

# Durabilidad del hormigón

ING. MÁXIMO COROMINAS

## INTRODUCCIÓN

### Durabilidad

Las obras de hormigón deben proyectarse no sólo para que resistan las cargas o acciones mecánicas previstas sin que alcancen su estado límite de agotamiento, sino, también, para que resistan aquellas acciones ambientales de tipo físico o químico que puedan deteriorarlas reduciendo su vida de servicio o exigiendo para su conservación un costo importante de mantenimiento o reparación.

La durabilidad de un hormigón de cemento portland puede definirse, por tanto, como la capacidad que tiene éste de resistir a la acción del ambiente ataques químicos, físicos, biológicos, o cualquier proceso que tienda a deteriorarlo. Así, un hormigón durable será el que conserve su forma original y su capacidad resistente de servicio en el tiempo, cuando se encuentre expuesto a estas acciones.

Generalmente, un hormigón sano y compacto presenta una buena durabilidad cuando se encuentra sometido a unas condiciones normales de ambiente y de desgaste, presentado además, una buena protección frente a la corrosión del acero en el caso de estar armado.

La durabilidad del hormigón está muy relacionada con la porosidad abierta del mismo y la distribución y tamaño de sus capilares. La permeabilidad de un hormigón, aunque en sí misma, no es una propiedad indicativa de la durabilidad sí está claramente relacionada con los mecanismos de penetración de sustancias agresivas en el interior del mismo.

En los hormigones sometidos a condiciones ambientales y climáticas severas con bajas temperaturas, heladas, acción de sales de deshielo, aguas puras, ácidas, etc., la durabilidad se encuentra muy disminuida dependiendo ésta, de la calidad de aquellos y de los medios que se hayan adoptado para protegerlos.

La acción del agua del mar y de los sulfatos se reduce empleando hormigones de alta calidad y cementos adecuados. Las protecciones y revestimientos juegan un papel importante en la vida de estos hormigones.

La abrasión en pavimentos industriales y obras hidráulicas puede disminuirse con hormigones de alta calidad y áridos duros, resistentes al desgaste y de tamaño grande.

La disgregación provocada en el hormigón armado por la corrosión de armaduras, especialmente en estructuras situadas en las proximidades del mar y en las de puentes en las que se emplean sales de deshielo, puede disminuirse con el empleo de grandes recubrimientos, hormigones de baja permeabilidad y con fuerte reserva alcalina.

Algunas veces hay que utilizar protecciones especiales.

Las disgregaciones provocadas por la reacción álcali-árido pueden evitarse eligiendo cementos de bajo contenido en álcalis, puzolánicos, o mediante el empleo de áridos que no sean reactivos.

A la durabilidad del hormigón se le ha presentado, en general, poco interés dejándola siempre relegada a un segundo a un segundo o tercer término, frente a las características de resistencias mecánicas que debía tener el hormigón.

El proyectista empieza a ser consciente de la importancia de la durabilidad hasta el punto de que en muchos países la durabilidad llega a ser un parámetro de diseño tan importante como la resistencia; ésta es cada día más conocida, así como son también, los mecanismos que producen el deterioro del hormigón.

La durabilidad de un elemento de hormigón es un proceso complejo en el cual están involucrados.

- Los materiales componentes del hormigón y éste mismo.
- El diseño estructural de la obra.

- La calidad de ejecución de la obra, incluyendo compactación y curado.
- Los sistemas de protección adoptados.

## Clases de tipo ambientales

Una estructura de hormigón, sea armado, pretensado o en masa, está sometida a unas sollicitaciones mecánicas con arreglo a las cuales se calcula, pero además está expuesta a unas agresiones de tipo físico o químico que pueden llegar a producir su degradación, bien como consecuencia de la corrosión de la armadura de acero, bien por ataques agresivos directos sobre el propio hormigón, o bien por combinación de ambas acciones.

Las clases generales de exposición frente a la corrosión de las armaduras vienen definidas en el *cuadro 1*, mientras que las clases específicas de exposición relativas a otros procesos de degradación del propio hormigón, distintos de los de corrosión de armaduras, vienen definidas en el *cuadro 2*.

Una estructura de hormigón armado, o elementos de la misma puede estar sometida, aunque no necesariamente, a un tipo de ambiente definido por la combinación de una clase y subclase general de exposición de las señaladas en el cuadro 1 y, en su caso, a una o varias clases con su correspondiente subclase específica de exposición recogida en el *cuadro 2*.

## Acciones físicas

Un hormigón endurecido puede destruirse como consecuencia de acciones físicas de naturaleza muy diferente.

Al igual que ocurre con cualquier material permeable, el agua puede penetrar en el interior del hormigón y si ésta se hiela dará lugar a tensiones importantes de tracción que podrán destruirlo.

Si los áridos presentan coeficientes de dilatación térmica muy diferentes al de la pasta los cambios fuertes de temperatura crearán tensiones internas que microfisurarán al hormigón, reduciendo sus resistencias y acabando por destruirlo.

El calor de hidratación del cemento puede ocasionar que los núcleos de grandes macizos de hormigón se encuentren a temperaturas

**CUADRO 1**

CLASE GENERAL DE EXPOSICIÓN				DESCRIPCIÓN	EJEMPLOS
CLASE	SUBCLASE	DESIGNACIÓN	TIPO DE PROCESO		
no agresiva		I	ninguno	<ul style="list-style-type: none"> <li>• interiores de edificios, no sometidos a condensaciones</li> <li>• elementos de hormigón en masa</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• interiores de edificios, protegidos de la intemperie</li> </ul>
normal	humedad alta	IIa	corrosión de origen diferente de cloruros	<ul style="list-style-type: none"> <li>• interiores sometidos a humedades relativas medias altas (&gt;65%) o a condensaciones</li> <li>• exteriores en ausencia de cloruros y expuestos a lluvia en zonas con precipitación media anual superior a 600 mm.</li> <li>• elementos enterrados o sumergidos</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• sótanos no ventilados</li> <li>• cimentaciones</li> <li>• tableros y pilas de puentes con precipitación media anual superior a 600 mm.</li> <li>• elementos de hormigón en cubiertas de edificios.</li> </ul>
	humedad media	IIb	corrosión de origen diferente de cloruros	<ul style="list-style-type: none"> <li>• exteriores en ausencia de cloruros, sometidos a la acción del agua de lluvia, en zonas con precipitación media anual inferior a 600 mm.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Construcciones exteriores protegidas de la lluvia</li> <li>• tableros y pilas de puentes, en zonas de precipitación media anual inferior a 600 mm.</li> </ul>
marina	aérea	IIIa	corrosión por cloruros	<ul style="list-style-type: none"> <li>• elementos de estructuras marinas, por encima del nivel de pleamar</li> <li>• estructuras situadas en las proximidades de la línea costera (a menos de 5 km)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• edificaciones en las proximidades de la costa</li> <li>• puentes en las proximidades de la costa</li> <li>• zonas aéreas de diques, pantanales y otras obras de defensa litoral</li> <li>• instalaciones portuarias</li> </ul>
	sumergida	IIIb	corrosión por cloruros	<ul style="list-style-type: none"> <li>• elementos de estructuras marinas sumergidas permanentemente, por debajo del nivel mínimo de bajarar</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• zonas sumergidas de diques, pantanales y otras obras de defensa litoral</li> <li>• cimentaciones y zonas sumergidas de pilas de puentes en el mar</li> </ul>
	en zonas de mareas	IIIc	corrosión por cloruros	<ul style="list-style-type: none"> <li>• elementos de estructuras marinas situadas en la zona de carrera de mareas</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• zonas situadas en el recorrido de marea de diques, pantanales y otras obras de defensa litoral</li> <li>• zonas de pilas de puentes sobre el mar, situadas en el recorrido de marea</li> </ul>
con cloruros de origen diferente del medio marino		IV	corrosión por cloruros	<ul style="list-style-type: none"> <li>• instalaciones no impermeabilizadas en contacto con agua que presente un contenido elevado de cloruros, no relacionado con el ambiente marino</li> <li>• superficies expuestas a sales de deshielo no impermeabilizadas</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• piscinas</li> <li>• pilas de pasos superiores o pasarelas en zonas de nieve</li> <li>• estaciones de tratamiento de agua</li> </ul>

