



## Actualización de los reglamentos estructurales y sísmicos

**Anúnciese**

### Resumen:

Para contribuir a la difusión de los avances en materia de regulación de la construcción estructural y sísmica, el autor de este artículo reseña los desarrollos más recientes que han tenido los reglamentos del ACI 318-99, el Reglamento Internacional de Construcción y las Disposiciones del NEHRP 2000.

En el *PCI Journal* de noviembre-diciembre de 1998 se publicó un resumen de las actividades recientes relacionadas con el desarrollo de la primera edición del Reglamento Internacional de Construcción (programada para publicarse en la primavera del año 2000), la edición 1999 de los *Requisitos del Reglamento de Construcción para Concreto Estructural* del American Concrete Institute (ACI 318-99) y la edición 2000 de las *Disposiciones Recomendadas del NEHRP* (siglas del National Earthquake Hazards Reduction Program –Programa Nacional de Reducción de Riesgos por Sismos) para las Regulaciones Sísmicas de Nuevos Edificios. Este artículo proporciona una breve actualización de ese resumen.

### ACI 38-99

Todos los cambios aprobados que se hicieron al ACI 318-95, y que formarán parte del ACI 318-99, se publicaron en el número de noviembre de 1998 de *Concrete International*. El periodo de discusión de 90 días se cerró el 1 de febrero de 1999. Todas las discusiones requieren una respuesta por oparte del ACI 318. Como parte de esa respuestya, todavía pueden hacerse modificaciones a los cambios publicados.

Ya están en marcha los trabajos para la edición 2002 del ACI 318. Se están preparando varios cambios para llevarse a votación dentro de los subcomités relevantes, previos a la convención del ACI en Chicago, Illinois, que tuvo lugar en marzo de 1999.

### Sujeciones al concreto

Alguna vez se esperó que un cambio propuesto al ACI 318, designado como CB 30, fuera un nuevo capítulo del ACI 318, sobre sujeciones al concreto. El cambio propuesto no había podido ser aprobado para su inclusión en el ACI 318-95, y se

revisó después de la publicación de esa edición. El cambio fue finalmente aprobado por el Comité 318 en la reunión de verano en Denver Colorado, en junio de 1998.

El Comité decidió también en ese momento que las disposiciones propuestas serían un nuevo Apéndice D al Estándar 318 del ACI, en lugar de ser un nuevo capítulo. El CB 30 incluye consideraciones de sujeciones post-instaladas, para las cuales recurre al ACI 355.1, Especificaciones Provisionales para el Comportamiento de Sujeciones Post-instaladas en el Concreto.

El ACI 355.1 fue revisado y aprobado por el Comité de Actividades Técnicas (TAC, por sus siglas en inglés: Technical Activities Committee) del ACI en su reunión de otoño de 1998 en Los Ángeles, California, sujeto a la respuesta satisfactoria que tuvieran los comentarios principales del TAC. El Comité 355 votó el documento 355.1 en su totalidad (con las respuestas a los comentarios del TAC incluidas) en noviembre, y se reunió a mediados de diciembre para resolver los comentarios negativos.

El Comité no pudo resolver todos los comentarios negativos sobresalientes en su reunión. Así pues, el documento 355.1 permanece sin la aprobación del TAC. Durante su reunión, el Comité 355 propuso cambios sustantivos al documento revisado del TAC, no en respuesta a los comentarios del TAC. Si el Comité decide examinar cuidadosamente esta opción, el documento tendrá que ser remitido nuevamente al TAC para otra revisión.

Después de la reunión del ACI 355, se deliberó, dentro del ACI, acerca de modificar el Apéndice D para considerar solamente los anclajes colados en obra, con la exclusión total de los anclajes taladrados. Se preparó una versión modificada del CB 30. Se esperaba que el Apéndice D, sin ninguna referencia al ACI 355.1, pudiera ser sometido nuevamente a votación, y aprobado por el ACI 318 a corto plazo. La aprobación del TAC era posible, al menos teóricamente, mediante votación por cartas. Sin embargo, esta medida no pudo lograr el suficiente apoyo dentro del ACI. En este punto, es una certeza virtual que el ACI 318-99 será publicado sin un Apéndice D, sin ninguna guía para el tema vital de las sujeciones al concreto.



