

Determinación de la cantidad optima de aditivo superplastificante para un hormigón autocompactante. Método de la hormigonera.

Determination of the optimum amount of superplasticising additive for a self-compacting concrete. Concrete mixer method

Isidro A. Carrascal*, Jose A. Sainz-Aja, Juan A. Polanco, Israel Sosa, Carlos Thomas,
Jose Casado y Soraya Diego.

LADICIM (Laboratorio de Ciencia e Ingeniería de los Materiales), Universidad de Cantabria.
E.T.S. de Ing. de Caminos, Canales y Puertos, Av/Los Castros 44, 39005 Santander, España.

RESUMEN

El hormigón autocompactante modifica su comportamiento en estado fresco con pequeños cambios en la dosificación del aditivo superplastificante. Se precisa de un amplio número de ensayos para controlar su trabajabilidad. Con la intención de encontrar un método que permita, con una única amasada, determinar la cantidad óptima de aditivo, se analizó la evolución del consumo eléctrico de la hormigonera al ir añadiendo pequeñas cantidades de aditivo al hormigón. Estos resultados se compararon tanto con los resultados de caracterización en estado fresco típicos como con los resultados del punto de saturación del aditivo, determinado mediante el cono de Marsh. Se ha obtenido una buena correlación entre los resultados obtenidos a través de los ensayos tradicionales y el método de la hormigonera propuesto.

ABSTRACT

Self-compacting concrete modifies its behaviour when fresh with small changes in the dosage of the superplasticising additive. A large number of tests are required to control its workability. The evolution of the electrical consumption of the concrete mixer was analysed when small quantities of additive was added in order to find a method that allows, with a single mix, to determine the optimum quantity of additive. These results were compared both with the typical fresh characterization results and with the results of the saturation point of the additive, determined by means of the Marsh cone. A good correlation has been obtained between the results obtained through the traditional tests and the method of the proposed concrete mixer.

PALABRAS CLAVE: Aditivo, superplastificante, hormigonera, autocompactante, hormigón, Marsh.

KEYWORDS: Additive, superplasticising, concrete mixer, self-compacting, concrete, Marsh.

1. Introducción

Sin lugar a duda, el componente que ha permitido grandes avances en la tecnología del hormigón durante las últimas décadas es el aditivo. Esto se acentúa más con los aditivos superplastificantes de última generación cuya formulación química radica en polímeros solubles en agua de tipo peine. Los aditivos superplastificantes son indispensables en la fabricación de hormigones autocompactantes, ya que permiten reducir el contenido de agua en las mezclas sin afectar la consistencia y mejorar el comportamiento mecánico y la durabilidad. Los beneficios del aditivo se obtienen al modificar la microestructura y composición del gel C-S-H de la pasta de cemento, los compuestos resultantes de la hidratación del cemento y la menor tensión de corte en estado fresco [1].

El comportamiento de las mezclas depende de la compatibilidad entre el aditivo y el cemento, condicionada por factores asociados a formulación de los aditivos, la composición de los cementos y a las condiciones de preparación. En cuanto a los factores asociados al aditivo y en los que puede intervenir el usuario de este producto es la dosificación. Es de suponer que, a mayor cantidad de aditivo mayor será el efecto fluidificante, sin embargo, este efecto está limitado por el punto de saturación del aditivo [2].

Los métodos empíricos para la caracterización del hormigón autocompactante en estado fresco no permiten determinar con facilidad el contenido óptimo de aditivo superplastificante y el método que mejor se aproxima es el del cono de Marsh sobre pastas de cemento [3]. Pero todos estos métodos se basan en la preparación de diferentes amasadas con contenidos de aditivo variable, de forma que

se puedan ensayar por separado y analizar los resultados para, por comparación, decidir cuál de todos los contenidos de aditivo es el óptimo. En este trabajo se propone un método alternativo que permite evaluar, con una única amasada, la cantidad óptima de aditivo. Además, se podrán utilizar los mismos áridos y dosificación que el hormigón real, por lo que se podrá evitar la influencia de otras variables como pueden ser la relación W/C, forma y tamaño de los áridos, proporción de los mismos, etc.