CUADRO 2

CLASE ESPECÍFICA DE EXPOSICIÓN				DESCRIPCIÓN	EJEMPLOS
CLASE	SUBCLASE	DESIGNACIÓN	TIPO DE PROCESO		
química agresiva	débil	Qa	ataque químico	<ul style="list-style-type: none"> <li>• elementos situados en ambientes con contenidos de sustancias químicas capaces de provocar la alteración del hormigón con velocidad lenta (ver cuadro 11.3)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• instalaciones industriales, con sustancias débilmente agresivas según cuadro 11.3</li> <li>• construcciones en proximidades de áreas industriales, con agresividad débil según cuadro 11.3</li> </ul>
	media	Qb	ataque químico	<ul style="list-style-type: none"> <li>• elementos en contacto con agua de mar</li> <li>• elementos situados en ambientes con contenidos de sustancias químicas capaces de provocar la alteración del hormigón con velocidad media (ver cuadro 11.3)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• dolos, bloques y otros elementos para diques</li> <li>• estructuras marinas, en general</li> <li>• instalaciones industriales con sustancias de agresividad media según cuadro 11.3</li> <li>• construcciones en proximidades de áreas industriales, con agresividad media según cuadro 11.3</li> <li>• instalaciones de conducción y tratamiento de aguas residuales con sustancias de agresividad media según cuadro 11.3</li> </ul>
	fuerte	Qc	ataque químico	<ul style="list-style-type: none"> <li>• elementos situados en ambientes con contenidos de sustancias químicas capaces de provocar la alteración del hormigón con intensidad rápida (ver cuadro 11.3)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• instalaciones industriales, con sustancias de agresividad alta de acuerdo con cuadro 11.3</li> <li>• instalaciones de conducción y tratamiento de aguas residuales, con sustancias de agresividad alta de acuerdo con cuadro 11.3</li> </ul>
con heladas	sin sales fundentes	H	ataque hielo-deshielo	<ul style="list-style-type: none"> <li>• elementos situados en contacto frecuente con agua, o zonas con humedad relativa media ambiental en invierno superior al 75%, y que tengan una probabilidad anual superior al 50% de alcanzar al menos una vez temperaturas por debajo de -5°C</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• construcciones en zonas de alta montaña</li> <li>• estaciones invernales</li> </ul>
	con sales fundentes	F	ataque por sales fundentes	<ul style="list-style-type: none"> <li>• elementos destinados al tráfico de vehículos o peatones en zonas con más de 5 nevadas anuales o con valor medio de la temperatura mínima en los meses de invierno inferior a 0°C</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• puentes o pasarelas en zonas de alta montañas</li> </ul>
erosión		E	abrasión cavitación	<ul style="list-style-type: none"> <li>• elementos sometidos a desgastes superficial</li> <li>• elementos de estructuras hidráulicas en los que la cota piezométrica pueda descender por debajo de la presión de vapor de agua</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• pilas de puente en cauces muy torrenciales</li> <li>• elementos de diques, patalanés y otras obras de defensa litoral que se encuentren sometidos a fuertes oleajes</li> <li>• pavimentos de hormigón</li> <li>• tuberías de alta presión</li> </ul>

más elevadas que las superficies con lo que al enfriarse, con el paso del tiempo, se contraerán y agrietarán.

La abrasión, erosión y cavitación, son formas de acciones físicas que terminan destruyendo al hormigón; algunas, como la cavitación, de una forma bastante notable.

Las piezas de hormigón de gran longitud, si se encuentran impedidas de deformarse libremente pueden figurarse al sobrevivir un descenso de temperatura si no disponen de juntas con la separación conveniente.

Las losas de carreteras de hormigón están sometidas a un gradiente térmico importante, haciendo que éstas puedan curvarse positiva o negativamente de acuerdo con las variaciones de temperatura que ocurran durante las veinticuatro horas del día, dando lugar a que se rompan al trabajar en bóveda bien directa o invertida.

El fuego puede considerarse como otra acción física de una gran capacidad destructora.

Por último, otra causa importante del deterioro del Hormigón lo constituye el efecto de cargas accidentales que pueden presentarse en la vida útil de la estructura, como lo son los terremotos y las explosiones.

### **Abrasión del hormigón**

La abrasión del hormigón en su superficie cuando sobre ella roza otro cuerpo o cuando sufre percusión. La abrasión de las superficies del hormigón puede ser debida a acciones de tipo mecánico provocadas por el aire, por el agua que lleve partículas sólidas en suspensión, o por la acción de elementos granulares deslizando sobre las superficies del hormigón.

Puede decirse que la resistencia al desgaste de un hormigón está relacionada con su resistencia a compresión. Cuando se trata de desgaste por rozamiento de pisadas o de tráfico ligero, la resistencia al desgaste de los áridos tiene una influencia superior a la propia resistencia o compresión del hormigón que pueda relegada a un segundo término; sin embargo, cuando se trata de acciones de percusión de pequeños objetos o partículas sólidas, la resistencia de unión de la pasta al árido juega el papel más importante.

Para fabricar un hormigón con elevada resistencia a la abrasión se recomienda:

- Que resistencia a compresión no sea inferior a  $30 \text{ N/mm}^2$ .
- Que los áridos sean duros, con textura superficial rugosa, elevada proporción de fracciones gruesas y que posean una buena granulometría.
- Duplicar la duración del curado sobre la indicada para hormigones normales.
- En caso de condiciones particularmente severas de abrasión utilizar terminaciones superficiales.

