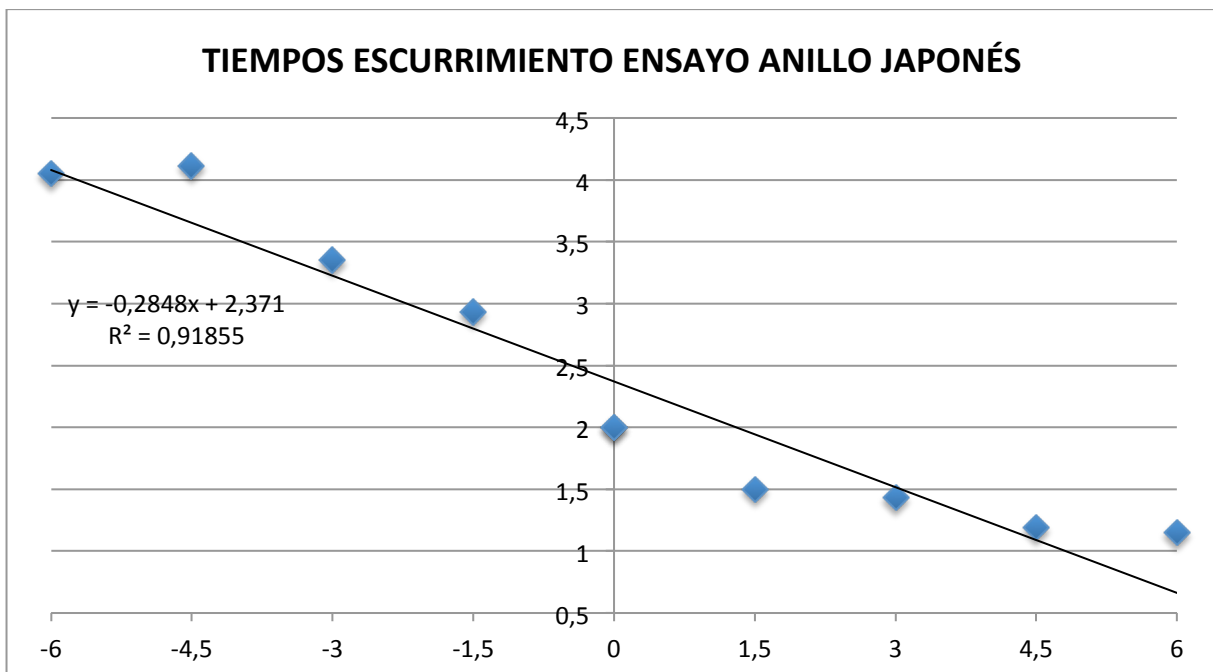
% AGUA	Ø 1 (cm)	Ø 2 (cm)	MEDIA
0	66	67	66,5
1,5	66	67	66,5
3	71	72	71,5
4,5	73	73	73
6	75	75	75
-6	60	60	60
-4,5	64	65	64,5
-3	60	60	60
-1,5	62	64	63

Como se puede observar en esta gráfica, pasa algo semejante a los diámetros de el ensayo de escurrimiento, es decir, los valores de las amasadas repetidas difieren de el resto de valores, pero todo ello se debe a lo explicado anteriormente. Además se puede decir que los valores obtenidos se encuentran próximos a la línea de tendencia que sigue la gráfica.

Si comparamos estos valores con los obtenidos en el ensayo de escurrimiento, podemos concluir que para las amasadas con mas agua obteníamos unos diámetros mayores en el ensayo del anillo japonés, mientras que para las amasadas de menos agua, obteníamos diámetros más pequeños en este ensayo.

- Tiempos de escurrimiento

La gráfica representativa de los tiempos de escurrimiento es la siguiente:



La gráfica anterior contiene los siguientes valores numéricos:

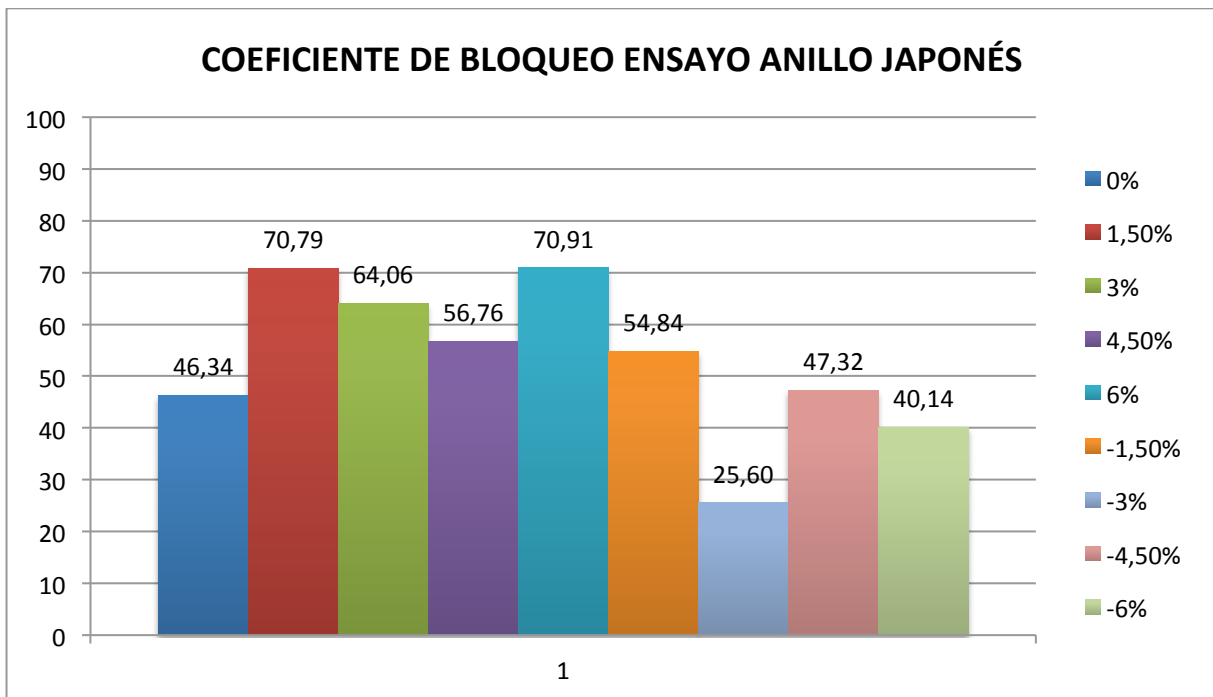
% AGUA	TIEMPO (seg)
0	2
1,5	1,5
3	1,43
4,5	1,19
6	1,15
-6	4,05
-4,5	4,11
-3	3,35
-1,5	2,93

De la gráfica se puede destacar que el tiempo de escurrimiento disminuye significativamente a medida que aumentamos el agua de amasado. Como se puede apreciar, los valores mas altos de agua (4,5% y 6%) van alcanzando un punto el cual se va aproximando al mínimo físicamente posible en producirse el escurrimiento, que estará entorno a 1 segundo.

- Coeficientes de bloqueo

Los coeficientes de bloqueo representan la resistencia al paso que supondrían las armaduras de una estructura. Dichos coeficientes se determinan a partir del ensayo del anillo japonés tal y como se describe en los anejos del presente proyecto.

La gráfica que representa dichos coeficientes es la siguiente:



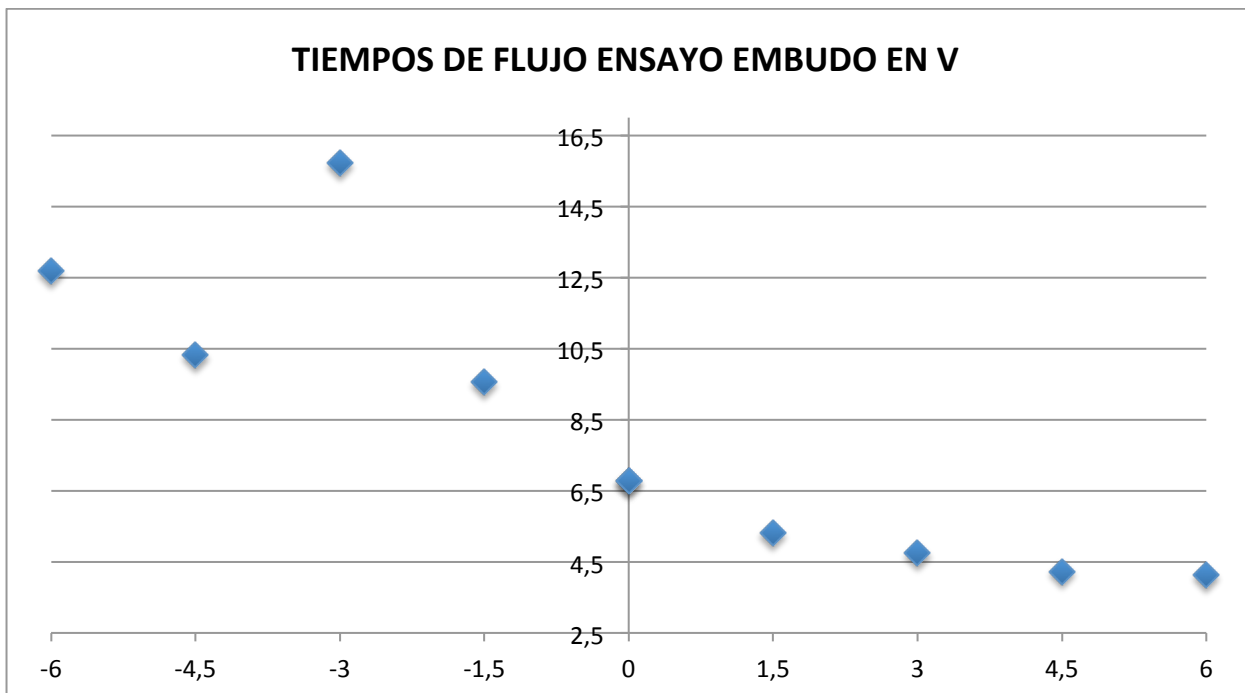
Como se observa en la gráfica a medida que aumentamos los porcentajes de agua de amasado, los coeficientes de bloqueo aumentan, y para los valores negativos de % de agua los resultados de los coeficientes son mucho menores, por debajo del 50%, excepto en el caso de la amasada -1,5% de agua, la cual se encuentra todavía muy próxima a la inicial.

Ensayo del embudo en V

- Tiempos de flujo

El ensayo del embudo en V evalúa la capacidad de relleno y la capacidad de paso por aberturas estrechas del hormigón autocompactante. Además mide indirectamente la viscosidad plástica del material. Para analizarla se toma el tiempo que tarda en vaciarse dicho embudo. Este ensayo se desarrolla en los anejos del presente proyecto.

La gráfica que representa dichos tiempos es la siguiente:



La gráfica anterior contiene los siguientes valores numéricos:

% AGUA	TIEMPO (seg)
0	6,76
1,5	5,31
3	4,75
4,5	4,22
6	4,13
-6	12,68
-4,5	10,31
-3	15,72
-1,5	9,56

Como podemos observar en esta grafica, los tiempos tienen una progresión regular y próxima a la línea de tendencia a excepción del valor de la amasada -3%. Dicha amasada es una de las iniciales que no se repitieron mientras que su consecutiva y su precedente si que fueron repetidas. Cabe decir también la posibilidad de que se ejecutara mal el ensayo de la amasada -3%, debido probablemente a dejar reposar durante mucho tiempo la masa de hormigón dentro del embudo.

5.3.2.3. 3ª Serie de amasadas (08/06/2011)

Como se ha dicho anteriormente, de esta serie de amasadas no fue preceptivo repetir ninguna, puesto que tras analizar la gráfica con los diámetros del ensayo de escurrimiento y ver que los resultados anotados en el estadillo eran coherentes se decidió que no haría falta repetir ninguna amasada.

El estadillo con los resultados correspondientes a esta serie de amasadas se haya adjunto en los anejos del presente proyecto.

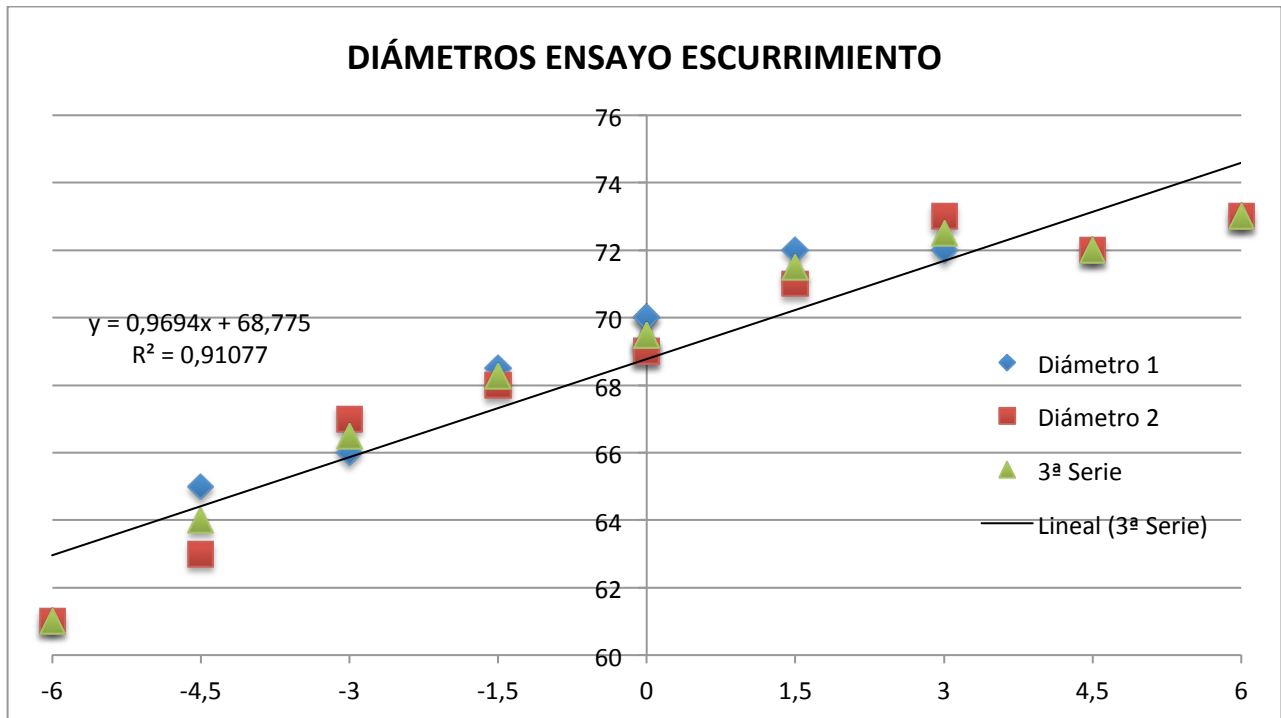
Pinche aquí para dirigirse al estadillo.

A continuación se estudiaran y analizaran los resultados obtenido en los diferentes ensayos.