2. Material.

2.1 Aditivos Superplastificantes

Los aditivos son productos que añadidos al conglomerante (pasta, mortero, hormigón) en el momento de su elaboración en las condiciones adecuadas, en la forma conveniente y en las dosis precisas, tienen por finalidad modificar en sentido positivo y con carácter permanente las propiedades del conglomerado, o en su caso conferírselas, para su mejor comportamiento en todo o en algún aspecto, tanto en estado fresco como una vez fraguado y endurecido [4].

Los aditivos son un componente esencial de los hormigones autocompactantes. Se pueden emplear más de un tipo de aditivo y en ese caso, al igual que ocurre con el hormigón convencional, es conveniente realizar pruebas de compatibilidad entre ellos y de estos con el cemento.

Actualmente el empleo de los aditivos en los morteros y hormigones ha experimentado un gran incremento como consecuencia de la mejor calidad de los mismos. Puede decirse que un porcentaje muy elevado del hormigón que se fabrica lleva incorporado un tipo u otro de aditivo y que si éstos son de calidad y están correctamente empleados, permiten conseguir

hormigones dóciles, resistentes, durables y económicos.

Cabe indicar que nunca un aditivo va a transformar un hormigón malo en uno bueno, pero sí podrá conseguir que un hormigón bueno mejore.

De acuerdo con su función principal la norma UNE-EN 934-2 [5] clasifica a los aditivos para hormigón y entre ellos se encuentra el aditivo reductor de agua de alta actividad/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 asiento (cono)/escurrimiento, o que produce ambos efectos a la vez.

Los superplastificantes modifican la reología permitiendo conseguir hormigones:

- Muy dóciles y fáciles de poner en obra sin reducir sus resistencias.
- De docilidad normal pero con muy bajo contenido de agua.
- De buena docilidad y menor cantidad de agua de lo normal.
- De baja dosificación de cemento pero que poseen resistencias y docilidad normales.

El aditivo empleado para este trabajo es el MasterGlenium® ACE (Admixture Controlled Energy) 450 de BASF. Se compone de una gama de productos Superplastificantes basados en los nuevos Policarboxilato de éter.

El empleo de este tipo de aditivos es imprescindible en el hormigón autocompactante, especialmente de los superplastificantes de nueva generación, basados en policarboxilatos, que son capaces de reducir el agua hasta en un 40 %.

Los superplastificantes tipo policarboxilatos permiten conseguir una adecuada trabajabilidad y fluidez en el hormigón a pesar del alto contenido de finos que poseen estos hormigones, haciendo que la mezcla tenga una mayor viscosidad y requiera de un menor contenido de agua.

En el Artículo 29º de la Instrucción EHE-08 [6] se limita el contenido de aditivo en un 5 % del peso de cemento.

2.2. Dosificación

Para este estudio se utilizaron hormigones que obedecen a la siguiente dosificación:

- Agua: 6 kg ($W/C = 0,4$)
- Cemento tipo IV/B(V) 32.5 N: 15 kg
- Arena de sílice (0-5): 30,11 kg
- Gravilla caliza (5-12): 19,3 kg

La cantidad de aditivo empleada en cada amasada, A, se determina en valor porcentual en peso respecto al cemento ($100 \cdot A/C$)

3. Metodología de ensayo

3.1 Cono de Marsh

El ensayo de cono de Marsh es la primera aproximación utilizada para la determinación de la cantidad óptima de aditivo en un hormigón. Para ello se utilizará una pasta constituida por el mismo cemento con la que se fabricará el hormigón y una cantidad variable de aditivo de forma que los resultados obtenidos con las pasta se pueden extrapolar al hormigón. En un estudio previo [7], se obtiene una buena correlación entre la fluidez de la pasta de cemento con la trabajabilidad del mortero y del hormigón fabricados con dicho cemento. La dosis óptima podría verse incrementada en el caso del empleo de áridos de elevados coeficientes de absorción [3].

El ensayo es similar al descrito en la normas ASTM C 939-87 [8], NF P18-358 [9] y UNE-EN 445 [10] y consiste, básicamente, en hacer pasar una pasta de cemento a través de un recipiente de forma tronco-cónica con una apertura en la parte inferior de 10 mm de diámetro y cuyas dimensiones se reflejan en la figura 1.