### **Acción del fuego sobre el hormigón**

Cuando el hormigón está sometido a la acción del fuego sus componentes sufren modificaciones importantes:

- A los  $100^\circ\text{C}$  el agua libre o capilar incluida en la masa del mismo empieza a evaporarse retardando de esta forma su calentamiento.
- Entre  $200^\circ\text{C}$  y  $300^\circ\text{C}$ , la pérdida de agua capilar es completa sin que se aprecien aún alteraciones en la estructura del cemento hidratado y sin que las resistencias disminuyan de forma apreciable.
- De  $300^\circ\text{C}$  a  $400^\circ\text{C}$  se produce una pérdida de agua del gel del cemento teniendo lugar una sensible disminución de las resistencias y apareciendo las primeras fisuras superficiales en el hormigón.
- A los  $400^\circ\text{C}$  una parte del hidróxido cálcico procedente de la hidratación de los silicatos se transforma en cal viva.
- Hacia los  $600^\circ\text{C}$ , los áridos, que no tienen todos el mismo coeficiente de dilatación térmica, se expanden fuertemente y con diferente intensidad dando lugar a tensiones internas que empiezan a disgregar al hormigón. Muchas veces esta expansión está incrementada por transformaciones estructurales ocurridas dentro de ciertos áridos.

Si analizamos los áridos desde el punto de vista mineralógico, tenemos que: los de tipo cuarzoso como el granito se fisuran por

encima de los 500°C; los no cuarzosos, como el basalto, no experimentan daños por la acción del calor; los ligeros naturales, debido a su estructura porosa y vítrea, se comportan muy bien frente a las altas temperaturas; los ligeros ratificales como las arcillas expandidas, escorias, etc., tienen una reacción frente al fuego muy similar a la de los áridos no cuarzosos; hay que tener presente que las temperaturas a las que han sido formados son muy superiores a; las del incendio.

Se ha comprobado también que hormigones con una buena granulometría y gran proporción árido/cemento, se comportan mucho mejor frente al fuego que los pobres en áridos y con deficientes curvas granulométricas.

El hormigón en proceso de elevación de temperaturas va sufriendo una serie de cambios de coloración, que pueden servir de índice de las pérdidas de resistencias y del cambio de condiciones experimentado.

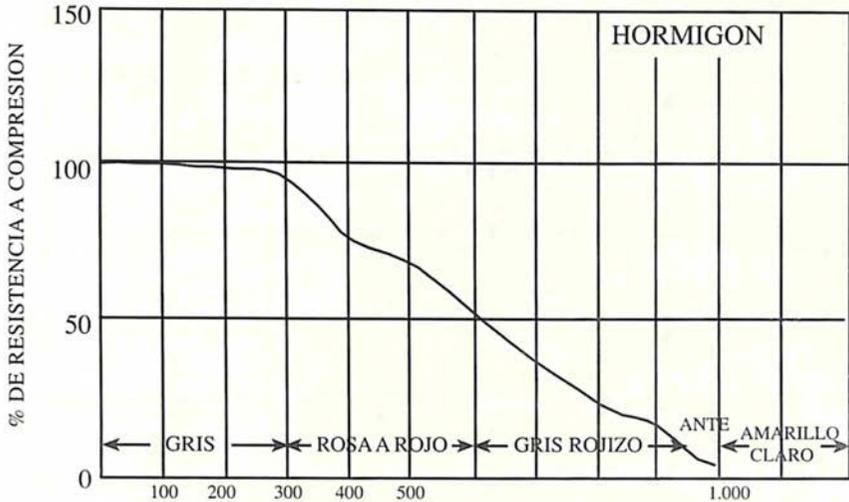
- A 200°C el color del hormigón es gris y no hay cambio apreciable en sus condiciones, existiendo una ligera disminución de la resistencia a compresión que a los 300°C puede valorarse por términos medio en un 10%, decreciendo progresivamente a partir de esta temperatura.

- De 300 a 600, el color cambia de rosa a rojo bajando la resistencia a compresión hasta valores de un 50% de valor primitivo, el módulo de elasticidad puede descender hasta en un 80% y la resistencia a tracción llega a tener un valor prácticamente despreciable.

- Entre 600 y 950°C el color cambia de nuevo a un segundo gris con puntos rojizos siendo índice de friabilidad y alta succión de agua, la resistencia a compresión para temperaturas comprendidas entre estos límites es muy pequeña.

- De 950 a 1000°C el color cambia a amarillo anaranjado o ante y el hormigón empieza a sintetizarse.

- Entre 1000 y 1200°C el hormigón sufre la sinterización tomándose su color a amarillo claro y anulándose prácticamente sus resistencias, el material queda totalmente calcinado y se deshace con facilidad a estas temperaturas.

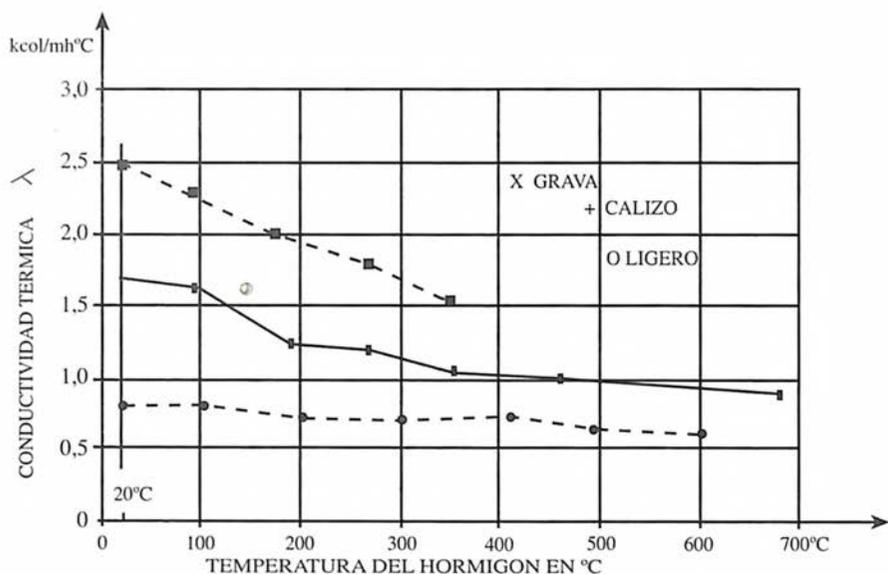
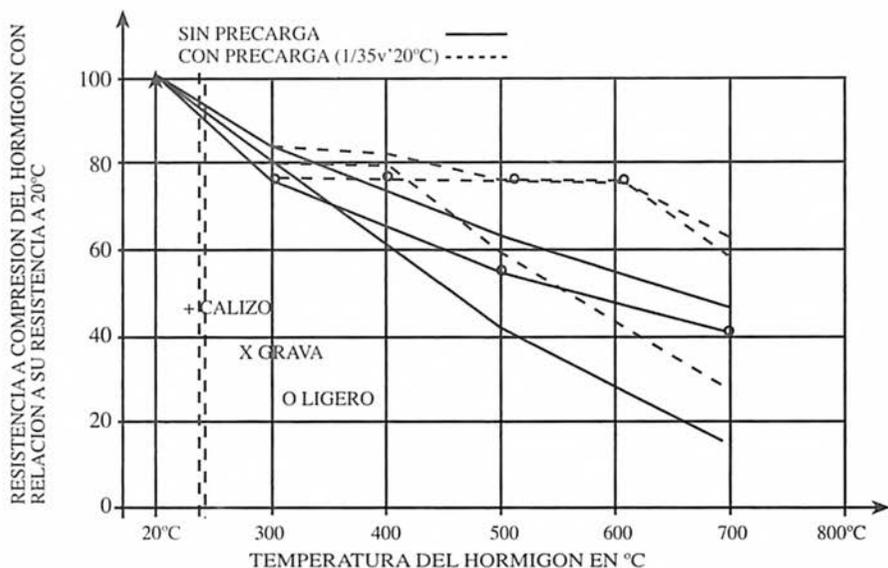


