

## Los cementos adicionados

Rodrigo Salamanca Correa\*

### Introducción

**E**n la tecnología del Concreto actual, y en todos los continentes, hay una tendencia muy clara e irreversible hacia la utilización de los cementos adicionados, más aún que de los cementos portland convencionales. Esta tendencia está asociada con la gran importancia que ha adquirido el concepto de durabilidad del concreto, y además con la creciente preocupación por los temas de protección ambiental, amén de los beneficios económicos implícitos en su uso; tal como se verá en lo que sigue, todos esos aspectos están directamente ligados al concepto del uso de las adiciones, concepto que ha sido retomado en los últimos tiempos, pero que era conocido y aplicado desde tiempos muy remotos.

### Antecedentes del uso de los cementos adicionados

Es inevitable recordar que hace más de 2000 años, los Romanos conocían sobre la actividad de la ceniza volcánica de Pozzoli, cuando ella se combinaba con la cal. De hecho esa mezcla era usada en sus construcciones de las cuales hoy subsisten ejemplos admirables, a pesar de su edad. Desde entonces, como ocurrió con Vitruve, arquitecto e ingeniero del siglo I d. de C., se intentó dar explicación a las reacciones por las cuales ciertas rocas se volvían cementantes.

En el siglo XX, la producción de cementos adicionados ha sido practicada por muchas décadas, particularmente en Europa, pero también en Japón, en la India, etc. El uso de la escoria granulada de altos hornos también tiene una historia de más de

\* Ingeniero Civil, Docente de Tiempo Completo, Director de Laboratorios de Ingeniería de la Universidad Militar "Nueva Granada".

cien años, desde cuando las industrias del hierro y el acero de Europa central y occidental operaron sus propias fábricas de cemento. En cuanto a los cementos con puzolanas naturales, su uso ha sido muy arraigado por varias décadas en Grecia e Italia prácticamente en todas las construcciones con concreto, y hoy su uso es generalizado en muchos países del mundo.

Colombia no ha sido ajena a este proceso tecnológico, y las fábricas del país han evolucionado en el conocimiento, explotación y uso de las adiciones desde hace unos 30 años, estando a tono con los avances logrados en países más desarrollados.

## Definición del cemento Portland convencional

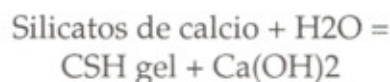
**E**l cemento portland, cuya invención data de la primera mitad del siglo XIX, es un producto con propiedades hidráulicas, resultante de la molienda conjunta de clinker y yeso; a su vez el clinker es el producto de la cocción hasta fusión incipiente de materiales calizos en muy alta proporción, combinados con sílice y alúminas (normalmente contenidos en las arcillas) y correctores como el mineral de hierro (que actúa como material fundente).

## Los productos de la hidratación del cemento Portland

El fraguado y endurecimiento del cemento están basados en la reacción de los com-

puestos anhidros del cemento con el agua. La mezcla de cemento y agua, llamada pasta, es el agente aglomerante del concreto. Cuando el cemento portland se pone en contacto con el agua, los componentes individuales del cemento forman compuestos hidratados.

La hidratación del cemento portland es predominantemente una hidrólisis de los componentes silíceos, produciendo un silicato hidratado de calcio de baja basicidad, en forma de gel, y con la liberación de una cal separada, en cristales de hidróxido de calcio,  $\text{Ca(OH)}_2$ , llamados portlandita.



Al completar la hidratación el cemento portland contiene cerca de un 60% de la fase CSH, y un 30% de hidróxido de calcio. Los silicatos hidratados serán después los responsables del desarrollo de las resistencias, mientras que el hidróxido de calcio no contribuye con ellas; dicho hidróxido de calcio, por su condición básica, eleva el pH de la pasta de cemento, alrededor de 12.5, y pasiva al acero contra la corrosión electroquímica, pero puede tener efectos negativos como, por ejemplo, el de ser 'lavado' en razón de su alta solubilidad en agua, incrementando la porosidad y bajando la resistencia. También, en ambientes contaminados el hidróxido de calcio puede reaccionar con el dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) formando carbonato de calcio ( $\text{CaCO}_3$ ), bajando el pH del concreto, eliminando la pasivación de las armaduras,

propiciando la corrosión, y finalmente causando la destrucción a la estructura, cuando se desarrolla el fenómeno llamado carbonización, que además depende de otra serie de factores contribuyentes.

Por su parte los aluminatos presentes en el cemento han de reaccionar con el yeso para permitir que el proceso de fraguado y endurecimiento ocurra dentro de unos tiempos adecuados para poder trabajar con la mezcla de concreto, y evitar un fraguado instantáneo, que sería causado por el aluminato tricálcico en caso de no existir la cantidad suficiente de yeso.

La hidratación, el fraguado y el endurecimiento del cemento, son entonces procesos de ocurrencia continua, y que están asociados a cambios en la composición de la materia, a cambios de energía, principalmente por liberación de calor, y a diversas velocidades de reacción en cada fase del proceso. Todas estas características son de importancia para poder fabricar y usar adecuadamente el cemento.