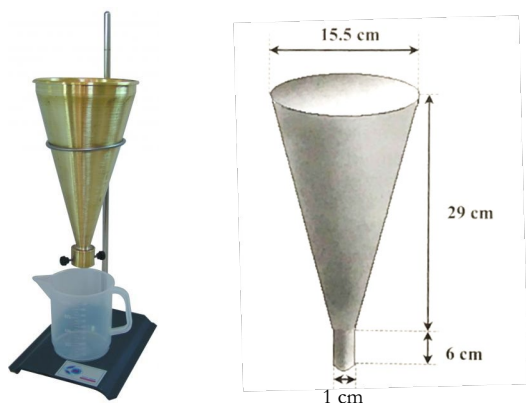


Figura 1. Cono de Marsh.

Una vez preparada la pasta de cemento, se procede a realizar el ensayo del cono de Marsh, colocando el dispositivo descrito sobre un recipiente con el que recoger la pasta de cemento vertida. Se utilizó una variante del método [11] consistente en el empleo de un recipiente graduado y una cámara de video que permite determinar los tiempos de fluidez para diferentes volúmenes, 200 ml, tiempo establecido en el método original y 500, 750 y 1000 ml. En la figura 2 se muestra se muestra el proceso seguido para la determinación del tiempo de fluidez para diferentes volúmenes.



Figura 2. Toma de tiempos en el ensayo de cono de Marsh

Cuanto menor es este tiempo medido, hasta un determinado volumen, mayor es la fluidez de la pasta, realizando este procedimiento para diferentes pastas de cemento con porcentajes de aditivo crecientes, se puede determinar el punto de saturación, a partir del cual añadir más aditivo es contraproducente, se puede producir segregación, además de encarecer el coste del material.

3.2. Ensayos en estado fresco

Una vez establecida el punto de saturación del aditivo sobre la pasta de cemento, se procede a la fabricación de diferentes dosificaciones de hormigones con contenidos de aditivo variable en torno al obtenido como óptimo a partir del cono de Marsh, para verificar si éste contenido obtenido es extrapolable al hormigón.

Para la medida de la consistencia del hormigón fresco o grado que tiene para deformarse y la capacidad que tiene de ocupar todos los huecos del encofrado o molde donde se vierte se realizan los siguientes ensayos en estado fresco:

3.2.1 Ensayo de escurrimiento

El ensayo se realiza de acuerdo a la norma UNE-EN 12350-5 [12]. Se rellena con el hormigón un molde metálico tronco-cónico de 30 cm de altura, 10 cm de diámetro superior y 20 cm de diámetro inferior apoyado sobre una chapa metálica y se espera 30 segundos antes de levantarlo. Una vez retirado en vertical se mide:

- t_{500} : tiempo que tarda en alcanzar la marca de 500 mm que hay en la plancha metálica.
- D_1 y D_2 : diámetros de la torta en dos direcciones perpendiculares una vez que acaba de fluir el hormigón.

En la figura 3 se muestra la ejecución de un ensayo de escurrimiento.



3.2.2 Caja en L

El ensayo se realiza de acuerdo a la norma UNE-EN 12350-10 [13]. La medida de la consistencia del hormigón en estado fresco por medio del ensayo con la caja en L, consiste en rellenar la parte vertical del molde con la compuerta cerrada con el hormigón fresco de forma continua y sin compactación alguna. Tras un tiempo de espera de 60 segundos, se abre la compuerta y cuando el hormigón deja fluir libremente se mide la diferencia de altura que alcanza la masa de hormigón fresco entre los extremos de entrada y final de la caja, H_1-H_2 (Figura 4). Por otro lado, también se puede medir el tiempo que transcurre hasta que la masa de hormigón fresco recorre todo el canal de salida.

