

# DIAGNÓSTICO Y RESTAURACIÓN DE LAS ESTRUCTURAS DE HORMIGÓN ARMADO

## 1 INSPECCIÓN Y TOMA DE DATOS

Se refiere a las manifestaciones sintomáticas de las lesiones de tipo mecánico, por lo general fisuras y deformaciones, aunque también pueden presentarse defectos de la apariencia debidos a su puesta en obra o a la acción del ambiente que las rodea. En las siguientes tablas se mencionan los principales síntomas relacionándolos con sus causas.

DIAGNOSIS Y DEFECTOS (*)					
CAUSA	SINTOMA			PUEDE APARECER:	
	Fisuras	Desconchados	Erosión superfic.	En nueva construcción	Después de algún tiempo
1. Deficiencia estructural.	SI	SI	-	SI	SI
2. Corrosión armaduras.	SI	SI	-	-	SI
3. Ataque químico.	SI	SI	SI	-	SI
4. Daño por heladas.	SI	SI	SI	SI	SI
5. Daño por fuego.	SI	SI	-	-	-
6. Reacción interac. en el hormigón.	SI	SI	-	-	SI
7. Movimientos térmicos coartados	SI	SI	-	SI	SI
8. Retracción coartada.	SI	-	-	SI	SI
9. Fluencia.	SI	SI	-	-	SI
10. Evaporación rápida y temprana.	SI	-	-	SI	-
11. Asentam. plástico.	SI	-	-	SI	-
12. Daño mecánico	SI	SI	-	SI	SI
13. Varias.	X	X	X	X	X

*Defectos comunes en obras de hormigón.*

(Tabla adaptada de L. How Son & G.C.S. Yuen "Building Maintenance Technology").

TIPOS DE FISURAS		
HORMIGON EN ESTADO	CAUSAS	MOMENTO EN QUE SE PRODUCEN
PLASTICO	* DESECACION PREMATURA	PRIMERAS HORAS
	* ASENTAMIENTO DIFERENCIAL DE LA MASA	
	* DEFECTOS DE EJECUCION (Movimientos de encofrados, etc.)	
ENDURECIDO	* CONTRACCION TERMICA INICIAL	PRMEROS DIAS
	* RETRACCION DE SECADO	PRIMERAS SEMANAS
	* ACCION DE LAS CARGAS	PUESTA EN CARGA
	* CORROSION	LARGO PLAZO.

\*) En el Tomo II de la obra "Patología de estructuras de hormigón armado y pretensado" del Prof. J. Calavera puede consultarse un Atlas de Fisuras que contiene numerosos ejemplos de las diferentes tipologías

### 1.1 PRINCIPALES TIPOS DE FISURAS

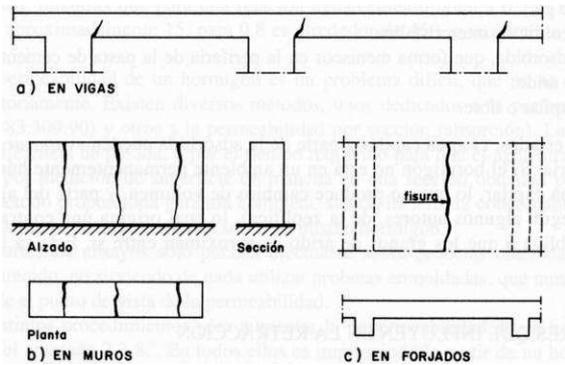
El hormigón estructural presenta, frente al acero laminado, una característica que puede ser considerada negativa y es su capacidad de fisuración. Pero bien es verdad que en el hormigón armado o pretensado, su capacidad de presentar fisuración, también puede ser juzgado como un indicio positivo, ya que pone de manifiesto, a veces ostensiblemente, su natural comportamiento y en consecuencia permite apreciar, preliminarmente, el nivel de riesgo que presenta el elemento dañado.

Cabe hacer notar que una fisura no puede ser en general asignada a una causa sin un estudio detallado posterior, ni evaluar el nivel de riesgo que entraña, pero sí puede decirse que la no idoneidad del comportamiento del hormigón armado puede detectarse mediante la fisuración, y en consecuencia, dirigir el análisis más intenso hacia los tipos de trayectorias de la fisuración detectada.

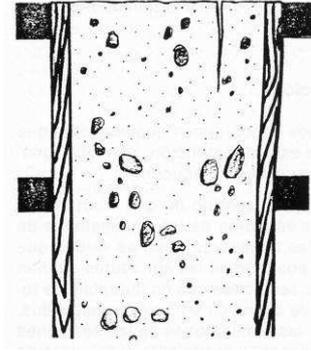
#### A) Fisuras por retracción

Aparecen en elementos lineales o superficiales. Su trazado es inequívoco en vigas, ya que la abertura de fisura puede ser semejante en toda la altura de la sección, tendiendo a manifestarse en los puntos de corte de barras, cambios de sección o marcando la presencia de estribos, con recubrimiento reducido. Pueden manifestarse en secciones solicitadas a flexión, con armadura insuficiente, pero en tales casos la presencia de ésta hace que, a su altura, tenga menos abertura.

La asignación de las fisuras a la retracción debe hacerse descartando otros motivos, y su trascendencia estructural puede ser en ocasiones nula, aunque, incluso en tales ocasiones pueda requerir tratamientos para garantizar la durabilidad. Las estructuras antiguas tienen tendencia a mostrar tal tipo de fisuración, al no quedar especificada en su normativa la exigencia de armaduras de piel en piezas de gran canto o la de cuantías geométricas mínimas por condiciones de temperatura y retracción.



Fisuras por retracción



Fisura por movimiento del encofrado

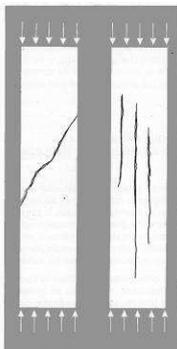
B) Fisuras por movimientos de encofrado

Su carácter es asistemático, y a posteriori es difícil definir si se produjo el movimiento que las ocasionó. La justificación de su aparición está en el hecho de que hubiese movimientos en el encofrado o cimbrado cuando el hormigón tenía una cierta rigidez, pero su resistencia era aún reducida. En general su ancho suele ser importante, y si coinciden en posición con una fisura de presumible carácter estructural pueden crear alarma. Su diagnóstico debe ser realizado eliminando otras causas principales.

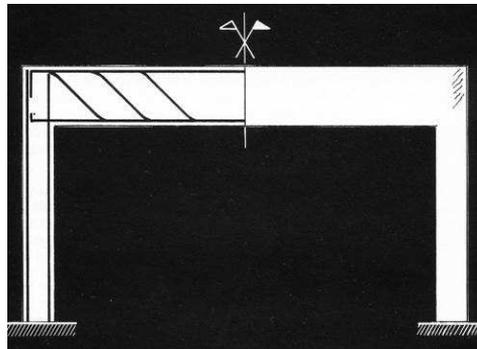
C) Fisuras por trabajo estructural

Pueden ser de varios tipos. Los anchos de fisura en flexión y esfuerzo cortante oscilan entre 0,1 y 0,3 mm, y pueden justificarse incluso en situaciones de seguridad aceptables. Aunque se recomiende siempre un estudio detallado, puede ser suficiente, ocasionalmente, un sellado o inyección, sin precisarse refuerzo del elemento dañado

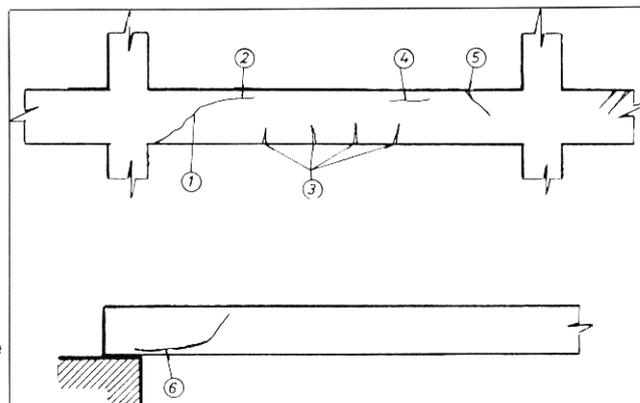
Las fisuras de aplastamiento son en general poco acusadas, teniendo anchos reducidos. En laboratorio pueden detectarse durante ensayo a compresión de piezas, con niveles de carga próximos al 90-95% de la carga de rotura pero su ancho es muy reducido, a veces menor de 0,05 mm. En consecuencia, tales fisuras son indicio de comienzo del fallo estructural, exigiendo actuación de emergencia, y precauciones extremas. Las fisuras de anclaje o solape que se señalan en el croquis, en general son poco accesibles en momentos negativos. En general se producen por fenómenos muy frágiles y cuando se acusan son indicio de que el fallo se ha producido, dejando sin colaboración la armadura de flexión afectada.



Fisuras de compresión



Fisuras de anclaje o solape



- 1 - Fisura de cortante
- 2 - Fisura de anclaje
- 3 - Fisuras de flexión (positivos)
- 4 - Fisura de deslizamiento de anclaje
- 5 - Fisuras de flexión (negativos)
- 6 - Fisuras de adherencia

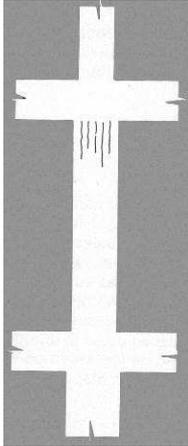
D) Fisuras por asiento de hormigonado

Se produce con el empleo de hormigones de consistencia fluida o líquida, y mal compactados, en elementos horizontales que incorporan armaduras que han sido bien fijadas en su posición. El asiento del propio hormigón, por consolidación natural, marca fisuras en los puntos de presencia de barras. En general tales fisuras son aparatosas por su gran abertura, pero en general quedan cortadas a la altura de la armadura. En ocasiones Pueden confundirse con fisuras de retracción en elementos superficiales.

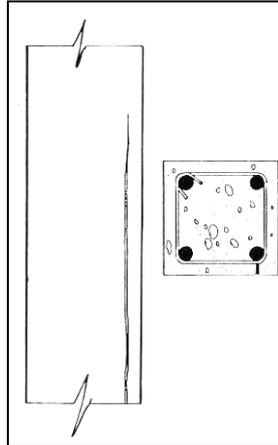
E) Fisuras por grifado de armadura o bajada de estribos

Fisuras que pueden aparecer en pilares como consecuencia de desplazamiento de estribos, una vez descartado el fallo a compresión. Puede disminuir su capacidad portante y ser indicio de aplastamiento o de pandeo de las barras.

Otro tipo de fisuras que se detectan en pilares son las de cabeza o zona superior, localizadas en esquinas; su origen puede encontrarse en grifados de la armadura para conformar la transición entre tramos de pilar, estando hormigonado el pilar poco tiempo antes. Estas fisuras son en general muy ostensibles y a menudo el daño que representan tiene mayor incidencia sobre la durabilidad que sobre la resistencia.



Fisuras por caída de estribos



Fisuras por corrosión



F) Fisuras por corrosión

Tales fisuras, que puede confundirse por su trayectoria con las de compresión en pilares, se manifiestan con dirección longitudinal siguiendo las barras o marcando estribos. Su ancho puede llegar a ser apreciable, e incluso hacer perder el recubrimiento a la pieza. Su origen está en el estallido de la zona de hormigón próximo a la armadura ante los aumentos de volumen que supone la presencia de óxido. Para distinguirlas en fase incipiente, no hay más remedio que descubrir la armadura y observar su estado superficial.

2 ESTUDIOS PREVIOS Y ENSAYOS

2.1 PRINCIPALES MÉTODOS DE ENSAYO DEL HORMIGÓN (\*)

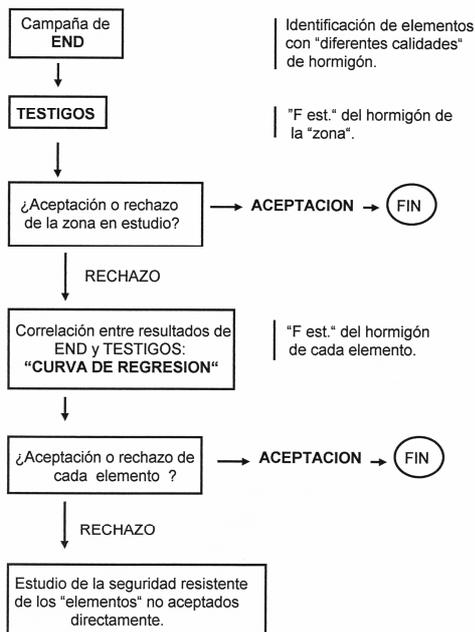
2.1.1 Ensayos físicos:

- Resistencia:
  - Probetas testigo. Esclerómetros. Ultrasonidos. Etc.
- Localización de huecos o coqueras:
  - Endoscopia. Radiografía. Termografía. Radar. Etc.
- Localización de barras de armado.
- Penetrabilidad del agua.
- Difusión de gases.
- Entrada de aire.
- Tipos de áridos.

2.1.2 Ensayos químicos y electro-químicos:

- Constituyentes del hormigón.
- Contenido de cloruro.
- Profundidad de carbonatación.
- Potencial eléctrico de las armaduras.
- Resistividad.

**SISTEMATICA DEL CONTROL, CON "ENSAYOS DE INFORMACION", EN UNA ZONA EN ESTUDIO.**



**PROCESO DE DIAGNOSIS Y EVALUACION DE ESTRUCTURAS DE HORMIGON.**

(CEB. B 192).

FASE	OBJETIVOS	OPERACIONES
PREPARATORIA	Asegurar que el estudio o inspección es eficientemente llevado a cabo con el conocimiento de todos los informes disponibles.	Recogida de todos los datos y resultados de ensayos disponibles.
EXAMEN GLOBAL	Comprender el comportamiento de la estructura. Selección de zonas para el examen en detalle. Determinación de las técnicas de ensayo que son adecuadas.	Inspección visual. Registro fotográfico. Ensayos destructivos. Toma de muestras.
EXAMEN DETALLADO	Conseguir suficientes datos de confianza de modo que la estructura pueda ser evaluada adecuadamente.	Pruebas de carga. Ensayos no destructivos. Ensayos físicos y químicos.
PRESENTACION DE RESULTADOS	Conseguir que los resultados obtenidos en la inspección sean fácilmente evaluados y comparados.	Salidas gráficas de ordenador. Análisis estadísticos.
INTERPRETACION DE RESULTADOS	Usar los resultados registrados para evaluar el cumplimiento, presente y futuro, de la estructura en relación con las exigencias.	Análisis estructural. Análisis del deterioro. Experiencias previas.
RECOMENDACIONES	Determinar qué otras acciones son necesarias: sea reparación, refuerzo, tratamiento preventivo o realización de estudios adicionales.	

**PRINCIPALES ENSAYOS PARA LA ESTIMACION IN SITU DE LA RESISTENCIA DEL HORMIGON (\* )**

TIPO DE ENSAYO	METODO	NORMATIVA	EXPERIENCIA DISPONIBLE
DESTRUCTIVO	PROBETAS TESTIGO	UNE 8330204(84) BS /ASTM /ACI	ABUNDANTE (Escasa para testigos de diámetro pequeño)
NO DESTRUCTIVO	ESCLEROMETR. (ESC. Schmidt-Suiza , 1948)	UNE 83307(86) BS / ASTM / RILEM	ABUNDANTE
	ULTRASONICO (Canadá - Gran Bretaña , 1945)	UNE 83308(86) BS / ASTM	ABUNDANTE
	COMBINADO (Europa del Este, 1966 / 70)	Rumania RILEM(83)	Escasa.
SEMI-DESTRUCTIVO	RESISTENCIA A PENETRACIÓN (Pistola Windsor, USA , 1960)	BS / ASTM / Canadá	Abundante en USA y Canadá. Escasa en Europa .
	PULL-OUT (URSS , 1938) (USA , 1944)	BS / ASTM	Abundante en USA y en algún país Europeo (DK)
	BREAK-OFF (Noruega , 1976)	BS Noruega/Suecia	Escasa.
	NUCLEARES Y RADIOACTIVOS (USA , 1949/52)	BS / ASTM	Abundante en Nucleares y escasa en Radioactivos.

(\*) Adaptación de la Tabla-3 de F. HOSTALET "Situación actual de las Técnicas de Ensayo No Destructivo del Hormigón". Informes de la Construcción nº433, 1994.

**ESTIMACION DE LA RESISTENCIA MECANICA RESIDUAL Y URGENCIA DE LA INTERVENCION EN PROBLEMAS DE CORROSION DE ARMADURAS**

(C.E.B. - B. Nº 162).

CONSTRUCCION	VALORES DE $v$ (*)			
	NIVEL DE DAÑOS EN ELEMENTOS DE HORMIGON ARMADO.			
	A	B	C	D
NUEVA	0,95	0,80	0,60	0,35
VIEJA	0,85	0,70	0,50	0,25

(\*)  $v = (\text{Capacidad mecánica actual} / \text{Capacidad mecánica inicial})$ .

URGENCIA DE INTERVENCION	
$v$	TIEMPO ( Años )
< 0'5	INMEDIATA
> 0'5	1 a 2
$\cong 1$	10 a 20

- 2.1.3 Ensayos de estructuras:
- Pruebas de carga in situ.
  - Monitorización de una estructura.
  - Ensayos vibratorios.
  - Pruebas de carga hasta rotura.

2.2 PRUEBAS DE CARGA.

Constituyen un proceso de investigación sobre una estructura ya construida mediante la reproducción de un estado de carga, con el fin de obtener datos experimentales sobre su comportamiento y/o seguridad.

### 2.2.1 Tipos de prueba:

- A) En situación de rotura.
- B) En situación de servicio:
  - Según el nivel de carga:
    - o Carga inferior a la de servicio.
    - o Carga de servicio.
    - o Carga superior a la de servicio.
  - Según la duración de la prueba:
    - o De duración reducida (< 8 horas).
    - o De duración estándar (>2días).
    - o De larga duración.

### 2.2.2 Documentación de referencia:

- UNE 7.457 - 86: "Realización de ensayos estáticos de puesta en carga sobre estructuras de piso en edificación".
- Normativa de estructuras de hormigón: Instrucciones españolas (EHE, EP y EF). Código americano (ACI - 318).
- GEHO (B. nº1.1988): "Evaluación de la capacidad portante de estructuras mediante pruebas de carga"

## 3 DAÑOS POR MALA CALIDAD DE LOS COMPONENTES Y LA FABRICACIÓN DEL HORMIGÓN

### A) Cemento

- *Problemas específicos:*
  - \* Falta de regularidad (componentes, molturación, almacenamiento)
  - \* Impurezas en las adiciones.
  - \* Peor resistencia a compresión previsible con *filler* calizo.
- *Dosificación:* aumento o disminución respecto a las de referencia de la EHE (ambientes)

### B) Agua

- *Sulfatos* (subsuelo):
  - \* Afectan al propio hormigón con procesos expansivos (etringita).
  - \* Armaduras: destruyen su pasivación, favoreciendo la corrosión.
- *Cloruros* (mar): cambia el pH del hormigón que protege las armaduras (corrosión)
- *Puras* (deshielo de montaña): elevada capacidad de disolución.

### C) Áridos

- *Compuestos de azufre* (del agua o del ambiente):
  - \* Dan sulfoaluminatos muy expansivos.
  - \* Los de piritas son más activos.
- *Arcilla:* afecta a la calidad del hormigón (adherencia de la pasta).
- *Cloruros:* modifica el pH del hormigón que protege las armaduras (corrosión).
- *Granulometría incorrecta:* provoca una disminución de la compacidad del hormigón.

### d) Aditivos

- *Por utilización inadecuada.*
- *Por sobre dosificación o dosificación insuficiente:*
  - \* Conviene usar los que posean D.I.T. y realizar ensayos previos.
  - \* Añadirlos siempre al agua (excepto colorantes y retenedores de agua).
  - \* Necesario premojado de los áridos secos que evite la absorción del aditivo.
  - \* Con inclusores de aire conviene evitar una compactación excesiva.
- *Por defectuosa ejecución.*

## 4 DAÑOS POR ERRORES EN LA FABRICACIÓN DEL HORMIGÓN

- *Manifestación:*

- \* Disminución de la resistencia a compresión.
- \* Prestancia de mal aspecto.
- \* Por retracción conjunta (térmica e hidráulica): fisuras en red marcadamente ortogonal.

- *Granulometría:*

- \* Debe retomarse la conciencia de su importancia en la dosificación.
- \* La resistencia del hormigón debe tender a la del árido.

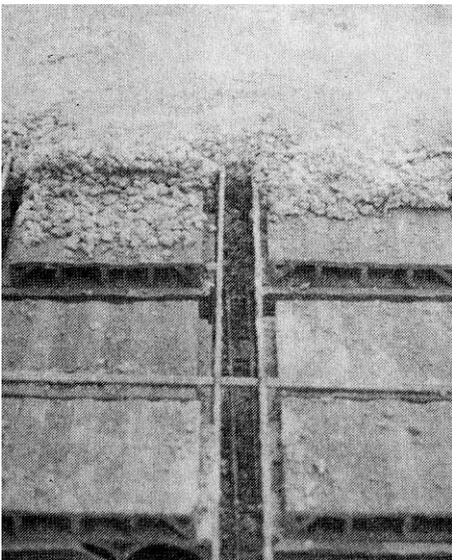
- *Amasado:*

- \* Escaso: falta de arropamiento del árido.
- \* Excesivo: lavado del árido.

- *Transporte:*

- \* Inadecuado: deshomogeneización.
- \* Demasiado largo: desecación y/o principio de fraguado.

