

HAC2018 | V Congreso Iberoamericano de Hormigón Autocompactante y Hormigones Especiales

Valencia, 5 y 6 de Marzo de 2018

Aditivos superplastificantes de última generación basados en polímeros PAE para el control de la viscosidad plástica del hormigón

P. Borralleras ⁽¹⁾, J.J. Jurado ⁽²⁾, S. Parra ⁽³⁾ y J. Caballero ⁽⁴⁾

⁽¹⁾ Technical & Marketing Manager, BASF Construction Chemicals, España.

⁽²⁾ Head of Technical Services, BASF Construction Chemicals, España.

⁽³⁾ Segment Manager Admixture Systems, BASF Construction Chemicals, España.

⁽⁴⁾ Project Manager Admixture Systems, BASF Construction Chemicals, España.

DOI: <http://dx.doi.org/10.4995/HAC2018.2018.5633>

RESUMEN

Con la introducción de los aditivos reductores de agua basados en policarboxilatos (PCE) se abrieron las puertas para el desarrollo del hormigón autocompactante (HAC). La evolución de estos aditivos ha derivado en la más reciente tecnología de polímeros para el diseño de aditivos superplastificantes: los polímeros PAE. La aportación más relevante de los polímeros PAE es la mejora del comportamiento reológico del hormigón y la reducción de la viscosidad plástica, incluso en condiciones adversas de relaciones volumétricas agua/finos ($R_{vol} A/F$) extremadamente bajas.

Con estas características, los aditivos superplastificantes basados en polímeros PAE encajan perfectamente con las propiedades requeridas y en las particularidades de diseño del HAC, para permitir la producción de hormigones de fácil bombeo y vertido y con mejor calidad de acabado. La reducción de viscosidad plástica aportada por los polímeros PAE no solamente permite la optimización de los costes de ejecución. También es posible optimizar el coste de producción y la huella de CO₂ asociada al hormigón gracias a permitir maximizar el uso de adiciones en detrimento del cemento.

PALABRAS CLAVE: PAE, superplastificantes, viscosidad plástica, reología, bombeo.

1.- INTRODUCCIÓN

La elevada fluidez que requiere el HAC para fluir libremente a través de las armaduras y acomodarse a la geometría del encofrado precisa del uso de aditivos superplastificantes basados en PCE a altas dosificaciones. Con los elevados niveles de fluidez aportados, para que la masa en estado fresco permanezca estable y no presente síntomas de disgregación en todo momento, es necesario emplear un elevado volumen de finos combinado con una baja cantidad de agua. En esta situación, la baja relación entre el volumen de agua y el de finos genera un incremento severo de la viscosidad del hormigón que a menudo se manifiesta como una limitación que condiciona tanto aspectos de ejecución como de diseño del HAC.

La viscosidad del HAC, además de con los métodos de ensayo puramente reológicos, puede observarse tanto en el ensayo de extensión de flujo con el T_{50} como especialmente en el embudo V. Para este último ensayo, se han publicado numerosas recomendaciones acerca de los valores máximos admitidos, coincidiendo en todos los casos en que un HAC con muy alta viscosidad no se considera apto para los fines propuestos [1].

La problemática radica en que, además de los condicionantes de diseño del HAC que de por sí ya provocan un aumento de la viscosidad, los aditivos superplastificantes basados en polímeros de PCE amplifican este efecto de tal modo que la elevada viscosidad plástica acaba por ser una característica relevante del HAC que a menudo es la responsable de varios de los defectos típicos observados en obras ejecutadas con este tipo de hormigón.

2.- PARÁMETROS QUE CONTROLAN LA VISCOSIDAD PLÁSTICA DEL HAC

La viscosidad de un hormigón depende de varios factores, pero el tipo de aditivo superplastificante empleado y la $R_{vol} A/F$ (relación agua/finos totales en volumen) son dos de los que ejercen una mayor influencia.