Ensayo de escurrimiento

- Diámetros de las tortas

La siguiente gráfica correspondientes a los diferentes diámetros de torta en el ensayo de escurrimiento:



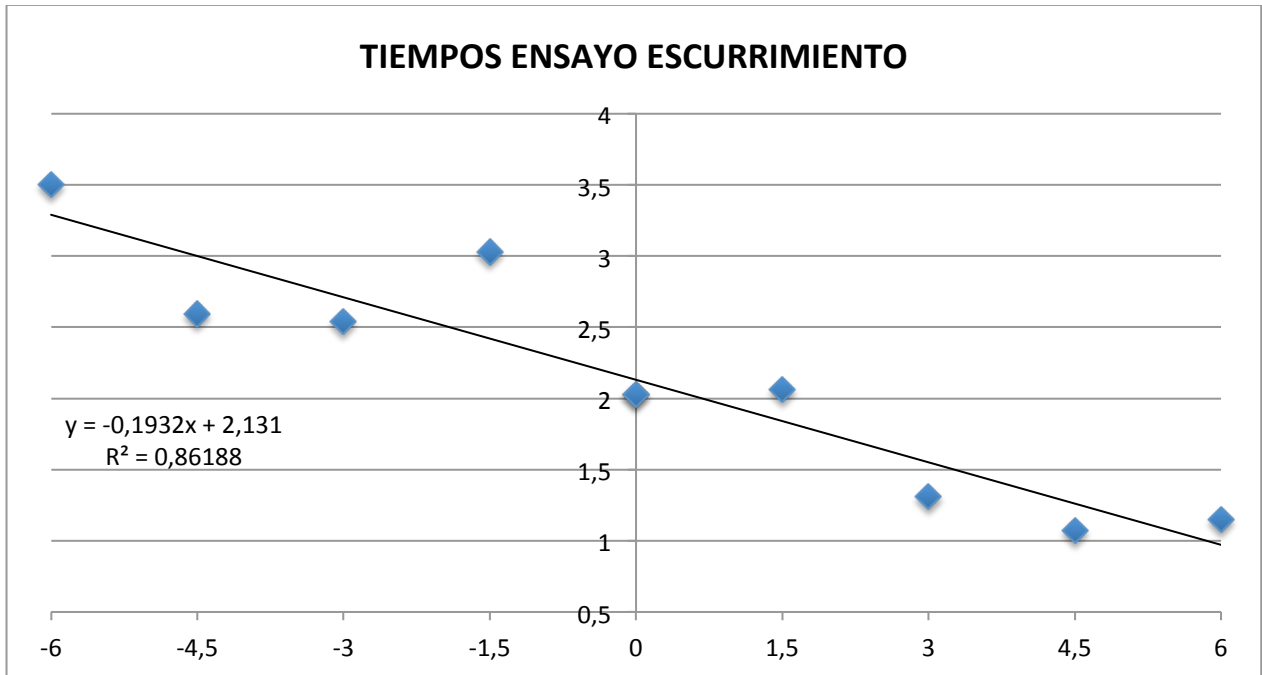
La gráfica anterior contiene los siguientes valores numéricos:

% de Agua	Ø 1 (cm)	Ø 2 (cm)	3ª media Ø
0	70	69	69,5
1,5	72	71	71,5
3	72	73	72,5
4,5	72	72	72
6	73	73	73
-6	61	61	61
-4,5	65	63	64
-3	66	67	66,5
-1,5	68,5	68	68,25

Como se puede observar en la gráfica, los resultados obtenidos en esta serie de amasadas siguen una progresión coherente, es decir, a mayor cantidad de agua de amasado, van aumentando los valores de los diámetros. Además de este aspecto, cabe decir que todos los resultados se encuentran próximos a la línea de tendencia, esto es indicativo de que todos los resultados en su conjunto son coherentes.

- Tiempos del ensayo

La gráfica representativa de los tiempos en el ensayo de escurrimiento es la siguiente:



La gráfica anterior contiene los siguientes valores numéricos:

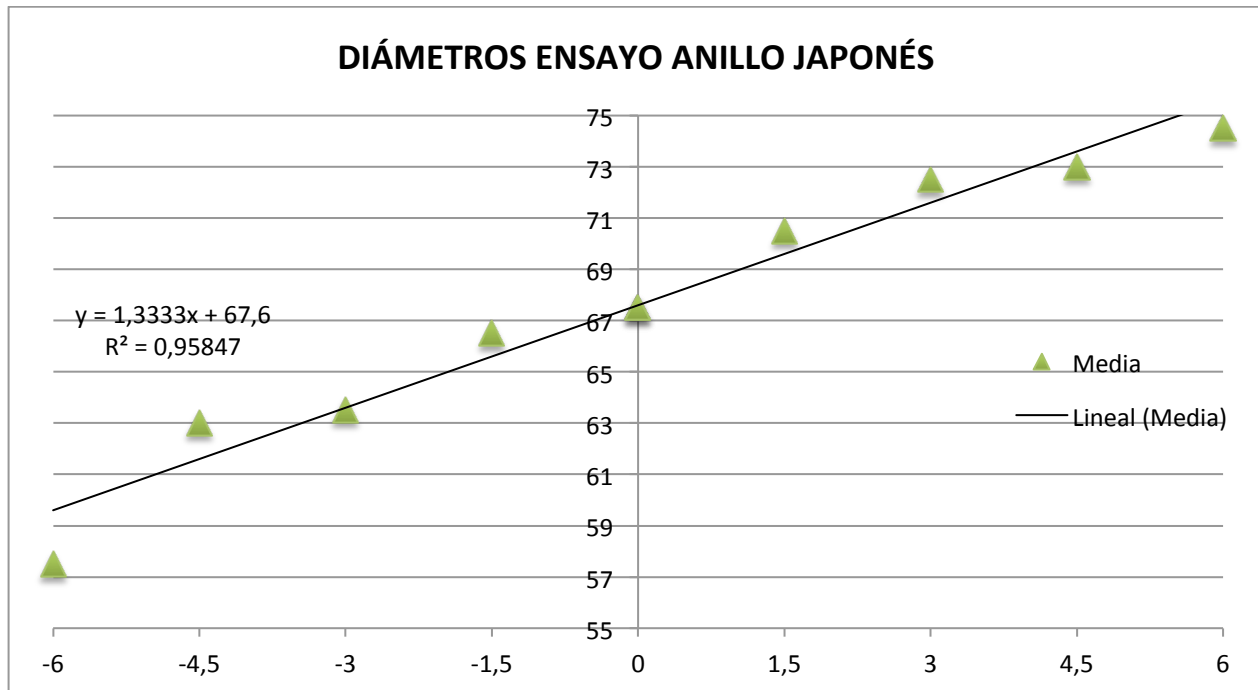
% AGUA	TIEMPO (seg)
0	2,03
1,5	2,06
3	1,31
4,5	1,07
6	1,15
-6	3,5
-4,5	2,59
-3	2,54
-1,5	3,03

En vista de la gráfica, se puede decir que también sigue una tendencia a disminuir su tiempo de escurrimiento a medida que aumentamos la cantidad de agua de amasado, este valor al que se va aproximando se encuentra alrededor de 1 segundo. Con respecto a las variaciones que se observan cabe decir que son del orden de medio segundo, por lo que realmente no son indicativas de incoherencias que conduzcan a errores.

Ensayo del anillo japonés

- Diámetros de las tortas

Los resultados de los diámetros obtenidos en esta serie de amasadas vienen recogidos en la siguiente gráfica:



La gráfica anterior contiene los siguientes valores numéricos:

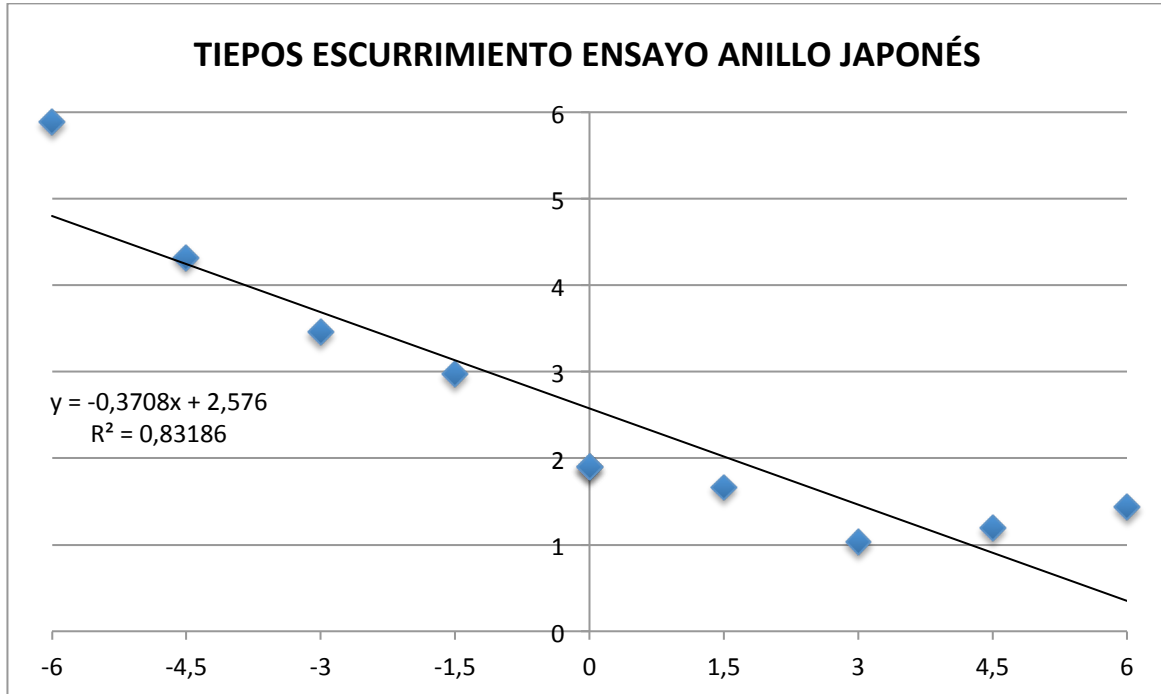
% AGUA	Ø 1 (cm)	Ø 2 (cm)	MEDIA
0	68	67	67,5
1,5	70	71	70,5
3	73	72	72,5
4,5	73	73	73
6	74	75	74,5
-6	57	58	57,5
-4,5	64	62	63
-3	64	63	63,5
-1,5	67	66	66,5

En este caso también podemos observar que todos los valores se encuentran próximos a la línea de tendencia, y que son coherentes unos con otros. Es decir, a medida que vamos aumentando la cantidad de agua de amasado, vamos obteniendo diámetros de tortas mayores.

Los diámetros obtenidos en el escurrimiento por de este ensayo, son ligeramente menores a los diámetros que obtuvimos en el ensayo de escurrimiento. Esto es debido a la resistencia que oponen las barras del anillo japonés.

- Tiempos de escurrimiento

La gráfica representativa de los tiempos de escurrimiento es la siguiente:



La gráfica anterior contiene los siguientes valores numéricos:

% AGUA	TIEMPO (seg)
0	1,9
1,5	1,66
3	1,03
4,5	1,2
6	1,43
-6	5,89
-4,5	4,32
-3	3,46
-1,5	2,97

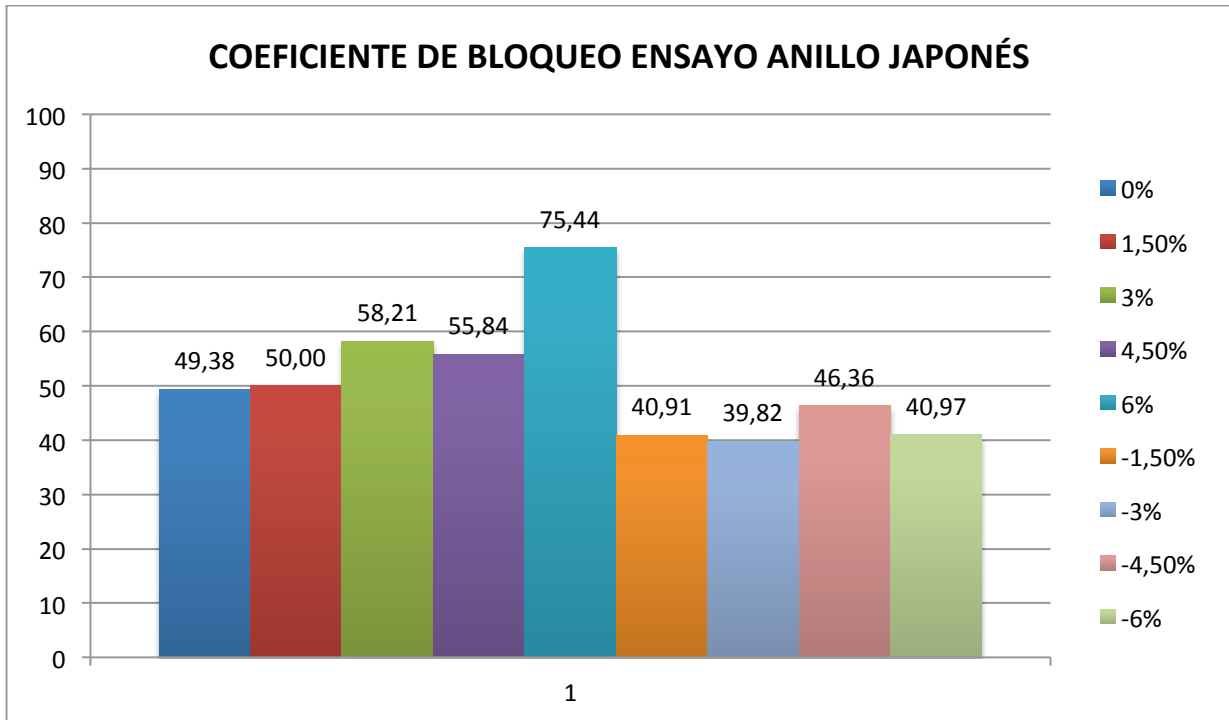
Como podemos observar, los tiempos en dicho ensayo disminuyen a medida que aumentamos la cantidad de amasado en la dosificación. Esto se debe a lo expuesto en los casos anteriores.

Respecto a los resultados se puede ver que todos se encuentran próximos a la línea de tendencia, por lo que, a pesar de que hayan algunas variaciones, son insignificantes puesto que son del orden de medio segundo.

- Coeficientes de bloqueo

Los coeficientes de bloqueo representan la resistencia al paso que supondrían las armaduras de una estructura. Dichos coeficientes se determinan a partir del ensayo del anillo japonés tal y como se describe en los anejos del presente proyecto.

La gráfica que representa dichos coeficientes es la siguiente:



Esta gráfica es la que mejores resultados dio respecto a las gráficas de bloqueo de las anteriores series de amasadas.