Los cambios descritos anteriormente son permanentes y las observaciones de color pueden ser hechas, lo mismo al día siguiente del incendio que a varias semanas e incluso meses de su extinción. Sin embargo, si la estructura ha estado sometida a temperaturas superiores a los 600°C y después actúa sobre ella el agua, la colaboración puede cambiar e inducirnos a error debido a los depósitos de limo que pueden producirse sobre ella.

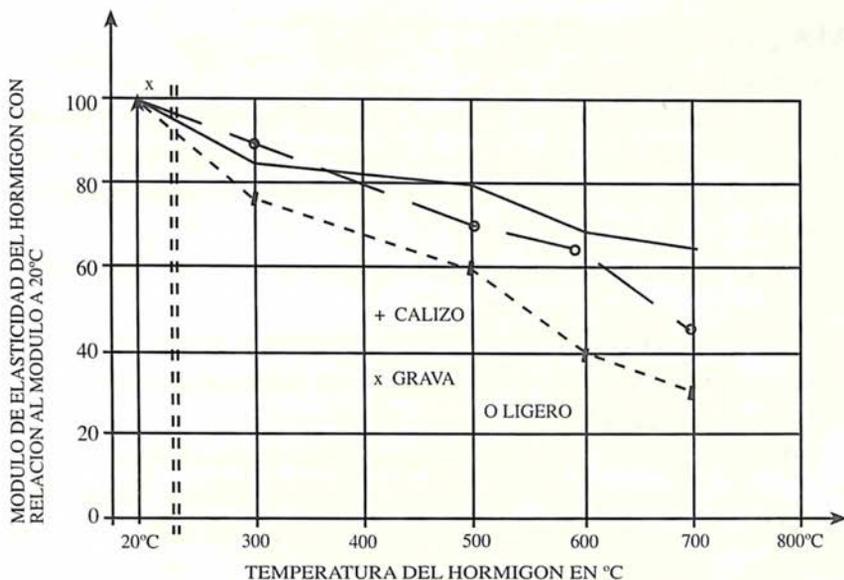
Si la temperatura del hormigón no ha sobrepasado los 500°C, éste puede experimentar una rehidratación posterior que puede hacerle recuperar hasta el 90% de su resistencia inicial al cabo de un año.

El cuadro recoge como influye la temperatura sobre la pérdida de resistencia del hormigón y los cambios de coloración del mismo.

TEMPERATURA	COLOR DEL HORMIGÓN	RESISTENCIA A COMPRESIÓN RESIDUAL (%)	MÓDULO DE ELASTICIDAD RESIDUAL (%)
20	Gris	100	100
200	Gris	95	70
300	Rosa	95	50
400	Rosa	80	38
500	Rosa	75	35
600	Rojo	55	20
900	Gris-rojizo	10	0
1.000	Amarillo-anaranjado	0	0



Debido a su baja conductividad térmica, el calentamiento del hormigón por el fuego afecta sólo a las capas superficiales o más externas del mismo, alcanzándose temperaturas que pueden poner en peligro su integridad sólo hasta profundidades de 50 a 100 mm salvo que el incendio tenga una gran duración.



Existen diferentes opiniones acerca del efecto de la humedad en el comportamiento del hormigón frente al fuego. De forma general puede estimarse que un contenido de humedad del 1% incrementa la resistencia al fuego de un 4 a 5% en volumen, y la porosidad del hormigón es escasa, la rápida evaporación puede ocasionar grandes tensiones que provocarán desprendimientos de las esquinas de las piezas, exfoliaciones superficiales y pérdidas de recubrimientos en el caso de hormigón armado.

En general puede afirmarse que el comportamiento al fuego de un hormigón será tanto mejor cuanto más concurren en él las siguientes condiciones:

- Empleo de áridos de menor coeficiente de dilatación térmica.
- Buena granulometría con alta proporción de finos.
- Utilización de áridos ligeros o calizos.
- Buena compactación del mismo.
- Baja conductividad térmica.
- Alta resistencia a tracción.
- Contenido bajo de humedad.
- Empleo de cementos de escorias o puzolánicos, especialmente estos últimos por la facultad que tienen de fijar la cal liberada.

## ATAQUES QUÍMICOS

### Proceso de ataque

La resistencia que presenta el hormigón al ataque químico por determinadas sustancias, e incluso por el agua pura, depende de su permeabilidad y de la distribución y tamaño de sus poros.

La agresión química puede realizarse de dos formas fundamentales:

- Por disolución de los compuestos fácilmente solubles del propio hormigón o por la formación de sales también solubles y extracción de las mismas.

- Por ataque con formación de compuestos insolubles de mayor volumen que los primitivos y que al recrystalizar dentro del sistema capilar dan lugar a una expansión que produce tensiones mecánicas capaces de destruir al hormigón.

Hay que considerar también a algunas sustancias perjudiciales que acompañan al agua de amasado y que, incluso, en débil concentración, pueden dañar al hormigón al actuar negativamente sobre el proceso de hidratación del cemento.

La agresividad de un determinado producto químico se incrementa, cuando:

- la temperatura del mismo aumenta
- la velocidad del fluido agresivo en contacto con el hormigón crece
- el hormigón presenta una compactación deficiente
- ha tenido un mal curado
- hay alternancias de humedad y sequedad
- las armaduras se encuentran corroídas, etc.

Esta agresividad disminuye si:

- se ha empleado en el hormigón una relación agua / cemento baja
- el tipo y contenido de cemento son adecuados al medio
- el hormigón tiene baja absorción y permeabilidad.

El grado de agresividad de los productos químicos, según se indica a modo de guía en el cuadro.