- *Vertido:*



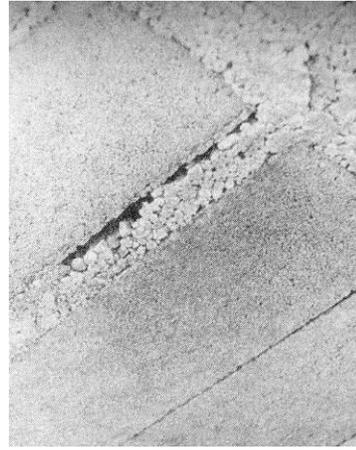
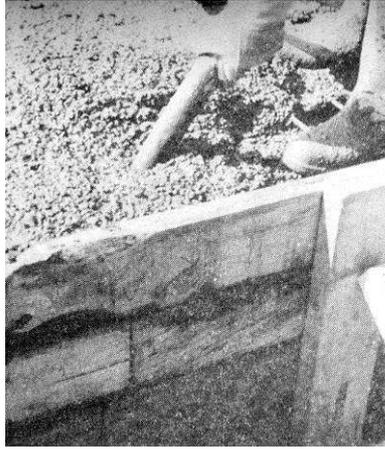
- \* Descuidado: movimiento de armaduras y poca homogeneidad; coqueras.
- \* Mal planificado: juntas mal situadas; uniones defectuosas entre tongadas.

- *Encofrado:*

- \* Desplomado: piezas torcidas; modificación de tensiones; defectos de tolerancias.



- \* Falta de estanquidad: pérdida de lechada; coqueras y cavidades.



- \* Falta de arriostamiento: derrumbes, desplomes, deformaciones.
- \* Muy seco: absorción de agua del hormigón.
- \* Falta de rigidez: abombamientos, flechas.
- \* Sucio: deterioro superficial, rotura del encofrado; pérdida de sección; manchas.

- *Desencofrado:*

- \* Prematuro: deformaciones, flechas, grietas, roturas.
- \* Descuidado: grandes deformaciones instantáneas; deterioro superficial.

- *Compactado:*

- \* Insuficiente o inadecuado: pérdida de compacidad y/o homogeneidad; coqueras no eliminadas.
- \* Excesivo: pérdida de homogeneidad.
- \* Descuidado: pérdida de adherencia hormigón / acero.



Fallo de vertido y compactado



Fisuras de retracción hidráulica por insuficiente curado



- *Curado:*

- \* Insuficiente: desecación; fisuras de afogado y retracción; pérdida de resistencia superficial.

## 5 DAÑOS POR LA FABRICACIÓN, COLOCACIÓN Y PROTECCIÓN DE LAS ARMADURAS

### 5.1 DEFECTOS DE FABRICACIÓN Y ACOPIO DE LAS BARRAS

#### A) Por impurezas del acero

- *Metálicas:* de P, S, Mn, Si, en porcentaje superior a un límite perjudicial.
- *Inclusiones:*
  - \* Sustancias extrañas de alto punto de fusión: óxidos, silicatos, sulfuros, etc.
  - \* Provocan discontinuidad de la masa metálica, concentración de tensiones, etc.
- *Gases retenidos:* oxígeno, nitrógeno, hidrógeno disueltos en el acero líquido.

#### B) Por defectos superficiales

- *Pliegues por laminación incorrecta:* constituyen el principio de la formación de grietas.
- *Desgarramientos:* por deformación excesivamente rápida, o sobre material ya frío.

**C) Por oxidación o corrosión superficial**

- Por almacenamiento en ambientes corrosivos.
- Armaduras en espera:
  - \* Expuestas a la intemperie demasiado tiempo.
  - \* Acentuado por los doblados para evitar molestias.

**5.2 CORROSIÓN DEL ACERO**

- Las armaduras están protegidas por el hormigón:
  - \* Debido a su elevada alcalinidad forma una película de pasivación del acero.
  - \* Su reducida permeabilidad (con buena calidad) evita el paso de aire y humedad.
- Oxidación interna: cuando el oxígeno es capaz de penetrar en ausencia de humedad.
  - \* Se produce una merma de resistencia mecánica según diámetro de armadura.
  - \* El mayor volumen del óxido provoca expansión que agrieta el hormigón: más oxidación.



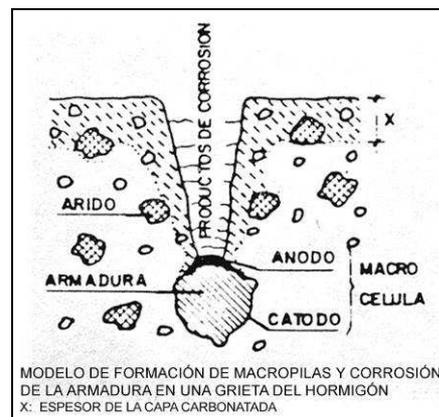
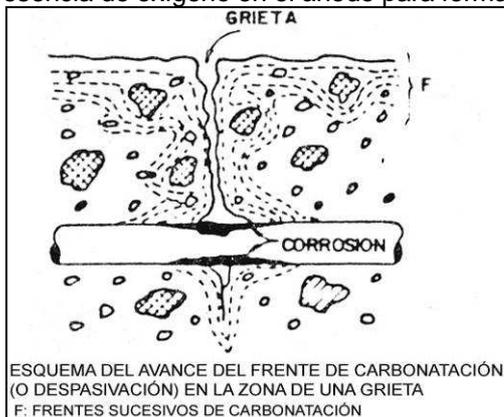
INDICACIONES VISUALES	NIVELES DE DAÑOS EN PROBLEMAS DE CORROSIÓN DE ARMADURAS (*)				
	A	B	C	D	E
CAMBIOS DE COLOR.	Manchas de óxido.	( A )	( A )	( A )	( A )
FISURACION	Alguna longitudinal.	Varias longitud. + alguna en estribos.	Generalizada.	( C )	( C )
DELAMINACION DEL RECUBRIMIENTO.	-	Algo	Generalizada.	En zonas el acero no está en contacto con el hormigón	( D )
MERMAS DE SECCION DEL ACERO.	-	5%	10%	25%	Rotos algunos estribos
FLECHAS.	-	-	-	Posibles	Visibles

(\*) Según el "Manual de inspección de obras dañadas por corrosión de armaduras" del Instituto Eduardo Torroja, 1989.  
(Clasificación de daño sugerida por CEB - B.N°162).

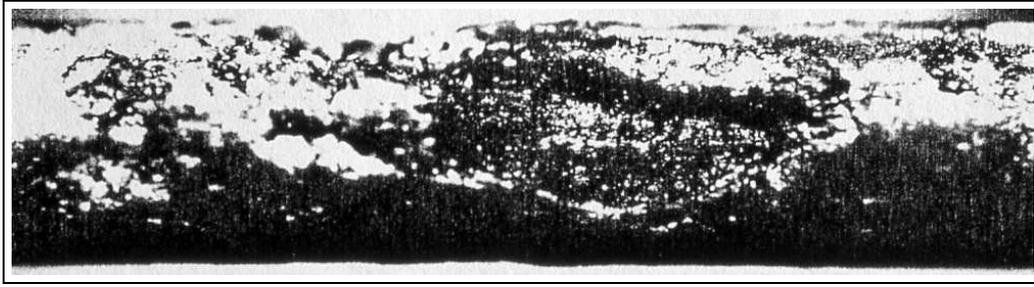
Niveles de daños por corrosión de armaduras

- Requisitos de la corrosión electroquímica:

- a) Presencia de electrolito: agua con sustancias o gases disueltos
- b) Diferencia de potencial electroquímico
- c) Presencia de oxígeno en el ánodo para formar el óxido



- \* Destrucción de la delgada película de oxígeno pasivadora (por pH > 13) si:
  - El hormigón es permeable: penetra el CO<sub>2</sub> y reacciona con el Ca(OH)<sub>2</sub>
  - La alcalinidad del medio desciende por debajo de 11,5
  - Se dan las condiciones a), b) y c).
  - Existe presencia de cloruros.



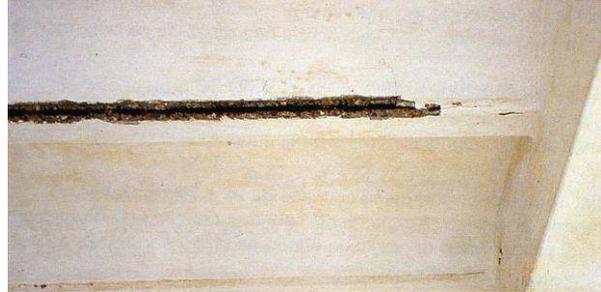
- *Acritud del acero por absorción de hidrógeno:*

- \* No es importante en armaduras ordinarias, pero sí en cables de pretensado.
- \* Se debe a la introducción del hidrógeno en el acero por diversas vías:
  - Decapado del hierro con ácidos
  - Exposición a un ambiente con determinados gases (cianhídrico, sulfúrico, etc.)
- \* El acero se vuelve frágil y puede romper con cualquier solicitud de tracción (acritud)



- *Manifestación de las lesiones:*

- \* Fisuras debidas a corrosión (y expansión del óxido): paralelas a la dirección de las barras.



- \* En las barras sometidas a compresión: misma dirección que las de origen tensional.
- \* Fisuras de corrosión de armadura principal: próximas a los vértices y labios en distinto plano.

### 5.3 DEFECTOS DE COLOCACIÓN DE LAS ARMADURAS

- *Transversales y longitudinales:*

- \* Débilmente trabadas: movilidad de la jaula.
- \* Soldadas: pérdida de resistencia de aceros de alta adherencia.

- *Diagonales y transversales:*

- \* De cortante o de rigidización de jaulas: deshomogeneización al verter contra ellas.

- *Doblado de las barras:*

- \* Radio excesivamente pequeño: grietas.
- \* Por calentamiento: pérdida de resistencia.

- *Colocación:*

- \* Mal aplomado: recubrimientos excesivos o insuficientes.
- \* Sin separadores: escaso recubrimiento, cambio de posición de barras (y tensiones).



\* Desviación barras sueltas: ineffectividad; modificación peligrosa de tensiones.

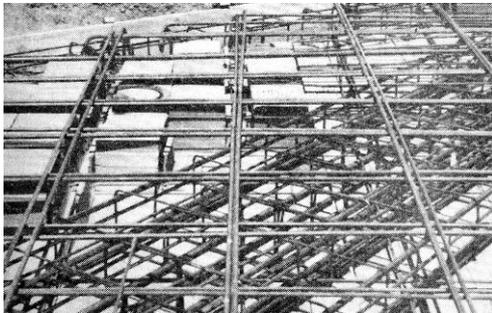
- Ausencia de armaduras de piel:

\* Fisuración de afogamiento y retracción.

- Exceso de armaduras:

\* Falta de compacidad; recubrimientos insuficientes; pérdida de adherencia; coqueas.

\* En piezas a flexión: riesgo de plastificación de las zonas solicitadas por compresión.



- Manifestación de lesiones:

\* En fallos de adherencia (falta de longitud de anclaje, etc.): fisuras normales a la armadura acompañadas en ocasiones de fisuras paralelas.

## 6 DAÑOS CAUSADOS POR AGENTES EXTERNOS

### 6.1 Influencia del ambiente en la durabilidad

AMBIENTES	I (no agresivo)	Ila (Visto, hum. alta)	Iib (visto, hum. normal)	III – IV (marino, piscinas)
DESCRIPCIÓN	.Interiores .Horm. en masa	.Interiores sometidos a humedad alta y condensaciones. .Exteriores expuestos a la lluvia (zonas húmedas). .Horm. Sumergidos o enterrados.	.Exteriores expuestos a la lluvia zonas secas).	.Exteriores zonas costeras (<5 Km al mar). .Piscinas.
EJEMPLOS	.Interiores.	.Sótanos no ventilados. .Cimentaciones.	.Estructuras vistas (protegidas de la lluvia directa). .Aleros y balcones.	.Estructuras vistas (zonas costeras). .Vasos de piscinas.

- Las dosificaciones que plantea la EHE para ambientes I y II son insuficientes.
- Las relaciones a/c son excesivamente bajas (mayor docilidad en edificación).
- Criterio general: aumentar la compacidad y, con ello, la impermeabilidad.
- No se determinan ni el criterio de composición granulométrica ni el método para obtener la impermeabilidad.

### 6.2 Tipos de daños

A) **Por agentes físicos** (agua, viento, temperaturas extremas, etc.)

- Sobre el hormigón fresco:

\* Lavado de los finos, disminuyendo el recubrimiento.

\* Congelación: impide la hidratación y destruye la micro estructura cristalina

\* Desecación: hidratación incompleta; resistencia insuficiente; fisuras

- Sobre el hormigón endurecido:

\* Bajas temperaturas: roturas por heladicidad, al hincharse el agua en los poros.

- \* Abrasión: poco frecuente, salvo en usos específicos.
- \* Roturas por dilataciones / contracciones térmicas, al carecer de juntas.



Rotura por contracción térmica



Erosión debida a la agresión química



- *Manifestación de las lesiones por heladicidad:*

- \* Progresivo desprendimiento de trozos en forma de escamas, paralelas a la superficie.
- \* Antes suelen presentarse síntomas en otros materiales menos resistentes a la helada.

**B) Por agentes químicos:**

Otras sustancias perjudiciales para el hormigón, además de los sulfatos de Na, K, Mg, etringita, por su hidratación expansiva, son ciertos óxidos del cemento pórtland, como la cal libre que pasa a hidróxido, el óxido de magnesio y el trióxido de azufre, responsable del fenómeno del falso fraguado. Y la oxidación de las armaduras, al formarse un material alterado más poroso y voluminoso que el acero original.

Además de las reacciones expansivas, el hormigón suele ser atacado por causa de la disolución de compuestos hidratados del cemento, principalmente los cálcicos. Por la formación de sales solubles arrastradas por el agua, como es el caso de los ataques por aguas puras, ácidos orgánicos e inorgánicos, agua de mar, etc. Las sustancias que poseen carácter agresivo sobre los hormigones son:

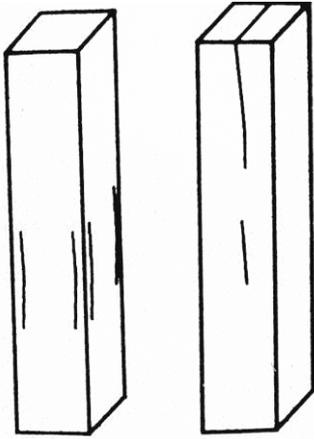
- Gases ácidos: el ataque sólo reviste importancia cuando se trata de gases de concentración elevada y en ambiente húmedo, salvo el CO<sub>2</sub> que también actúa en ambiente seco.
- Aguas agresivas: del subsuelo u otros orígenes, como las ácidas, puras, sulfatadas o selenitosas, residuales, con detergentes, etc., cuya acción se incrementa al estar en movimiento.
- Líquidos que desprenden burbujas, ácidos, aceites vegetales y otros compuestos orgánicos. Tierras y suelos con humus y sales cristalizadas.

**7 DAÑOS CAUSADOS POR ERRORES DE PROYECTO O FALLO ESTRUCTURAL**

**7.1 En pilares**

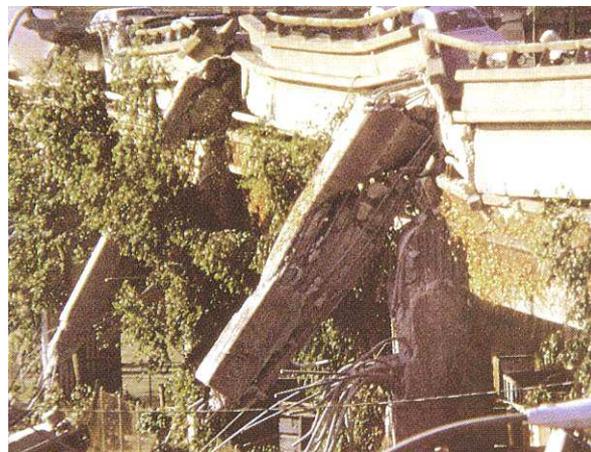
**A) Aplastamiento del hormigón:**

- \* *Síntomas:* Rotura rápida y muy grave: fisuras en las caras opuestas del pilar o en las esquinas. Pandeo de las armaduras longitudinales.
- \* *Causas:* Errores de dimensionado o cálculo; exceso de carga.



B) Cortante:

- \* *Síntomas:* Rotura rápida y muy grave: fisuras a 60° en dos caras opuestas y horizontal en las otras.
- \* *Causas:* Sección o armadura transversal insuficientes; empujes o momentos excesivos; deslizamiento de la cimentación.



C) Tracción:

- \* *Síntomas:* Rotura grave o muy grave según la causa: fisura o grieta horizontal en toda la sección.
- \* *Causas:* Asiento del terreno; omisión o insuficiente viga centradora; excavación cercana; acortamiento de las cabezas de pilares inferiores por fluencia o recredido defectuoso.



Rotura por tracción



Roturas por flexión

D) Flexión:

- \* *Síntomas:* Rotura grave: fisura fina horizontal en la cabeza o pie del pilar.

\* **Causas:** Error de cálculo; armadura insuficiente; aumento del momento por asiento; empuje.

## 7.2 En vigas y viguetas:

### A) Flexión:

\* **Síntomas:** Roturas graves: grietas o fisuras ortogonales a la directriz en las zonas traccionadas.

\* **Causas:** Sección o armadura insuficiente; sobrecarga excesiva; escasa longitud de anclaje; cálculo erróneo; omisión de patillas; luz mayor de la prevista.



Ensayo de rotura a flexión de una viga



Colapso por cortante

### B) Cortante:

\* **Síntomas:** Rotura muy grave, a veces instantánea: fisuras cerradas a 45°-75° hacia el pilar.

\* **Causas:** Sección o armadura transversal insuficientes; sobrecarga excesiva; error de cálculo.

### C) Aplastamiento del hormigón:

\* **Síntomas:** Rotura muy grave: fisuras horizontales.

\* **Causas:** Sección pequeña y exceso de armaduras de tracción; carga excesiva; cálculo erróneo.



Rotura por aplastamiento



Grietas y fisuras por torsión

### D) Torsión:

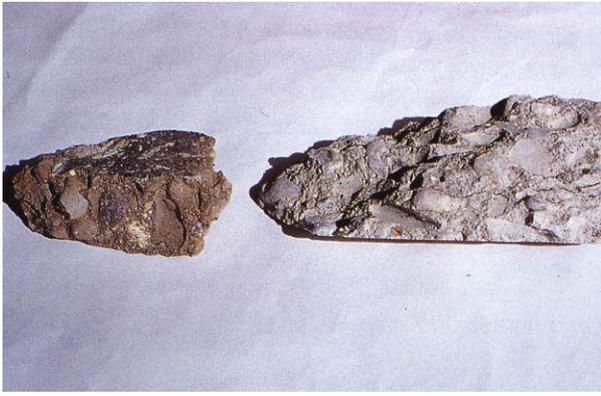
\* **Síntomas:** Rotura grave y rápida con escasa armadura; forma red a 45°-75° en el contorno.

\* **Causas:** Sección o armadura insuficiente; sobrecarga excesiva; cálculo deficiente; con brochales.

### E) Aluminosis:

\* **Síntomas:** Lesión grave: oscurecimiento del hormigón y a veces fisuras en el sentido de las barras.

\* **Causas:** Empleo de cemento aluminoso; transformación de los aluminatos; humedad y temperatura elevadas; carbonatación del cemento; ubicación en la costa o en baños.



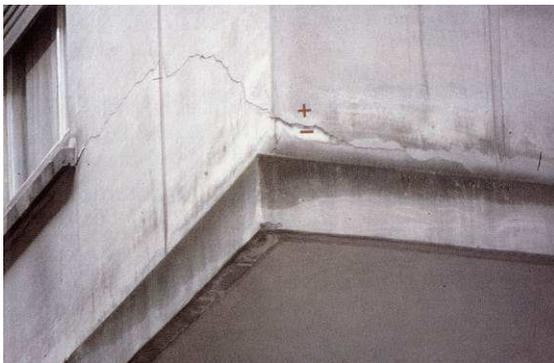
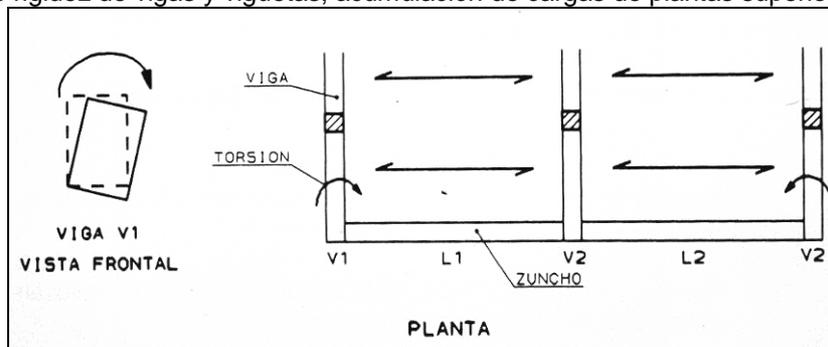
F) Cortante en viguetas:

- \* *Síntomas:* Lesión muy grave en la que pocas veces surgen fisuras pues la rotura es instantánea.
- \* *Causas:* Sección insuficiente; sobrecarga excesiva; omisión armadura transversal; luz excesivas.



G) Deformación de vigas y viguetas en voladizo:

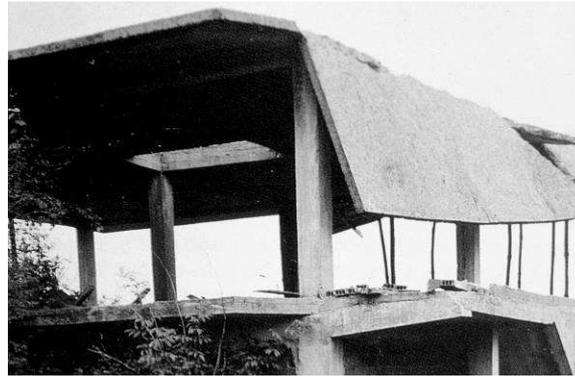
- \* *Síntomas:* Lesiones leves o medias: fisuras horizontales o inclinadas a 45°.
- \* *Causas:* Falta de rigidez de vigas y viguetas; acumulación de cargas de plantas superiores.