2.1.- Influencia de la $R_{vol} A/F$ (relación agua/finos totales en volumen)

A medida que decrece la relación entre el volumen de agua y el volumen de finos totales (cemento, adiciones, fillers, finos de la arena) se reduce el agua efectiva para plastificar la masa. Esto conlleva a la reducción de la $R_{vol} A/F$ e implica que el hormigón muestre una apariencia menos dócil y pegajosa, con mucha inercia al movimiento, que complica la puesta en obra y puede ocasionar acabados deficientes y mermas en la autocompactabilidad.

Como puede observarse en la Fig. 1(a), la $R_{vol} A/F$ decrece progresivamente con el aumento de finos totales a volumen de agua constante, pero la viscosidad plástica incrementa exponencialmente con la reducción de la $R_{vol} A/F$, tal y como muestra la Fig. 1(b). Por lo tanto, la elevada demanda de finos que requiere el HAC ($500-550 \text{ kg/m}^3$) tiene efectos exponenciales sobre la viscosidad plástica, que se ven multiplicados por las características de los aditivos superplastificantes requeridos.

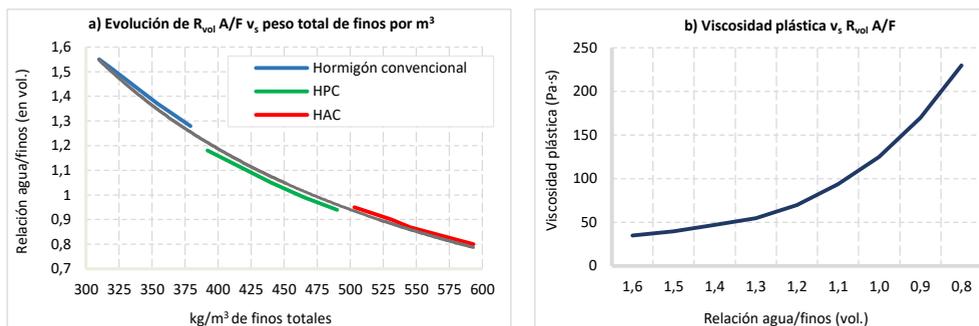


Figura 1. a) Evolución de la $R_{vol} A/F$ con los kg/m^3 de finos a volumen de agua constante. b) Relación entre viscosidad plástica del hormigón y $R_{vol} A/F$

Como puede observarse, las características de diseño del HAC, debido al elevado contenido de finos y la baja R A/C, sitúan este tipo de hormigón en las condiciones de máximas viscosidades plásticas.

2.2.- Influencia del aditivo superplastificante

El incremento de viscosidad plástica que provocan los aditivos superplastificantes basados en PCE es un fenómeno conocido y estudiado [2]. Este comportamiento contrasta con el observado en los condensados de naftalensulfonato, los cuales apenas provocan incrementos de viscosidad apreciables incluso cuando son usados a alta dosis, aunque su empleo para la fabricación de HAC no es viable debido a su insuficiente capacidad fluidificante.

El efecto sobre la viscosidad plástica del HAC generado por un polímero de PCE no es igual en todas las estructuras poliméricas. En la Fig 2 se presentan resultados de viscosidad plástica y de tiempo de descarga en el embudo V en función de la dosis y del tipo de aditivo superplastificante empleado en una dosificación de HAC con filler calizo que se presenta en la Tabla 1.

Tabla 1. Dosificación de HAC con filler calizo

Componente	CEM I-42,5R	Filler calizo	R A/C	R _{vol} A/F	Áridos	Aditivo PCE
kg/m3	390	130	0,46	0,96	1.650	1,0 – 1,8%

Como puede observarse en la Fig 2(a), la longitud de las cadenas laterales tiene una incidencia más pronunciada en el incremento del tiempo de descarga en el embudo V, que puede relacionarse directamente con la viscosidad del HAC. Asimismo, el incremento de dosificación de aditivo también acarrea incrementos de la viscosidad plástica, según muestra la Fig. 2(b), expresada de forma relativa a partir del valor registrado con el 1% de aditivo.

