

---

# CAPÍTULO 3

---

## **Capítulo 3 - ESTADO DEL CONOCIMIENTO**

- 3.1 Introducción
- 3.2 Patologías en puentes de hormigón armado y pretensado
  - 3.2.1 -Ciclos hielo y deshielo
  - 3.2.2 -Ataques químicos
  - 3.2.3 -Abrasión
  - 3.2.4 -Corrosión de la armadura
  - 3.2.5 -Carbonatación
  - 3.2.6 -Reacciones químicas de los agregados
  - 3.2.7 -Hormigón en medio marino
  - 3.2.8 -Fisuración
  - 3.2.9 -Acción del fuego
  - 3.2.10 -Acciones excepcionales
- 3.3 Consideraciones sobre seguridad estructural y vida útil
  - 3.3.1 Introducción
  - 3.3.2 Fallos en estados límites
  - 3.3.3 Evaluación estructural
- 3.4 Tipos de Actuación y Elementos a reparar
- 3.5 Materiales de reparación
  - 3.5.1 Introducción
  - 3.5.2 Productos a utilizar

## CAPITULO 3

### ESTADO DEL CONOCIMIENTO

#### 3.1- INTRODUCCIÓN

El presente capítulo pretende brindar una panorámica general sobre los aspectos más relevantes en relación a las patologías en estructuras de hormigón, su detección y las posibles técnicas de reparación y refuerzo, así como otras consideraciones relacionadas con la vida útil de puentes existentes y que pueden ser de aplicación a otros tipos de edificaciones.

Históricamente, la presentación de problemas, lesiones ó patologías en las estructuras son tan antiguos como el inicio mismo de la construcción; habiendo registro de éstas desde hace muchísimos siglos. En la historia reciente, alrededor de 1856 en Inglaterra surgían iniciativas para llevar un registro sistemático sobre problemas de ingeniería civil [Fernández Cánovas, 1994]. Asimismo, en los EE.UU. en 1918 aparece una publicación sobre problemas en construcciones de hormigón, según el origen mismo del problema. [Miravete, 1994].

#### 3.2- PATOLOGÍAS EN PUENTES DE HORMIGON ARMADO Y PRETENSADO

Es normal que con el paso del tiempo los puentes existentes sufran el deterioro de sus componentes por la acción de: las cargas, el clima, elementos contaminantes, movimientos sísmicos, impactos, explosiones, etc. Con la Reparación y Refuerzo de puentes se obtiene un aumento o recuperación (según sean las necesidades) de la capacidad portante del mismo, con lo que podrán llegar al final de la vida útil prevista.

La magnitud de daños que puede presentar un puente y su complejidad, hacen que la mecánica de inspección y diagnóstico y el plan de intervención no sean tan simples de seleccionar.

Al ser tan amplio el rango de posibilidades en la cuantía de daños, no se puede aplicar una sola metodología para resolver la patología en ese momento estudiada. Se hace necesario entonces, adecuarse a la magnitud propia de cada caso; con lo que se pueden hacer desde diagnósticos inmediatos, hasta casos en los que se deban hacer análisis y ensayos específicos debido a la complejidad del problema.

Sea cual fuere el caso, el conocimiento de los registros de la obra en su ejecución es de particular importancia, ya que a partir de toda la información durante construcción se contará con elementos de juicio sólidos, que permitirán adoptar la mejor decisión posible.

Dentro del trabajo de detección de patologías en puentes se tienen que desarrollar tareas que permitan lograr un sistema de reparación fiable y competitivo frente a sistemas tradicionales; así mismo, la durabilidad de la reparación puede aumentar mediante el empleo de revestimientos protectores específicos.

La primera tarea dentro de un sistema de reparación será realizar la inspección de obra para determinar el estado de servicio que permita mantener un nivel de seguridad, confort y la durabilidad prevista bajo unas condiciones normales de explotación.

Inicialmente el objetivo de la inspección de obra sirve, como ya se ha comentado, para determinar el estado de servicio. Al inspeccionar, además de establecer medidas que garanticen la seguridad de los usuarios, habrá que:

- Identificar las causas que provocan o provocaron ese deterioro
- Conocer la dimensión del deterioro en cuanto a los efectos sobre las propiedades físicas y mecánicas de los materiales así como delimitar las zonas a reparar.
- Estudiar la variación en el tiempo de las condiciones a las que esta sujeta la obra, como por ejemplo:
  - a) Evolución del lecho del curso de agua en relación con la extracción de materiales y que provoquen erosiones en los puentes.
  - b) Fuerte aumento de la circulación de grandes cargas sobre una estructura.
  - c) Accidentes como fuego o impacto de vehículos.

Como resultado de esta investigación se tendrá un conocimiento de las actuales características resistentes y funcionales de la estructura. Este conocimiento permitirá proponer una reparación o un refuerzo de la misma junto a unas posibles medidas preventivas.

Para empezar el análisis de una estructura se deberá realizar un examen visual asociado con la toma de medidas "in situ" que cuantifiquen el deterioro y asimismo extraer cuanta información ayude a interpretar los desperfectos. El procedimiento típico de estudio de una estructura en forma esquemática se presenta en la figura 3.1, correspondiente a la inspección de un puente de vigas. Se citan las patologías que indican mal estado de funcionamiento.

Cuando se examina la estructura se deberán:

- localizar todas las zonas dañadas
- clasificarse por tipologías todos los desperfectos existentes
- tomarse datos para elaborar unos planos de daños donde se reflejen la localización y tipo de daño para poder luego decidir que zonas serán ensayadas

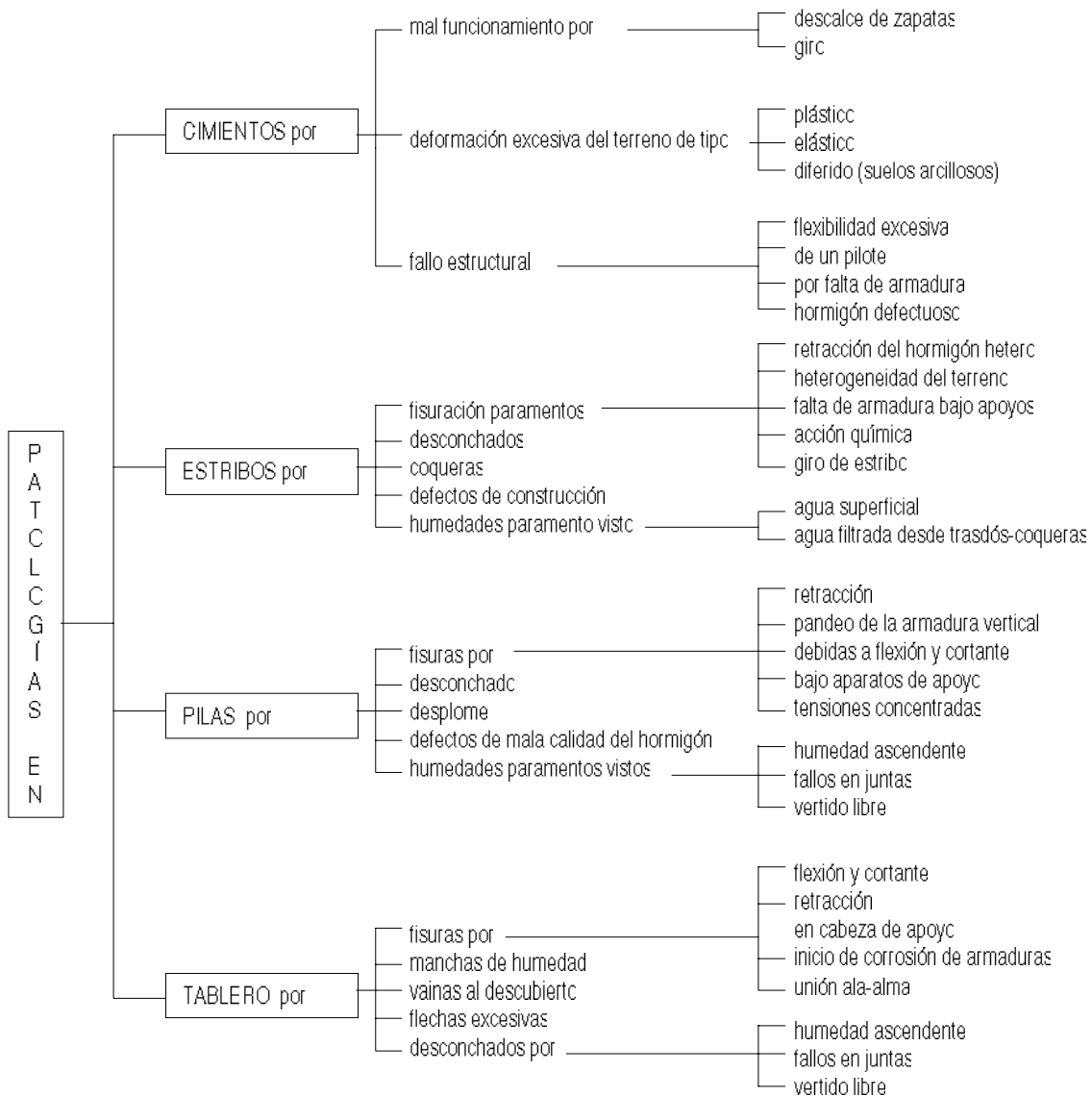


Figura 3.1 Procedimiento de inspección. [Sanz, 1984]

Partiendo del *PROBLEMA* que se da en un puente existente (hormigón deteriorado, existencia de fisuras, desconches, corrosión de armaduras pasivas y de pretensado, etc.), se hace necesario determinar las causas del deterioro.

