

## PRESENTACION

La plasticidad y la versatilidad son cualidades muy apreciadas del concreto, pues permiten una libertad de diseño que no se alcanza con otros materiales. Gracias a ellas, la creatividad puede desplegarse y tomar cuerpo en construcciones antes impensables, capaces de asombrar a quien las observa porque transgreden lo convencional, como ocurre con la escuela de Paspels, un proyecto que pudo llevarse a la práctica porque existía el concreto. Y es que con este material, "uno piensa de manera diferente", dice Valerio Olgiati, el arquitecto autor del diseño.



En nuestro primer artículo pueden encontrarse pormenores de esta obra. Tanto la necesidad de reducir los costos como la de preservar los recursos naturales y el medio ambiente son un acicate constante para la innovación tecnológica en la industria de la construcción e impulsan la investigación en todo el mundo. Los concretos reciclados constituyen una de las propuestas relacionadas con estas preocupaciones. El trabajo que incluimos sobre las cualidades físicas y mecánicas de los agregados reciclados expone el desarrollo de un estudio experimental realizado en España y presenta las conclusiones a las que llegaron los investigadores. La ingeniería sísmica es una disciplina que desempeña un papel muy importante porque de sus avances depende en buena medida la seguridad personal y patrimonial de mucha gente en el mundo. Por ello, y porque nos da gusto siempre el reconocimiento que pueda hacerse al talento de los ingenieros mexicanos, reproducimos el contenido de una entrevista con el doctor Luis Esteve Maravoto, un profesional cuyo trabajo es ampliamente valorado en nuestro país y en el extranjero, tanto que le ha valido el ingreso a la Academia Nacional de Ingenieros de Estados Unidos, una distinción que pocos alcanzan. Y para terminar, una cuestión que sigue ocupando un lugar relevante en las inquietudes de quienes se dedican al desarrollo de la tecnología del concreto: la durabilidad. Su importancia crece cuando se trata de estructuras muy sensibles al deterioro, como son las que están expuestas al aire de mar y, por ende, a la acción destructiva de los cloruros. El trabajo que presentamos, el primero de una serie de tres, recoge los resultados de una intensa y valiosa labor de búsqueda en las investigaciones existentes sobre el tema y propone un modelo de durabilidad para el concreto reforzado sometido a tales condiciones ambientales. Gracias por seguir con nosotros, y mucho éxito en todo lo que emprendan.

Licenciado Luis Martínez Argüello

Aquí! 



Durante una plática sobre sus relaciones con el concreto, Valerio Olgiati declaró que "un hombre sin prejuicios no puede estar contra el concreto". Se trataba de la escuela de Paspels, en Domleschg, un edificio que él concibió, y en cuya realización el concreto aparente es un elemento muy importante.

Benedict Loderer describe esta escuela como "un cubo de concreto de ángulos fijos, cuya parte superior sigue la línea oblicua del terreno".<sup>1</sup> La escuela de Paspels no corresponde en ningún caso a la idea generalmente compartida del aspecto que debe tener una escuela. El edificio sorprende por sus grandes superficies de concreto aparente, tanto en el exterior como en el interior. No hay nada cosmético en él. Y es por esta razón que las imperfecciones que han desesperado a tantos otros arquitectos son aquí muy visibles. A Olgiati no le molesta esto. Más bien, se dedica a resaltar la gran precisión del trabajo.

### Plan de conjunto poco común

La escuela comprende tres pisos y un corredor subterráneo que une al antiguo edificio con el nuevo (véase el corte en la página 8. Dicho de manera simplificada, se compone de un cajón exterior de 25 m de lado. Los diferentes locales -por ejemplo, los tres salones de clases y la sala polivalente en el primero y en el segundo pisos- son otros cajones incorporados a este gran cajón.

Eso no tiene nada de excepcional. Lo que hace a esta obra interesante es que uno busca en vano, por así decirlo, ángulos rectos en el plano, tanto del cajón exterior como de los cajones interiores; casi todo, a veces de manera apenas visible, está dislocado; los ángulos agudos y obtusos reemplazan a los ángulos rectos (véase la página 9. En los tres amplios espacios libres, y sobre todo en el de comunicación entre las salas, ello conduce a vistas en perspectiva originales, ya que los muros no son paralelos.

Los dos pisos superiores no difieren mucho. Pero al estar sus planos algo invertidos, ningún muro interior se encuentra directamente encima de otro muro, lo que explica igualmente la diferencia de las ventanas .

### El material es función de las exigencias

Olgiati dice que el concreto está muy presente en las obras de infraestructura de Grisons, que le gustan mucho y lo impresionan: puentes, muros de apoyo, postes de transformación, etc. Se trata, en este caso, de construcciones que marcan el paisaje con su sello particular. Los muros de concreto, así como los de piedra natural, se componen de piedras y de mortero. Es cierto que son



Esta es una escuela de aspecto poco común, con ángulos que no son rectos y muros que no guardan paralelismo entre sí. Según su creador, tal originalidad en el diseño sólo podía permitirla un material: el concreto..



colados, y no levantados, pero adquieren una pátina similar.

Olgiami trabaja con el mismo entusiasmo con la madera. Por eso, no era del todo evidente para él, en un principio, que la escuela de Paspels debiera ser de concreto. Al contrario, concibió este edificio sin pensar primero en un material determinado. Él tuvo para empezar la noción abstracta de una estructura espacial.

La cuestión del material surgió porque la envoltura del edificio estaba distorsionada. Al ser módulos rectangulares, los ladrillos no entraban en consideración para Olgiami, ya que "si se lleva verdaderamente la reflexión hasta el extremo, resulta curioso construir con ladrillos una casa que no es rectangular".

Quedaba el concreto, que se cuela en moldes. "Lo hermoso es que yo pude encontrar un material con el cual lo más lógico era construir este edificio sin ángulos rectos", ha dicho Olgiami. Un muro mampostado sólo puede ser sometido a compresión. El concreto armado puede ser sometido a compresión y a tensión, teniendo en muchos aspectos el carácter de un muro de piedra natural".

Con la madera y el acero, es preciso trabajar con una retícula; con el concreto, no necesariamente lo es. Es lo que ha permitido realizar ventanas de 10 m de largo colocadas irregularmente, que son una característica de la escuela de Paspels.

### **Vestíbulos reverberantes**

Para Olgiami, la acústica forma parte de la concepción arquitectónica. En las escuelas, uno procura normalmente amortiguar la acústica. Pero él decidió, con los habitantes de Paspels, que siendo el corazón de la escuela, los vestíbulos y corredores deberían tener una acústica en proporción; la reverberación de estos espacios fue proyectada con conocimiento de causa. Las gruesas puertas de roble impiden que el ruido de los niños en los corredores perturbe la enseñanza.

### **La originalidad no debe corresponder a un aumento de costos**

Con un precio de 480 francos por metro cúbico, la escuela de Paspels se ubica en el promedio. La relación de superficie entre corredores y salones de clases y sala polivalente es de 1:2, como en los edificios escolares tradicionales. Pero para una misma cantidad de metros cúbicos, las escuelas de sección oblonga tienen una superficie un tercio más grande. De este modo, se ha podido liberar dinero y utilizarlo, por otra parte, para materiales más caros.

### **Contra una catalogación**

"Actualmente, construir con concreto resulta ser, con frecuencia, una preferencia personal del arquitecto o del propietario", dice Olgiati. "Así que el concreto no se utiliza por fuerza, sino con un propósito decorativo. Pero este edificio, no podía ser construido más que con concreto, lo que significa que el material ha sido utilizado con una perfecta lógica".

A pesar de estas declaraciones, a Olgiati no le gusta que los medios lo presenten a veces como el arquitecto del concreto. Él siente horror por este género de catalogación o de etiqueta que a veces se le pone. A este respecto, dice: "Tal vez, construir con concreto sólo me interesa de manera pasajera. Yo no creo que el concreto sea fundamentalmente un mejor material que la madera, el ladrillo o la piedra natural. Lo que me gusta es experimentar, obtener del concreto lo que éste puede dar. Naturalmente, el concreto me gusta también, en lo personal, por ese algo que tiene de arcaico o antiguo. La idea de realizar una casa compuesta de un solo material me fascina igualmente. El concreto permite realmente modelar un cuerpo o un espacio. Con el concreto, simplemente uno piensa de manera diferente que con los otros materiales". Un resultado de esta otra manera de pensar está a la vista en la escuela de Paspels.

## **Bibliografía**

1. Loderer, B., "Der Fels von Paspels", Hochparterre 11 [6/7], 22-24, 1998.
2. Olgiati, V., Paspels, Dino Simonett, Zurich, 1998, 65 pp.
3. Teuwsen, I., "Ein Dorf leistet sich Architektur", Neue Zürcher Zeitung, 31-07-1999 o <http://db.nextroom.at/tx/3056.html>.
4. Remmele, M., "Wie ein Monolith - Valerio Olgiatis, Schulhaus in Paspels", Neue Zürcher Zeitung, 05-02-1999 o <http://db.nextroom.at/tx/961.html>

Este artículo se publicó en Bulletin du ciment y se reproduce con la autorización de Technische Forschung und Beratung für Zement und Beton (TFB).

Datos de la escuela de Paspels

I Propietario de la obra: comuna política de Paspels

I Arquitecto: Valerio Olgiati, Zurich

I Colaboración: Iris Dätwyler, Gaudenz, Zindel, Raphale Zuber

I Duración de los trabajos: 1996- 1998

I Ejecución: Peter Diggelmann

I Ingeniero: Gebhard Decasper

I Costo de la construcción: CFC: 2.8 millones de francos

I Volumen: 5,800 m<sup>2</sup> I Precio por m<sup>3</sup>: 480 francos I Costo total de solamente la escuela CFC 0-9: 3.8 millones de francos

### **Valerio Olgiati**

Valerio Olgiati nació en 1958 y creció en el cantón de Grisons. Terminó sus estudios de arquitectura en 1986 en la EPF de Zurich.

Después, en

1986: asistente en la EPF de Zurich

1988-1992: oficina propia de arquitectura en Zurich

1993-1995: oficina de arquitectura con Frank Escher en Los Angeles, EUA

1994: profesor invitado a la "Hochschule für Technik", Stuttgart

1995: oficina propia de arquitectura en Zurich

Olgiati ha recibido numerosas distinciones, por ejemplo, la Beca Federal de Bellas Artes

(1994), el Premio Federal de Bellas Artes

(1995, con Frank Escher) y el Premio Internacional de Arquitectura por "Neues Bauen in den Alpen", Sexten Kultur,

(1999, por la escuela de Paspels).

Actualmente Olgiati se encuentra en pláticas para la transformación de La Casa Amarilla de Films, que en realidad es blanca.

La tendencia actual en la construcción es tener un ciclo de vida lo más cerrado posible, que actúe de forma óptima con la economía, y de manera razonable con el medio ambiente. Esto es: Si se parte de un material de los llamados de primera generación y, tras un proceso de transformación, se genera un insumo que, posteriormente, agotada su vida útil tras un proceso de producción o servicio, resulta en la generación de un material de desecho; si dicho material de desecho, después de recorrer otro proceso de transformación, genera un material distinto (de los llamados de segunda generación), y éste se inserta nuevamente dentro de otro insumo (o, en el caso óptimo, dentro del mismo insumo del que proviene), el ciclo de vida de los materiales será más eficiente y acorde con el medio ambiente.