## Código Internacional de Construcción

El plazo para la presentación de los cambios al borrador final del Reglamento Internacional de Construcción (IBC, por sus siglas en inglés: International Building Code) estaba fijado para el 12 de octubre de 1998. Los cambios serán considerados en las Audiencias para el Desarrollo del Reglamento del Consejo Internacional del Reglamento (ICC, por sus siglas en inglés: International Code Council), en 1999. Las fechas para las Audiencias Estructurales del IBC acaban de ser anunciadas. Se llevarán a cabo desde la tarde del viernes 19 de marzo hasta la mañana del lunes 22 de marzo.

En vista de los desarrollos mencionados arriba, tendrá que ser retirada una proposición de cambios al reglamento conjunto ACI-PCA, buscando incluir el Apéndice D en el IBC 2000, o será rechazada por el Subcomité Estructural IBC. El IBC 2000 permanecerá entonces con las disposiciones sobre anclajes, que son parte del Borrador Final y que se toman directamente de la edición de 1997 del Reglamento Uniforme de Construcción.

Todavía es posible modificar la presentación al cambio del Reglamento ACI-PCA, de modo que las disposiciones sobre anclajes del Borrador final del IBC sean reemplazados, no por el Apéndice D del ACI 318, sino por una versión reducida del Apéndice D que considere únicamente los anclajes colados en la obra. Para que tal medida tenga éxito, se requiere que sea apoyada por un grupo llamado Comité de Apoyo de Recursos del Reglamento (CRSC, por sus siglas en inglés: Code Resource Support Committee), que está programado para reunirse en Reno, Nevada, el 20 de enero de 1999.

El CRSC es el sucesor de otro grupo llamado Comité de Desarrollo de Recursos para el Reglamento (CRDC, por sus siglas en inglés: Code Resources Development Committee), que se estableció con los fondos de la Agencia Federal de Manejo de Emergencias (FMEA, por sus siglas en inglés: Federal Emergency Management Agency), dentro del Consejo de Seguridad de Edificios durante Sismos, con el único

propósito de desarrollar las disposiciones de diseño sísmico del IBC 2000, con base en las disposiciones del NEHRP 1997. El CRDC fue reemplazado por el CRSC a finales de 1998.

En su reunión de enero de 1999, el CRSC decidirá sobre su posición (apoyo, oposición, o posición neutral) respecto a los cambios al reglamento presentados, respecto a las disposiciones estructurales del Borrador Final del IBC. La opinión de este grupo tendrá mucha influencia en el Subcomité Estructural del IBC.

En su reunión en Puerto Vallarta, México, el 11 de enero de 1999, el Comité de Actividades Técnicas (TAC, por sus siglas en inglés) del PCI aprobó por unanimidad respaldar un movimiento para reemplazar las disposiciones de anclaje del Borrador Final del IBC con una versión reducida del Apéndice D, que excluye la consideración de anclajes post instalados. La idea fue sugerida por el director técnico del PCI, Phillip Iverson, en una reunión de la Alianza de Reglamentos y Estándares del Concreto, a mediados de diciembre de 1998. La Alianza comprende un número de organizaciones relacionadas con el concreto, tales como el ACI, el PCA y el PCI. El grupo estuvo de acuerdo en apoyar la idea, a condición de que el PCI determinara que sería benéfico para la industria.

## **Disposiciones del NEHRP 2000**

El desarrollo de las disposiciones del NEHRP 2000 que proporcionarán la base de las regulaciones del diseño sísmico del IBC 2003, ha empezado ya. El Comité de Actualización de las Disposiciones está programado, de hecho, para reunirse en Reno el 19 de enero de 1999.

Se ha conformado un Equipo Rápido del PCI sobre Cambios al Reglamento sobre Sismos (compuesto por Ned Cloland, Thomas D'Arcy, Robert Fleichman, S.K. Ghosh, Simon Harton, Nel Hawkins, Phillip Iverson, Michael Oliva y Richard Sause), para desarrollar los cambios al reglamento de concreto premoldeado-presforzado, para las Disposiciones del NEHRP. Ahora está en duda la reunión esperada para marzo del Subcomité Técnico 4 sobre el Concreto, del Comité de



Actualización de Disposiciones, debido a un conflicto con las fechas de las audiencias del Subcomité Estructural del IBC. El conflicto, de hecho, podría darle al Equipo Rápido más tiempo para preparar sus subcomisiones iniciales.