Las causas pueden ser :

Atendiendo al tipo de acción actuante, el boletín 162 del C.E.B. [CEB. 1993] establece la siguiente clasificación:

- a) acciones excepcionales y accidentales
  - terremotos, deslizamientos de tierras
  - huracanes, tornados
  - explosiones
  - impactos de vehículos, barcos, aviones...
  - incidentes debidos a operaciones de pretensado

- b) acciones ambientales
  - ataque químico
  - carbonatación
  - hielo - deshielo
- c) deformaciones impuestas
  - asentamientos diferenciales
  - efectos térmicos
  - efectos en el tiempo: retracción y fluencia
- d) fuego
- e) sobrecargas

Otra clasificación de las causas de fallo de las estructuras contempla el “que o quien” es el responsable de ese error:

- a) los errores en fase de proyecto o diseño achacables al proyectista
  - cálculo defectuoso
  - falta de detalles constructivos
  - esquema estructural incorrecto
  - mala evaluación de las acciones actuantes
  - falta de adecuación ambiental
- b) defectos imputables a los materiales, ya sea por disminución en la resistencia mecánica, en su estabilidad o en su durabilidad.
- c) errores durante la ejecución
  - insuficiencia en el vibrado del hormigón
  - mal curado en el hormigón o malos aditivos de curado
  - problemas con las heladas
  - asientos y/o deslizamientos en encofrados
  - segregaciones
  - armaduras concentradas que no dejan penetrar la pasta
  - errores en la colocación de las armaduras
- d) el mantenimiento y uso de la estructura.

Las causas más sencillas son de origen físico, pudiendo ser el resultado de la erosión por viento o agua, abrasión mecánica o por impacto directo, sobrecarga estructural, fuego o ciclos hielo y deshielo.

El ataque al hormigón armado en ambientes industriales se puede presentar a causa del derrame de agentes químicos agresivos, por la acción de sulfatos de aguas subterráneas y su cristalización interna en ambientes cálidos. La presencia de un gel expansivo a partir de una reacción entre el cemento y los áridos, genera fisuración y desmoronamiento del hormigón.

De lo anteriormente expuesto se puede deducir que la durabilidad e impermeabilidad que se demandará a un hormigón, la determinarán las condiciones ambientales a las que se verá expuesto. Para que sea garantizada la durabilidad será imprescindible:

- contenido alto de cemento, controlando la relación a/c.
- recubrimientos suficientes.
- curado efectivo del hormigón.

Todo ello juntamente con buenos áridos, vibrado y compactación correctos, control de los aditivos químicos empleados y contando con las reglas de una buena práctica constructiva. De esta manera, la durabilidad será sinónima de densidad, buena calidad y compacidad.

Para llegar a determinar las causas desencadenantes del deterioro; se tienen que conocer los efectos en el tiempo, de manera que hay que tener presente el concepto de durabilidad, entendida ésta como la capacidad del hormigón para resistir la acción de los agentes atmosféricos, ataques químicos, abrasión o cualquier proceso de deterioro. [ACI 201, 1988. Vázquez, 1996. GEHO-CEB, 1993]

El hormigón es un material complejo, que contiene fases líquidas y también cristalinas y, componentes amorfos sólidos, los cuales varían con la humedad, temperatura y tiempo; dependiendo además de la microestructura del hormigón, tamaño de los poros distribución y tipo de unión entre los ingredientes sólidos, condiciones medio - ambientales, etc. [Monteiro. et al 1995]. Se puede entonces apreciar que la durabilidad del hormigón es el resultado de una interrelación de muchos factores; que unidos deben asegurar la seguridad y funcionalidad de la estructura, determinando de ésta manera la vida de servicio. (ver figura 3.2)

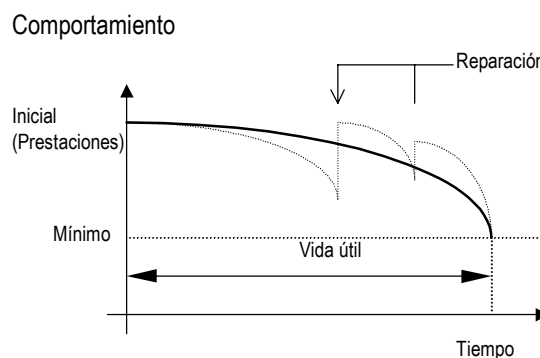


Figura 3.2 Relación entre comportamiento y vida útil del hormigón. (GEHO-CEB, 1993)

### 3.2.1 Ciclos hielo y deshielo

El hormigón expuesto a ciclos de congelamiento y deshielo debe ser adecuadamente dosificado, mezclado, colocado y curado para resistir adecuadamente tan fuertes exigencias.

En el proceso de congelamiento en la pasta de cemento, la mayoría de los movimientos del agua se realizan hacia las regiones de congelación; ya que el agua en la pasta del cemento

está formada por una solución alcalina ligera. Al caer la temperatura, se producirá un superenfriamiento en el que se forman cristales de hielo. Aumentando el contenido de álcalis en la solución no congelada, creando un potencial osmótico que obliga a las moléculas de agua, a difundirlas en la solución de las cavidades congeladas. [ACI-201. 1988]

La pasta falla cuando la redistribución necesaria del agua no se puede lograr. Sin embargo el aire adicionado contribuye a eliminar la posibilidad de daño por congelación; ya que se generan cámaras de expansión del agua congelada. Debido a que el volumen de agua se incrementa durante la congelación ( $\pm 9\%$ ), y se presenta un fenómeno de difusión durante el enfriamiento que es importante ya que existen poros no saturados para que el agua se expanda sin provocar deterioros. Ya que de lo contrario se puede romper el material por reventamiento (Splitting). [GEHO-CEB, 1993]

El tamaño del agregado grueso es un factor importante para la resistencia al congelamiento, ya que éstos absorben agua, la que es crítica para la estructura del hormigón. La presión que se desarrolla cuando las partículas expelen agua durante el congelamiento las rompe así como la matriz; presentándose desprendimientos locales en los sitios donde se encuentran los áridos de mayor tamaño. Cerca de un tercio del agua puede congelarse a los  $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$  y dos tercios a los  $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Cuando las fuerzas internas de expansión son más grandes que la resistencia a tracción del hormigón, ocurre la fisuración. [Monteiro. et al 1995; GEHO-CEB, 1993]

### 3.2.2 Ataques químicos

Las condiciones resistentes y/o funcionales pueden disminuir mucho en el hormigón armado cuando se utiliza en ambientes agresivos; éste no es regularmente atacado por sustancias químicas secas y sólidas; para llegar a deteriorarlo las sustancias deben estar en solución y sobrepasar niveles de concentración determinados. La presencia de agua en estado líquido o gaseoso es indispensable para que las reacciones químicas tengan lugar.

Las sustancias químicas agresivas más frecuentes son los ácidos minerales, sulfatos, cloruros, nitratos, fenoles y algunos ácidos orgánicos.

Un factor importante para la durabilidad que retarda la degradación química (incluso la física y/o mecánica) causada por los agentes agresivos, es la compacidad del hormigón. La composición y las condiciones de puesta en obra determinan esta compacidad que está estrechamente ligada a la porosidad inicial del hormigón.[Berissi, 1986]

Hay que tener presente que una sola sustancia puede provocar, a lo largo del período de actuación sobre la estructura, diversos tipos de ataque, por lo que será necesario determinar en cada momento los productos resultantes de las reacciones e indagar los agentes responsables de tal efecto. A continuación se presentan algunos casos particulares.

De forma general se presentan en la Tabla 3.1 los efectos de algunas sustancias agresivas sobre el hormigón, no debiéndose olvidar que existen numerosos factores en la deterioración, y que ésta es solo una guía.



Velocidad de ataque	de	Ácidos inorgánicos	Ácidos orgánicos	Soluciones alcalinas	Soluciones salinas	Varios
<b>Rápida</b>		Clorhídrico Fluorhídrico Nítrico Sulfúrico	Acético Fórmico		Cloruro de aluminio	
<b>Moderada</b>		Fosfórico	Titánico	Hidróxido de sodio 20%	Nitrato de Amonio Sulfato de amonio Sulfato de sodio Sulfato de magnesio Sulfato de calcio	Bromo (gas)  Sulfito líquido
<b>Lenta</b>		Carbónico		Hidróxido de sodio 10 - 20%  Hipoclorito de sodio	Cloruro de amonio Cloruro de magnesio Cloruro de sodio	Cloro (gas)  Agua de mar  agua dulce
<b>Despreciable</b>			Oxálico Tartárico	Hidróxido de sodio 10 %  Hipoclorito de sodio  Hidróxido de amonio	Cloruro de calcio Cloruro de sodio Nitrato de zinc Cromato de sodio	Amoniaco líquido

Tabla 3.1 Efecto de las sustancias químicas en el hormigón. (ACI-201, 1988)

*a. Ataque por sulfatos.*

El ataque por sulfatos es una reacción entre la solución agresora y los componentes del cemento formando productos secundarios, siendo estos productos secundarios expansivos que al cristalizar provocan la rotura del hormigón. El ataque por sulfatos puede ser de los más agresivos dando lugar a componentes fuertemente expansivos que terminan destruyendo totalmente el hormigón.

El mecanismo resumido del ataque por sulfatos es: Teniendo contacto la superficie del hormigón con la solución agresiva, penetra el  $\text{SO}_4^{2-}$  (ion sulfato) por difusión limitada en la zona superficial; penetra el catión asociado y reacciona sustituyendo el  $\text{Ca}^{2+}$  (ion calcio), formándose yeso. Se presenta una reacción puntual con el  $\text{C}_3\text{A}$  (aluminato tricálcico) ó el  $\text{C}_4\text{AH}_x$  (aluminato cálcico hidratado) y el monosulfoaluminato, generando etringita expansiva. Este sulfoaluminato presenta un volumen 2,5 veces superior al del aluminato de partida, dando por consiguiente, a una fuerte expansión; degradando el conglomerante y dejando sólo al árido. Se presenta una fisuración por presión de cristalización, acentuándose la penetración de los sulfatos por las fisuras creadas, pudiendo llegar a la destrucción más o menos completa. [Fernández, 1994; GEHO-CEB, 1993] (ver Figura 3.3)

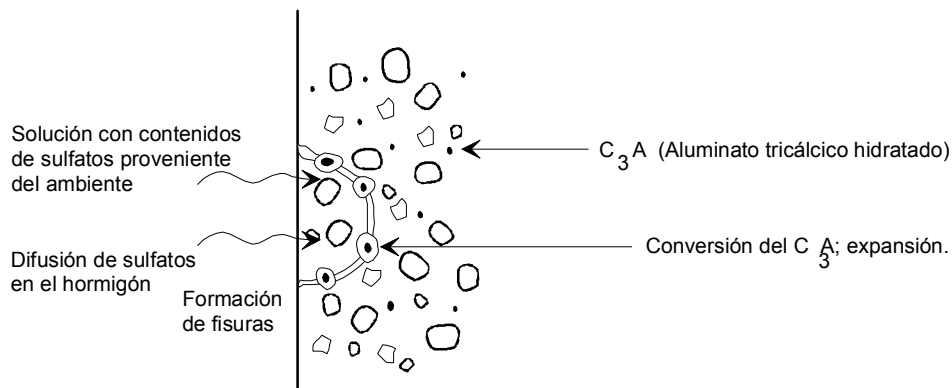


Figura 3.3 Efecto sobre el hormigón en medios sulfatados [Fernández, 1994]

La intensidad de la reacción depende de muchos factores, entre otros se tienen: cantidad de aluminato en el cemento, solubilidad del sulfato, tipo de catión unido al radical sulfato (sodio, magnesio, calcio, etc.), permeabilidad del hormigón, temperatura, cantidad de agua disponible, etc.