VELOCIDAD DE ATAQUE A 20° C	ÁCIDOS INORGÁNICOS	ÁCIDOS ORGÁNICOS	SOLUCIONES ALCALINAS	SOLUCIONES SALINAS	VARIOS
Rápida	Clorhídrico Fluorhídrico Nítrico Sulfúrico	Acético Láctico Fórmico	Cloruro de aluminio		
Lenta	Fosfórico	Tánico	Hidróxido sódico >20%	Nitrato amónico sulfatos amónicos, sódico, magnésico, cálcico.	Bromo (gas)
Lenta	Carbónico		Hidróxido Sódico 10 a 20% Hipoclorito sódico	Cloratos amónico y magnesio cianuro sódico	Cloro (gas) Agua de mar
Despreciable		Oxálico Tartárico	Hidróxido sódico <10% hipoclorito sódico hidróxido amónico	Cloruros cálcico y sódico nitrato de zinc Cromato sódico	Amoniaco (líquido)

### Ataque por Ácidos

El hormigón no posee buena resistencia frente a los ácidos, aunque tolere bien a los débiles.

La actividad de un ataque por ácidos, aunque tolere bien a los débiles.

Desde el punto de vista de su naturaleza se puede considerar los ácidos inorgánicos y los orgánicos.

De acuerdo con el pH de la disolución, ésta se puede considerar como débilmente agresiva si aquel está comprendido entre 6,5 y 5,5; fuertemente agresiva si lo está entre 5,5 y 4,5 y, altamente agresiva si es menor de 4,5.

## Ácidos inorgánicos

Los gases procedentes de la combustión de muchos combustibles contienen  $SO_2$  que con la humedad ambiente se transforma en ácido sulfúrico.

El agua de montaña suele ser muy pura pero en general lleva en disolución  $CO_2$  siendo, por tanto, algo ácida y atacando a las superficies del hormigón. Las de zonas urbanas e industriales suelen tener  $CO_2$  y ácido sulfuroso que al pasar en presencia de bacterias a ácido sulfúrico atacan más enérgicamente.

Mencionemos algunos de los más peligrosos para el hormigón:

- Ácido clorhídrico. Es peligroso cualquiera que sea su concentración.

- Ácido sulfhídrico. Es ligeramente agresivo. El peligro mayor del sulfhídrico es que se puede oxidarse a sulfúrico.

- Ácido sulfúrico. El ácido sulfúrico es peligroso en cualquier concentración.

- Ácido sulfuroso.

- Ácido carbónico. Se forma por disolución acuosa del anhídrido carbónico procedente de la combustión de carbones y otros combustibles.

- Ácido fosfórico.

- Ácido fluorhídrico. En pequeñas cantidades actúa como protector, pero en grandes puede producir daños importantes.

- Ácido nítrico. Su efecto es muy perjudicial.

- Ácido fosfórico.

- Ácido fluorhídrico. En pequeñas cantidades actúa como protector, pero en grandes puede producir daños importantes.

- Ácido brómico y crómico.

## Ácidos orgánicos

- Ácido acético.

- Ácido oxálico. Es un ácido fuerte. Su acción cierra los poros del hormigón protegiéndolo contra nuevos ataques. Se emplea en tratamientos protectores de superficie del hormigón.

- Ácido tánico. Es un ácido débil y muy poco agresivo.

- Ácido fórmico. Se trata de un ácido moderadamente fuerte.

- Ácido húmico. Es un ácido débil.

## Otras sustancias

Además de los ácidos descritos anteriormente, hay otras muchas sustancias que no siendo ácidos pueden reaccionar con el hidróxido de calcio del hormigón formando las sales correspondientes, algunas de las cuales pueden producir daños en el hormigón si por su naturaleza son fácilmente lavables o expansivas, entre ellas caben destacarse las siguientes:

- Azúcares. Influyen, aún en pequeñas concentraciones, retardando el fraguado y endurecimiento del hormigón e incluso, si su concentración es alta, inhibiendo el fraguado del cemento.

- Alcoholes. Tanto el alcohol metílico como el etílico son fuertemente agresivos.

- Aldehídos. No son agresivos; sin embargo, la disolución de formaldehído da lugar a la formación de ácido fórmico que es moderadamente agresivo.

## Ataque por aguas puras

Las aguas puras o blandas procedentes de deshielo o de lluvias en zonas no industriales, tienen una gran capacidad de disolución sobre el hidróxido de calcio. La agresividad de esta agua depende de su pureza, es decir, de la carencia de sustancias disueltas.

La agresividad del agua de lluvia se ve incrementada por el contenido de anhídrido carbónico y aún más por el de anhídrido sulfuroso procedente de los gases de combustión; en ambos casos, aparte de ser aguas blandas son además ácidas.

A veces, en obras atacadas por aguas puras aparecen estalactitas blanquecinas de calcita producidas por el arrastre hacia el exterior de la cal disuelta, evaporación del agua, cristalización y carbonatación.

## Ataque por sales orgánicas e inorgánicas

Los ataques de las sales en el hormigón se producen principalmente, con la oxidación de los refuerzos metálicos del mismo. El aumento de volumen por el proceso de oxidación provoca tensiones en el hormigón, que llegan a vencer su resistencia a la tracción y producen el agrietamiento y desprendimiento del mismo.

Pueden ser sales orgánicas o inorgánicas.

## **Ataque por sulfatos**

El ataque del hormigón por sulfatos es una de las causas de agresión más peligrosas, produciendo la desagregación de este material.

Los suelos pueden tener sulfato de sodio, de potasio, de magnesio o de calcio.

Las aguas de mar poseen sulfato de sodio y de magnesio, entre otros. Las aguas residuales de procesos industriales pueden poseer igualmente una gran variedad de sulfatos.

## **Corrosión del hormigón armado**

La corrosión del hormigón armado se produce mediante un mecanismo electroquímico o galvánico del acero de los barras que forman la armadura. Este proceso está influenciado por las características propias del hormigón y por la distancia a que se encuentren dichas barras de la superficie libre del hormigón o "recubrimiento".

En el proceso de oxidación de un metal (diferente al de corrosión electroquímica), el oxígeno presente en la atmósfera se combina con el metal dando lugar a una película superficial de óxido de metal. Si esta película es porosa o fácilmente eliminable, el proceso de oxidación continúa y el metal perderá sección, como ocurre en el caso del acero; si por el contrario, la película es muy densa, cerrada y bien adherida a la superficie, ésta impedirá que la corrosión progrese protegiendo por tanto al metal, como ocurre, por ejemplo, con el aluminio.

La oxidación del acero tal como se ha escrito, y a temperatura ambiente es muy lenta si el aire es seco, pero puede ser rápida interrumpida debido a que la capa de producto formado, procedente de la corrosión, es porosa y suelta, dando lugar a que la corrosión prosiga en el acero por debajo de la capa de óxido formada.