Los estudios actuales de concreto reciclado (CR) con sustitución parcial de agregados naturales por los agregados reciclados de concreto (ARC) prometen un camino factible para su práctica, un ahorro de energía, mejoras medioambientales y solución para los 200 millones de toneladas de estos desechos que genera al año la CE.1 La garantía de su posible aplicación estructural se centra en el estudio del comportamiento de propiedades tales como la contracción y la fluencia, que inciden en su comportamiento a corto y largo plazo, provocando variaciones en sus coeficientes de comportamiento y restringiendo su aplicación si éstas se omiten o equiparan con los concretos convencionales.

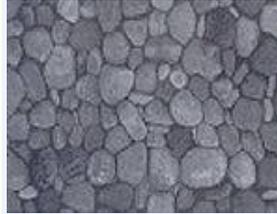
En este trabajo se presentan cinco tipos de concretos con diferentes contenidos de un ARC más el comportamiento del concreto que dio origen a los ARC, los cuales se prepararon para el estudio de propiedades tanto de los agregados como de los mismos concretos.

### **Experimento**

Concreto original Para nuestro estudio se utilizaron 4 m<sup>3</sup> de un concreto original (OC) de uso común, procedente de planta premezcladora, que se colocaron en elementos de cimbra de madera con dimensiones de 0.40 × 0.20 × 0.10 m.

Se dispusieron también para el análisis del comportamiento mecánico 8 cilindros de  $\varnothing$  0.15 × 0.45 m y 50 cilindros más de  $\varnothing$  0.15 × 0.30 metros.

Transcurridas 24 horas del colado, se procedió al descimbrado, y entonces se sometieron los elementos y especímenes a condiciones de curado para su



Razones económicas y ecológicas inducen al empleo de concreto reciclado, un material cuyas posibilidades de aplicación estructural están relacionadas con el estudio de propiedades a largo plazo tales como la contracción y la fluencia, las cuales muestran algunas variaciones respecto a los concretos usuales. En este trabajo se presentan los resultados del análisis experimental de especímenes elaborados con reemplazo de agregados naturales por agregados reciclados de concreto...



envejecimiento durante 150 días (véase la tabla 1, donde se dan con detalle las particularidades de este concreto). Los elementos se hicieron después pasar una sola vez por una trituradora semifija de rodillos, con apertura de entrada de 0.45 m y tamaño máximo de salida de 0.025 m. Por último, el material resultante se clasificó en los tamaños 0-5, 5-10, 10-20, 20-25, de los cuales se tomaron las fracciones 5-10 y 10-20 para constituir los ARC de este trabajo. Dichas fracciones utilizadas representan 41.3% (fracción 5-10) y 38% (fracción 10-20) del OC utilizado.

### **Agregados reciclados versus agregados naturales**

La designación utilizada por tamaños fue la siguiente: para ARC, grava 10-20 y gravilla 5-10; y para los agregados naturales (AN), grava 12-20 y gravilla 5-12. En las figuras 1 y 2 se presentan las granulometrías de los ARC, y en la figura 3, el ajuste granulométrico utilizado para hacer coincidir los perfiles de ARC y AN. El criterio empleado para este ajuste fue el de máxima densidad compactada (el cual reduce la posible influencia de tamaños de partículas diferentes), es decir:

§ Para ARC, la combinación fue 55% de grava y 45% de gravilla.

§ Para AN, la combinación fue 70% de grava y 30% de gravilla.

En la figura 4 se presentan todas las combinaciones de contenidos grava - gravilla para ambos agregados. Obsérvese en ésta que la curva de los ARC siempre se mantiene por debajo de la curva de los AN; en el mejor de los casos, ésta se encuentra a 230 kg/m<sup>3</sup> por debajo de los AN.

En las figuras 1, 2 y 3 se observa que los ARC presentan pendientes más pronunciadas que los AN, lo cual responde al proceso de triturado y tamizado aplicado al OC. Por razones de espacio no se presentan los perfiles de los AN, pero su comportamiento se encuentra perceptiblemente dentro de lo especificado por la UNE 146120: 1997.2

En la tabla 2 se indican las propiedades de los agregados utilizados.

El Coeficiente de Forma (CF),<sup>3</sup> presentado en esta tabla para la fracción grava es similar en ambos casos; sin embargo, para la fracción gravilla los ARC tienden a ser menos esféricos (20%) que los AN. Esto podría explicarse por el hecho de que las partículas de menor tamaño tienden a ser sometidas a mayor desgaste y sollicitación durante el proceso de triturado, aunado al hecho de que los ARC

cuentan con una procedencia de constitución de carácter parcial. No obstante, el CF se mantuvo siempre por arriba de la especificación para concretos comunes ( $> 0.20$ ).

En cuanto al contenido de materia  $< 200 \mu\text{m}$ , era de esperarse que los ARC no aportasen gran cantidad de partículas finas en sus diferentes fracciones, pues las trituradoras de rodillo generan poca cantidad de finos. Asimismo, el proceso de tamizado mecánico utilizado provocó que los finos pasaran de forma rápida a las fracciones 0-5.

Los Índices de Lajas (IL)<sup>4</sup> reportados en la tabla 2 nos muestran que los ARC tienen un valor menor que los AN. No obstante, el IL para ambos tipos de agregados siempre se mantiene por debajo de la especificación para concretos comunes ( $\leq 20$ ).

Los ensayos de la prueba Los Ángeles (LA),<sup>5</sup> presentados en la figura 5, fueron hechos sometiendo las fracciones gravilla a una carga abrasiva de 8 esferas, y la fracción grava, a 11 esferas; en ambos casos, la prueba comprendió 500 ciclos. Como se observa en dicha figura, la correlación entre el incremento de contenido de ARC (factor "r") y el coeficiente LA es directa hasta llegar a un máximo de 34.48 para ambas fracciones, con un  $r = 0.60$ .

La figura 6 presenta la densidad seca ( $D_s$ ), la densidad saturada superficialmente seca ( $D_{ss}$ ), la absorción y la porosidad total al agua para ambos agregados en las fracciones de estudio.<sup>6</sup> Se puede observar en esta figura que la absorción de los ARC (de 5.83 a 8.16%) es mayor que la de los AN (de 0.88 a 1.49%), y que, mientras que para los AN es sensiblemente la misma en todos los tamaños, para los ARC ésta se incrementó de forma directa al reducirse el tamaño de las partículas. La porosidad total al agua es la que presenta mayor variación entre los ARC y los AN (figura 6), llegando a pasar en el peor de los casos de 2.82% para el AN a 14.86% para el ARC en la fracción gravilla. En cuanto a las densidades, los ARC son menos pesados que los AN (promedio de 14% menos en  $D_s$ , y de 9% en  $D_{ss}$ ). Estos ARC incrementan sus densidades de manera directamente proporcional al aumento en su tamaño de partícula. Por último, las diferencias entre las condiciones seca o saturada superficialmente seca son mayores entre los ARC que entre los AN.

Expuestas las anteriores propiedades de los ARC en estudio, se concluye que éstos se encuentran dentro de la recomendación RILEM para ARC TIPO II (absorción  $\leq 10\%$  y  $D_s \geq 200 \text{ kg/m}^3$ ), para la Belga son GBSBII (absorción  $< 9\%$  y  $D_s \geq 240 \text{ kg/m}^3$ ), y para el tipo III, la especificación para

y  $D_s > 210 \text{ kg/m}^3$ ) y en cuanto a la Japonesa, cumplen con el requisito de absorción  $\leq 7\%$  y  $D_s \leq 220 \text{ kg/m}^3$  en las fracciones utilizadas. 7, 8, 9, 10 Por todo ello, los ARC empleados en este trabajo pueden utilizarse como concreto simple o reforzado, teniendo en cuenta su aplicación y sus coeficientes de comportamiento.

### **Dosificación de los concretos reciclados**

Dada la dificultad de determinar la relación real  $a/c$  por la alta variación de absorción de los ARC, se optó por utilizar los conceptos básicos de dosificación del ACI 211.1 y del ACI 211.2 con los siguientes criterios:

1) La sustitución de ARC por AN se realizó con iguales volúmenes de los porcentajes de peso a sustituir, con la siguiente condición:

donde:  $r$  = porcentaje de AN sustituido por ARC;  $RAC_{\text{grueso}} = 55\%$  grava reciclada +  $45\%$  gravilla reciclada;  $NA_{\text{grueso}} = 70\%$  grava natural +  $30\%$  gravilla natural.

Los porcentajes de estudio de los cinco tipos de CR fueron:  $r = 0.0, 0.15, 0.30, 0.60$  y  $1.00$ . Como agregado fino se utilizó  $100\%$  de arena natural caliza triturada procedente de la cantera del Garraf, Barcelona.

2) Los ARC aumentan su absorción proporcionalmente con el tiempo de inmersión en agua, véase la figura 7. Para la dosificación, se tomaron 20 minutos de inmersión, alcanzando  $97\%$  en gravilla y  $77\%$  para grava, respectivamente, de los valores observados en los ensayos a 24 horas.

3) La cantidad de agua absorbida por los agregados se tomó en cuenta por separado, además de la humedad que tenían antes del mezclado y del agua libre que forma parte de la mezcla.

Con el tiempo de mezclado establecido y la cantidad de agua requerida, el orden de introducción de los materiales de mezclado garantiza (en lo posible) inmovilidad de agua y mejora de la zona de transición. Se optó por la siguiente secuencia:

a) Todos los agregados gruesos y el agua fueron introducidos en la mezcladora,

b) Éstos se mezclaron durante dos minutos,

c) La mezcladora se mantuvo en reposo tres minutos,

d) Se repitió el proceso b y c dos veces más,

e) Se introdujo el cemento y se mezcló tres minutos, y f) Se adicionó la arena y se mezcló tres minutos más.

Las dosificaciones de mezclas obtenidas con los anteriores criterios se dan en la tabla 3. Como se aprecia en ésta, son tolerables las variaciones en consistencia y pesos volumétricos para los diferentes porcentajes de reemplazo (reventamiento  $0.10 \pm 0.03$  m y concreto con peso volumétrico normal).

### **Comportamiento de los concretos reciclados**

Absorción, densidad, porosidad y permeabilidad al agua

Como se observa en la figura 8, la absorción de los CR se incrementó proporcionalmente al contenido de ARC, pasando de 7.4% para  $r = 0.0$  a 8.6% para  $r = 1.00$ , mientras que sus densidades decrecen ligeramente en sentido opuesto. Por otra parte, la porosidad al agua, al igual que la absorción, se incrementó proporcionalmente con el contenido de ARC.

En cuanto a la permeabilidad al agua (véase la figura 9),<sup>11</sup> el promedio de las lecturas de penetración no tiene incrementos significativos; mientras que la penetración máxima pasa de 0.104 m para  $r = 0.0$  a 0.143 m para  $r = 1.0$ . La gran diferencia entre las penetraciones promedio y máxima podrían explicarse por el hecho de que el ARC se posiciona en la superficie de ensayo, vulnerando de esta forma la zona y permitiendo el paso del agua.

### **Compresión simple**

Los ensayos se realizaron en cilindros de  $\varnothing 0.15 \times 0.30$  m, y las edades de ensayo fueron 7, 28 y 90 días para los CR, y 179, 200 y 262 días para el OC; cada punto de las figuras es un promedio de tres ensayos.