El hormigón se comienza a degradar presentando un cambio de coloración en la superficie, seguido de la aparición de fisuras entrecruzadas cuyo espesor va aumentando, simultáneamente se va generando una delaminación con un curvado de las capas más externas del hormigón y fisuración irregular, causado por las tensiones que generan los productos de expansión.

Los sulfatos pueden estar presentes tanto en el terreno, teniendo contacto con la cimentación; puede además estar presente en los líquidos que se transportan por tuberías o que están en contacto con un canal o una presa, pueden también estar presentes en el agua de amasado o de curado, así mismo, estar presentes en los depósitos o contenedores del hormigón ó formarse por oxidación del  $\text{SO}_2$  (bióxido de sulfato) presente en atmósferas industriales.

En general la extensión del ataque por aguas sulfatadas, de la misma manera que ocurre con todos los químicos en disolución, cuando el agua está estancada o en movimiento tiene consecuencias en la magnitud de los daños; ya que en aguas con movimiento la posibilidad de que el cemento pueda ser lavado es mayor y por tanto presenta un considerable problema.

#### *b. Los medios ácidos.*

Se pueden incluir aquí la mayoría de los ácidos minerales (por ej. sulfúrico, clorhídrico, nítrico, ...) y ácidos orgánicos (por ej. ácido láctico, acético y fórmico). Provenientes de aguas naturales, lluvia ácida, agua en pantanos y turberas, aguas industriales, red de cloacas, etc., que hacen que el hormigón pierda su alcalinidad y resistencia, además, si las

soluciones ácidas o salinas alcanzan el acero de refuerzo pasando por poros o fisuras, se presentarán fenómenos de corrosión y posterior agrietamiento y deterioro del hormigón.

Como resultado de esta agresión, los compuestos cálcicos del hormigón se convierten en sales cálcicas, destruyendo la estructura del cemento endurecido; así mismo, destruyendo la globalidad del sistema poroso (reaccionan todos los componentes del cemento). De manera que, con el ataque de ácidos, la permeabilidad del hormigón aún sano no tiene mucha trascendencia, como consecuencia el hormigón termina dispersándose. (ver Figura 3.4). [GEHO-CEB, 1993]. De manera que, con el ataque de ácidos, la permeabilidad del hormigón aún sano no tiene mucha importancia. Como consecuencia el hormigón termina disgregándose.

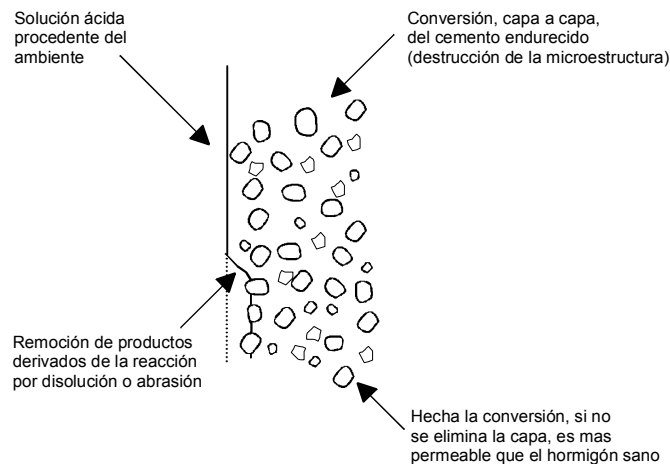


Figura 3.4 Efecto sobre el hormigón en medios ácidos [Fernández, 1994]

*c. Disoluciones alcalinas.*

Disoluciones concentradas de NaOH (hidróxido sódico) y KOH (hidróxido potásico) atacarán a la pasta de cemento principalmente cuando las disoluciones están calientes. En piezas sometidas a ciclos de humedad - sequedad, la reacción de ataque sobre el hormigón dará lugar a la cristalización de sales expansivas, lo que causará el consiguiente deterioro del hormigón.

*3.2.3 Abrasión*

La capacidad de la superficie de hormigón para resistir el desgaste generado por fricción o frotamiento, como consecuencia de tráfico de peatones o vehículos se puede definir como la resistencia del hormigón a la abrasión. Las partículas arrastradas por el viento o el agua también pueden erosionar las superficies del hormigón. (ACI-201, 1988; GEHO-CEB, 1993).

La resistencia del hormigón a la abrasión se puede ver afectada principalmente por: la resistencia a compresión, las propiedades de los agregados, los métodos de acabado, el uso de cubiertas o recubrimientos y el curado.

### 3.2.4 Corrosión de la armadura

La causa más común de deterioro en el hormigón armado y pretensado es la oxidación de las armaduras. La corrosión de las armaduras tiene lugar como consecuencia de la carbonatación del recubrimiento del hormigón y/o de la penetración de los iones cloruro hasta el nivel de las armaduras; y también por la reducción de alcalinidad causada por lixiviación de álcalis presentes en corrientes de agua. La propagación lleva progresivamente a la formación de fisuras y al desprendimiento del recubrimiento de hormigón.

El proceso de corrosión de las armaduras embebidas en el hormigón responde al mecanismo electroquímico REDOX en el que el metal se oxida comportándose como ánodo y liberando electrones que son empleados en la reducción del oxígeno, que actúa como cátodo. El circuito se cierra a través del acero desplazándose los electrones desde las zonas anódicas a las catódicas, mientras que los iones resultantes de la reducción lo hacen en sentido contrario a través del hormigón. [Vázquez, 1996; Fernández, 1993; Santa, 1993; Pazini, 1994; Helene, 1995].

Como ya se ha presentado, para que se inicie la corrosión electroquímica, se debe formar una pila galvánica, por tanto, un cátodo, un ánodo, un electrólito y oxígeno; donde el ánodo y el cátodo estén conectados para que se produzca el paso de electrones. El ánodo es el sitio donde se corroe el acero ya que aquí el metal pierde electrones. (Ver figura 3.5)

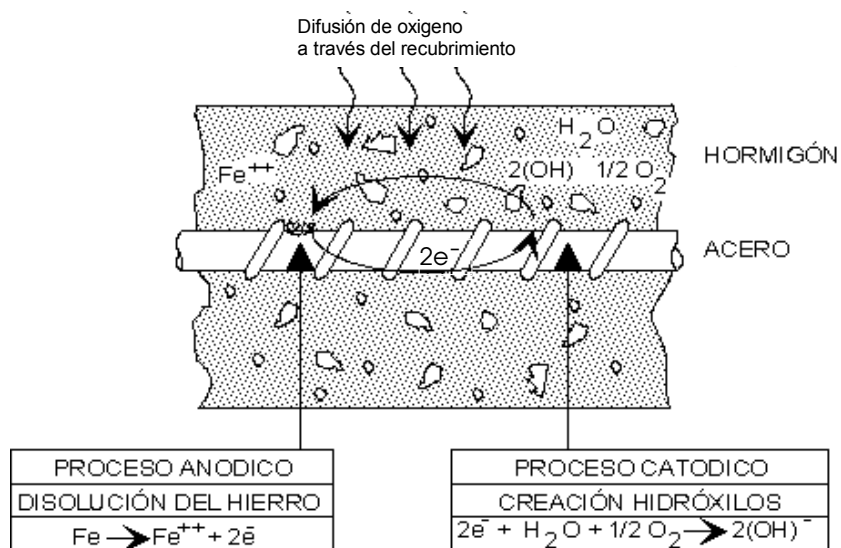


Figura 3.5 Pila electroquímica de corrosión . (Fernández, 1994; GEHO-CEB, 1993)

Se puede apreciar que en el proceso se consume oxígeno y que se precisa agua sólo para iniciar el proceso, ya que después es regenerada. Como resultado, en una atmósfera seca o con humedad relativa inferior al 40%, es posible que no se presente corrosión. La

humedad óptima para favorecer la corrosión se sitúa alrededor de 70-80%, pues con valores mayores, la difusión de los iones de oxígeno se ve considerablemente reducida.

La manifestación típica se presenta como manchas marrones - rojizas sobre la superficie del elemento estructural afectado, correspondiendo con la situación de las barras principales y que por la acción de la herrumbre expansiva origina tensiones que abren las fisuras. Luego surgen otras coincidiendo con el plano de estribos y/o cercos. (Ver Figura 3.6). [Helene, 1995].