7.3 En forjados

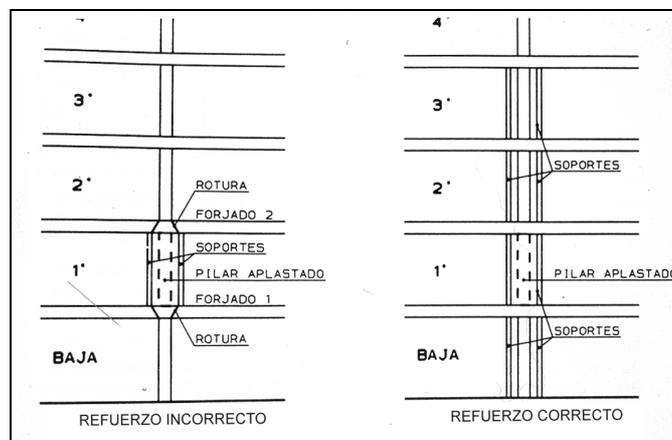
A) Caída de forjados en voladizo:

- \* **Síntomas:** Rotura muy grave: fisura de flexión y desprendimiento del voladizo .
- \* **Causas:** Omisión de la armadura de negativos o colocarla muy baja; falta de continuidad.



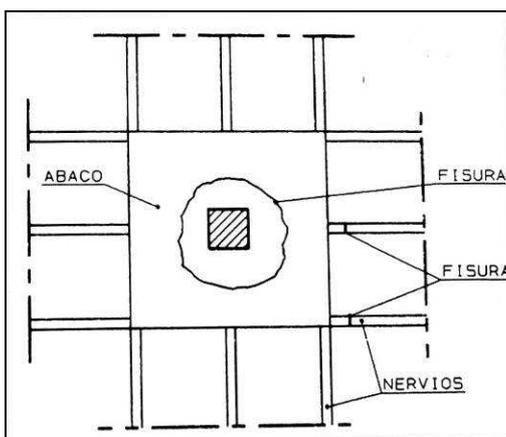
B) Apuntalamiento incorrecto:

- \* **Síntomas:** Rotura muy grave a 45° por cortante en forjado inferior y superior.
- \* **Causas:** Colocar perfiles sólo en la planta afectada donde el pilar carece de resistencia.



C) Cortante en nervios que entregan en el ábaco:

- \* **Síntomas:** Rotura muy grave a 45° difícil de observar por su poca capacidad de aviso.
- \* **Causas:** Cálculo erróneo; omisión de armadura transversal; sobrecarga imprevista.



Rotura por cortante de viguetas



Grietas de punzonamiento del pilar en el ábaco

D) Punzonamiento:

- \* **Síntomas:** Rotura rápida y muy grave con fisuras cerradas que se sitúan alrededor del pilar.
- \* **Causas:** Poco espesor del forjado; armadura transversal insuficiente; baja de resistencia.

E) Aplastamiento de la base de bovedillas:

- \* **Síntomas:** Se aplastan y desprenden las bases de bovedillas de una calle de viguetas.

\* Causas: Asiento de la cimentación; deformación excesiva del forjado.



## 8 ACTUACIÓN EN ESTRUCTURAS DE HORMIGÓN

### 8.1 Reparación de fisuras

Cuando aparecen fisuras con abertura fuera de los límites aceptables para el ambiente en que se encuentra la obra hay que intervenir con objeto de restaurar el monolitismo, proporcionar impermeabilidad para evitar la penetración de sustancias químicamente agresivas, además de mejorar el aspecto de la obra.

Antes de la actuación es preciso obtener cierta información sobre las lesiones:

- Tipos de fisuras: trayectoria, localización, agrupamiento, etc.
- Estado de las fisuras: vivas (con movimiento), o estabilizadas.
- Diagnóstico: causa de las roturas.

A continuación habrá que elegir el método de reparación, para lo que se dispone de varias opciones:

- Inyección.
- Vaciado y sellado de la fisura.
- Formación de junta y recubrimiento.
- Otros: Cicatrización. Ocratización. Grapado. etc.

#### A) Inyección de fisuras.

La inyección permite hacer *estanco* un hormigón fisurado e incluso restablecer su *continuidad mecánica*. El relleno podrá ser parcial o total, con un material para simple compactación o para pegado adicional de la zona fisurada. La inyección es una técnica apropiada para "fisuras estabilizadas". En "fisuras con movimientos pequeños" podría utilizarse siempre que los materiales de relleno sean flexibles.

Los materiales de inyección pueden estar basados en resinas epoxídicas, aerificas, u otras. Será conveniente conocer y prescribir el grado de penetrabilidad y adherencia, resistencia y durabilidad.

El procedimiento a seguir puede ser:

- Sellado extremo de la fisura.
- Colocación de tubos de inyección (en rellenos someros) o realización de "taladros" (en rellenos profundos).
- Limpieza del hueco mediante agua a presión y posterior secado con aire caliente.
- Aplicación de presión en la resina:
  - o Baja (0'1 a 0'4 Mpa) en rellenos someros.
  - o Alta (1 a 2 Mpa) en rellenos profundos.

El material de relleno a emplear, según la anchura (w) de la fisura, puede ser:

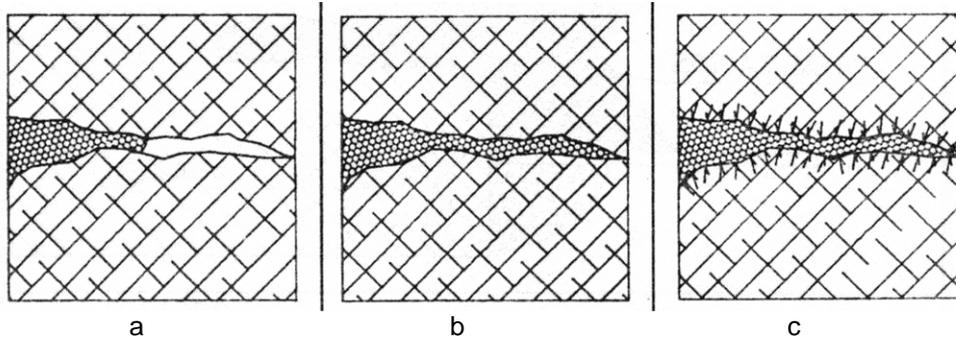
- $w < 0'6$  mm: Resina pura.

- W: 0'6 a 3'0 mm:
- W > 3'0 mm:

Resina con polvo de vidrio.  
Mortero de resina y arena fina.

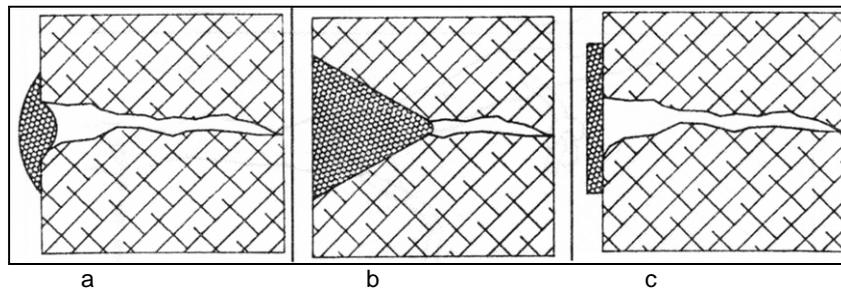
Los tipos de inyección más utilizados son:

- Relleno parcial de la fisura
- Relleno total
- Pegado de la zona fisurada

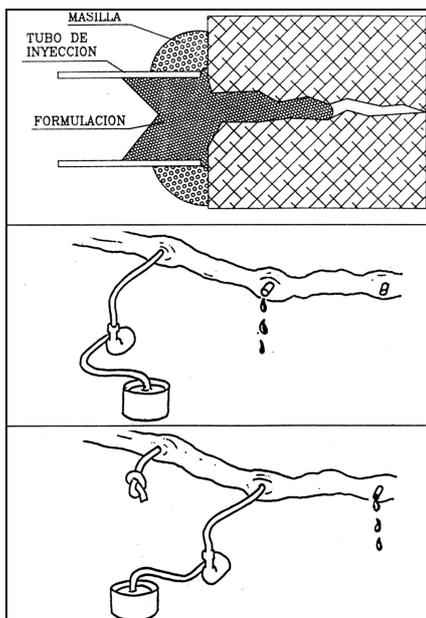


Una opción al relleno dentro de la misma técnica de reparación de fisuras es el sellado externo, que puede hacerse por los tres siguientes procedimientos

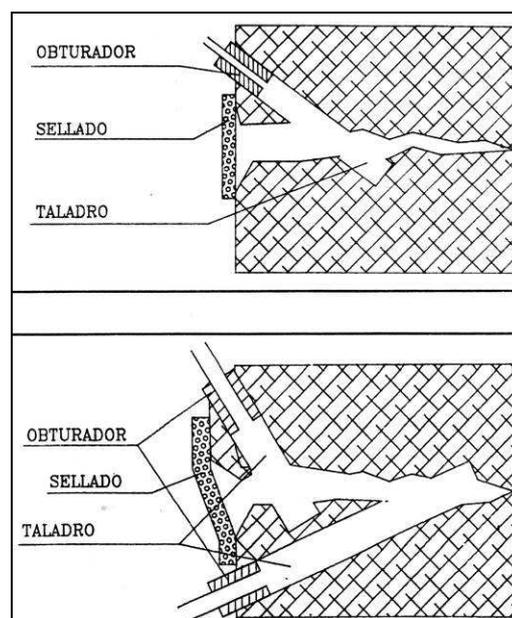
- Cordón de masilla
- Cajeado y posterior relleno de masilla
- Banda de tejido adherido



En cuanto a los procedimientos de inyección, puede optarse por la inyección desde la superficie, o por la inyección interna, que a su vez puede ser con relleno total o con relleno parcial.



Inyección desde la superficie



Inyección interna

## B) Formación de juntas

Esta solución es aplicable a "fisuras vivas" con movimiento de cierta entidad. Se trata de convertir la fisura en una junta controlada y estanca. Para ello, el procedimiento a seguir consta de las siguientes etapas:

- Vaciado o cajeado de la cabeza de la fisura.

- Recubrimiento con materiales adecuados.

En el caso de elementos verticales como muros de cierre o contención las soluciones posibles son:

- a. Con material de sellado elástico, que se coloca cuando la fisura está ensanchada, de modo que el sellante tendrá menos posibilidades de desgarramiento.
- b. Sellado con neopreno predeformado.
- c. Banda flexible pegada en bordes, no siendo necesario el cajeadado.

Para elementos horizontales como soleras:

- a. En el caso de que no soporten tráfico: vale la solución (a) anterior.
- b. Si soportan tráfico, se usa una banda metálica (sección "en avión") y materiales de recubrimiento.

## 8.2 Reparación de hormigones disgregados

Los principales deterioros del hormigón de las estructuras por razones no estrictamente mecánicas pueden atribuirse a alteraciones químicas por la acción de la contaminación del ambiente o impurezas de los componentes, o bien son debidos a los fenómenos de corrosión electroquímica de las armaduras. En la mayoría de los casos se producen pérdidas de hormigón o éste se encuentra disgregado.

Los requisitos del hormigón a reparar son:

- a. Resistencia de la superficie: ensayo de arrancamiento de disco adherido (se exige, en general, mayor de  $5n/mm^2$ ).
- b. Estado de humedad de la superficie:
  - Saturado: sin encharcamiento, cuando se van a adherir morteros tradicionales.
  - Seco máxima humedad del 6% en peso, si se van a colocar resinas o materiales poliméricos.

La actuación consistiría en una fase previa de protección y apeo, si fuera necesario, y luego unas operaciones de saneamiento del material deteriorado. Se requiere una superficie saneada y rugosa con objeto de obtener mayor adherencia y uniones más eficaces y duraderas. Debe eliminarse la capa superficial de lechada, así como el hormigón que se halle deteriorado, disgregado o contaminado. Los procedimientos pueden ser:

- a. Mecánicos:
  - Chorro de arena: debe reducir el espesor no más de 5 mm. Se caracteriza por su rapidez y obtención de buena rugosidad, pero resulta caro.
  - Chorro de agua a presión: con 10/40 atmósferas se obtiene una simple limpieza; 40/120 atm. Da buenas rugosidades; con 120/240 atm. se llega a cortar (hidrodemolición).
  - Pistolas de agujas mecánicas.
  - Martillos de percusión.
  - Granalladoras: granalla de acero.
  - Escarificación: agujas de diamante.
  - Lijado: disco de esmeril.
- b. Métodos químicos:
  - Limpieza con desengrasantes o decapantes.
  - Chorro de vapor con aditivos de limpieza.
- c. Métodos térmicos:
  - Lanza térmica de oxígeno (oxicorte): corte de hormigones de grandes espesores (50 a 150 cm).

A continuación debe conformarse la superficie de la pieza de tal modo que se favorezca la conexión con las prótesis o nuevo material que se dispondrá junto al preparado. Por lo general se usan formas características, como cajeados, cola de milano, etc. Además es recomendable, no sólo con problemas de corrosión, dejar descubiertas las armaduras para permitir su limpieza y protección, así como favorecer la conexión entre materiales viejo-nuevo. Para finalizar la preparación se colocará un adhesivo que hará la unión con el nuevo hormigón.

La siguiente etapa es la unión del material de reparación, para lo cual puede usarse alguna de las siguientes soluciones:

- Recubrimiento con hormigón nuevo colocado mediante encofrado.
- Hormigón proyectado.
- Enfoscado con mortero.

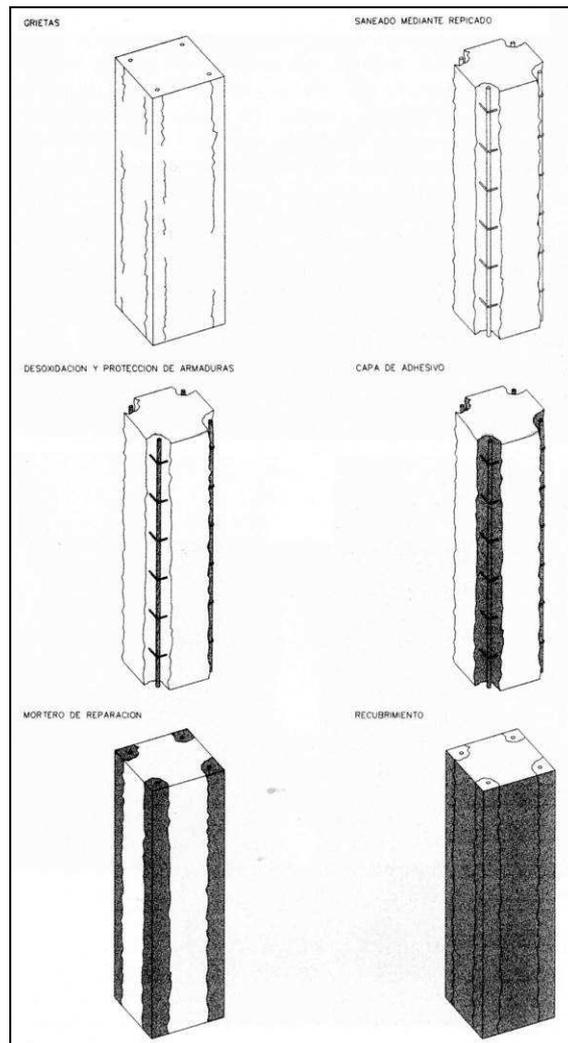
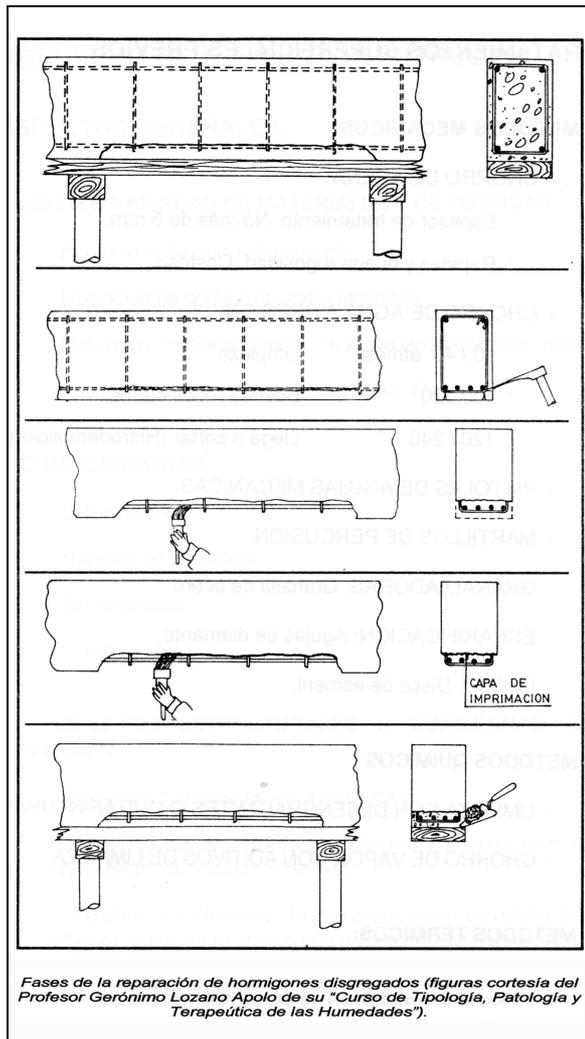
Posibles materiales de reparación.	ESPESOR RECUBRIMIENTO (mm)						Vertido o inyecc.	Ligante para adherir
	AREAS GRANDES			AREAS PEQUEÑAS				
	60 a 100	25 a 60	12 a 25	6 a 12	12 a 25	6 a 12		
Lechada.							+	+
Mort. tradic.			+	+	+	+	+	
Hormigón y microhormig.	+						+	
Hormigón proyectado.		+						
Mortero modific. con expansivos.				+	+	+	+	
Mort. fosfato de magnesio		+						
Mort. epoxi				+	+	+	+	+
Mort. poliuret.				+	+	+	+	+
Mortero poliéster						+		
Mixtos con polímero termoplástico.			+	+	+	+		+
Mixtos con polímero termoestable.			+	+	+	+		

**Selección de morteros de reparación según espesores y áreas (Basado en GEHO: "Morteros de reparación" (B. N° 4. 1989).**

Hormigones. Morteros. Rellenos (lechadas):	BASE CEMENTO	BASE CEMENTO-POLIMEROS	RESINAS EPOXI	BASE POLIESTER
Resistencia a compresión	20 - 70 (N/mm <sup>2</sup> )	10 - 60 (N/mm <sup>2</sup> )	55 - 110 (N/mm <sup>2</sup> )	55 - 110 (N/mm <sup>2</sup> )
Módulo Elástico	20 - 30 (KN/mm <sup>2</sup> )	1 - 30 (KN/mm <sup>2</sup> )	0,5 - 20 (KN/mm <sup>2</sup> )	2 - 10 (KN/mm <sup>2</sup> )
Resistencia a flexión	2 - 5 (N/mm <sup>2</sup> )	6 - 15 (N/mm <sup>2</sup> )	9 - 29 (N/mm <sup>2</sup> )	8 - 17 (N/mm <sup>2</sup> )
Resistencia a tracción	1,5 - 3,5 (N/mm <sup>2</sup> )	2 - 8 (N/mm <sup>2</sup> )	9 - 29 (N/mm <sup>2</sup> )	8 - 17 (N/mm <sup>2</sup> )
Elongación a rotura, %	0	0 - 5	0 - 15	0 - 2
Coef. lineal de Expansión Térmica	7 - 22 x 10 <sup>-6</sup> por °C	8 - 20 x 10 <sup>-6</sup> por °C	25 - 30 x 10 <sup>-6</sup> por °C	25 - 30 x 10 <sup>-6</sup> por °C
Absorción de agua (7 días a 25 °C)	5 - 15	0,1 - 0,5	0 - 1	0,2 - 0,5
Temperatura máx. de uso	Por encima de 300 °C	100 - 300 °C	40 - 80 °C	50 - 80 °C
Tiempo de desarrollo de resistencia a 20 °C	1 - 4 semanas	1 - 7 días	6 - 48 horas	2 - 6 horas

**Comparación de propiedades de los morteros de reparación más utilizados: Basado en GEHO: "Morteros de reparación" (B. N° 4. 1989).**

Por último, cuando se quiere garantizar una durabilidad suficiente tras la reparación, suele recurrirse a una protección adicional de la superficie del hormigón.



La reparación mediante refuerzo de las estructuras de hormigón armado es una intervención clásica, bien conocida y experimentada desde hace varias décadas, contándose para ello con variados materiales y técnicas, como son los recrecidos de hormigón armado, la implementación de perfiles de acero laminado, el uso de bandas de acero laminadas con resinas, el relleno y arriostamiento, pretensado y postensado, etc.

Antes de llevar a cabo una actuación de refuerzo sobre una estructura de hormigón habrán de considerarse una serie de condiciones previas, relativas al comportamiento mecánico, rapidez y seguridad de la ejecución, y otras de tipo económico y estético, no menos importantes.

No obstante, las primeras son decisivas, dada la naturaleza de los elementos a reforzar, por lo que habrá de tenerse en cuenta la posible alteración de rigideces de los componentes de la estructura, la futura coexistencia de antiguos y nuevos materiales con capacidad mecánica y deformabilidad distintas.

Así mismo, es muy importante resolver transferencia de esfuerzos entre el elemento original y el refuerzo, según que la unión entre ambos sea con adhesivos, conectadores, etc. Y plantear la necesidad de descarga parcial de elemento estructural afectado y su posterior entrada en carga.

