

# Materiales alternativos al cemento Pórtland

**José Iván Escalante García**

El concreto es el material que ha tenido el mayor uso en la construcción de edificios e infraestructura en la historia de la civilización. En particular, la demanda de cemento Pórtland se incrementa conforme aumenta la población mundial. Sin embargo, la industria asociada a la generación de este tipo de cemento involucra altos requerimientos energéticos y una fuerte emisión de contaminantes. En la actualidad no existe un material alternativo que pueda ser utilizado como material de bajo costo en construcciones de gran volumen. En el presente artículo se analiza el uso de algunos materiales alternativos que pueden resolver algunos de estos problemas y que además pueden mejorar las propiedades tecnológicas de construcción del cemento Pórtland.

Desde tiempos inmemoriales el hombre ha edificado construcciones para resguardo propio o con propósitos sociales o religiosos. Los egipcios empleaban lodo del río Nilo para sus construcciones; no obstante, las bajas temperaturas que podían lograr sólo les permitían usar materiales de poco valor cementoso sin resistencia a la humedad. Los romanos descubrieron la tecnología de los materiales llamados “puzolánicos”: para producir sus cementos mezclaban cal con cenizas que provenían de un lugar llamado Pozzouli. Muchas de las edificaciones de los romanos se mantienen todavía en pie, lo que refleja el alto nivel de su tecnología aun para nuestros días. En la edad media se perdió tanto la inercia del desarrollo como mucho de los conocimientos de los romanos y no fue sino hasta el siglo XIX que se trabajó intensamente

---

*El Dr. José Iván Escalante García es investigador titular de la Unidad Saltillo del Cinvestav. Dirección electrónica: [jjeg@saltillo.cinvestav.mx](mailto:jjeg@saltillo.cinvestav.mx)*

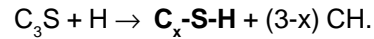


en muchas investigaciones (predominantemente empíricas) en la búsqueda de nuevos materiales para construcción. La patente de lo que hoy conocemos como cemento Pórtland se otorgó a J. Aspdin en 1824 en Inglaterra; sin embargo, la historia involucra otros nombres con tiempos y hechos que apuntan a que Aspdin no fue el único abocado al desarrollo de este tipo de cemento.

## ¿En que consiste la explotación del cemento?

El cemento Pórtland es el ingrediente ligante o adhesivo del concreto. Está compuesto principalmente por óxidos de calcio, silicio, aluminio y hierro hasta en un 95%. Las fases presentes comprenden principalmente silicatos de calcio ( $3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$  y  $2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ ) y en menor proporción aluminato de calcio ( $3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$ ) y ferroaluminato de calcio ( $4\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$ ). Las propiedades de

endurecimiento del cemento se logran mediante la mezcla de éste con el agua. Esto resulta en la formación de productos de hidratación que poseen cualidades ligantes y baja solubilidad en agua (las estructuras de cemento pueden subsistir aun bajo el agua). La reacción química principal se da con el silicato tricálcico y el agua, expresada en la fórmula condensada ( $\text{C} = \text{CaO}$ ,  $\text{S} = \text{SiO}_2$ ,  $\text{H} = \text{H}_2\text{O}$ )



El gel C-S-H (sin indicar composición específica) es el responsable de las propiedades mecánicas conocidas del cemento; el CH [ $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ] es un subproducto de poco valor cementoso y puede ser el punto de origen de algunas reacciones degenerativas del cemento Pórtland hidratado.

El cemento Pórtland tiene características peculiares con respecto a otros materiales de construcción. Se requieren conocimientos en dos líneas principales para su explotación adecuada. En primer lugar sobre los procesos de fabricación, que involucran materias primas (selección y formulación), procesamiento térmico (calentamiento y enfriamiento) y molienda; sólo un cemento bien procesado tiene buen potencial de desempeño. En segundo lugar vienen los problemas involucrados en la utilización del cemento, donde se requiere tener conocimientos sobre la química de hidratación, interacción con agregados y con fibras, reacciones nocivas, resistencia al ataque químico, etc. La preparación de un buen concreto puede ser cuestión de buena suerte, pero en general la obtención de buenas propiedades y buena durabilidad (por muchos años), lejos de ser trivial está ligada al dominio del proceso.