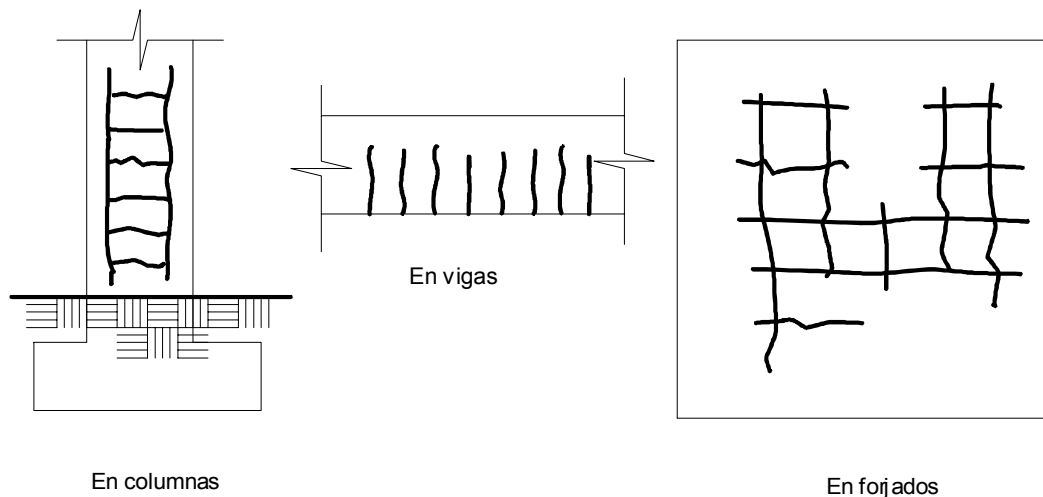


Figura 3.6 Algunas manifestaciones típicas de corrosión de armaduras.

La corrosión del acero será posible, al llegar a producirse por una parte la eliminación de la capa pasivada que recubre la superficie de la barra y por otra que se inicie un fenómeno electrolítico, presentándose en las situaciones siguientes:

- a) rotura física o ataque químico sobre la superficie de hormigón que facilita la entrada hacia el interior de la pieza de agentes externos.
- b) ataque químico y/o lixiviación del hormigón circundante a la barra con la pérdida de alcalinidad y de impermeabilidad.
- c) eliminación de la capa pasivada por disminución de la alcalinidad (por ej. presencia de iones cloruro). Queda claro que penetra la corrosión de la armadura en función de la alcalinidad. Se ha estudiado que los incrementos más grandes de penetración de la corrosión se dan para valores de  $\text{pH} \approx 5$ , aunque para un  $\text{pH} = 11$  también hay una corrosión considerable.

Por lo general el recubrimiento de hormigón protege adecuadamente al acero pues:

- a) representa una barrera mecánica ante el movimiento del agua y de la humedad. Este recubrimiento será más o menos efectivo, en función de la calidad del hormigón, sobre todo su impermeabilidad, y del espesor.
- b) el principal producto soluble de un hormigón, el  $\text{Ca(OH)}_2$ , (hidróxido cálcico-portlandita) cuando está en disolución saturada, proporciona un  $\text{pH} \approx 12.4$  por lo que al poseer el hormigón

compuestos de sodio y potasio, puede llegar su pH hasta 13.5. En estas condiciones, los productos resultantes de la corrosión del acero (óxido férrico) forman una película de óxido pasivado sobre la superficie de la armadura.

- c) También se puede añadir que la presencia de hormigón de baja permeabilidad alrededor del acero, provoca un aumento de la resistividad eléctrica que reduce el flujo de las corrientes eléctricas.

Los métodos empleados para estudiar el proceso de la corrosión se basan en la medida de parámetros electroquímicos; los principales son:

- Medida de la resistencia de polarización
- Medida de potencial de las armaduras
- Medida de la resistividad eléctrica del hormigón

La resistencia de polarización se define como el inverso de la relación entre el incremento de la intensidad que fluye desde una armadura a través del hormigón, al aplicarle un incremento de potencial muy pequeño: [Santa, J. 1993]

$$1/R_p = dI/dE$$

Para medirla se utiliza el “Potenciostato” que permite aplicar una determinada tensión entre dos armaduras. Registrando la intensidad inducida puede medirse la resistencia de polarización.

La determinación del potencial de corrosión es el método electroquímico más antiguo utilizado para el control de la corrosión. Se basa en la medición de la diferencia de potencial entre el acero y un electrodo de referencia situado en la superficie del hormigón; Haciendo contacto eléctrico entre la armadura y el electrodo en serie con un voltímetro. Posicionando el electrodo sobre el hormigón se cierra el circuito midiéndose la diferencia de potencial.

Los puntos medidos deben referenciarse en el hormigón para poder replantearlos y dibujar mapas de curvas equipotenciales, que indican con claridad las zonas de riesgo. [Pazini, E. 1994].

La resistividad eléctrica complementa la medida del potencial, informando sobre la facilidad o impedimento que presenta el hormigón a que la corrosión progrese en caso de que se produzca; se utiliza el resistivímetro para medir la resistividad eléctrica.

### 3.2.5 Carbonatación

La carbonatación de los compuestos hidratados del cemento por el CO<sub>2</sub> (dióxido de carbono) reduce el pH de la solución intersticial a un valor tal que la capa de óxidos, formada en medio alcalino y que protege el acero, pierde su estabilidad. Al destruirse esta

capa, la corrosión puede desarrollarse en medio aéreo y húmedo. (ver figura 3.7). [Vázquez,, Barra, 1996] En general el efecto sobre la resistencia es nulo ya que lo que permite la carbonatación es la despasivación de la armadura y consecuentemente como producto de la corrosión los efectos expansivos de ésta. En el proceso de carbonatación el  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  (hidróxido cálcico - portlandita) es atacado por el  $\text{CO}_2$  (dióxido de carbono) del aire.

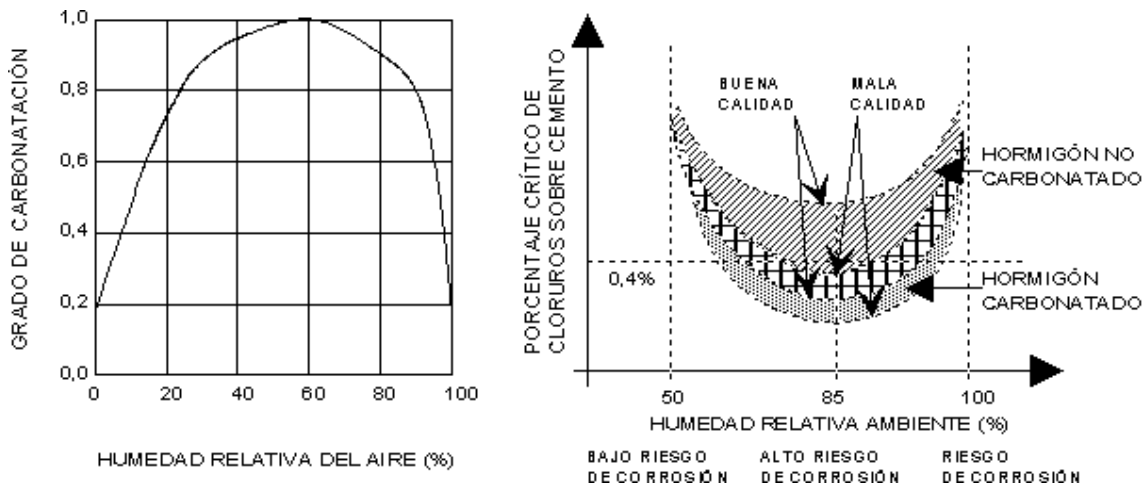


Figura 3.7 Carbonatación en función de la humedad y Contenido de cloruros. (Fernández, 1994; Pazini, 1994)

#### a. Velocidad de carbonatación

La velocidad de carbonatación depende sobre todo de la facilidad de penetración del  $\text{CO}_2$  (dióxido de carbono), que a su vez depende del Medio (humedad relativa y concentración del  $\text{CO}_2$ ) de las características del hormigón (humedad, composición, tipo de cemento utilizado, relación agua/cemento, etc.), de la presencia de fisuras, etc.

De principal importancia para el transporte de sustancias en el interior de los poros del hormigón son: la porosidad y la distribución del tamaño de los poros. Los procesos de transporte de gases, agua o sustancias disueltas en agua son procesos de difusión en función de la humedad del aire; ya que los procesos de difusión son inducidos por la tendencia al equilibrio al existir gradientes de concentraciones. Los mecanismos de transporte son por difusión, por succión capilar y por penetración causada.

#### b. Influencia de las adiciones

La presencia de minerales en la solución intersticial, reaccionan con la portlandita de la hidratación del cemento. Los cementos con adiciones de escoria o cenizas presentan una

mayor profundidad de carbonatación comparada con la del cemento portland sin adiciones, ya que se presenta una reducción del pH.

La introducción de micro sílice, sustituyendo cemento, genera una reducción mayor del pH. La sustitución de cemento por sílica fume determina la reducción de la relación C / S a causa de la formación de CSH (silicato cálcico hidratado).

#### *c. Profundidad de carbonatación*

Se ha demostrado que el espesor de la capa carbonatada es una función exponencial del tiempo. Así mismo la resistencia a la compresión es un parámetro fiel de la susceptibilidad del hormigón a la carbonatación. (Aguado, A. et al 1995; Andrade, 1994)

#### *d. propiedades de la capa carbonatada*

Cuando se presenta la carbonatación, se modifican la distribución y el tamaño de los poros del hormigón. Generalmente reduce la porosidad media del cemento hidratado, mejorando la resistencia de la capa carbonatada.

En cementos con escorias se presentará un aumento de la permeabilidad de la capa carbonatada, además de la reducción de la resistencia de dicha capa. [Vázquez, Barra, 1996]

#### *e. como evitar la carbonatación*

Contra el fenómeno de la carbonatación se deberán diseñar mezclas que aminoren la penetración del ataque. ya que la carbonatación empieza a producirse desde el mismo inicio de la construcción, Por tanto es recomendable:

- Los cuidados en relación a la puesta en obra y curado deberán extremarse para evitar riesgos de fisuración, los cuales son una ruta abierta a la carbonatación--despasivación--corrosión del acero.
- Respetar los recubrimientos mínimos.
- Utilizar hormigones con bajas relaciones a/c, para obtener hormigones de alta compacidad.
- La composición de áridos y cementos deberá ser la adecuada.
- Utilizar barreras de protección contra la entrada del agua, con altas resistencias al dióxido de carbono y a los cloruros.