### 8.3.1 Seguridad en la estructura

No es fácil saber cuándo será ineludible proceder a reforzar la estructura, pero parece prudente que sea siempre que el coeficiente de mayoración de acciones haya sufrido un decremento superior al 10%. Debe hacerse un estudio a fondo de la estructura que disminuya la probabilidad de aparición de otros defectos para cuyo fin se destina el coeficiente de seguridad (errores o desajustes del cálculo, variabilidad de la geometría o de cargas permanentes, etc.).

### 8.3.2 Tipos de refuerzo

Los refuerzos que pueden introducirse en una estructura pueden ser de dos tipos, según el momento en que los nuevos elementos que se incorporan entran en carga.

- Refuerzos activos: son aquellos cuya colaboración resistente se alcanza desde el momento de la entrada en servicio de la estructura.

- Refuerzos pasivos: los que entran en carga ante condiciones específicas del material que originalmente conforma la estructura (fluencia, retracción, etc.) o bien ante un fallo del mismo.

En general, los refuerzos activos, son adecuados para aliviar situaciones de seguridad precaria en elementos originales, siempre que las características del material de base que conforma la estructura original no sea capaz, mediante reología, deformabilidad, o plasticidad, de movilizar la capacidad resistente del refuerzo. En general requiere cimbrados costosos y el empleo de gatos u otros procedimientos auxiliares para descargar el elemento que se refuerza.

Los refuerzos pasivos son en general adecuados para elevar los niveles de seguridad ante situaciones en que, aun sin riesgo de ruina, quiere mejorarse la garantía de un comportamiento estructural. Asimismo son adecuados en los casos que hemos citado al hablar de los refuerzos activos, es decir cuando la deformabilidad de la estructura, garantiza la entrada en carga del refuerzo, bien inicialmente o a largo plazo, y todo ello sin llegar a situaciones de carga en el elemento original que puedan considerarse críticas. Este tipo de refuerzo requiere un mejor conocimiento del comportamiento de la estructura a reforzar tanto desde el punto de vista del material que la integra como de sus condiciones de deformabilidad; el ahorro en medios auxiliares se logra en base a un análisis más profundo.

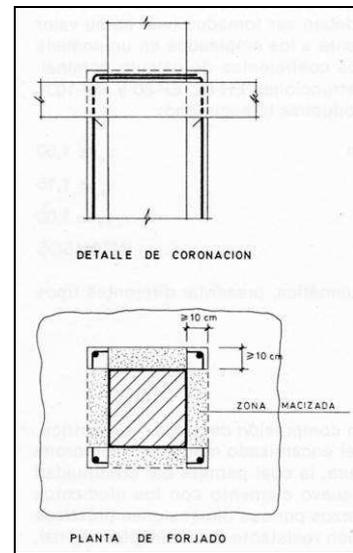
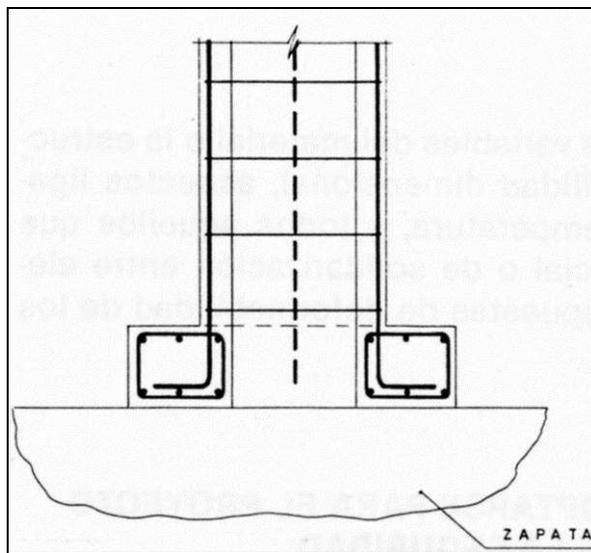
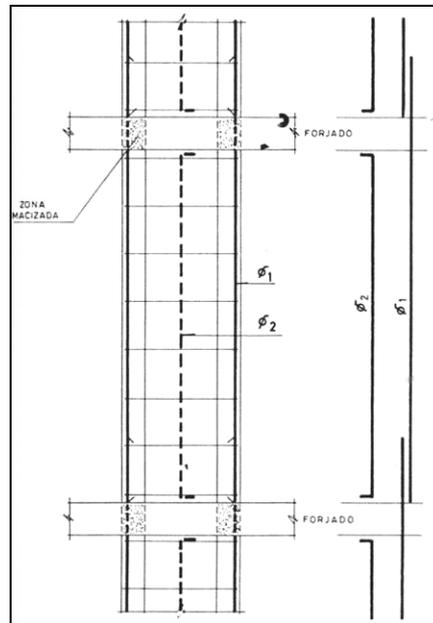
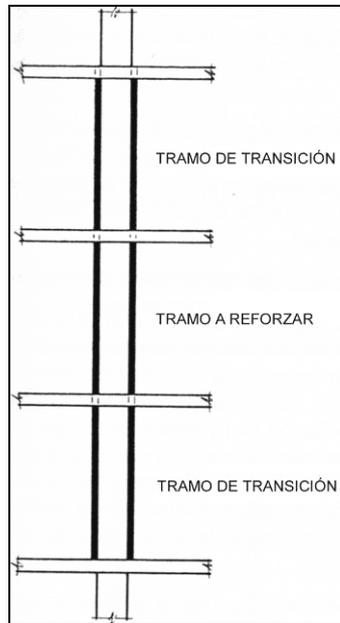
En los casos de selección de un refuerzo pasivo, es preciso conocer una serie de características del material de la estructura, y de la propia estructura en general, ya que las mismas pueden condicionar, bien el dimensionado del refuerzo o, en algunos casos, incluso su tipología estructural. En lo referente a las estructuras de hormigón, es particularmente importante un análisis detallado de las siguientes variables.

#### a) Deformabilidad de la estructura

En general deben conocerse en detalle, los aspectos de deformabilidad de la estructura original, tanto ante aplicación de cargas instantáneas como valorando los incrementos que en las deformaciones instantáneas tienen las cargas de larga duración. Particularmente esto es importante ante la introducción de elementos metálicos, en los que su colaboración se logre por procesos que parten de la hipótesis con compatibilidad de deformaciones.

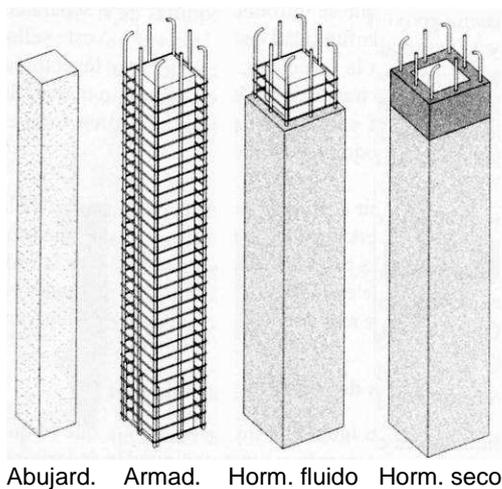
#### b) Las características mecánicas del material a reforzar





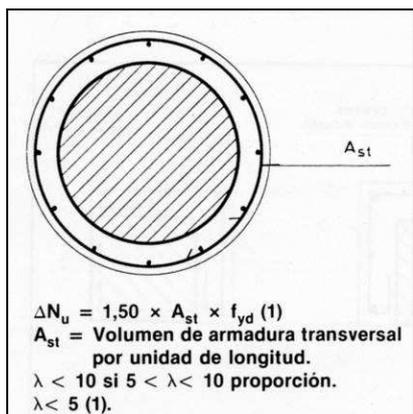
Refuerzo de pilares con hormigón armado

Estos refuerzos por sus dimensiones prácticas de ejecución permiten anular la contribución resistente del elemento original, el cual, mediante fluencia, transmitiría incluso parte de la carga que inicialmente tuviese a la corona. Requieren ser cimentados, en unos casos, o analizar la transmisión de la carga al elemento original en caso en que el refuerzo no alcance al tramo adyacente de la cimentación.

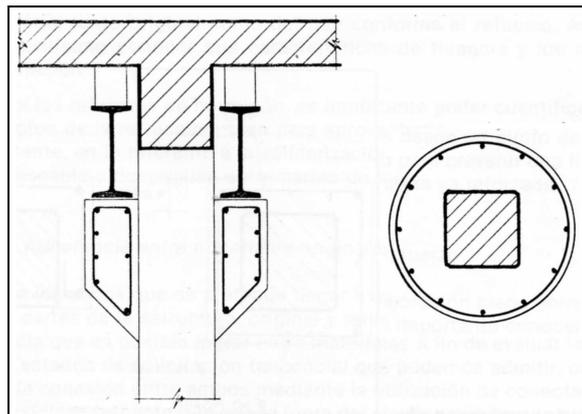


Existe otro tipo de refuerzo de hormigón que consiste en mejorar las características resistentes del material existente en la pieza comprimida mediante zunchado; el cálculo de estos elementos se recoge en la Instrucción EHE, siendo en general condicionante la geometría del elemento y las altas cuantías de armadura transversal. En algunos

casos pueden resultar interesantes técnicas especiales de hormigonado (hormigón proyectado, etc.), para estructuras en compresión.



Zunchado con hormigón in situ, o gunitado



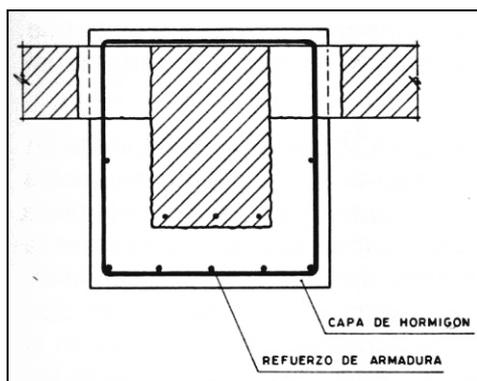
Zunchado por retracción

Señalaremos otro tipo de refuerzo, aunque no específico para elementos en compresión, pero que si permite transmitir cargas directamente a un pilar de hormigón, o, por ejemplo, mejorar la situación a corte o punzonamiento de forjados sin vigas. Se trata de una especie de zunchos anclados por retracción, cuyo diseño está basado en las compresiones que al retraer se ejercen entre una corona de hormigón y un elemento poco deformable, las cuales garantizan la absorción de cargas verticales, que crearían estados tangenciales en la unión entre el elemento original y el de refuerzo.

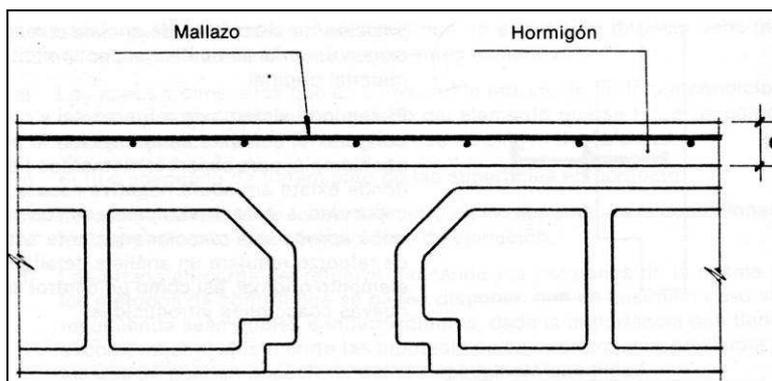
#### B) Refuerzo de vigas y forjados:

Se usan, en general, dos grupos de refuerzos destinados a incrementar la capacidad flectora y a mejorar la resistencia a cortante. En las vigas se producen importantes concentraciones de esfuerzos en algunas zonas de contacto entre pieza original y refuerzo, por lo que deben cuidarse los mecanismos de transferencia. Esto es menos crítico en forjados, pero en ellos, al actuar sobre grandes superficies, existen dificultades constructivas y de coste, muchas veces por tener que demoler tabiquerías y solados.

Existe la posibilidad de reforzar elementos en flexión, frente a momentos flector y esfuerzo cortante, mediante hormigón. En las figuras siguientes se presenta la tipología aplicable a casos de vigas y forjados, en los que el refuerzo, en su caso, puede incorporar armaduras de flexión y corte, mientras en el forjado se incrementa la capacidad de la cabeza comprimida. En este último caso es necesario garantizar la absorción de las tensiones rasantes en la unión, y evaluar la incidencia de los incrementos de carga permanente.



Refuerzo de vigas con hormigón armado



Refuerzo de forjado aumentando a capa de compresión

En todos los casos de refuerzo de hormigón es necesario proceder a un picado superficial del hormigón para mejorar la adherencia entre hormigones, dejando a la vista el árido del hormigón original. En algunos casos puede mejorarse la unión mediante el uso de resinas epoxi.

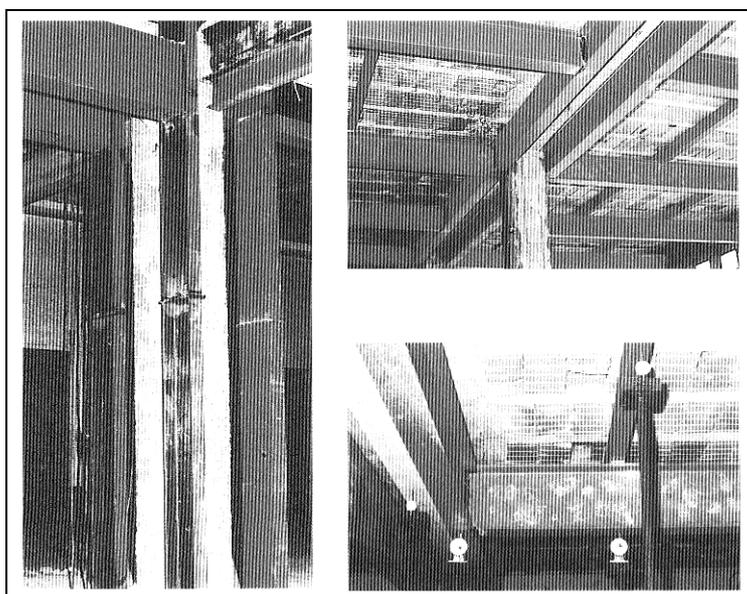
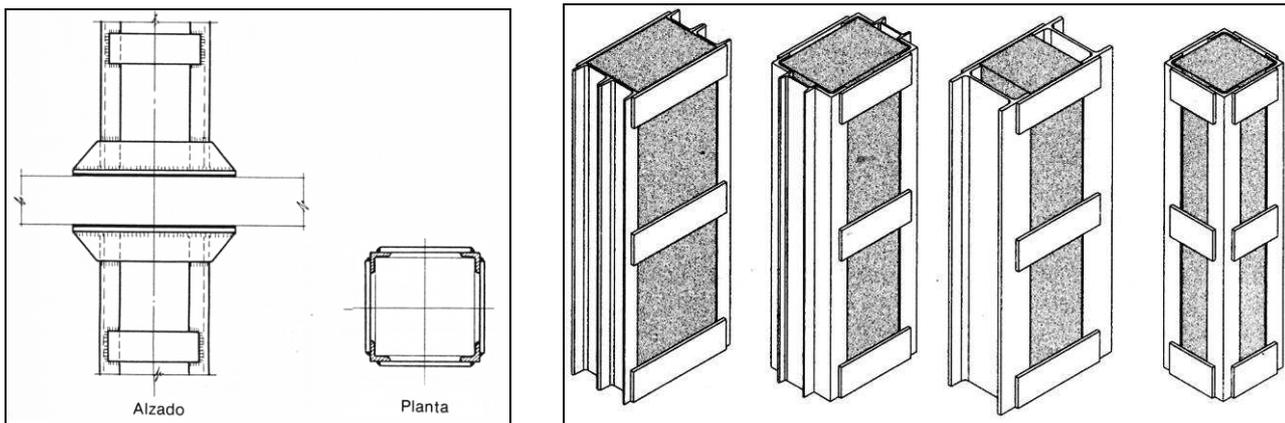
Hay que advertir sobre las alteraciones que puede sufrir un hormigón en el cual se realiza un picado superficial. Investigaciones realizadas al efecto muestran la posibilidad de que sea afectada la adherencia entre el árido y la pasta de cemento, pudiendo quedar alterada una capa de hormigón equivalente al tamaño máximo del árido, aspecto de importancia frente a garantía de solidarización entre hormigones.

#### 8.3.4 Refuerzos metálicos

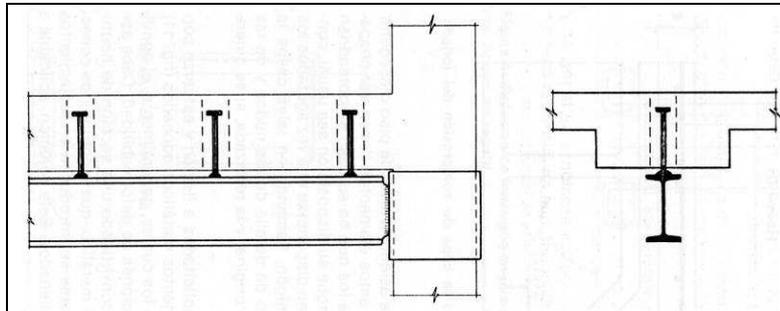
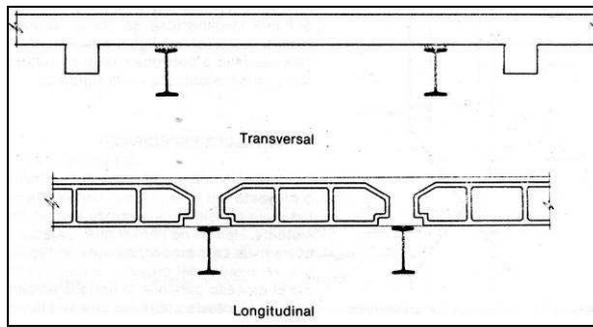
El refuerzo con perfiles de acero requiere prestar atención a la transferencia de esfuerzos, por la aparición de posibles efectos secundarios no deseados. También es importante el estudio de las soldaduras, para aprovechar su retroceso. Existe la posibilidad de precalentar presillas. Y sin olvidar la adecuada protección contra el fuego.

Mediante elementos metálicos pueden ser reforzados pilares o elementos comprimidos, pero, en general, no tan fácilmente como se piensa. Un refuerzo metálico del tipo que señalamos en la figura siguiente requiere un análisis detallado, tanto de la entrada en carga del refuerzo, como de la resolución de los nudos a nivel de piso. Ello conlleva a que, generalmente, si no se conecta al elemento existente al original, deba llevarse el refuerzo hasta cimentación, y a la vez que deban disponerse verdaderas placas de asiento a nivel de piso o asegurar su continuidad.

Por otra parte, estos elementos deben ser chapados, requiriendo unos espesores similares a los que en su caso se obtendrían con forros de hormigón. En principio, y aunque su disposición sea usual, consideramos que los refuerzos metálicos deben disponerse una vez agotados los recursos para disponer refuerzos de hormigón, llamando en tales casos la atención sobre la necesidad de un estudio de detalle de los nudos y de las transmisiones de carga entre la estructura original y la reforzada, si se quiere garantizar su eficacia.



En lo referente al refuerzo de elementos solicitados a flexión y esfuerzo cortante, cabe la posibilidad de disponer elementos metálicos adosados como refuerzo activo o refuerzo pasivo, en los cuales el condicionante de dimensionado sería su tipo de deformabilidad.



También pueden reforzarse estructuras o elementos convirtiendo una sección del hormigón existente en mixta, adosando un perfil metálico, que incorpore los conectores, al original, como se ve en la figura siguiente. Los conectores se introducen en alojamientos que con posterioridad son inyectados o rellenados. Esta solución, aplicable a los casos de forjados planos, en losa maciza o de viga plana, se complementa con collarines de chapa adheridos a los pilares, a los que se suelda el alma del perfil.

Entre las técnicas con elementos metálicos existe los refuerzos con bandas de acero encoladas con resinas epoxi, basadas en la gran adherencia que dichas resinas tiene con el hormigón y el acero.



Es una solución eficaz, cómoda, rápida y económica, interesante para refuerzos de piezas que trabajen a flexión y a cortante. Para ello es importante la preparación de superficies, por ejemplo mediante limpieza con chorro de arena. Se requiere la planeidad de las superficies de contacto. Además, hay que vigilar el espesor de la capa de adhesivo, que suele tener aproximadamente 1 mm, así como proteger el refuerzo contra incendios.

#### BIBLIOGRAFÍA UTILIZADA

- ACI "Lessons from Failures of Concrete Structures" 1964
- ASCE. "Guide to Investigation of Structural Failures"
- BLEVOT, J. "Patología de las construcciones de hormigón armado". Edit. Técnicos Asociados. Barcelona, 1977.

- CALAVERA, J. "Influencia de diferentes variables en la seguridad de secciones de hormigón armado". Monografía del IETCC
- COAM. Colegio Oficial de Arquitectos de Madrid: "Curso de Rehabilitación" .Tomo 5: La estructura. Madrid 1985.
- COOK, G.K -HINKS, AJ "Apraising building defects: Perspectives on stability and hygrothermal performance". Longman Scientific Technical. England, 1992.
- COMITÉ EURO-INTERNATIONAL DU BETON. Bulletin n.º 162 . Agosto, 1983.
- CP-110 B.S.I. 44. "The structural use of concrete".
- CHANDLER I. "Repair and refurbishment of modern building". B.T. Batsford Ltd. London, 1991.
- GONZÁLEZ VALLE E. Informes de la construcción: No 333 (1981). "La flexibilidad de los forjados de hormigón de edificación: Evaluación de la situación actual".
- DEL RIO, A.-ORTIZ, J. "Rehabilitación de estructuras de hormigón". ANCOP. Madrid, 1991.
- FERNANDEZ CÁNOVAS M. "Patología y Terapéutica del hormigón armado" (3º ed.). C.O.I.C.C.P. Madrid, 1994.
- GEHO. Grupo Español del Hormigón. (B. 14.1994). "Reparación y refuerzo de estructuras de hormigón. Guía FIP de buena práctica".
- HOWSONL-YUENG. "Building maintenance technology". Mac Millan Press Ltd. London, 1993.
- JIMÉNEZ MONTOYA, MESSEGUER, MORÁN "Hormigón armado" G.Gili, Barcelona, 2000
- MONJO CARRIÓ, J., MALDONADO RAMOS, L. "Patología y técnicas de intervención en estructuras arquitectónicas" Ed. Munilla-Lería. Madrid, 2001.
- NEVILLE, A. M. "Properties of Concrete". Pitman Publishing. 2.a Edición, 1973.
- VILLEGAS L. "Calidad y patología en la construcción: Aplicación a las obras de hormigón". GTED (Grupo de Tecnología de la Edificación - Universidad de Cantabria). Santander, 1997.