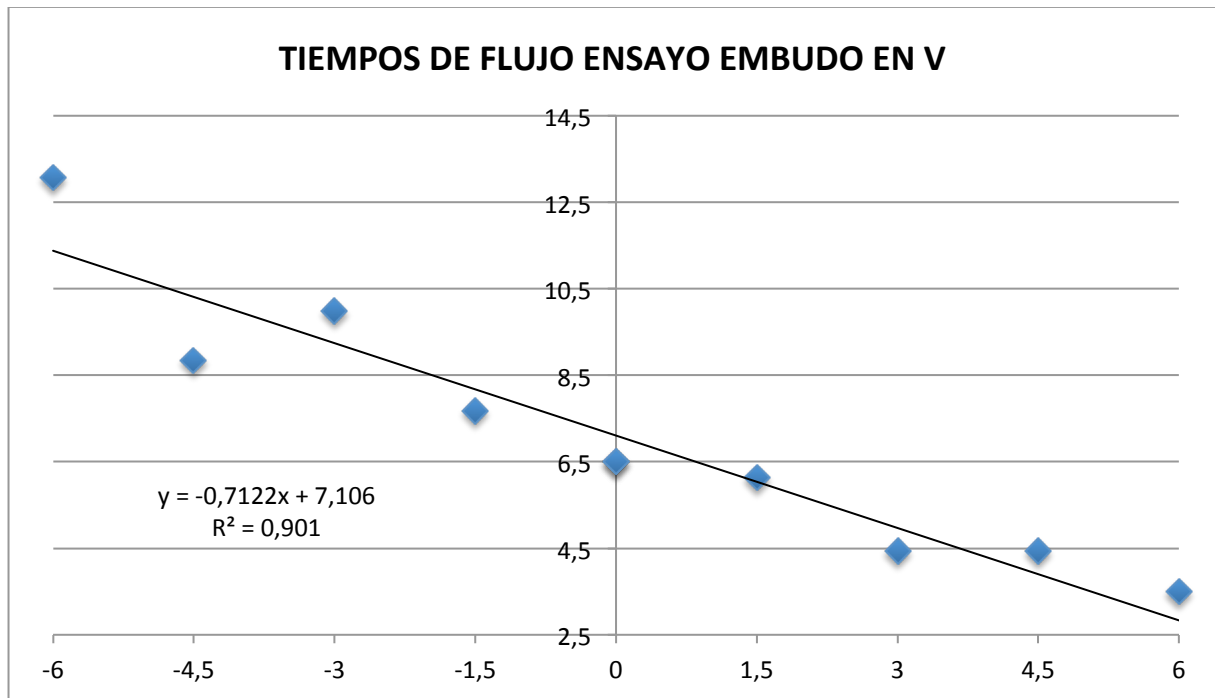
Como se puede observar, los coeficientes de bloqueo aumentan ligeramente a medida que aumenta el agua de amasado, y viceversa. En la amasada de 6% podemos ver que hay un pico significativo del 75,44%, esto se debe a que en esta amasada el hormigón fluyó mucho más que su amasada predecesora, lo cual dio unas alturas muy parecidas de H1 y H2.

Ensayo del embudo en V

- Tiempos de flujo

El ensayo del embudo en V evalúa la capacidad de relleno y la capacidad de paso por aberturas estrechas del hormigón autocompactante. Además mide indirectamente la viscosidad plástica del material. Para analizarla se toma el tiempo que tarda en vaciarse dicho embudo. Este ensayo se desarrolla en los anejos del presente proyecto.

La gráfica que representa dichos tiempos es la siguiente:



La gráfica anterior contiene los siguientes valores numéricos:

% AGUA	TIEMPO (seg)
0	6,5
1,5	6,13
3	4,44
4,5	4,43
6	3,5
-6	13,06
-4,5	8,84
-3	9,98
-1,5	7,68

Por último en esta gráfica se puede apreciar como los tiempos del ensayo disminuyen a medida que aumentamos el % de agua de amasado. Todos los valores se encuentran próximos a la línea de tendencia.

5.3.3. Media de los resultados finales corregidos

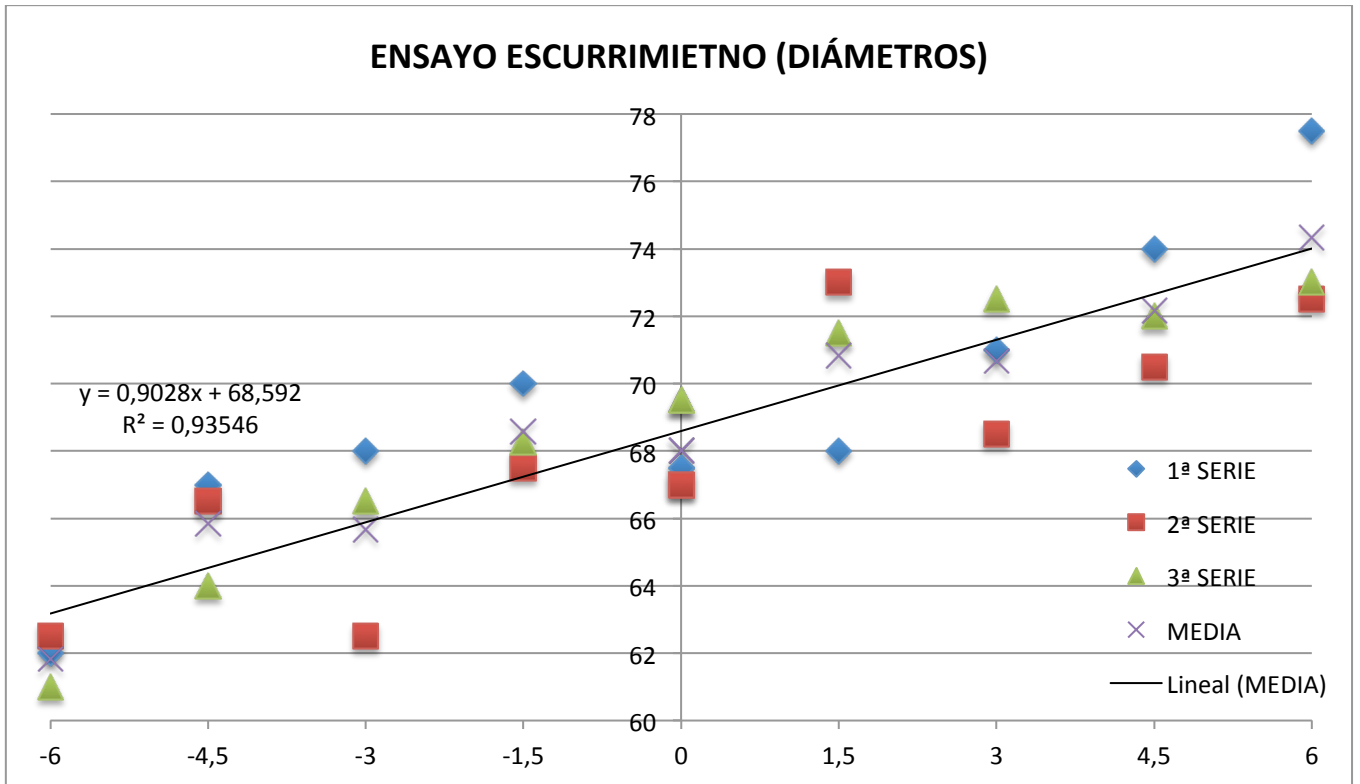
Para poder determinar si finalmente los resultados estudiados y analizados por separado con antelación se ajustan a las normativas correspondientes, y por tanto son

óptimos como HAC, se sacaron las medias aritméticas de todos los resultados y se realizaron las gráficas representativas de dichos resultados.

5.3.3.1. Ensayo de escurrimiento

- Diámetros de las tortas

La gráfica representativa de los diámetros de escurrimiento es la siguiente:



La gráfica anterior contiene los siguientes valores numéricos:

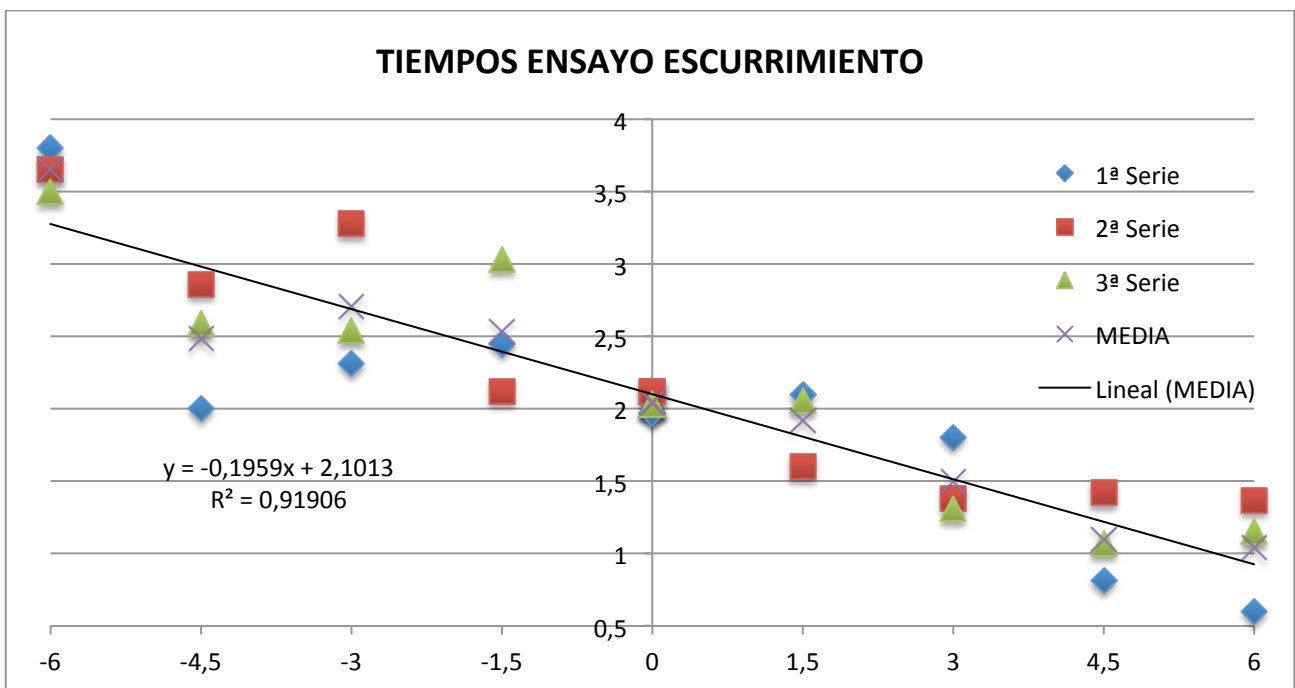
% AGUA	DIÁMETROS (cm)			
	1ª Serie Ø	2ª Serie Ø	3ª Serie Ø	MEDIA
0	67,50	67,00	69,50	68,00
1,5	68,00	73,00	71,50	70,83
3	71,00	68,50	72,50	70,67
4,5	74,00	70,50	72,00	72,17
6	77,50	72,50	73,00	74,33
-6	62,00	62,50	61,00	61,83
-4,5	67,00	66,50	64,00	65,83
-3	68,00	62,50	66,50	65,67
-1,5	70,00	67,50	68,25	68,58

Como podemos observar, la curva resultante de las tres series de amasadas, se ajusta a la línea de tendencia.

También se observa que, según los parámetros de las Directrices Europeas para HAC, los resultados óptimos deberían de encontrarse entre 660-750 mm para aplicaciones normales del HAC. Por lo tanto, en vista de los resultados obtenidos, el único valor que no se ajusta a la normativa es el de -6% (61,83 mm), puesto que los demás valores quedarían redondeados en 5 mm.

- Tiempos del ensayo

La gráfica representativa de los tiempos de escurrimiento es la siguiente:



La gráfica anterior contiene los siguientes valores numéricos:

% AGUA	TIEMPOS (seg.)			
	1ª Serie	2ª Serie	3ª Serie	MEDIA
0	1,97	2,12	2,03	2,04
1,5	2,1	1,6	2,06	1,92
3	1,8	1,38	1,31	1,50
4,5	0,81	1,42	1,07	1,10
6	0,6	1,37	1,15	1,04
-6	3,8	3,65	3,5	3,65
-4,5	2	2,86	2,59	2,48
-3	2,31	3,28	2,54	2,71
-1,5	2,45	2,12	3,03	2,53

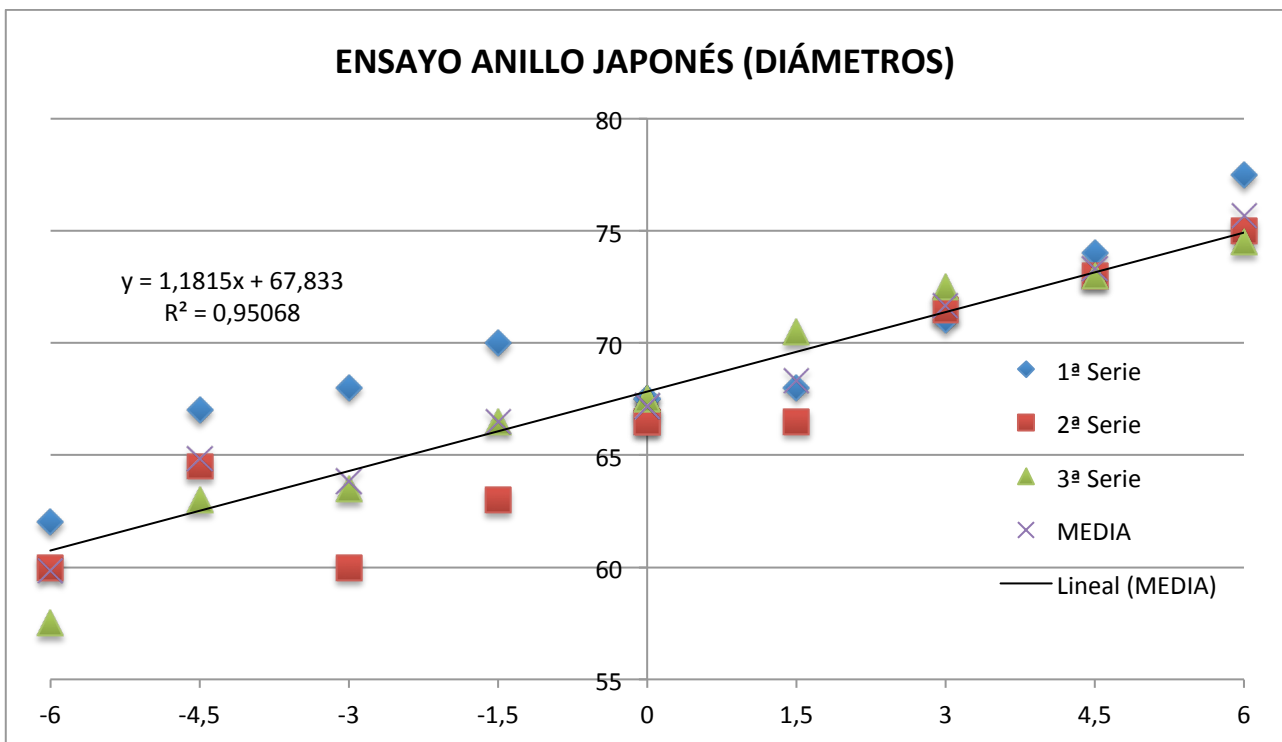
Como se puede observar, la media resultante de las tres series de amasadas se ajusta a la línea de tendencia que describe. El único sobresalto se podría encontrar en los resultados para -4,5% de agua que son ligeramente inferiores a los de -3%, pero la diferencia es insignificante (< 0,5 seg.) por lo que no tiene mayor importancia.