El 9 de enero tuvo lugar en Chicago la reunión de un grupo que representaba al Subcomité Técnico 4 sobre el Concreto y al Subcomité 5 sobre Mampostería, del BSSC, con el objeto de conciliar las disposiciones de anclaje para concreto y mampostería para las disposiciones del NEHRP 2000. Desafortunadamente, no pudieron asistir dos representantes del PCI debido a un conflicto directo con la reunión PCI-TAC de enero de 1999. Los esfuerzos de este grupo, si tiene éxito, serían de gran beneficio para las industrias del concreto y la mampostería.



## Sistema de alarma sísmica

La idea fue concebida por Sami Guindi, en Quebec, Canadá. Durante el invierno de 1995, él consideró la posibilidad de combinar una alarma sonora con un sensor geofísico para producir un sistema de alarma sísmica destinado a un mercado masivo. Este invento se utilizaría para proporcionar un temprano aviso de la llegada de un sismo.

El desarrollo del trabajo de investigación y la producción de prototipos preliminares se completó a fines de julio de 1995. El sistema fue sido sometido a pruebas de calificación por el Departamento de Ingeniería Civil de la Universidad de British Columbia bajo la dirección del doctor Carlos E. Ventura. El examen mostró la ocurrencia de un aviso significativo del arribo de las ondas sísmicas. Este aviso anticipado tiene lugar gracias al empleo de un elemento transmisor ajustado a la frecuencia específica de las primeras ondas que arriban al lugar en cuestión (las ondas P).

El equipo está actualmente en trámite de patente, y la marca, en trámite de registro.

En Canadá se ha desarrollado un sistema de alarma sísmica que se conoce en ese país como Quake Alert, y en Estados Unidos como Quake Guard.

El sistema está diseñado para alertar a los usuarios justo antes de que un terremoto golpee la ciudad. La alarma se activa cuando el sistema detecta los casi imperceptibles movimientos de tierra verticales que preceden a un sismo.

El aparato detecta estos movimientos verticales que generan las ondas P – las ondas primarias que se propagan sobre la superficie de la tierra cuando se produce un temblor–. Como este tipo de onda viaja más rápidamente que las ondas destructivas, proporciona un tiempo valioso para reaccionar ante el peligro inminente



### Resumen:

Pese a los notables avances de la ciencia, los sismos siguen siendo fenómenos impredecibles y cuando ocurren, el tiempo con que contamos para ponernos a resguardo es mínimo, resultando a menudo insuficiente. El sistema de alarma que aquí presentamos permite ampliar ese lapso, que es crucial, al anunciar el movimiento antes de que las ondas destructivas entren en escena.

de un terremoto.

El sistema, que utiliza un transmisor regido por principios electromecánicos, fue concebido como una unidad pequeña que se apoya en la pared de las habitaciones por medio de un colchón de neopreno de células cerradas que le permite adherirse con cierta presión sin sacrificar sensibilidad. Dos tornillos la fijan a la pared. Cualquier vibración del tipo de las vibraciones sísmicas de cierta magnitud activará de manera electrónica una alarma distintiva, dando la advertencia de actividad sísmica antes de la llegada de las ondas dañinas.

Los componentes del equipo están contenidos en una caja de aluminio adonizado que se acompaña de instrucciones de uso. Un sistema de ajuste de sensibilidad puede ser fijado por el usuario para coincidir con las diferentes estructuras residenciales. Los niveles de sensibilidad han sido previamente calibrados. Según sus fabricantes, el detector es en extremo específico y sólo sonará cuando ocurra un desplazamiento vertical arriba de cierta frecuencia, lo que virtualmente elimina las falsas alarmas. El sistema ofrece también un control para variar la sensibilidad que permite al usuario elegir el grado en términos de la frecuencia asociada a cada construcción o al grado de precaución que se quiere tener.

