EVOLUCIÓN DE LOS CEMENTOS Y SU COMPATIBILIDAD QUÍMICA CON LOS ADITIVOS AL HORMIGÓN

GUÍA OPERATIVA E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

ÍNDICE

1. OBJETO 5

2. ALCANCE 7

3. MECANISMO DE ACTUACIÓN DE LOS ADITIVOS SUPERPLASTIFICANTES. COMPATIBILIDAD CEMENTO-ADITIVO 9
   - 3.1. Introducción 9
   - 3.2. Mecanismo de dispersión del cemento con aditivos superplastificantes basados en polímeros de policarboxilato (PCE) 9
   - 3.3. Compatibilidad cemento-aditivo 12
   - 3.4. Principales factores relacionados con el cemento que condicionan la compatibilidad cemento-aditivo 13
   - 3.5. Conclusiones 16

4. MÉTODO DE ENSAYO DE CONTRASTE DE MORTEROS DE CEMENTO NORMALIZADO CON Y SIN ADITIVO SUPERPLASTIFICANTE 17
   - 4.1. Objetivo 17
   - 4.2. Referencias 17
   - 4.3. Instrumentos y componentes para elaboración de morteros 17
   - 4.4. Registros 20

5. TIPOS DE CEMENTOS QUE SE RECOMIENDA ENSAYAR Y POR QUÉ 21
   - 5.1. Antecedentes 21
   - 5.2. Hoja de ruta de descarbonización: adiciones e impacto en prestaciones 23
   - 5.3. Aditivos químicos para el cemento y sus aplicaciones: compañeros de viaje 26
   - 5.4. Novedades en la Normativa 26

6. CEMENTOS EMPLEADOS Y SENSIBILIDAD DEL MÉTODO 33

7. CONCLUSIONES 41

AGRADECIMIENTOS

La elaboración de esta guía no habría sido posible sin la participación de los comités técnicos de las diferentes asociaciones que componen la Plataforma Tecnológica Española del Hormigón:

- Asociación nacional de la industria del prefabricado de hormigón (ANDECE).
- Asociación nacional española de fabricantes de hormigón preparado (ANEFHOP).
- Asociación nacional de fabricantes de aditivos para hormigón (ANFAH).
- Federación de áridos (FdA).
- Instituto Español del Cemento y sus Aplicaciones (IECA).
- Agrupación nacional de fabricantes de cemento de España (OFICEMEN).

Y tampoco sin la participación activa de los investigadores del Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja (IETcc), que han sido los encargados de la realización de todos los ensayos y han aportado su conocimiento técnico para la interpretación de los mismos y para la elaboración de esta guía. En concreto, se agradece su participación a:

- D. Ángel Castillo, director del IETcc.
- D. José Luis García, vicedirector del IETcc.
- Dña. Marta Palacios, investigadora del IETcc.

1 OBJETO

El objeto final de esta guía es aprovechar el método de ensayo de mortero de cemento normalizado para conocer la interacción cemento-aditivo, bien para entender cómo afectan posibles cambios en un determinado cemento, en cuanto a fluidez, mantenimiento de consistencia, aire ocluido, densidad y fraguado, o bien cómo se comportan en esos mismos parámetros diferentes tipos de cemento, manteniendo el mismo tipo de aditivo.

Para ello, se definen sus componentes, el método de amasado, determinación de la consistencia, fabricación, conservación y rotura de probetas, tanto para morteros normalizados como para morteros a los que se ha introducido una cantidad de aditivo superplastificante para alcanzar la misma consistencia inicial que el mortero normalizado de referencia, para una relación a/c de 0,38 +/- 0,02 con el objetivo de dosificar el aditivo dentro de su rango prescrito para dicho aditivo.

2 ALCANCE

El alcance de esta guía y de estos ensayos está especialmente indicado para todos los cementos que contengan una o más adiciones, y que tengan un contenido relativamente bajo de clínker, a los cementos de elevado grado de finura, y en general, a los cementos experimentales que con el objetivo de la descarbonización del cemento, se quieran producir de forma habitual en las plantas de cemento, para conocer de forma previa las características que los hormigones que se elaboren con estos cementos van a tener en su uso industrial, tanto en las plantas de hormigón preparado, como en las plantas de prefabricación.

3 MECANISMO DE ACTUACIÓN DE LOS ADITIVOS SUPERPLASTIFICANTES. COMPATIBILIDAD CEMENTO-ADITIVO

3.1. INTRODUCCIÓN

De forma muy simple, se describe el mecanismo de actuación de los aditivos reductores de agua (plastificantes y superplastificantes) explicando que éstos se "adhieren" sobre las partículas de cemento provocando la repulsión entre estas partículas, y generando el fenómeno de fluidificación. Pero bajo esta explicación tan simplista se esconde un complejo mecanismo fisicoquímico responsable de los efectos que observamos a escala macroscópica.

Aunque existen diferentes químicas de aditivos reductores de agua, podemos afirmar que existen fundamentalmente los basados en lignosulfonatos (LS), naftalensulfonatos (BNS), melaninas sulfonadas (MNS) y polímeros de policarboxilato (PCE), todas ellas funcionan bajo el mismo principio (se "adhieren" sobre el cemento y crean repulsión entre partículas). Sin embargo, el modo en cómo se desarrollan estos procesos sí que es diferente en cada una de estas químicas, desde cómo se produce el proceso de "adhesión", hasta cómo se genera la repulsión (*electrostática o estérica*).

Esta guía trata, de forma específica, el mecanismo y los procesos de compatibilidad de los aditivos superplastificantes basados en polímeros de policarboxilato (PCE - éster y éter). Esta tecnología, a pesar de introducirse en el mercado local hace apenas 20 años, ya representa el grupo de aditivos más empleado globalmente (en España suponen más del 50% del total en volumen), tanto en hormigón preparado para hormigones cotidianos, obra civil y, especialmente, en prefabricado. Esto se debe a que sus prestaciones son muy superiores a las del resto de tecnologías, hasta el punto de que permiten fabricar tipologías de hormigones imposibles con superplastificantes de otras naturalezas.

3.2. MECANISMO DE DISPERSIÓN DEL CEMENTO CON ADITIVOS SUPERPLASTIFICANTES BASADOS EN POLÍMEROS DE POLICARBOXILATO (PCE)

Para comprender el sentido de la compatibilidad cemento-aditivo es preciso presentar unas nociones del mecanismo de actuación de los aditivos superplastificantes basados en polímeros de policarboxilato (PCE).

En relación con las observaciones macroscópicas, el mecanismo de actuación de estos aditivos puede agruparse en dos procesos que, aunque se presenten por separado, están íntimamente correlacionados:

- *Capacidad dispersante / efecto fluidificante en cada instante:* equivaldría a la fluidez del hormigón que observamos en cada momento puntual, desde el amasado hasta la puesta en obra en el caso de hormigón preparado y hasta el vertido en el molde en el caso de elementos prefabricados de hormigón.
- *Mantenimiento del efecto dispersante en el tiempo:* asociado con el mantenimiento de consistencia del hormigón en el tiempo.

El primer aspecto podría considerarse como la parte del mecanismo controlada por la **termodinámica**, mientras que el segundo se corresponde con los **aspectos cinéticos**.

El mecanismo por el cual un aditivo superplastificante genera el efecto de dispersión se representa de manera simplificada en la Figura 3.1.

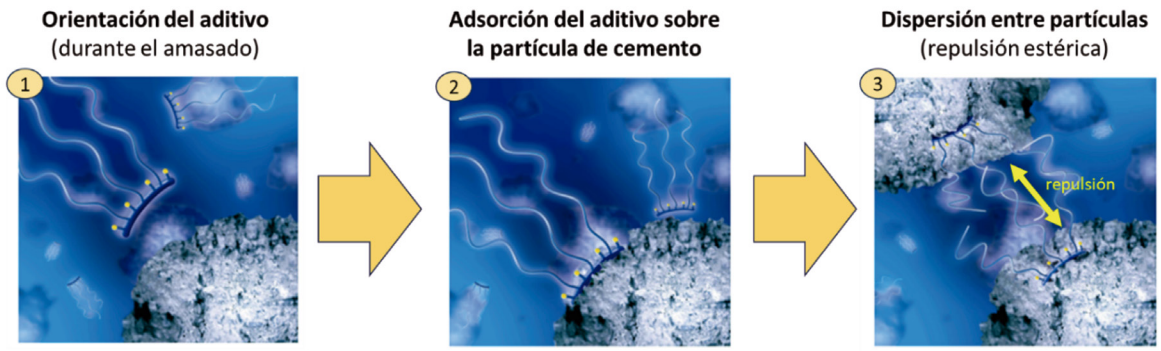


Figura 3.1. *Mecanismo de dispersión de los aditivos superplastificantes basados en polímeros de PCE.*

Durante el amasado, el polímero adquiere la confirmación adecuada (1) para adsorberse sobre la superficie de la partícula de cemento (2). En esta disposición, las largas cadenas laterales del polímero se confrontan con cadenas laterales de otras unidades de polímero adsorbidas en las partículas de cemento colindantes (3). Entonces, las cadenas laterales impiden la fricción directa entre partículas sólidas y con ello provocan el aumento de fluidez del sistema.

Este es, a grandes rasgos, el mecanismo por el cual se genera **fluidez**, y depende esencialmente de la cantidad de aditivo adsorbida sobre la superficie externa del cemento en cada preciso instante.

La duración del efecto dispersante en el tiempo está estrechamente vinculada a cómo progresa el equilibrio entre aditivo adsorbido (activo) y aditivo en solución (reserva de aditivo), porqué precisamente la fracción de aditivo de reserva es la responsable del mantenimiento del efecto dispersante en el tiempo (mantenimiento de la consistencia).

La Figura 3.2 ilustra el mecanismo de mantenimiento del efecto dispersante en el tiempo de los aditivos superplastificantes basados en polímeros de PCE.

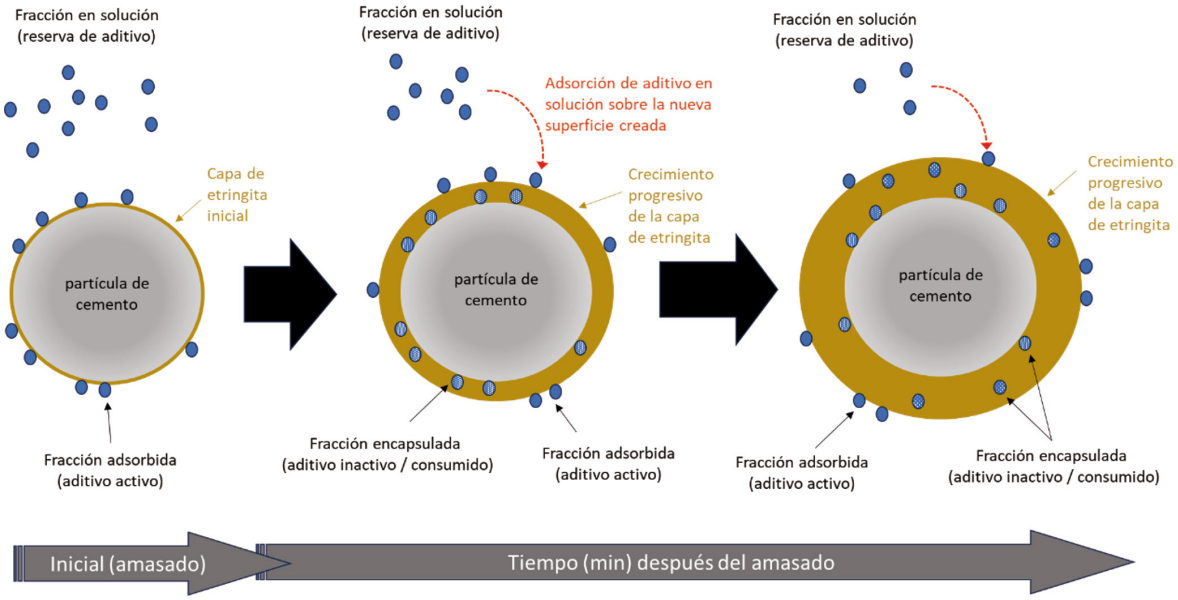


Figura 3.2. *Mecanismo de mantenimiento del efecto dispersante de los aditivos superplastificantes basados en polímeros de PCE.*

En el momento del amasado, no reacciona (se adsorbe) el 100% de aditivo disponible. La parte que queda absorbida en el momento inicial es la responsable de generar la fluidez inicial, pero una fracción permanece en solución y será la que se irá adsorbiendo sobre la nueva superficie que se genera con el progresivo crecimiento de la capa de etringita. A medida que la capa de etringita va creciendo, el aditivo previamente adsorbido queda encapsulado dentro de la estructura formada y queda totalmente inactivado. Es entonces cuando parte del aditivo que permanece en solución se adsorbe sobre la nueva capa de etringita y restituye el efecto dispersante.