De forma general podemos observar que todos los valores se ajustan a los establecido por la HEH-08 y es que los tiempos de escurrimiento son < a 8 segundos.

5.3.3.2. Ensayo del anillo japonés

- Diámetros de las tortas

La media de los resultados de los diámetros obtenidos en este ensayo viene recogida en la siguiente gráfica:



La gráfica anterior contiene los siguientes valores numéricos:

% AGUA	DIÁMETROS (cm)			
	1ª Serie Ø	2ª Serie Ø	3ª Serie Ø	MEDIA
0	67,5	66,5	67,5	67,17
1,5	68	66,5	70,5	68,33
3	71	71,5	72,5	71,67
4,5	74	73	73	73,33
6	77,5	75	74,5	75,67
-6	62	60	57,5	59,83
-4,5	67	64,5	63	64,83
-3	68	60	63,5	63,83
-1,5	70	63	66,5	66,50

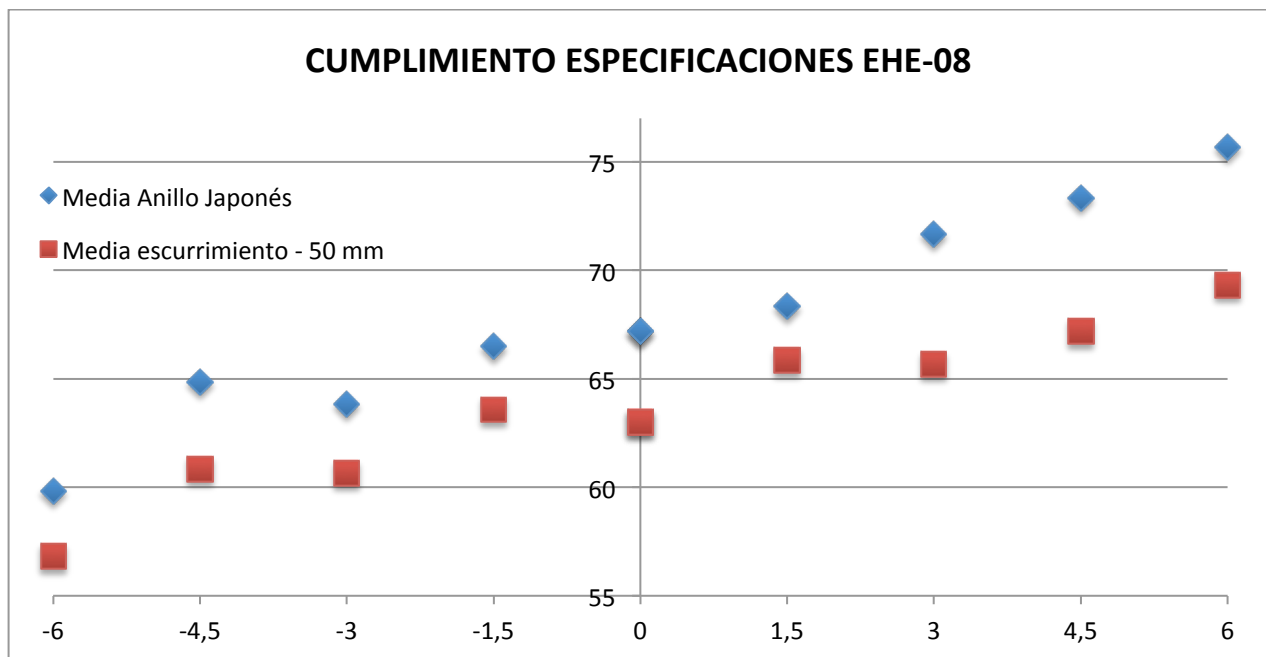
Se puede observar en la gráfica que la media resultante de las tres series de amasadas sigue una progresión bastante lineal, y se ajusta a la línea de tendencia.

También cabría ver si cumplen con lo especificado en la EHE-08, para ello $d_{jf} \geq d_f - 50$ mm, donde:

d_{jf} , es la media entre los dos diámetros que tomamos de cada amasada.

d_f , es la media de los diámetros tomados en el ensayo de escurrimiento.

La siguiente gráfica compara la media de los diámetros obtenidos en el ensayo del anillo japonés, con los obtenidos en el ensayo de escurrimiento menos 50 mm:



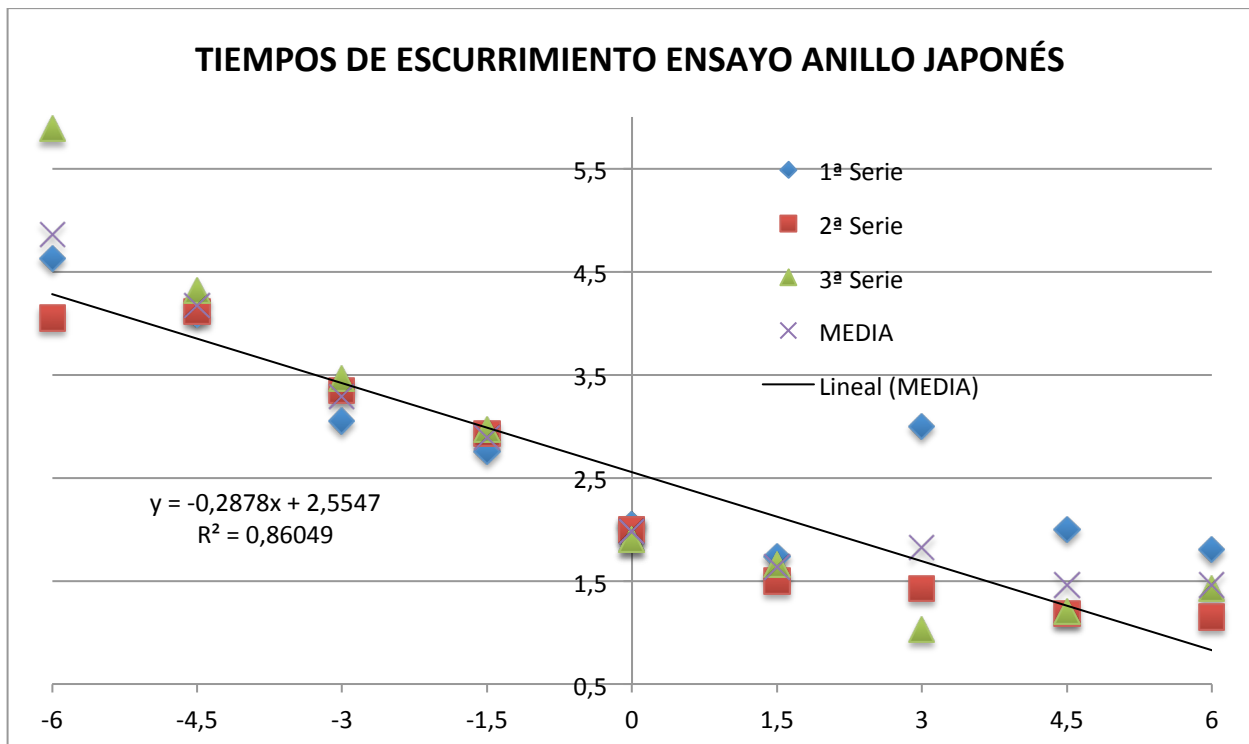
La gráfica anterior contiene los siguientes valores numéricos:

% AGUA	MEDIA Ø A.Japonés	MEDIA Ø Ecurri.
0	67,17	63,00
1,5	68,33	65,83
3	71,67	65,67
4,5	73,33	67,17
6	75,67	69,33
-6	59,83	56,83
-4,5	64,83	60,83
-3	63,83	60,67
-1,5	66,50	63,58

Como se puede observar en la grafica, todos los valores cumplen lo especificado en la EHE-08 ($d_{jf} \geq d_f - 50 \text{ mm}$).

- Tiempos de escurrimiento

La gráfica representativa de la media de los tiempos de escurrimiento es la siguiente:



La gráfica anterior contiene los siguientes valores numéricos:

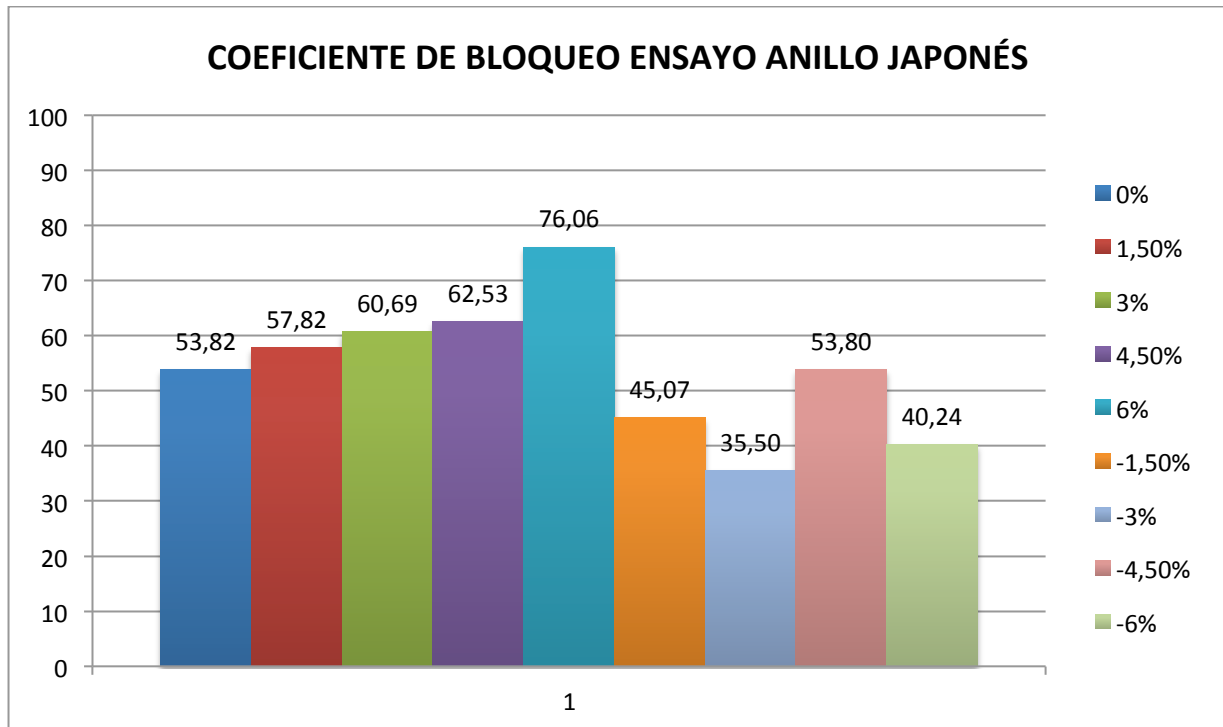
% AGUA	TIEMPOS (seg.)			
	1ª Serie	2ª Serie	3ª Serie	MEDIA
0	2,05	2	1,9	1,98
1,5	1,74	1,5	1,66	1,63
3	3	1,43	1,03	1,82
4,5	2	1,19	1,2	1,46
6	1,8	1,15	1,43	1,46
-6	4,63	4,05	5,89	4,86
-4,5	4,09	4,11	4,32	4,17
-3	3,05	3,35	3,46	3,29
-1,5	2,76	2,93	2,97	2,89

Simplemente en esta gráfica podemos observar la evolución de los tiempos tras realizar el ensayo. La normativa no especifica la determinación de los tiempos para realizar el ensayo, pero son un buen indicativo de la evolución que originan, es decir, a medida que vamos añadiendo mas agua de amasado, los tiempos van siendo menores. Como podemos apreciar también, la media de las tres series se ajusta a la línea de tendencia.

- Coeficientes de bloqueo

Los coeficientes de bloqueo representan la resistencia al paso que supondrían las armaduras de una estructura. Dichos coeficientes se determinan a partir del ensayo del anillo japonés tal y como se describe en los anejos del presente proyecto.

La gráfica que representa la media de dichos coeficientes es la siguiente:



Como se puede observar en la gráfica, los coeficientes de bloqueo aumentan a medida que aumentamos el porcentaje de agua de amasado.

La EHE-08 no especifica nada para el coeficiente de bloqueo en el ensayo del anillo japonés, pero si que especifica que para el ensayo de la caja en L, los coeficientes de bloqueo deben comprenderse dentro del siguiente rango:

$$0,75 \leq C_{bL} \leq 1,00$$

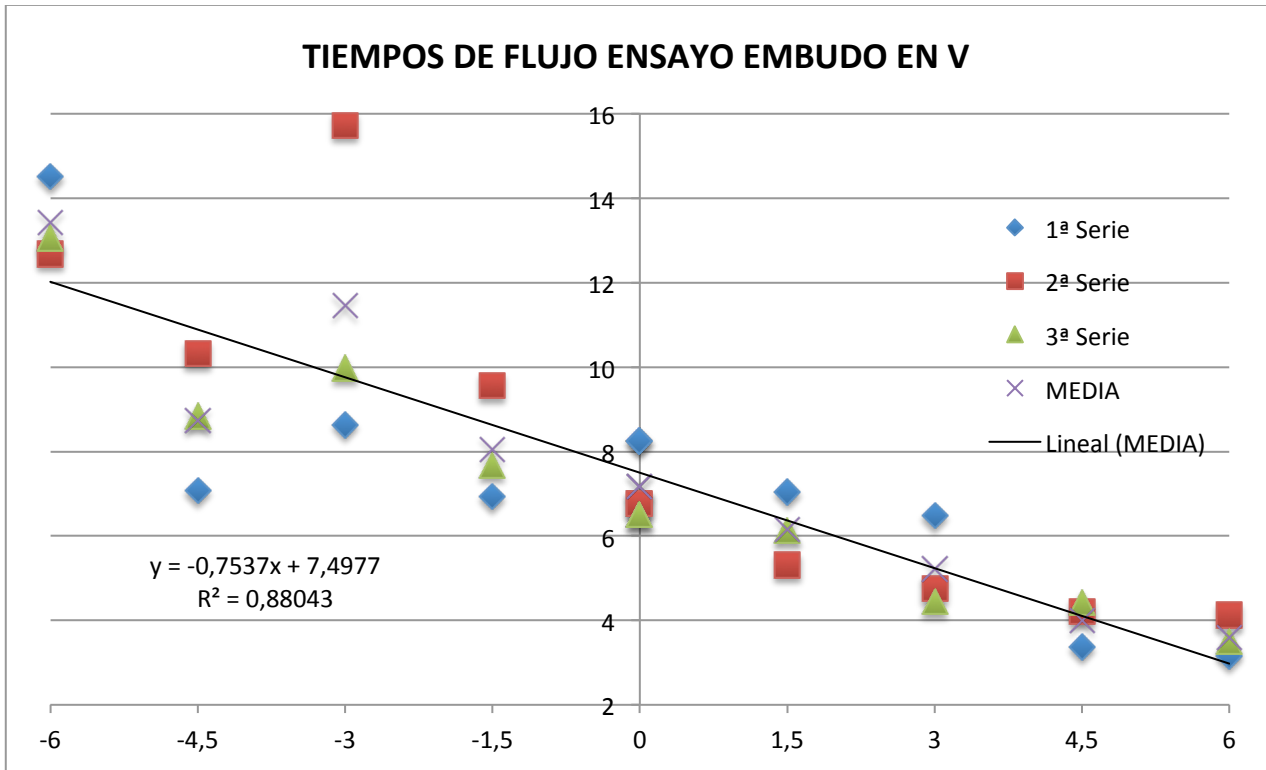
Aunque dicho rango no es útil para valorar los coeficientes de bloqueo en el ensayo del anillo japonés, puesto que las alturas obtenidas no son semejantes.