Puede apreciarse que, para las edades de estudio, el  $f'c$  decrece al incremento del factor  $r$  (véase la figura 10). Si se comparan los resultados con el concreto de referencia ( $r = 0.00$ ), de forma independiente a la edad de ensayo, se obtienen las siguientes relaciones:

$$f'_{cr} = CO = 124.1\% \quad f'_{cr} = 0.00$$

$$f'_{cr} = 0.15 = 99.6\% \quad f'_{cr} = 00$$

$$f'_{cr} = 0.30 = 97.8\% \quad f'_{cr} = 0.00$$

$$f'_{cr} = 0.60 = 91.6\% \quad f'_{cr} = 0.00$$

$$f'_{cr} = 1.00 = 90.0\% \quad f'_{cr} = 0.00$$

Se puede decir que, para  $r < 0.30$ , el  $f'c$  es sensiblemente igual al concreto de referencia. Cuando se toma en cuenta la edad de los ensayos y se compara con el concreto de referencia, se puede observar que las evoluciones de los CR son iguales, aunque, claro está, los niveles de tensión son menores. Por último, se observa que el tipo de falla ocurre usualmente en el nexo del mortero adherido al agregado original; hecho que puede explicarse por la incompatibilidad elástica entre el agregado y la fase de la pasta.

### **Tensión indirecta**

En la figura 11 se muestran los ensayos realizados de tensión indirecta ( $f_t$ ) para iguales edades y especímenes que en el apartado anterior. Si se expresan los valores de esta figura en función de sus respectivas resistencias a la compresión simple, se obtiene:

donde:  $C = 10.00$  para  $r = 0.00$ ,  $C = 10.31$  para  $r = 0.15$ ,  $C = 10.46$  para  $r = 0.30$ ,  $C = 11.66$  para  $r = 0.60$  y  $C = 12.59$  para  $r = 1.00$ .

### **Módulo de elasticidad**

Para el estudio de esta propiedad mecánica, se optó por igual número y edad de ensayo que en apartados anteriores; en los registros de las deformaciones se utilizaron dos calibradores extensométricos posicionados en sentido vertical sobre dos generatrices opuestas de los cilindros. Los calibradores utilizados fueron del tipo PL-60-1 1 - 1L TML y el ensayo se rigió por la normativa UNE 83.316: 1996.12

En la figura 12 se presentan los valores del módulo de elasticidad, ( $E$ ), para los diferentes concretos de estudio. Se observa que el valor medio del  $E$ , sin importar la edad de ensayo, alcanza su cota mínima para  $r = 0.60$ , presentando 89% del  $E$  del concreto de referencia; siguiéndole de cerca  $r = 1.00$ , que tan sólo alcanza 90% del  $E$  del concreto de referencia.

Como es bien sabido, el  $E$  de los CR decrece con el incremento de la sustitución del NA por el ARC.13, 14 Este comportamiento también se observó en estos ensayos, llegando en el caso extremo a reducir el  $E$  en 81% en relación con el concreto de referencia, cuando  $r = 1,00$  a la edad de 90 días.

### **Contracción y fluencia**

Para los ensayos restantes de esta campaña experimental se utilizaron ocho cilindros de  $\varnothing 0.15 \times 0.45$  m para cada una de las variables antes propuestas. Las medidas de

deformación se realizaron con calibradores embebidos (tipo EGP- Series MM) colocados en el centro de los especímenes de concreto (véase la figura 13).

Los especímenes se mantuvieron en cámara de curado durante 28 días ( $T = 20\text{ °C} \pm 2$  y  $HR = 90\% \pm 5$ ), a partir de entonces los especímenes pasaron a una cámara climática ( $T = 20\text{ °C}$  y  $HR = 50\%$ ) hasta el final del periodo de ensayo (90 días). Los instantes de inicio de registro de deformaciones fueron los siguientes: para contracción básica y por secado,  $t_0 = 24$  horas después de colados los especímenes, para fluencia básica y por secado,  $t_0 = 28$  días.

Cuando se procedió al paso de especímenes a la cámara climática, cuatro de los ocho especímenes por cada variable de estudio (dos para contracción básica y dos más para fluencia básica) fueron sellados en toda su superficie con parafina ( $\pm 0.003$  m de espesor) y, por último, envueltos con tres capas de papel estaño para evitar movimiento de agua con el medio ambiente de la cámara.

La configuración de los bastidores utilizados para los ensayos de fluencia básica y por secado se presenta en la figura 14; de igual forma, en la tabla 3 se muestran los valores de  $f_c$ , niveles de tensión de ensayo para los diferentes concretos y deformaciones instantáneas y finales para las diferentes propiedades estudiadas.

En la figura 15 se presentan las curvas para los ensayos de contracción básica (cada una de las curvas es el promedio de dos especímenes). Como se aprecia en éstas, en los primeros 28 días (cámara de curado), los especímenes  $r = 0.60$  y  $1.00$  experimentan considerable expansión; sin embargo, rápidamente se recuperan y contraen casi a iguales valores que el resto de los CR a edad de 90 días en cámara climática.

Los ensayos de contracción por secado se presentan en la figura 16; en ésta se observa que el comportamiento de todos los especímenes para edades cortas es sensiblemente igual entre sí, pero a largo plazo, el incremento del factor  $r$  es directamente proporcional con la deformación sufrida por esta contracción. Para el caso de  $r = 1.00$ , el incremento de deformación sufrido es 46% mayor si se lo compara con el concreto de referencia (a edad de 90 días). Este tipo de comportamiento de los CR coincide con los resultados de trabajos comentados por otros autores.15, 16, 17

Para el comportamiento de fluencia básica (véase la figura 17), los concretos con factor  $r > 0.00$  se distancian del

concreto de referencia, por lo que su coeficiente de fluencia pasa de  $f_{básica} = 1.0$  para  $r = 0.15$  a  $f_{básica} = 1.3$  cuando se sustituye todo el agregado grueso.

En cuanto a la fluencia por secado presentada en la figura 18, se puede apuntar que el comportamiento muestra un aumento gradual, incrementando la diferencia conforme transcurre la prueba y con el factor de reemplazo de agregados. El coeficiente  $f_{secado}$  se incrementa en el orden de 3% en el menor de los casos, hasta 35% cuando  $r = 1.00$ .

## Conclusiones

Con base en los resultados expuestos en este trabajo, se presentan las siguientes conclusiones:

Los agregados reciclados procedentes de concreto presentan un elevado nivel de poros, con posibilidad de absorber más agua y una densidad más baja que los agregados de uso acostumbrado.

Las variaciones que se puedan presentar entre las propiedades de los diferentes agregados reciclados de concreto son una función del tipo de concreto original, de su estado de conservación y, por último, del proceso de producción del cual son creados.

Los resultados de las propiedades mecánicas estáticas de concretos reciclados apuntan a una reducción en sus cuantías; dichas reducciones son proporcionales y producidas por el incremento de reemplazo de agregados naturales por agregados reciclados procedentes de concreto.

Al parecer,  $r = 0.30$ , en los concretos reciclados, marca la frontera entre el desempeño de éstos y el de un concreto usual.

La evolución en el tiempo de las propiedades mecánicas de concretos reciclados es parecida a la de los concretos usuales, sin embargo, los niveles de tensión son menores.

Los incrementos de las propiedades de fluencia y contracción en los concretos reciclados deben explicarse sobre la base de las propiedades de los agregados reciclados procedentes de concreto.

Los anteriores puntos ponen de manifiesto la importancia que tienen en el comportamiento de los concretos reciclados la cantidad y calidad de pasta de que se constituyen los agregados reciclados de concreto.

La viabilidad de la fabricación de elementos estructurales con concretos reciclados deberá tomar en cuenta los parámetros y coeficientes adecuados al comportamiento de estos concretos.

## **Agradecimientos**

Este trabajo fue parcialmente desarrollado gracias a la Agencia Española de Cooperación Internacional, con su programa de becas para estudios de doctorado. Los autores también manifiestan su agradecimiento a las empresas Cementos Molins, PROMSA y REMSA, por su colaboración en el desarrollo de los ensayos.

## **Referencias**

1. Gröbl, W. (1999), "Environmentally friendly construction technology-interaction between construction and environment", <http://www.b-i-m.de/public/Tudmassiv/dacon98gruebl.htm>

2. UNE 146120: 1997. Áridos para hormigones. Especificaciones.

3. UNE 7238. Determinación de coeficiente de forma del árido grueso empleado en la fabricación de hormigones.

4. UNE-EN 933:3:1997. Ensayos para determinar las propiedades mecánicas y físicas de los áridos: Parte 3: Determinación de la forma de las partículas. Índice de lajas.

5. UNE 83.116: 1990. Áridos para hormigón. Determinación del coeficiente "Los Ángeles" 6. UNE 83.134: 1990. Áridos para hormigones. Determinación de la densidad, porosidad, coeficiente de absorción y contenido en agua del árido grueso.

7. RILEM Recommendation. (1994). "121 -DRG Guidance for demolition and reuse of concrete and masonry. Specifications for concrete with recycle aggregates". Materials and Structures, núm. 27, pp. 557-559.

8. Hendriks, Ch. F. (1994), "Certification system for aggregates produced from building waste and demolished buildings", en: Goumans, J. J. J. M., H. A. Van Der Sloot y T. G., Aalbers (Eds.), Environmental aspects of construction with waste materials, pp. 821-843.

9. Vyncke, J. y E. Rousseau. (1993), "Recycling of construction and waste in Belgium: actual situation and future

evolution", en: Lauritzen, E. K, (Ed.), Demolition and reuse of concrete and masonry, guidelines for demolition and reuse of concrete and masonry, octubre, pp. 57-69.

10. Kasai, Y. (1993), "Guidelines and the present state of the reuse of demolished concrete in Japan", en: Lauritzen, E. K. (Ed.), Demolition and reuse of concrete and masonry, guidelines for demolition and reuse of concrete and masonry, octubre, pp. 93-104.

11. UNE 83.309: 1990. Ensayos de hormigón. Determinación de la profundidad de penetración de agua bajo presión.

12. UNE 83.316: 1996. Ensayos de hormigón. Determinación del módulo de elasticidad en compresión.

13. Müller, C. (1999), "Requirements on concrete for future recycling". <http://www.b-im.de/public/ibac/mueller.htm>

14. Bretschneider, A. y M. Rühl (1998), "The Influence of recycled aggregate on the compressive strength and the elastic modulus of concrete". <http://www.b-im.de/public/Tudmassiv/dacon98ruehl.htm>.

15. Tavakoli, M. y P. Soroushian (1996), "Drying shrinkage behavior of recycled aggregate concrete", Concrete International, The Magazine of American Concrete Institute, noviembre, pp.58-61.

16. Yamato, T., Y. Emoto y M. Soeda (1998), "Mechanical properties, drying shrinkage and thawing of concrete using recycled aggregate", ACI Recent advances in concrete technology, pp. 105-122.

17. Hansen, T. C., y E. Bøegh (1995), "Elasticity and drying shrinkage of recycleaggregate", ACI Journal, núm. 5, septiembre-octubre, pp. 648-652.

José M. Gómez, Luis Agulló y Enric Vázquez son docentes de la Escuela de Caminos Canales y Puertos de la Universidad Politécnica de Cataluña en Barcelona, España.