Este proceso se irá alimentando mientras quede reserva de aditivo en solución. Por lo tanto, el mantenimiento del efecto dispersante en el tiempo está directamente relacionado con la velocidad de consumo de aditivo, considerando como progresa el equilibrio entre la fracción adsorbida (fracción activa a efectos de dispersión), la fracción de aditivo que permanece en solución (fracción de reserva para el mantenimiento del efecto en el tiempo) y la fracción encapsulada (fracción consumida – inactiva).

La Figura 3.3 presenta a modo de ejemplo la situación ideal en cuanto a la evolución en el tiempo de la fracción adsorbida de aditivo, la de reserva y la consumida. Se puede observar que, a medida que incrementa la fracción consumida, se va reduciendo la fracción de reserva con el propósito de mantener la fracción activa (la adsorbida). En el momento en que se agote la fracción de reserva, ya no quedará más aditivo para adsorberse sobre la nueva etringita que se va formando y ya no será capaz de seguir manteniendo el efecto dispersante por más tiempo. A partir de aquí, se observa la progresiva pérdida de fluidez hasta la pérdida total de fluidez (cuando todo el aditivo ya ha sido consumido).

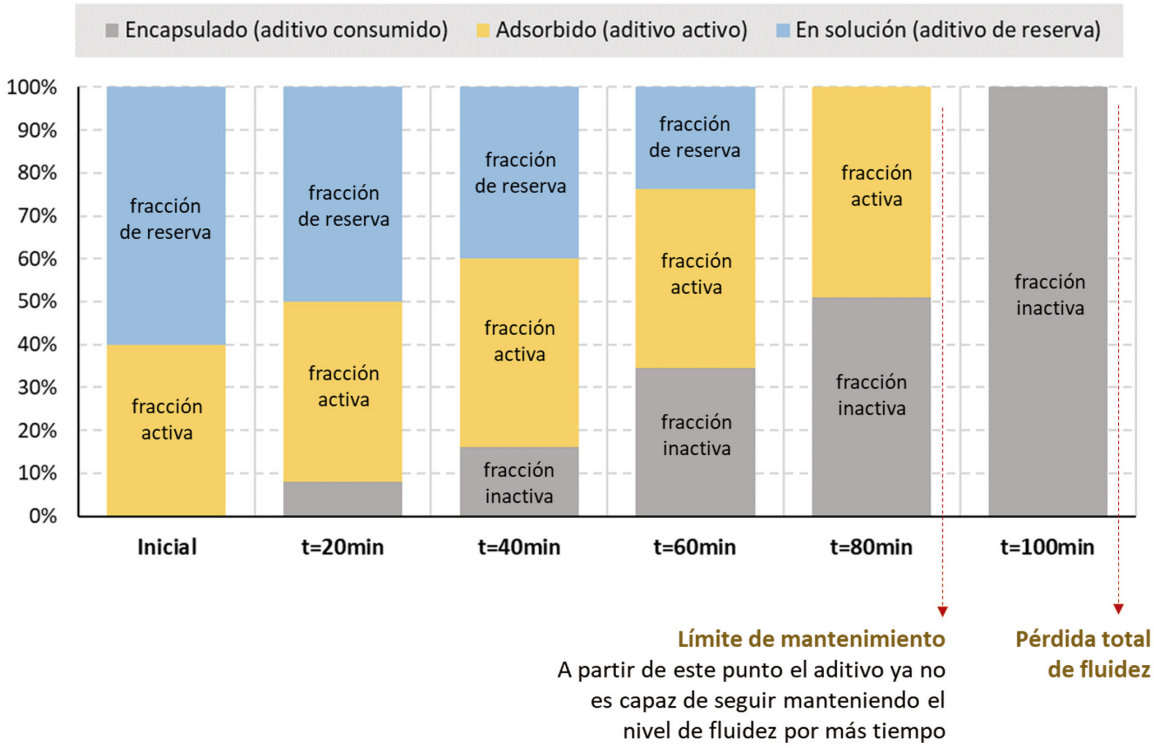


Figura 3.3. *Mecanismo de mantenimiento del efecto dispersante de los aditivos superplastificantes basados en polímeros de PCE.*

3.3. COMPATIBILIDAD CEMENTO-ADITIVO

La compatibilidad cemento-aditivo debe entenderse como un binomio. Por lo general, no hay cementos incompatibles ni aditivos incompatibles de por sí, sino combinaciones cemento-aditivo no adecuadas o poco compatibles.

A escala **macroscópica**, se puede afirmar que existe una buena compatibilidad entre el cemento y el aditivo cuando el efecto producido en el hormigón es sencillamente el esperado. Con esto nos referimos a obtener el efecto fluidificante suficiente para, con el contenido de agua exigido, lograr la consistencia inicial especificada y mantenerla a lo largo del tiempo necesario.

A escala **microscópica**, un cemento y un aditivo se definen como compatibles cuando el consumo del aditivo progresa con el tiempo de tal manera que es capaz de mantener el efecto dispersante necesario durante el periodo exigido. En otras palabras, manteniendo suficiente reserva de aditivo para prolongar el efecto dispersante y adsorbiendo la cantidad justa para generar la fluidez exigida en cada momento.

Cualquier causa, por el motivo que sea, que altere el ritmo previsto de consumo de aditivo comprometerá la compatibilidad con el cemento. Por este motivo, resulta de crucial importancia la correcta selección del aditivo superplastificante, con la finalidad de adaptarlo de la mejor manera a un cemento particular en cuestión y obtener así la máxima compatibilidad posible.

Sin embargo, existen ciertas particularidades relacionadas con el cemento que resultan de crucial importancia a la hora de condicionar la compatibilidad con el aditivo. Y aunque

para la mayoría de ellas existe suficiente tecnología de aditivos para adaptarse, conocer el alcance de ciertos cambios y poder anticiparse a problemas potenciales sin duda facilitará la implementación exitosa de los cementos de baja huella de carbono.

Cuando un aditivo y un cemento no son compatibles, los fenómenos que se observan pueden explicarse a partir de la alteración que producida sobre el equilibrio entre la fracción adsorbida de aditivo y la reserva en solución. La Tabla 3.1 resume los factores de incompatibilidad más comunes entre el aditivo y el cemento, así como sus causas.

TABLA 3.1

Factores más típicos que limitan la compatibilidad cemento-aditivo

Problemática	Impacto en el mecaniso de actuación	Comportamiento observado	Motivo / Causa
Alta afinidad de adsorción (adsorción demasiado rápida)	El aditivo se consume demasiado rápido (su efecto dura poco)	Alta fluidez inicial pero rápida pérdida de consistencia	Cementos de alta finura con clínkers muy reactivos
Poca afinidad de adsorción (insuficiente adsorción inicial)	El aditivo permanece mayoritariamente en solución y no se adsorbe sobre el cemento (insuficiente cantidad adsorbida para generar dispersión)	Poca fluidez inicial (requiere aumetar la dosis de aditivo)	Cementos con exceso de sulfato soluble (competencia)
		Poca fluidez inicial y posterior refluidificación (aumento de fluidez retardado)	Cementos con adiciones poco ionizables (escorias muy vitrificadas, cenizas exhaustas)
Absorción de aditivo (pérdida de aditivo)	El aditivo absorbido no es capaz de generar dispersión (equivalente a disponer de menos aditivo)	Menor fluidez inicial y pérdida de consistencia prematura	Cementos con adiciones absorbentes (puzolanas naturales, calizas, arcillas calcinadas)
Intercalación de aditivo (inhibición del aditivo)	El aditivo intercalado queda totalmente inhibido para generar dispersión (se anula el aditivo por completo)	Poca fluidez inicial y pérdida de consistencia casi inmediata	Cementos con defecto de sulfato soluble (cambios en la morfología de la etringita)

Todo lo que altere (y en la magnitud en que lo haga) la correcta progresión en el tiempo del equilibrio entre el aditivo adsorbido y el aditivo en solución comprometerá la compatibilidad cemento-aditivo.

3.4. PRINCIPALES FACTORES RELACIONADOS CON EL CEMENTO QUE CONDICIONAN LA COMPATIBILIDAD CEMENTO-ADITIVO

Los factores propios del cemento que condicionan la compatibilidad con el aditivo deben comprenderse como factores que, al modificarse, podrían provocar que el aditivo actualmente empleado dejara de ser el más adecuado. No se trata de aspectos *de blanco o*

negro, sino de escalas de grises donde la tecnología de aditivos puede, en la mayoría de los casos, adaptarse de forma exitosa.

El dinamismo actual de la industria del cemento para cumplir con los compromisos de emisiones y ser más sostenible está forzando la introducción de nuevos cementos con menor huella de carbono, pero de prestaciones lo más similares a los cementos de referencia. Y para fabricar estos nuevos cementos, se emplean materiales y sistemáticas que en ciertas ocasiones pueden tener consecuencias sobre la compatibilidad cemento-aditivo.

- Finura del cemento:

  Cuando aumenta la superficie específica del cemento *se incrementa la velocidad de adsorción* de aditivo y la cantidad neta adsorbida. Esto provoca que la *reserva de aditivo* (responsable del mantenimiento de consistencia) se agote más rápidamente. De esto modo, lo que se observa a escala macroscópica es que el hormigón requiere más aditivo para obtener la fluidez habitual y que el mantenimiento de consistencia es a menudo insuficiente.

  Por lo general, no todos los aumentos de la finura del cemento pueden llegar a requerir cambiar el tipo de aditivo superplastificante, pero en cualquier caso seguro que exigirán una dosis de aditivo mayor.

- Adiciones absorbentes:

  Solamente la fracción de aditivo que está adsorbida sobre la superficie externa del cemento es la que presenta actividad a efectos de dispersión. La Figura 3.4 ilustra las diferencias entre adsorción y absorción (sorción = adsorción + absorción), ya que son relevantes para explicar el impacto que presentan las adiciones absorbentes sobre el mecanismo de actuación de los aditivos superplastificantes.

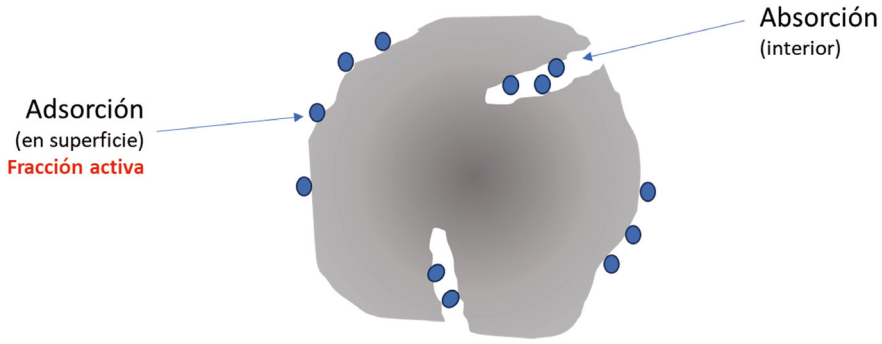


Figura 3.4. *Diferencia entre adsorción y absorción.*

La fracción adsorbida contribuye a generar dispersión, pero la fracción absorbida queda totalmente inhibida (es incapaz de generar fluidez, es como dosificar menos aditivo del que realmente se ha adicionado). Por lo tanto, el uso de adiciones de carácter absorbente provoca que la reserva de aditivo quede mermada y de este modo no quede aditivo suficiente para mantener la fluidez del hormigón en el tiempo (el aditivo ubicado en los poros es aditivo perdido).

Debe mencionarse que las adiciones de carácter absorbente (puzolanas naturales, calizas, arcillas calcinadas), además de impactar sobre el aditivo, también limitan directamente el agua disponible para fluidificación, amplificando el déficit de fluidez inicial y acelerando la pérdida de consistencia en el tiempo.

Esta problemática no siempre se resuelve incrementando la dosis de aditivo, y puede requerir cambiar el aditivo en numerosas ocasiones.