### **Las pruebas de laboratorio y de campo**

**Prueba 1, en Crown Point, N.Y.** En junio de 1995 se realizó esta primera prueba documentada. Diversos tipos de maquinaria pesada fueron utilizados para determinar la posibilidad de falsas alarmas causadas por vibraciones cotidianas en el sistema. Maquinaria pesada como son bull dozers, grúas aéreas, aplanadoras y camiones de carga fueron empleados para determinar la proporción de activación por falsas alarmas. Se instalaron tres aparatos en diferentes tipos de cimientos, uno en un muro de carga de una bodega de cinco toneladas, otro en un pilar de dos toneladas y el último en un árbol plantado en tierra. Los aparatos **aprobaron** favorablemente las falsas alarmas.



**Prueba 2, en Lafarge, Quebec** En julio de 1995 tuvo lugar esta prueba conducida. Se detonaron 7 mil kilogramos de explosivos a 250 metros de distancia de dos unidades de prueba que fueron conectadas a un acelerador triaxial utilizado como marca. Las dos unidades se colocaron en una depresión de 60 pies para minimizar interferencias sónicas. El objetivo del experimento era observar la creación de una onda P y filmar la activación de diferentes sensores. Después, la señal digitalizada del acelerador fue comparada y correlacionada con la activación de las unidades de prueba. Esto probó concluyentemente cuáles señales activaron el aparato y cuáles no.

**Prueba 3, en Tokio, Japón** Un aparato de prueba se colocó en una habitación de un hotel de Tokio, en Japón. Se dejó allí durante dos meses, y en ese periodo se presentó un temblor de magnitud 2 en la escala de merca. El ingeniero Robert Heidt fue despertado por la alarma a la llegada de las ondas P. Esto comprobó que el sistema se activa con verdaderas ondas P.

**Prueba 4, en la Universidad de British Columbia.** Las últimas pruebas se llevaron a cabo en el Laboratorio de Investigación de Sismos de la Universidad de British Columbia, en Canadá. Durante las mismas se analizaron algunos récords digitalizados de temblores que se guardaban en los archivos de la Universidad. Como resultado de estas pruebas, los sistemas fueron más adelante calibrados en términos de un ajuste variable relativo al llamado “efecto tambor”, relacionado con cada tipo de cimentación. Se comprobó la respuesta positiva del sistema al comenzar la generación de ondas P.





## Seguridad en los incendios

### Evaluación de la velocidad de desplazamiento de grupos de personas

Si bien se puede atribuir a una persona aislada una velocidad de desplazamiento que permita un cálculo simple de la duración de su recorrido hasta la salida, hay que utilizar conocimientos más complejos para expresar la velocidad de desplazamiento de los grupos de personas.

Los estudios experimentales de evacuación de voluntarios en diversas situaciones, realizados por investigadores rusos entre 1940 y 1970, han conducido a expresar la velocidad media del movimiento de un grupo de personas en función de su densidad (el número de personas por metro cuadrado). Se han establecido diversas fórmulas válidas para pasillos, rampas, escaleras, salidas, que proporcionan la velocidad media de un grupo en función de su densidad. Estas fórmulas también toman en cuenta el ancho del pasillo y el grado de urgencia experimentado por las personas.

Para una determinada configuración de edificio, se puede realizar un modelo a la medida relacionando las fórmulas adaptadas a la configuración y calcular la velocidad en los diferentes lugares del recorrido, además del tiempo total requerido para la salida de la última persona.

### Simulación de la evacuación de personas en un edificio

Este es un ejemplo de simulación de evacuación de personas. Las figuras muestran tres momentos del procedimiento. Inicialmente, 250 personas están concentradas en una sala de 22 x 12 m, la cual está representada en la parte alta de las figuras.

En el instante  $t = 0$ , ellas empiezan a evacuar la sala por un pasillo de 60 m de largo que forma un codo cuyo ancho es inicialmente de 4 m y luego de 5 metros.

El pasillo se reduce a 2 m en un punto, debido a la presencia



### Resumen:

En este mundo tecnificado en que vivimos, todo puede hacerse con un software. Hasta la evacuación de personas de un edificio durante un incendio puede ya preverse mediante un programa de simulación digital que permite calcular la duración del operativo y los movimientos de los grupos de gente en función de las distancias que deben recorrer, el ancho de las salidas y los obstáculos que encuentran a su paso.

de unos guardarropas (en una longitud de 5 m). La salida, de 5 m de ancho, se ubica en las figuras abajo, a la derecha.