## Cemento y contaminación

Durante los últimos 60 años el estudio de la fabricación y utilización del cemento Pórtland se ha atendido con enfoques cada vez menos empíricos y más científicos. A raíz de esto, los procesos de producción se han mejorado; uno de los más notables ha sido el cambio del proceso que manejaba la materia prima en húmedo (barbotinas) al manejo en seco; como resultado se obtuvieron ahorros de energía de más del 40%, sin mencionar la reducción de emisión de contaminantes y del tamaño de los hornos. La producción de cemento es un proceso de alta demanda energética de combustibles ( $\approx 4,000$  kJ/kg cemento, 25%

de pérdidas) y con alta emisión de contaminantes (0.85-1 kg CO<sub>2</sub>/kg cemento) por descarbonatación de materia prima y uso de combustibles. Las restricciones ambientales impuestas a las cementeras son cada vez más estrictas<sup>1</sup>, lo que deberá llevar a la optimización de procesos o a la búsqueda de alternativas para la resolución de los diversos problemas y necesidades actuales.

Desde la perspectiva internacional, existe el constante crecimiento de la población, que a su vez demanda infraestructura de vivienda y social en los lugares de asentamiento. Para satisfacer la creciente demanda de cemento es necesario buscar esquemas alternativos de apoyo, de otra suerte los costos económicos, energéticos y ecológicos serían muy altos. La producción mundial de cemento es de aproximadamente 1500 millones de toneladas, con la consecuente emisión de casi la misma cantidad de toneladas de CO<sub>2</sub>. Desde la perspectiva nacional, México produce suficiente cemento para el consumo interno. De hecho la principal compañía nacional (*Cemex*) es el tercer productor mundial (incluyendo todas sus plantas en varios países) y es también el primer exportador mundial. Sin embargo, existe la necesidad de crear materiales de construcción de menor costo; por otro lado, dada la diversidad y lo extremo del clima en algunas regiones, se requieren materiales con propiedades diversas, por ejemplo térmicamente aislantes.

## Materiales alternativos

Los materiales alternativos tienen cabida como materias primas o materiales cementosos de reemplazo parcial o total del cemento Portland. Parte de la generación de CO<sub>2</sub> viene de des-carbonatación del CaCO<sub>3</sub> que representa alrededor del 80% de la materia prima (0.3Kg CO<sub>2</sub>/Kg cemento). El uso de fuentes de CaO diferentes puede aliviar parcialmente tal situación. Por otro lado, es posible usar cenizas y escorias como materias primas; sin embargo, en este artículo nos interesará el carácter adhesivo de los materiales alternativos. Se puede definir un material adhesivo alternativo como aquel que tenga propiedades cementosas *per se* o latentes (que requieren ser potenciadas externamente), esto es, que pueda emplearse como sustituto parcial o total del cemento Portland. A continuación se revisarán algunos detalles respecto a su composición química, origen, forma de uso y posibles ventajas.

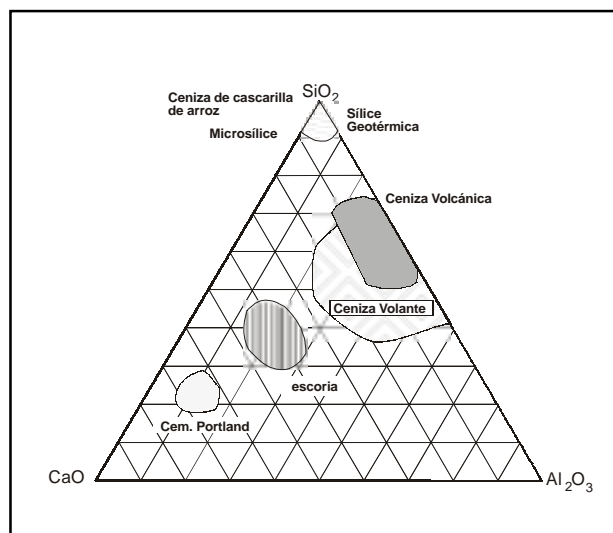


Figura 1. Composición química aproximada de los materiales alternativos empleados en construcción.