## DIAGNÓSTICO Y RESTAURACIÓN DE LAS ESTRUCTURAS DE ACERO

### 1 LESIONES DEBIDAS A FALLOS DE LOS MATERIALES

#### 1.1 Rotura frágil

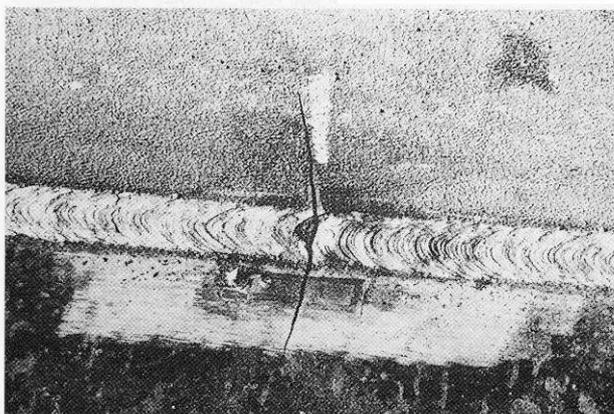
Por lo general, los aceros de construcción son tenaces y plásticos. Gracias a esta plasticidad, que se traduce por la gran deformación que se produce entre el comienzo de la plastificación y la rotura, las estructuras metálicas tienen una gran reserva de seguridad que evita casi siempre que se rompan. Por el contrario, el proceso de deformaciones continuadas anuncia la posibilidad de ruina.

Sólo en algunos casos, bajo ciertas condiciones, los aceros se comportan frágilmente, rompiendo bruscamente sin que se hayan producido deformaciones apreciables.

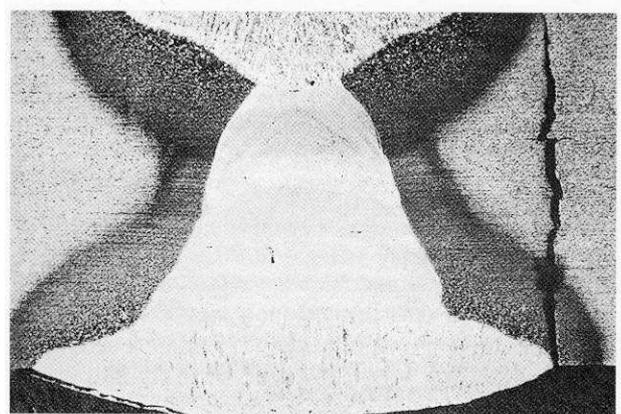
En el acero, al contrario que en la fundición, la rotura sólo puede ser frágil en ciertos casos. No hay actualmente criterios intrínsecos que permitan definir el límite de la rotura frágil al igual que el valor de la tensión última en el caso de rotura dúctil, pero existen recomendaciones fiables para hacer una selección adecuada: tales son las recogidas, en el Anejo no 3.1 de la Norma NBE-EA-95, que hacen alusión a las circunstancias que pueden causar la citada rotura frágil.

#### 1.2 Rotura por fatiga

La fatiga es un término que describe de una forma general el comportamiento de los materiales y, en particular, de los metales, cuando están sometidos a esfuerzos variables en el tiempo. Se puede definir con más precisión como el proceso de deformación irreversible, pequeña, localizada y progresiva de un metal hasta que se produce la rotura, total o parcial, como consecuencia de la repetición de esfuerzos que producen unas tensiones inferiores al límite elástico.



ROTURA FRÁGIL DE UN CORDÓN



ROTURA POR FATIGA

La rotura por fatiga se inicia a partir de anomalías superficiales, como son los ángulos entrantes y las entalladuras o inclusiones, produciendo unas fisuras que se propagan hacia el interior de la pieza, hasta que la sección sana es incapaz de resistir los esfuerzos aplicados y rompe bruscamente

Aunque la fatiga es un proceso progresivo, la rotura se produce bruscamente sin apenas modificación aparente de la forma de la pieza, es decir, sin deformaciones plásticas apreciables. Esto se debe a que la fisuración es un proceso localizado que afecta a un volumen pequeño de material y, aunque se ha comprobado que hay plastificaciones en los bordes de las fisuras, las deformaciones que inducen son despreciables con respecto a las dimensiones de las piezas. De aquí la peligrosidad de este proceso porque las fisuras pueden ser difíciles de detectar.

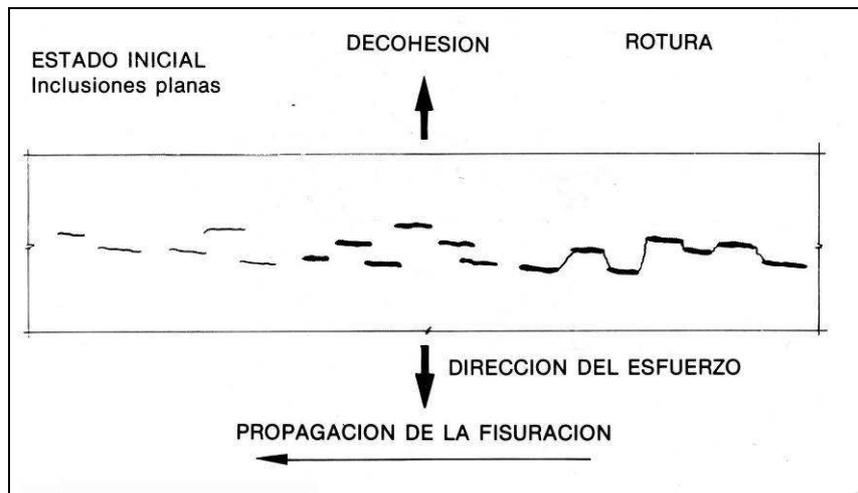
En casi todas las estructuras los esfuerzos varían a lo largo de su vida en servicio pero, para que se pueda producir la rotura por fatiga, es preciso que el número de variaciones y la magnitud de la variación de los esfuerzos sean suficientemente elevados.

### 1.3 Desgarro laminar

El desgarro laminar es una alteración que se produce en estructuras soldadas a consecuencia de deformaciones en la dirección del espesor de las capas, provocadas por la retracción del material de aportación, y que puede ocasionar una rotura frágil.

Las deformaciones producidas por la retracción del material de aportación son, a menudo, varias veces superiores a las correspondientes al límite elástico del material base y muy superiores a las producidas por las cargas exteriores.

Al tener el metal de aportación un límite elástico superior al del material base, las deformaciones se producen únicamente en éste. Por otra parte los aceros normalmente empleados tienen una elevada ductilidad en la dirección longitudinal y en la transversal pero muy pequeña en la dirección perpendicular a la del laminado, como consecuencia de las inclusiones no metálicas. La combinación de estos dos factores pueden producir el desgarro laminar. La sección de rotura es escalonada, siendo los tramos horizontales mucho mayores que los verticales.



Durante el proceso de soldadura, las deformaciones producidas por la retracción en cada pasada, aumentan según se enfría la soldadura hasta un grado tal que produce la descohesión en la superficie común a los cristales de hierro y a las inclusiones no metálicas

Cuando más material se deposita mayor es el número de grietas que se producen. Dado que las inclusiones están distribuidas de forma irregular, los desgarros se producen también de forma irregular. El enfriamiento consiguiente hasta la temperatura ambiente aumenta la deformación hasta que las grietas se unen, como consecuencia de una rotura por cortadura, formándose los escalones.

El mecanismo de formación del desgarro laminar pone en evidencia las tres condiciones necesarias para que se produzca este fenómeno:

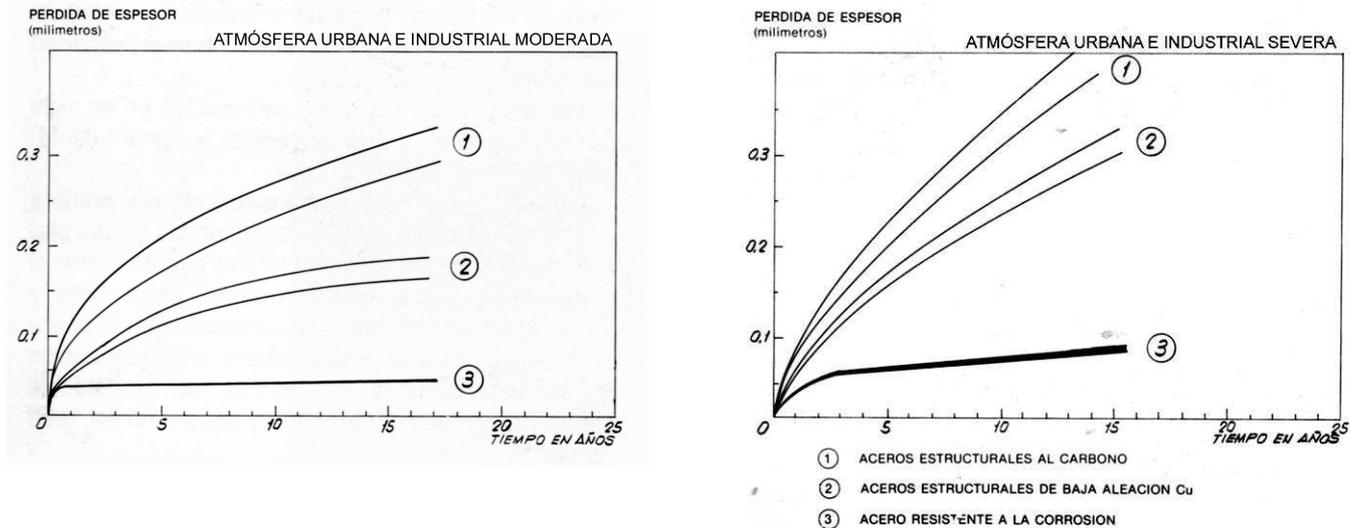
1. El material base ha de ser sensible a este fenómeno. Esta susceptibilidad se debe a la existencia de inclusiones en la dirección del laminado. Estas inclusiones pueden detectarse mediante ultrasonidos.

2. Una unión muy coartada provoca una gran deformación plástica en el material base cercano a la junta. Estas deformaciones son mayores cuanto mayor es la coacción y el volumen de metal de aportación en la junta.

3. La probabilidad de desgarro laminar aumenta cuando la forma de la unión permite que se produzca la retracción perpendicularmente al plano de laminación (uniones en T, en esquina y en cruz).

## 1.4 Corrosión

La corrosión de los materiales se define como la destrucción o deterioro de las propiedades de un material por reacción (química o electroquímica), en su medio ambiente. El término corrosión puede designar tanto el proceso en sí como el daño por él causado).



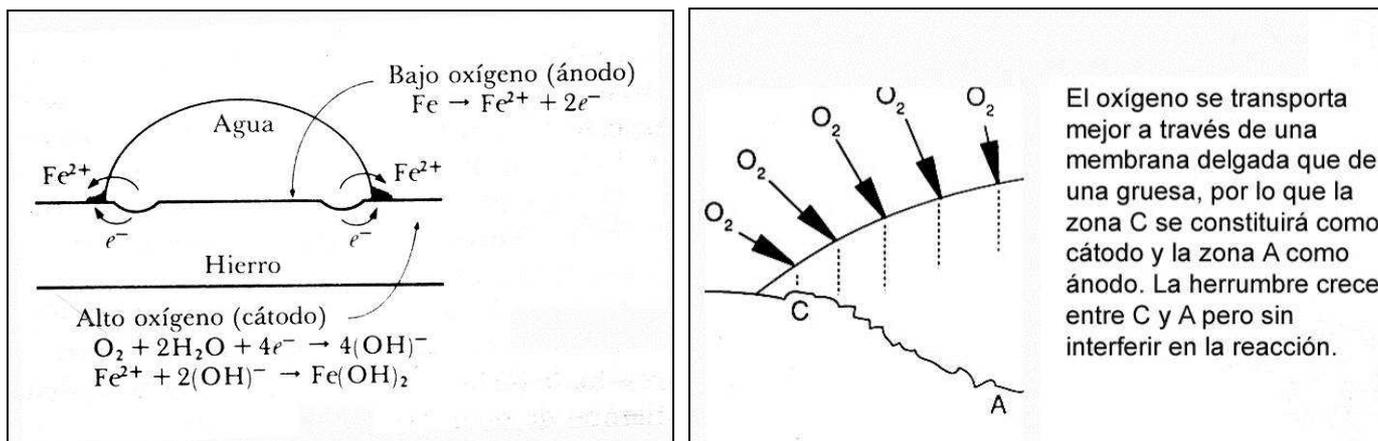
Comportamiento de diferentes aceros frente a la corrosión

Este fenómeno se debe a una ley natural de estabilidad. Los materiales como el acero existen en su forma útil a consecuencia de su transformación por el hombre a partir de los minerales existentes en la naturaleza y que requieren la aportación de energía. Por tanto, son materiales inestables frente a los agentes atmosféricos, y tenderán a regresar a su estado original, o al menos a estados más estables y, por ello, menos útiles. Si se quiere conservar los materiales en sus estado útil es preciso impedir o, al menos, retardar la tendencia natural a la degradación.

Por la naturaleza de las reacciones que intervienen en la corrosión, puede clasificarse en química y electroquímica.

La corrosión química es consecuencia del ataque del metal por reacciones químicas en el medio ambiente. Este medio puede ser gaseoso o líquido, a condición de que no se trate de un electrolito. Las reacciones químicas se desarrollan en la interfase entre el metal y el medio corrosivo.

La corrosión electroquímica es consecuencia de la aparición de corrientes eléctricas, entre dos zonas del metal que tienen potenciales diferentes cuando se ponen en contacto a través del medio de ataque, sin que exista una fuente exterior que los produzcan. Las potenciales más negativas corresponden a las regiones anódicas, donde el metal se disuelve en forma de iones hidratados.



Hay una diferencia esencial entre ambos procesos. En el proceso químico los productos de corrosión se depositan y ejercen una cierta acción protectora, aunque no total, porque el depósito forma una capa porosa. En el proceso electroquímico los productos insolubles de la corrosión se forman fuera del ánodo y no pueden oponerse a la prosecución del ataque, por lo que es más peligroso que el proceso puramente químico.

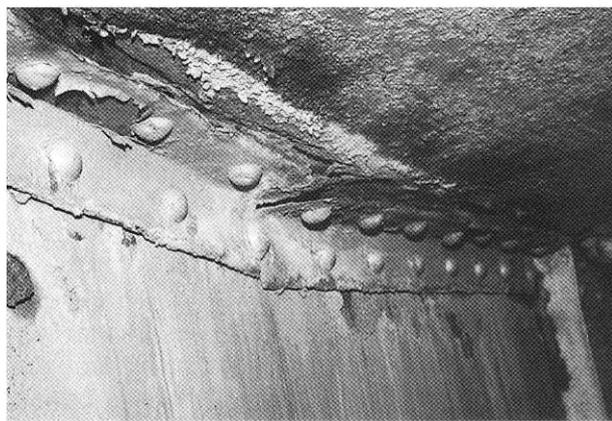
El aspecto que presentan las superficies corroídas es, en general, diferente según se trate de uno u otro proceso. El proceso químico se desarrolla en toda la superficie expuesta lo que se traduce en una disminución regular del espesor del metal.

El proceso electroquímico, al ser un proceso localizado hace que la corrosión se efectúe en ciertos puntos de la superficie del metal formando cráteres que aumentan en profundidad pudiendo llegar a la perforación de la estructura.

Sea cual sea el proceso de corrosión, sus efectos se traducen en una disminución progresiva de la sección resistente que puede llegar hasta la perforación o rotura.



CORROSIÓN EXTENDIDA



ROTURA POR CORROSIÓN

Los óxidos producto de la corrosión ocupan un volumen muy superior al del material sano inicial por lo que se pueden abombar las piezas e incluso romper las uniones. El aumento de volumen es del orden de diez veces lo que nos puede servir para evaluar de forma aproximada la pérdida de sección.

De entre los materiales férricos tradicionales, el orden de resistencia a la corrosión sería: fundición, hierro forjado y acero de bajo contenido en carbono (suave). En general, si no están protegidos, los metales de hierro se oxidan o corroen rápidamente expuestos al aire y la humedad.

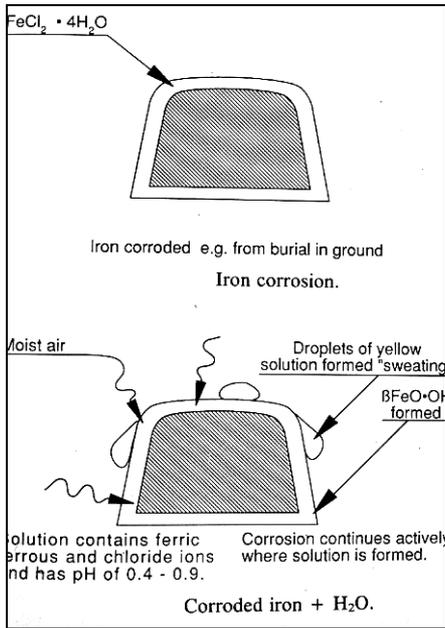


A partir de 65% de H.R. puede iniciarse el proceso; o hasta con 20% en caso de exposición a lluvia ácida, atmósfera contaminada o presencia de sales.

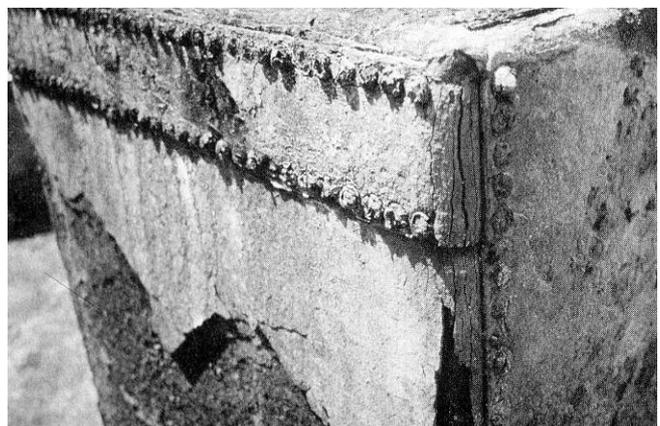
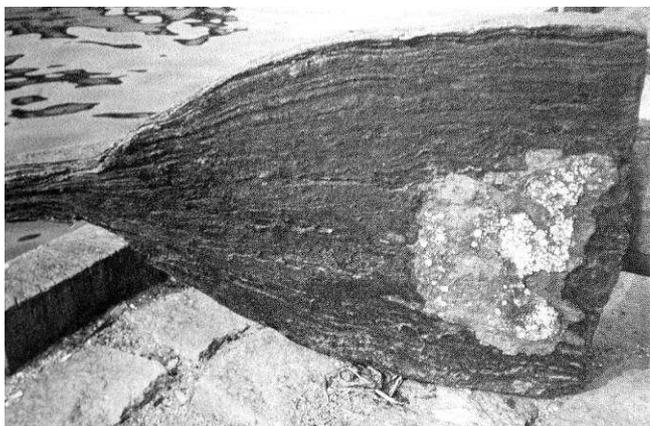
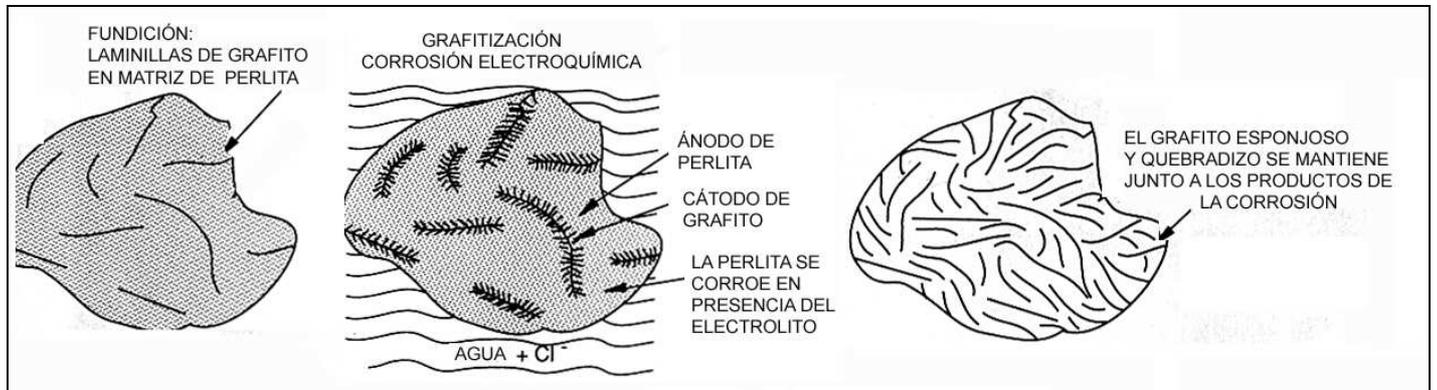
En la oxidación se forma óxido ferroso o férrico que se hincha al captar humedad y transformarse en hidróxido. Si existen contaminantes como cloruros, carbonatos o sulfuros, pueden formarse productos de corrosión: cloruro y oxiclорuro férrico, sulfuro de hierro, etc.

En piezas de hierro enterradas, la corrosión puede formar una costra de cloruro ferroso tetrahidrato. Si después el metal se expone al aire húmedo, se forma un oxihidróxido férrico con una gotas de solución de ácido clorhídrico (exudación) con un pH muy bajo (0,4-0,9) que aceleran la corrosión.