### *3.2.6 Reacciones químicas de los agregados*

#### *a. reacción álcali - árido*

Esta reacción se produce entre los álcalis del cemento portland y la sílice cristalina de algunos tipos de áridos (calcedonias y tridimitas), por lo que es importante comprobar si



los áridos a utilizar son o no reactivos frente a los álcalis del cemento. Los hormigones dañados por este tipo de reacción presentan fisuras pequeñas de forma irregular que aparecen en la superficie del hormigón, o en forma de cráteres localizados, en los cuales pueden aparecer en sus bordes gotas de gel blando.

*b. reacción álcali - carbonato*

El origen es la desdolomitización de calizas dolomíticas y dolomitas. Se presenta una expansión de los minerales arcillosos del interior del árido próximos a los cristales de dolomita. El tipo de fisuración que presenta el hormigón atacado es de estrella (piel de cocodrilo).

*c. reacción álcali - sílice*

Se presenta cuando los minerales silíceos están en desequilibrio termodinámico en un medio de pH mayor o igual a 12,5. Se da una expansión por captación de H<sub>2</sub>O, generando un gel expansivo. En muchas patologías estudiadas este gel se encuentra en la zona de transición o dentro del árido y siempre contiene Ca<sup>2+</sup> (ion de calcio). Las fuerzas de expansión de éste proceso son de 6 a 7 MPa y la resistencia a tracción normal en el hormigón es de 3 MPa. [Vázquez, 1996].

Es importante mencionar que el mecanismo de ataque es igual para todas las formas de sílice, pero la diferencia esta en la velocidad de la reacción.

El deterioro se inicia con fisuras superficiales distribuidas irregularmente, seguidas por la destrucción completa. Otra manifestación son los hinchamientos locales y exudación de productos cristalinos.

*d. reacción álcali - silicato*

Este tipo de reacción no genera geles expansivos, sino que provoca la exfoliación de minerales filíticos (de mucha semejanza con la reacción álcali carbonato).

*e. apariencia superficial de hormigones atacados*

El aspecto más frecuente es el del hormigón que ha sufrido expansiones. Primero, se pueden presentar estallidos en las juntas de dilatación, también movimientos diferenciales entre elementos estructurales; en presas se pueden presentar bloqueos de compuertas o turbinas bloqueadas por las reacciones expansivas.

Es de hacer notar que estas observaciones también podrían ser causadas por sulfatos, hielo, variaciones de humedad y temperatura, etc. por lo que se deberá tener especial cuidado en el diagnóstico.

La fisuración superficial que presentan las estructuras atacadas en la mayoría de los casos se orientan paralelamente a las tensiones mayores, pudiendo llegar a tener anchos de fisura de 10 mm con una velocidad = 1mm/año; penetrando de 20 a 50 mm. También existe la presentación de rebordes pardos o de aspecto de óxido, pasando a dar luego la impresión de estar húmedas.

Se presentan los llamados “Pop outs” ó estallidos puntuales. que también pueden aparecer en la acción del hielo.

Por lo general el fenómeno tarda más de diez años en aparecer, y en algunos casos varias décadas. Cuando existen áridos muy reactivos y en condiciones adversas para el hormigón el ataque puede tardar en mostrar sus efectos exteriores hasta 5 años.

### 3.2.7 Hormigón en medio marino

El agua en ambiente marino contiene sulfatos:  $\text{CaSO}_4$  (sulfatos de calcio),  $\text{MgSO}_4$  (sulfatos de magnesio),  $\text{K}_2\text{SO}_4$  (sulfato potásico) y  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  (sulfatos de sodio) que reaccionan con el  $\text{C}_3\text{A}$  (aluminato tricálcico) y los cloruros:  $\text{NaCl}$  (cloruro sódico),  $\text{MgCl}_2$  (cloruro magnésico) y  $\text{KCl}$  (cloruro potásico); cloruros que solubilizan la cal. La acción perjudicial sobre la estructura dependerá de las sales disueltas en el mar y del tipo de contacto o cercanía.[Fernández, 1994]

En relación al nivel de contacto del agua de mar con la estructura se deben establecer las siguientes zonas de estudio: [Bastús, 1996; Fernández, 1994] (figura 3.8)

#### a Zona totalmente sumergida

En ésta zona los procesos de corrosión son de origen químico y biológico.

#### b. Zona de oscilaciones

Además de los ya enunciados intervienen otros procesos físicos, como la saturación, heladas, desecación. etc. Se presentan saturaciones en presencia de e| s el de erosión, el cual puede ser agravado por el transporte de sólidos en suspensión.

#### c. Zona de evaporación

Donde el agua se evapora en forma continua, incrementando la concentración de sales. Sobre los niveles de oscilación el agua asciende por capilaridad. Las características del aire, su velocidad, acabado superficial del hormigón, compacidad del hormigón, distancia desde la zona húmeda y composición del agua atacante.

#### d. Zona próxima al mar

A causa de la elevada humedad relativa del aire y por la concentración de sales, se puede generar a través de los poros un ataque al cemento del hormigón.

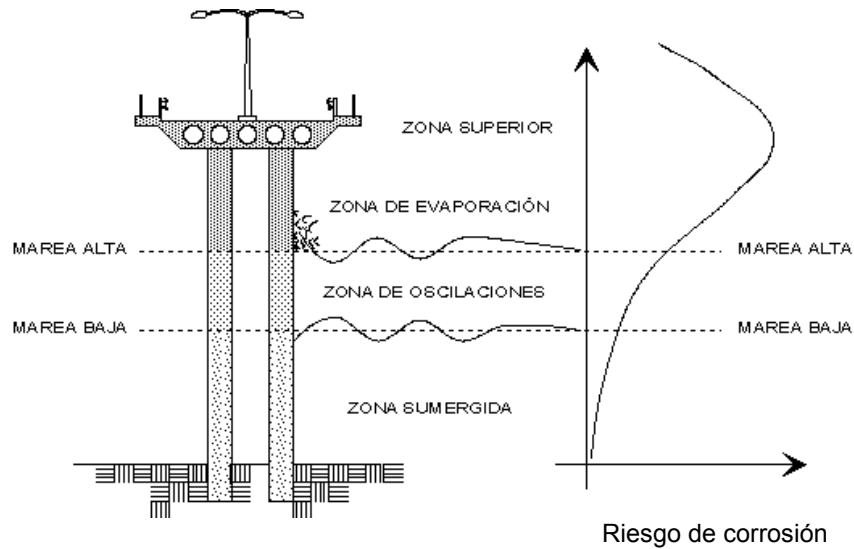


Figura 3.8 Relación de zona de contacto con nivel riesgo de ataque

### 3.2.8 Fisuración

Las deformaciones por tracción provocan la fisuración, dichas deformaciones se pueden presentar por causa de:

- Movimientos producidos en el interior del hormigón.
- Expansión del material embebido en el hormigón.
- Condiciones externamente impuestas .

Algunas de las posibles causas de la fisuración se presentan a continuación en la figura 3.9 [GEHO-CEB. 1993]

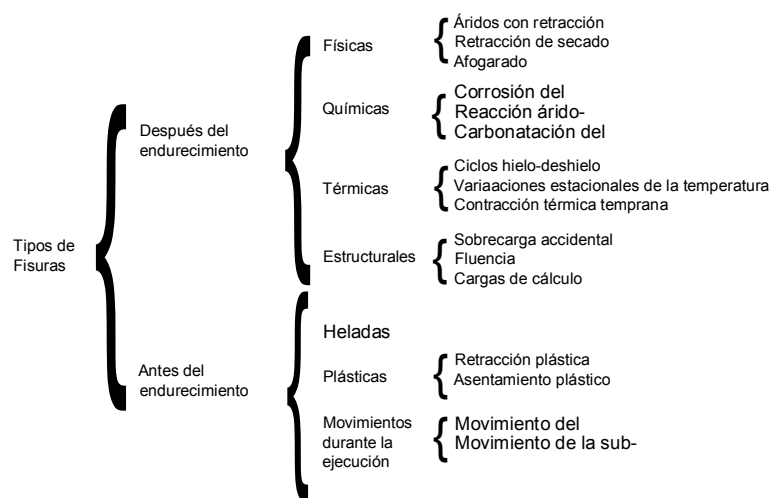


Figura 3.9 Tipos de fisuras

a. *Fisuración precoz*

Este tipo de fisuración provoca fisuras abiertas que permiten la penetración de los compuestos agresivos al hormigón. Las principales causas por las que se puede generar ésta fisuración precoz son:

- **Exudación:** Es una segregación provocada por el asentamiento por gravedad de los componentes sólidos de mayor peso (áridos y cemento). A partir de las primeras horas del hormigonado, una parte del agua de amasado fluye a la cara superior del hormigón hasta el principio del fraguado, momento en el cual decrece bruscamente. Parte de éste flujo no llega a la superficie, quedando atrapada en áridos y barras horizontales de armado; provocando que la capa superior sea más débil que la inferior.

- **Retracción plástica:** Surge cuando el agua de exudación se pierde, y cuando la velocidad de evaporación es más rápida que la de exudación. coincide regularmente con el inicio del fraguado y termina al finalizar éste. Geométricamente se presenta una fisuración en forma de malla paralelas, orientadas en dirección de la dimensión menor. Siendo típica cuando no existe curado o es deficiente o por sobredosificación de agua. (Helene, P. 1995). (Ver Figura 3.10).

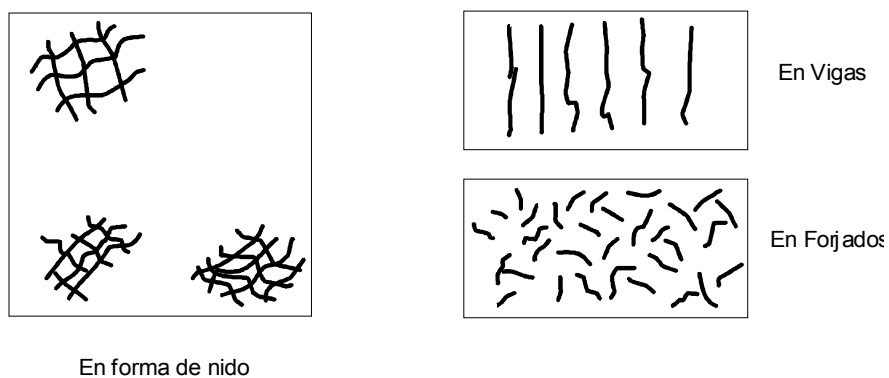


Figura 3.10 Fisuras anidadas por retracción plástica.