El concreto es el material de construcción más utilizado en las sociedades industrializadas. Sus propiedades mecánicas y su poca necesidad de mantenimiento lo han hecho el material más competitivo entre todos. Sin embargo, en ambientes muy agresivos, su durabilidad se acorta debido a la corrosión de la armadura de acero.

El propósito de este informe es básicamente reunir el conocimiento de investigaciones sobre durabilidad del concreto en ambiente marino y transferir esta información para incluir un "modelo de durabilidad" al diseño estructural del elemento de concreto.

El ejemplo que se presenta, aunque pequeño en dimensiones, describe paso a paso la metodología para el diseño de un elemento estructural por durabilidad.

### **Corrosión en infraestructura de concreto**

Las estructuras de concreto son regularmente definidas como estructuras durables con un bajo costo de mantenimiento. Sin embargo, en las últimas tres décadas se ha observado un incremento de los agrietamientos y delaminaciones de elementos de concreto relacionados con la corrosión de la armadura de acero, en el ámbito mundial. La cooperación del concreto con el acero de refuerzo (o pre-esfuerzo) se basa en que el concreto provee al refuerzo de una protección tanto química como física en contra de la corrosión. La protección química se debe a la alcalinidad del concreto, la cual produce una capa de óxido (del orden de un par de nanómetros) en la superficie del acero, impidiendo que éste continúe corroyéndose. A este fenómeno se le denomina pasividad,<sup>1</sup> ya que la capa de óxido evita la propagación de la corrosión del acero. Esta alcalinidad del concreto se debe, principalmente, al hidróxido de calcio (CH) que se forma durante la hidratación de los silicatos (C2S, C3S, C3A, C4AF) del cemento y a los álcalis (sodio y potasio) que pueden estar incorporados como sulfatos en el clinker.<sup>2</sup> Estas sustancias sitúan el pH de la fase acuosa contenida en los poros en valores entre 12,6 y 14,3 es decir, en el extremo más alcalino de la escala de pH. El concreto también funciona como una capa física protectora contra los

agentes ambientales (oxígeno, agua, cloruros, dióxido de carbono) que pudieran despasivar al acero e iniciar su corrosión.

Sin embargo, en un ambiente marino, los iones cloruro del agua de mar se acumulan en la superficie del concreto y lentamente se transportan a través del recubrimiento de



La corrosión del acero de refuerzo sigue siendo un problema grave para la durabilidad de las estructuras de concreto expuestas al aire de mar. Aquí se presenta la primera de las tres partes de un trabajo que, luego de revisar el conocimiento aportado por investigación existente sobre el tema, propone un modelo de durabilidad para el concreto reforzado sometido a tales condiciones de exposición y describe la metodología para determinar los parámetros de diseño involucrados en el mismo.



concreto hasta llegar a la armadura. Cuando la concentración de los iones cloruro en la superficie del acero de las armaduras alcanza valores que exceden un nivel crítico (denominado CCRIT en este informe), la protección de la armadura corre el peligro de desaparecer y la corrosión puede desencadenarse.

Cuando el acero embebido en concreto se corroe, se consume una capa de la superficie del acero y se forma una capa de productos de corrosión (óxido o hidróxido de hierro) en el perímetro de la barra. El volumen ocupado por dicho óxido (o hidróxido) es mayor que el que ocupaba el acero original, creando presiones contra el concreto que rodea al acero; esto propiciará la formación de grietas y desprendimientos del concreto (figura 1). Además de ser antiestéticas, estas grietas y/o desprendimientos del recubrimiento de concreto pueden disminuir el anclaje del acero y, potencialmente, la resistencia del elemento estructural.

### **El concepto de durabilidad**

En los últimos 20 años, el término "durabilidad" se ha estado escuchando con más frecuencia en la rama de la ingeniería civil. Países industrializados como Estados Unidos, algunos de Europa (España, Francia, Reino Unido) y Japón, han tomado la durabilidad como un tema de gran importancia, invirtiendo sumas millonarias en estudio e investigación en esta área.

En América Latina, un esfuerzo similar se realizó en el año 1997 al presentarse el informe de la Red Temática DURAR,<sup>4</sup> en el cual se presentaron algunos conceptos básicos sobre vida útil, evaluación, mantenimiento, reparación y/o rehabilitación de obras de concreto armado dañadas principalmente por corrosión de la armadura. DURAR definió la vida útil de una estructura como "el periodo de tiempo durante el cual la estructura conserva todas las características de funcionalidad, seguridad, resistencia y aspecto externo, con un nivel de seguridad suficiente".<sup>4</sup>

Este trabajo, que está dividido en tres secciones, de las cuales ésta es la primera, presenta el modelo de durabilidad de concreto reforzado expuesto a un ambiente marino y expone la metodología para determinar los parámetros de diseño que están involucrados en dicho modelo. Se espera que este trabajo sirva también para iniciar al ingeniero civil o estructurista en el "arte" de la selección de un concreto (o propiedades de la mezcla del concreto) y obtener así un elemento estructural cuya vida útil sea adecuada al ambiente en el cual estará en servicio.

## Modelo de durabilidad propuesto

Se han propuesto varios modelos de durabilidad que relacionan la degradación por corrosión del acero de refuerzo (o pre-esfuerzo) en concreto, en función del tiempo. Éstos se evaluarán brevemente a continuación.

El modelo de Tuutti,5 en el cual se basa la mayoría de los ya existentes, distingue dos etapas: T1 y T2. Los modelos de Bazant,6,7 Browne,8 y Beeby9 son similares al propuesto por Tuutti:5 modelos que se dividen en dos etapas, T1 y T2. Los modelos de Bazant6,7 y Browne8 especifican que T2 finaliza al encontrarse daños visibles en la estructura o elemento estructural. En cambio, el modelo de Beeby9 especifica que T2 finaliza cuando se llega a un nivel inaceptable de corrosión. Esto quiere decir que el elemento puede estar más allá de su periodo de vida útil y encontrarse en la etapa de su vida residual.

El presente informe tomará como base el modelo de durabilidad considerado por

Tuutti:5  $TVU = T1 + T2$

(1) En donde T1 y T2 se denominan periodos de iniciación y de propagación. Se define T1 como el lapso de tiempo que tarda el ion cloruro en atravesar el recubrimiento, alcanzar la armadura y provocar su despasivación. En tanto que T2 se refiere al periodo entre la pérdida de protección de la película pasiva y la manifestación externa de los daños por corrosión (manchas de óxido, agrietamientos o desprendimientos de la cobertura de concreto). TVU se define como el periodo de vida útil de la estructura. La etapa T2 (que se estudiará ampliamente en la segunda parte de este informe) finalizará al formarse pequeñas grietas (con anchos menores de 0.1 mm) o manchas de óxido.

Si en la estructura se observan otros tipos de degradaciones tales como grietas más anchas de 0.1 mm, de laminaciones, barras de refuerzo expuestas con corrosión visible, etc., dicha estructura se encontrará más allá de su vida útil, es decir, en el periodo de su vida residual. El periodo de la vida residual finaliza cuando se llega a un límite inaceptable de durabilidad, el cual se podría expresar en función de la capacidad de carga del elemento estructural. Este tema está fuera del alcance de este informe, que compete a la determinación de la vida útil ( $TVU = T1+T2$ ), y se presentará en una publicación futura (tercera parte). La figura 2 presenta, de una manera gráfica, las etapas T1 y T2 así como el periodo de la vida residual.

En esta primera parte del informe se presenta, en particular, un modelo semi-empírico para determinar la duración de T1 de un elemento estructural expuesto a un ambiente marino tropical. La segunda y la tercera parte presentarán el modelo para proyectar T2 y la vida residual, respectivamente.

### **Determinación de los parámetros del modelo propuesto**

El modelo propuesto en este informe se presenta en la ecuación (1). Se ha estimado experimentalmente<sup>10</sup> y por inspección de estructuras en servicio<sup>11</sup> que la duración de T2 es únicamente entre 1 y 5 años, dependiendo principalmente de la velocidad de corrosión,  $i_{CORR}$  (que a su vez está ligada íntimamente al contenido de humedad y de oxígeno del concreto que rodea a la armadura). En cambio, el periodo T1 podría prolongarse, en el mejor de los casos, entre 50 y 100 años, dependiendo de la calidad del concreto.<sup>3,4</sup> Por esto, las tendencias actuales para el diseño por durabilidad de estructuras de concreto en ambiente marino hacen hincapié en prolongar el periodo T1.

En este informe se hablará de la despasivación del acero por el ataque de cloruros únicamente. Para mayor información de modelos de durabilidad que involucran otros agentes externos (dióxido de carbono, sulfatos, reacciones álcali-silice y/o heladas-deshielos) pueden consultarse otros informes.<sup>12-16</sup>

Las fuentes más comunes de cloruros son el agua de mar y las sales de deshielo (las sales adicionadas durante el mezclado del concreto no se incluyen en este informe). Como consecuencia de la penetración de los cloruros en el concreto, se forma un gradiente de concentraciones en dirección de la barra de refuerzo. Este gradiente de concentraciones de cloruros es comúnmente modelado usando la función error (erf), la cual cumple con las condiciones de la segunda ley de Fick de difusión.<sup>17</sup> La difusión de cloruros en el concreto puede modelarse usando una de las soluciones de la segunda ley de Fick:<sup>17</sup> (2)

En donde CS es la concentración de cloruros en la superficie, C es la cobertura o recubrimiento de concreto y DEF es el coeficiente efectivo de difusión de cloruros del concreto. Usando la función parabólica como una aproximación de la erf (ecuación 2), se tiene la siguiente ecuación:

(3) Despejando T1, se tiene la siguiente relación

(4) De la ecuación (4) se puede observar que T1 es una función CCRIT, C, CS, y DEF.

**(Para ver las ecuaciones adquiera la revista del mes de mayo año 2001)**

A continuación, se realizará una breve discusión sobre la determinación de cada una de estas variables.

### **Concentración crítica a la profundidad de la armadura, CCRIT**

En la actualidad existen varios estándares para definir el valor de CCRIT, el cual depende del tipo de cemento que se vaya a utilizar, del contenido de cemento de la mezcla, de si el concreto tiene o no aditivos, de la humedad del ambiente al que va a estar expuesta, de si el elemento estructural es o no pretensado, etcétera.11-15

En un estudio reciente, Li18 encontró que CCRIT puede variar desde 0.17 hasta 2.5% del peso del cemento. Este rango tan amplio se debió principalmente a que la información recabada por Li18 incluye probetas en soluciones, pastas de cemento, morteros y concretos, así como la variabilidad en el tipo de exposición (laboratorio y aire libre).

En una investigación reciente en la que se utilizaron probetas de concreto expuestas a un ambiente marino por un lapso de ocho años, Bamforth19 concluyó que una concentración de cloruros del orden de 0.5% por peso del cemento en el nivel de la barra de acero no es suficiente para activarla, y que potenciales del orden de -300 mV (vs CSE), típico de acero activo, se alcanzaron hasta concentraciones de cloruros del orden de 1% del peso del cemento. Este mismo autor20 presentó los niveles de CCRIT obtenidos por el informe final del programa "Concrete in the Ocean" en función del riesgo de que se presente corrosión en la barra de refuerzo. Estos rangos pueden consultarse en la tabla 1. Los resultados también estipulan que para valores de CCRIT entre 0.4 y 1%, la probabilidad de que la barra de refuerzo se corroa es muy probable.