En el seno del hormigón la presencia de humedad y oxígeno dan lugar a que se origine una corrosión galvánica o electroquímica, al existir agua que forma el electrolito de la pila galvánica, y que puede verse muy acelerada por la presencia de cloruros u otros iones que aumenten la conductividad de este electrolito.

La profundidad de penetración del  $\text{CO}_2$  es función no sólo del tiempo sino también de la porosidad del hormigón. Como se sabe la porosidad depende del contenido de cemento, de la relación a/c, de la compactación y del curado del hormigón.

El tiempo necesario para que el frente de penetración del  $\text{CO}_2$  alcance al plano de las barras y por tanto las desactive, va a depender de la porosidad del hormigón y del espesor del recubrimiento de las barras de acero. Al principio la velocidad de penetración del  $\text{CO}_2$  es rápida, algunos milímetros al año, pero conforme va avanzando se va tornando más lenta, pudiendo llegar a alcanzar una profundidad de 5 cm unos 100 años en un hormigón bueno o 20 años en uno de baja calidad.

La carbonatación del hormigón y, por tanto la reducción del pH en el mismo depende de la humedad del aire, siendo máxima para un 60% de humedad relativa y prácticamente de un 20% en un ambiente seco y saturado.

La presencia de iones cloro en el hormigón puede proceder además de por difusión desde el exterior al interior (fenómeno típico de ambientes salinos), por acompañamiento a los propios materiales componentes de hormigón, agua, áridos, aditivos, etc.

La corrosión generalizada se produce como un proceso que abarca a todo el metal de una zona que sufre el efecto corrosivo de forma homogénea y en toda su superficie, dando lugar a la formación de herrumbre con un incremento de volumen muy importante y que se traduce en fuertes tensiones en el hormigón, que puede llegar a  $40\text{Nmm}^2$ , ocasionalmente figuración, disgregación del hormigón y pérdida de adherencia de este con las barras de acero.

Como medidas a tomar frente a la corrosión de las armaduras de carero hay que señalar que la primera consiste en hacer un buen hormigón con unos componentes de calidad, con una dosificación de cemento por encima de la mínima y una relación a/c máxima. Es imprescindible, además, una buena compactación y curado del hormigón.

La segunda medida consiste en dar un espesor de recubrimiento adecuado a las barras de acuerdo también con el medio en que esté la estructura.

El curado del hormigón juega también un papel muy importante en la impermeabilidad del hormigón del recubrimiento.

En el caso de que las condiciones ambientales sean muy severas existe la posibilidad de tratar las superficies del hormigón mediante productos protectores.

## **Fisuración del hormigón**

Uno de los inconvenientes que cabe ponerle al hormigón es la relativa facilidad con que se fisura y que es consecuencia de su baja resistencia a tracción y reducida tenacidad. La figuración parece ser la característica más negativa del hormigón.

Las fisuras en el hormigón pueden ponerse de manifiesto al cabo de algunas horas, de semanas, de meses e incluso al cabo de años de ser colocado.

Las causas de la figuración pueden ser muy variadas y la determinación de su origen no siempre es fácil aunque, en general, puede decirse que las mismas causas producen idénticos tipos de fisuras.

Hay que señalar que las fisuras de amplitud inferior a 0,05 mm se consideran como microfisuras y no son más, las que impiden que el hormigón sea capaz de resistirlas.

A veces la figuración es consecuencia de una acción aislada, en otras ocasiones, lo es de varias acciones combinadas; así, una microfisuración de origen estático puede ser la puerta de entrada de agentes agresivos que corroyendo las armaduras den lugar a una figuración más enérgica.

Los factores que provocan la figuración son muy distintos, algunos de ellos pueden ser los siguientes:

1. Alto contenido de agua en el hormigón. Cuanto mayor es el contenido de agua mayor es la retracción hidráulica y por tanto la posibilidad de que aparezcan fisuras, de aquí que haya de respetarse los contenidos máximos de relación agua/cemento.

2. Alta dosificación de cemento. Esta da lugar a la necesidad de tener que emplear más agua con lo cual aparecen los mismos problemas anteriores. Es conveniente recordar que los mejores hormigones son aquellos que proporcionan las características de resistencia y durabilidad deseadas con el menor consumo posible de cemento.

3. Alto calor de hidratación del cemento. Un contexto excesivo de cemento especialmente si éste es rico en silicato tricálcico, desprende una gran cantidad de calor que puede ocasionar tensiones térmicas diferenciales que sobrepasen la resistencia a tracción del hormigón especialmente a edades tempranas.

4. Los ciclos de sequedad y humedad debidos al sol y la lluvia dan lugar a concentraciones y expansiones que pueden originar tracciones que causen la figuración.

5. Las reacciones de los alcalinos del cemento con determinados áridos de naturaleza silíceas pueden dar lugar a la formación de geles que originan presiones internas que provoquen la rotura del hormigón.

6. Los cambios de temperatura. El hormigón en verano puede alcanzar 50°C y en invierno temperaturas inferiores a -10°C. Estas variaciones pueden crear acortamientos que, si están impedidos, provoquen la figuración del hormigón.

7. El viento seco y caliente actuando sobre el hormigón recién puesto en obra provoca una pérdida rápida de agua que da lugar a una retracción superficial que lo fisura.

8. Los ciclos hielo-deshielo, además de cambios de temperaturas, producen tensiones internas provocadas por la acción del agua al helarse en los poros del hormigón. Igualmente ocurre en el caso del empleo de sales de deshielo que son absorbidas en disolución por los poros del hormigón donde luego cristalizan generando tensiones que pueden crear fisuras.

9. El ataque de los sulfatos sobre el aluminato tricálcico hidratado del hormigón da lugar a la formación de ettingita expansiva que crea tensiones internas de tal intensidad que con facilidad destruyen al hormigón previa figuración del mismo.

10. Los movimientos de las estructuras debidos a asentamientos diferenciales, o a la existencia de suelos expansivos, produce fisuras muy características del hormigón.