La posición de las personas se indica en los instantes  $t = 10$  segundos, 60 segundos y 120 segundos.

El entramado, en cuadrados de 1 m x 1 m, permite identificar las personas y los obstáculos. Se observa la fluidez del desplazamiento de las personas en el pasillo cerca de la salida y, a los dos minutos, la formación de aglomeraciones en el pasillo de los vestuarios. Se necesitan aproximadamente tres minutos para que salga el último ocupante.

El público reunido en una sala de espectáculos se lanza hacia las salidas de emergencia para escapar de las llamas... El humo del fuego invade un supermercado y siembra el pánico entre los clientes... Se declara un incendio en un local donde una pared acristalada expone a las personas a la radiación térmica... Todos estos escenarios catastróficos pueden ser reproducidos con la ayuda de los modelos y programas desarrollados por los investigadores del Centre Scientifique et Technique du Bâtiment (SCTB) para prever con total seguridad las acciones de evacuación de las personas.

Estas herramientas están siendo utilizadas actualmente por los organizadores de París-Expo, quienes estudian la manera de perfeccionar la disposición y las dimensiones de los pabellones, pasillos y salidas del Parque de Exposiciones de la Porte de Versailles para asegurar, en caso de necesidad, la evacuación de los visitantes en las mejores condiciones.

De hecho, el número de personas que podrían evacuarse en caso de incendio en establecimientos que reciben público, salas de espectáculos, almacenes de grandes superficies, naves de exposición, puede llegar a centenares e incluso a miles.

La facilidad y rapidez de la evacuación son esenciales. Ambas dependen del número de personas, de la longitud del camino por recorrer, de las características de los pasillos, escaleras, salidas.

Utilizando algoritmos evolucionados, los programas de simulación digital permiten calcular los movimientos de las

personas en función de las distancias por recorrer o del ancho de las salidas, y determinar la duración de la evacuación. Los cálculos tienen en cuenta los obstáculos que se oponen al movimiento (sillas o mamparas) y las superficies que se deben evitar, tales como los focos de fuego activos. Además, permiten prever el recorrido seguido por cada persona.

Otros programas completan los anteriores para evaluar las consecuencias de ciertos riesgos del fuego tales como el de sufrir quemaduras, que aumenta con la amplitud del flujo de calor recibido y la duración de la exposición, ligada a la velocidad de progresión de las personas. Así, por cálculo, se puede determinar si el ancho del pasillo o de la salida es suficiente para que el conjunto de personas salga indemne.

Un riesgo adicional en un incendio es el humo. El software CIFI, basado en un modelo de generación de humo en un edificio, permite simular los efectos del humo durante la evacuación en locales tales como un supermercado y describir las condiciones de riesgo que se forman en las diversas zonas. Para determinados escenarios de fuego y diferentes características de control del humo, se consideran los trayectos seguidos por las personas hacia las salidas y se estima si son o no peligrosos, ya sea por su exposición o por la duración del recorrido.

La Dirección de Defensa y de Seguridad Civil del Ministerio del Interior de Francia efectuó recientemente un estudio al respecto. Este tipo de enfoque permite analizar la influencia de las características del sistema de control de humo y de las vías de circulación o de las salidas, con el fin de descubrir su combinación óptima para la protección de las personas.



## Morteros más resistentes a los sulfatos

El deterioro del concreto por agentes químicos agresivos es un proceso complejo. Las reacciones entre estos agentes y los constituyentes del concreto no están claramente entendidas y hace falta una buena correlación entre los estudios realizados en el laboratorio y el comportamiento de la estructura en servicio.<sup>1</sup>

Los suelos que contienen sulfatos y el agua de mar son los dos ambientes principales donde el concreto se puede degradar debido al ataque de sulfatos, si no se toman las medidas apropiadas.

Los investigadores han encontrado que los altos niveles de  $C_3A$  en el cemento dan lugar a expansiones deletéreas por la etringita que se forma en la pasta hidratada de cemento.<sup>2</sup> Los cementos de moderado a bajo contenido de  $C_3A$  (por ejemplo el ASTM C 150 Tipo II y V) son efectivos para minimizar estas expansiones. El uso de ciertas puzolanas o escorias granuladas de alto horno como sustitución en el cemento también ha sido eficaz para mitigar el efecto de los sulfatos.<sup>3</sup>

El uso de los materiales suplementarios como son las puzolanas naturales, la ceniza volante, las escorias, etc. ha mejorado la durabilidad del concreto. Sin embargo, en México es muy común el uso de las puzolanas naturales para producir el cemento portland-puzolana.