- Adiciones muy vitrificadas:

  Las adiciones muy vitrificadas y con poca capacidad de ionización inicial presentan superficies muy poco reactivas para adsorber aditivo. Esta es una situación típica de los cementos con elevados contenidos de escoria (más cuanto mayor es su grado de vitrificación) o incluso de cementos que contienen elevados contenidos de cenizas volantes muy meteorizadas.

  Cuando la ionización superficial es baja, el aditivo no puede adsorberse de tal modo que no puede generar dispersión en el momento inicial. En estos casos se suele observar que ni tan siquiera incrementando la dosis de aditivo se logra aumentar la fluidez inicial del hormigón.

  Sin embargo, varios minutos después del amasado, la ionización de la superficie de estas adiciones progresa, liberando nueva superficie ya activa para adsorber aditivo. Debido a esto, se observa que la fluidez aumenta con el tiempo, pudiendo llegar incluso de disgregar hormigones después de 20-30 minutos de su fabricación.

  Esta es una situación que prácticamente siempre requiere la sustitución del aditivo superplastificante, y se observa de manera más frecuente en invierno que en verano.

- Relación entre sulfato soluble y aluminato tricálcico:

  La disponibilidad de sulfato soluble en relación con el contenido de aluminato tricálcico es uno de los factores más críticos que determina la compatibilidad cemento-aditivo. Esta relación controla la velocidad de formación de la etringita y su morfología, y condiciona de manera directa qué tipo de aditivo superplastificante será el más adecuado para un cemento en particular. En consecuencia, cambios relevantes en los valores de la relación SO_4^{2-}/C_3A podrían implicar que el aditivo habitualmente empleado deje de funcionar de la manera esperada y requiera ser sustituido.

  Es importante remarcar que esta relación entre sulfato y aluminato considera el contenido de sulfato soluble (SO_4^{2-}), que no es lo mismo que el contenido de SO_3 del cemento. Del mismo modo, la morfología del aluminato tricálcico (C_3A cúbico u ortorrómbico) también impacta de manera diferente en la demanda de sulfato soluble.

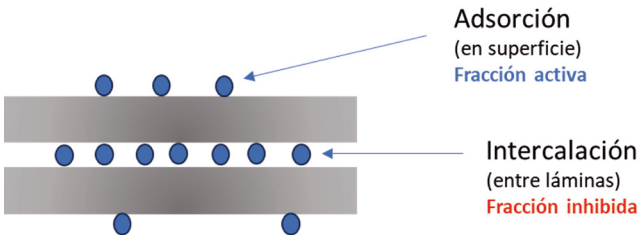


Figura 3.5. *Disposición del aditivo intercalado en estructuras laminares de etringita.*

Tal y como se observa en la Figura 3.5, con la intercalación se bloquean grandes cantidades de aditivo que quedan totalmente inhibidas para ejercer su función. Esta es una de las *situaciones más críticas* en cuanto a incompatibilidad cemento-aditivo. Por un lado, los efectos observados a escala macroscópica son muy evidentes (poca fluidez inicial incluso con altas dosis de aditivo y pérdida de consistencia casi instantánea), y por otro, no existen soluciones de aditivos plenamente exitosas para las situaciones de defecto de sulfato soluble. En consecuencia, esta es una situación que debería evitarse a toda costa.

La *relación SO_4^{2-}/C_3A es uno de los parámetros más selectivos* para definir qué aditivo es el más compatible con un cemento. Incluso dentro de los rangos de compatibilidad de la relación SO_4^{2-}/C_3A, en función del valor específico de cada cemento habrá un aditivo más adecuado que otro.

La Figura 3.6 presenta el mapa de compatibilidad cemento-aditivo en función de la relación molar SO_4^{2-}/C_3A. En el ejemplo, un cemento con un valor de relación molar A cambia a un valor B por el motivo que sea, incrementando el contenido de sulfato soluble disponible, aunque dentro de la zona compatible. En esta situación, el aditivo regularmente empleado (aditivo 1) ya no funcionará de la misma forma y será conveniente sustituirlo por el aditivo 2, más adecuado para estas nuevas condiciones.

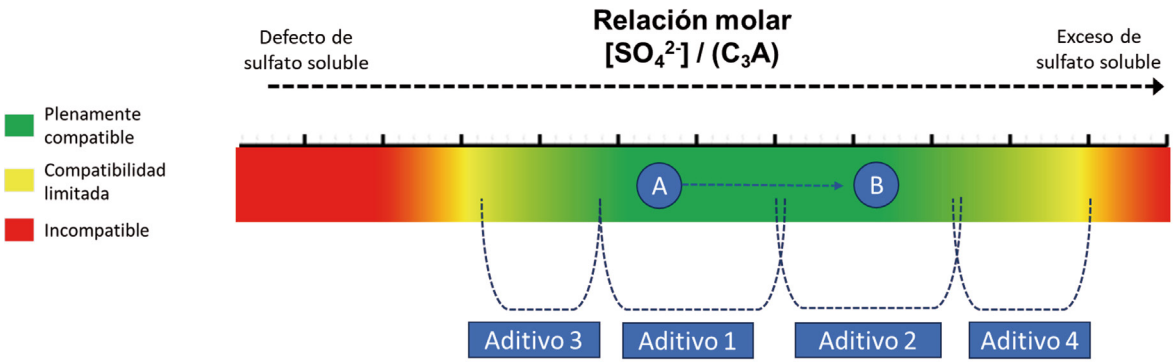


Figura 3.6. *Criterios de selección del aditivo superplastificante en función de la relación molar SO42-/C3A.*

3.5. CONCLUSIONES

Ciertos cambios en los cementos pueden comprometer la compatibilidad con el aditivo y condicionar la correcta selección del superplastificante a emplear. La sustitución de clínker por adiciones y las correcciones empleadas para mantener las prestaciones del cemento deben tenerse en cuenta porque pueden modificar el comportamiento de los aditivos. Y conocer la magnitud de estos impactos de manera anticipada facilita el proceso de selección del aditivo para mantener las prestaciones del hormigón fabricado con nuevos cementos con menor huella de carbono.

Además del cemento, es importante matizar que existen otros factores además del cemento que pueden comprometer el rendimiento del aditivo. Especialmente, la calidad de las arenas. Del mismo modo, factores como la humedad y especialmente la temperatura pueden enfatizar problemáticas apenas visibles en condiciones climáticas más normales (por ejemplo, las mermas de resistencia inicial se acentúan exponencialmente con las bajas temperaturas y la alta humedad y la pérdida de consistencia se agudiza en condiciones muy calurosas y secas).

4 METODO DE ENSAYO DE CONTRASTE DE MORTEROS DE CEMENTO NORMALIZADO CON Y SIN ADITIVO SUPERPLASTIFICANTE

4.1. OBJETIVO

El objetivo final es aprovechar el método de ensayo de mortero de cemento normalizado para conocer la interacción cemento-aditivo, bien para entender cómo afectan posibles cambios en un determinado cemento, en cuanto a fluidez, mantenimiento de consistencia, aire ocluido, densidad y fraguado, o bien cómo se comportan en esos mismos parámetros diferentes tipos de cemento, manteniendo el mismo tipo de aditivo.

Para ello, se definen sus componentes, el método de amasado, determinación de la consistencia, fabricación, conservación y rotura de probetas, tanto para morteros normalizados como para morteros a los que se ha introducido una cantidad de aditivo superplastificante para alcanzar la misma consistencia inicial que el mortero normalizado de referencia, para una relación a/c de 0,38±0,02.

4.2. REFERENCIAS

EN 196-1 Métodos de ensayo de cementos.

EN 1015-3 y 1015-5 Métodos de ensayos de los morteros para albañilería. Determinación de la consistencia del mortero fresco (por la mesa de sacudidas).

EN 480-1 Aditivos para hormigones, morteros y pastas.

4.3. INSTRUMENTOS Y COMPONENTES PARA ELABORACIÓN DE MORTEROS

Los instrumentos básicos son:

a) Amasadora Hobart – EN 196/1.

b) Balanza con exactitud 1g.

c) Cronometro.

d) Una mesa de sacudidas, de acuerdo con EN 1015-3.

e) Un molde troncocónico, de acuerdo con EN 1015-3.
f) Un pisón, de acuerdo con EN 1015-3.
g) Un calibre, de acuerdo con EN 1015-3.
h) Una paleta.
i) Una regla para enrasar.
j) Un porosímetro para mortero.
k) Aparato de Vicat, para determinación del tiempo de fraguado del mortero.
l) Moldes metálicos, de acuerdo con EN 1015-11.

Los componentes que se utilizarán son:

1. Arena: se usará arena normalizada según la norma CEN EN 196-1.
2. Cemento para ensayar.
3. Aditivo: el requerido para la mezcla de ensayo. Se dosificará en % de peso sobre cemento y tendrá una temperatura estándar de 21°C (±2°C).
4. Agua de amasado: agua potable en condiciones de 21°C (±2°C)

4.3.1. PROCEDIMIENTO DE AMASADO DEL MORTERO

Los morteros se fabricarán de acuerdo con la norma EN 196-1. Para los morteros con aditivo, se buscará la *misma consistencia inicial* que la obtenida en el mortero patrón de referencia, con un margen de 10 mm, debiendo escogerse un aditivo superplastificante (100% policarboxílico, acrílico o similar) de gama media de planta de hormigón, en una dosificación en torno al 0,4-0,6% s.p.c., para obtener una relación a/c de 0,38±0,02.

Nota 1: la cantidad de agua que incorpora el aditivo debe ser considerada, para lo que debe realizarse un ensayo previo de residuo seco del mismo con una termobalanza o similar.

Nota 2: la proporción de aditivo variará según su RS, poder fluidificante e incluso si es de la gama de prefabricado o de planta de hormigón

Nota 3: aunque el método está previsto para aditivos superplastificantes, es posible ensayar también aditivos plastificantes, aunque estos últimos suelen ser menos influenciados por cambios en los cementos.

Amasado

- Se vierte el agua y aditivo en el recipiente y una vez que se ponga la amasadora en marcha a velocidad lenta, se acciona el cronometro.
- Se añade el cemento a los 10 s manteniendo el amasado hasta los 30 s.
- Después de 30 s, se añade regularmente la arena durante los 30 s siguientes.
- Al minuto 1, se pone la amasadora a velocidad rápida durante 30 s.
- Se para la amasadora durante 90 s, retirando con una espátula el mortero adherido a las paredes.
- Se continúa el amasado a velocidad rápida, durante 60 s más (*).

(*) Este último amasado a velocidad rápida podría afectar al contenido de aire ocluido del mortero fabricado con aditivo. Debería estudiarse esta cuestión, por si es recomendable cambiar o no este último amasado de velocidad rápida a velocidad lenta (sólo para el caso de *morteros con aditivo*).

4.3.2. MEDIDA DE LA CONSISTENCIA DEL MORTERO POR LA MESA DE SACUDIDAS

Se realizará el ensayo de acuerdo con la norma EN 1015-3 y 1015-5, para el mortero recién amasado (T_0), a los 30 minutos (T_{30}) y a los 60 minutos (T_{60}). Dado que debe mantenerse el mortero durante una hora hasta la realización del último ensayo de consistencia, cada vez que se realice un ensayo a tiempos menores se debe recuperar el mortero de la mesa de sacudidas, introducirlo en el recipiente de amasado, realizar un reamasado de todo el mortero en la amasadora durante 10 segundos a velocidad rápida e, inmediatamente, sacar el recipiente y taparlo con un plástico o similar para evitar la evaporación de agua.

4.3.3. FABRICACIÓN, CONSERVACIÓN Y ROTURA DE PROBETAS DE MORTERO

Las probetas se realizarán, conservarán y romperán de acuerdo con la norma EN 1015-11, una vez terminada la última determinación de la consistencia del mortero (T_{60}). Antes de llenar los moldes de acero prismáticos de 40x40x160 mm, se realizará la medida de la densidad del mortero en fresco y su contenido de aire ocluido, así como la determinación del tiempo de fraguado mediante un aparato de Vicat.

Ejemplo de resumen de resultados de ensayo de mortero normalizado y contraste con aditivo superplastificante.