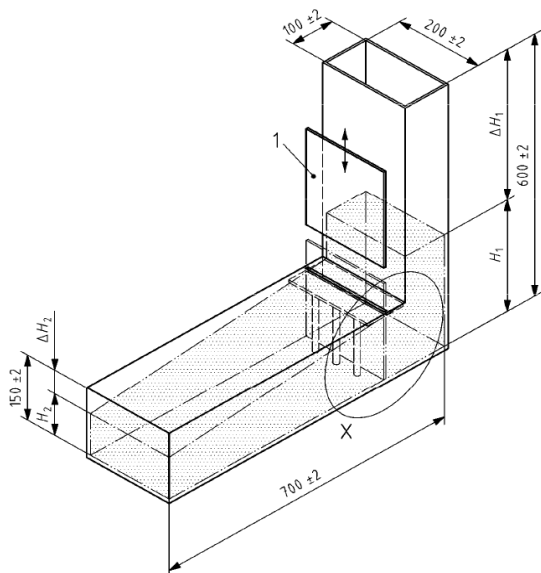


Figura 4. Esquema del dispositivo de la caja en L

3.2.3 Embudo en V

El ensayo se realiza de acuerdo a la norma UNE-EN 12350-9 [14]. La medida de la consistencia del hormigón en estado fresco por medio del ensayo con el embudo en V, consiste en evaluar la habilidad de fluir del hormigón en áreas restringidas en dirección vertical y bajo su propio peso, cualificando la tendencia a la segregación y al bloqueo, mediante observación de la variación de la velocidad de flujo. El Embudo-V, normalmente de acero, tiene forma de V con una apertura en el fondo (ver Figura 5),

donde se coloca una compuerta de rápida apertura, para interferir lo menos posible en el momento de la descarga, el ensayo consiste en llenar el embudo de forma continua y sin compactación alguna; tras un tiempo de espera de 10 segundos se abre la compuerta y en ese instante se comienza a medir el tiempo que tarda el volumen total de hormigón en fluir a través de la apertura.

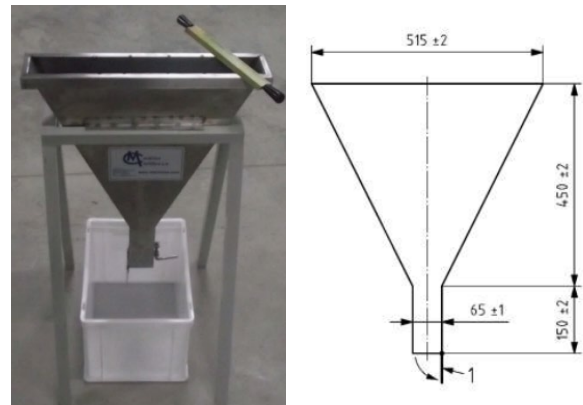


Figura 5. Esquema del dispositivo del embudo en L.

3.3. Método de la hormigonera

El método está basado en el uso de una hormigonera como si de un viscosímetro se tratase. Durante el proceso de amasado del hormigón se irán añadiendo, en tiempos programados, cantidades controladas de aditivo, de manera que la viscosidad de la mezcla se irá modificando, y en el mismo sentido lo hará la fluidez del hormigón en estado fresco.

El método propone el empleo de una hormigonera convencional de eje vertical trifásica, como la que aparece en la figura 6, sin ningún tipo de instrumentación electrónica para medida de la viscosidad. El método propone la medida de la viscosidad de forma indirecta a través del consumo del motor que mueve las palas de la hormigonera. Para ello se medirá el voltaje e intensidad de cada una de las fases, con el objeto de monitorizar la potencia consumida por la hormigonera durante el proceso de amasado. Al principio, sin aditivo en la mezcla, el consumo será elevado, e irá descendiendo a medida que se añade aditivo y la mezcla se hace más fluida.

Para la realización de este trabajo se utiliza una mezcladora forzada de alto rendimiento marca DIEM y modelo DZ100VS. La mezcladora es de eje vertical con un mecanismo mezclador orbital, una capacidad de 100 litros y un tambor de 700 mm de diámetro.



Figura 6. Hormigonera instrumentada para medida de Potencia.

La hormigonera se instrumenta por medio de un analizador trifásico de potencia marca Gossen Metrawatt y modelo MAVOWATT 40 (fig. 7).



Figura 7. Analizador trifásico para la medida de Pot.

Durante todo el proceso de amasado se registró la tensión e intensidad en cada una de las fases con una frecuencia de un dato por segundo, de forma que se permita tener un registro continuo que analice la evolución de la potencia consumida durante todo el proceso de amasado.