Debido a las características geológicas del suelo, existen en nuestro país diversos bancos de puzolanas naturales, de acuerdo con un estudio<sup>4</sup> en el que se muestran diferentes puzolanas naturales mexicanas y sus características, entre las que se cuentan la actividad puzolánica y las resistencias que genera después del endurecimiento. Los minerales representativos que se mencionan para estas puzolanas son la oligoclasa y el cuarzo principalmente, además del vidrio en forma de pumicita y los líticos volcánicos, sobre todo los de composición ácida.



### Resumen:

En este artículo se informa sobre un estudio experimental realizado para determinar la composición y actividad puzolánica de 15 puzolanas naturales y la capacidad para resistir el ataque de sulfatos de barras de morteros elaborados con cemento portland y con cemento portland-puzolana, a diferentes edades. Se concluyó que los cementos que contenían puzolanas naturales con alta actividad puzolánica o bajo contenido de alúmina tenían mejor resistencia a los sulfatos y que es importante considerar el contenido de puzolana en el cemento

Los posibles beneficios tecnológicos que aportan las puzolanas naturales en el concreto incluyen la reducción de la permeabilidad, la resistencia al ataque de sulfatos, la mejora de la resistencia al fisuramiento térmico y el incremento de la resistencia a edades tardías.<sup>5</sup>

Una forma de mejorar la resistencia al ataque de sulfatos es emplear cemento portland-puzolana. En esta investigación se examina cuáles son los parámetros que tienen influencia en la resistencia a los sulfatos. Se consideran el tipo de puzolana, las características químicas de las puzolanas y la cantidad presente en el cemento.

Puesto que las puzolanas naturales están ampliamente disponibles en México, la explicación de las propiedades puzolánicas y cementantes de los aditivos minerales cuando son utilizados como sustitutos en el cemento portland da lugar a la posibilidad de un considerable beneficio económico.

### **Alcance de la investigación**

El objetivo de este estudio es presentar los resultados de un programa experimental dirigido a determinar la actividad puzolánica y el análisis químico de 15 puzolanas naturales. Las pruebas de comportamiento se realizaron de acuerdo con el Método de Prueba Estándar para el Cambio de Longitud de Barras de Mortero Expuestas al Ataque por Sulfatos ASTM C 1012,<sup>6</sup> en 13 cementos portland-puzolana y en tres cementos portland ASTM C tipo I, II y V. El proporcionamiento del mortero se mantuvo constante, una parte de cemento y 2.75 partes de arena estándar, y las barras se almacenaron en una solución de sulfato de sodio al 5 por ciento. Se estudió la capacidad de resistencia al ataque de sulfatos en morteros que empleaban cementos portland y cementos portland-puzolana. Esto incluye la composición, reactividad y cantidad de puzolana utilizada junto con clínker portland, y la cantidad de aluminato tricálcico en el cemento.

### **Métodos experimentales**

### **Materiales**

"Cementos. Los cementos investigados incluyen tres cementos portland (ASTM tipos I, II y V) y 13 cementos portland-puzolana. Estos cementos tienen diferente composición de clinker portland, material puzolánico y cantidad de puzolana. Las propiedades físicas y el análisis químico se muestran en los **cuadros 1, 2A y 2B**.

>Arena estándar. Para elaborar los morteros se empleó arena estándar graduada que cumple con ASTM C 778.

>Puzolanas naturales. Las puzolanas naturales fueron obtenidas en 15 diferentes bancos localizados en la república mexicana. Sus propiedades se muestran en los **cuadros 3A y 3B**. La actividad puzolánica con cal y con cemento portland se determinaron de acuerdo con ASTM C 311<sup>7</sup> y se ilustran en las **figuras 1 y 2**.