¿Cómo se pueden clasificar los materiales alternativos? Los hay sintéticos o naturales, pero una clasificación más adecuada involucra su composición química y por ende el tipo de productos de hidratación que forman. Se puede decir que existen materiales puzolánicos e hidráulicos. La figura 1 presenta los campos de composición química aproximada de los materiales alternativos en un diagrama de composición SiO<sub>2</sub>-CaO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.

## Materiales puzolánicos

Las puzolanas son aquellos materiales de composición rica en SiO<sub>2</sub>, similares a las cenizas volcánicas utilizadas por los romanos. Ejemplos de éstos son la ceniza volcánica (empleada en nuestro país), la sílice condensada, algunos caolines, ceniza de cascarilla de arroz y desechos geotermales. La tabla 1 presenta un resumen de algunas de sus características. Todos estos materiales pueden ser empleados como reemplazo parcial del cemento Portland y algunos como reemplazo total. Los materiales puzolánicos son así llamados por la interacción química con los productos de hidratación del cemento, principalmente [Ca(OH)<sub>2</sub>]; la reacción que describe tal proceso es llamada "reacción puzolánica"



Tabla 1. Características generales de los materiales puzolánicos.

	Procesamiento adicional requerido	Características	Origen
Sílice condensada	Aglomeración para su manejo	Partículas esféricas de tamaño < 1µm. Alta área superficial	Vapores condensados de la producción de carburo de silicio
Ceniza volcánica	Molienda	Reactividad variable, partículas de forma irregular	Emisiones volcánicas
Ceniza de cascarilla de arroz	Calcinación, se aprovecha el calor generado como combustible	Morfología irregular, tamaño muy fino, alta área superficial	Producción de grano de arroz
Sílice geotérmica	Lavado	Morfología irregular, tamaño submicrónico, alta área superficial	Incrustaciones en líneas de vapor geotermal (generación de electricidad).
Caolines	Tratamiento térmico hasta 800°C	Tamaño de partícula fina, alta área superficial	Mineral
Ceniza volante		Partículas esféricas de tamaño variable similar o menor a las del cemento Portland	Generadas por la combustión de carbón para la generación de electricidad

La generación de más C-S-H y la eliminación del CH producido por el cemento explica el incremento en las propiedades mecánicas de cementos reemplazados. Los antiguos cementos romanos mezclaban simplemente cal  $[Ca(OH)_2]$  con material volcánico y obtenían C-S-H como se plantea en la reacción anterior. Además de la composición química de las puzolanas, sus características físicas, como tamaño de partícula y morfología, influyen también considerablemente en las propiedades del cemento substituido.

Los niveles de reemplazo de los materiales puzolánicos por cemento pueden llegar hasta un 30%. Algunos de estos materiales son empleados en nuestro país, mas no se explota todo su potencial y las cantidades generadas no se conocen con total certidumbre; sin embargo se ha citado una producción mundial de  $180 \times 10^6$  toneladas de ceniza volante<sup>2</sup>.

## Materiales hidráulicos

Estos materiales son de los más comúnmente empleados en la escoria de alto horno granulada; sin embargo, es posible emplear escorias de otros procesos como los de aceración, producción de fósforo, cobre, zinc y plomo<sup>3,4</sup>. Pueden considerarse como materiales sintéticos dado que son subproductos. En términos generales requieren de molienda antes de ser empleados como reemplazo del cemento Pórtland.

Para el caso de escoria de alto horno (producción de hierro), los niveles de substitución por cemento<sup>5</sup> son de 10 a 90% y varían según las normas locales. Al igual que las puzolanas, interacciona con los productos de hidratación del cemento pero la reacción es diferente ya que los materiales hidráulicos, como la escoria de alto horno, contienen calcio en su composición química. La reacción que produce C-S-H y elimina el CH generado por el cemento sería (sin balancear):