Una vez mezclados todos los componentes del hormigón en la mezcladora se mantienen durante 180 segundos (3 minutos) sin añadir aditivo. Trascorrido este tiempo se

comienza a añadir de forma progresiva el aditivo. Se comienza añadiendo una cantidad fija de 0,2 % cada 3 minutos hasta el 1% y a continuación se incrementa la cantidad de aditivo en etapas de 0,4 %, manteniendo los mismos tiempos, hasta el 3,4 %, ultimo valor de aditivo añadido. En la tabla 1 se muestra todo el proceso de mezcla del hormigón con el aditivo.

Tabla 1. Mezcla del aditivo con el hormigón.

N	t_0 (min)	t (min)	V (ml)	Va (ml)	Va (%)
0	0	3	0	0	0
1	3	3	50	50	0.2
2	6	3	50	100	0.4
3	9	3	50	150	0.6
4	12	3	50	200	0.8
5	15	3	50	250	1
6	18	3	100	350	1.4
7	21	3	100	450	1.8
8	24	3	100	550	2.2
9	27	3	100	650	2.6
10	30	3	100	750	3
11	33	3	100	850	3.4

Donde t_0 es el tiempo en el que se añade la cantidad V de aditivo, t es el tiempo que se mantiene cada una de las etapas de amasado y Va es el volumen de aditivo acumulado en cada una de las etapas, N.

4. Análisis de resultados

4.1 Cono de Marsh

Se prepararon pastas de cemento con la misma relación agua-cemento que los hormigones que se emplearon en el estudio ($W/C = 0,4$). Se analizaron 5 condiciones diferentes de concentración de aditivo: A/C = 0,5, 1, 1,5, 2 y 3 %. Y se realizaron medidas del tiempo que tarda en fluir 200, 500, 750 y 1000 ml de la pasta. Para evaluar la influencia de la relación W/C en el punto de saturación, o concentración óptima de aditivo, se repitieron los ensayos con una pastas con $W/C = 0,38$.

Para la medida de los tiempos se grabaron los ensayos en video, lo que permitió asignar tiempos a los diferentes volúmenes con gran precisión.

Una vez obtenidos los tiempos para cada porcentaje de aditivo y para las dos relaciones W/C en la figura 8 se representan las curvas de isovolumen.

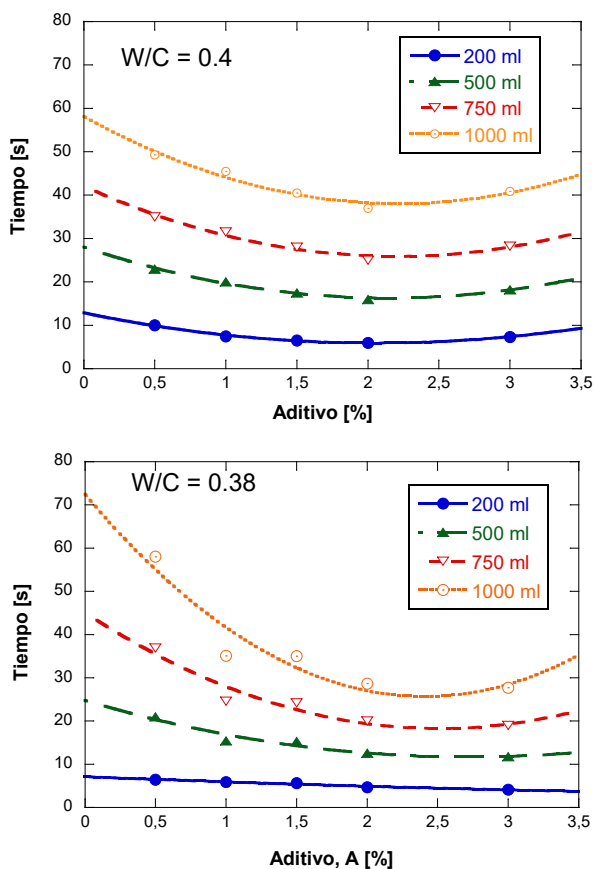


Figura 8. Cono de Marsh para W/C 0,4 y 0,38

Como se puede observar en los gráficos, tras un ajuste parabólico de los datos, la definición del punto de saturación mejora a medida que se incrementa el volumen de pasta analizada. Por otro lado, apenas se aprecia diferencia entre las dos relaciones W/C. Para W/C = 0.4 el punto de saturación queda definido claramente para un 2 % de aditivo. Por otro lado, para W/C = 0.38, a pesar de que la definición no es tan clara, se comprueba que a partir del 2 % la fluidez no mejora, por lo que, también, se considera este valor como el punto

de saturación del aditivo, ya que incrementar el aditivo implica un incremento económico.