## Definición del cemento adicionado

Los cementos adicionados (o compuestos), son mezclas de clinker de cemento portland, sulfato de calcio (yeso) y adiciones minerales; estos cementos pueden ser producidos por molienda conjunta de esos componentes o por la mezcla de los componentes finamente molidos.

## Adiciones minerales más usadas

Las adiciones minerales de uso más frecuente pueden clasificarse en tres grupos dependiendo de su actividad y de su contribución al desarrollo de la resistencia del cemento.

- **Adiciones hidráulicas (ó con hidraulicidad latente):** son adiciones que poseen un potencial hidráulico natural, pero que requieren un activador para que puedan endurecer bajo agua; dicho activador puede ser: cal, clinker de cemento portland, yeso o un activador químico. La adición típica de este grupo es la **escoria**.
- **Adiciones puzolánicas:** son adiciones que sólo endurecen en presencia de clinker de cemento portland debido a que la reacción ocurre entre los silicatos activos del material puzolánico y el hidróxido de calcio ( $\text{Ca(OH)}_2$ ) liberado por el clinker en el transcurso de la hidratación. Los materiales más comunes pertenecientes a este grupo son: la **puzolana natural**, por lo general de origen volcánico, y la **ceniza volante** ('fly ash').
- **Adiciones inertes:** son adiciones que no poseen actividad hidráulica ni puzolánica, pero que contribuyen al desarrollo de otras propiedades del cemento, diferentes de la resistencia. Se usa comúnmente el **llenante calizo**, en especial cuando se trata de la producción de cementos para mampostería.

El proceso para la fabricación de los cementos adicionados debe ser diseñado de acuerdo con las propiedades químicas y físicas de las adiciones, y además con miras a las especificaciones del producto final, por lo cual puede ser diferente del proceso de fabricación de un cemento portland.

### Composición de las adiciones activas

Las adiciones hidráulicas al igual que las puzolánicas son llamadas adiciones activas; a pesar de que esos materiales pueden tener propiedades muy diferentes entre sí, todos ellos se conforman esencialmente de los mismos elementos químicos que el clinker portland, es decir, óxidos de sílice, de alúmina y de calcio:



Las diferencias, entre las diversas adiciones activas, radican en las distintas proporciones de estos elementos:

- Las escorias: son ricas en sus contenidos de sílice y calcio, y en la práctica su activación se realiza por combinación con clinker portland o con yeso. Dichas escorias habitualmente son granuladas y son un subproducto industrial de la producción de acero en los altos hornos; para que sean activas, su enfriamiento debe ocurrir muy rápidamente, al salir de horno.
- Las puzolanas: son ricas en sílice y poseen alúmina en menor grado, mientras que el óxido de calcio es bajo; ellas suministran el sílice o alúmina que reacciona con la portlandita resultante de la hidratación del cemento portland, ocasionando la 'fijación de la cal', y convirtiéndola en producto cementante.
- Hay puzolanas naturales, en forma de cenizas volcánicas, tufas, opalinas, pizarras "cherts", tierras diatomáceas, riolitas, etc.; también las hay artificiales a partir de materiales naturales activados, por ejemplo arcillas o rocas volcánicas activadas, metacaolines, pizarras calcinadas, etc.; y por último hay subproductos industriales activados con propiedades puzolánicas como las cenizas pulverizadas de carbones ligníticos o antracíticos, cenizas de fondo, residuos industriales ricos en sílice (humo de sílice), desechos calcinados, ladrillos o tejas de arcilla calcinados, etc.

### Razones para el uso de los cementos adicionados

La producción de los cementos adicionados se ha venido incrementando de modo importante en todo el mundo por múltiples razones, entre otras las siguientes:

- Mejoramiento de las propiedades del cemento y de su calidad.

- Posibilidad de producir cementos especiales para aplicaciones específicas.
- Conservación de la energía térmica y de los recursos minerales
- Necesidad de disminuir emisiones de CO<sub>2</sub> y de calor, a la atmósfera
- Posibilidad de usar subproductos de otras industrias
- Incremento de la productividad en la industria cementera, por:
  - Reducción de costos de producción
  - Confiabilidad al seleccionar sistemas de molienda
  - Menor riesgo de inversión.

## Mejoramiento de las propiedades del cemento

Se señalan enseguida una serie de ventajas asociadas con el uso de los cementos adicionados en la fabricación de concretos o morteros:

- **Menor calor de hidratación**, toda vez que son los componentes del clinker portland los mayores generadores de calor (C3A y C3S); en este sentido son los cementos más indicados para usarse en los concretos masivos.
- **Mayor reserva de resistencias** que en el cemento portland; resistencias que son desarrolladas a edades tardías, 28 o más días, siempre y cuando se realice el curado adecuado; se consiguen altas o muy altas resistencias finales, lo cual compensa la eventual 'desventaja', por su desarrollo lento en las edades iniciales.