Las capas de escoria (grafito) del hierro forjado retardan la corrosión, salvo en atmósferas muy contaminadas, en que material se corroe descamándose por los bordes de las capas de carbono.



En la fundición aparece una superficie alterada escamosa pero muy resistente a posterior corrosión. En los casos de piezas de fundición sumergidas en agua de mar o expuestas a lluvia ácida por tiempo prolongado, tiene lugar un tipo de corrosión galvánica. Entonces, las laminillas de grafito actúan como cátodos y la matriz de perlita como ánodo, corroyéndose hasta el punto de que sólo queda una masa quebradiza negra y esponjosa de grafito sostenida por productos de la corrosión.



Ancla y arcón de fundición rescatados de un barco hundido

Algunos defectos y grietas de elaboración o colado de la fundición, como burbujas, poros, inclusiones, pueden confundirse con la corrosión. Las grietas pueden deberse a lesiones de enfriamiento heterogéneo, suelen ser puntos de origen del proceso corrosivo.

La corrosión y formación de productos supone más volumen que puede inducir el astillamiento y destrucción de la pieza ya ahuecada, así como el estallido o rotura de la albañilería en que la pieza metálica se encuentra embebida.



Tipos de ambientes corrosivos: agua de mar; aire marino salino; ácidos; terrenos, en especial los que contienen cloruros o sulfatos; pasta de yeso; cementos con oxiclورو de magnesio; cenizas y escorias; muchos compuestos sulfurados.

## 2 LESIONES DEBIDAS A FALLOS DE DISEÑO

### 2.1 Imprevisiones y errores de cálculo

El proyectista tiene que ser consciente de que no se puede encontrar todo en las Normas; debe ser capaz de interpretarlas y, en los casos necesarios, salirse de ella. Esta acción comporta un riesgo, ya que, en caso de existir responsabilidades judiciales, será un agravante, pero si se tiene plena conciencia de lo que se hace y el nivel técnico suficiente, el riesgo es prácticamente nulo.

Por el contrario, mantenerse dentro de los límites de las Normas no es una garantía frente a posibles accidentes, ya que es perfectamente posible proyectar y construir estructuras que se caigan respetando escrupulosamente cualquier Norma.

- Ausencia de prescripciones sobre cargas

No existe actualmente Norma alguna relativa a las sobrecargas producidas por las aguas pluviales, y que son el origen de numerosos hundimientos, aunque, en general, y por fortuna, se limitan a las inmediaciones de las bajantes. No obstante, en el caso de cubiertas de gran superficie y pequeña pendiente, un defecto en el sistema de desagüe o cualquier otra causa fortuita puede hacer embalsar la suficiente cantidad de agua como para llegar a producir el hundimiento de extensas superficies de la misma. Este fenómeno es, además progresivo, ya que pequeñas cantidades de agua embalsada hacen deformar la estructura, aumentando su capacidad de embalse, multiplicando el efecto.

Otro tipo de sobrecarga no computado en la Norma es la producida por el polvo procedente de ciertas industrias que se deposita sobre las estructuras de la propia industria y de los edificios cercanos, sobrecarga que puede llegar a ser considerable si el material tiene una densidad elevada o puede aglomerarse por efecto de la humedad. Ha provocado ya numerosos hundimientos.

- Prescripciones inadecuadas sobre cargas

En la Norma de acciones se trata con detenimiento las cargas producidas por las acciones de viento. En los casos normales, que son mayoría, esto es suficiente. En los casos excepcionales, las prescripciones son insuficientes. A este respecto es interesante señalar que los resultados de los estudios realizados en túnel de viento de la Universidad de Ontario, habiendo concluido el gran desconocimiento real de la acción del viento. Depende en gran manera del entorno de la construcción.

En unos casos se obtuvieron presiones menores a las prescritas por las normas, mientras que en otros, y esto es grave, mucho mayores. Como la acción del viento es la suma de todas las presiones sobre las fachadas, estos valores máximos localizados no influyen excesivamente sobre la estabilidad del conjunto pero sí sobre los elementos localizados, como ventanales, aleros, elementos de borde, etc. Como ejemplo, lo ocurrido en la torre John Hancock de Boston en el que falló el muro cortina, porque se proyectaron las lunas para las cargas especificadas en la Norma correspondiente, pero no resistían las cargas reales.

La acción de la nieve también ha sido la causa de numerosos problemas. Así sucedió a final de los '70 en Estados Unidos, donde grandes nevadas produjeron numerosos hundimientos de cubiertas en ciudades como Chicago. Inmediatamente después de estos accidentes, los proyectistas consideraron sobrecarga de nieve un 20% mayor que la prescrita por las normas, además de tener en cuenta aludes de nieve desde otras cubiertas más elevadas. También hay que considerar que los accidentes se multiplican por el efecto de formación de hielo y la acumulación de agua en zonas bajas entre el hielo, que se aumenta en las cubiertas bien aisladas, pues reducen la pérdida de calor.

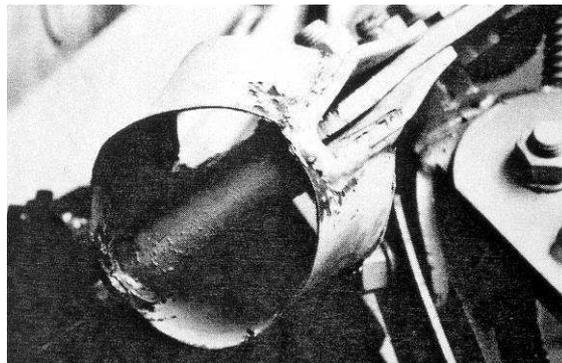
- Ausencia de definición de estados límites

Las normas vigentes prescriben que deben comprobarse todas las estructuras para los estados límites últimos y para los de servicio. Los estados límites últimos suelen estar adecuadamente definidos, aunque existen algunas lagunas, porque afectan a la seguridad de las personas. Los estados límites de servicio, en general, no están definidos porque afectan a criterios más subjetivos, como puede ser el confort de los usuarios o la duración del edificio y pueden variar entre amplios límites.

Entre estos casos se puede citar la limitación de los desplazamientos horizontales de las estructuras, que se dejan al criterio de los proyectistas excepto en algunos casos concretos, como vigas carril de puentes-grúa o torres de comunicación hertzianas. El no limitarlos no suele acarrear accidentes catastróficos, pero puede dar origen a problemas importantes, como vibraciones de edificios de gran altura por la acción del viento o rotura de cerramientos por deformaciones de la estructura, producida por los temporales, el viento, etc. Tampoco existe ninguna limitación de los estados límites de vibración y de durabilidad, entendiendo ésta como protección de la estructura metálica.

Dentro del estado límite último de estabilidad, tenemos el caso de abollamiento del alma producida por la aplicación de cargas concentradas. Para evitar el abollamiento producido por los esfuerzos internos (axil, flector, cortante), suele prescribirse que colocar rigidizadores transversales en las secciones de apoyo y en todas aquellas en que actúen cargas concentradas. Lo mismo habría que considerar frente al abollamiento del alma producido por cargas concentradas móviles, como en el caso de las vigas-carril o el producido por cargas cuasi concentradas aplicadas en las zonas de las vigas comprendidas entre rigidizadores transversales.

Lo mismo puede acontecer con estructuras estéreas constituidas por barras a base de perfiles huecos de pequeño espesor.



## 2.2 Errores de proyecto

- Planos incompletos

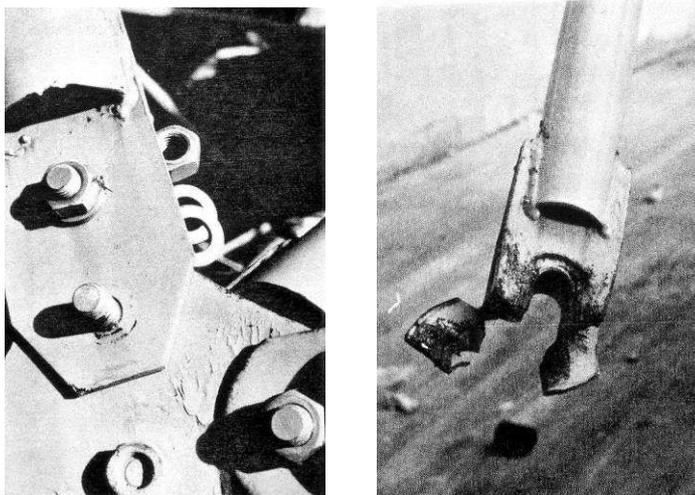
Sino están suficientemente definidos cada uno de los elementos de la estructura, se pueden producir errores de interpretación de la base de fabricación y construir una estructura diferente de la proyectada.

- Planos no conformes al anejo de cálculo

Los errores de transcripción producidos al pasar a los planos los resultados del dimensionamiento efectuado en el Anejo de Cálculos hace que la estructura representada sea diferente de la proyectada.

- Uniones incorrectas o irrealizables

Las uniones deben proyectarse de tal forma que resistan al hacer el ensamblaje de la estructura. Aunque puede parecer obvio, en muchos casos se proyectan uniones que, satisfaciendo todas las prescripciones, no son posibles o son tan difíciles de realizar que generan serias dudas sobre su calidad.



Los anclajes de la estructura en los zócalos o cimientos de hormigón pueden a veces ser insuficientes frente a esfuerzos de succión de viento o de deformación de la estructura.



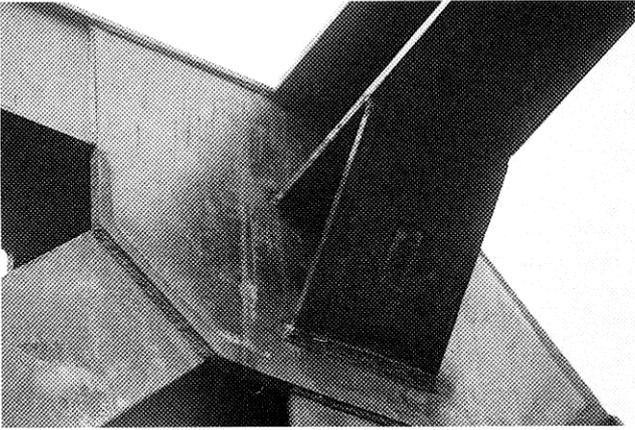
### 3 LESIONES DEBIDAS A LA FABRICACIÓN Y PUESTA EN OBRA

#### 3.1 Defectos de fabricación y montaje

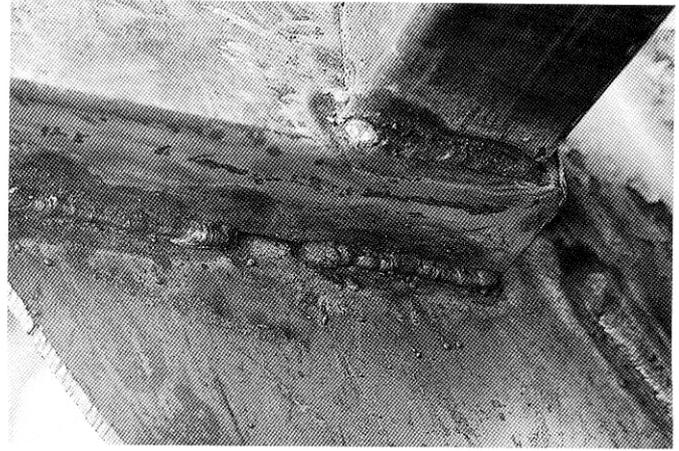
La fabricación en taller de los elementos de la estructura metálica, consiste en la materialización de lo que está definido en los planos, de acuerdo con el Pliego de Condiciones del Proyecto, las Normas vigentes correspondientes y las reglas de buena práctica de construcción. Por consiguiente, los defectos de la estructura serán originados por alguna de las tres causas que se citan en los apartados siguientes.

- Fabricación no conforme a los planos

A consecuencia de modificaciones de la forma y tamaño de los perfiles, de la posición de los elementos, de la situación o las longitudes de los cordones de soldadura y de las posiciones de las uniones atornilladas.



Cordones excesivos en soldaduras a tope sin preparación de borde



Uniones defectuosas por mala ejecución de los cordones

- Fabricación fuera de tolerancia

Este defecto no es grave en sí pero acarreará problemas al ensamblar las distintas piezas, durante el mismo proceso de fabricación o durante el montaje.



Diagonal corta

- Errores en el proceso de fabricación:

Por ejemplo, en el taladrado de agujeros, lo que obliga a forzar las piezas a unir, para poder confrontar los agujeros, o lo que es peor, a agrandarlos mediante soplete u otra práctica viciosa.

En las uniones soldadas un error que puede tener graves consecuencias, es el de emplear una secuencia de soldadura inadecuada, lo que producirá tensiones residuales elevadas al retraer la pieza durante su enfriamiento.

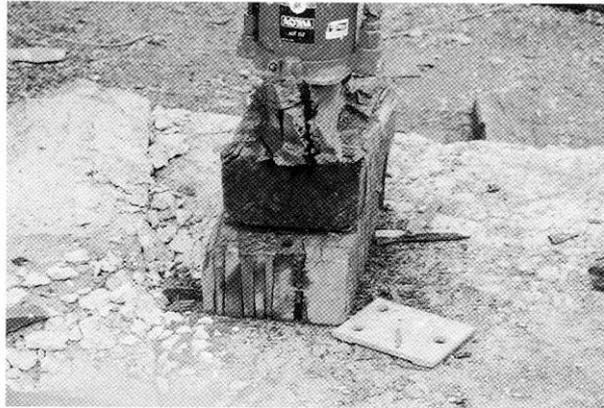
El montaje de las estructuras metálicas, dadas las peculiares características del acero, se efectúa a base de yuxtaponer elementos y es una de las fases más delicadas y comprometidas. Como corroboración de lo anterior, diremos que, según las estadísticas, un tercio de los accidentes registrados en Estructuras Metálicas se han producido durante la fase de montaje.

Esto es así por dos razones. La primera porque la estructura no será completa hasta que esté totalmente montada. Durante el montaje podrán existir numerosas fases del mismo en que la estructura será inestable o no resistirá lo suficiente, en cuyo caso necesitarán arriostramientos provisionales y pueden faltar o ser insuficientes. Y, porque los diferentes elementos de la estructura estarán solicitados por primera vez de forma apreciable, lo que representa una cierta prueba de carga, y se evidenciarán los errores cometidos en anteriores fases del proceso.

En el caso de obras importantes o cuyo montaje sea delicado, se elaboran planos o instrucciones precisas con el fin de que éste se efectúe en condiciones óptimas de seguridad. Desgraciadamente, estos documentos no se realizan, en la práctica, para aquellas obras en las que se consideran corrientes las operaciones de montaje.

- Montaje no conforme a los planos.
- Montaje fuera de tolerancia.

- Estabilidad insuficiente
- Falsas maniobras

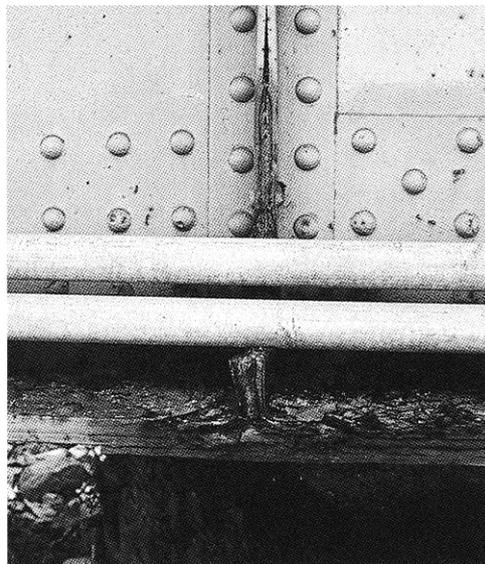


Apoyo provisional defectuoso

### 3.2 Alteraciones de la estructura

Un hecho muy frecuente, al que no se le suele dar la debida importancia, es el aprovechar la estructura para apoyar cualquier objeto, como conducciones, letreros, etc, con sus correspondientes fijaciones. Independientemente de que aumenten los esfuerzos de la estructura; estas disposiciones suelen ser puntos de almacenamiento de agua y suciedad que producen una aceleración de la corrosión.

Por otra parte, al colocar las fijaciones, se levanta la protección anticorrosiva de esas zonas que debe ser re- puesta si no se quiere dejar desprotegido al acero.



Corrosión acelerada por colocar tuberías inadecuadamente

### 3.3 Mantenimiento insuficiente

La estructura proyectada debe ser resistente, no solo en el momento de su construcción sino que debe conservar sus propiedades a lo largo de su vida en servicio. La estructura de acero no es insensible al paso del tiempo, como suele creerse, sino que puede deteriorarse o empezar a funcionar mal.

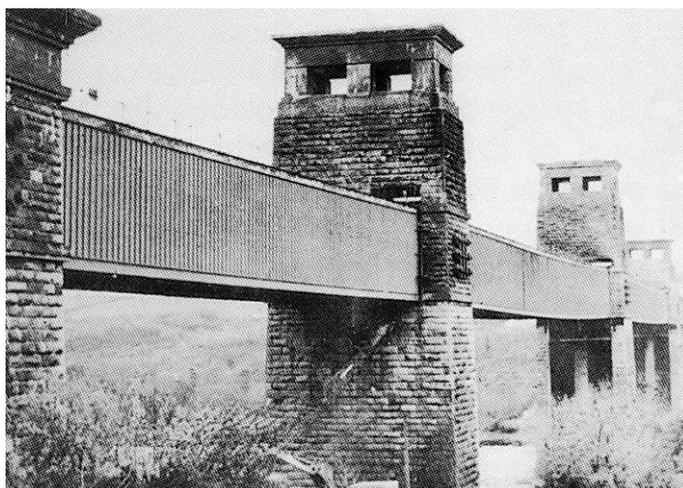
Es pues necesario inspeccionar periódicamente la estructura con el fin, no sólo de evitar que se produzcan accidentes graves a consecuencia de los defectos, sino también de detectarlos lo antes posible para reducir al mínimo el coste de la rehabilitación.

La periodicidad de las inspecciones puede variar entre amplios límites dependiendo de las condiciones de trabajo de las estructuras y de la gravedad de los daños que se pueden ocasionar en el caso de que se produzca la ruina. Puede oscilar entre no efectuar ninguna, como es el caso de edificios en los que la estructura esté totalmente aislada o sea inaccesible, hasta hacerlo diariamente en el caso de que el deterioro progrese con rapidez.

Como no todos los elementos de una estructura tienen las mismas sensibilidades a la deterioración, ni las consecuencias de la ruina tienen la misma gravedad, pueden establecerse distintos tipos de inspección con una intensidad y periodicidad específicos.

Los deterioros fortuitos engloban aquellos hechos que tienen una probabilidad muy pequeña de que se produzcan. En unos casos, como los incendios, existen Normas relativas a la resistencia de las estructuras frente a ellos, pero en otros como las explosiones, los choques, etc., no existen; salvo en casos muy concretos, ya que es pequeña la probabilidad de que se produzcan, y muy elevado el coste que representa su prevención.

En cuanto a los incendios, si la estructura o algunos de sus elementos se han derrumbado o se han deformado de forma apreciable, puede seguir cumpliendo su misión sin ningún menoscabo. Si el acero no ha alcanzado la temperatura de transformación conserva su estructura cristalina, y si no se ha deformado de forma apreciable, sigue comportándose elásticamente, en cuyo caso, una vez enfriado, vuelve a ser el mismo material que antes del incendio. Si la deformación es apreciable, la estructura ha plastificado y es inservible, debiendo ser sustituida.



#### 4 PROBLEMAS ESPECÍFICOS DE FORJADOS HISTÓRICOS Y PIEZAS ROBLONADAS

Los forjados antiguos de perfiles de acero laminado pueden haber experimentado deformaciones excesivas, es decir, manifestar una flecha importante por causa de una escasa rigidez para soportar cargas normales, o bien por sufrir tensiones elevadas debidas a cargas superiores a las calculadas.

Además de la flecha no admisible y sus consecuencias para los elementos más rígidos apoyados, otro efecto perjudicial es el cimbreo de la estructura horizontal, percibido al paso de las personas.

El estado límite de servicio se toma para frecuencias  $> 2$  Hz (paso humano). Hasta los años '60 se construía con acero de límite elástico de  $2.400 \text{ Kp/cm}^2$ , lo que conducía a un cálculo de la carga de servicio (tensión característica), de  $< 1.200 \text{ Kp/cm}^2$ .

Interesa hacer un recálculo que mantenga las condiciones iniciales originales: así, considerando un L.E. medio de unos  $2.200 \text{ Kp/cm}^2$ , coeficiente de minoración del acero = 1,25 (sin ensayos ni control), se obtendría una tensión última admisible de unos  $1.800 \text{ Kp/cm}^2$ . Con coeficiente de mayoración de acciones de 1,45, se llega a una tensión admisible de  $1.200 \text{ Kp/cm}^2$ , que conserva la seguridad del proyecto original.

Por otro lado, en los casos de piezas roblonadas, puede darse la situación de grandes separaciones entre roblones con riesgo de que se formen gruesas capas de herrumbre entre los palastros que componen la sección.

El óxido (y posterior hidróxido) ocupa mayor volumen, obligando a las piezas a separarse y creando así tensiones que llegan a romper los roblones por tracción.

#### 5 ACTUACIÓN EN ESTRUCTURAS DE ACERO

La reparación o modificación de una estructura de acero, por motivo de haber sufrido una merma de su resistencia como resultado de procesos de corrosión, incendio, deformaciones imprevistas, etc, o simplemente por la necesidad de aumentar su capacidad mecánica, debe plantear el objetivo de alcanzar una situación aceptable desde el punto de vista de la resistencia y estabilidad, cuando mediante métodos de cálculo recogidos en la norma, con la combinación de acciones ponderadas más desfavorables para la estructura, se compruebe que ésta y los elementos

que la integran son estáticamente estables y las tensiones calculadas no sobrepasas las correspondientes condiciones de agotamiento incluida la seguridad.