- **Contracción térmica ulterior al fraguado:** El calor que produce el fraguado genera expansión. Cuando se da el enfriamiento se desarrollan contracciones diferenciales. Según sea el espesor, se hará inevitable. En una pieza de 60 cms. el gradiente térmico de la superficie al núcleo es de 40 a 60°C. [Fernández, 1994]

- **Autodesecación:** Se presenta cuando se aísla el hormigón del exterior y hay poca agua para el fraguado; cuando existe relación a/c menor a 0,35.

- Retracción por secado: Se puede presentar por la pérdida de agua absorbida en el CSH (silicato cálcico hidratado). La produce la fuerza entre la humedad interior y exterior. [Vázquez, 1996; ACI-223 1990; GEHO-CEB, 1993] (ver Figura 3.11).

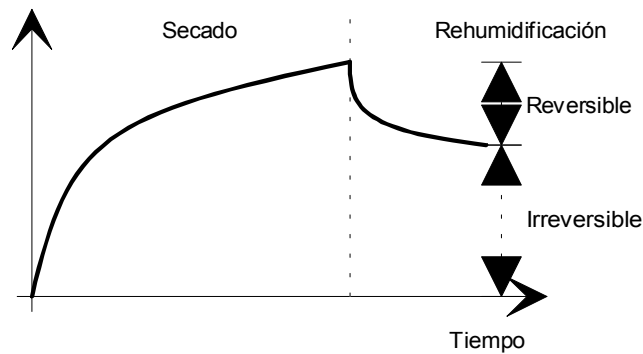


Figura 3.11 Grado de reversibilidad debida a la retracción por secado.

El calor de hidratación del cemento, que es liberado durante el fraguado y el endurecimiento, no es capaz de alcanzar fácilmente el aire circundante. Como resultado, se presenta un gradiente térmico, desde el interior hasta el exterior de la estructura. Es parte de la retracción total vinculada a la disminución del volumen provocado por la pérdida de humedad interna del hormigón por transferencia con el medio circundante. Es por tanto, el resultado del efecto físico de la modificación de las láminas en la red capilar.[Carbonari, 1996]

#### b. Fisuración después del endurecimiento

Básicamente ya se ha comentado sobre las causas como se apunta en la figura 3.9, donde se muestran las causas físicas, químicas, térmicas y estructurales.

A continuación se describirán los tipos de fisuras de origen estructural, tales como: sobrecarga accidental, fluencia y cargas de cálculo; ya que las causas físicas químicas y térmicas se han descrito en su respectivo momento.

- Fisuración debida a cargas directas: Este tipo de fisuración es efecto de los esfuerzos presentes en las secciones debido a las cargas aplicadas (flexión, cortante, torsión, etc.). [GEHO-CEB, 1993] (ver Figura 3.12).

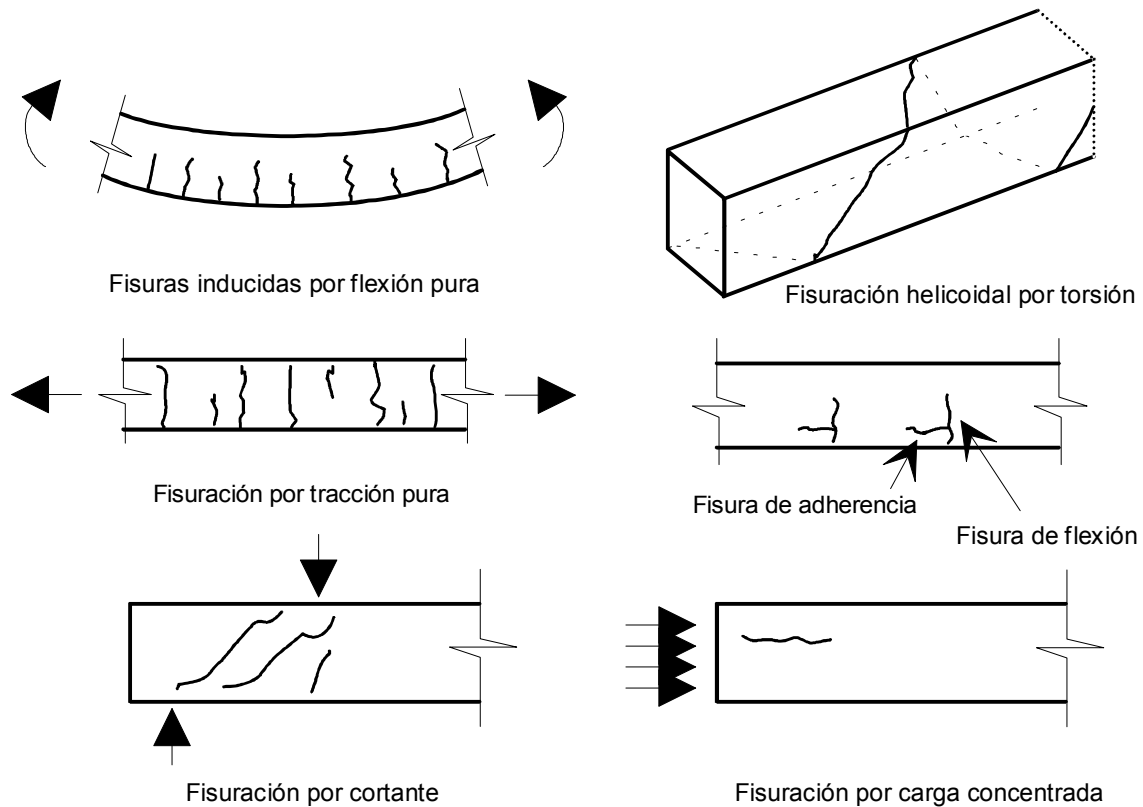


Figura 3.12 Fisuras generadas por cargas directas.

- Debido a deformaciones impuestas: Las diferencias de temperatura, la retracción, etc. producen fisuración de origen tensional, la cual aparece donde los elementos de la estructura se oponen a los movimientos impuestos.

- Por retracción: siendo una deformación a largo plazo, se debe a la disminución del volumen de hormigón debido a su desecación; desarrollándose fuerzas centradas o excéntricas que producen fisuras al superarse la deformación última a tracción del hormigón. Siendo independiente de acciones exteriores. (Ver Figura 3.13). [Helene, 1995; Carbonari, 1996; GEHO-CEB, 1993]

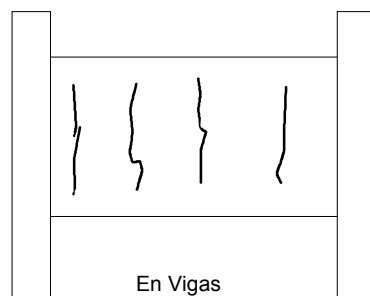


Figura 3.13 Fisuración por retracción

- Por efectos de la fluencia: Teniendo una estructura sometida a carga, las deformaciones diferidas que se incrementan con el tiempo, son de origen

tensional y proporcionales a las deformaciones instantáneas, si la tensión es constante. [Carbonari, 1996]

La fluencia por secado esta asociada a la variación tensional que la reducción del volumen genera, éste volumen es el correspondiente a la pérdida de humedad del hormigón. A nivel de microestructura, se pierde sección; lo que hace que la tensión a ese nivel aumente aunque las cargas externas se mantengan constantes. Esta fisuración aparecerá donde la estructura se opone a estos movimientos tensionales.

### 3.2.9 Acción del fuego

Un incendio puede causar daños muy diferentes en una estructura oscilando desde una simple mancha causada por el humo y el calor, hasta la total destrucción por combustión o pérdida de resistencia. (Ver Figura 3.14).

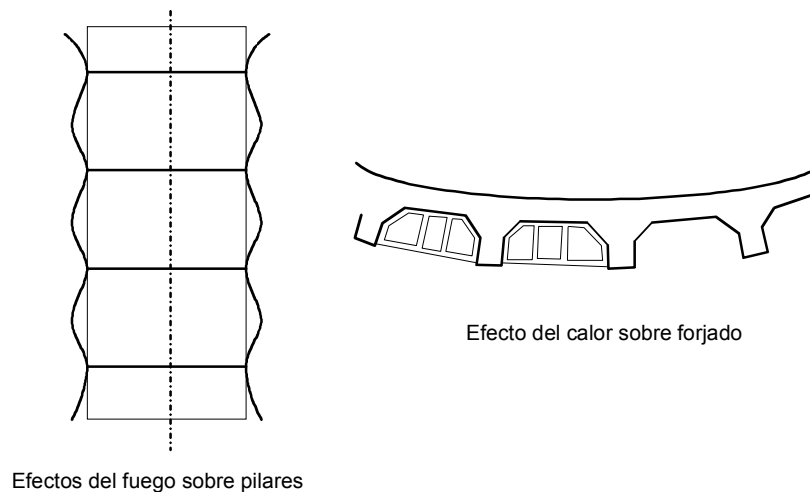


Figura 3.14 Efectos de la acción del fuego sobre elementos estructurales.

Algunos de los factores que influyen en el nivel de daños que se puedan alcanzar por la acción del fuego son:

- La naturaleza de los materiales utilizados.
- El efecto de las corrientes de aire.
- Presencia de cenizas, que pueden ayudar a reducir la combustión.
- Efectos causados por enfriamientos y contracciones repentinos por lanzamiento de agua.

Durante el desarrollo de un incendio se presentan: una fase de iniciación con incremento progresivo y acelerado de la temperatura. Luego el fuego entra en su plenitud, estabilizándose; la temperatura máxima alcanzada y la duración de esta fase dependen de la cantidad y tipo de materiales de combustión presentes. La última fase consistente en la disminución de la intensidad de las temperaturas, debido al agotamiento del material combustible. [Vázquez, 1996; Fernández, 1994; Terro, et al 1992; MOPU, 1991] (Ver figura 3.15).