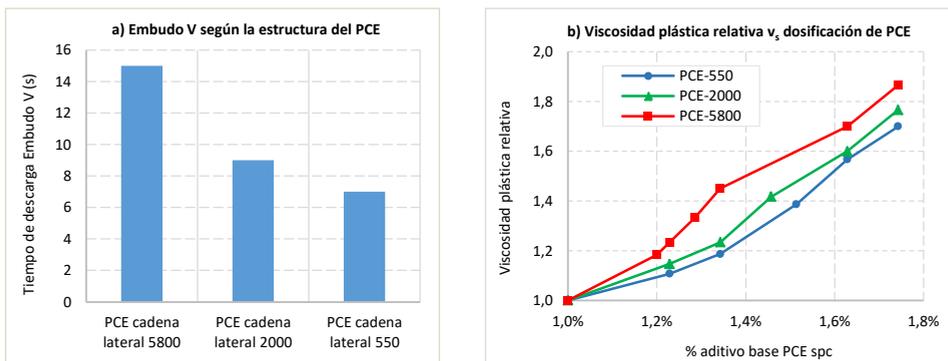


Figura 2. a) Resultados del embudo V con diferentes estructuras de PCEs a dosificación equivalente.
b) Efectos de la dosificación de PCEs con diferente cadena lateral sobre la viscosidad plástica

Debido a que los polímeros de PCE con cadena lateral larga son los que mayor capacidad fluidificante presentan, no siempre es posible poder corregir el incremento de viscosidad seleccionando PCEs con cadena lateral más corta, que por otro lado requerirán de una mayor dosificación para alcanzar la misma fluidez, obligando a aplicar en cualquier caso correcciones en el diseño del HAC.

El fenómeno de incremento de viscosidad generado por los polímeros de PCE se explica a partir de la rigidez de la interacción del terminal $-\text{COO}^-$ de anclaje del aditivo con la superficie de la partícula de cemento ionizada. El terminal carboxilato concentra la carga aniónica en los dos átomos de oxígeno del grupo funcional, de tal modo que la atracción electrostática que general la adsorción hace que la unidad de polímero adsorbida se disponga muy próxima a la partícula coloidal.

3.- POLÍMEROS PAE: ESTRUCTURA Y MECANISMO DE DISPERSIÓN

La tecnología de los polímeros PAE (abreviación de condensados de poli-aril éter fosfónico), diseñada y producida por BASF, permite la fabricación de hormigones con baja viscosidad y de reología mejorada, suponiendo un avance en relación a la química de los tradicionales PCE, que se explica a partir de las diferencias estructurales entre ambos tipos de polímeros.

Los polímeros basados en poli-aril éter (PAE) tienen una estructura muy similar a la de los policarboxilatos, con la misma típica forma de peine fruto de la presencia de cadenas laterales de condensados polióxido de etileno. Como presenta la Fig. 3(a), la principal diferencia radica en la estructura de su cadena principal, formada por condensados de poli-aril éter en lugar de secuencias de ácido acrílico, metacrílico o maléico, y especialmente en los grupos de adsorción con el cemento que, a diferencia de los PCE, está basada en grupos funcionales fosfónicos en lugar de radicales carboxílicos, tal y como muestra la Fig. 3(b).

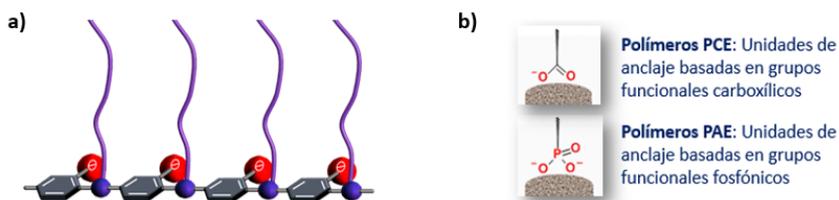


Figura 3. a) Estructura de los polímeros PAE. b) Grupos funcionales de adsorción del PCE y PAE.