5.3.3.3. Ensayo del embudo en V

- Tiempos de flujo

El ensayo del embudo en V evalúa la capacidad de relleno y la capacidad de paso por aberturas estrechas del hormigón autocompactante. Además mide indirectamente la viscosidad plástica del material. Para analizarla se toma el tiempo que tarda en vaciarse dicho embudo. Este ensayo se desarrolla en los anejos del presente proyecto.

La gráfica que representa dichos tiempos es la siguiente:



La gráfica anterior contiene los siguientes valores numéricos:

% AGUA	TIEMPOS (seg.)			
	1ª Serie	2ª Serie	3ª Serie	MEDIA
0	8,25	6,76	6,5	7,17
1,5	7,03	5,31	6,13	6,16
3	6,47	4,75	4,44	5,22
4,5	3,37	4,22	4,43	4,01
6	3,16	4,13	3,5	3,60
-6	14,52	12,68	13,06	13,42
-4,5	7,06	10,31	8,84	8,74
-3	8,63	15,72	9,98	11,44
-1,5	6,93	9,56	7,68	8,06

En este caso se puede observar que la media de los resultados obtenidos siguen una progresión correlativa con la cantidad de agua de amasado. Es decir, a mayor cantidad de agua de amasado obtenemos tiempos mas reducidos, y a menor cantidad de agua en el amasado, ocurre justo lo contrario.

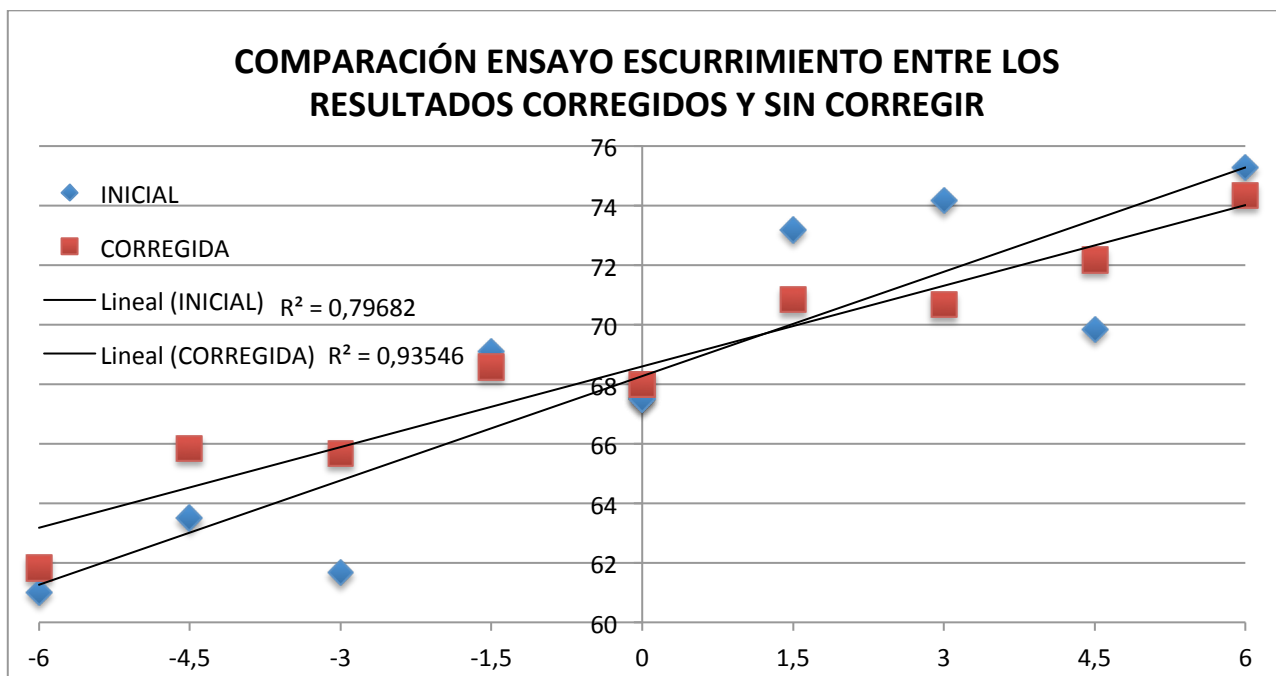
Para que la media de los tiempos sean adecuados deben comprenderse dentro del rango fijado por la EHE-08, que serian:

$$4 \text{ seg} \leq T_v \leq 20 \text{ seg}$$

Por lo tanto el único valor que no se obtuvo dentro de dicho rango fue para un porcentaje de agua de -6%, en el que el tiempo de la 2ª serie fue el único que entro dentro de el rango.

5.3.4. Comparación entre los resultados corregidos y sin corregir de los diámetros del ensayo de escurrimiento

La siguiente grafica nos muestra una comparación de la media de los diámetros resultantes en el ensayo de escurrimiento, corregidos y sin corregir. Cuando se dice que los resultados están corregidos, se quiere decir que han sido repetidas las amasadas que por diversos motivos no se ajustaban o discrepaban del resto de amasadas, y han sido reemplazadas por estas.



La gráfica anterior contiene los siguientes valores numéricos:

% de Agua	MEDIA	MEDIA
0	67,50	68,00
1,5	73,17	70,83
3	74,17	70,67
4,5	69,83	72,17
6	75,25	74,33
-6	61,00	61,83
-4,5	63,50	65,83
-3	61,67	65,67
-1,5	69,08	68,58

Como podemos observar en la gráfica, la media de resultados pertenecientes a las series iniciales presenta mayores dispersiones respecto a su línea de tendencia, mientras que la curva roja, perteneciente a la media de resultados corregidos, se ajusta mucho más a su línea de tendencia, por lo que su dispersión respecto a esta es mucho menor.

5.4. EL HAC EN ESTADO ENDURECIDO

El ensayo que se llevo a cabo en el hormigón endurecido fue únicamente el ensayo de resistencia a compresión. Dicho ensayo se realiza sobre probetas cilíndricas de 15x30 cm, enmoldadas en el lugar de confección y sometidas posteriormente a un curado de 28 días, edad a la que se realiza el ensayo.

La resistencia a compresión es igual al cociente entre la carga de la rotura y la sección de la probeta.

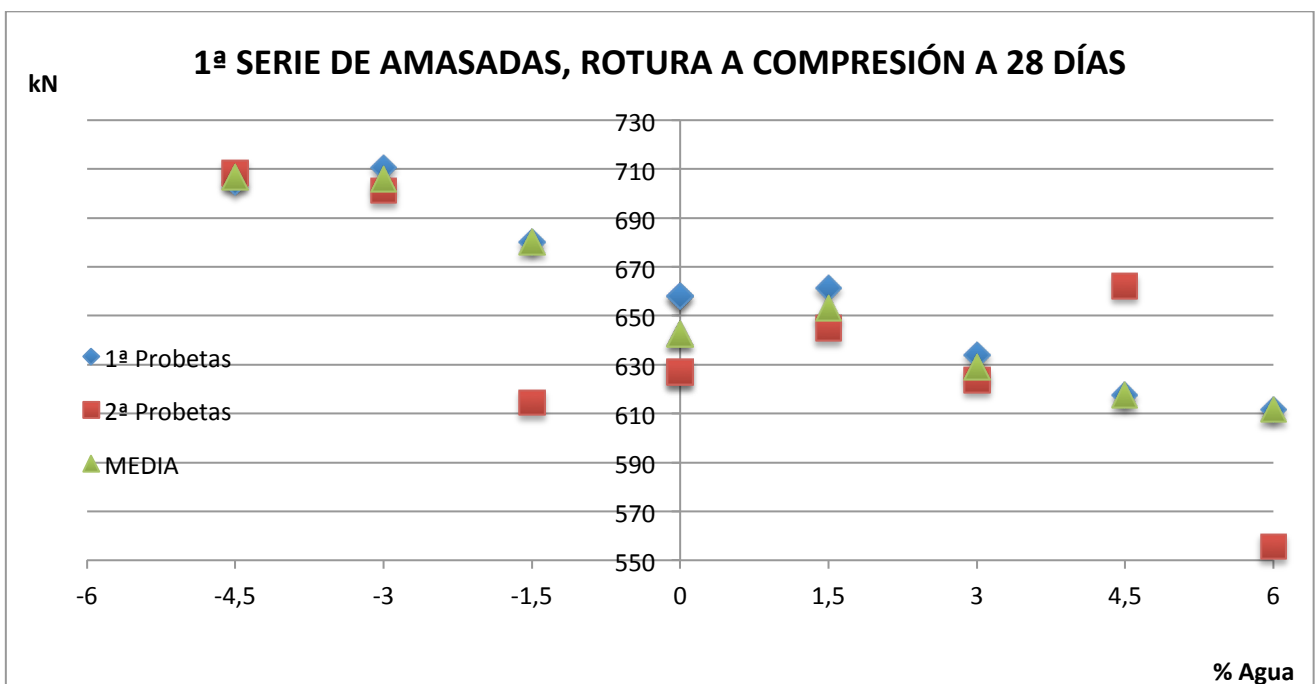
Además de la resistencia a compresión, también se puede realizar la resistencia a tracción indirecta y la resistencia a flexotracción.

5.4.2. Rotura a compresión tras 28 días

5.4.1.1. 1ª Serie de amasadas (16/05/2011)

Fue realizada el día 13/06/2011

Los resultados obtenidos tras realizar el ensayo de compresión, vienen recogidos en la siguiente gráfica:



La gráfica anterior contiene los siguientes valores numéricos:

1ª SERIE DE AMASADAS (16/05/2011)						
13/06/11	Probeta 1		Probeta 2		MEDIA EN kN	MEDIA EN MPa
% AGUA	kN	MPa	kN	MPa		
0	658	37,233	626,9	35,476	642,45	36,3545
1,5	661,5	37,433	645	36,502	653,25	36,9675
3	633,9	35,873	623,7	35,295	628,8	35,584
4,5	617,4	34,937	662,1	37,466	617,4	34,937
6	611,5	34,602	555,5	31,437	611,5	34,602
-6						
-4,5	704,6	39,871	708,6	40,1	706,6	39,9855
-3	710,54	40,21	701,3	39,688	705,92	39,949
-1,5	680,2	38,493	614,4	34,769	680,2	38,493

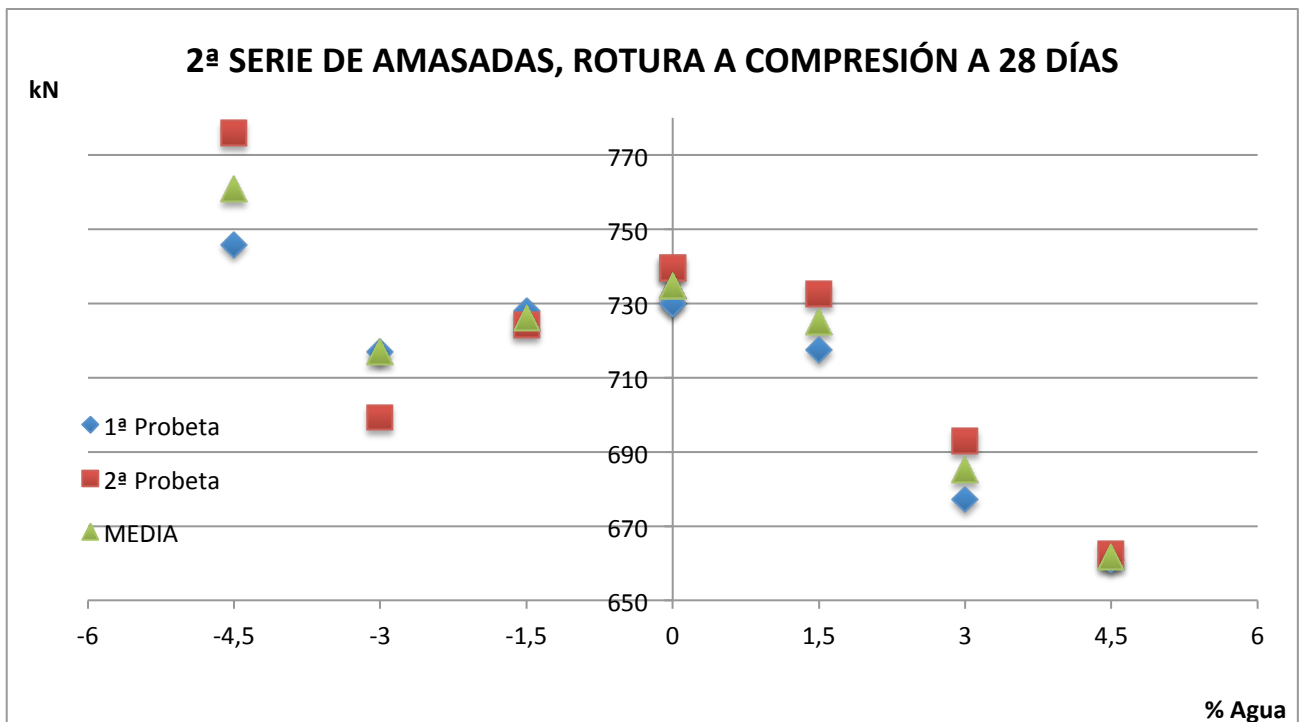
Como se puede observar en la gráfica, a medida que disminuye el % de agua de amasado en la dosificación, va aumentando la resistencia del HAC.

Aparecen tres valores marcados en amarillo (4,5% 6% y -1,5%) los cuales se desecharon a la hora de sacar la media de las dos probetas, porque dichas probetas presentaban alteraciones en su acabado superficial, principalmente presentaban coqueras en su superficie, la cual cosa hacia bajar su resistencia considerablemente.

5.4.1.2. 2ª Serie de amasadas (18/05/2011)

Fue realizada el día 15/06/2011

Los resultados obtenidos tras realizar el ensayo de compresión, vienen recogidos en la siguiente gráfica:



La gráfica anterior contiene los siguientes valores numéricos:

2ª SERIE DE AMASADAS (18/05/2011)						
15/06/11	Probeta 1		Probeta 2		MEDIA EN	MEDIA EN
% AGUA	kN	MPa	kN	MPa	kN	MPa
0	730	41,31	739,7	41,856	734,85	41,583
1,5	717,4	40,696	732,5	41,453	724,95	41,0745
3	677,2	38,321	692,9	39,211	685,05	38,766
4,5	660,8	37,394	662,5	37,489	661,65	37,4415
6						
-6						
-4,5	745,9	42,208	775,8	43,902	760,85	43,055
-3	716,8	40,564	699,3	39,571	716,8	40,564
-1,5	727,9	41,188	724,1	40,978	726	41,083
0	730	41,31	739,7	41,856	734,85	41,583

En este caso, la única probeta que fue desechada tras realizar el ensayo fue la 2ª probeta de -3%, puesto que presentaba oquedades en su superficie la cual cosa hizo disminuir su resistencia a compresión.