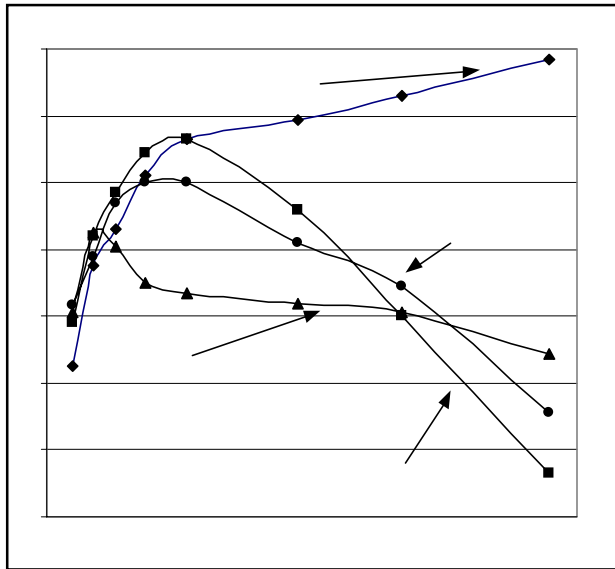


Figura 2. Evolución de la concentración de  $\text{Ca(OH)}_2$  durante la hidratación de un cemento Portland puro y cemento sustituido con escoria y cenizas volcánica y volante.

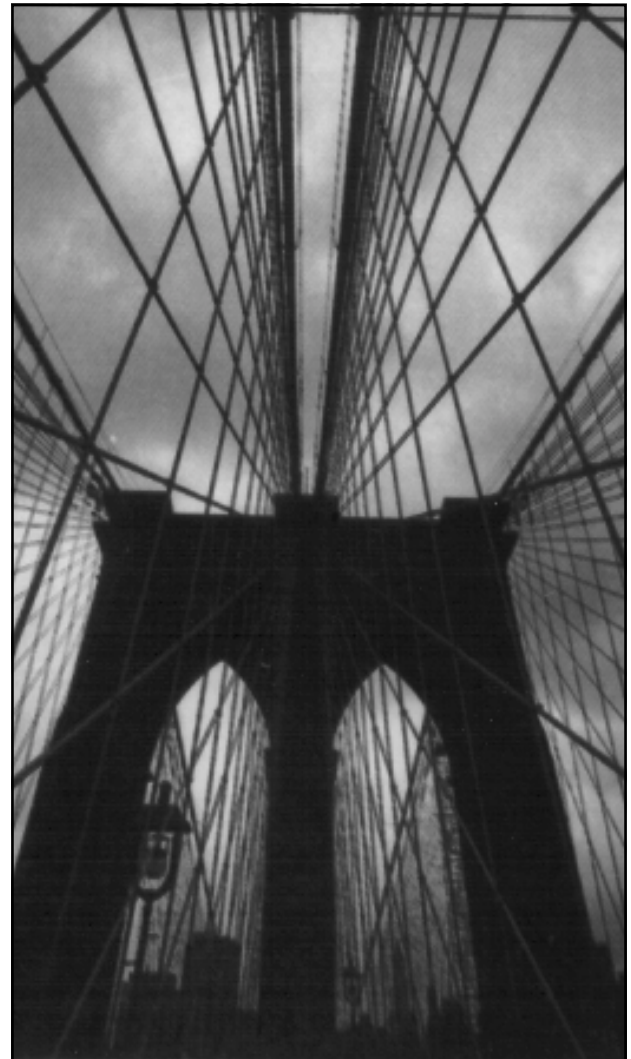


La figura 2 muestra la producción de  $\text{Ca(OH)}_2$  generado durante las reacciones de hidratación del cemento Portland vs tiempo. El resto de las líneas representa la concentración de  $\text{Ca(OH)}_2$  para cementos Portland sustituidos con escoria de alto horno, ceniza volante y ceniza volcánica (mexicanas). Puede notarse que las curvas de concentración de  $\text{Ca(OH)}_2$  para el cemento sustituido inicialmente suben y eventualmente tienden a la baja al dar inicio la reacción de consumo del  $\text{Ca(OH)}_2$ .

Para los materiales de reemplazo del cemento Portland generalmente se requiere un estado estructural amorfo (como los vidrios), esto es, con alta energía interna y por ende inestables termodinámicamente y muy reactivos químicamente<sup>6</sup>. El mecanismo básico es el ataque alcalino de los OH sobre la estructura vítrea para disolverla, con la consecuente combinación con el  $\text{Ca(OH)}_2$  y precipitación de productos cementosos tipo C-S-H.