4.2 Ensayos en estado fresco

Definido el punto de saturación del aditivo para un pasta de cemento en el 2 %, se realizaron diferentes amasadas con la dosificación indicada en el apartado 2.2. y modificando la cantidad de aditivo empleada: 1, 1.5, 2 y 3 %. Sobre estas amasadas se realizaron los ensayos en estado fresco para verificar si el punto de saturación del aditivo en la pasta se correspondía con la cantidad óptima de aditivo en el hormigón.

4.2.1. Cono de Abrams, ensayo de escurrimiento

El diámetro de la torta es útiles para evaluar la capacidad de deformación del hormigón autocompactable, mientras que el t_{500} se emplean para caracterizar la viscosidad y cohesión.

En la Figura 9 se representan los valores del diámetro de la torta y del t_{500} . Se puede comprobar como tanto el diámetro como el t_{500} presentan una variación importante al pasar de A = 1,5 a 2 %, coincidiendo con el punto de saturación obtenido con el ensayo del cono de Marsh, pero entre 2 y 3 % apenas hay variación.

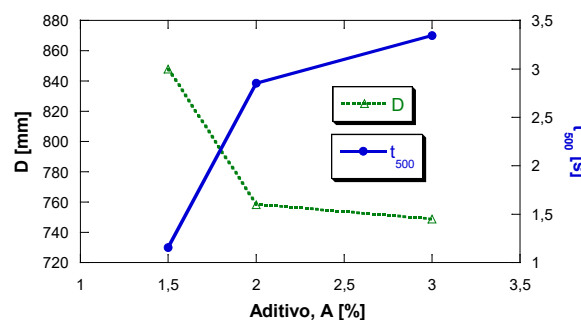


Figura 9. Ensayo de escurrimiento

En la figura 9 no se representan datos para la amasada con A = 1% ya que no se dispone de datos concluyentes, debido a que se trata de un hormigón con consistencia plástica, como queda evidenciado en la Figura 10, donde se puede ver que su fluidez es casi nula.



Figura 10. Ensayo de escurrimiento, Aspecto final.

Teniendo en cuenta este resultado de la amasada con $A = 1\%$ en el ensayo de escurrimiento, no se realizarán los ensayos de

caja en L y embudo en V para esta amasada, ya que no tiene sentido al tratarse de un hormigón que no fluye.

La figura 10 muestra el aspecto de las diferentes amasadas tras el ensayo de escurrimiento. Se puede comprobar que para la amasada del 3 % de aditivo aparece una clara segregación que penaliza los contenidos de aditivo superiores al 2 %.

4.2.2. Caja en L

En la figura 11 se representan los resultados obtenidos con la caja en L, donde se puede comprobar que el parámetro H_1-H_2 presenta un mínimo coincidiendo con el punto de saturación del aditivo.

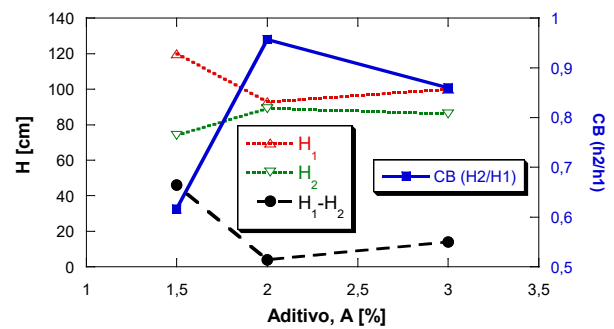


Figura 11. Ensayo de Caja en L

Por otro lado, el coeficiente de bloqueo ($CB=H_2/H_1$), buen indicador de la habilidad para pasar por aperturas estrechas, que incluye la capacidad de deformación y la resistencia al bloqueo, presenta un máximo coincidiendo también con el punto de saturación del aditivo.