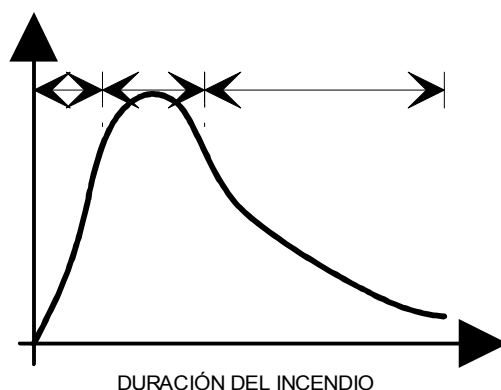


Figura 3.15 Fases de desarrollo de un incendio.

Al someter al hormigón a la acción del fuego, sus componentes sufren severas modificaciones:

Temperatura del incendio	Acción sobre la estructura del hormigón	Efectos
100 °C	Se evapora el agua libre de los capilares	El calor latente de vaporización, retarda la elevación de la temperatura
200 - 300 °C	Se completa la pérdida de agua libre y parte de la absorbida, sin alterar la estructura del cemento hidratado	El calor latente de vaporización, retarda la elevación de la temperatura
300 - 400 °C	Se produce la pérdida de agua de gel del cemento. Pérdida de Hidróxidos del CSH (Silicato cálcico hidratado)	Disminución apreciable de la resistencia y aparición de fisuración superficial
450 °C	Parte del $C_3(OH)_2$ (hidróxido cálcico-portlandita), se transforma en cal libre $C_3O + H_2O$ (óxidos cálcicos)	Continúa la disminución de la resistencia y fisuración superficial del hormigón
600 °C	Los áridos se expanden fuertemente y con diferente intensidad.	Generación de tensiones internas que empiezan a disgregar el hormigón

Tabla 3.2. Acción del fuego sobre el hormigón. (Fernández, 1994)

En el proceso de incremento de temperatura repercute en el hormigón en un fenómeno de pérdida de resistencia, el cual va acompañado de una serie de cambios de coloración. Dicho cambio persiste en el tiempo después del incendio durante días, incluso llegar hasta varios meses. Ver tabla 3.3 y Figura 3.16.

Temperatura	Coloración	Efectos
-------------	------------	---------



Hasta 300 °C	Gris	Descenso de la resistencia del 10%
300 - 600 °C	Rosa a Rojo	Perdida de resistencia en 50%, Módulo de elasticidad = 80%
600 - 950 °C	Gris con puntos rojizos	Resistencia muy reducida
950 - 1000 °C	Amarillo anaranjado	Inicio de la sinterización
1000 - 1200 °C	Amarillo claro	Desintegración. Resistencias totalmente nulas

Tabla 3.3 Influencia de la temperatura en la coloración y resistencia del hormigón.

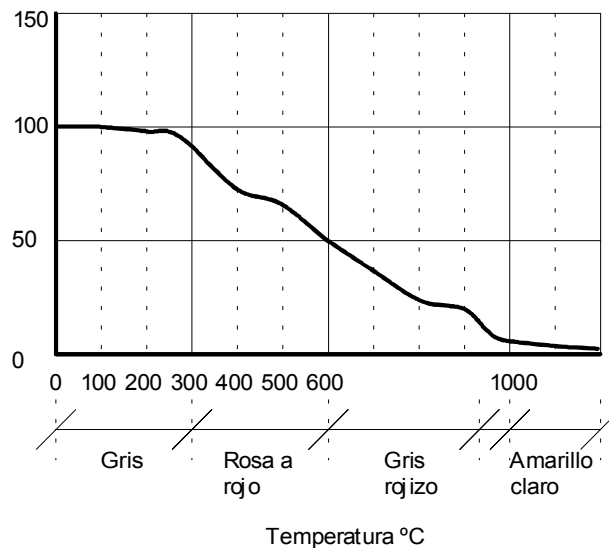


Figura 3.16 Influencia de la temperatura sobre la resistencia a compresión del hormigón

Para mejorar la resistencia al fuego, se debe:

- Utilizar áridos de bajo coeficiente de dilatación térmica. (calizo, árido ligero, etc.)
- Seleccionar una buena granulometría.
- Tener presente que se debe hacer una buena compactación.
- Baja conductividad térmica.
- Se comportan mejor los hormigones con alta resistencia a tracción.
- Humedad baja.
- La utilización de cementos de escorias o puzolánicos (fijan la cal libre - hidróxido cálcico).

Se ha demostrado que al ser baja la conductividad térmica del hormigón el recubrimiento es una efectiva capa protectora de las armaduras. Así, un recubrimiento de 2 cm. de espesor puede brindar 30 minutos de protección. Este recubrimiento debe permitir que las armaduras no alcancen la temperatura crítica del acero.

### 3.2.10 Acciones excepcionales.

Este tipo de acciones suelen presentarse raras veces, pero, cuando aparecen son de corta duración. Los sismos, cambios fuertes de temperatura, huracanes, empujes de tierra, inundaciones, choque de las olas, impactos fuertes, explosiones, incendios, acciones terroristas, guerras, etc. son algunos buenos ejemplos.

Se pueden presentar acciones de origen natural siempre relacionadas con fenómenos geográficos ó climáticos; y de origen no natural, es decir relacionadas con la actividad humana y son de carácter accidental.

Como puede deducirse, la gran variedad de causas, de magnitudes, de ángulos de incidencia, etc. hacen que los daños causados a la estructura sean muy variables; por lo que será necesario evaluarlo detenidamente para cada caso que se pueda presentar. [Helene, 1995; Fernández, 1994].

## 3.3- CONSIDERACIONES SOBRE SEGURIDAD ESTRUCTURAL Y VIDA ÚTIL

### 3.3.1- INTRODUCCIÓN

Es de principal importancia que una estructura cumpla de forma adecuada la función para la que fue diseñada; durante el tiempo que su o sus creadores fijaron como vida útil.

Los métodos de cálculo, después de los años 50, se han basado en la filosofía del cálculo en ESTADOS LÍMITES, que parte de la observación del carácter incierto de cargas y acciones, y considera un número finito de modos de fallo o estados límites, interpretados como márgenes dentro de los cuales se estima que la respuesta de una estructura es satisfactoria, a los cuales se les aplica los niveles de seguridad correspondientes.

Toda estructura deberá garantizar una resistencia que supere ciertos márgenes de seguridad a lo largo de un tiempo previsto de funcionamiento, incluyendo las disminuciones o pérdidas de resistencia inherentes a las condiciones de exposición al medio ambiente y de explotación o uso y que provoca las distintas patologías que hemos señalado en el punto anterior.

En la actualidad, se hace mas frecuente intervenir sobre estructuras ya construidas para verificar, mantener, recuperar y/o incrementar su capacidad de servicio, para que siempre sea la **Resistencia**  $\geq$  que las **Solicitaciones**; por lo que siempre debe haber un margen de

seguridad, que se define como  $f = R - S$ . Durante el momento de la evaluación se deberá cumplir entonces que  $R \geq S$ . (Ver figura 3.17).

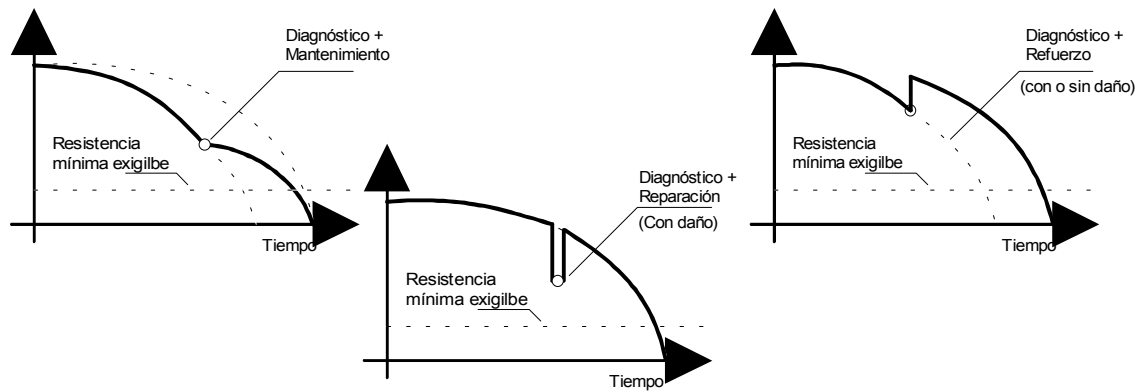


Figura 3.17 Formas de intervención en las estructuras.

### 3.3.2 FALLOS EN ESTADOS LÍMITES

**Estado Límite Último:** Relativo al colapso total o parcial de la estructura, situación en la cual la estructura queda sin posibilidad de seguir siendo utilizada. Estado ligado a la limitación de riesgos. Algunos ejemplos son:

- Rotura. Por tensiones normales o tangenciales
- Pandeo
- Pérdida global de equilibrio
- Pérdida de adherencia
- Fatiga

**Estado Límite de Servicio:** Relativo a la funcionalidad de la estructura; situación que al ser alcanzada, hace que la estructura quede fuera de servicio. Estado relacionado con la calidad de la estructura. Pudiéndose tomar como ejemplos:

- Flechas excesivas
- Fisuración
- Vibración excesiva
- Pérdida de elementos estéticos, etc.

A la hora de evaluar una estructura existente, habrá que verificar si se cumplen determinados estados límites, teniendo en cuenta una serie de diferencias significativas entre la evaluación y el proyecto de una estructura nueva. Por ejemplo:

Consideraciones sobre Evaluación y el Diseño:

Estructura Existente	Estructura en Proyecto
Existe historia del comportamiento estructural	No existen referencias de las respuestas estructurales
La vida útil es más corta. Improbabilidad que se legue a someter a solicitaciones extraordinarias	Vida útil más larga. Existe la probabilidad que se presente una solicitación o combinación de solicitaciones extraordinarias.
El proceso de deterioro puede ser seguido, controlado y puesto al día	No se conoce si la estructura estará sometida a un proceso de daño.
Impacto social y económico se encuentra ya estabilizado	Las repercusiones sociales y económicas, se pueden estimar. Pero existe mucha dispersión.
Se puede deducir el crecimiento del volumen de las sobrecargas	Se toman los criterios de las normativas.
Las resistencias y solicitaciones por medio de técnicas experimentales pueden actualizarse y ajustarse a la realidad	Las resistencias y las solicitaciones son las establecidas por las normas, quedando establecidas como variables aleatorias.
Se puede estimar con mayor exactitud, el nivel de seguridad real. Pueden existir controles de calidad. Que eliminan el error humano posible.	Los criterios de seguridad de las normativas son muy generales. Las normas contemplan durante construcción el error humano.