## Disponibilidad de materiales

Se estima que la producción nacional de escoria es de aproximadamente  $1.4 \times 10^6$  toneladas anuales entre las



dos principales acereras nacionales (EUA comercializa  $10^6$  e India  $7 \times 10^6$  toneladas anualmente<sup>7</sup>), esto equivale a la producción anual de una planta cementera. No se dispone de datos confiables de la generación de ceniza volante adecuada para aplicarse en cementos; sin embargo, los planes de expansión de infraestructura de la Comisión Federal de Electricidad sugieren que habrá generación de cantidades considerables de este material. La cantidad de ceniza volcánica empleada es una función de la disponibilidad. Al respecto de la sílice geotérmica, algunos estudios preliminares han mostrado su carácter puzolánico<sup>8</sup>; actualmente está en desarrollo un extenso estudio sobre la viabilidad de uso en cemento Portland<sup>9</sup>. La sílice geotérmica no se explota sistemáticamente y se estima un acumulado a la fecha de al menos 500,000 toneladas.

Tabla 2. Cementos substituidos a base de cemento Pórtland.

Ligante básico	Materiales de reemplazo	Resistencia mecánica
	Ceniza volante	√
	Ceniza volcánica	√
Cemento Portland	Escoria de alto horno	√
	Silice condensada	√√√
	Caolines	√
	Silice geotérmica	√√

Existen otras fuentes de desechos. Por ejemplo, el yeso puede provenir de la industria cerámica tradicional (producción de muebles para baños, etc.) o como subproducto de fabricación de ácido fluorhídrico. Otros materiales de desecho que pueden ser empleados son las escorias de otras industrias metalúrgicas<sup>10</sup>, así como lodos de drenaje<sup>11</sup>, lodos de producción de aluminio<sup>12</sup> o residuos de incineradores municipales<sup>13</sup>. Por supuesto, es necesaria una base de datos o una bolsa de desechos industriales que permita la reutilización y el aprovechamiento de desechos de este tipo.

## Esquemas de materiales cementosos y sus ventajas

Los esquemas de materiales adhesivos existentes varían en función de su composición y sus propiedades; una posible clasificación considera sistemas básicos o substituidos. Los materiales cementosos son nobles y son muchos los materiales que pueden incorporarse. Un ejemplo de esto es la inmovilización de desechos peligrosos en matrices de cemento Pórtland o hasta la incorporación de llantas recicladas que mejoran la impermeabilidad del sistema<sup>14</sup>. El cemento Pórtland (cemento base) puede reemplazarse por los materiales indicados en la tabla 2. En todos los casos se obtienen mejores propiedades de resistencia y de durabilidad. Los materiales como la silice condensada y la escoria inducen propiedades de alta resistencia mecánica (120Mpa)<sup>15</sup>.

Tabla 3. Cementos generados con desechos químicamente activados.

Ligante básico	Características	Observaciones
Escoria de alto horno activada por álcalis	Excelentes propiedades mecánicas, 0% cemento Pórtland	Posiblemente pueda incorporar otros desechos, ahorros de hasta 40% en costos
Ceniza volante activada por álcalis	Propiedades mecánicas aceptables, 0% cemento Pórtland <sup>18</sup>	
Escoria de producción de fósforo y cobre <sup>19</sup>	Buenas propiedades mecánicas, 0% cemento Pórtland	
Cementos de sulfoaluminatos de calcio <sup>20</sup>	Relativamente reciente, en desarrollo con excelentes propiedades	Menor demanda energética que el cemento Pórtland
Cementos supersulfatados	5% cemento Pórtland, 80-85% escoria, 10-15% yeso	No soportan curado a alta temperatura

Otro esquema es el de los desechos químicamente activados, por ejemplo las escorias de alto horno activadas. En este caso no se usa cemento Portland y las reacciones de hidratación de la escoria se activan con agentes alcalinos como hidróxido de sodio, silicato de sodio y carbonato de sodio. Las propiedades mecánicas resultantes dependen del tipo de agente activante<sup>16</sup>: generalmente las mejores propiedades se obtienen con silicato de sodio y las más pobres con hidróxido de sodio.