4.2.3. Embudo en V

En la figura 12 se representan los resultados obtenidos en el ensayo de embudo en V. Para este ensayo los resultados obtenidos han sido decrecientes hasta 3% no presentando un mínimo en el punto de saturación del aditivo.

Se puede comprobar en dicha figura una mayor fluidez al incrementar el %A, pero se ha comprobado en el ensayo anterior que contenidos de aditivos superiores a la 2 % provocan segregación, de forma que no fluye conjuntamente la pasta y el árido.

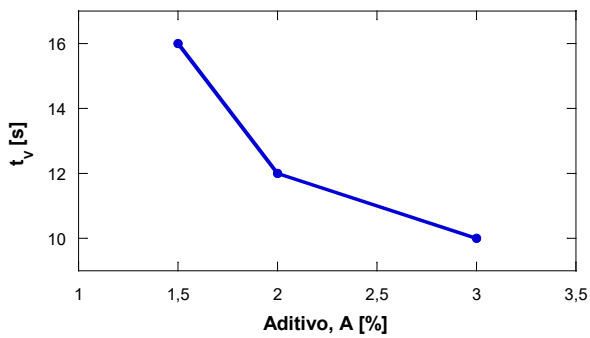


Figura 12. Ensayo de Embudo en V

El método se muestra eficiente para evaluar la habilidad de fluir del hormigón en áreas restringidas en la dirección vertical, sin embargo, el ensayo no permite cualificar bien la tendencia a la segregación y bloqueo entre las armaduras. Asimismo, el resultado no refleja la habilidad de fluir en dirección horizontal o contraria a la gravedad. Por lo tanto, el tiempo de flujo obtenido en este ensayo no es suficiente para cuantificar las propiedades necesarias que garanticen las prestaciones del hormigón como autocompactante, por lo que deberá ser complementado con otros ensayos.

4.3 Método de la hormigonera

La figura 13 representa la evolución de la potencia consumida por cada una de las fases durante todo el proceso de mezclado de las diferentes cantidades parciales del aditivo. En dicha gráfica porción de aditivo, se produce la correspondiente disminución en la potencia, o lo que sería equivalente, la correspondiente disminución de viscosidad, o aumento de fluidez en la mezcla.

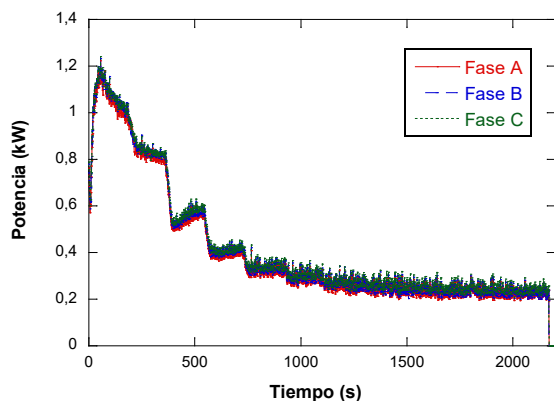


Figura 13. Evolución de la potencia de la amasadora

Al graficar la potencia en función del tiempo del ensayo se puede apreciar una gran fluctuación de los resultados obtenidos. Para evitar este ruido se plantea una metodología que permita asociar un valor numérico constante a cada cantidad de aditivo añadida. De cada escalón se seleccionaron los últimos 50 segundos (cada escalón tiene una duración de 180 segundos), momento en el que ya se considera que el escalón está estabilizado. En este tramo, se selecciona el valor máximo de potencia registrado durante el ensayo. Se optó por quedarse con el valor máximo debido a que este valor reflejara el momento en el que el hormigón ejerce la mayor resistencia frente al giro de las palas, es decir, el momento en el que el hormigón es menos fluido y por lo tanto se trata de la situación más desfavorable de cada escalón una vez ya estabilizado.

Estos resultados se reflejan en la figura 14 donde se puede apreciar que al sobrepasar el 1% de aditivo la potencia tiende a estabilizarse, pero es a partir del 2% cuando la potencia se hace constante, razón por la cual se define el 2% de aditivo como el porcentaje de aditivo óptimo, coincidiendo además con el punto de saturación del aditivo medido a través del cono de Marsh y del resto de ensayos sobre el hormigón en estado fresco.