- **Mayor durabilidad**, debida a la formación de una matriz de cemento más densa, que evita además el desarrollo de la carbonatación.
- **Mayor densidad de la matriz cementosa**, ayudando a la **menor permeabilidad**, y en consecuencia disminuyendo la posibilidad de que penetre cualquier agente agresor al concreto; ello es consecuencia de la alta finura de las partículas de la adición, que taponan poros y vacíos.
- **Alta resistencia a los sulfatos y al agua de mar (sales)**: en razón de la mayor presencia de aluminato tricálcico (C3A) que da origen a la etringita, sustancia susceptible de ser atacada por los sulfatos u otras sales, formando compuestos expansivos.
- **Menor propensión a la reacción alkali-agregado**, igualmente por la menor presencia del clinker portland en el cemento.
- **Mejora de la manejabilidad de las mezclas**: debido a la mayor presencia de partículas finas y especialmente válido para cementos con cenizas.
- **Reducción de la debilidad causada por la presencia de cal libre (portlandita) y óxido de magnesio (MgO)**: por el proceso de fijación de la cal, se evita su 'lavado', y además tal proceso de fijación contribuye en el efecto cementante; de otro lado el MgO del clinker portland puede tener efectos nocivos por cambios de volúmen.

## Clasificación de los cementos

**E**n el caso de las normas ASTM, ellas han clasificado los cementos bajo los siguientes criterios, los cuales con algunas modificaciones obedecen a la tendencia de las normas europeas:

- **Cementos tipo I-P:** cementos portland-pozolánicos, con contenido de puzolanas entre el 15 y el 40%.
- **Cementos tipo P:** cementos puzolánicos (sin la denominación portland), cuando el contenido de las puzolanas es mayor al 40%.
- **Cementos tipo I-S:** cementos portland-siderúrgicos, cuando el contenido de la escoria es entre el 25 y el 60%.
- **Cementos tipo S:** cementos siderúrgicos (sin la denominación portland), cuyos contenidos de escorias son mayores del 60% y además contienen cal.
- **Cementos supersulfatados:** son cementos que contienen más del 75% de adición, compuesta por escorias y yeso.

En términos generales se podrían agrupar los cementos más comunes dentro de rangos parecidos a los indicados, dependiendo de la normativa de cada país. En el caso colombiano debe tenerse presente que los cementos continúan denominándose con tipos del 1 al 5, de acuerdo con la NTC-30, pero tal como se ha indicado antes, a pesar de conservar dicha nomenclatura, son en su mayoría adicionados; lo normal es que los llamados tipo 1 incluyan adiciones puzolánicas o de escorias, y aún llenantes

inertes o combinación de ellos, en porcentajes que pueden sumar hasta un 30 o 40% de su volumen total. A efecto de conseguir el desempeño indicado por las normas vigentes, en lo relativo al desarrollo de resistencias, en cuanto a requisitos químicos, y además por razones de competitividad en el mercado, los porcentajes de las adiciones varían entre tipos y marcas de cementos, por lo cual es razonable que, para tener certeza del tipo de cemento adicionado con el cual se está trabajando en cada caso, se consulte al fabricante respectivo. También debe ponerse de presente que se fabrican cementos portland convencionales, y sin adiciones, para cuando las circunstancias requieran su uso.

## Redefinición general de los cementos

Para efectos prácticos puede establecerse el siguiente resumen de los probables componentes de cualquier cemento hoy día, siendo claro que se pueden dar múltiples combinaciones, de acuerdo con el propósito de uso del producto final:

- **Constituyentes principales:** Clinker/regulador de fraguado.
- **Constituyentes secundarios:** Adiciones: hidráulicas/puzolánicas/inertes.
- **Aditivos químicos:** Ayudantes de molienda/mejoradores de calidad.

## Conclusión

Gracias a que se ha conseguido un alto grado de conocimiento de los procesos químicos y físicos que se desarrollan al interior de las mezclas, prácticamente todos los cementos elaborados hoy día, están involucrando el uso de los constituyentes secundarios (y algunas veces de los aditivos químicos); constituyentes que han pasado a convertirse en realidad cotidiana en la tecnología del cemento y por ende en la tecnología del concreto. A este respecto, la industria cementera nacional ha venido aplicando las últimas tecnologías disponibles en el mundo de modo que la gran mayoría de los cementos nacionales son adicionados, bien con puzolanas, con escorias, con llenantes calizos, etc. Por su parte las industrias concreteras, enfrentando el reto

de la masificación del concreto premezclado, tienen ante sí la tarea complementaria de utilizar adiciones minerales en sus mezclas, las cuales son de uso menos frecuente en Colombia pero, a la luz de las exigencias cada vez mayores de los proyectos constructivos, serán una necesidad en el futuro inmediato.

## Bibliografía

1. HOLDERBANK, Management and Consulting Ltd., *Cement Course-Materials Technology I*. Holderbank, Switzerland, 1994.
2. SANDINO PARDO, Alejandro. *Materiales para Estructuras*. Escuela Colombiana de Ingeniería.