Estas diferencias estructurales son esenciales para permitir una interacción más flexible y de menor rigidez estructural entre el aditivo y las partículas de cemento. Este comportamiento se explica a partir del efecto que ejerce la apolaridad de los anillos aromáticos de la cadena principal en el proceso de adsorción, que limita la aproximación del polímero a la capa de Stern. Este mecanismo de interacción, macroscópicamente se traduce en una disminución significativa de la viscosidad plástica del hormigón debido a la menor ordenación del sistema.

4.- COMPORTAMIENTO Y PRESTACIONES DE LOS POLÍMEROS PAE

De modo general, las prestaciones en cuanto a capacidad fluidificante, aire ocluido, tiempo de fraguado y generación de resistencias mecánicas de los aditivos superplastificantes basados en polímeros PAE pueden considerarse equivalentes a las de los aditivos basados en PCE, siendo el efecto sobre la reología la principal diferencia entre ambos tipos

4.1.- Efecto de los polímeros PAE sobre la reología y viscosidad plástica del hormigón

La principal diferencia entre los aditivos superplastificantes basados en polímeros PAE y los basados en polímeros de PCE recae en el impacto provocado sobre la viscosidad plástica del HAC. Como se ha observado en la Fig. 2, el incremento de dosificación de aditivos en base PCE, o el empleo de los tipos de PCE con mayor capacidad fluidificante (por contener cadenas laterales de mayor longitud), genera incrementos exponenciales de la viscosidad plástica del HAC a pesar de incrementar el grado de fluidez.

Para observar las diferencias a nivel reológico entre los polímeros PAE y los polímeros de PCE, se emplea una dosificación de HAC con $R_{vol} A/F$ inicial de 0,90 y un 1,0% spc de aditivo superplastificante para dar una consistencia inicial de 630 mm en el ensayo de extensión de flujo. La Tabla 2 presenta la dosificación del HAC descrito.

Tabla 2. Dosificación de HAC, con 1,0% spc de aditivo

<i>Componente</i>	<i>CEM I-42,5R</i>	<i>Filler calizo</i>	<i>R A/C</i>	<i>R_{vol} A/F</i>	<i>Áridos</i>	<i>Aditivo</i>
kg/m ³	430	155	0,44	0,90	1.570	1,0%

En la Fig 4(a), para observar como impacta la dosificación de cada tipo de polímero sobre la viscosidad plástica del HAC, en cada incremento de dosis de aditivo superplastificante se ajusta (reduce) el contenido de agua para equilibrar la consistencia inicial sobre el valor de 630 mm. De este modo, cada ajuste del contenido de agua (incremento de dosis de aditivo) provoca una reducción del valor de la $R_{vol} A/F$.

Como se observa en la Fig. 4(a), en un HAC con el mismo valor de fluidez inicial los polímeros PAE experimentan un menor incremento de la viscosidad plástica al aumentar la dosificación de aditivo. En consecuencia, puede afirmarse que los polímeros PAE no son tan sensibles al efecto que provoca la reducción de la $R_{vol} A/F$ sobre el incremento de viscosidad, y, por lo tanto, el HAC producido con aditivo superplastificante basado en polímeros PAE mantendrá la misma estabilidad y resistencia a la segregación pero con unos valores de viscosidad plástica hasta un 30% inferiores al mismo HAC producido con un aditivo basado en polímeros de PCE.

En el caso del impacto producido sobre la tensión de cizallamiento en función del tipo de polímero, la Fig. 4(b) muestra la evolución del valor de tensión de cizalla y de viscosidad plástica del HAC presentado en la Tabla 2 a diferentes $R_{vol} A/F$, producido con un aditivo basado en PCE y con un aditivo basado en polímeros PAE, a igual nivel de fluidez.

La modulación de la $R_{vol} A/F$ se obtiene ajustando la cantidad inicial de 155 kg/m^3 de filler calizo hasta 125 kg/m^3 y 100 kg/m^3 , que corresponden a los valores de $R_{vol} A/F$ de 0,9 (inicial), 0,95 y 1,00 respectivamente. Se observa que las diferencias entre los valores de tensión de cizalla no son relevantes entre el polímero de PAE y de PCE porqué las variaciones de la $R_{vol} A/F$ no tienen efecto apreciable sobre este parámetro. Sin embargo, sí incide de manera determinante sobre el valor de viscosidad plástica del HAC.