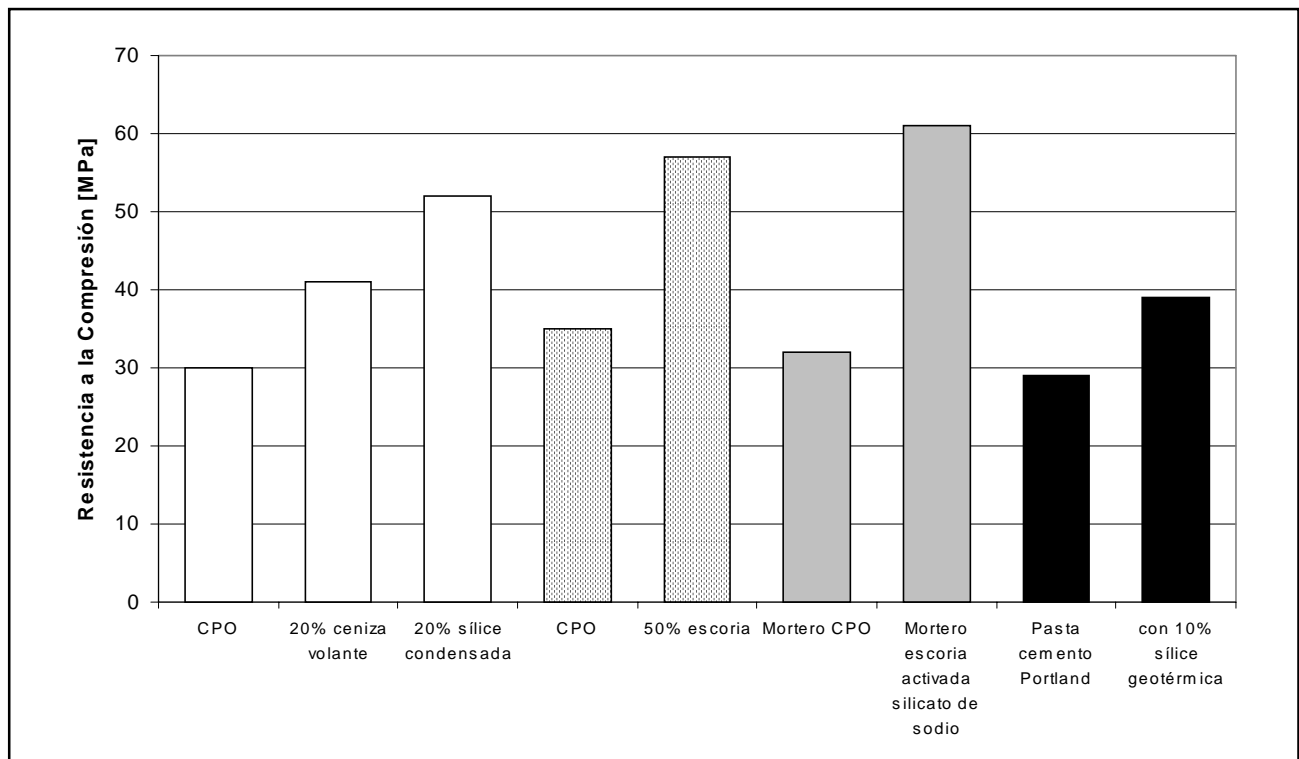


Figura 3. Resistencia a la compresión de diversos sistemas cementosos<sup>4,8,22</sup>.

Algunos estudios sobre la adición de desecho de sílice geotérmica al sistema de escoria con NaOH indican incrementos significativos de las propiedades mecánicas<sup>17</sup>. Los productos de reacción generados son similares al C-S-H del cemento Portland. La posibilidad de combinar algunos desechos con la escoria activada con agentes de bajo costo ha dado resultados promisorios. Las cenizas volantes activadas están también bajo estudio con buenas propiedades mecánicas. La tabla 3 presenta algunos esquemas con pequeñas fracciones o nada de cemento Portland.

Otro esquema alternativo con gran potencial y que puede presentar ligereza, buen acabado y rápido fraguado es el que involucra yeso+ cemento+ puzolana. El costo de estos materiales puede implicar ahorros de hasta 70%<sup>4</sup>; sin embargo, la durabilidad de estos sistemas no está bien definida y continúa bajo estudio<sup>21</sup>. Las posibilidades de igualar estos esquemas con materiales sólo de desecho o subproductos son interesantes y se están desarrollando en la Unidad Saltillo del Cinvestav. Asimismo, se llevan a cabo estudios sobre el sistema cemento Portland + escoria activada por álcalis.