### **Pruebas de comportamiento de acuerdo con el método ASTM C 1012**

El método ASTM C 1012<sup>6</sup> cubre la determinación del cambio de longitud de barras de mortero almacenadas en una solución de sulfato de sodio al 5 por ciento. El proporcionamiento de las mezclas de mortero fue de una parte de cemento y 2.75 partes de arena y una relación agua / cemento de 0,485; se utilizaron moldes para barras de 25 x 25,285 mm. Para los cementos puzolánicos, el contenido de agua se ajustó hasta lograr en el mortero una fluidez de 5 por ciento de la obtenida para los cementos portland. Los especímenes se curaron hasta alcanzar un valor de 20 MPa de resistencia a la compresión en cubos de mortero. Los resultados de las expansiones en las barras de mortero durante 78 semanas se muestran en los **cuadros 4 y 5**.

### **Resultados y discusión**

#### Puzolanas naturales

La evaluación de la actividad puzolánica es esencial para evaluar al material como una puzolana. De acuerdo con ASTM C 618, las puzolanas naturales que vayan a utilizarse como aditivo mineral en el cemento portland deben cumplir con

ciertos requerimientos físicos y químicos. Por ejemplo, los aditivos minerales clase N deben cumplir con un mínimo de 70 por ciento en la suma de  $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ ; en el caso de las puzolanas naturales, contienen entre 55,8 y 88,5 por ciento. Este requerimiento químico es arbitrario para el propósito de tener una relación directa con las propiedades del material. La importancia del contenido ( $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3$ ) es subrayado por el hecho de que las fases vítreas activas generalmente son más ricas en contenido de sílice y alúmina. Las puzolanas naturales mexicanas muestran un fuerte carácter ácido teniendo un contenido de  $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3$  entre 52,3 y 85,6 por ciento. Sin embargo, no todas mostraron actividad puzolánica (figuras 1 y 2).

Los principales requerimientos físicos en morteros curados en las condiciones especificadas son la actividad puzolánica con cal y con cemento portland. La resistencia a la compresión mínima a 7 días es de 5,4 MPa para mezclas cal-puzolana o un mínimo de 75 por ciento de resistencia a la compresión a 7 y 28 días (comparadas con un testigo) en mezclas cemento portland-puzolana.<sup>8</sup> En este caso, la mayoría de las puzolanas naturales mexicanas mostraron actividad puzolánica con cal que varió entre 4,72 MPa y 8,56 MPa. Dos puzolanas naturales no mostraron actividad puzolánica con cal, la resistencia a la compresión fue de 0,38 y 0,52 MPa (figura 1). Además, la actividad puzolánica con cemento portland en estas mezclas de cemento portland-puzolana a 28 días tampoco cumplió con el requisito mínimo de 75 por ciento (figura 2). En el caso de las puzolanas B, D y F, la actividad puzolánica con cal se encuentra entre 4.72 y 5.1 MPa, excediendo 75 por ciento de la actividad puzolánica con cemento portland.

### **Resultados de pruebas de comportamiento de acuerdo con el método ASTM C 1012**

La causa primaria del ataque de los sulfatos en los morteros o en el concreto es la reacción entre el  $\text{C}_3\text{A}$  presente en el cemento portland y los iones sulfatos ( $\text{SO}_4^{2-}$ ) provenientes del medio ambiente, la cual da por resultado una expansión por la formación de etringita. Se llevó a cabo un programa experimental sobre la resistencia al ataque de sulfatos desarrollada por los cementos portland-puzolana y morteros de

referencia elaborados con cementos portland ASTM C tipo I, II y V. Los resultados de las pruebas en barras de mortero expuestas en una solución al 5 por ciento de sulfato de sodio durante un periodo de 78 semanas se muestran en los cuadros 4 y 5. Los morteros a base de cemento portland-puzolana (CPZ-H, CPZ-I, CPZ-A, CPZ-C) mostraron las menores expansiones y, por lo tanto, la mayor resistencia al ataque de sulfatos a 26, 52 y 78 semanas (figuras 5 y 7), seguidos por los cementos CPZ-J y CPZ-K, y el cemento de referencia el mortero de cemento portland tipo V.<

Estos cementos portland-puzolana contienen puzolanas con una alta actividad puzolánica con cal, mayor a 5.64 Mpa, clinker portland tipo V (CPZ-H y CPZ-I) y clinker portland tipo I con un contenido de  $C_3A$  entre 10.2 a 12 por ciento.