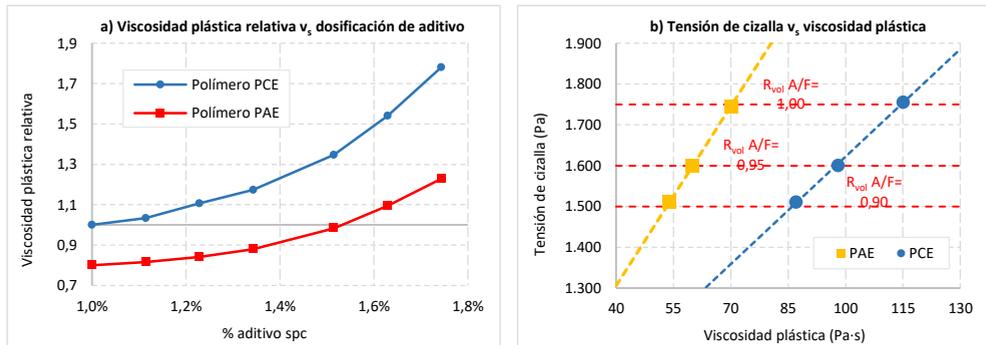


Figura 4. a) Evolución de la viscosidad plástica relativa en función de la dosificación de aditivo. b) Tensión de cizalla y viscosidad a diferentes $R_{vol} A/F$ con polímeros PAE y PCE

2.2.- Capacidad de reducción de agua y fluidificante de los polímeros PAE

El óptimo desarrollo de las formulaciones de aditivos superplastificantes basados en polímeros PAE ha permitido el diseño de aditivos que presentan una capacidad de reducción de agua y de fluidificación comparable a los PCE tradicionales, pero que al mismo tiempo mejoran la reología y evitan el incremento de la viscosidad plástica del HAC. La Fig. 5 presenta la evolución de la extensión de flujo en relación al T_{50} obtenida por el incremento de la dosis de polímeros. Se emplea la dosificación del HAC presentado en la Tabla 2 pero incrementando el contenido de filler calizo hasta 200 kg/m^3 para soportar los incrementos de aditivo sin reducir el contenido de agua y no causar segregación de la masa.

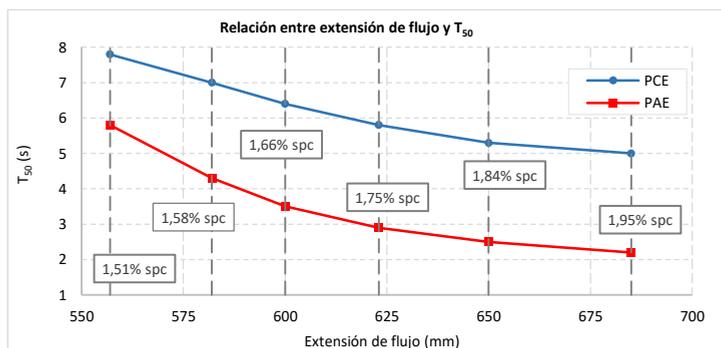


Figura 5. Evolución de la extensión de flujo y del T_{50} con diferentes dosificaciones de aditivo

Los resultados obtenidos muestran que el desarrollo de fluidez medido por la extensión de flujo es equivalente con las dosificaciones de superplastificantes basados en PCE y en polímeros PAE. Sin embargo, la relación entre el T_{50} y la extensión de flujo no es igual para ambos polímeros, mostrando sistemáticamente menores valores de T_{50} con el polímero PAE a niveles equivalentes de extensión de flujo.

Este comportamiento se explica a partir de la menor viscosidad plástica del HAC fabricado con polímeros PAE en relación a los polímeros de PCE, mostrando coherencia con los resultados obtenidos anteriormente.