Tabla 3.4 Diferencias entre evaluación y proyecto.

### 3.3.3 EVALUACIÓN ESTRUCTURAL

La verificación de la seguridad de un puente en servicio es de mucha importancia; debido a que se puede determinar su respuesta estructural. Se puede también, medir las solicitaciones reales de tráfico, pudiendo llegar a predecir las máximas solicitaciones en el período de vida útil previsible. En forma breve, se puede conocer la historia de su comportamiento y estimar, con mayor exactitud, la futura.

La evaluación debe basarse en:

- Un estudio teórico
- Un estudio experimental
- Experiencia relativa a casos similares

De acuerdo con la filosofía de los estados límite, en la evaluación tanto las Solicitaciones como la Respuesta estructural deben tratarse como variables aleatorias. Según la información disponible sobre el problema estructural, los métodos de estudio se pueden ordenar en varios niveles:

**NIVEL 1:** Evaluación utilizando coeficientes de seguridad asociados a los valores característicos de las variables de resistencia y solicitación.

**NIVEL 2:** Este nivel implica la utilización de técnicas y procedimientos numéricos aproximados para obtener valores de probabilidad de fallo  $P_f$ , considerando la resistencia y las solicitaciones como variables aleatorias.

NIVEL 3: Utiliza la descripción probabilista completa de forma “exacta” de la Función de Distribución Conjunta de las variables que afectan a la estructura.

### 3.4- TIPOS DE ACTUACIÓN Y ELEMENTOS A REPARAR

En la actualidad existe un amplio conocimiento del hormigón y el acero utilizado en construcción, ya que han venido utilizando desde el siglo XIX. Cada vez es más común encontrarse con estructuras deterioradas, lo cual exige una intervención ya sea *demoliendo y reconstruyendo* ó *reparando y reforzando*.

Antes de realizar cualquier tipo de intervención es preciso conocer su estado, las causas de su deterioro y los factores de su propagación.

La durabilidad depende tanto de los factores de construcción (puesta en obra, cálculo, etc.) como de los factores ambientales (exposición a ambientes severos). Por ello debe estudiarse el estado de la estructura según se indica brevemente en los siguientes pasos[Carbonell, M. 1996]:

- Exámen visual y acústico.
- Profundidad de carbonatación.
- Espesor de recubrimiento de hormigón.
- Ancho y profundidad de fisuras.
- Resistencia mecánica por esclerometría.
- Resistencia mecánica por ultrasonido.
- Resistencia a tracción por arrancamiento.
- Porosidad abierta.
- Contenido de humedad.
- Cloruros y otros agentes químicos.
- Grado de corrosión de la armadura.
- Otras acciones sobre la estructura.

Los tipos de actuación a realizarse en la intervención de una estructura de hormigón son generalmente:

- Protección superficial.
- Morteros de reparación.
- Uniones y refuerzos estructurales.
- Impermeabilización de fisuras por inyección y sellado de juntas.
- Reparación y refuerzo del acero pasivo y activo.

Los elementos a reparar, dependerán de la magnitud de daños que presente el elemento estructural, los cuales deberán ser evaluados según la complejidad de cada caso.

### 3.5- MATERIALES DE REPARACIÓN

### 3.5.1- INTRODUCCIÓN

En la actualidad existe una amplia gama de materiales y sistemas de aplicación de materiales para reparación, refuerzo y protección de estructuras de hormigón. Algunos de estos materiales han sido desarrollados para usarse conjuntamente con otros formando un sistema de reparación ó protección. Se deberá tener en cuenta que para la aplicación de cada uno de los materiales de reparación, funcionará de mejor manera según unas condiciones climáticas determinadas.

A continuación se presentan de forma resumida algunos de estos materiales.

### 3.5.2- PRODUCTOS A UTILIZAR

Dentro de las familias de materiales según el tipo de actuación a realizar tenemos:

- 1 ADITIVOS PARA MORTEROS
- 2 ADITIVOS Y ADICIONES PARA HORMIGONES
- 3 ANTICONGELANTES
- 4 ADITIVOS PARA GUNITADO E INYECCIONES
- 5 PRODUCTOS DE CURADO Y DESENCOFRANTES
- 6 TRATAMIENTOS DE PROTECCIÓN SUPERFICIAL
- 7 PRODUCTOS DE SELLADO Y ADHESIVOS ELÁSTICOS
- 8 PRODUCTOS A BASE DE RESINAS EPOXI
  - a Adhesivos y morteros
  - b Revestimientos
- 9 PAVIMENTOS
- 10 MORTEROS DE CEMENTO MODIFICADOS CON RESINAS
- 11 MORTEROS ESPECIALES
- 12 OTROS

### MATERIALES COMPUESTOS:

Se denominan así todos aquellos materiales bifásicos (fibra + matriz) constituidos por dos ó más materiales, para obtener otro de características y propiedades superiores a las que presentan sus componentes. A pesar de la amplia variedad de estos materiales, todos tienen en común la existencia de un elemento fibroso (que brinda la resistencia y rigidez), y una matriz (normalmente resina) que es la que configura geoméricamente el material compuesto.

Generalmente, la matriz es flexible y poco resistente, con el objetivo principal de transmitir los esfuerzos de unas fibras a otras, y entre ellas y la superficie adyacente, además de proteger las fibras de daños mecánicos y ambientales [Gómez, 1999].

Propiedades generales de los materiales compuestos

Entre las características principales se pueden destacar:

- Alto modulo de elasticidad, alta resistencia a atracción.
- Comportamiento lineal hasta rotura.
- Resistencia a la corrosión.
- Resistencia a los ataques químicos.
- Poco peso.
- Presentación en cualquier longitud (eliminación de juntas).
- Buen comportamiento a fatiga.
- Buenas propiedades dieléctricas.
- Transparencia a los rayos X.

En cuanto a las fibras, se pueden encontrar orientadas en una única dirección ó formando una malla bidireccional. Por lo que las propiedades del material compuesto son el resultado del porcentaje de fibras y de la orientación de las mismas. Los tipos de fibras comúnmente utilizados para el refuerzo de estructuras son: las fibras de vidrio, aramidas y fibras de carbono. [García, 2000]

- Fibra de vidrio:

Con buenas propiedades mecánicas como: incombustibilidad, imputrescibilidad, además de las ya comentadas.

Existen diferentes composiciones comerciales, a las que se les asignan letras que representan diferentes características:

- E: Electrical. Baja conductividad eléctrica.
- A: Alkali. Alta resistencia a los ácidos sódicos.
- C: Chemical. Alta durabilidad química.
- S: Strength. Alta tensión de rotura

Algunas de las propiedades de las fibras anteriormente comentadas se pueden observar en la tabla 3.5.

Fibra	Densidad g/cm <sup>3</sup>	Resistencia a tracción MPa	Modulo Elástico MPa	Alargamien to en rotura a 27°	Diámetro Filamentos µm
E_glass	2.58	3450	72.5	0.048	8.9-20.3
A_glass	2.5	3040	69.0		
C_glass	2.62	3626	72.5		
S_glass	2.48	4590	86.0	0.057	5.3-9.9

Tabla 3.5 Algunas propiedades de las fibras de vidrio

Se puede observar que dentro de los distintos tipos de fibra de vidrio, la de tipo S tiene una alta resistencia a tracción y alto modulo elástico.

- Fibra de Carbono:

A partir del gran auge en su desarrollo en los años setenta, por exigencias de la industria aeroespacial, y la ampliación de las aplicaciones en la industria de la automoción en los años ochenta, los CFRP se han venido utilizando en aplicaciones en la ingeniería civil.

Se han establecido distintas clasificaciones, principalmente por sus propiedades resistentes. Comúnmente se utiliza para los refuerzos con CFRP, los tipos : HT (high tensile strength) y el HM (high elastic modulus).

Algunas de las propiedades de las fibras de carbono más comercializadas se pueden observar en la tabla 3.6.

Nombre comercial	Densidad g /cm <sup>3</sup>	Resistencia a tracción MPa	Modulo Elástico GPa
<b>Torayca T700</b>	1.84	4900	230
<b>Amoco T300</b>	1.77	3650	230
<b>Amoco</b>	2.18	2240	830
<b>Toray</b>	1.82	6900	290
<b>Hercules</b>	1.88	3790	425

Tabla 3.6 Algunas propiedades de las fibras de carbono

- Fibra Aramida:

Las fibras aramidadas pueden definirse como una fibra de largas cadenas sintéticas de poliamidas con uniones conectadas directamente a dos anillos aromáticos. Son elementos compuesto por fibras paralelas de fibras aramidadas embebidas en una resina epóxica. Los nombres comerciales de esta fibra pueden ser:

- Kevlar (Du pont de Nemours)
- Nomex (Du pont de Nemours)
- Twaron (Azko BV)
- Teijinconex (Teijin Ltd.)
- Techmora (Teijin Ltd.)

Algunas de las propiedades de las fibras Aramidadas más comercializadas se pueden observar en la tabla 3.7.



Nombre comercial	Densidad g/cm <sup>3</sup>	Resistencia a tracción MPa	Modulo Elástico GPa	Diámetro Filamento μm
<b>Twaron ST</b>	1.44	3000	75	12
<b>Twaron IM</b>	1.44	3000	95	12
<b>Twaron HM</b>	1.45	3150	125	12
<b>Kevlar 29</b>	1.44	3400	83	12
<b>Kevlar 49</b>	1.44	3600	131	12
<b>Kevlar 149</b>	1.47	3600–4100	186	12

Tabla 3.7 Algunas propiedades de las fibras Aramidas