## Cementos substituidos y "cementos sin cemento Portland"

Las propiedades primordiales de interés para los usuarios de materiales de construcción son la resistencia mecánica y la durabilidad. Algunas ventajas que pueden explotarse del empleo de materiales cementosos constituidos parcial o totalmente por desechos o subproductos son los siguientes (con respecto de los materiales basados en cemento Portland):

- Propiedades mecánicas similares o en muchos casos superiores.
- Durabilidad mejorada a ambientes químicos agresivos (p. ej., agua de mar, pisos en plantas químicas).
- Extensión de la capacidad de producción del cemento cuando se usan como reemplazo (10-90%) sin requerir de procesamiento térmico adicional (ahorro de energía y menor contaminación).



- Reducción de la acumulación de desechos en tiraderos o rellenos.

Comparado con las ventajas obtenidas, las desventajas son de poco peso, pero deben tenerse en consideración en algunos aspectos tecnológicos. En el uso de escorias de alto horno inicialmente la resistencia mecánica es menor a los productos elaborados con cemento Pórtland y las ventajas se obtienen en el largo plazo (después de 28 días): mejor durabilidad, resistencia al ataque químico, propiedades mecánicas superiores. Este problema está siendo analizado en la Unidad Saltillo del Cinvestav. Las escorias activadas presentan fluidez y tiempos de fraguado menores que el cemento Pórtland, lo que puede representar problemas para concretos premezclados y su colado. El manejo de los agentes activantes alcalinos puede ser un factor de riesgo si se hace sin control.

## Perspectivas

El nivel de uso de cada desecho o combinación de desechos estará regido por factores como la disponibilidad y los

efectos generados sobre el cemento. La sílice condensada puede usarse como aditivo (en lugar de reemplazo) en un 10% y mejora significativamente las propiedades mecánicas del concreto; por otro lado, las escorias se pueden emplear en reemplazo hasta de un 50% con ahorro de cemento. Los niveles de aplicación estarán regidos por las normas locales o por los requerimientos específicos de un proyecto de construcción. Por ejemplo, en los EUA la adición de materiales de desecho al cemento para comercializar no está permitida por sus propias normas; sin embargo, éstas permiten agregar, por ejemplo, ceniza volante al concreto en el sitio de la construcción. En México se permite agregar alrededor de un 5% del cemento como caliza, escoria, ceniza volante, etc.

Las propuestas de materiales adhesivos nuevos o de combinaciones nuevas siempre vienen acompañadas de ciertas dudas: ¿será durable el material?, ¿soportará las condiciones a las que se expondrá?, ¿mantendrá sus propiedades mecánicas y estéticas? Por esta razón la introducción de nuevos materiales no es trivial, especialmente cuando hay vidas humanas que dependen de la solidez y durabilidad de una estructura o construcción. Lo cierto es que existe la necesidad de alternativas de reemplazo de cemento. Si sólo en México se reemplazara



el cemento por 5% de escoria o ceniza volante, se estaría hablando de una reducción de 1.4 millones de toneladas de CO<sub>2</sub> liberadas al medio ambiente; extrapolada a escala mundial, la cifra sería de 75 millones de toneladas de CO<sub>2</sub>.

Mucho del conocimiento sobre estos procesos se genera en países desarrollados y es necesario reducir la dependencia del conocimiento y la tecnología del extranjero. La formación de recursos humanos calificados ayudará a formar un equipo que genere conocimientos y permita que estemos preparados con opciones adecuadas antes de que las necesidades nos alcancen y nos tomen desprevenidos. En opinión de algunos investigadores<sup>23</sup>, la tecnología de materiales de alto volumen y tonelaje (cemento, concreto, acero, aleaciones ligeras, composites) está alcanzando una madurez tecnológica que avanza ahora lentamente. Esto es aceptable sólo de manera parcial: muchos paradigmas deberán cambiar en vista de las necesidades que generará la creciente población

mundial, las restricciones ambientales cada vez más exigentes y el encarecimiento y la escasez de energéticos.