Algunos de los principales problemas que debe enfrentar el proyecto de reparación o rehabilitación de estructuras metálicas es la gran capacidad mecánica del material, que conduce a grandes esbelteces de las piezas y su consiguiente penalización por pandeo. Y también la necesidad de arriostramiento complementario a que obliga a usual escasa rigidez de los nudos. También habría que recordar que los aceros no normalizados de las construcciones de la primera mitad del siglo XX obligarían a realizar ensayos previos de caracterización de dichos materiales.

Antes de proyectar el refuerzo de una estructura debe llevarse a cabo una verificación lo más completa posible de las características y capacidades de la estructura existente. Deben controlarse, al menos:

- Las cotas originales y las reales.
- El grado de corrosión de los componentes.
- Las modificaciones habidas en las cargas.
- Las nuevas situaciones de carga previstas.
- El estado de las uniones y su forma de trabajo.
- El estado de los roblones, soldaduras y tornillos.

Otras precauciones a tener en cuenta se refieren a la necesidad de prever uniones posibles de los elementos de refuerzo. La necesidad de proteger el acero existente y el que se coloque como refuerzo, teniendo especial atención a las superficies en contacto con soldaduras o tornillos, sin olvidar que la imprimación de taller no puede considerarse definitiva, sin una adecuada terminación en obra. Las bases de pilares y elementos de la estructura que vayan a estar en contacto con el terreno deben preverse embebidos en hormigón para evitar su posible corrosión.

## 5.1 Refuerzo de elementos estructurales

Se lleva a cabo cuando la peritación de la estructura existente indica su incapacidad de asumir las cargas ponderadas previstas por su nuevo uso, o por su estado de deterioro. En dicha peritación debe considerarse el fenómeno de la fatiga que afecta a los elementos estructurales que hayan sufrido un número de ciclos de carga y descarga superior a  $10^4$ .

Por otro lado, la reparación de estructuras con uniones roblonadas presenta ciertos inconvenientes que obligan a que los refuerzos deban estar soldados:

- La pérdida de sección por los agujeros de los roblones aumenta el peso necesario de estructura.
- La menor rigidez y uniones anelásticas de dichas estructuras.
- Los plazos de ejecución de refuerzos suele ser más prolongados.
- Existencia de mayor riesgo de corrosión.

El refuerzo sólo colabora en las cargas que se apliquen después de su colocación, normalmente las sobrecargas de uso. Por tanto existe un desaprovechamiento del material de refuerzo, ya que no puede trabajar al límite de sus posibilidades. En general no tiene importancia este hecho pero puede existir casos en los que el ahorro de material pueda justificar que el refuerzo colabore también transmitiendo la carga permanente. Para ello será preciso apearse el elemento a reforzar y descargarlo, dándole un esfuerzo igual y de sentido contrario mediante gatos o cualquier otro procedimiento.

La misión de toda estructura es transmitir al terreno las cargas que actúan sobre la construcción, por lo que, no sólo hay que estudiar el refuerzo del elemento directamente implicado sino todos los que puedan resultar afectados, incluidas las uniones y empalmes. Además de los efectos que producen las cargas hay que tener en cuenta los posibles efectos que el mismo refuerzo ejerce sobre la estructura primitiva, como excentricidades, transformación de articulaciones en empotramientos, etc.

Las operaciones de refuerzo son, en general, caras, por lo que el coste del material tiene una incidencia más bien pequeña. En consecuencia, en el proyecto de un refuerzo no hay que tratar sólo de hacer un dimensionamiento afinado sino, sobre todo, estudiar una solución de refuerzo que sea lo más económica posible.

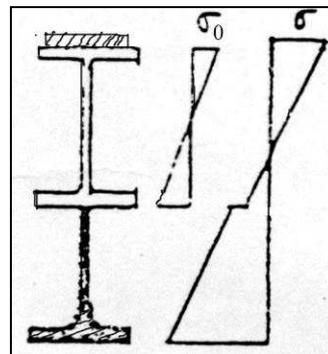
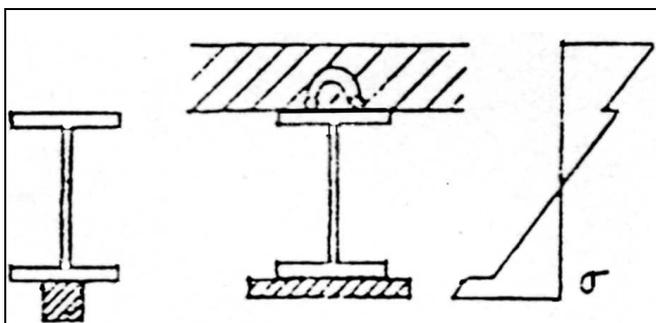
Durante la ejecución del refuerzo se tendrá un cuidado especial de no producir en la estructura, o en sus elementos, debilitamiento que puedan conducir a su rotura. Es el caso de la retirada de roblones o tornillos de una unión, y la de platabandas de una viga armada para su sustitución. En las soldadura hay que tener un cuidado especial de no calentar excesivamente las piezas ya que la resistencia del acero disminuye con la temperatura y si la carga permanente es suficientemente elevada se puede producir el colapso de la pieza.

### 5.1.1 Refuerzo de vigas

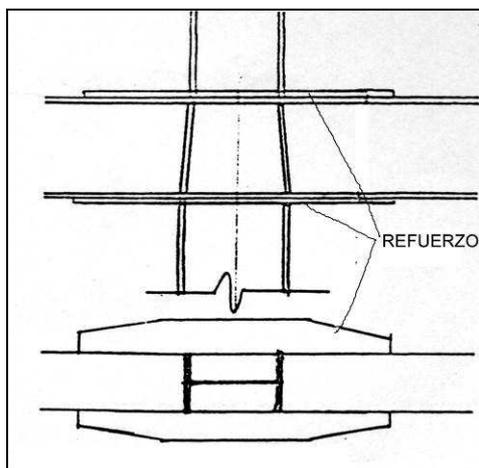
Es requerida con objeto de aumentar su capacidad de carga pero sin incrementar la flecha. Esto suele resolverse añadiendo elementos de acero a las secciones, debiendo operar generalmente sobre la estructura existente por

lo que hay que desmontar las piezas para efectuar correctamente las soldaduras. Si la estructura se encuentra en servicio, las operaciones deben hacerse sin desmontaje, lo que complica los trabajos a la vez que aumenta el riesgo de corrosión.

Hay que comprobar si el acero existente es capaz de admitir soldaduras, lo que obliga a comprobar su calidad mediante ensayo. Conviene tener en cuenta que los antiguos hierros dulces son escasamente soldables y, además, quebradizos y agrios.

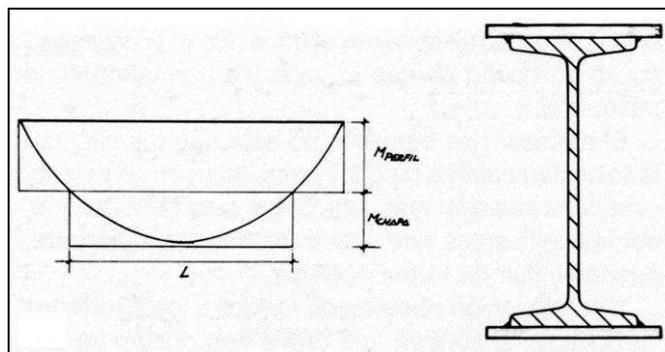


Cuando las vigas requieren aumento de su resistencia a tracción en los nudos para absorber un momento mayor, pueden reforzarse los perfiles existentes mediante dos platabandas que tendrán una sección que un momento de inercia adicional para el incremento necesario. Dicha solución suele acompañarse con la disposición de rigidizadores en la viga que garanticen la estabilidad del nudo. Los cordones longitudinales de soldadura para unir los nuevos elementos deben hacerse al tresbolillo.



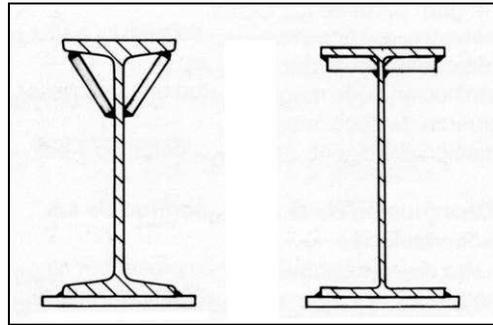
A) Refuerzo de las alas

El método de refuerzo más eficaz es la colocación, en las cabezas, de platabandas en una longitud suficiente. Esta longitud será la teórica "l" más una longitud, a cada lado, del orden de la anchura de la chapa, cuya misión es de anclaje.

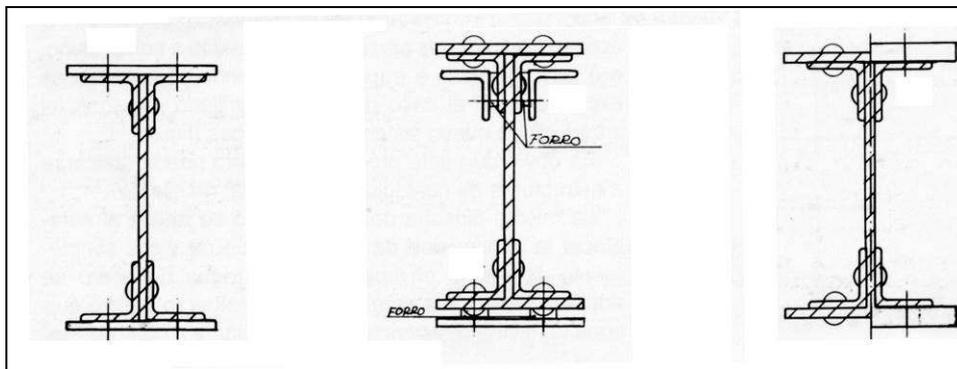


Si encima de las vigas hay otros elementos como forjados, cubiertas, correas, etc., esta solución no es económica por lo que habrá que limitarse a colocar el refuerzo por debajo del ala superior de alguna de las formas indi-

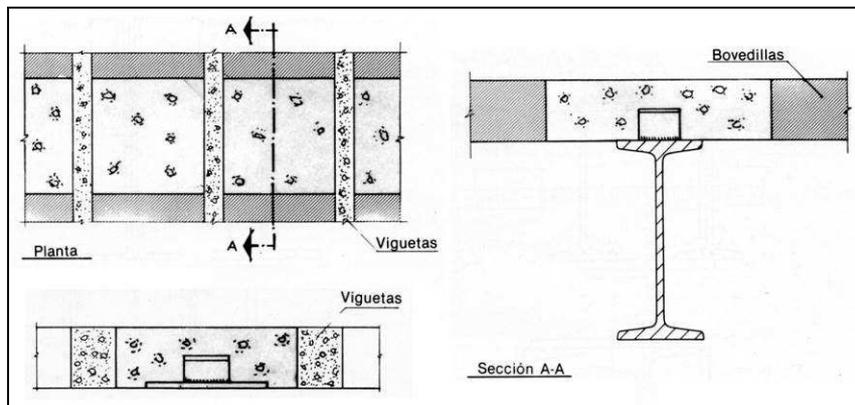
casas en la figura siguiente. Si el aumento de carga es pequeño, o sólo se necesita el refuerzo por razones de deformabilidad puede ser suficiente colocar sólo la platatabanda inferior.



Cuando el acero no sea soldable, puede unirse la pieza mediante tornillos, lo que a veces complica el refuerzo de la cabeza superior. Una opción en tal situación es la sustitución de algún elemento de la sección por otro de mayor área, siempre que la sección restante sea capaz de resistir las cargas existentes en el momento de efectuar esta operación o se haya apeado previamente la viga.



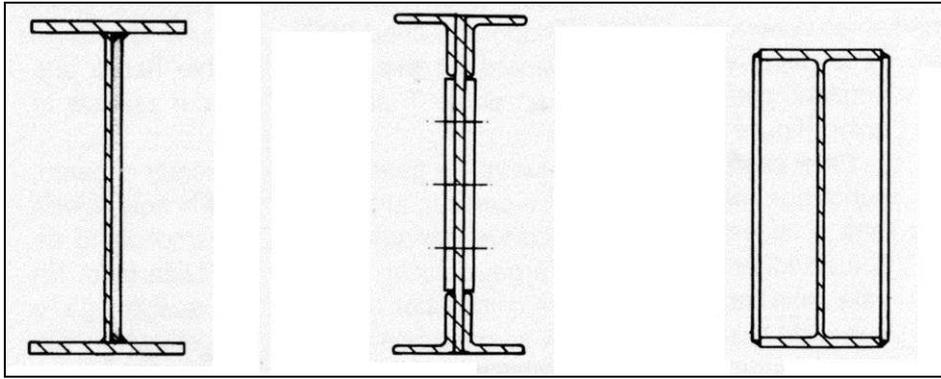
Otro método de refuerzo es colocar sobre la viga una cabeza de compresión de hormigón, con sus conectores correspondientes convirtiéndola en viga mixta. En vigas de edificios sobre las que se apoya el forjado, esto se puede hacer con relativa facilidad, eliminando las bovedillas, colocando los conectores entre las viguetas de forjado y, hormigonando el conjunto. El espesor del forjado será el espesor de la cabeza de hormigón.



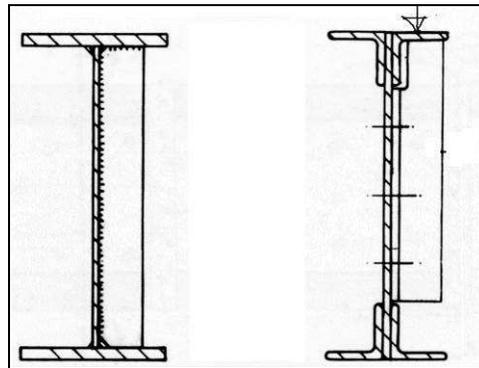
## B) Refuerzo de las almas.

El sistema corriente para reforzar las almas frente al esfuerzo cortante es el de adosar chapas del espesor necesario. Conviene colocar dos chapas, a cada lado del alma de forma que se siga conservando la simetría, pero es más cómodo poner una sola chapa de espesor doble ya que así sólo hay que acceder a la viga por un solo lado, lo que puede ser decisivo a veces, reduciéndose a la mitad la longitud de los cordones de soldadura.

Si el acero no fuese soldable es preciso que las dos caras del alma sean accesibles, al menos para introducir los tornillos y, a menos que una de las caras sea poco accesible, lo lógico será colocar dos, una a cada lado del alma. Otra solución posible es el de convertir la viga en doble T, en un cajón con dos o tres almas, según se coloque una o dos chapas. Esta solución tiene el inconveniente de que las uniones de apoyos pueden ser difíciles, además de ocultar las originales y, si la viga está a la intemperie, tiene el inconveniente adicional de que hay que hacer estancos los cajones ya que no son accesibles para pintarlos.

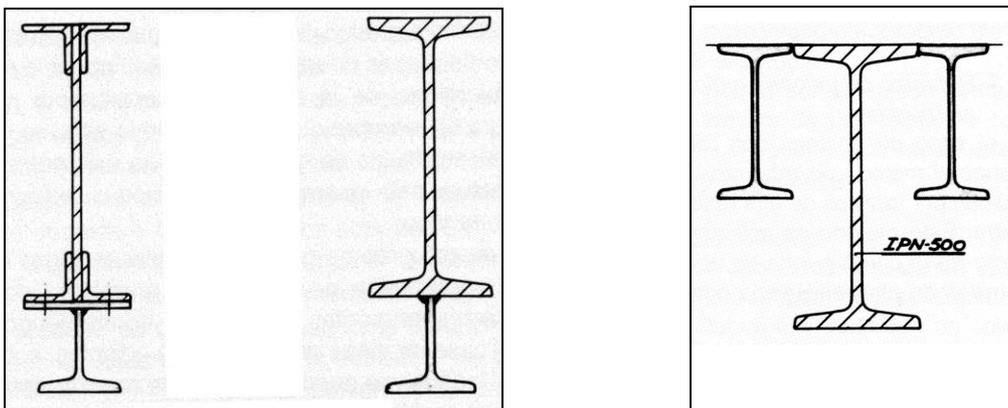


Con excesiva esbeltez de las almas, el refuerzo consiste en aumentar su espesor, como en el caso anterior o, mejor solución, colocar rigidizadores. Se dispondrán preferentemente por un sólo lado, por la misma razón ya apuntada para el refuerzo a cortante. Cuando la unión sea atornillada, ambas caras deben ser accesibles. Si los rigidizadores se colocan para absorber cargas concentradas aplicadas en el ala superior hay que unirlos a ella.



C) Refuerzo de la sección

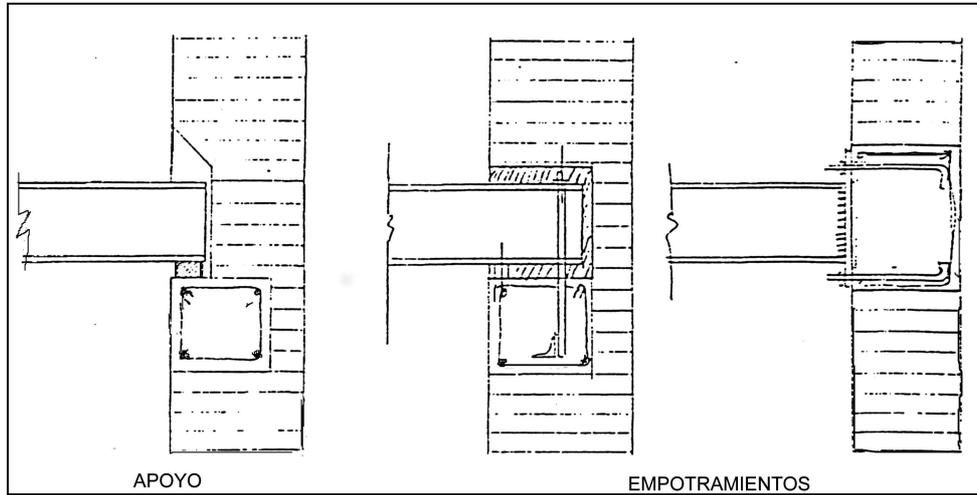
Una solución económico y eficaz, cuando el uso del edificio lo permita, es el aumento del canto de la viga con un perfil en T, obtenido a partir de una doble T, o mediante armado con chapas. Si el acero no es soldable habrá que usar perfiles en doble T para poder hacer la unión.



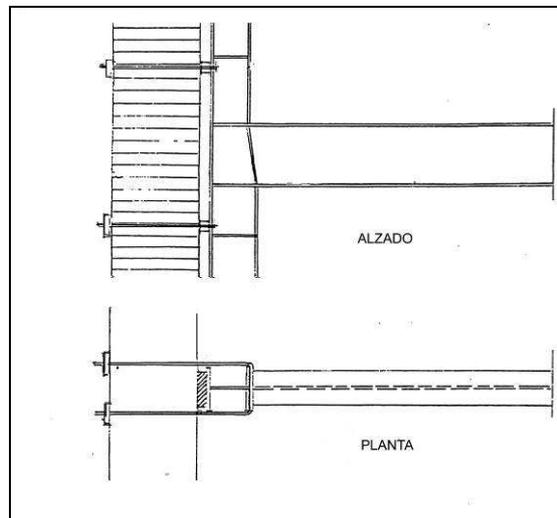
Cuando no se pueda aumentar el canto, habrá que recurrir a colocar al lado de la actual, otra viga o, si es preciso conservar el mismo plano de actuación de la carga, colocar una a cada lado. Entonces hay que comprobar no sólo que la viga o vigas de refuerzo son capaces de resistir el incremento de carga sino que poseen rigidez suficiente para poder absorberlo. O se podría hacer un apeo para rebajar tensiones en la viga original.

D) Entrega de vigas a muros

Al modificar o sustituir parte de una estructura de acero apoyada sobre fábricas de ladrillo o de piedra, sin tener que demolerlas, se requiere una unión entre ambos de tal manera que se garantice una transferencia de carga hacia el muro siempre de modo repartido y nunca puntual; que el enlace permita el movimiento de la viga, cuando se trata de apoyo móvil. El muro debe admitir carga excéntrica debida al apoyo de la viga. Además, deben aislarse los perfiles de acero de las posibles humedades del muro.

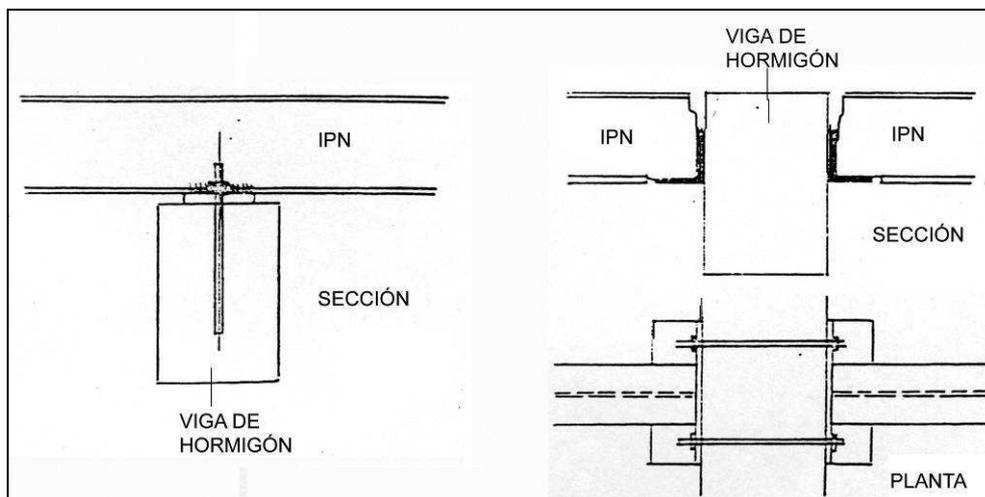


Quando los muros existentes no poseen capacidad para resistir la carga de las nuevas vigas, pero deben mantenerse (edificios históricos o complejidad de la obra), existe la opción de disponer una estructura paralela que se encarga de asumir toda la carga del edificio, además de asegurar la estabilidad de los muros conservados. Este mismo puente puede hacerse en la cimentación.