Con lo presentado anteriormente, se puede concluir que existe una gran variabilidad en el valor de CCRIT. Por ello, este informe tomará un valor conservador de CCRIT: 0.5% del peso del cemento.

### **Concentración en la superficie, CS**

Se ha determinado con anterioridad21 que existen varios factores que afectan el valor de CS. Estos factores están relacionados con el medio ambiente y también con las propiedades del concreto.21 Aunque es obvio esperar que CS varíe con el tiempo, por cuestiones de diseño se puede considerar que, en la mayoría de los casos, la concentración de cloruros en la superficie de la

considerar que, seis meses después de haber entrado la estructura en servicio, el valor promedio de CS permanece constante.

El valor de CS es afectado por el tipo de concreto, principalmente por la cantidad de cemento que posee la mezcla y por el uso o no en ésta de puzolana (ceniza volante, espuma de sílice).<sup>21</sup> Se ha observado también que el valor de CS es inversamente proporcional al contenido de cemento, Cf.<sup>21</sup> Esta relación alcanzaba una acotación para Cf 350 kg/m<sup>3</sup>, en donde el valor de CS puede considerarse constante e igual a - 4.5% del peso del cemento.

Este mismo autor<sup>19</sup> también observó que en la zona de alta-baja marea (o zona de splash), el valor medido de CS llega a valores tan altos como 0.8% del peso del cemento (el doble que en el resto de la estructura con 0.4%). CS es también afectado por la distancia de la estructura con respecto a la costa. Este informe incluirá únicamente estructuras cuya ubicación sea dentro de la zona de mareas o muy cerca (< 50 m) de la costa.

Con esta información, Bamforth<sup>21</sup> presentó los valores (muy conservadores) de la tabla 2 con los rangos de los valores de CS para el diseño por durabilidad de estructuras en ambiente marino para concretos con o sin puzolanas. Más adelante se compararán estos rangos con valores experimentales obtenidos por el presente autor.

### **Coefficiente efectivo de difusión de cloruros en el concreto, DEF**

Se ha definido anteriormente<sup>19-21</sup> que los valores de DEF fluctúan entre 10<sup>-7</sup>-10<sup>-8</sup> cm<sup>2</sup>/s, y dependen mucho de la calidad del concreto. Como regla general, se puede decir que, si se incrementa la calidad del concreto (disminuyendo la relación agua/cemento, a/c, aumentando la cantidad del material cementante, aumentando el tiempo de curado, adicionando puzolanas, etc.) el valor de DEF disminuye.

Predecir el valor de CS es un tanto complicado, debido al número de factores que entran en juego. Predecir el valor de DEF es aún más complicado. En los últimos 20 años, la literatura se ha plagado de publicaciones que han tratado el tema de difusión de cloruros y la estimación experimental de DEF usando probetas de laboratorio o por evaluación de elementos de concreto expuestos directamente a un ambiente marino. A continuación se explicarán brevemente los factores que hacen variar el valor de DEF.

Para la determinación de DEF (así como de CS) de un concreto en particular, es necesario realizar un diagnóstico

concreto en particular, es necesario realizar un diagnóstico de la estructura en servicio. A grandes rasgos, el procedimiento sería el siguiente: (1) se extraen corazones en varios elementos de la misma estructura, en zonas de alto riesgo de corrosión (principalmente en zona de mareas o en contacto directo con el agua de mar); (2) se cortan los corazones en rodajas; (3) se pulveriza cada una de las rodajas; (4) se obtiene la concentración de cloruros totales mediante algún método químico conocido; (5) se obtienen los valores de CS, DEF mediante tratamiento matemático; (6) se obtiene el valor de C empleando un pacómetro en caso de que al extraer los corazones no se alcance a determinar visualmente. Este diagnóstico serviría para la determinación de T1 usando la ecuación (4).

Por otro lado, para el diseño por durabilidad de estructuras que van a ser construidas, se tendría que estimar un valor aproximado de DEF. A continuación, este informe presenta un análisis por regresión estadística para determinar DEF en función de las propiedades físicas del concreto, tomado de los valores de investigaciones existente en la literatura.

El Departamento de Transporte del Estado de la Florida (FDOT), conjuntamente con la Universidad del Sur de la Florida (USF), realizó un diagnóstico de la resistencia a la penetración de cloruros de las mezclas de concreto usadas en subestructuras de varios puentes del estado de la Florida. En dichos trabajos<sup>23,24</sup> se estimaron ambas cantidades, CS y DEF, usando el método descrito anteriormente. Se pudieron obtener valores de CS y DEF en la zona de mareas (altura no mayor de 50 cm sobre la línea de marea alta) de la subestructura del orden de 3 a 8.5% por peso de cemento, y  $8 = \sim 10$ - $10$ - $7 = \sim 10$ - $8$  cm<sup>2</sup>/s, respectivamente. Los valores de CS y DEF disminuían conforme la altura (con relación a la línea de alta marea) del corazón extraído se incrementaba.

Como se puede observar, los valores de CS fueron mucho mayores que los rangos reportados en la tabla 2,<sup>21</sup> lo cual nos hace pensar que la temperatura del ambiente podría ser otro factor importante, ya que las probetas utilizadas para obtener los rangos de la tabla 2 fueron expuestas al ambiente del norte de Europa, en comparación con el informe de Sagüés<sup>23</sup> y Sagüés y Kranc,<sup>24</sup> con corazones extraídos de puentes ubicados en zona tropical (Golfo de México).

De los resultados de Sagüés<sup>23</sup> y Sagüés y Kranc<sup>24</sup> se puede inferir que el concreto usado en el estado de la Florida es de muy buena calidad, ya que hubo valores de DEF inclusive menores que el rango estipulado en otros informes.<sup>19-22</sup> A la fecha, el autor desconoce si en América Latina (y en especial en México) exista un diagnóstico similar

(estructuras en servicio de dimensiones apreciables) al efectuado por el FDOT que pueda determinar el tipo de concreto y su durabilidad en contra de la penetración de cloruros. Por esto, los valores experimentales de Sagüés<sup>23</sup> y Sagüés y Kranc,<sup>24</sup> al igual que los de Bamforth,<sup>22</sup> Jaegerman,<sup>25</sup> Gjorv y otros<sup>26</sup> y Mustafa y Yusof,<sup>27</sup> servirán como base para determinar una ecuación empírica (mediante un análisis estadístico por regresión múltiple) de DEF en función de las siguientes características físicas del concreto: la cantidad de material cementante,  $C_f$  (en  $\text{kg}/\text{m}^3$ ), la relación  $a/c$  (en fracción de peso), la cantidad de ceniza volante,  $f_a$  (en fracción de peso) en el caso de cementos puzolánicos, y el tiempo,  $t$  (en años), en que la estructura ha estado en servicio. La siguiente ecuación se obtuvo para concretos sanos no contaminados: (5)

La figura 3 presenta una comparación entre el valor estimado [por la ecuación (5)] y los valores experimentales de los autores anteriores.<sup>22-27</sup> Tomando en consideración que los datos experimentales provienen de diferentes fuentes, la figura 3 muestra una correlación aceptable.

La ecuación (5) presenta una relación empírica entre DEF, las propiedades de la mezcla de diseño y el tiempo,  $t$ , que cumplen con observaciones hechas anteriormente por diversos autores:<sup>17-26</sup> DEF es proporcional a la relación  $a/c$ , e inversamente proporcional a  $C_f$ ,  $f_a$ , y  $t$ . Esta ecuación, aunque válida para los datos experimentales usados para su obtención,<sup>22-27</sup> necesitará en el futuro ser probada con un mayor número de datos para su aplicación.

Existen ciertos reglamentos o normas prácticas<sup>20</sup> que especifican los requerimientos mínimos que se deben considerar en el diseño de mezclas de concreto resistentes a cloruros. A manera de ejemplo de dichas recomendaciones, la tabla 3 presenta un extracto de una de estas prácticas, la cual se usará en el ejemplo de diseño de este informe.

### **Diseño por durabilidad empleando el método de factor de seguridad**

La teoría del diseño por durabilidad está basada en la teoría de seguridad tradicionalmente usada en diseño estructural (diseño por confiabilidad estructural). En este contexto, el término seguridad de una estructura se define como la capacidad de ésta de resistir, con un grado de certidumbre aceptable, la posibilidad de falla debida a la degradación gradual del material producida por agentes agresivos del medio ambiente.<sup>28</sup>

Tradicionalmente, la metodología del diseño por seguridad

estructural se ha aplicado con exclusividad a la mecánica estructural. Un nuevo giro que se ha dado a la teoría por seguridad estructural es la incorporación del factor tiempo dentro del diseño, permitiendo así la posibilidad de incluir la degradación del material como una parte esencial en el diseño de la estructura. La seguridad en contra de la falla será considerada una función del tiempo, al diseñar la estructura por serviciabilidad, incluyendo el requerimiento de vida útil que deberá cumplirse.

Este informe presenta únicamente las herramientas para determinar la vida de diseño en función de la vida útil de la estructura. Por facilidad, el cálculo de TVU (en años) será estimado igual a  $TVU = T1 + 5$ , en donde el valor de 5 es el periodo T2 (el cual se detallará ampliamente en la segunda parte de este informe) conforme a lo observado por Sagüés y Powers.<sup>11</sup>

Existen tres diferentes métodos para determinar TVU: el método determinístico, el método estocástico y el método de factores de seguridad. En el método determinístico, TVU es considerado como cantidad única calculada directamente de fórmulas analíticas o empíricas [ecuaciones (1) y (4)] previamente determinadas.

En el método estocástico, TVU es considerado como función de una distribución probabilística. Normalmente, muchos son los factores involucrados para determinar las funciones de distribución probabilística de estas tres funciones, por lo que la aplicación del método estocástico sería muy compleja. Por esto, es más sencillo el uso del método por factor de seguridad.

Aunque el método para determinar TVU usando el factor de seguridad se basa en el principio de seguridad y confiabilidad, el procedimiento sigue la metodología de un proceso determinístico. Esto se logra cambiando el tiempo TVU por el tiempo de diseño, TD, usando un factor de seguridad  $\delta t$  de la siguiente manera:  $TD = \delta t \cdot TVU$

Con la ayuda del factor de seguridad  $\delta t$ , el diseño estocástico se convierte indirectamente en un diseño determinístico.

Las curvas en la figura 4 corresponden a la situación más común en el diseño del problema de capacidad de carga de una estructura que presenta un proceso de degradación paulatina en el tiempo. Por simplicidad, la función S (cargas externas) se considerará constante en este informe. Como puede observarse en la figura 4, si la estructura se diseñara por durabilidad usando  $TVU = TD$ , existiría la probabilidad que 50% de las estructuras fallaran al llegar a este tiempo. Para disminuir la fracción de estructuras que fallen al llegar al

tiempo TVU, TD debe ser mayor que TVU. A ello se debe la necesidad de determinar el factor de seguridad adecuado para que la probabilidad de falla en el tiempo TVU [Pf(TVU)] sea muy pequeña. Es claro que, para disminuir Pf(TVU), se debe incrementar el factor de seguridad  $\delta t$ .

El periodo de TD estará íntimamente ligado a la importancia de la estructura y al costo que involucraría el hecho de que fallara por durabilidad durante su vida útil (pérdidas humanas, retrasos en el flujo de vehículos debido a su reparación, etc.).