Como se puede observar en la grafica, la curva sufre un escalón en las probetas correspondientes a las amasadas de -3% y -4,5%. Uno de los motivos por el cual se podría haber provocado este escalón es que estas dos amasadas contuviesen más cantidad de agua de la que le correspondía.

6. CONCLUSIONES

El presente proyecto ha tratado de estudiar la robustez de un determinado hormigón autocompactante a partir de variaciones del porcentaje de agua sobre su dosificación inicial. Las conclusiones extraídas de todo ello han sido:

Como se a podido ver en las gráficas representativas de los diferentes ensayos, a mayor cantidad de agua en la dosificación, se producían mayores diámetros en al ensayo del escurrimiento y tiempos más pequeños, se producían menores diferencias entre las alturas de dentro y afuera en el anillo japonés, y por ultimo se producían unos tiempos en el embudo en V mas pequeños.

Del mismo modo, cuando íbamos disminuyendo la cantidad de agua progresivamente en la dosificación, los resultados obtenidos tendían a dar diámetros más pequeños en el ensayo de escurrimiento, con tiempos mayores. En el anillo japonés obteníamos mayores diferencias de alturas entre dentro y fuera del anillo. Y en el embudo en V obteníamos tiempos mayores.

Respecto a la segregación y a la exudación del HAC, era imprescindible la utilización de AMV sobre todo para los casos en los que se añadía mas agua.

A pesar de utilizar AMV era muy probable que a partir de unos porcentajes de +4,5% y +6% las tortas obtenidas, produjesen segregación.

Cabe decir que tal y como se podía observar tras rellenar las probetas y dejarlas reposar, el hormigón autocompactante obtenido no producía exudación en ningún caso. Ello se debía a que el cemento que utilizábamos era un cemento muy fino y contenía aditivos también muy finos.

Por el contrario, a medida que producíamos HAC con menor cantidad de agua, a partir de los porcentajes de -4,5% en algunos casos obteníamos tortas muy pequeñas que ya no cumplían como hormigón autocompactante, y para porcentajes de -6% de agua ningún hormigón cumplía con las caracteriasticas de un autocompactante.

Por lo tanto para producir un hormigón autocompactante de unas características adecuadas, seria aconsejable que no se produjesen variaciones de agua mayores a $\pm 3\%$.

Es muy importante remarcar la importancia de la humedad de los áridos. Como se a explicado, al inicio de cada jornada se tomaba la humedad de los áridos y se ajustaba la dosificación, pero dicha humedad era un factor muy sensible porque era muy fácil que se produjesen variaciones de dicha humedad a lo largo de l día. Por lo que era muy importante mantener los áridos en las mejores condiciones posibles, intentando mantener su humedad. Puesto que las variaciones de la humedad producían variaciones en los resultados.

7. BIBLIOGRAFÍA

Autores y Entidades

Directrices Europeas para el Hormigón Autocompactable Especificaciones, Producción y Uso, Febrero 2006

EHE-2008. *Instrucción Española de Hormigón Estructural. Anejo 17*, Ministerio de Fomento, Madrid, 2008.

CALABUIG PASTOR, R. ARILLA AGÓRRIZ, E. y LÓPEZ TOLEDO V. M., “Apuntes de conglomerantes y materiales componentes de morteros y hormigones”, Departamento de Construcciones Arquitectónicas, ETSIE, UPV, Ref.: 2011.261.

VALIENTE SOLER, J. M., AZNAR MOLLÁ, J. y PITARCH ROIG, Á. M. “Materiales de construcción conglomerados: pastas, morteros y preliminares del hormigón”, Departamento de Construcciones Arquitectónicas, ETSIE, UPV, Ref.:2011.772.

VALIENTE SOLER, J. M. y PITARCH ROIG, Á. M. “Materiales de construcción yesos, cales y cementos, fundamentos”, Departamento de Construcciones Arquitectónicas, ETSIE, UPV, Ref.:2011.301.

GARCÍA BALLESTER, L. V. “Introducción al hormigón, Propiedades del hormigón fresco, Propiedades del hormigón endurecido y Áridos para hormigón. Granulometría”, Departamento de Construcciones Arquitectónicas, ETSIE, UPV. Ref.: A.2036.

EFNARC, “*achieving the highest standards*”. Especificaciones y directrices para el Hormigón autocompactable – HAC, Febrero 2002.

BERMEJO NÚÑEZ, E. B. “ Dosificación, propiedades y durabilidad en el hormigón autocompactable para edificación”, Tesis doctoral, ETSICCP, UPM, Madrid 2009.

CLAUDE AÏTCIN, P. “El futuro del hormigón y el hormigón del futuro”, Universidad de Sherbrooke, Québec Canadá.

DAVID BONEN, “Self Consolidating Concrete”, The Center for Advanced Cement Based Materials White Paper, ACBM, February 2007.

GARCÍA-GASCO LOMINCHAR, S.; MAS LLORENS, V.; y SÁEZ-BRAVO PICÓN E. “Piel del Hormigón, Aspectos técnicos y estéticos del hormigón autocompactable”, CEMEX ESPAÑA, V- 2009.

AGULLO, L.; GETTU, R. “Estado del arte del hormigón autocompactable y su caracterización, Parte 1 y Parte 2” Departamento de la Ingeniería de la Construcción, ETS de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, UPC.

Normas UNE

UNE 83361, *Hormigón Autocompactable. Caracterización de la fluidez. Ensayo del escurrimiento*, AENOR, España, 2007.

UNE 83362, *Hormigón Autocompactante. Caracterización de la fluidez en presencia de barras. Ensayo del escurrimiento con el anillo japonés*, AENOR, España, 2007.

UNE 83364, *Hormigón Autocompactante. Determinación del tiempo de flujo. Ensayo del embudo en V*, AENOR, España, 2007.

UNE-EN 12350-7, *Ensayos de hormigón fresco. Parte 7: Determinación del contenido de aire. Métodos de presión*, AENOR, España, 2010.

UNE-EN 12620: 2003, Áridos para hormigón.

UNE 146121: 2000, Áridos para la fabricación de hormigones. Especificaciones para los áridos utilizados en los hormigones destinados a la fabricación de elementos de hormigón estructural.

UNE-EN 932-1:1997 , Parte 1: Métodos de muestreo.

UNE-EN 12390-3 Ensayos de hormigón endurecido Parte 3: Determinación de la resistencia a compresión de probetas

Paginas Web

<http://www.concretebasics.org>

<http://www.ingenieria-arquitectura-basf-cc.es/>

ANEJOS

ANEJO 1. ENSAYOS PARA EL HAC EN ESTADO FRESCO

Ensayo del escurrimiento

El valor del ensayo de asentamiento describe el flujo de una mezcla fresca y no confinada. Es un ensayo delicado que normalmente será especificado para todos los HAC, como ensayo inicial de que la consistencia del hormigón fresco cumple con las especificaciones. Las observaciones visuales durante el ensayo y/o durante la medida del tiempo T500 pueden dar información adicional sobre la segregación y la uniformidad de cada entrega.

Los valores normales para los distintos tipos de asentamiento y su campo de aplicaciones se describen a continuación:

SF1 (550 – 650 mm) es apropiado para:

- estructuras en masa o poca densidad de armaduras que sean llenadas desde la parte superior con desplazamiento libre desde el punto de entrega (p.e. losas de cimentación o pavimentos)
- hormigones de relleno por bombeo (p.e. encofrados de túneles)
- elementos suficientemente pequeños que no precisen largos flujos horizontales (p.e. pilares y algunas cimentaciones profundas)

SF2 (660 – 750 mm) es adecuado para muchas aplicaciones normales (p.e. muros, pilares)

SF3 (760 – 850 mm) se elabora normalmente con una limitación del tamaño máximo de los áridos (menor de 16 mm) y se usa para aplicaciones verticales en estructuras muy armadas, estructuras de formas complejas, o rellenos bajo los encofrados. El SF3 da normalmente un mejor acabado superficial que el SF2 para aplicaciones verticales pero la segregación es más difícil de controlar.

Valores mayores de 850 mm pueden especificarse en algunos casos especiales, pero deberán extremarse las precauciones, considerando la segregación y el tamaño máximo de los áridos será normalmente menor de 12 mm.

Introducción

Es un método para caracterizar la fluidez del hormigón autocompactante en estado fresco, en cuya composición no intervengan áridos de tamaño máximo superior a 25 mm, mediante la determinación del escurrimiento y el tiempo de escurrimiento medidos al dejar fluir el hormigón libremente tras introducirlo en un molde en forma de tronco de cono.

El tamaño de la muestra debe ser de, al menos, 10 l de hormigón fresco.

Aparatos

- Bandeja, hecha con un placa plana con un área de cómo mínimo 900 mm x 900 mm en la que se pueda verter el hormigón. La placa tendrá una superficie plana, lisa y no absorbente con un grosor mínimo de 2mm. La superficie no debe ser fácilmente atacable por la pasta de cemento ni ser oxidable. La construcción de la placa debe prevenir la distorsión. La desviación de la planimetría no debe exceder de 3 mm en ningún punto cuando un borde recto se sitúa entre los centros de dos caras opuestas.
El centro de la placa debe estar marcada con una cruz, las líneas de ésta serán paralelas a los bordes de la placa y con círculos de 200 mm de diámetro y de 500 mm de diámetro de centro coincidente con el punto central de la placa.
- Metro o regla graduada, desde 0 mm hasta 1000 mm con intervalos de 1mm.
- Cronómetro, capaz de medir con una resolución de 0,1 s.
- Anillo pesado (opcional), con una masa mínima de 9 kg.

Procedimiento

Se coloca la bandeja sobre una superficie plana y horizontal libre de vibraciones o sacudidas externas. Se humedecen la bandeja y el molde inmediatamente antes del ensayo, sin dejar agua libre.

Se sitúa el molde centrado sobre la bandeja ayudándose de la marca circular de (200 ± 1) mm de diámetro, y se mantiene en posición presionando las asas.

Se llena el molde de una sola vez a partir de la muestra contenida en el recipiente, ayudándose opcionalmente de la tolva. Con la barra, se enrasa el hormigón con el borde superior del molde, limpiando con el paño húmedo la zona libre de la bandeja de cualquier resto de hormigón.

A continuación, se eleva verticalmente el molde, tirando de las asas. Esta operación debe realizarse de forma continua en un tiempo comprendido entre 2 s y 3 s. En el momento de levantar el molde, y de manera simultánea, se acciona el cronómetro y se detiene cuando la masa alcanza visualmente la marca de 500 mm de diámetro. Una vez cesa completamente el movimiento del hormigón, se miden con la regla los diámetros finales alcanzados por éste en dos direcciones perpendiculares, d_{f1} y d_{f2} .

El ensayo se considera correctamente ejecutado si la diferencia entre los dos diámetros d_{f1} y d_{f2} es menor o igual a 50mm.

Se observa detenidamente si se produce segregación, así como la posible exudación de la pasta en la zona perimetral, o la mayor concentración de árido grueso en la zona central de la masa de hormigón.

El tiempo empleado en la toma de muestras, nivelación y enrasado del hormigón no debe superar los 3 min.

Resultados del ensayo

- El escurrimiento, d_f es el valor resultante de $(d_{f1} \text{ y } d_{f2})/2$, redondeado a los 5 mm.
- El tiempo de escurrimiento, T_{50} , es el tiempo empleado, en segundos, en alcanzar el diámetro de 500mm.

Ensayo del Anillo Japonés

Introducción

El anillo japonés es un importante aspirante para la determinación de la capacidad de paso in situ.

Este ensayo especifica un método para caracterizar la fluidez del hormigón autocompactante en estado fresco, en cuya composición no intervengan áridos de tamaño máximo superior a 25 mm, mediante la determinación del escurrimiento, el tiempo de escurrimiento y el coeficiente de bloqueo, medidos al introducir el hormigón en un molde con forma de tronco de cono y hacerlo pasar a través de unas barras metálicas dispuestas en forma de anillo.

Aparatos

Los aparatos a utilizar para este ensayo serán los mismos que para el ensayo del escurrimiento además del siguiente:

Anillo de acero: conocido como anillo japonés, de diámetro medio (300 ± 1) mm, de sección rectangular de (30 ± 1) mm \times (20 ± 1) mm.

A lo largo de la circunferencia del anillo correspondiente a un diámetro de (300 ± 1) mm, se dispondrán una serie de barras lisas equidistantes entre sí, de longitud (100 ± 1) mm, mediante un sistema de fijación que asegure la rigidez del sistema de manera que las barras se mantengan perpendiculares al plano del anillo:

- 20 barras de 10 mm de diámetro, si el tamaño máximo del árido es menor o igual a 20mm. Figura 1
- 12 barras de 28 mm de diámetro, si el tamaño máximo del árido es mayor que 20mm. Figura 2