Tipo cemento										
Fecha ensayo										
Código ensayo										
Arena DIN 196		kg/m³								
Cemento		kg/m³								
Agua total		kg/m³								
Aditivo 1 (%spc)	Residuo seco =	kg/m³								
Aditivo 2 (%spc)	Residuo seco =	kg/m³								
Aditivo 3 (%spc)	Residuo seco =	kg/m³								
Aditivo 4 (%spc)	Residuo seco =	kg/m³								
Aditivo 5 (%spc)	Residuo seco =	kg/m³								
Relación Agua/Cemento		a/c								
Densidad fresco		kg/m³								
Aire ocluido		%								

Tipo cemento										
Fecha ensayo										
Código ensayo										
Consistencia mesa de sacudidas (mm)	0′									
	30′									
	60′									
Fraguado (min)	INICIO									
	FINAL									
Resistencias a compresión (MPa)	24H									
	7D									
	28D									
Resistencias a flexión (MPa)	24H									
	7D									
	28D									
Observaciones										

4.4. REGISTROS

Los resultados obtenidos quedan registrados en la Base de Datos utilizada en el laboratorio XXX, quedando guardados durante al menos Y años.

5 TIPOS DE CEMENTOS QUE SE RECOMIENDA ENSAYAR Y POR QUÉ

5.1. ANTECEDENTES

1. **"No hay nada permanente, excepto el cambio".** Frase atribuida a Heráclito de Éfeso que, después de 2.500 años, ilustra perfectamente el contexto actual que afrontan las principales industrias manufactureras, de productos y soluciones, con una alta huella embebida en dióxido de carbono ($C0_2$) en las mismas.

   Este cambio deriva de la necesidad de implementar hojas de ruta de descarbonización, de acuerdo con el Pacto Verde Europeo, para así transitar hacía una neutralidad climática y una transformación económica europea sostenible que no comprometa las opciones de desarrollo y crecimiento de futuras generaciones, el denominado desarrollo sostenible.

   Esta nueva estrategia ha abierto un intenso debate con diferentes dimensiones a abordar, unas relativas a materia normativa, o bien tecnológica, prestacional o financiera, cuyo fin último busca converger todos estos diferentes discursos y expectativas a un plano común: las reformulaciones de las nuevas líneas directrices en materia de manufactura a nivel europeo.

   Más centrado en el sector de la fabricación de cemento y sus derivados encontramos que, en dicha reformulación de la realidad productiva, existen diferentes formas de abordar e implementar estas hojas de rutas. Dichas iniciativas, que pueden ser complementarias, permitirán de manera agregada, vislumbrar un escenario viable de neutralidad climática.

   Y es precisamente porque no existe una única vía para conseguir dicha reducción sistemática de la huella embebida de CO_2 de las soluciones cementosas, por la que no se puede simplificar la descripción de este capítulo a un tipo o tipología de cemento concreto. Al contrario, se trata de aprovechar aquellas líneas más eficientes para cada caso y maximizar su contribución, porque cada kilogramo equivalente de CO_2 suma, o mejor dicho, resta.

   Por tanto, pese a poder ser una pequeña decepción para algún lector, no haremos de Oráculo de Delfos y, más bien, orientaremos el sentido de este documento a una recopilación actualizada, de materiales, prestaciones de diseño esperables y mejoras de estas últimas, si fuera necesario, en base al estado tecnológico actual de la química para el cemento y sus derivados, que igualmente está sujeta a cambio y evolución continua, lo que nos permitirá ayudar al lector a ubicarse dentro de las diferentes vías y rutas más factibles a día de hoy.

2. "En esta carrera hacia la descarbonización, existen diferentes rutas para llegar a la meta"

En coherencia con la introducción de este capítulo, pretendemos abordar de forma general, sin la ambición de ser exhaustivos, aquellos escenarios o rutas de diseño de cementos, que, a corto plazo, bien por disponibilidad de materiales o por bagaje existente que avale su uso, consideramos que van a ser ejemplos relevantes de diseño en las diferentes estrategias de productos de los diferentes fabricantes de cementos y derivados.

Existen en el mercado multitud de cementos comerciales con menor huella de carbono que los tradicionales cementos tipo I. Son productos con un elevado nivel tecnológico que implican reducciones de las emisiones de CO_2 del 20% al 70 % respecto a los cementos originales, con características técnicas y reológicas similares a las de éstos.

En todos los casos, la reducción del factor de clínker, % de clínker en la composición de un cemento, es objeto de reducción sistemática, puesto que el clínker resulta el componente más intensivo en huella de CO_2 embebida (kg de CO_2 equivalente/kg de material) de todos los posibles candidatos a ser parte de la composición de un cemento.

El desarrollo de cementos que favorecen la descarbonización del sector de la construcción es y será cada vez más habitual y en la actualidad diversos materiales puzolánicos, como cenizas volantes y otros tipos de cenizas, escorias, puzolanas, metacaolín y otras adiciones más novedosas como arcillas calcinadas, etc., son utilizados en pastas, morteros y hormigones.

No existe un único criterio en la velocidad de aparición de los nuevos cementos ni hay una tendencia única en cuanto al tipo de adiciones, ya que el uso de unas u otras depende mucho de la disponibilidad de estas en cada región y de la hoja de ruta de cada empresa cementera.

Para ayudar a entender mejor la posible evolución de estos cementos, se adjunta información relativa a demanda de cemento portland ya existente, así como la disponibilidad de las principales fuentes de adiciones al mismo.

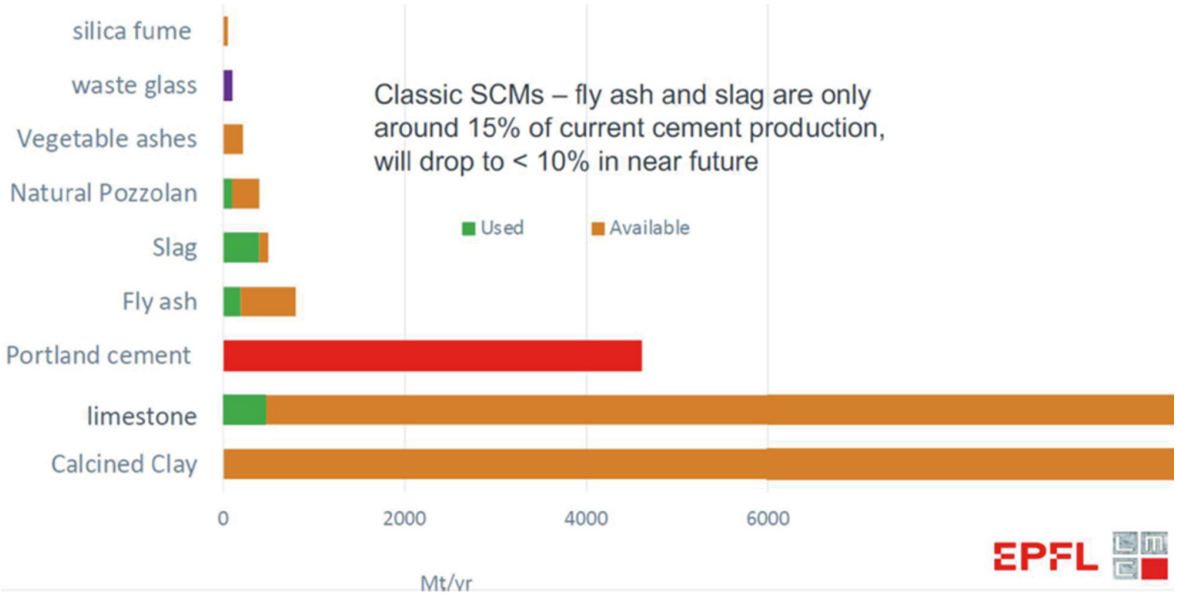


Figura 5.1. *Demanda de cemento portland ya existente y disponibilidad de las principales fuentes de adiciones al mismo.*

5.2. HOJA DE RUTA DE DESCARBONIZACIÓN: ADICIONES E IMPACTO EN PRESTACIONES

El afán de este epígrafe es didáctico y descriptivo. En ningún caso se pretende preconizar o estigmatizar enfoques de productos que aquí no aparezcan como ejemplo, insistir en este punto, no hay una vía única para poder diseñar hoja de ruta de diseño de productos.

Más bien se trata de relacionar, en función de tipología de adiciones a emplear en diseño, las características que, a priori, podrían verse influenciadas por dicha incorporación, de nuevo, con carácter general, nunca dogmático ni en términos absolutos.

Con carácter general, la reducción del factor de clínker conlleva la revisión de 3 grandes grupos de prestaciones:

1. Reactividad del sistema ligante, especialmente a edades tempranas.
2. Reología y docilidad de los materiales que emplean estos cementos.
3. Estabilidad dimensional y comportamiento por exposición a agentes agresivos en el largo plazo.

5.2.1. REACTIVIDAD DEL SISTEMA LIGANTE, ESPECIALMENTE A EDADES TEMPRANAS

Típicamente, conseguir una alta reactividad temprana de cementos portland, implica normalmente unos mayores costes asociados, entre otras, por este tipo de requerimientos:

- Condiciones más exigentes de clinkerización, es decir, la conversión y generación de silicatos cálcicos altamente reactivos.
- Contenidos altos de clínker en el cemento final, el componente más costoso de generar.
- Consignas altas de molturación y finura de dichos cementos, en donde un aumento de la superficie específica ayuda a la reactividad temprana de ciertas fases presentes en el clínker.

Al reducir la participación del clínker en estos cementos, se hace más complejo conservar este atributo de diseño. Esto puede ser más evidente cuando la tipología de la adición a incorporar es bien:

- Adición hidráulica, con capacidad de generar gel CSH, siglas en inglés de Calcium Silicates Hydrates, por si sola al hidratarse, pero carece de dicha reactividad temprana si no se activa de forma efectiva, por ejemplo, escorias de alto horno y asimilables.
- Adición puzolánica, con capacidad para fijar hidróxido cálcico, $Ca(OH)_2$, y generar gel CSH, pero su contribución no es efectiva en periodos muy cortos de tiempo, por su propia naturaleza química, por ejemplo, cenizas volantes, puzolanas naturales y artificiales (arcillas calcinadas).
- Adición que carece de carácter hidráulico o puzolánico, lo que, de forma objetiva, reduce la capacidad ligante de nuestro sistema cementoso de diseño, en este caso hablamos de adiciones de caliza y asimilables.

A pesar de estas posibles pérdidas de reactividad temprana, se dispone de un conocimiento consolidado sobre diferentes vías de activación de dichas matrices, tanto en adiciones

hidráulicas como puzolánicas, que permiten compensar de manera parcial o incluso totalmente, esa posible merma en prestación temprana. Sin ánimo de ser exhaustivo, cabría destacar dos de las más conocidas:

- Activación alcalina, donde a través de sustancias químicas que promueven condiciones muy básicas en el medio, se genera la rotura de enlaces covalentes (hidrólisis alcalina), lo que habilita mayor capacidad del sistema ligante para recombinarse y formar gel CSH.
- Activación sulfática, en donde, las fases ricas en aluminio y hierro presentes en sistemas ligantes, pueden generar una tipología de hidratos diferentes al gel CSH, pero que también aportan a las prestaciones mecánicas del sistema, especialmente, a edades tempranas. Esta tipología de hidratos se engloba dentro de la familia de los hidróxidos de doble capa, en inglés LDH (Layered Double Hidroxides), con un amplio espectro de tipología y posibles contribuciones.

5.2.2. REOLOGÍA Y DOCILIDAD DE LOS MATERIALES QUE CONTENGAN ESTOS CEMENTOS

La fabricación de cementos con mayores proporciones de estas adiciones, bien por el propio proceso de molturación al ser diferentes las durezas de cada material, bien por su propia mineralogía y morfología de estas, pueden provocar un aumento en la superficie específica de dichos cementos compuestos.

Este aumento de superficie específica, de forma objetiva, exige un aumento de la capacidad de humectación del sistema, ya que hay más superficie a humectar para una misma cantidad determinada de agua (adsorción física), algo que, si no se compensa con química de fluidificación, puede traducirse en un aumento neto de la demanda de agua de dichos cementos de diseño. Este aumento de agua conlleva una concatenación de efectos que, en último término, y reduciendo mucho la secuencia de efectos, se traducen en una posible merma prestacional y de durabilidad de todo el elemento fabricado con este cemento de diseño.

Además de esta adsorción física, existe otra tipología de fenómeno asociada al aumento de superficie específica que es la interacción que tiene lugar debido a la naturaleza química y afinidad específica de las "nuevas" superficies presentes en el sistema, las cuales condicionan el comportamiento y eficiencia de las tecnologías de fluidificación del cemento y sus aplicaciones, en algún caso, de manera notable.

Y si aún podemos prever algún escenario de complejidad mayor, en relación a la generación de nueva superficie específica, están aquellas superficies específicas generadas como resultado de la implementación en nuestros sistemas ligantes de estrategias de activación.