Los valores de TVU más comunes son 50, 75 y 100 años. Existen estándares que clasifican el tipo de estructura y el tiempo mínimo de servicio de la estructura.<sup>15,16</sup> La clasificación que este informe utiliza, presentada en la tabla 4, está basada en el informe técnico 130-CSL del RILEM:

"Durability Design of Concrete Structures",<sup>28</sup> el cual define los valores de  $\delta t$  en función del estado límite que se va a diseñar (de servicio o último), las consecuencias de la falla de la estructura por durabilidad, la probabilidad de falla [Pf(TVU)], el índice de seguridad de la capacidad estructural ( ) y el coeficiente de variación (definido como

Los valores de  $\delta t$ , presentados en la tabla 4, se utilizarán en el ejemplo de diseño que se presentará a continuación

### **Diseño de tvu para ambiente marino empleando el modelo propuesto**

Hasta el momento, se han presentado las ayudas necesarias para diseñar un elemento estructural por durabilidad considerando las "cargas" ambientales. A continuación se presentará el proceso, paso a paso, para el diseño por durabilidad de una viga isostática de concreto reforzado usando el método de diseño de durabilidad por factor de seguridad separada. La presente sección explicará con detalle los pasos seguidos durante la creación de la memoria.

**A) Especificaciones del proyecto.** Ubicación: El proyecto consiste en la construcción de una terraza cubierta ubicada en la playa de Chelem, en la costa yucateca, a unos 20 m de la orilla del mar. Sistema constructivo: En la techumbre se utilizará el sistema constructivo más usado en esta región: techo de vigueta-bovedilla. Ésta consta principalmente de viguetas pre-esforzadas de sección en "t" invertida, las cuales soportarán unos bloques prefabricados de concreto vibro-comprimido que servirán como pequeños moldes para formar arcos de concreto entre viguetas. Dimensiones del proyecto: Esta techumbre será soportada por vigas de concreto reforzado coladas en el sitio y separadas 4 m entre sí. Estas vigas tendrán una sección transversal de 40 x 50 cm.

ejes. Estas vigas tendrán una porción en voladizo (de 1.5 m). Especificaciones del cliente: El futuro dueño de la construcción solicitó que la estructura sea durable por lo menos 50 años (TVU = 50 años).

**B) Efectos ambientales.** Con la ubicación de la obra se determinó que la estructura se encontrará en una zona de alto riesgo de corrosión por cloruros, ya que estará expuesta al ambiente marino, frente a la costa, con posibilidad de ciclos de secado y mojado (en la intemperie), radiación solar casi todo el año y temperaturas tropicales promedio del orden de 25-30 EC.29

**C) Mecanismo de degradación.** Conocidos los agentes agresivos, que en este caso serían los cloruros, se usaría el modelo por durabilidad en ambiente marino  $T = T_1 + T_2$ , donde  $T_1$  es definido en la ecuación (4) y a  $T_2$  (que se presentará en la segunda parte de este informe) se le asignará el valor 5.10,11

**D) Requerimientos mínimos.** Con base en las especificaciones del ACI 318,30 sección 7.7.1, se determinó una cobertura mínima de 5 cm para elementos estructurales que estén en contacto con agentes climáticos extremos. Este valor podría cambiar inclusive a 3.8 cm, ya que la viga estará parcialmente cubierta por la techumbre. En este ejemplo en particular, se usará  $C = 5$  cm. Otros requerimientos mínimos serían la relación a/c máxima y la cantidad mínima de material cementante, los cuales se pueden obtener de la tabla 3. Para esta estructura, se escogió utilizar como primera instancia una relación a/c de 0.55 y la cantidad mínima de material cementante de 350 kg/m<sup>3</sup>. No se usará cemento puzolana.

**E) Predimensionamiento con base en el modelo de durabilidad.** Con el valor TVU = 50 años, definido por el propietario del inmueble (en función del costo final de la estructura), se llevó a cabo el cálculo de TD. Para ello se estimó  $8t = 2.86$  en la tabla 4, considerando el diseño al límite último, una consecuencia de falla no muy seria [ $P_f(\text{TVU}) = 9.7 \approx 10^{-4}$ ] y un coeficiente de variación de  $8t$ ,

Teniendo el valor de TD y  $T_2$ ,  $T_1$  sería igual a:  $T_1 = 143 - (5)A(2.86) = 129$  años. Con el valor estimado de  $T_1$  se podría despejar DEF de la ecuación (4). Primero, se necesitan estimar los valores de CS y CCRIT. Para este diseño en particular se escogió un valor de CS = 3% del peso del cemento (tabla 2, extremo, CS > 0.75%), y considerando los valores experimentales obtenidos en la Florida,<sup>23,24</sup> ambiente similar al de la península yucateca. El valor CCRIT se escogió igual a 1% del peso del cemento.

Sustituyendo estos valores en la ecuación (4) con  $C = 5$  cm, se estimó un valor requerido de  $DEF = 0.0904$  cm<sup>2</sup>/año ( $2.87 \approx 10-9$  cm<sup>2</sup>/s. Al revisar si las características de la mezcla de diseño cumplen con este valor de DEF, se usó la ecuación empírica (6) con una relación a/c de 0.50 ( $< 0.55$ ), con un revenimiento de 80-100 mm se estimó que  $C_f = 430$  kg/m<sup>3</sup>  $> 350$  kg/m<sup>3</sup>, con base en el método de diseño de mezclas de concreto del ACI.2 Este concreto tendría una resistencia a la compresión estimada de 32 MPa.2 El estimado de DEF con la ecuación (5) es:  $DEF = 3.15 \approx 10-9$  cm<sup>2</sup>/s, el cual es mayor que el requerido.

Cambiando la relación a/c a 0.45,  $C_f = 478$  kg/m<sup>3</sup>, y sustituyendo en (5), se obtuvo un valor de  $DEF = 2.17 \approx 10-9$  cm<sup>2</sup>/s, el cual es menor que el requerido. El valor del  $f'_c$  a 28 días sería  $\sim 40$  MPa.2 Este valor correspondería a un concreto de muy alta calidad en nuestros estándares, ya que normalmente los valores de  $f'_c$  en casa-habitación fluctúan entre 15 y 20 MPa. Estos valores ( $f'_c = 40$  MPa y recubrimiento  $C = 5$  cm) podrían ser incluidos por el diseñador en el diseño mecánico por cargas (el cual no se incluye en este informe) para así determinar las dimensiones de concreto y la cantidad de acero de refuerzo final de la viga en cuestión.

Mucho falta para llegar al nivel de conocimiento que permita incluir la durabilidad en alguno de los reglamentos de diseño estructural como el americano ACI o el europeo CEB. A pesar de ello, el conocimiento aportado por la sociedad científica de nuestro tiempo ha contribuido en gran medida para la generación de ayudas de diseño que, en un futuro no muy lejano, servirán para la creación de dicho código de diseño integral por durabilidad y cargas.

## Reconocimientos

Este informe fue realizado con el apoyo del Instituto Mexicano del Transporte / Dirección de Equipamiento, otorgado al autor. Las opiniones manifestadas en esta publicación son las del autor y no son necesariamente las del instituto editor.

## Referencias

1. Fontana, M. G., Corrosion engineering, 3ra ed., Mc GrawHill, Nueva York, 1986, p. 556.
2. Mindess, S., y J.F. Young, Concrete, Prentice Hall, Nueva Jersey, 1981.

3. Andrade, C., M.C. Alonso y J.A.González, "An initial effort to use the corrosion rate measurements for estimating rebar durability," en: N.S. Berke, V. Chaker y D. Whiting (Eds.) Corrosion rates of steel in concrete, ASTM STP 1065, Prentice Hall, Filadelfia, 1990, pp. 29-37.

4. Red DURAR, "Manual de inspección, evaluación y diagnóstico de corrosión en estructuras de hormigón armado," CYTED, Programa Iberoamericano de Ciencia y Tecnología para el Desarrollo, Subprograma XV Corrosión/Impacto Ambiental sobre Materiales, CYTED, Maracaibo, 1997.

5. Tuutti, K., "Corrosion of steel in concrete", Swedish Cement and Concrete Research Institute, Estocolmo. 1982.

6. Bazant, Z. P, "Physical model for steel corrosion in concrete sea structures - theory", J. Struct. Div., ASCE, 105 (ST6), 1979a, pp. 1137-1153.

7. Bazant, Z. P, "Physical model for steel corrosion in concrete sea structures - application", J. Struct. Div., ASCE, 105 (ST6), 1979b, pp. 1155-1166.

8. Browne, R. D., Mechanism of corrosion of steel in concrete in relation to design, inspection and repair of offshore and coastal structures, ACI SP-65, Malhotra, V. M.(Ed.), American Concrete Institute, Detroit, 1980, pp. 169-204.

9. Beeby, A. W., "Cracking, cover, and corrosion of reinforcement", Conc. Intl., 5 (2), 1983, pp. 35-40.

10. Torres-Acosta, A. A., "Cracking induced by localized corrosion of reinforcement in chloride contaminated concrete", tesis doctoral, University of South Florida, EUA, 1999.

11. Sagüés, A.A. y R.G. Powers, "Corrosion and corrosion control of concrete structures in Florida - What can be learned?," presentado en la International Conference on Repair of Concrete Structures, Svolve, Noruega, 1997.

12. ACI-201, "Proposed revision of guide to durable concrete", ACI Materials Journal, 88, 5, 1991, p.544.

13. RILEM Report 12, Performance criteria for concrete durability, J. Kropp e Hilsdorf (Eds.), E & FN SPON, Londres, 1996.

14. CEB, "Durable concrete structures, design guide, eurointernational committee for concrete", Thomas Thelford Services Ltd., Londres, 1992.

15. CEN (European Committee for Standardization), "ENV 1991 1. Eurocode 1: Basis of design and actions on structures. Part 1: Basis of design," Bruselas, 1994.
16. BSI, "BS 7543 Guide to durability of buildings and building elements, products and components," British Standards Institution, Londres, 1992.
17. Crank, J., The mathematics of diffusion, 2ª. ed., Oxford University, Clarendon Press, EUA, 1975.
18. Li, L., "Pitting corrosion and chloride corrosion threshold of reinforcing steel in alkaline solutions", tesis doctoral, University of South Florida, EUA, 2000.
19. Bamforth, P., "Predicting the risk of reinforcement corrosion in marine structures", Corrosion Prevention & Control, agosto de 1996, pp. 91-99.
20. Bamforth, P., "Chloride penetration and service life", publicación presentada en Corrosion and Protection of Metals in Contact with Concrete - COST-509 Workshop, Sevilla, España, septiembre de 1995.
21. Bamforth, P., "Definition of exposure classes and concrete mix requirements for chloride contaminated environments", publicación presentada en SCI 4th International Symposium on Corrosion of Reinforcement in Concrete Construction, Cambridge, julio de 1996.
22. Bamforth, P., "Factors influencing chloride ingress into marine structures", publicación presentada en Economic and Durable Construction through Excellence, Dundee, septiembre de 1993.
23. Sagüés, A.A., "Corrosion of epoxy coated rebar in Florida bridges", reporte final al FDOT, WPI No. 0510603, State job No. 99700-7556-010, 1994.
24. Sagüés, A.A., y S.C. Kranc, "Corrosion forecasting for 75-year durability design of reinforced concrete - Update on assessment of chloride penetration of sound concrete in FDOT bridge structures", reporte parcial, State Job núm. 99700-3515-020, WPI núm. 0510805, 1999.
25. Jaegerman, C., "Effect of water-cement ratio and curing on chloride penetration into concrete exposed to Mediterranean sea climate", ACI Materials Journal, 87, 4, 1990, pp. 333-339.