11. Los excesos de cargas, bien estáticas, provocan igualmente la figuración del hormigón.

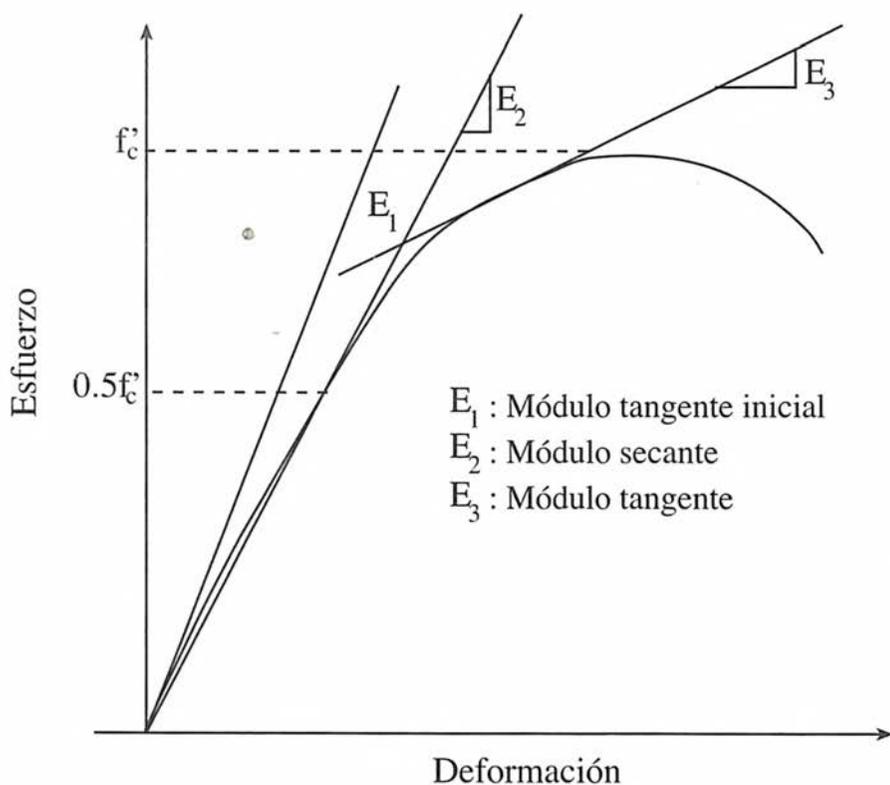
12. La corrosión de las armaduras en el hormigón armado y especialmente cuando éste está situado en ambiente marino es una

causa de fuerte figuración debida a la expansión que experimenta el acero al corroerse.

## Daños por terremotos

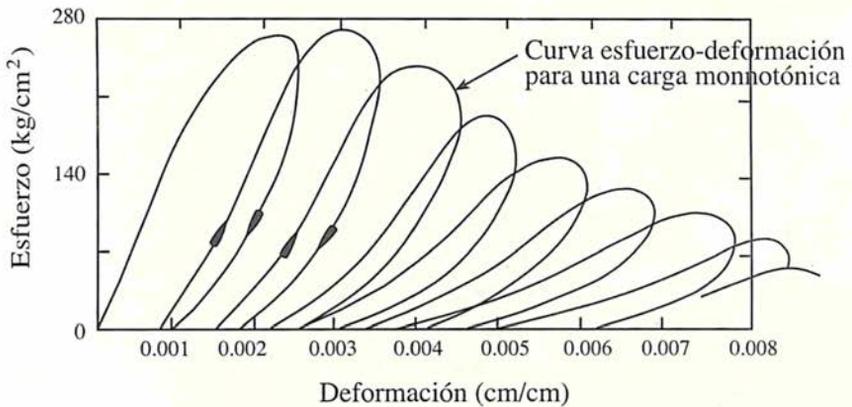
Los terremotos dependiendo de su magnitud, imponen al Hormigón deformaciones obligadas, las cuales pudieran estar a dentro de la zona donde este se comporta como un material cuasi-elástico y por tanto no reproducen daños de importancia, ni deformaciones permanentes (caso de sismos de pequeña Magnitud) o deformaciones grandes que lo llevan a su rango de comportamiento no lineal o cuasi-plástico (sismos grandes), lo que hace que en este se produzcan agrietamientos importantes y quede con deformaciones permanentes. *Ver fig. 1*

FIG. 1. CURVA CARACTERÍSTICA DEL HORMIGÓN.



Además de estas denominaciones obligadas producidas por los sismos, están las vibraciones o alteraciones de cargas, o sea el sismo contrario, lo que en términos generales produce ciclos de cargas y descargas o sea desde el punto de vista de esfuerzos ciclos de tracciones y compresiones que unido a las grandes deformaciones produce fallas que se conocen como de bajo ciclaje. Ver fig. 2

FIG. 2. CURVA ESCUERZO-DEFORMACIÓN DE UN ESPECIMEN DE CONCRETO SOMETIDO A CARGAS CÍCLICAS



Estas roturas en forma de grietas aparecen en las estructuras que han sufrido sismos durante su vida útil, lo que hace que su rigidez y resistencia disminuya para soportar otros eventos sísmicos, así como también las cargas gravitacionales normales a la que esa sometida en su uso diario.

## PATOLOGÍAS DE LAS EDIFICACIONES

### REPARACIONES DE EDIFICACIONES

#### Introducción

El concreto de cemento Pórtland ha probado ser el material de construcción más adecuado para las estructuras, superando con grandes ventajas otras alternativas viables, como madera, acero o albañilería.

Desde los inicios del empleo del concreto armado, creado en Francia en 1849 por Monier, los edificios, obras de arte, carreteras, canales y otras construcciones civiles en concreto armado o presentado han resistido las más variadas sobrecargas y acciones del medio ambiente.

No obstante el concreto pudiera ser considerado un material prácticamente eterno, siempre que reciba un mantenimiento y programado, hay construcciones que presentan manifestaciones patológicas de significativa intensidad e incidencia, acompañadas de elevados costos para su reparación. Siempre hay compromiso de los aspectos estéticos y en la mayoría de los caos, reducción de la capacidad resistente, pudiéndose llegar en ciertas situaciones, al colapso parcial o total de la estructura.

Ante estas manifestaciones patológicas se observa en general una actitud inconsecuente, que conduce en unos caos a simples reparaciones superficiales, y en otros a demoliciones o refuerzos injustificados. Ninguno de los dos extremos es recomendable, con la existencia hoy día de gran cantidad de técnicas y productos desarrollados específicamente para solucionar estos problemas.

Considerando el grado actual de conocimiento de los procesos y mecanismos destructivos que actúan sobre las estructuras y considerando la gran evolución tecnológica experimentada en estos últimos años, con el desarrollo de equipos y técnicas de observación de las estructuras, es posible diagnosticar con éxito la mayoría de los problemas patológicos.

**La Patología** puede ser definida como la parte de la ingeniería que estudia los síntomas, los mecanismos, las causas y los orígenes de los defectos de las obras civiles, o sea, es el estudio de las partes que componen el diagnóstico del problema.

A la **Terapia** le corresponde el estudio de la corrección y la solución de estos problemas patológicos. Para obtener éxito en las medidas terapéuticas, es necesario que el diagnóstico del problema, haya sido claramente definido.

## **Patología**

El diagnóstico adecuado y completo es aquel que esclarece todos los aspectos del problema, o sea:

a) **Síntomas.** Los problemas patológicos, salvo raras excepciones, presentan manifestaciones externas características, a partir de las cuales se puede deducir cual es la naturaleza, el origen y los mecanismos de los fenómenos involucrados, así como estimar sus probables consecuencias. Estos síntomas, también denominados lesiones, daños, defectos o manifestaciones patológicas, pueden ser descritos y clasificados, orientando un primer diagnóstico, a partir de detalladas y experimentadas observaciones visuales y con análisis químicos y físicos de la estructura en cuestión.

b) **Mecanismo.** Todo problema patológico, llamado en lenguaje jurídico de vicio oculto o vicio de construcción (daño oculto), ocurre a través de un proceso, de un mecanismo.