5.- APORTACIONES PRÁCTICAS DE LOS POLÍMEROS PAE EN EL HAC

La reducción del impacto sobre la viscosidad que se logra con la tecnología de polímeros PAE en relación a los PCE se traduce en mejoras tanto en el proceso de puesta en obra como en el diseño del hormigón y sus implicaciones en el desarrollo sostenible.

5.1.- Incremento del rendimiento de ejecución y puesta en obra del hormigón

La viscosidad plástica es un parámetro crítico que frecuentemente se relaciona con defectos en la calidad de acabado y la capacidad de relleno del HAC. Un HAC con altos valores de viscosidad plástica, a pesar de la elevada fluidez, presenta limitaciones en su habilidad para fluir libremente y rellenar perfectamente las formas del encofrado. Adicionalmente, y en especial en aplicaciones verticales como por ejemplo muros encofrados, una elevada viscosidad dificulta la evacuación del aire atrapado.

En estas situaciones, si el vertido del HAC no se realiza muy lentamente, la alta viscosidad impide que el aire escape, acumulándose en la superficie y generando acabados de calidad deficiente. En consecuencia, una alta viscosidad del HAC implica un mayor tiempo de puesta en obra, el cual incrementará los costes de producción de la obra.

El empleo de aditivos superplastificantes basados en polímeros PAE en la fabricación de HAC aporta la posibilidad de optimizar los costes de producción debido a que se acorta el tiempo de puesta en obra, tanto en el caso de vertido directo como en ejecuciones por bombeo.

Como puede observarse en la Fig. 6(a), la presión requerida para permitir el bombeo de un hormigón es directamente proporcional a la viscosidad plástica del hormigón [3], requiriendo mayores presiones de bomba en hormigones de mayor viscosidad. En base a esta afirmación, las reducciones de viscosidad plástica aportadas por los aditivos superplastificantes basados en polímeros PAE se traduce en claras mejoras en el proceso de bombeo.

La Fig. 6(b) presenta los resultados de presión obtenidos en pruebas de bombeo a escala industrial con una formulación de HAC idéntica y con los mismos valores de fluidez, tratada con polímeros PAE y con polímeros PCE. Se observa que las reducciones medias de

presión alcanzadas con el aditivo base PAE son de aproximadamente 60 bar comparativamente al HAC fabricado con aditivo basado en PCE.

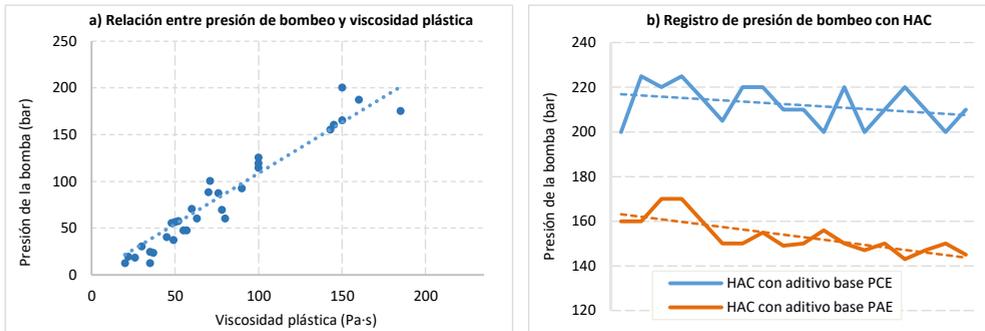


Figura 6. a) Influencia de la viscosidad plástica en la presión de bombeo. b) Registro de presiones de bombeo en una aplicación de HAC a escala industrial

Los valores de presión de bombeo comparando los dos tipos de aditivos demuestran con claridad la aportación de los polímeros de PAE en la optimización de los procesos de bombeo.