Es decir, y por ilustrar mejor con un ejemplo esta tercera vía de generación e interacción superficial: el empleo de vías de activación, como la vía sulfática, que buscan promover la formación de una tipología concreta de hidratos concreta a edades tempranas (LDH), tienen una interacción con las tecnologías de fluidificación, en algunos casos, muy significativas. En muchos casos no es sencillo de cuantificar o prever, pues se trata de un fenómeno "latente", que no será visible hasta que no se desencadene la hidratación del sistema.

5.2.3. ESTABILIDAD DIMENSIONAL Y COMPORTAMIENTO POR EXPOSICIÓN A AGENTES AGRESIVOS EN EL LARGO PLAZO

El comportamiento durable del cemento portland está muy bien documentado y existe una sólida experiencia en todo lo relativo a:

- Agentes agresivos responsables de los fenómenos de ataque y degradación del cemento y sus aplicaciones.
- Mecanismos de ataque y degradación de estos, incluyendo formas de proyectar tiempos de vida útil.
- Evolución de las especies químicas, su mineralogía y las connotaciones relativas a la presencia de dichas fases o sustancias en el cemento y sus aplicaciones.
- Correlación entre esta evolución mineralógica y las prestaciones de los elementos fabricados con estos sistemas ligantes.
- Patologías asociadas a esta evolución de mecanismos de agresión al cemento y sus aplicaciones, así como las técnicas de remediación de las mismas.

Por tanto, no estamos en un escenario de incertidumbre en cuanto al dominio del diseño de estos materiales y todo lo relativo a sus prestaciones durables en el tiempo, siendo esta una de las principales virtudes del cemento y sus aplicaciones.

Aun así, destacar que el aumento de contenido relativo de adiciones, o mejor dicho, la reducción de clínker en estos nuevos cementos conlleva un mayor nivel de análisis y detalle en todo lo relativo a las condiciones de contexto en materia de durabilidad, los motivos:

- **Reducción objetiva de la reserva alcalina del sistema.** Durante la hidratación del cemento portland, algunas fases mineralógicas del clínker, liberan de forma importante hidróxido cálcico al medio, lo que genera una reserva alcalina fundamental para asegurar la pasivación del acero en aplicaciones de hormigón armado.
- **Mayor consumo de $Ca(OH)_2$, debido al carácter puzolánico de las adiciones.** Si en estos diseños de cementos, se aumenta la contribución de adiciones puzolánicas, la reserva alcalina también se ve mermada, algo que debe tenerse en cuenta para poder prever posibles comportamientos en determinados escenarios de exposición.
- **Refinamiento red porosa más tardía.** En este caso, debido a una posible reducción de reactividad temprana, la evolución de tamaño de la red capilar puede dilatarse algo en el tiempo, lo que podría conllevar, en caso de una exposición temprana a agentes agresivos, el ingreso y concentración de dichos agentes agresivos en niveles altos, dentro de la matriz cementante, lo que alteraría el comportamiento durable esperable si el refinamiento de la red porosa fuera más rápido.
- **Posible comportamiento inestable de nuevos hidratos presentes en mayor cantidad.** Al utilizar vías de generación de reactividad temprana, los hidratos generados durante la misma, pueden tener un comportamiento y evolución en el tiempo diferente a la matriz clásica de hidratos generados en cementos portland muy ricos en clínker. Es por ello, que resulta necesario el confirmar la estabilidad dimensional de las fases generadas, así como prever la interacción de estas mismas con los agentes agresivos a los más comúnmente se exponen los sistemas cementantes.
- **Estabilidad composicional de nuevas tipologías de adiciones.** La industria cementera, tradicionalmente ha sido un agente de circularidad altamente contributivo, permitiendo la incorporación de corrientes tanto en procesos productivos (valorización energética), como

en su composición (subproductos y asimilables a residuos). Desde este rol ya consolidado, resulta más que previsible el incremento potencial de corrientes candidatas a ser parte de este proceso productivo, por lo que, será de gran relevancia entender cómo pueden afectar a los mecanismos de hidratación y la estabilidad de dichos hidratos en el tiempo.

Este último epígrafe es el más difícil de manejar, no ya por las previsibles incertidumbres existen a día de hoy en lo relativo a la posible valorización en el cemento de nuevas corrientes, sino por poder converger las expectativas en materia de sostenibilidad y factibilidad tecnológica. Debemos apoyar con solidez científica y viabilidad técnica-económica esta nueva dinámica sostenible, y eso pasa, básicamente, por un cuerpo normativo que soporte dicha transición hacia la neutralidad sin mayores incertidumbres y capaz de dar garantías al diseño, fabricación, uso y gestión del final de vida de los elementos fabricados con cemento y sus aplicaciones. Es ahí donde, como sector, cada empresa o agente involucrado, desde su posición en la cadena de valordonde hay que generar un ecosistema colaborativo, donde el fin último sea ese mismo, deba acelerar la transición hacia una economía manufacturera sostenible sin merma alguna de garantías a nivel prestacional.

5.3. ADITIVOS QUÍMICOS PARA EL CEMENTO Y SUS APLICACIONES: COMPAÑEROS DE VIAJE

El uso de estos cementos en el hormigón implica, en numerosas ocasiones, la necesidad de **aditivos superplastificantes y reductores de agua**, o bien de **acelerantes** en el caso de que sean cementos algo más lentos en cuanto a su curva de fraguado, para, a su vez, evitar incrementos en los contenidos de cemento que se añade a posteriori en el hormigón, lo que implicaría, de nuevo, mayores tasas de emisiones de CO_2.

Combinaciones de diferentes tipos de aditivos también son posibles, como superplastificantes o reductores de agua de alta actividad que también posean una función de retardadores, ya registrados en Marcado CE bajo norma UNE-EN 934 – grupo 11, o bien combinaciones de superplastificantes que también posean una función de aceleradores, bajo el cuerpo normativo de la misma UNE-EN 934 dentro del grupo 12.

Otros aditivos cuyo uso puede ayudar a un mayor consumo de cementos con bajas emisiones de CO_2 y, por tanto, a la descarbonización del sector de la construcción son los aditivos reductores de la retracción, cuyo Marcado CE está actualmente en proceso, los líquidos de curado, etc.

Además, el uso de **aditivos de molienda y mejoradores de la calidad del cemento** está ayudando, en gran medida, a esta descarbonización del sector de la construcción en nuestro país. Con ellos se logra obtener cementos con mayores contenidos en adiciones sin que esto afecte a su comportamiento, realizando un enfoque holístico en el que se ensayan todos los parámetros necesarios desde el cemento, aguas abajo, como en el hormigón, agua arriba, con el fin de lograr que los cambios afecten lo mínimo posible al cliente final del hormigón. Esta ayuda o colaboración se ha visto acelerada en los últimos años y está avalada y regulada por nuevas normativas que se han ido incluyendo en los últimos años.

5.4. NOVEDADES EN LA NORMATIVA

- Novedades Norma UNE-EN 197-1:

  La norma UNE-EN 197-1 regula la clasificación de los siguientes cementos comunes:

Tipos principales	Designación y denominación de los 27 productos (tipos de cementos comunes)		Composición (proporción en masa[a])									
			Componentes principales									Componentes minoritarios adicionales
			Clínker	Escoria de horno alto	Humo de sílice	Puzolana		Ceniza volante		Esquisto calcinado	Caliza	
						Natural	Natural Calcinada	Sílice	Calcárea			
			K	S	D[b]	P	Q	V	W	T	L	LL
CEM I	Cemento Portland	CEM I	95-100	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
CEM II	Cemento Portland con escoria	CEM II/A-S	80-94	6-20	-	-	-	-	-	-	-	0-5
		CEM II/B-S	65-79	21-35	-	-	-	-	-	-	-	0-5
	Cemento Portland con humo de sílice	CEM II/A-D	90-94	-	6-10	-	-	-	-	-	-	0-5
	Cemento Portland con puzolana	CEM II/A-P	80-94	-	-	6-20	-	-	-	-	-	0-5
		CEM II/B-P	65-79	-	-	21-35	-	-	-	-	-	0-5
		CEM II/A-Q	80-94	-	-	-	6-20	-	-	-	-	0-5
		CEM II/B-Q	65-79	-	-	-	21-35	-	-	-	-	0-5
	Cemento Portland con ceniza volante	CEM II/A-V	80-94	-	-	-	-	6-20	-	-	-	0-5
		CEM II/B-V	65-79	-	-	-	-	21-35	-	-	-	0-5
		CEM II/A-W	80-94	-	-	-	-	-	6-20	-	-	0-5
		CEM II/B-W	65-79	-	-	-	-	-	21-35	-	-	0-5
	Cemento Portland con esquisto calcinado	CEM II/A-T	80-94	-	-	-	-	-	-	6-20	-	0-5
		CEM II/B-T	65-79	-	-	-	-	-	-	21-35	-	0-5

(Continúa en la página siguiente).

Tipos principales	Designación y denominación de los 27 productos (tipos de cementos comunes)		Composición (proporción en masa[a])										
			Componentes principales										Componentes minoritarios adicionales
			Clínker	Escoria de horno alto	Humo de sílice	Puzolana		Ceniza volante		Esquisto calcinado	Caliza		
						Natural	Natural Calcinada	Sílice	Calcárea				
			K	S	D[b]	P	Q	V	W	T	L	LL	
CEM II	Cemento Portland con caliza	CEM II/A-L	80-94	-	-	-	-	-	-	-	6-20	-	0-5
		CEM II/B-L	65-79	-	-	-	-	-	-	-	21-35	-	0-5
		CEM II/A-LL	80-94	-	-	-	-	-	-	-	-	6-20	0-5
		CEM II/B-LL	65-79	-	-	-	-	-	-	-	-	21-35	0-5
	Cemento Portland compuesto*	CEM II/A-M	80-88	← 12-20 →									0-5
		CEM II/B-M	65-79	← 21-35 →									0-5
CEM III	Cemento de horno alto	CEM III/A	35-64	36-65	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
		CEM III/B	20-34	66-80	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
		CEM III/C	5-19	81-95	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
CEM IV	Cemento puzolánico*	CEM IV/A	65-89	-	← 11-35 →					-	-	-	0-5
		CEM IV/B	45-64	-	← 36-55 →					-	-	-	0-5
CEM V	Cemento compuesto*	CEM V/A	40-64	18-30	-	← 11-35 →			-	-	-	-	0-5
		CEM V/B	20-38	31-49	-	← 36-55 →			-	-	-	-	0-5

[a]Los valores de la tabla se refieren a la suma de los componentes principales y minoritarios adicionales.

[b]La proporción de humo de sílice está limitada al 10%.

[c]En los cementos Portland compuestos CEM II/A-M y CEM II/B-M, en los cementos puzolánicos CEM IV/A y CEM IV/B y en los cementos compuestos CEM V/A y CEM/B, los componentes principales diferentes del clínker se deben declarar en la designación del cemento (véase los ejemplos en el capítulo 8).