Por ejemplo, el cemento portland ASTM C tipo II de referencia presentó una expansión mayor que la de los cementos portland-puzolana CPZ-B, CPZ-G, CPZ-L, CPZ-N (**figuras 3, 4 y 7**) a las 52 semanas; además, las barras de mortero muestran pequeñas fisuras.

En este caso, los cementos portland-puzolana que contienen puzolanas con baja actividad puzolánica con cal son más ricas en alúmina y, en algunos casos, contienen menos cantidad de puzolana en el cemento.<

**figuras 3 y 6.** El cemento de referencia portland tipo I tiene una muy alta expansión a edades tempranas (8 semanas) y las barras de mortero están totalmente curvadas y con grandes grietas. El cemento portland tipo II mostró un gran cambio de longitud o expansión a 26 semanas. Obviamente, el cemento tipo I no es resistente al ataque de sulfatos, y este comportamiento ocurre también en los cementos portland-puzolana CPZ-M y CPZ-O. De manera que las puzolanas que contienen estos cementos no presentan actividad puzolánica; por lo tanto, no tienen la capacidad de formar compuestos cementantes que ayuden a prevenir el ataque de sulfatos.

## Conclusiones

El principal hallazgo de este estudio es la sustancial resistencia a los sulfatos que presentan los cementos portland-

puzolana tanto con clinker portland tipo I como tipo V, con respecto a los cementos portland tipo II y V. Este significado en particular se debe a que las puzolanas empleadas que muestran una alta actividad puzolánica incrementan la resistencia a los sulfatos cuando se añaden como aditivo mineral. Específicamente:

Los cementos portland-puzolana que contienen clinker portland tipo I, tipo V y puzolanas con una alta actividad puzolánica tienen una resistencia a los sulfatos mayor que la que presenta un cemento portland tipo V; aun después de 52 semanas estos cementos muestran una alta resistencia a los sulfatos.

Las puzolanas que tienen bajo contenido de alúmina (entre 11.6 y 14.7 por ciento) y alta actividad puzolánica tienen en los cementos puzolánicos mejor resistencia a los sulfatos que aquellas que contienen más de 16 por ciento de alúmina.<

>Los cementos puzolánicos con clinker portland tipo V son más efectivos para incrementar la resistencia al ataque de sulfatos, incluso con un contenido de puzolana de 14 por ciento.

Los cementos puzolánicos con clinker portland tipo I y puzolanas con actividad puzolánica menor a 5.4 MPa tienen una moderada resistencia a los sulfatos.

## Referencias

1. Cohen, M.D. y B Mather, "Sulfate Attack on Concrete-Research Needs", *ACI Material Journal*, vol. 88, núm. 1, enero-febrero de 1991, pp. 62-69.

>2. Lea, F.M., *The Chemistry of Cement and Concrete*, Chemical Publishing Company. Inc., Nueva York, 1970, pp 727.

3. Prusiski y Carrasquillo, *Fifth CANMET/ACI International Conference Fly Ash, Silica Fume, Slag and Natural Pozzolans in Concrete*, SP-153, vol 1, Milwaukee, Wisconsin, EUA, 1995, pp 43-65.

4. Uribe-Afif y R.E. Rodríguez-Camacho, "Mexican Natural Pozzolans and the Evaluation of the Specifications Related to

Their Use”, *Fifth CANMET/ACI International Conference Fly Ash, Silica Fume, Slag and Natural Pozzolans in Concrete*, SP-153, vol 1, Milwaukee, Wisconsin, EUA, 1995, pp 531-548.

5. Ramachandran, V.S., *Concrete Admixture Handbook. Properties, Science and Technology*, Noyes Publications. p 304.

6. ASTM Standard C 1012-95. Test Method for Length Change of Hydraulic- Cement Mortars Exposed to a Sulfate Solution.

7. ASTM Standard C 311-93. Tests Methods for Sampling and Testing Fly Ash or Natural Pozzolans for use as a Mineral Admixture in Portland-Cement Concrete.

8. ASTM Standard C 618. Specification for Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use as a Mineral Admixture in Portland Cement Concrete.

Rosa Elba Rodríguez Camacho es jefa del Laboratorio Químico del Centro de Investigación y Desarrollo Tecnológico del Concreto de Cemex.