26. Gjorv, O. E., Tan, K. y Zhang, M., "Diffusivity of chlorides from seawater into high-strength lightweight concrete", ACI Materials Journal, 91, 5, 1994, pp. 447-452.

27. Mustafa, M.A. y K.M. Yusof, "Atmospheric chloride penetration into concrete in semi-tropical marine environment", ACI Struct. J., 24, 4, 1994, pp. 661-670.

28. RILEM Report 14, Durability design of concrete structures, Sarja A. y Vesikari E. (Eds.), E & FN SPON, Londres, 1996.

29. Castro, P., R. Castillo y L. Maldonado, "Penetration of chlorides and rebar corrosion in concrete columns of two buildings at a marine site", Publicación núm. 321, CORROSION/96, Houston, NACE, 1996.

30. ACI Committee 318, "Building Code Requirement for Structural Concrete (ACI 318-95) and Commentary (ACI 318R-95)", Farmington Hills, Michigan, 1996.

El doctor Andrés A. Torres Acosta es jefe del Área de Materiales de la Coordinación de Equipamiento del Instituto Mexicano del Transporte.

La ingeniería civil en México requiere incrementar el número de estudiantes, mejorar el plan de estudios de posgrado de la UNAM, promover mayor participación de los egresados de esta especialidad en los problemas que enfrentan las distintas dependencias oficiales, así como elevar la capacidad empresarial del país- aseguró el ingeniero Luis Esteva Maravoto, quien el año pasado se convirtió en el tercer mexicano que ingresó a la Academia Nacional de Ingenieros de Estados Unidos (ANIEU).

Entrevistado en su cubículo del Instituto de Ingeniería de la UNAM, el también doctor en Ingeniería Sísmica dijo que las condiciones anteriores servirían para "poder desarrollar otras ingenierías en el nivel en que lo ha hecho la ingeniería civil en México", De la conversación se desprende que los ingenieros de esta rama se encuentran entre los mejores del mundo.

Durante la conversación, el doctor Esteva Maravoto trazó un panorama de la ingeniería civil en nuestro país desde sus inicios y se refirió a su propio interés por esta disciplina tan importante en México, así como a la labor que él desarrolla en la formación de ingenieros civiles en la especialidad sísmica en la UNAM, donde es catedrático en la maestría y el doctorado.

-¿Cómo tomó usted el reconocimiento que le hicieron para ingresar a la Academia de Ingenieros de Estados Unidos?

-Me dio mucha satisfacción; fue para mí algo inesperado, porque a uno lo proponen sin que se entere, y yo lo supe cuando ya me habían aceptado. Es principalmente un reconocimiento a mi labor de investigación en el área de la ingeniería sísmica en el país. No es por un trabajo específico, es un reconocimiento a las labores realizadas durante décadas en esa línea, desde fines de los años cincuenta. Es un reconocimiento de mis colegas de otros países, fundamentalmente por mi labor en Estados Unidos.

Recordó a los otros dos mexicanos que han sido miembros de la Academia; uno es el doctor Leonardo Sevarit, un ingeniero muy distinguido en el área de la mecánica de suelos en México, que "está activo todavía como ingeniero y como profesor de la División de Posgrado de Ingeniería". El otro, el doctor Emilio Roseblueth, quien "entre otras cosas fue mi profesor y una personalidad muy distinguida en México, pero que desgraciadamente falleció a principios de 1974", comentó el entrevistado.

-Háblenos un poco de su trabajo.

-Yo me gradué en 1958, pocos meses después del temblor



Con una larga trayectoria como investigador y docente en la especialidad de ingeniería sísmica, el doctor Esteva Maravoto se ha ganado el reconocimiento internacional y el ingreso a la Academia Nacional de Ingenieros de Estados Unidos. Su participación en la elaboración de normas de diseño, su visión del desarrollo de la ingeniería en México, las enseñanzas que dejó el terremoto de 1985 y las posibilidades de que ocurra uno mayor son cuestiones a las que se refirió en la conversación con él mantenida.



de 1957 en el que se cayó El Ángel de la Independencia. Ya en esa época trabajaba como ayudante en la oficina de Diseño Estructural de Colinas de Buen Rodríguez, uno de cuyos dueños era Oscar de Buen, que fue también mi profesor.

Por esos años, el joven ingeniero tenía inquietudes relacionadas con los problemas del diseño estructural; cuando ocurrió el temblor mencionado, obviamente esos intereses se incrementaron:

-Al terminar mi carrera y recibir el grado, conseguí una beca para irme a hacer la maestría al Instituto Tecnológico de Massachussetts, fundamentalmente con esos intereses, y regresé una vez terminada la maestría porque me interesaba mucho trabajar ya en problemas que tenían que ver con la ingeniería sísmica en México y el mundo.

Recuerda que trabajó en una oficina de la cual fue socio, ya que era una empresa que habían formado unos amigos suyos, quienes lo invitaron a participar.

-Pero con el tiempo me di cuenta de que me interesaba no solamente estar en la práctica, sino también hacer investigación, de modo que le solicité al doctor Roseblueth la posibilidad de ingresar en esta actividad, lo cual pude hacer a fines de 1959. Me tocaron entonces las secuelas del temblor de 1957, porque estaban en proceso de revisión las normas entonces vigentes, y debí empezar algunas investigaciones sobre problemas relacionados con la resistencia de las construcciones de mampostería ante temblores, ya que sobre este tipo de edificaciones no se había investigado en México ni en los países avanzados. A éstos no les interesaba tal construcción, muy típica en nuestro país.

Del trabajo allí realizado, recuerda:

-Me tocó hacer el primer mapa de regionalización sísmica del país, en cuya elaboración se incluyeron planteamientos muy novedosos, basados en análisis de riesgo y probabilidades. Fue uno de los primeros mapas de este tipo que se hicieron en el mundo y, también, una de las razones del reconocimiento.

El especialista reitera que el trabajo que ha realizado está relacionado con la ingeniería civil, pero orientada hacia el diseño contra temblores, "lo que me ha hecho trabajar también en la frontera con la sismología".

Agrega que los sismólogos tienen su forma de ver los problemas, y los ingenieros la suya. "Nosotros necesitamos obtener información de tipo sismológico para poder plantearnos normas de diseño adecuadas".

-Me ha tocado participar en la norma de diseño para México y en las normas de diseño de otros países, principalmente de Latinoamérica, aunque también colaboré en la revisión de los problemas en Irán y otros países afectados por temblores intensos. La experiencia que nos ha dado México la hemos tenido que compartir con otros países que han pasado por problemas similares a los nuestros.

-¿En especial con los japoneses?

-He viajado bastante a Japón para dar conferencias sobre el trabajo que hacemos en México. No podría decir yo que los hemos asesorado, porque ellos tienen muchísimo tiempo de trabajar en esto, pero, bueno, me han invitado para comunicar nuestras experiencias.

-¿Es usted pionero en este rubro en México?

-Por más que creamos que estamos introduciendo todo lo que conocemos, ¡vaya, siempre hay sorpresas!

El temblor de 1985 causó problemas porque dentro de nuestra experiencia y la revisión hecha de la información de varios siglos atrás, no teníamos indicios de un sismo de intensidad tan grande como la que se manifestó entonces: 1985 nos mostró una intensidad sísmica que sinceramente no esperábamos.

-¿No la había habido ni en los sismos del siglo XVI?

-Cuando nos fuimos para atrás y buscamos en los códigos información histórica al respecto, nos dimos cuenta de que había datos de temblores que debieron haber sido muy intensos. Lo que pasa es que no habían sido muy destructivos, porque no había construcciones sensibles a los movimientos sísmicos que tenemos en nuestro país, con su tipo particular de suelo. Entonces, no había referencias históricas que nos dijeran que teníamos que preocuparnos por una intensidad excesiva. Una vez que ocurrió el sismo y nos pusimos a investigar en el pasado, nos dimos cuenta de que habían ocurrido fenómenos que seguramente habían sido temblores. Pero eso lo encontramos no en informaciones científicas, sino en crónicas históricas, e incluso en códigos antiguos.

-En relación con el terremoto de 1985, cuando se derrumbó el edificio Nuevo León en Tlatelolco, se habló de fraude con los materiales que se utilizaron para la construcción de la unidad, ¿es cierto esto?

-Sinceramente, no lo creo. En este caso, Nonoalco era un conjunto muy moderno, pero que había sido construido con normas anteriores, y por eso los edificios se cayeron en 1985. Ahora, creo que muchas construcciones que se vinieron abajo en 1985, y muchos de los problemas que

tuvimos después, fueron precisamente porque las normas de construcción no estaban en relación con la gran intensidad de ese sismo.

También debo decirle que muchos edificios que estaban bien hechos, y según las normas anteriores, resistieron, a pesar de que no habían sido construidos para soportar las características de los temblores de 1985. Esos edificios tuvieron defensas suficientes para seguir en pie, a pesar de que las normas no preveían temblores tan intensos.

Agrega el doctor Esteva Maravoto que, en este caso, se puede decir que la mayor parte de los problemas que hubo en 1985 se debió a deficiencias en la construcción, pero aclara que otra de las situaciones de esta problemática que enfrenta la ciudad de México, sobre todo en la parte central de lo que fue el lecho del lago, es el hundimiento de edificios.

-¿Cómo trabaja usted en ese aspecto, cuál es su participación?

-No, yo en eso no trabajo. Hay gentes en el Instituto de Ingeniería que se dedican al estudio de ese problema, principalmente los ingenieros interesados en la mecánica de suelos. Yo me he concentrado más en el problema de cómo responden las construcciones ante temblores y cómo conviene diseñarlas para que puedan resistir esas situaciones de alta sismicidad.

-¿El temblor de 1985 fue el ejemplo, el despertar para ponerse a trabajar más sobre esto?

- No, digamos que el despertar fue el de 1957. Ese año aprendimos mucho, ya que en el curso de los siguientes, entre 1957 y 1985, como recordarán, tuvimos 304 temblores que causaron algo de destrucción, por lo que consideramos que eso era lo peor que nos podía pasar.

-Hay gente que piensa que se está generando mucha energía en ciertos lugares del país y que podría producirse un temblor más fuerte que el de 1985, ¿usted qué opina?

-Si, es una realidad. Esto es así, si se toman en cuenta las características de las fallas en la corteza terrestre, en especial las de aquellas sobre las que está asentada la república mexicana. Además, el tiempo que ha transcurrido parece indicar que se está acumulando suficiente energía para que, a una distancia más corta de lo que ocurrió en 1985, y si esa energía se liberara de golpe, el temblor pudiera ser más grave. Aunque también existe otra posibilidad: que no haya tal sismo, porque ha habido antecedentes de liberación de esa energía ya en dos ocasiones, que representaron la liberación de la mitad de la energía total. Podría ser así, pero también podría ser que ocurriera lo contrario, y eso nadie puede predecirlo. Le puedo afirmar que

si ocurre ese temblor, que desgraciadamente estamos esperando, sí va a haber problemas. Está previsto de dos maneras: por un lado, las normas se están actualizando continuamente, y existe en el caso de la ciudad de México un Comité Asesor en Seguridad de Infraestructura del DF, que se formó desde el régimen anterior y que en éste ha sido ratificado. El comité sigue trabajando, y bajo su patrocinio se están haciendo estudios para la actualización de las normas de construcción.