La norma UNE-EN 197-1 incluye desde hace unos años un cambio en cuanto al requisito que deben cumplir los clínkeres con los que se van a fabricar los cementos resistentes a los sulfatos:

TABLA 1

Limitación de C_3A en el clínker en los cementos comunes resistentes a los sulfatos (SRC)

Cementos comunes resistentes a los sulfatos	C_3A (%) en el clínker
CEM I-SR 0	=0%
CEM I-SR 3	≤ 3%
CEM I-SR 5	≤ 5%
CEM III/B-SR	Sin requisito
CEM III/C-SR	Sin requisito
CEM IV/A-SR	≤ 9%
CEM IV/B-SR	≤ 9%

TABLA 2

Los siete productos de la familia de los cementos comunes resistentes a los sulfatos

Tipos principales	Designación de los 7 productos (tipos de cementos comunes)		Composición (proporción en masa[1])				
			Componentes principales				Constit. Minorit.
			Clínker K	Escorias de Horno Alto S	Puzolana Natural P	Cenizas Volantes Silíceas V	
CEM I	Cemento Portland resistente a los sulfatos	CEM I-SR 0 CEM I SR-3 CEM I-SR 5	95-100				0-5
CEM III	Cemento de horno alto resistente a los sulfatos	CEM III/B-SR	20-34	66-80	-	-	0-5
		CEM III/C-SR	5-19	91-95	-	-	0-5
CEM IV	Cemento puzolánico resistente a los sulfatos[2]	CEM IV/A-SR	65-79		21-35		0-5
		CEM IV/B-SR	45-64		36-55		0-5

- Nueva norma UNE-EN 197-5:

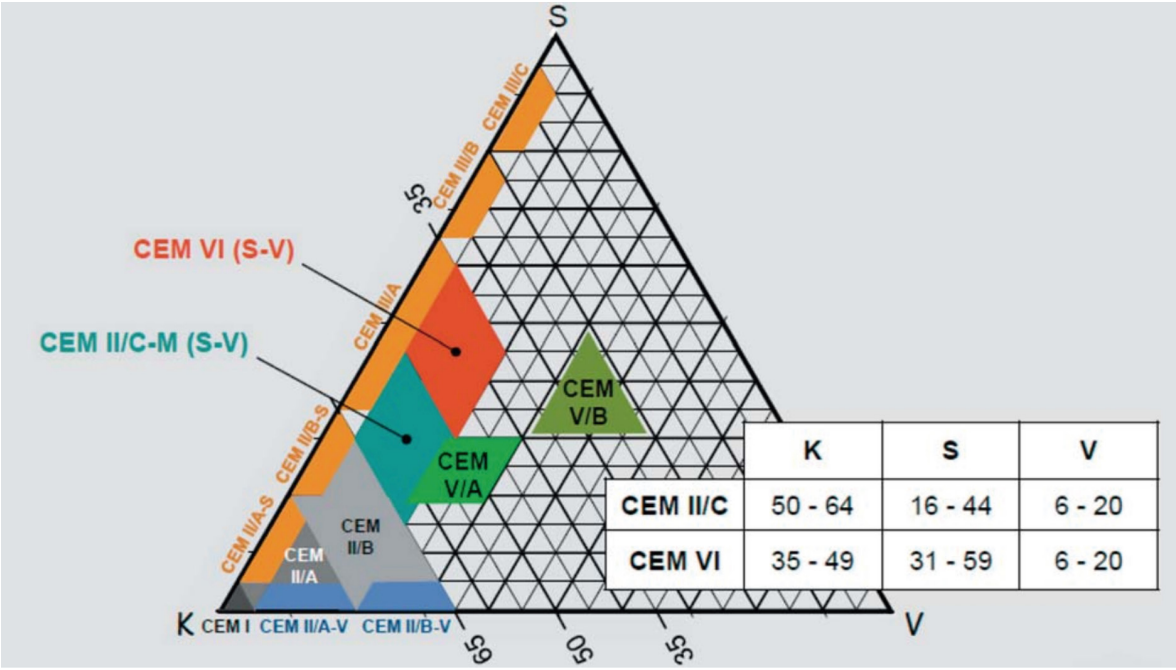
  Los cementos portland compuestos CEM II/C-M y CEM VI se han normalizado recientemente bajo la UNE-EN 197-5, elaborada por el comité técnico CTN-80: Cementos y cales, publicada el 9 de julio de 2021 y aprobada por el CEN el 2 de agosto de 2021. Esta parte 5 incluida dentro de la colección de normas UNE-EN 197 incluye nuevos tipos

de cementos que permitirán el uso de ligantes con menores emisiones de CO_2 en las estructuras de hormigón, así como en los morteros de base cementosa, con el fin de lograr los objetivos europeos frente al cambio climático y a la vez minimizar el uso de recursos naturales.

Los cementos portland compuestos CEM II/C-M y cementos compuestos CEM VI contienen una elevada cantidad de adiciones en proporciones diferentes a las normalizadas en la UNE-EN 197-1.

Tipos principales	Designación de los productos (tipos de cemento)		Composición (proporción en masa[a])										
			Componentes principales										Componentes adicionales minoritarios
			Clínker	Escoria de horno alto	Humo de sílice	Puzolana		Ceniza volante		Esquistos calcinados	Caliza		
						Natural	Natural	Silíceas	Calcáreas				
	Denominación	Designación	K	S	D[b]	P	Q	V	W	T	L	LL	
CEM II	Cemento Portland compuesto[1]	CEM II/C-M	50-64										0-5
CEM VI	Cemento compuesto	CEM VI (S-P)	35-49	31-59	-	6-20	-	-	-	-	-	-	0-5
		CEM VI (S-V)	35-49	31-59	-	-	-	6-20	-	-	-	-	0-5
		CEM VI (S-L)	35-49	31-59	-	-	-	-	-	-	6-20	-	0-5
		CEM VI (S-LL)	35-49	31-59	-	-	-	-	-	-	-	6-20	0-5

En el diagrama triangular K-S-V, se puede ver el lugar que ocupan los cementos CEM II/C-M (S-V/P) y CEM VI (S-V/P) de la UNE-EN 197-5 entre los cementos CEM II/B-S o CEM III/A y CEM V/A o CEM V/B de la UNE-EN 197-1:2011, respectivamente. La idoneidad para el uso previsto de estos cementos (producción de hormigón estructural) lo ha evaluado el Comité Europeo de Normalización CEN/TC 51 'Cemento y cales de construcción'.



	K	S	V
CEM II/C	50 - 64	16 - 44	6 - 20
CEM VI	35 - 49	31 - 59	6 - 20

- Nueva Norma UNE-EN 197-6:

  Dentro de la colección de normas UNE-EN 197, la parte 6 incluye nuevos tipos de cementos con materiales de construcción reciclados.

  La nueva UNE-EN 197-6:2023 especifica el cemento con finos de hormigón reciclado cuyo uso previsto es la elaboración de hormigón, mortero, lechadas, etc.

TABLA 3

Cementos con finos de hormigón reciclado

Tipos principales	Notación de los productos (tipos de cemento)		Composición (proporción en masa[a])											
			Componentes principales											Componentes adicionales minoritarios
			Clínker	Finos de hormigón reciclado	Escoria de horno alto	Humo de sílice	Puzolana		Ceniza volante		Esquisto calcinado	Caliza		
							Natural	Natural Calcinada	Silícea	Calcárea				
	Denominación	Designación	K	F	S	D[b]	P	Q	V	W	T	L[e]	LL[e]	
CEM II	Cemento Portland con finos reciclados	CEM II/A-F	80-94	6-20	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
		CEM II/B-F	65-79	21-35	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
	Cemento Portland compuesto[d]	CEM II/A-M	80-88	6-14	← 6-14 →									0-5
CEM VI	Cemento compuesto	CEM II/B-M	65-79	6-29	← 6-29 →									0-5
		CEM II/C-M	50-64	6-20	← 16-44 →									0-5
		CEM VI	35-49	6-20	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5

[a]Los valores de la tabla se refieren a la suma de los componentes principales y adicionales minoritarios.

[b]El caso de emplear humo de sílice, la proporción de humo de sílice se limita del 6% al 10% en masa..

[c]En caso de utilzar caliza, la suma de la caliza y de los finos de hormigón reciclado (suma de L, LL y F) se limita al 35% en masa.

[d]El número de componentes principales distintos de clínker se limita a dos, y dichos componentes principales se deben declarar en la designación del cemento (Véanse los ejemplos del apartado 6). En el caso de emplear en la composición F y (L o LL) conjuntamente, el número de componentes principales distintos del clínker se limita a tres, y dichos componentes principales se deben declarar en la designación del cemento.

6 CEMENTOS EMPLEADOS Y SENSIBILIDAD DEL MÉTODO

Para la elaboración de la presente guía se exponen una serie de ensayos[1] realizados con diferentes cementos y aditivos químicos, para poder mostrar la utilidad del método planteado a la hora de detectar y anticipar cualquier cambio, si lo hubiera, en las propiedades del mortero fabricado con el cambio de cualquiera de sus constituyentes, en este caso el cemento.

Para ello se han seleccionado diferentes cementos y aditivos, de uso habitual en las plantas de hormigón preparado y prefabricado. En esta selección se ha tenido en cuenta la representatividad de los materiales en la industria, aunque solo son una pequeña parte de la oferta disponible hoy en día.

La comparación entre los distintos materiales no persigue un análisis absoluto de sus propiedades, si no un estudio relativo del propio método de ensayo y su sensibilidad a la hora de detectar la posible influencia de cualquier cambio en el resto del sistema que permita tomar las decisiones para poder corregirlas, si fuera necesario.

Los cementos seleccionados son los siguientes:

Cemento tipo CEM I 52,5 R: cemento portland de altas resistencias, sin adiciones, con resistencia característica inferior mayor de52,5 MPa a 28 días. Recomendable para la elaboración de hormigón, tanto en masa, armado y pretensado. La composición estimada según la norma UNE-EN 197-1 es clínker: 95-100% en masa, y componentes minoritarios adicionales: 0-5% en masa.

Cemento tipo CEM II/A-V 52,5 R: cemento portland de altas resistencias, con adición de ceniza volante, de resistencia característica inferior mayor de 52,5 MPa a 28 días. Recomendable para la elaboración de hormigón, tanto en masa, armado y pretensado. La composición estimada según la norma UNE-EN 197-1 es clínker: 80-94% en masa, adición de ceniza volante: 6-20% en masa y componentesminoritarios adicionales: 0-5% en masa.

[1]Estos ensayos han sido realizados en su totalidad por el Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja, perteneciente al CSIC.

Cemento tipo CEM II/A-L 42,5 R: cemento portland con adición caliza, de resistencia característica inferior mayor de 42,5 MPay resistencia característica superior menor de 62,5 MPa a 28 días. Recomendable para la elaboración de hormigón, tanto en masa como armado. La composición estimada según la norma UNE-EN 197-1 es a clínker: 80-94% en masa, adición caliza: 6-20% en masa y componentes minoritarios adicionales: 0-5% en masa.

Cemento tipo CEM II B-M (P-LL) 42,5 R: cemento portland con adición caliza y puzolana natural, de resistencia característica inferior mayor de 42,5 MPa y resistencia característica superior menor de 62,5 MPa a 28 días. Recomendable para la elaboración de hormigón, tanto en masa como armado. La composición estimada según la norma UNE-EN 197-1 es a clínker: 65-79% en masa, adición de caliza más puzolana natural: 21-35% en masa y componentes minoritarios adicionales: 0-5% en masa.

Cemento tipo III/A 42,5 N/SRC: cemento portland con adición de escoria de horno alto resistente a sulfatos, de resistencia característica inferior mayor de 42,5 MPa y resistencia característica superior menor de 62,5 MPa a 28 días. Recomendable para la elaboración de hormigón, tanto en masa como armado. La composición estimada según la norma UNE 80303-1 es clínker: 35-64% en masa, adición de escoria de horno alto: 36-65% en masa y componentes minoritarios adicionales: 0-5% en masa.

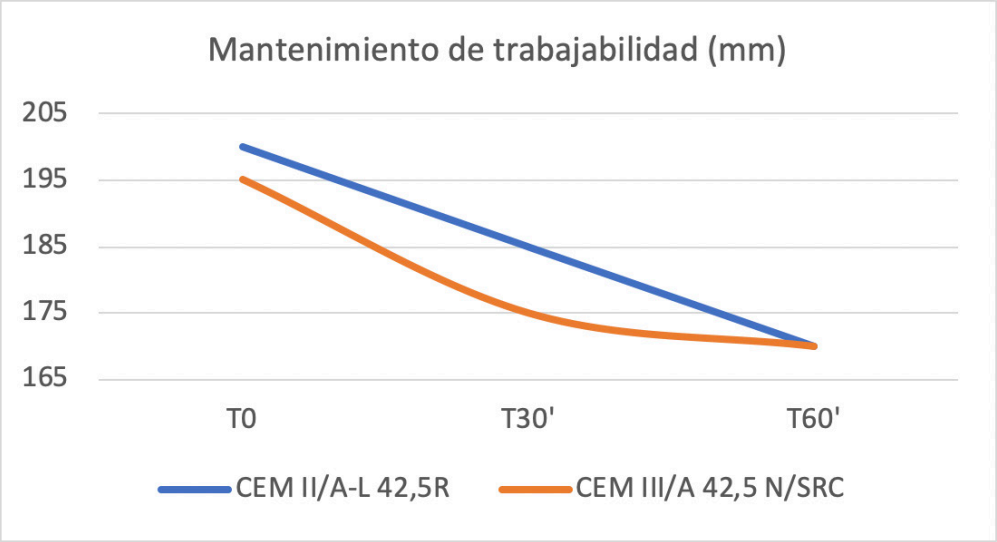
Cemento tipo CEM I 42,5 R-SR: cemento portland resistente a los sulfatos, sin adiciones, de resistencia característica inferior mayor de 42,5 MPa y resistencia característica superior menor de 62,5 MPa a 28 días. Recomendable para la elaboración de hormigón, tanto en masa, armado y pretensado. La composición estimada según la norma UNE-EN 197-1 sería clínker: 95-100% en masa y componentes minoritarios adicionales: 0-5 % en masa.