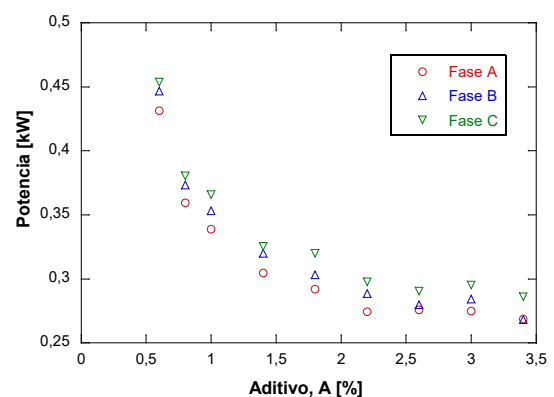


Figura 14. Evolución de la potencia de la amasadora en función de la cantidad de aditivo añadida

5. Conclusiones

Tras analizar los resultados se comprueba que la cantidad de aditivo óptima para el caso en estudio es del 2 %.

Las pastas de cemento y hormigones con porcentaje de aditivo del 3% pueden mostrar, en algunos casos, mayor fluidez que para del 2%, pero se hace notable la segregación de sus elementos siendo esto una situación a evitar.

Respecto al método de ensayo propuesto de la hormigonera, se ha revelado como una metodología válida para la obtención de la cantidad óptima de aditivo.

Este método es más rápido que la técnica actual, ya que permite obtener resultados a partir de una única amasada y, además elimina variables en el estudio al trabajar sobre los componentes reales del hormigón.

Por otro lado se ha comprobado que la obtención del punto de saturación del aditivo por medio del cono de Marsh es más precisa empleando un volumen superior al recomendado por las normas vigentes.

Por último, la medida de la potencia de las tres fases ha resultado similar por lo que se podría simplificar la metodología instrumentando solamente una de las fases de la hormigonera.

Referencias:

[1] F. Puertas, Et al. Polycarboxylate superplasticiser admixtures: effect on hydration, microstructure and rheological behaviour in cement pastes. *Advances in Cement Research*. 17-2, pg 77–89. (2005)

[2] K Yamada. Basics of analytical methods used for the investigation of interaction mechanism between cements and superplasticizers, *Cem.Concr.Res.* 41, pg 793-798. (2011)

[3] ACHE. Asociación Científico Técnica del Hormigón Estructural, M-16: Manual de tecnología de Aditivos para Hormigón (2010)

[4] ACHE. Asociación Científico Técnica del Hormigón Estructural, M-13: Hormigón autocompactante. Diseño y aplicación. (2008)

[5] AENOR. UNE-EN 934-2:2010+A1:2012. Admixtures for concrete, mortar and grout - Part 2: Concrete admixtures - Definitions, requirements, conformity, marking and labelling (2012)

[6] EHE-08. Instrucción de Hormigón Estructural. (2008)

[7] Roncero, J. et al. Influencia de la dosificación del superplastificante y de la temperatura sobre la fluidez de pastas de cemento. Aplicación a hormigones de altas prestaciones. Proc. 1er Simp. Nacional de hormigón de altas prestaciones. (1998)

[8] ASTM C 939-87. Standard test method for flow of grout for preplaced-aggregate concrete (flow cone method). (1987)

[9] AFNOR. P18-358. Adjuvants pour bétons, mortiers et coulis. Coulis courants d'injection pour précontrainte. Mesure de la fluidité et de la réduction d'eau. (1985)

[10] AENOR. UNE-EN 445:2009. Grout for prestressing tendons - Test methods (2009)

[11] AENOR. UNE-EN 12350-8. Ensayos de hormigón fresco. Parte 8: Hormigón autocompactante. Ensayo del escurrimiento (2011)

[12] Sosa, I. Incorporación de escorias siderúrgicas en hormigones autocompactantes de altas prestaciones. Tesis Doctoral. U. de Cantabria. (2017)

[14] AENOR. UNE-EN 12350-10. Ensayos de hormigón fresco. Parte 10: Hormigón autocompactante. Método de la caja en L (2011)

[15] AENOR. UNE-EN 12350-9. Ensayos de hormigón fresco. Parte 9: Hormigón autocompactante. Ensayo del embudo en V (2011)