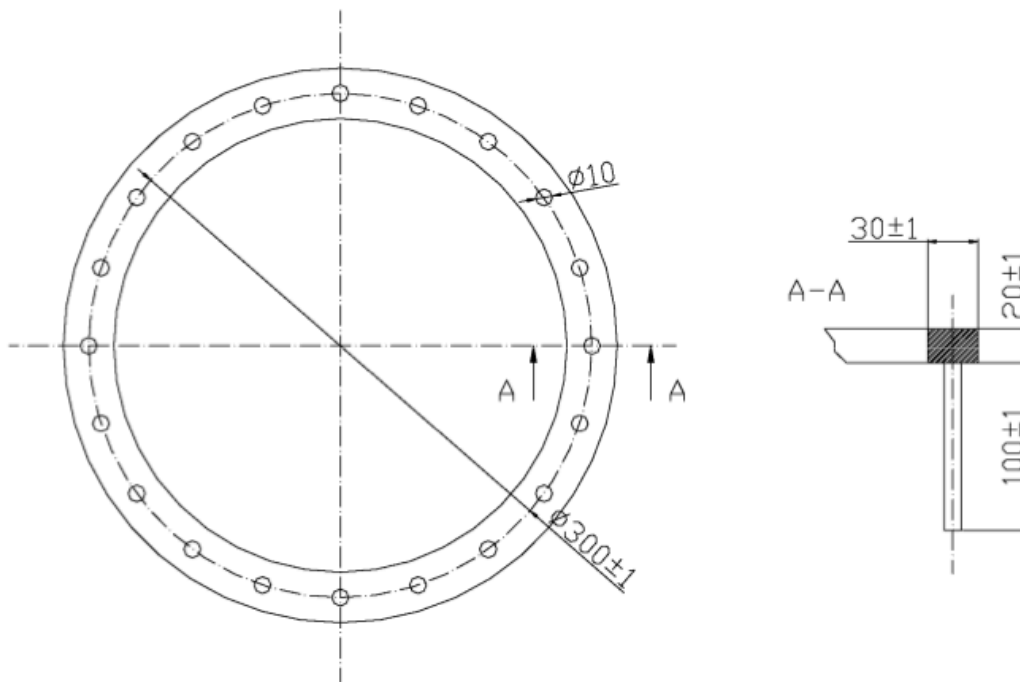


Figura 1 – Anillo japonés para tamaño máximo de árido menor o igual a 20 mm

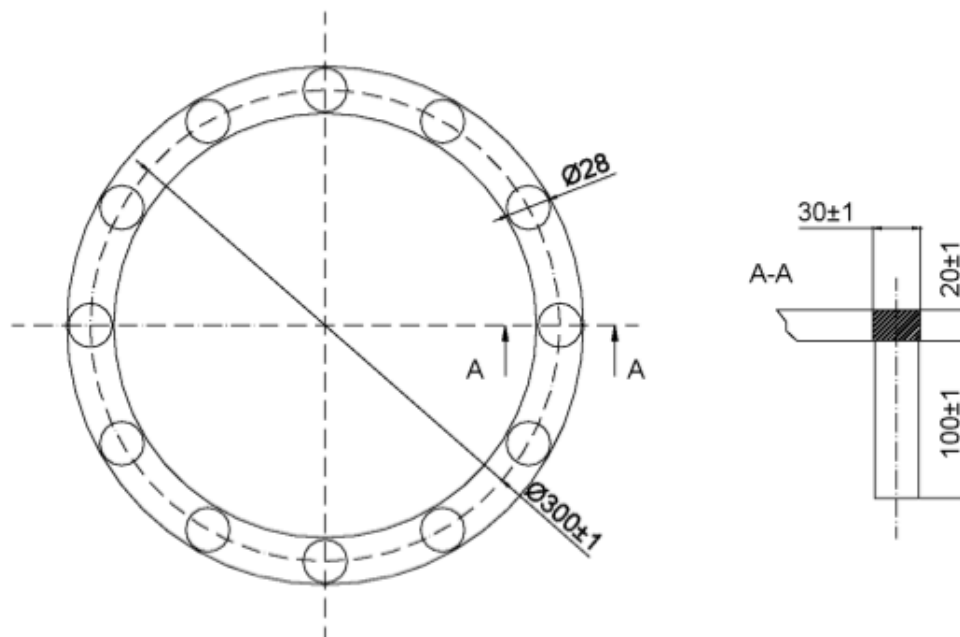


Figura 2 – Anillo japonés para tamaño máximo de árido superior a 20 mm

Procedimiento

Se coloca la bandeja sobre una superficie plana y horizontal libre de vibraciones o sacudidas externas. Se humedecen la bandeja y el molde inmediatamente antes del ensayo, sin dejar agua libre.

Se sitúa el molde centrado sobre la bandeja ayudándose de la marca circular de (200 ± 1) mm de diámetro.

Se sitúa el anillo centrado sobre la bandeja, concéntrico al molde, ayudándose de la marca circular de (300 ± 1) mm de diámetro.

Se mantiene el molde en posición presionando las asas.

Se llena el molde de una sola vez a partir de la muestra contenida en el recipiente, ayudándose opcionalmente de la tolva. Con la barra, se enrasa el hormigón con el borde superior del molde, limpiando con el paño húmedo la zona libre de la bandeja de cualquier resto de hormigón.

A continuación, se eleva verticalmente el molde, tirando de las asas. Esta operación debe realizarse de forma continua en un tiempo comprendido entre 2 s y 3 s. En el momento de levantar el molde, y de manera simultánea, se acciona el cronómetro y se detiene cuando la masa alcanza visualmente la marca de 500 mm de diámetro.

Una vez cesa completamente el movimiento del hormigón, se miden con la regla los diámetros finales alcanzados por éste en dos direcciones perpendiculares, d_{f1} y d_{f2} .

El ensayo se considera correctamente ejecutado si la diferencia entre los dos diámetros d_{f1} y d_{f2} es menor o igual a 50mm.

Se mide la distancia vertical entre el borde superior del anillo y la superficie del hormigón en dos puntos de la circunferencia interna del anillo, situados aproximadamente en el punto medio del espacio entre dos barras. Uno de estos puntos estar situado lo más próximo posible a la intersección de la circunferencia interna del anillo con el diámetro en el que se determinó d_{f1} . El otro punto estar situado lo más próximo posible a la intersección de la circunferencia interna del anillo con el diámetro en el que se determinó d_{f2} . Restando estas distancias de la altura total del anillo, 120 mm, se obtiene la altura H1 según lo mostrado en la figura 3, como el promedio de las dos determinaciones.

Se mide la distancia vertical entre el borde superior del anillo y la superficie del hormigón en dos puntos de la circunferencia externa del anillo, situados en el punto medio del espacio entre dos barras. Uno de estos puntos estar situado lo más próximo posible a la intersección de la circunferencia externa del anillo con el diámetro en el que se determinó d_{f1} . El otro punto estar situado lo más próximo posible a la intersección de la circunferencia externa del anillo con el diámetro en el que se determinó d_{f2} . Restando estas distancias de la altura total del anillo, 120 mm, se

obtiene la altura H2 según lo mostrado en la figura 3, como el promedio de las dos determinaciones.

Se observa detenidamente si se produce segregación, así como la posible exudación de la pasta en la zona perimetral, o la mayor concentración de árido grueso en la zona central de la masa de hormigón.

El tiempo empleado en la toma de muestras, llenado del molde y enrasado del hormigón no debe superar los 3 min.

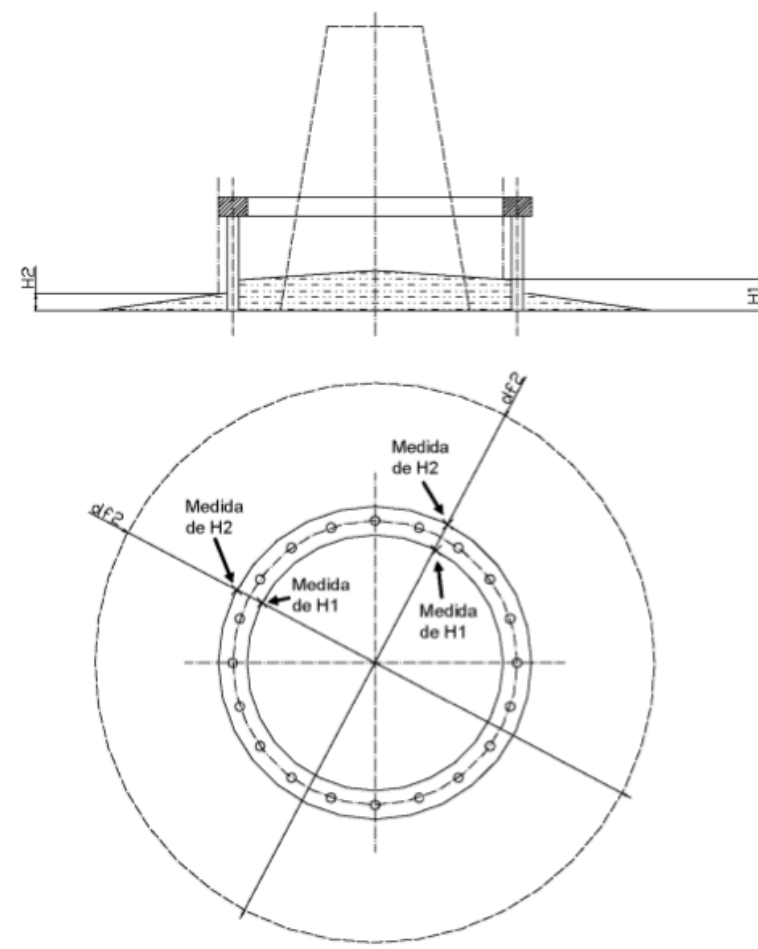


Figura 3 – Definición de H1 y H2

Resultados del ensayo

- El escurrimiento, d_{jf} , es el valor resultante de $(d_{f1} + d_{f2})/2$, redondeado a los 5mm.
- El tiempo de escurrimiento, T_{J50} , es el tiempo empleado, en segundos, en alcanzar el diámetro de 500mm.
- El coeficiente de bloqueo C_{bE} , se calcula mediante la expresión:

$$C_{bE} = (H2/H1) \times 100$$

Ensayo del Embudo en V

Introducción

El ensayo del embudo en V se usa para calcular la viscosidad y la capacidad de llenado del hormigón autocompactable.

En él se especifica el procedimiento para determinar el tiempo de flujo del embudo en V del HAC. El ensayo no es adecuado si el tamaño máximo de los áridos supera los 20 mm.

Aparatos

- Embudo en V, hecho con las dimensiones de la figura 1 (tolerancias de ± 1 mm), llenado con una carga rápida, disponiendo de una compuerta hermética en su base, colocado de tal modo que la parte superior esté horizontal. El embudo en V será metálico; las superficies deben ser lisas, y sin ser fácilmente atacables por la pasta de cemento ni ser oxidables.
- Recipiente, para almacenar la muestra de ensayo, de volumen mínimo 12 l, y mayor que el volumen embudo.
- Cronómetro, con una resolución de 0,1s.
- Barra metálica, para enrasar el nivel de hormigón a la parte superior del embudo.

Procedimiento

Se coloca el embudo sobre su soporte, asegurándose de que descansa sobre una superficie horizontal, libre de vibraciones o sacudidas externas, con sus aperturas en el plano horizontal. Se humedecen con el paño las caras interiores inmediatamente antes del ensayo, sin dejar agua libre.

Se comprueba que el sistema de cierre funciona correctamente, está asegurado y no deja escapar el hormigón.

Se llena el molde de una sola vez, a partir de la muestra contenida en el recipiente. Con la barra, se enrasa el hormigón con el borde superior. Se coloca bajo el embudo el recipiente para recoger el hormigón.

Transcurridos 10 s después del enrasado, se abre el dispositivo de cierre. Se acciona el cronómetro en el momento de abrir el cierre, y se detiene cuando se vacía el embudo, considerando este momento como el instante en el que el operador, observando el flujo desde la parte superior del embudo, vislumbra la luz a través de la boca inferior del mismo.

El tiempo empleado en la toma de muestras, llenado del molde y enrasado del hormigón no debe superar los 3 min.

Resultados del ensayo

El tiempo de flujo, T_V , es el tiempo que tarda en vaciarse el embudo, en segundos.

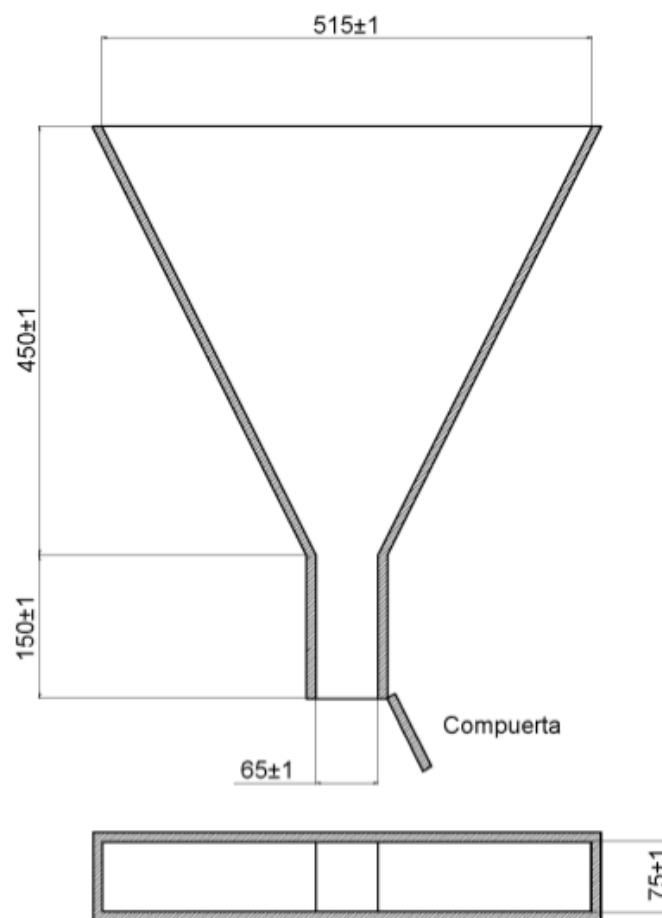


Figura 1 – Forma y dimensiones del embudo en V

ANEJO 2. ENSAYOS PARA EL HAC EN ESTADO ENDURECIDO

El objetivo es la determinación de la resistencia a compresión de probetas de ensayo de hormigón endurecido.

Las probetas se comprimen hasta rotura en una máquina de ensayo de compresión conforme a la Norma EN 12390-4.

Se registra la máxima carga alcanzada por la probeta y se calcula la resistencia a compresión del hormigón.

El aparato utilizado para este ensayo es, máquina de ensayo a compresión, conforme a la Norma EN 12390-4.

El procedimiento es el siguiente:

Se limpian los platos de carga de la máquina, debiendo eliminarse cualquier resto de gravilla u otro material extraño de las superficies de la probeta que han de estar en contacto con los platos. No se debe usar ningún suplemento distinto de los platos auxiliares o bloques espaciadores, entre la probeta y los platos de ensayo de la máquina. Se seca el exceso de humedad de la superficie de la probeta antes de ponerla en la máquina de ensayos. Las probetas cúbicas se colocan de tal forma que la carga se aplique perpendicularmente a la dirección de hormigonado. Las probetas deben centrarse respecto al plato inferior con una aproximación de $\pm 1\%$ de la dimensión normalizada del lado de la probeta cúbica o del diámetro normalizado de la probeta cilíndrica. Si se usan platos auxiliares, se alinean con las caras superior e inferior de las probetas. En las prensas con dos columnas, las probetas cúbicas deberían situarse con la cara fratasada frente a una de ellas.

Se selecciona una velocidad de carga constante dentro del rango de $0,6 \pm 0,2$ MPa/s ($N/mm^2 \cdot s$). Se aplica la carga inicial, que no debe exceder de aproximadamente el 30% de la carga de rotura. Después de esto, se aplica la carga a la probeta sin brusquedades y se incrementa continuamente, a la velocidad seleccionada $\pm 10\%$, hasta que no se pueda soportar más carga. Cuando se use una prensa de control manual, cualquier tendencia a disminuir la velocidad de carga cuando la probeta se aproxima al punto de rotura debe ser corregida mediante el ajuste adecuado de los controles. Se registra la carga máxima indicada en kN.

En la figura 1 se dan ejemplos de rotura de probetas mostrando que los ensayos se han realizado satisfactoriamente para probetas cúbicas y en la figura 3 para las cilíndricas. En la figura 2 se muestran ejemplos de roturas no satisfactorias de probetas cúbicas y en la figura 4 para las probetas cilíndricas. Si la rotura no es satisfactoria debe hacerse constar con referencia al tipo de rotura más parecido y que está designado por una letra en las figuras 2 ó 4.