Conocer el mecanismo del problema es fundamental para una terapia adecuada. Es imprescindible saber por ejemplo, que deben ser limitadas las sobrecargas o reforzar las vigas cuando las fisuras son consecuencias del momento flexionante. En este caso no basta con la inyección de las fisuras pues estas podrían aparecer nuevamente en posiciones muy próximas a las iniciales.

c) **Origen.** El proceso de construcción y uso puede ser dividido en cinco grandes etapas: planeación, proyecto, fabricación de materiales y elementos fuera de la obra, ejecución propiamente dicha, y uso; esta última etapa más larga en el tiempo, involucra la operación y mantenimiento de las obras civiles.

Si por un lado las cuatro primeras etapas representan un período de tiempo relativamente corto, la duración de la obra, por otro lado, las construcciones deben ser utilizadas durante períodos largos, en general más de cincuenta años para edificaciones y más de doscientos para presas y obras de importancia social.

Los problemas patológicos se manifiestan, normalmente, después de la ejecución propiamente dicha, última etapa de la fase de producción. Ocurren con mayor incidencia en la etapa de uso.

Un diagnóstico adecuado del problema debe indicar en que etapa del proceso constructivo tuvo origen el fenómeno. Pro ejemplo, una fisura de momento flexionante en vigas, tanto pudo ser por un diseño inadecuado, como por la calidad inferior del acero usado; tanto por la mala ejecución con un concreto de resistencia inadecuada, como

por la mala utilización que se hace del elemento, con la colocación sobre la viga, de cargas mayores a las previstas inicialmente. Para cada origen del problema existe la terapia más adecuada, aunque el fenómeno y los síntomas puedan ser los mismos.

Cabe resaltar que la identificación del origen del problema permite también identificar, para fines judiciales, quién cometió la falla. Así, si el problema tuvo origen en la fase de proyecto, el proyectista faltó; cuando el origen está en la calidad del material, fue el fabricante quien faltó; cuando el origen está en la calidad del material, fue el fabricante quien faltó, si en la etapa de ejecución, se trata de falta de la mano de obra, omisión de su supervisión o de la constructora; si en la etapa de uso, la falta es de operación y mantenimiento.

d) **Consecuencias.** Un buen diagnóstico se completa con algunas consideraciones sobre las consecuencias del problema en el comportamiento general de la estructura, o sea, un pronóstico del problema.

Debemos separar las consecuencias en dos tipos: las que afectan la seguridad de la estructura (asociadas al estado límite último) y las que afectan condiciones de servicio y funcionamiento de la edificación.

En general, los problemas patológicos son evolutivos y tienen a agravarse al transcurrir el tiempo, además de arrestar otros problemas con el inicial.

Las correcciones serán más durables, más efectivas, más fáciles de ejecutar y mucho más económicas, cuanto más temprano se ejecutan. Esto lo vemos con la "ley de Setter" que prevé los costos accidentes según una progresión geométrica.

Una interpretación adecuada de cada uno de estos períodos puede ser la que sigue:

• **Proyecto**

Toda medida tomada a nivel de diseño con el objetivo de aumentar la protección y durabilidad de la estructura, implica un costo que podemos asociar al número 1.

• **Ejecución**

Toda medida fuera del proyecto, tomada durante la ejecución propiamente dicha, incluyendo en ese período la obra recién construida,

implica un costo 5 (cinco) veces superior al costo que se hubiese, ocasionado si esta medida hubiera sido tomada a nivel de diseño, para lograr el mismo "grado" de protección y durabilidad de la estructura.

• **Mantenimiento preventivo**

Toda medida tomada con antelación y previsión, durante el periodo de uso y mantenimiento de la estructura, puede ser asociada a un costo de 5 veces menor que aquel necesario para la corrección de los problemas generados a partir de una intervención no preventiva tomada con precedencia a la manifestación explícita de patología. Al mismo tiempo estará asociada a un costo 25 veces superior a aquel que habría ocasionado una decisión de proyecto para la obtención del mismo "grado" de protección y durabilidad de la estructura.

• **Mantenimiento correctivo**

Corresponde a los trabajos de diagnóstico, pronóstico, reparación y protección de las estructuras que ya presentan manifestaciones patológicas, o sea, corrección de problemas evidentes. A estas actividades se les puede asociar un costo 125 veces superior al costo de las medidas que podrían haber sido tomadas a nivel de proyecto y que redundarían en un mismo 'grado' de protección y durabilidad que se estime de la obra a partir de la corrección.

## **Terapia**

Las medidas terapéuticas de corrección de los problemas pueden tanto incluir pequeñas reparaciones localizadas, como una recuperación generalizada de la estructura. Es siempre recomendable, que después de cualquier intervención, sean tomadas medidas de protección de la estructura, con la implantación de un programa de mantenimiento periódico. Este programa debe tener en cuenta la vida útil prevista, la agresividad de las condiciones ambientales de exposición y la naturaleza de los materiales, y medidas protectoras adoptadas.

Dentro de las terapias más utilizadas se encuentran:

- I. Sustituciones del hormigón dañado.
- II. Inyecciones de resinas epóxicas.
- III. Regruesamientos de columnas.
- IV. Refuerzos de columnas con acero y/o fibras de carbono
- V. Refuerzos de vigas con bandas de hacer pegadas.
- VI. Refuerzos de vigas a cortante con acero y/o fibras de carbono.
- VII. Refuerzos de zapatas. .
- VIII. Adición de nuevos elementos estructurales.
- IX. Refuerzos con cables tensados.

Estas terapias no son limitativas y se podrán utilizar cualquier combinación de ellas dentro de la misma edificación y en casos, dentro del mismo elemento.

## Procedimiento

La selección de los materiales y la técnica de corrección a ser empleada depende del diagnóstico del problema, de las características de la zona a ser corregida y de las exigencias de funcionamiento del elemento que va a ser objeto de la corrección.

Corresponde al estructuralista y al especialista de reparaciones, escoger los tipos de reparación, el procedimiento de ejecución y los materiales a utilizar en cada caso particular, para asegurar un comportamiento adecuado de los elementos estructurales a reparar y de las edificaciones en su conjunto.

## Bibliografía

- M. Fernández Canovas. *Patología y Terapéutica del Hormigón Armado*. 3ra Edición.
- J. Calavera Ruiz. *Patología de Estructuras de Hormigón Armado y Pretensado*.
- Paulo R. Do Lago Helene. *Manual para reparación, refuerzo y protección de las estructuras de concreto*.
- Coloquio. *Memorias de los Trabajos*.
- CYTED. *Manual de inspección, evaluación y diagnóstico de corrosión en estructuras de hormigón armado*.