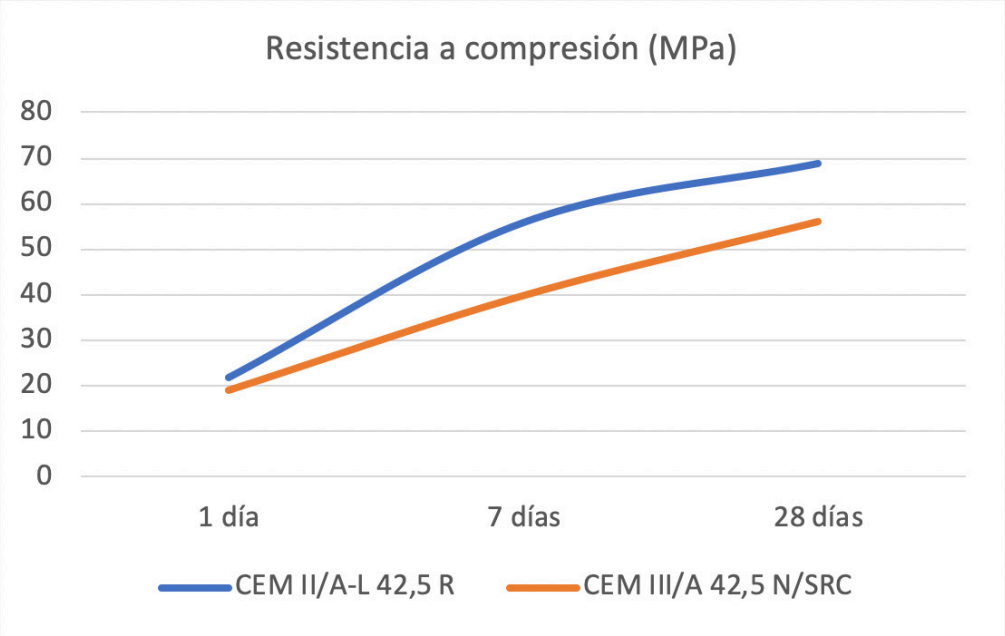
Cemento tipo CEM IV/A (P) 42,5 R-SR: cemento puzolánico resistente a los sulfatos de resistencia característica inferior mayor de 42,5 MPa y resistencia característica superior menor de 62,5 MPa a 28 días. Recomendable para la elaboración de hormigón, tanto en masa como armado. La composición estimada según la norma UNE-EN 197-1 sería clínker: 65-89% en masa, adición de puzolana natural: 11-35% en masa y componentes minoritarios adicionales: 0-5% en masa.

Como se puede observar, la selección de cementos cubre un amplio espectro de posibilidades en cuanto a composición, adiciones empleadas y uso de los diferentes cementos para distintas aplicaciones.

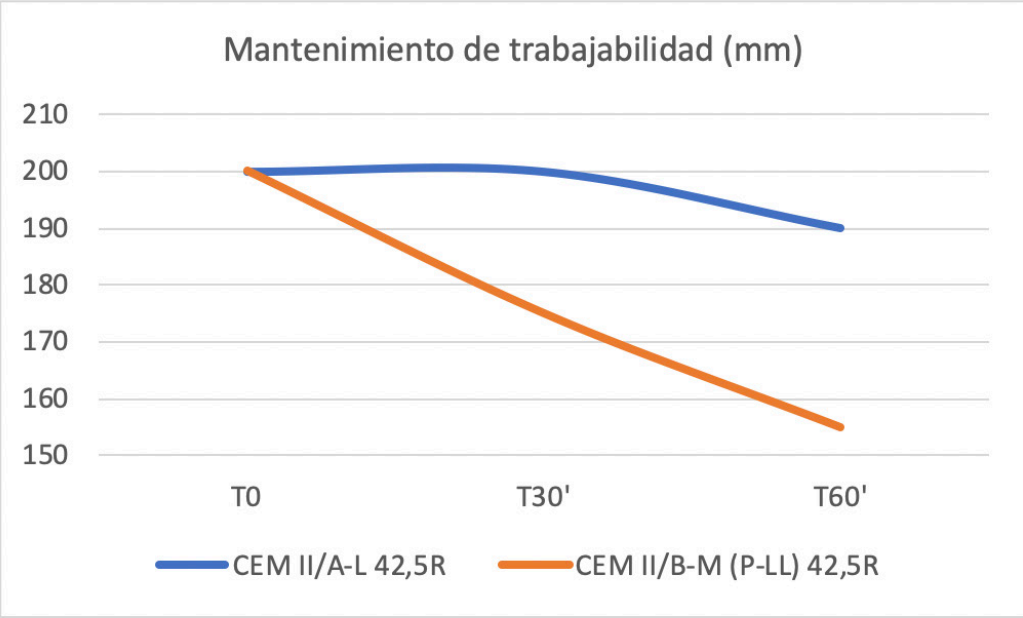
A continuación, se muestran algunos ejemplos para ilustrar la sensibilidad del método propuesto para determinar los efectos del cambio de tipo de cemento en el mortero ensayado. Estos ejemplos deben tomarse como tal y no considerar lo expuesto como un valor absoluto.

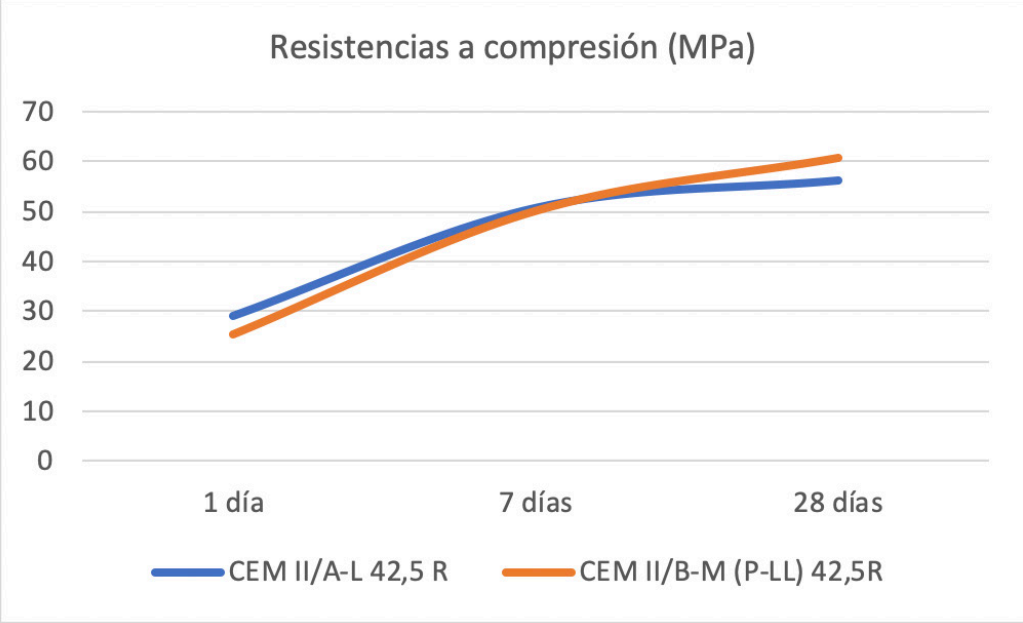
INFLUENCIA DEL CAMBIO DE CEM II/A-L 42,5 R A III/A 42,5 N/SRC A R(A/C) CONSTANTE Y ADITIVO TIPO "SUPERPLASTIFICANTE HORMIGÓN PREPARADO"



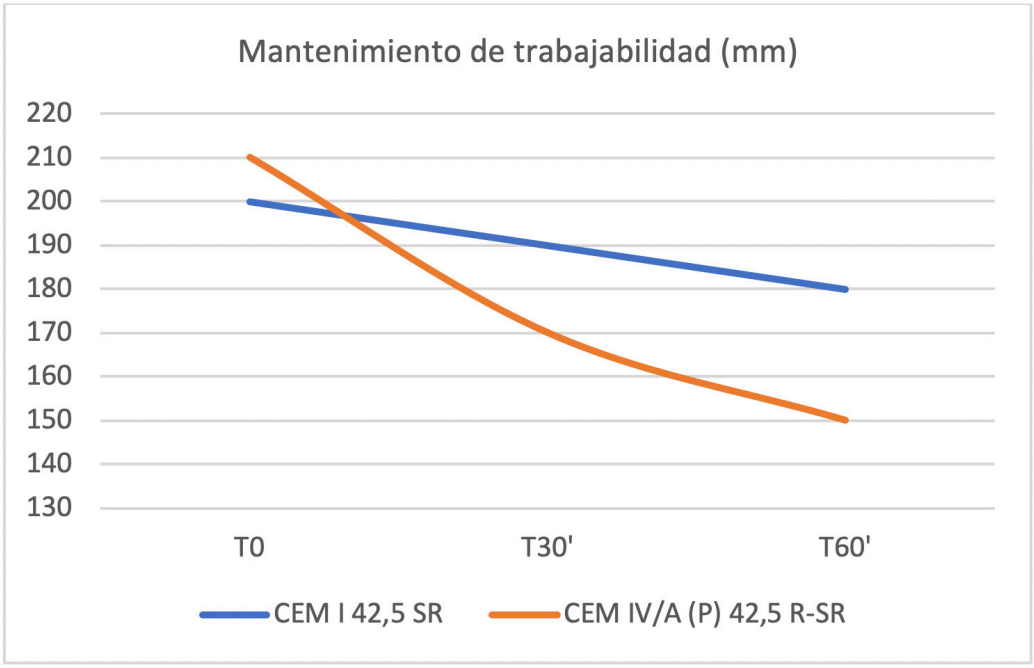


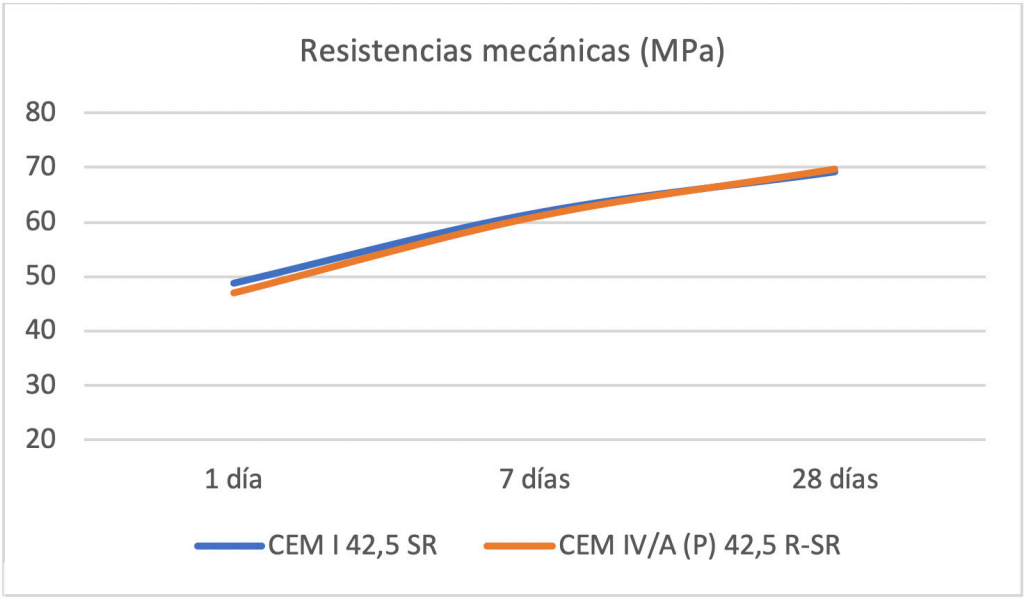
INFLUENCIA DEL CAMBIO DE CEM II/A-L 42,5 R A CEM II/B-M (P-LL) 42,5R A R(A/C) CONSTANTE Y ADITIVO TIPO "SUPERPLASTIFICANTE PARA HORMIGÓN PREPARADO"