Evaluando el rendimiento de producción, en la Fig. 7(a) se observa que con la tecnología de polímeros PAE se registra un incremento del rendimiento de bombeo de 3-4 m³/h, gracias a una mayor capacidad de relleno del cilindro de hasta el 12%. La Fig. 7(b) es un esquema del funcionamiento de una bomba de hormigón a partir del cual puede deducir que el incremento del relleno del cilindro de la bomba es consecuencia directa de la menor viscosidad plástica del hormigón, que permite que el proceso de succión en cada embolada sea más eficiente, cargando el cilindro con más volumen de hormigón y por lo tanto haciendo circular un mayor volumen en cada embolada.

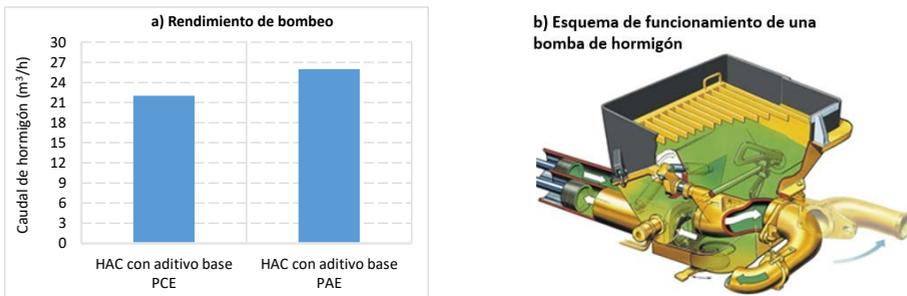


Figura 7. a) Rendimiento de bombeo. b) Esquema de funcionamiento de una bomba de hormigón

Las ventajas en el proceso de bombeo que aportan los polímeros PAE permite optimizar los costes de dosificación de los hormigones que deben ser bombeados, especialmente en los casos donde es necesario incrementar la cantidad de cemento o emplear arenas correctoras

para aportar finos y volumen de mortero. En ambos casos, empleando aditivos basados en polímeros PAE, es posible suprimir estas medidas adicionales, aportando ahorros de coste.

Adicionalmente, la menor viscosidad implica un menor rozamiento entre el hormigón y los conductos de la bomba. De este modo, el desgaste de tuberías y útiles de la maquinaria es menor, pudiendo optimizar los costes de mantenimiento.

5.2.- Optimización del coste de producción de hormigón y reducción de la huella de CO₂

Muy frecuentemente, las dosificaciones de HAC contienen más cemento del estrictamente necesario para satisfacer la demanda de resistencias y de durabilidad. El motivo de esta sobre-dosificación de cemento es la necesidad de la aportación de la cantidad de finos mínima que requiere el HAC para conservar sus propiedades de capacidad de paso y de relleno, preservando al mismo tiempo la estabilidad frente a la segregación.

Estas situaciones son típicas en los casos en que la demanda de agua de las adiciones o fillers empleados para el aporte de finos son elevadas, y que requieren mayores dosificaciones de aditivo para evitar incrementar el contenido de agua. Cuando los materiales que aportan finos no son de la calidad esperada, la cantidad a emplear se ve limitada por los efectos secundarios que pueden producir sobre la demanda de agua y la viscosidad del hormigón. Cuando esto sucede, irremediablemente la demanda de finos debe ser compensada incrementando el contenido de cemento y la cantidad de agua. Estas correcciones de diseño, además de implicar sobrecostes de la dosificación del HAC, tienen consecuencias directas en la huella de CO₂ asociada al hormigón.

La situación planteada puede ser perfectamente corregible con el empleo de aditivos basados en polímeros PAE. Cuando un filler presenta una demanda de agua elevada no es posible en todas las ocasiones compensar este efecto con el incremento de la dosificación de superplastificante basado en PCE tradicional porque el aumento de viscosidad plástica que se experimenta es inviable para garantizar la correcta puesta en obra del hormigón. Sin embargo, gracias a la baja sensibilidad que muestran los aditivos superplastificantes basados en polímeros PAE frente al aumento de la viscosidad del hormigón, es posible corregir la demanda de agua de los fillers simplemente con el incremento de dosificación de aditivo, sin acarrear problemas relacionados con el vertido o bombeo del HAC. Por lo tanto, es posible emplear mayores cantidades de adición o filler y se evita la sobre-dosificación de cemento a modo de aporte finos, la cual tiene una incidencia directa en la huella de CO₂.