Los resultados vienen expresados por la siguiente formula:

$$f_c = F/A_c$$

donde:

- f_c es la resistencia a compresión, en MPa (N/mm²);
- F es la carga máxima de rotura, en N;
- A_c es el área transversal de la probeta sobre la que actúa la fuerza de compresión, calculada a partir de las dimensiones normalizadas de la probeta (véase la Norma EN 12390-1) o de las medidas de la probeta si se ensaya de acuerdo con el anexo B en mm².

La resistencia a compresión debe expresarse con aproximación de 0,1 MPa (N/mm²)

ANAJO 3. ESTADILLOS CON LOS RESULTADOS DE LOS ENSAYOS

Estadillo 1ª Serie de amasadas (16/05/2011)

16/05/11	0%	1,50%	3%	4,50%	6%	-1,50%	-3%	-4,50%	-6%
DATOS	1º ENSAYO	2º ENSAYO	3º ENSAYO	4º ENSAYO	5º ENSAYO	6º ENSAYO	7º ENSAYO	8º ENSAYO	9º ENSAYO
CEM	5,250	5,250	5,250	5,250	5,250	5,250	5,250	5,250	5,250
AGUA	2,596	2,646	2,695	2,745	2,795	2,546	2,496	2,447	2,397
SUP.PLAST	0,087	0,087	0,087	0,087	0,087	0,087	0,087	0,087	0,087
VISCOSANT.	0,016	0,016	0,016	0,016	0,016	0,016	0,016	0,016	0,016
ARENA0/2	6,781	6,750	6,719	6,688	6,657	6,812	6,842	6,873	6,904
ARENA 0/4	10,273	10,226	10,180	10,133	10,086	10,320	10,367	10,413	10,460
GRAVA	11,000	10,950	10,900	10,850	10,800	11,050	11,100	11,150	11,200

RESULTADOS										
ESCURRIMIENTO	Ø 1	67	75	70	73	77	71	54	67	
	Ø 2	68	75	72	75	78	72	58	67	
	SEC.	1,97	2,17	1,8	0,81	0,6	2,17	4	2	
ANILLO JAPONES	Ø 1	61	67	65	72	78	65	50	62	
	Ø 2	62	71	67	74	79	67	50	64	
	SEC.	2,05	2,6	3	2	1,8	3	-	4,09	
	1) h FUERA	10,2	10,4	10,6	11,3	11,6	10,5	10	10,5	
	2) h DENTRO	8,5	9,8	9,3	11	11,4	10	7,4	9,5	
	3) h FUERA	10,3	10,9	10,6	11,5	11,5	10,7	10,1	10,4	
	4) h DENTRO	9,5	10	10	11,5	11,4	8,5	6,4	9,5	
	5) h FUERA	10,2	10,7	10	11,5	11,5	10,5	10,5	10,1	
	6) h DENTRO	9,6	9,5	8,5	11,3	11,5	9,7	7	10	
7) h FUERA	10,2	10,8	10,4	11,3	11,6	10,6	9,4	10,5		
8) h DENTRO	9,6	9,4	9,5	11	11,5	9,3	7	9,4		
EMBUDO EN V	SEC	8,25	5,72	6,47	3,37	3,16	7,81	12,06	7,06	
VALIDO O NULO ¿PORQUÉ?		No hay segregación ni exudación	Segrega muy poco	Segrega levemente	Segrega muy levemente	Ha segregado	Segrega levemente	No segrega	No segrega	

Estadillo 2ª Serie de amasadas (18/05/2011)

18/05/11	0%	1,50%	3%	4,50%	6%	-1,50%	-3%	-4,50%	-6%
DATOS	1º ENSAYO	2º ENSAYO	3º ENSAYO	4º ENSAYO	5º ENSAYO	6º ENSAYO	7º ENSAYO	8º ENSAYO	9º ENSAYO
CEM	5,250	5,250	5,250	5,250	5,250	5,250	5,250	5,250	5,250
AGUA	2,538	2,588	2,638	2,688	2,738	2,488	2,438	2,388	2,338
SUP.PLAST	0,087	0,087	0,087	0,087	0,087	0,087	0,087	0,087	0,087
VISCOSANT.	0,016	0,016	0,016	0,016	0,016	0,016	0,016	0,016	0,016
ARENA0/2	6,781	6,751	6,720	6,689	6,658	6,812	6,843	6,874	6,905
ARENA 0/4	10,331	10,283	10,236	10,189	10,142	10,378	10,425	10,472	10,519
GRAVA	11,000	10,950	10,900	10,850	10,800	11,050	11,100	11,150	11,200

RESULTADOS										
ESCURRIMIENTO	Ø 1	65	73	78	63		67	62	59	
	Ø 2	66	73	80	64		68	63	60	
	SEC.	1,53	1,6	1,62	1,88		2,12	3,28	2,3	
ANILLO JAPONES	Ø 1	63	66	78	63		62	60	55	
	Ø 2	64	67	78	65		64	60	58	
	SEC.	4	1,5	0,75	1,5		2,93	3,35	4,66	
	1) h FUERA	11,1	10,4	11,8	10,3		10,4	11,5	10,1	
	2) h DENTRO	7	9,3	11	9		9,5	8,5	9	
	3) h FUERA	10,7	10,1	11,8	10,4		10,5	11,1	10,6	
	4) h DENTRO	8,5	10	11	9,8		8,9	9	8	
	5) h FUERA	11	10,5	10,8	10,6		10	10,7	9,9	
	6) h DENTRO	9,1	10	10,8	9,4		9,2	9	9	
7) h FUERA	11	10,7	11	10,7		10,3	11,5	9,6		
8) h DENTRO	8,4	9,8	10,8	8,6		8	9	8		
EMBUDO EN V	SEC	3,72	5,31	3,16	8,84		9,56	15,72	20,85	
VALIDO O NULO ¿PORQUÉ?		Segrega levemente	Segrega levemente	Segrega levemente	No segrega				No segrega	

Estadillo serie de repetición de amasadas (09/06/2011)

09/06/11		0%	1,50%	3%	4,50%	6%	-1,50%	-3%	-4,50%	-6%	2ª -6%
DATOS		1º ENSAYO	2º ENSAYO	3º ENSAYO	4º ENSAYO	5º ENSAYO	6º ENSAYO	7º ENSAYO	8º ENSAYO	9º ENSAYO	10º ENSAYO
CEM		5,250	5,250	5,250	5,250	5,250	5,250	5,250	5,250	5,250	5,250
AGUA		2,160	2,212	2,264	2,315	2,367	2,108	2,056	2,005	1,953	1,953
SUP.PLAST		0,087	0,087	0,087	0,087	0,087	0,087	0,087	0,087	0,087	0,087
VISCOSANT.		0,016	0,016	0,016	0,016	0,016	0,016	0,016	0,016	0,016	0,016
ARENA0/2		6,996	6,964	6,932	6,900	6,868	7,028	7,060	7,091	7,123	7,123
ARENA 0/4		10,494	10,446	10,398	10,351	10,303	10,542	10,589	10,637	10,685	10,685
GRAVA		11,000	10,950	10,900	10,850	10,800	11,050	11,100	11,150	11,200	11,200
RESULTADOS											
ESCURRIMIENTO	Ø 1	67	67	68	70	72	70	68	66	62	62
	Ø 2	67	69	69	71	73	70	68	67	62	63
	SEC.	2,12	2,1	1,38	1,42	1,37	2,45	2,31	2,86	3,8	3,65
ANILLO JAPONES	Ø 1	66	70	71	73	75	68	65	64	59	60
	Ø 2	67	70	72	73	75	68	66	65	59	60
	SEC.	2	1,74	1,43	1,19	1,15	2,76	3,05	4,11	4,63	4,05
	1) h FUERA	11	10,7	11,1	10,9	11,1	10,6	11,1	10,6	10,6	10,7
	2) h DENTRO	10,1	9,7	10,7	10,4	10,9	9,7	9,2	9,5	7,8	7,7
	3) h FUERA	11,2	11,1	11	11	10,8	10,9	10,8	10,8	10,6	10,8
	4) h DENTRO	9,8	10,7	10,3	10	10,3	9,6	9,5	9,4	8,5	8,8
	5) h FUERA	10,9	10,4	11	10,8	11	11	10,5	10,5	10,5	10,3
	6) h DENTRO	9,9	9,5	10,3	10,5	10,7	8,7	8,7	8,8	8,3	8,1
7) h FUERA	11,1	10,9	10,8	11,1	11,2	11	11	10,8	10,4	10,3	
8) h DENTRO	10	8,8	10,3	9,7	10,6	8,6	9,4	9,1	8,5	8,7	
EMBUDO EN V	SEC	6,76	7,03	4,75	4,22	4,13	6,93	8,63	10,31	14,52	12,68
VALIDO O NULO ¿PORQUÉ?											
AÑADIDO A:		SERIE 2	SERIE 1	SERIE 2	SERIE 2	SERIE 2	SERIE 1	SERIE 1	SERIE 2	SERIE 1	SERIE 2

Estadillo 1ª Serie de amasadas corregidas (16/05/2011 + 09/06/2011)

16/05/2011 + 09/06/2011	0%	1,50%	3%	4,50%	6%	-1,50%	-3%	-4,50%	-6%
DATOS	1º ENSAYO	2º ENSAYO	3º ENSAYO	4º ENSAYO	5º ENSAYO	6º ENSAYO	7º ENSAYO	8º ENSAYO	9º ENSAYO
CEM	5,250	5,250	5,250	5,250	5,250	5,250	5,250	5,250	5,250
AGUA	2,596	2,212	2,695	2,745	2,795	2,108	2,056	2,447	1,953
SUP.PLAST	0,087	0,087	0,087	0,087	0,087	0,087	0,087	0,087	0,087
VISCOSANT.	0,016	0,016	0,016	0,016	0,016	0,016	0,016	0,016	0,016
ARENA0/2	6,781	6,964	6,719	6,688	6,657	7,028	7,060	6,873	7,123
ARENA 0/4	10,273	10,446	10,180	10,133	10,086	10,542	10,589	10,413	10,685
GRAVA	11,000	10,950	10,900	10,850	10,800	11,050	11,100	11,150	11,200

RESULTADOS										
ESCURRIMIENTO	Ø 1	67	67	70	73	77	70	68	67	62
	Ø 2	68	69	72	75	78	70	68	67	62
	SEC.	1,97	2,1	1,8	0,81	0,6	2,45	2,31	2	3,8

ANILLO JAPONES	Ø 1	64	70	65	72	78	68	65	62	59
	Ø 2	64	70	67	74	79	68	66	64	59
	SEC.	2,05	1,74	3	2	1,8	2,76	3,05	4,09	4,63
	1) h FUERA	10,2	10,7	10,6	11,3	11,6	10,6	11,1	10,5	10,6
	2) h DENTRO	8,5	9,7	9,3	11	11,4	9,7	9,2	9,5	7,8
	3) h FUERA	10,3	11,1	10,6	11,5	11,5	10,9	10,8	10,4	10,6
	4) h DENTRO	9,5	10,7	10	11,5	11,4	9,6	9,5	9,5	8,5
	5) h FUERA	10,2	10,4	10	11,5	11,5	11	10,5	10,1	10,5
	6) h DENTRO	9,6	9,5	8,5	11,3	11,5	8,7	8,7	10	8,3
7) h FUERA	10,2	10,9	10,4	11,3	11,6	11	11	10,5	10,4	
8) h DENTRO	9,6	8,8	9,5	11	11,5	8,6	9,4	9,4	8,5	

EMBUDO EN V	SEC	8,25	7,03	6,47	3,37	3,16	6,93	8,63	7,06	14,52
-------------	-----	------	------	------	------	------	------	------	------	-------

VALIDO O NULO ¿PORQUÉ?	No hay segregación ni exudación		Segrega levemente	Segrega muy levemente	Ha segregado			No segrega	
-----------------------------------	---------------------------------	--	-------------------	-----------------------	--------------	--	--	------------	--

AMASADAS REPETIDAS:		AMASADA REPETIDA				AMASADA REPETIDA	AMASADA REPETIDA		AMASADA REPETIDA
----------------------------	--	------------------	--	--	--	------------------	------------------	--	------------------

Estadillo 1ª Serie de amasadas corregidas (16/05/2011 + 09/06/2011)

18/05/2011 + 09/06/2011	0%	1,50%	3%	4,50%	6%	-1,50%	-3%	-4,50%	-6%
DATOS	1º ENSAYO	2º ENSAYO	3º ENSAYO	4º ENSAYO	5º ENSAYO	6º ENSAYO	7º ENSAYO	8º ENSAYO	9º ENSAYO
CEM	5,250	5,250	5,250	5,250	5,250	5,250	5,250	5,250	5,250
AGUA	2,160	2,588	2,264	2,315	2,367	2,488	2,438	2,005	1,953
SUP.PLAST	0,087	0,087	0,087	0,087	0,087	0,087	0,087	0,087	0,087
VISCOSANT.	0,016	0,016	0,016	0,016	0,016	0,016	0,016	0,016	0,016
ARENA0/2	6,996	6,751	6,932	6,900	6,868	6,812	6,843	7,091	7,123
ARENA 0/4	10,494	10,283	10,398	10,351	10,303	10,378	10,425	10,637	10,685
GRAVA	11,000	10,950	10,900	10,850	10,800	11,050	11,100	11,150	11,200

RESULTADOS										
ESCURRIMIENTO	Ø 1	67	73	68	70	72	67	62	66	62
	Ø 2	67	73	69	71	73	68	63	67	63
	SEC.	2,12	1,6	1,38	1,42	1,37	2,12	3,28	2,86	3,65
ANILLO JAPONES	Ø 1	66	66	71	73	75	62	60	64	60
	Ø 2	67	67	72	73	75	64	60	65	60
	SEC.	2	1,5	1,43	1,19	1,15	2,93	3,35	4,11	4,05
	1) h FUERA	11	10,4	11,1	10,9	11,1	10,4	11,5	10,6	10,7
	2) h DENTRO	10,1	9,3	10,7	10,4	10,9	9,5	8,5	9,5	7,7
	3) h FUERA	11,2	10,1	11	11	10,8	10,5	11,1	10,8	10,8
	4) h DENTRO	9,8	10	10,3	10	10,3	8,9	9	9,4	8,8
	5) h FUERA	10,9	10,5	11	10,8	11	10	10,7	10,5	10,3
	6) h DENTRO	9,9	10	10,3	10,5	10,7	9,2	9	8,8	8,1
7) h FUERA	11,1	10,7	10,8	11,1	11,2	10,3	11,5	10,8	10,3	
8) h DENTRO	10	9,8	10,3	9,7	10,6	8	9	9,1	8,7	
EMBUDO EN V	SEC	6,76	5,31	4,75	4,22	4,13	9,56	15,72	10,31	12,68
VALIDO O NULO ¿PORQUÉ?			Segrega levemente							
AMASADAS REPETIDAS		AMASADA REPETIDA		AMASADA REPETIDA	AMASADA REPETIDA	AMASADA REPETIDA			AMASADA REPETIDA	AMASADA REPETIDA