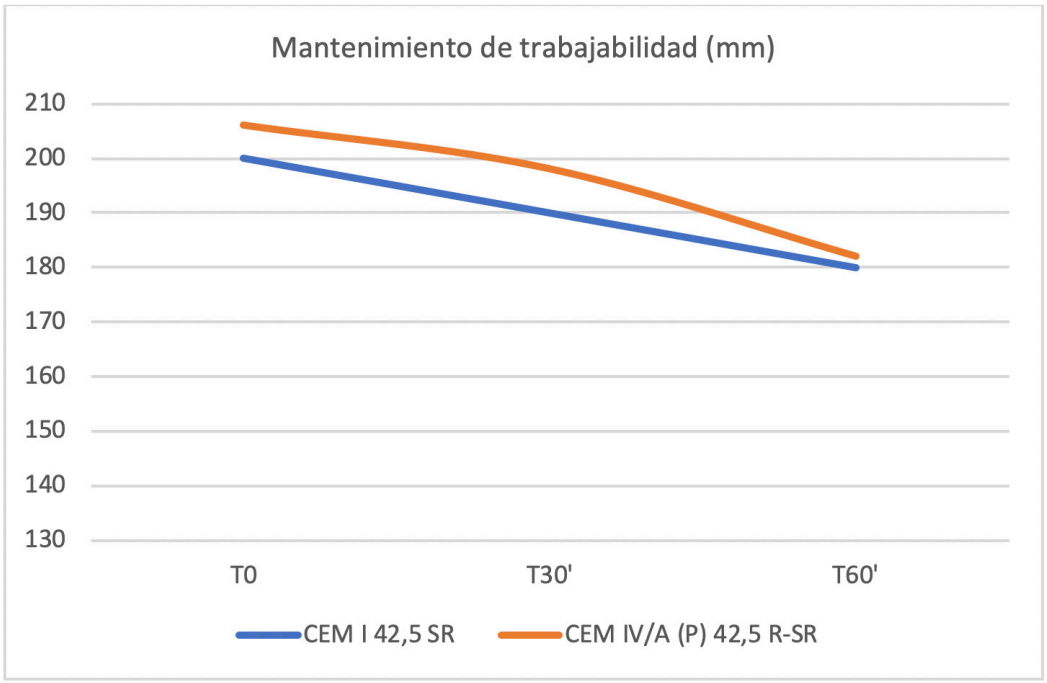
INFLUENCIA DEL CAMBIO DE CEM I42,5 SR A CEM IV/A (P) 42,5R-SR A R(A/C) CONSTANTE Y ADITIVO TIPO "SUPERPLASTIFICANTE PREFABRICADO"

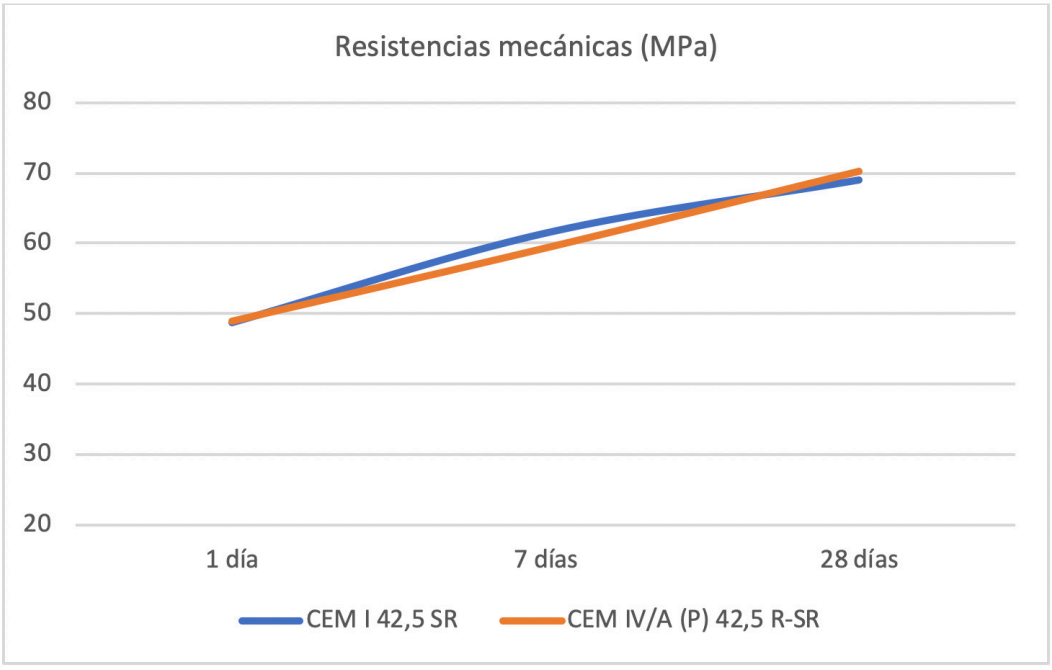




A modo de ejemplo se observa en el siguiente gráfico cómo el método de ensayo puede emplearse para proponer una medida correctora para solucionar la pérdida de trabajabilidad observada, empleando un aditivo químico de diferente composición, especialmente diseñado para el cemento ensayado.

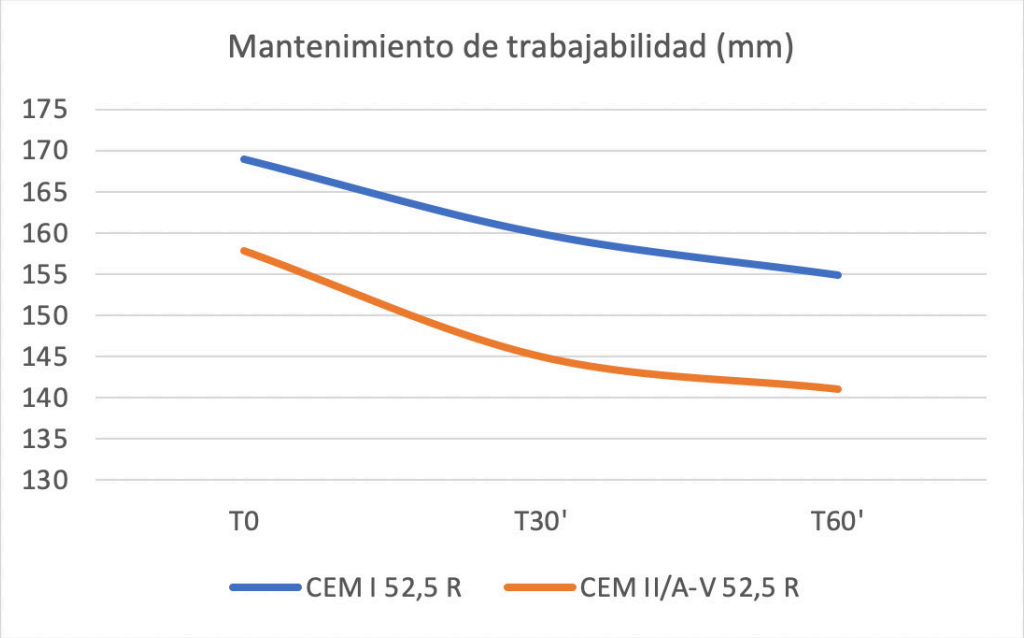
INFLUENCIA DEL CAMBIO DE ADITIVO EN EL CASO DE ESTUDIO DE CAMBIO DE CEMENTO CEM I42,5 SR A CEMIV/A (P) 42,5R-SR A R(A/C) CONSTANTE

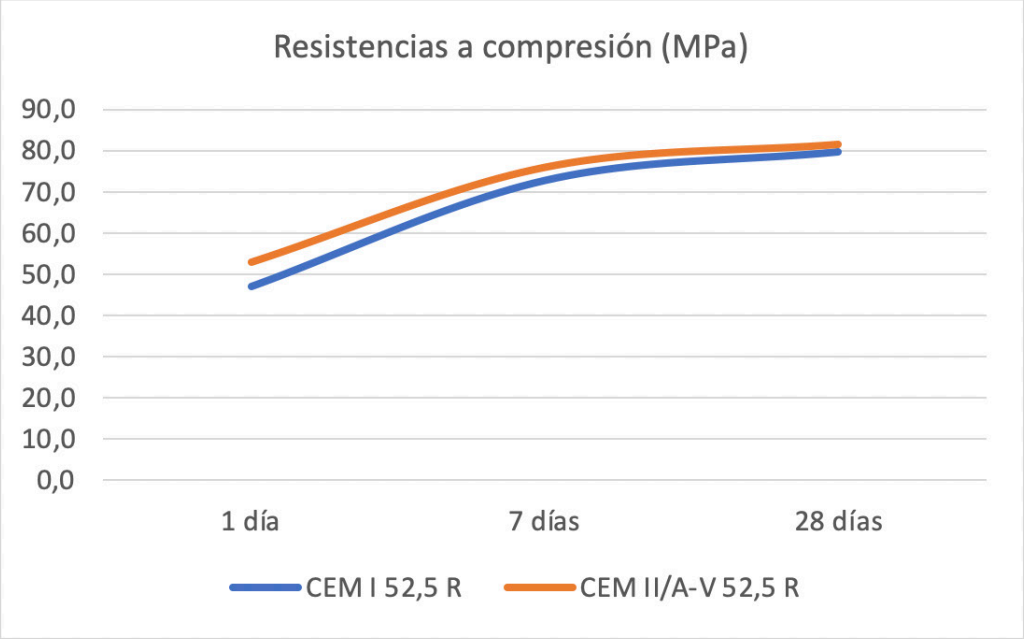




En este caso se observa cómo se corrige la pérdida de trabajabilidad inicial con el empleo de otro tipo de superplastificante más adaptado a la naturaleza del nuevo cemento ensayado.

INFLUENCIA DEL CAMBIO DE CEM I 52,5 R A CEM II/A-V 52,5R A R(A/C) CONSTANTE Y ADITIVO TIPO "SUPERPLASTIFICANTE PREFABRICADO"





7 CONCLUSIONES

La presente guía ha tenido como objetivo principal ofrecer un método de ensayo alternativo al ya existente para morteros de cemento normalizados. La irrupción de nuevos cementos de baja huella de carbono, impulsada por la necesidad de implementar la hoja de ruta hacia la emisión CERO de CO_2, ha evidenciado que el método actualmente empleado podría ser limitadoo insuficiente. La incorporación de un aditivo reductor de agua de alta actividad en el método de ensayo puede ayudarnos a comprender mejor la interacción cemento-aditivo, ya sea para analizar cómo afectan los posibles cambios en un determinado cemento en términos de fluidez, resistencias, mantenimiento de consistencia, oclusión de aire, densidad y fraguado, o para evaluar el comportamiento de diferentes tipos de cemento bajo las mismas condiciones y con un aditivo común.

Se ha evaluado la sensibilidad y utilidad del método de ensayo propuesto para el análisis de cemento, considerando una selección representativa de distintos tipos de cementos y especificando la tipología concreta de aditivos a emplear. Los ensayos han demostrado que el método es capaz de detectar y anticipar cambios en las propiedades del mortero cuando se modifican sus componentes, particularmente en lo que respecta al tipo de cemento utilizado.

La variedad de cementos seleccionados, que incluye desde cementos portland de alta resistencia (CEM I 52,5 R) hasta cementos con adiciones como ceniza volante (CEM II/A-V 52,5 R) o escoria de horno alto (CEM III/A 42,5 N UNE-EN 197-1), ha permitido cubrir un espectro amplio de composiciones y aplicaciones típicas de la industria del hormigón. Esto refuerza la aplicabilidad del método en contextos reales de producción y control de calidad en hormigón preparado y prefabricado.

Los resultados obtenidos evidenciaron la capacidad del método para identificar diferencias significativas en el desempeño de morteros fabricados con distintos cementos, incluso bajo condiciones controladas de relación agua/cemento ($r_{a/c}$) constante y en combinación con aditivos específicos, como los superplastificantes.

En conclusión, la modificación del método de ensayo constituye una herramienta robusta y adaptable para analizar la influencia de los diferentes tipos de cementos y aditivos en el comportamiento del mortero. Esto no solo mejora el control de calidad en la fabricación de

cementos, sino que también permite anticipar problemas potenciales y tomar decisiones informadas para optimizar las composiciones.

No obstante, se recomienda realizar ensayos adicionales con este método para que éste sea validado en condiciones experimentales más diversas y con otros tipos de materiales (áridos locales, cementos disponibles en la zona y distintos aditivos recomendados por los fabricantes, adaptados a las necesidades individuales del usuario principalmente), para ampliar aún más su aplicabilidad y resultados en cada caso.