En las Fig. 8 se presenta la optimización de un diseño de HAC empleando la tecnología de los polímeros PAE frente a los aditivos tradicionales en base PCE, así como su efecto en la huella de CO₂ asociada.

El cálculo de la huella de CO₂ de cada HAC presentado se realiza mediante la herramienta informática “BASF Life Cycle Analyzer”. Dicha herramienta está auditada, validada y certificada por TÜV, NSF, DGNB, GBC, HQE y BREEAM y conforme con los estándares ISO, confirmando la validez de los datos obtenidos. Los valores de equivalentes de CO₂ considerados para cada componente individual se obtienen a partir de los valores

publicados en las EPD de cada ingrediente. Estos son los datos que se introducen en la herramienta de cálculo mencionada a partir de los cuales se obtiene la huella de CO₂ asociada a cada dosificación de HAC mostrada en la Fig 8.

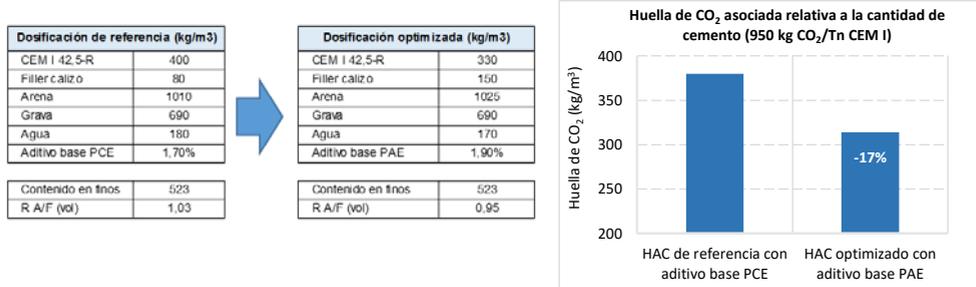


Figura 8. Optimización de una formulación de HAC con aditivos superplastificantes basados en polímeros PAE y su consecuencia en la huella de CO₂

Como puede observarse, la menor sensibilidad de los aditivos superplastificantes basados en polímeros PAE frente a los efectos que provoca la disminución de la R_{vol} A/F sobre la viscosidad plástica puede aprovecharse para optimizar la relación de proporciones entre el cemento y el resto de adiciones que actúan como aporte de finos. De este modo, con la reducción del contenido de cemento acompañada por el incremento del contenido de adición, la huella de CO₂ asociada a un metro cúbico de HAC puede reducirse entre un 10-20%, pero a esta contribución debe añadirse las otras aportaciones relacionadas con la mayor rapidez de la puesta en obra, que implica menores consumos energéticos, colaborando a la mejora de la sostenibilidad global de la obra.

5.- CONCLUSIONES

La última generación de aditivos superplastificantes basados en polímeros de PAE representan el último avance en la tecnología de aditivos superplastificantes para hormigón. Sus propiedades únicas sobre el control de la viscosidad plástica del hormigón y su menor sensibilidad ante el descenso de la R_{vol} A/F hacen que esta tecnología sea ideal para la producción de HAC, aportando ventajas en el proceso de puesta en obra al mismo tiempo que permiten optimizar los costes de producción y la sostenibilidad de los hormigones.

REFERENCIAS

- [1] Varios (2005). "The European Guidelines for Self-Compacting Concrete: Specification, Production and Use". EFNARC
- [2] F. Puertas, H. Santos, M. Palacios, S. Martínez-Ramírez (2006). "Polycarboxylate superplasticizers admixtures: effect on hydration, microstructure and rheological behavior in cement pastes". Advances in Cement Research, núm. 2, pág. 77-89.
- [3] M. Benaicha, O. Jalbaud, A. Hafidi Alaoui, Y. Burtschell (2013). "Correlation between the pumping and the rheological properties of self-compacting concrete: a practical study". Int. Journal of Engineering and Technical Research, ISSN 3121-0869.