Por supuesto, la tendencia internacional deberá orientarse hacia la generación de bienestar para las generaciones actuales pero sin comprometer el bienestar de las generaciones venideras hacia una política de desarrollo sustentable. Desde esta perspectiva, los materiales alternativos de construcción, así como el reciclaje y la reutilización de muchos otros materiales, representan una de las vías de solución; es necesario generar políticas que orienten esfuerzos en esta dirección.

## Conclusión

El concreto es un material estratégico: en los EUA las edificaciones y estructuras construidas representan cerca del 70% de la riqueza del país<sup>24</sup>. Es importante generar una cultura que cambie la imagen del concreto como un material de bajo costo y simple de elaborar por lo que realmente es: un componente de alto desempeño y de infraestructura básica. La incorporación de materiales de desecho puede permitir extender la capacidad de producción de materiales cementosos que pueden ofrecer mejores propiedades que el cemento Pórtland y a un menor costo; coadyuvan en la reducción de emisión de contaminantes y requerimientos energéticos; reducen la acumulación de desechos en tiraderos industriales o rellenos sanitarios, etc. Las ventajas potenciales están allí; se requiere invertir tiempo, dinero y recursos humanos para llevar a nuestro país a un mejor nivel de explotación de sus recursos con una orientación de respeto al medio ambiente.



## Notas

1. J. Davidovits, Emerging technologies symposium on cement and concretes in the global environment (Portland Cement Association, 1993).
2. R. Sersale, *Proc 7<sup>th</sup> Int Cong. on the Chemistry of Cement*. Vol. 1, IV-1 (Paris, 1980).
3. M. Tufekci *et al.*, *Cement and Concrete Res.* **27**, 1713 (1997).

4. C.D. Lawrence, en *Leas's chemistry of cement and concrete* (Arnold, 1997).
5. J. Daube, R. Bakker, *Blended cement ASTM STP 897*, G. Frohnsdorff, ed. (ASTM, Philadelphia, 1986) p. 5.
6. J.I. Escalante *et al.*, *Cement and Concrete Res.* (2001).
7. E.J. Hogan, J.H. Rose, 2<sup>nd</sup> Int. Conf., Ed. V. M. Malhorta (Am. Concrete Institute, Detroit, 1986) p. 1551.
8. J.I. Escalante *et al.*, *Cement and Concrete Res.* **29**, 623 (1999).
9. L.Y. Gómez, en preparación.
10. E. Douglas, P.R. Mainwaring, *Am. Ceramic Soc. Bull.* **64**, 700 (1985); C. Atzeni, L. Massidda, U. Sanna, *Cement and Concrete Res.* **26**, 1381 (1996).
11. H. Uchikawa, H. Obana, *World Cement* **26**, 33 (1995).
12. C. Shi, P.E. GrattanBelew, J.A. Stegemann, *Constuction and Building Materials* **13**, 279 (1999).
13. K.S. Wang, K.L. Lin, Z.Q. Huang, *Cement and Concrete Res.* **31**, 97 (2001).
14. N. Segre, I. Joeques, *Cement and Concrete Res.* **30**, 1421 (2000).
15. H. Uchikawa, *Ceramics Transactions* **40**, 143 (1994).
16. J.I. Escalante *et al.*, XLI Congreso de Cerámica y Vidrio, Benalmédena España (2001).
17. V.M. Palacios Villanueva, tesis de maestría en ingeniería cerámica, Cinvestav, Unidad Saltillo (2001).
18. K. Ikeda, *Cement and Concrete Res.* **27**, 657 (1997).
19. C. Shi, Ji. Qian, *Resources, Conservation and Recycling* **29**, 195 (2000).
20. J.H. Sharp, C.D. Lawrence, R. Yang, *Advances in Cement Research* **11**, 3 (1999).
21. A. Bentur, A.K. Kovler, *Advances in Cement Research* **25**, 752 (1995).
22. G. Frigione, *Blended cement ASTM STP 897*, G. Frohnsdorff, ed. (ASTM, Filadelfia, 1986) p. 5.
23. M.F. Ashby, *Progress in Materials Science* **46**, 191 (2001).
24. J.P. Skalny, *Materials Science of Concrete 1* (American Ceramic Society, 1997).