Puntualiza que hay una revisión que se está terminando en este momento. Los documentos sobre la revisión de las normas de diseño sísmicas ya se distribuyeron, para que distintos especialistas en toda la ciudad puedan revisarlas y dar su opinión, con el fin de que se conviertan, al final de este año, en la versión 2001 de las normas, "porque sobre este tema hay que seguir aprendiendo, siempre hay cosas nuevas".

La otra manera, al decir del doctor Esteva Maravoto, es que actualmente se están dando cursos en la UNAM y en otras universidades del país sobre ingeniería sísmica, tanto en el ámbito profesional como de posgrado.

-Nos preocupamos por formar ingenieros, aunque no sé si serán suficientes, porque desgraciadamente, cuando sucede un sismo de grandes magnitudes nos damos cuenta de que no son suficientes los ingenieros sísmicos.

-La población, doctor, ¿tiene información para estar prevenida y enterada de qué debe o no debe hacer en este tipo de terremotos, sobre todo en zonas populares donde hay construcciones hechas?

-Desgraciadamente, creo que tenemos que aceptar que hay mucha autoconstrucción y que ésta no satisface ninguna norma. Aunque, afortunadamente, en el caso de la ciudad de México eso no es cierto; ustedes recordarán que los problemas de fallas no se dieron en la autoconstrucción, realmente no, porque esas construcciones no son tan sensibles como los edificios altos.

Agrega que en el caso de la ciudad de México, por las características del terreno y las de los temblores que nos llegan de lejos, los movimientos de suelo se amplifican en el terreno blando, por lo que las estructuras vulnerables son los edificios, más que las casas bajitas.

-Si estuviéramos hablando de Acapulco y Oaxaca, diríamos que de las casitas de un piso construidas así, sin ninguna norma, sin control, se caería un gran porcentaje, pero si se recuerda, eso no ocurrió en México en 1985, y es simplemente por la situación peculiar de terreno que tenemos; aquí no se producen muchos temblores ni tampoco se generan corras; aunque también se han dado, pero no son

se generan cerca, aunque también se han dado, pero no son los que nos han estado afectando. Los que nos dañan vienen, principalmente, del Pacífico, pero esos movimientos en terreno firme no nos hacen nada, y a las construcciones bajitas no las afecta; solamente daña las estructuras más altas, las que tienen periodos de vibración que coinciden con los periodos del terreno local y eso causa las famosas resonancias, las que hacen que respondan tan fuerte a los movimientos a pesar de que los temblores estén tan lejos.

-¿Qué apoyos han tenido ustedes, los investigadores y especialistas en sismología, de las instituciones de México o del extranjero?

-En realidad, yo me considero muy afortunado, porque ha sido satisfactorio el apoyo que he recibido, aunque claro, siempre piensa uno que podría tener más, pero yo creo que en el Instituto de Ingeniería de la UNAM hemos tenido unos apoyos muy adecuados.

Explica el doctor Esteva que buena parte de estos apoyos se han dado directamente a través del presupuesto universitario, que una parte importante ha llegado también de los proyectos que han patrocinado distintas instituciones oficiales, y que él ha tenido el apoyo de éstas, prácticamente todo el tiempo.

Señala que estos apoyos han llegado a través del Gobierno del Distrito Federal, de la Comisión Federal de Electricidad, de la Comisión Nacional del Agua, "y de muchas que en este momento se me olvidan".

-Ahora, si nos comparamos con los recursos que puede tener una institución semejante en un país con más recursos, es obvio que estamos en desventaja; pero dadas nuestras condiciones, yo no me quejaría. Para un país de cien millones de habitantes, con las necesidades que tenemos, en verdad son muy pocos los especialistas en sismología. Pero nos metemos en un círculo vicioso, porque nos quejamos de que no tenemos tantos especialistas de alto nivel, y, sin embargo, al momento de formarlos, tampoco hay muchos lugares donde ubicarlos, por los problemas de insuficiencia de recursos.

El doctor Esteva Maravoto dice que lo anterior es consecuencia del subdesarrollo, de los recursos del trabajo, de las instituciones y, obviamente, de lo que se invierte en el país. Sobre el ambiente que existe en el gremio, el especialista en ingeniería sísmica dice:

-Somos bastante unidos, tenemos conciencia del papel que nos toca para construir la infraestructura que el país necesita; en general, nos apoyamos y nos entendemos muy bien, a pesar de que muchos tienen que competir entre sí, obviamente.

Finalmente, ¿cuál es la situación de la ingeniería en

- Finalmente, ¿cual es la situacion de la ingeniera en México?, ¿ qué futuro le espera?

- Los ingenieros civiles hemos podido trabajar con mucha menos dependencia de las empresas extranjeras que los ingenieros de otras especialidades. Obviamente, la situación es complicada por la desigualdad en la competencia con las empresas extranjeras para otras ingenierías, las cuales no han tenido la capacidad de desarrollarse como la civil, que en México lo logró hacer gracias al impulso que recibió para construir la infraestructura básica. Todos los ingenieros saben que a partir de los años veinte, y con la necesidad de construir la infraestructura de este país, nuestra ingeniería civil se tuvo que desarrollar. Lo que pasa es que para ser competitivo se necesitan dos cosas: por un lado, saber, y por el otro, tener los recursos para competir con otras empresas.

A la ingeniería civil la apoyan instituciones oficiales tales como la Comisión Nacional del Agua, la Comisión Federal de Electricidad y la Secretaría de Comunicaciones y Transportes, porque les interesa crear infraestructura y apoyan la investigación orientada a ello. En el caso de una compañía de electrónica, de informática, de cualquier rama industrial, la cantidad de dinero que tendría que invertir para poder competir con la alternativa extranjera es muy grande, y eso le hace la vida muy difícil. Entonces, para estar en posibilidades de avanzar en esa dirección, las universidades hacen su aportación; pero eso es solamente una parte, la otra es la que se refiere a cómo hacemos para competir con los japoneses, con los americanos; no se trata sólo de conocimiento.

Yo creo que aquí podemos formar gente de primer nivel en cualquier disciplina, yo creo que hay personal académico de muy alto nivel en otras disciplinas, pero la posibilidad de ser competitivos en el ámbito internacional, no desde el punto de vista académico, sino desde el punto de vista de las aplicaciones, es mucho más difícil para ellos que para nosotros. Simplemente, nosotros estamos en una situación más ventajosa en razón de quién es nuestro usuario.



## PUNTO DE ENCUENTRO

**5a. Conferencia Internacional Innovación en el diseño con énfasis en carga sísmica, eólica y ambiental, control de calidad e innovación en materiales/concreto en clima caliente.**

### **Solicitud de Ponencias**

El propósito de ésta conferencia es difundir la información más actual del área de diseño y construcción para estructuras nuevas de concreto; y la reparación, rehabilitación y mantenimiento de las estructuras existentes. El objetivo de esta conferencia es reunir a investigadores, ingenieros y tecnólogos para intercambiar nuevas ideas y explorar nuevas áreas de investigación.

Para mayor información visite el sitio del ACI:

<http://www.aci-int.org/events/conferences/conference.htm>

### **FECHAS LÍMITES**

Recepción de resúmen de 200 palabras: **1/Junio/ 2001**

Aceptación de resúmen y notificación a los autores: **1/Agosto/ 2001**

Recepción de ponencia previa para revisión por el ACI: **15/Nov/ 2001**

Aceptación de ponencia previa y notificación a los autores: **1/Feb/2002**

Recepción de ponencia final: **1/ Mayo/ 2002**

**Favor de enviar 6 copias de su resumen a:**

**Phyllis Erebor, Speaker/Manuscript Ltaison ACI International P.O. Box 9094**

**Farmington, Hills, MI 48333-9094, USA**

**Phone: (248) 848-3784 Fax: (248) 848-3768**

**Email: PErebor@aci-int.org**

**Cancún, Q.Roo. 10 al 13 diciembre 2002**

---

### **14º Congreso Mundial de la Carretera de la IRF**

Del 11 al 15 de junio de 2001 en París, Francia Informes: Tel.: 33. (0)1.44.88.25.25

Fax: 33. (0)1.40.26.04.44

E-mail: [fournier@socfi.fr](mailto:fournier@socfi.fr)

Internet: <http://www.socfi.fr>

---

### **Conferencia IABSE sobre Puentes Soportados por Cables / Reto de los límites técnicos**

Del 12 al 14 de junio de 2001 en Seúl, Corea

Informes: Tel.: +82-335-336-8375

Fax: +82-335-336-8376

E-mail: [seoul2001@iabse-kr.org](mailto:seoul2001@iabse-kr.org)

---

### **1ª Conferencia Mundial sobre Túneles de Vías Urbanas**

Del 14 y 15 de junio de 2001 en París, Francia

Informes: Tel.: 33 (0)1 44 64 15 15

Fax: 33 (0)1 44 64 15 16

**Aquí!** 



E-mail: [p.fournier@colloquium.fr](mailto:p.fournier@colloquium.fr)  
Internet: [www.irfparis2001.com](http://www.irfparis2001.com)

---

### **3ª Conferencia Internacional sobre Concreto bajo Condiciones Severas / Medio Ambiente y Carga**

Del 18 al 20 de junio de 2001 en Vancouver, BC, Canadá  
Informes: Profesor N. Banthia, University of British Columbia, Department of Civil Engineering  
Tel.: 1(604) 822-9541  
Fax: 1(604) 822-6901  
E-mail: [banthia@civil.ubc.ca](mailto:banthia@civil.ubc.ca)

---

### **7º. Simposio Internacional sobre Ferrocemento y Compuestos Delgados del Cemento Reforzado**

Del 27 al 29 de junio en Singapur  
Informes: Dr. M.A. Mansur, National University of Singapore, Department of Civil Engineering  
Fax: (65) 779 1635  
E-mail: [cvemansu@nus.edu.sg](mailto:cvemansu@nus.edu.sg)

---

### **2º. Simposio Internacional de Mantenimiento y Rehabilitación de Pavimentos y Control Tecnológico**

Del 29 de julio al 1 de agosto en Auburn, Alabama, EUA  
Informes: <http://www.olemiss.edu/projects/cait/Index.html>

---

### **Conferencia Internacional sobre Materiales de Alto Desempeño en Puentes y Edificios**

Del 29 de julio al 3 de agosto en Kona, Hawaii  
Informes: E-mail: [engfnd@aol.com](mailto:engfnd@aol.com)  
<http://www.engfnd.org>

---

### **Simposio Internacional sobre el Desarrollo Sustentable y la Tecnología del Concreto**

Del 16 al 19 de septiembre en San Francisco, EUA  
Informes: V.M. Malhotra, CANMET  
Fax: 613-992-9389

---

### **26ª Conferencia sobre Nuestro Mundo en Concreto y Estructuras**

Del 26 al 28 de agosto en Singapur  
Informes: Tel.: (065) 7332922 Fax: (065) 2353530  
E-mail: [cipremie@singnet.com.sg](mailto:cipremie@singnet.com.sg)  
Web: [www.cipremier.com](http://www.cipremier.com)