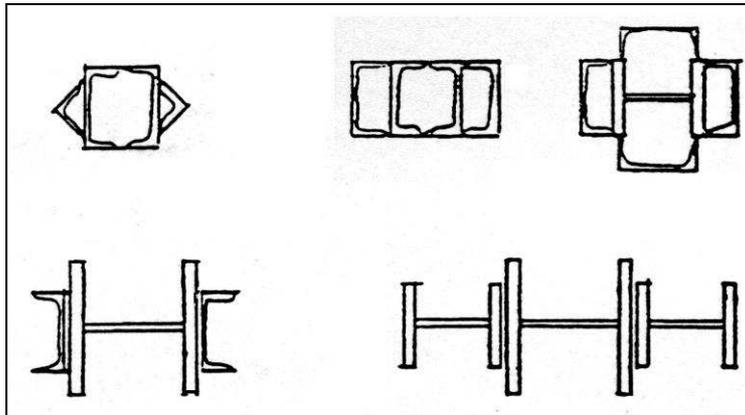
#### E) Uniones a vigas de hormigón

Obra típica de las reformas, en que se puede aprovechar la técnica del taladro a gran velocidad para colocar *spit roots* o barras ancladas al hormigón y recibidas con resina epoxi, que permiten a su vez el anclaje de una capa de acero a la que se soldará la cabeza de la nueva viga metálica.

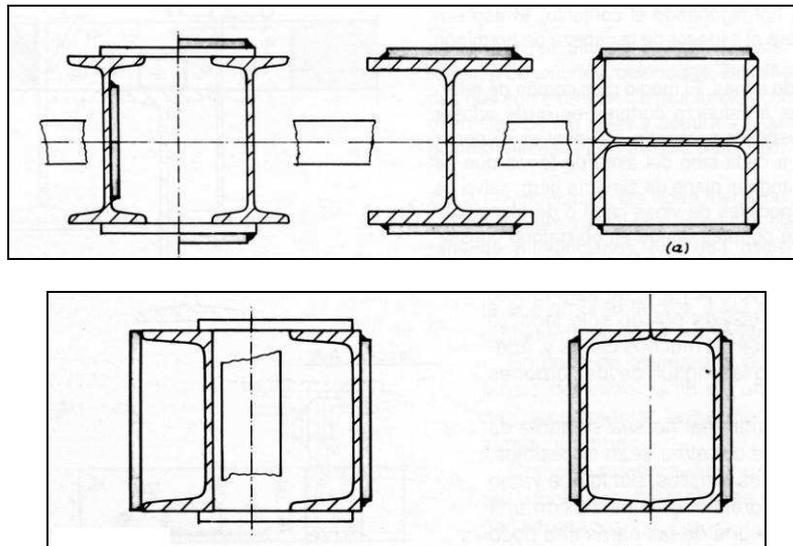


### 5.1.2 Refuerzo de soportes

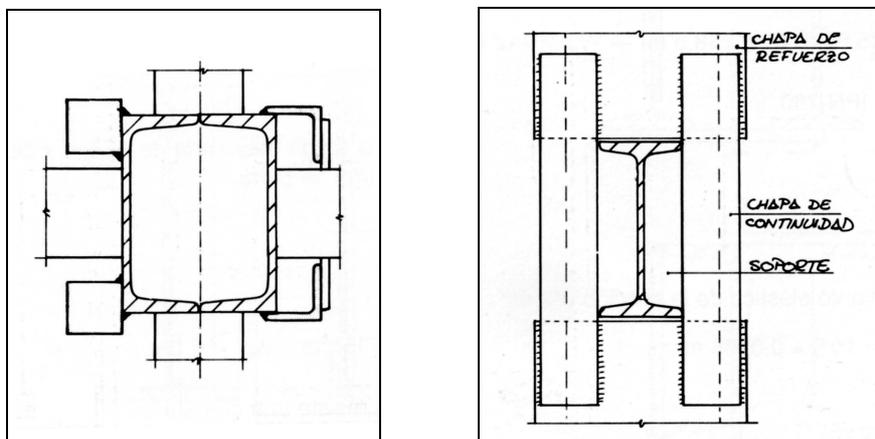
La solución usual de refuerzo consiste en adosar chapas o perfiles que proporcionen la sección y estabilidad adecuadas. Aunque es difícil evitar la modificación del aspecto, este procedimiento sigue siendo el más competitivo por su rapidez de ejecución, garantía del material y de elaboración, acabado y ligereza.



La posición de refuerzo dependerá de la forma de la sección transversal y, sobre todo, de la posición de las vigas. Cuando las que apoyan en el soporte están colocadas en una sola dirección, lo indicado será colocar los refuerzos en las caras paralelas a esa dirección, lo que, normalmente, no representa ningún problema.



Si hubiera vigas en las dos direcciones habrá que recurrir a colocar el refuerzo en las zonas que no interfieran con las vigas y, si esto es posible, será preciso dar continuidad al refuerzo a su paso por la viga, aunque esto suele complicar la solución.



Cuando exista gran diferencia en la esbeltez de la pieza respecto a su dos planos principales, el refuerzo es mucho más eficaz, colocándolo de forma que se reduzca la esbeltez máxima, reduciendo el radio de giro

Otros procedimientos de refuerzo de soportes son:

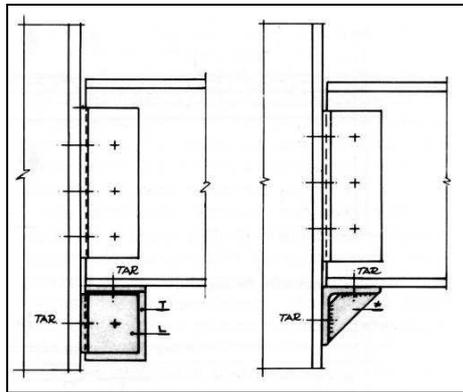
- Mediante hormigonado, embebiendo o rellenando el soporte, lo que constituye el *soporte mixto*.
- Mejor, recubierto por el hormigón, para protegerlo del fuego. El hormigón H-250, con recubrimiento mayor de 50 mm, separación de estribos no mayor de 200 mm, anclados a los perfiles. Se requieren conectores para asegurar la transmisión de esfuerzos rasantes del acero al hormigón; o bien la colocación de una placa de reparto en la cabeza de los soportes.

### 5.1.3 Refuerzo de piezas con uniones roblonadas y atornilladas

Cuando se trata de estructuras con uniones a base de roblones o tornillos ordinarios el método de refuerzo más sencillo es el sustituirlos por tornillos de alta resistencia del mismo diámetro. Este método es aplicable siempre que el aumento de la carga pueda ser absorbida, tanto por los tornillos de alta resistencia como por el material base.

Si la unión es con tornillos de alta resistencia o el aumento de la carga es superior a la admisible por el método anterior, puede efectuarse el refuerzo colocando un diámetro de tornillo mayor, aumentando el diámetro del agujero, o aumentando el número de tornillos. Este método es aplicable siempre que la separación entre los agujeros sea la suficiente como para cumplir las limitaciones de las Normas y que la carga pueda ser absorbida por el material base. En todas estas operaciones, debe hacerse la sustitución de forma escalonada con el fin de que, en todo momento, la unión pueda transmitir los esfuerzos existentes, a menos que se apeee convenientemente la estructura descargando la unión.

En uniones viga-soporte puede efectuarse el refuerzo aumentando el canto del alma por debajo del ala inferior, haciendo allí la unión al soporte, o colocando una consola.

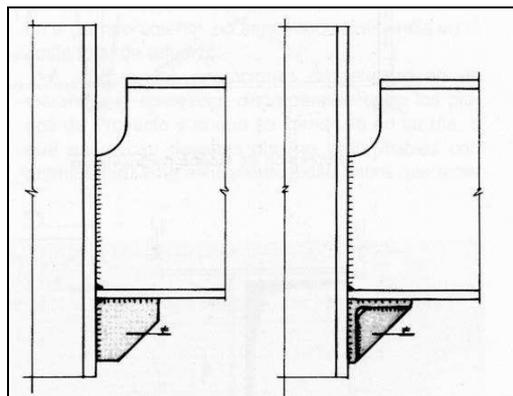


Cuando el acero sea soldable, puede reforzarse la unión mediante cordones de soldadura. En este caso, los roblones o tornillos resisten las cargas aplicadas en el momento del refuerzo, y las cargas aplicadas con posterioridad deberán transmitirse exclusivamente en la unión tornillos de alta resistencia.

### 2.1.4 Refuerzo de piezas con uniones soldadas

Cuando la soldadura de los perfiles de la estructura sea en ángulo, el procedimiento de refuerzo habitual es el aumento de la longitud del cordón y el del espesor de garganta, respetando las limitaciones que se fijan en las Normas. En algún caso podría ser mejor hacer el refuerzo mediante tornillos de alta resistencia con las ventajas que reporta el no tener que llevar los aparatos necesarios para la soldadura.

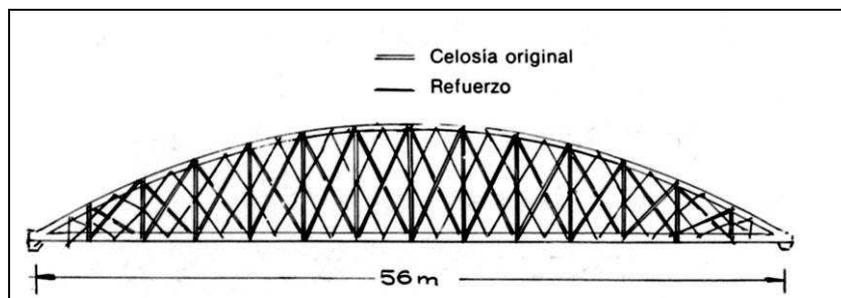
Las uniones viga-soporte pueden reforzarse del mismo modo que las uniones atornilladas, aumentando el canto del alma por debajo del ala inferior efectuando allí la unión al soporte o colocando una consola.



### 5.1.5 Refuerzo de celosías

La celosía es un tipo de estructura en que sus elementos están solicitados sobre todo por esfuerzos axiales. Por ello puede aplicarse todo lo expuesto anteriormente: los elementos fraccionados se reforzarán con aumento de sección mientras que los elementos comprimidos, además, disminuyendo sus luces de pandeo mediante arriostramientos adecuados. En todos esos casos habrá que reforzar también las uniones siguiendo lo indicado anteriormente.

La siguiente figura muestra la rehabilitación de Puente de Toro sobre el río Duero, donde en lugar de reforzar las piezas, se duplicó la celosía. Así no hubo que actuar en los nudos ni reforzar barras, ya que la disminución de las luces de pandeo de cabeza superior y la triangulación proporcionaban la rigidez y resistencia necesarias.



### 5.1.6 Refuerzo de forjados

Para reforzar forjados deformados por ser muy esbeltos, es preciso aumentar la inercia, ya que la flecha es excesiva y aumentar el módulo resistente, para asumir las tensiones excesivas.

La solución más conocida consiste en reforzar las viguetas mediante platabandas soldadas al ala inferior, o bien la adición de medios perfiles I o H, con la misma disposición.

En vigas apoyadas, o continuas con problema exclusivo de flecha, el suplemento sólo es necesario en la zona de momentos positivos, es decir, los 3/4 de la luz centrales. En vigas continuas con problemas tensionales los puntos desfavorables son los apoyos: se refuerzan las zonas contiguas, en  $1/5 L$  a cada lado.

El método opcional es el refuerzo mediante losa de hormigón mínimamente armada, de 10 a 15 cm de espesor, H-250, enlazada mediante conectores, preferentemente pernos Nelson colocados a pistola, o bien trozos de perfiles UPN 80 o L 80.8, soldados manualmente.

En cualquier caso es necesario un estudio de soldabilidad que incluya al menos un análisis químico del material existente, y un ensayo de dureza. Se requiere también sopado de los forjados y/o las viguetas, durante la operación.

### 5.1.7 Reparación de estructuras de fundición

No existen estructuras de fundición para edificios aunque si columnas de fundición en el interior de edificios del siglo pasado. También existen muchos elementos de fundición: barandillas, pretilas, kioscos... La fundición es un material que resiste bien a compresión y no tan bien a tracción. Es frágil por lo que es sensible a la fatiga y a la rotura frágil. Las columnas clásicas de fundición suelen estar sometidas a solicitaciones de compresión centrada y no suelen tener problemas de fatiga y muy pocos casos de rotura frágil. Por tanto es un elemento que puede ser reutilizable en cualquier rehabilitación.

Cuando existe alguna fisura o grieta puede repararse con facilidad: se sanea la grieta totalmente con la piedra de amolar redondeando su iniciación. El relleno de la grieta se debe hacer con electrodos de níquel, precalentando la zona y siempre siguiendo las indicaciones del fabricante de los electrodos.

## 5.2 Prevención del desgarro laminar

- En el ámbito de diseño de la estructura, reduciendo al mínimo los esfuerzos en la dirección perpendicular al plano de laminación. La norma DIN 410 prohíbe que las piezas estén sometidas a esfuerzos de tracción en esa dirección a menos que se garantice que la resistencia en esa dirección es la suficiente. Las tensiones exteriores no originan este fenómeno pero puede ayudar a la propagación de la fisura, especialmente en el caso de fatiga.

- En el nivel de diseño de la unión, limitando la deformación plástica en las inmediaciones de la junta y evitando que la retracción se produzca perpendicularmente al plano de las inclusiones. En la figura 12 se dan algunos ejemplos de como diseñar adecuadamente las uniones.

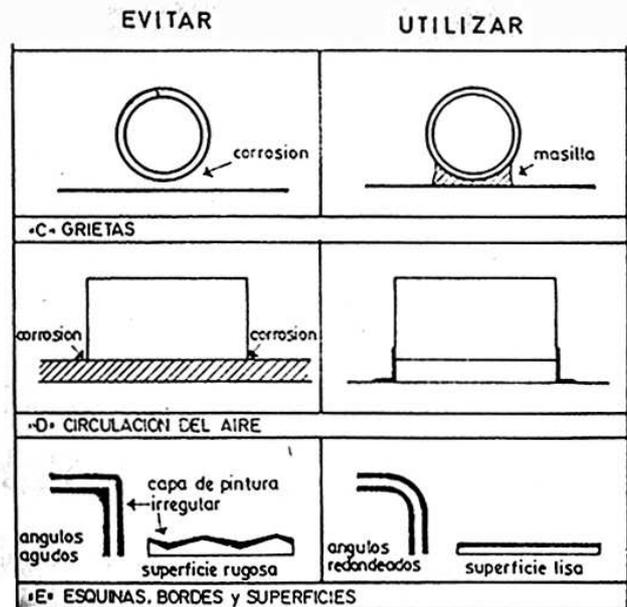
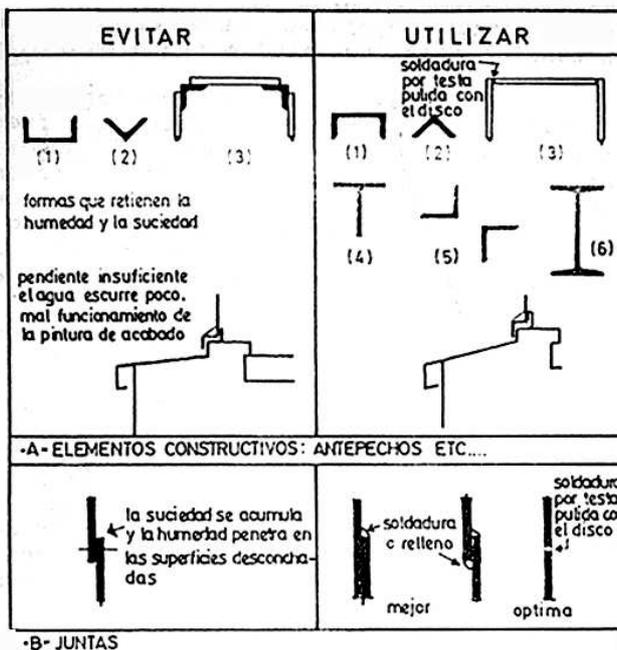
- En la selección del material de base, empleando aceros que contengan pocas inclusiones.

- Con respecto al proceso de soldadura, eligiendo un metal de aportación compatible con la resistencia del material base en la dirección perpendicular a la del plano de laminación, eligiendo una secuencia de soldadura que reduzca al mínimo las deformaciones por retracción y reduciendo al mínimo necesario la cantidad de metal de aportación.

### 5.3 Reparación de estructuras afectadas por la corrosión

En la rehabilitación de una estructura el procedimiento más adecuado a seguir es el siguiente:

- Limpieza de la zona corroída para conocer el alcance del problema, pues el enorme aumento de volumen producido por la oxidación hacer pensar en daños mayores que los reales. La limpieza debería hacerse al chorro de arena.
- Proyecto y ejecución del refuerzo en función de la causa del inicio de la corrosión, evitando las superficies de condensación, diseñando detalles limpios, sin anfractuosidades ni recovecos; y dejando las superficies accesibles para un fácil mantenimiento posterior. Si ello no fuera posible, hay que prever una buena ventilación para evitar humedades permanentes.



- Colocando una adecuada protección de las superficies metálicas en función de las condiciones ambientales y del plazo de garantía.

#### 5.3.1 Eliminación de la corrosión

##### A) Abrasivos lanzados en seco:

- Como el chorro de arena, para eliminar productos de la corrosión y restos de pintura, siempre que las piezas no sean muy delgadas.
- Deben efectuarse ensayos para determinar: presiones efectivas; tamaño y tipo de partículas de abrasivo; y distancia de trabajo. Puede utilizarse: granalla de cobre o escoria molida; la eliminación de pintura de minio de plomo (tóxica) obliga a especial protección de los operarios.
- El hierro forjado puede ser blando para usar abrasivos fuertes: mejor cáscaras de nueces molidas a presiones reducidas (30 psi).

##### B) Abrasión manual o mecánica:

- Mediante cepillos de cerdas de acero, martillos pesados o rascadores. Son poco efectivos pues dejan siempre restos de herrumbre, costras, etc.
- Con cepillos rotatorios, pistolas de agujas: más efectivos, aunque también pueden dejar residuos en las cavidades de más difícil acceso.

##### C) Flameado:

- Mediante soldador de oxipropano para calentar la superficie del metal corroída. El calor expande los productos de la corrosión en grado diferente que el metal soporte, lo que hace que se despeguen.
- Se considera el método idóneo para hierro forjado; debe cuidarse, no obstante, su aplicación a piezas delgadas que pueden sufrir deformaciones por las dilataciones.
- El calor puede utilizarse para eliminar la oxidación relámpago y para secar zonas del hierro antes de la aplicación de una imprimación.

### 5.3.2 Tratamiento de los materiales dañados

#### A) Estabilización de la corrosión:

- Se trata de convertir en estables los productos de la corrosión formados sobre el metal.
- *Formulaciones basadas en el ácido ortofosfórico*: son convertidores de los óxidos en fosfatos de hierro, productos estables de color grisáceo.
- *Formulaciones basadas en el ácido tánico*: convertidores de óxidos de hierro y otras sustancias de la corrosión en complejos organo-metálicos que incluyen tanato de hierro, cuyo único inconveniente es la posible formación de manchas negras difíciles de eliminar.
- *Inhibidores de corrosión*: basados en silicatos, que inducen la formación, catalizada por los silicatos, de sales de hierro (goetita y magnetita) que pasan a ser estables y restablecen la alcalinidad necesaria para la estabilidad y resistencia a la corrosión del acero de armaduras o pies derechos.

#### B) Repintado:

El riesgo de una corrosión anticipada de un elemento estructural depende de su ubicación en la estructura: en una zona poco ventilada, cerca de grandes humedades, en una posición donde se producen condensaciones, o en una exposición directa a la intemperie, etc. Y del ambiente donde está el edificio: rural, urbano o marino.

La duración de cualquier tipo de protección es siempre limitada, lo cual debe quedar muy claro, para que el usuario establezca un calendario de su mantenimiento y repintado. El grado de oxidación se fija de acuerdo con una escala, la escala europea, por ejemplo, por comparación con unas superficies tipo fotografiadas.



Aunque no hay ninguna normativa que establezca una definición clara de esta duración tipificada, se puede fijar una garantía de protección de 7 años con referencia a un grado de deterioro con las siguientes características: pintura de acabado envejecida, ampollado o decolorada; máximo de superficie cubierta de óxido: 10 %; película de pintura desprendida; muy pocas picaduras del metal observables a simple vista. Esto corresponde a una duración de la protección del orden de 11-15 años si se adopta una política de mantenimiento que contemple repintados parciales a lo largo de dicho periodo.

#### a) Para ambiente agresivo:

- Estructuras a la intemperie al borde del mar o en su zona de influencia, o en zonas industriales de gran humedad.
- Elementos estructurales en puntos de alta condensación, mal ventiladas, no accesibles y/o con peligro de estar en contacto con humedades, aunque la estructura esté en un ambiente no agresivo.
- Preparación de la superficie a pintar con chorro de arena hasta grado Sa. 21/2 de las normas suecas SIS 055900 o a *casi metal blanco* de las especificaciones americanas de la Steel Structures Painting Council.
- Imprimación epoxi rica en zinc, con un espesor de 22  $\mu$  de la capa de película seca (una o dos manos)
- Capa gruesa intermedia epoxi con un espesor de película seca de 75  $\mu$ .
- Esmalte epoxi en acabado de 35  $\mu$  de espesor.

Esta solución actúa en dos direcciones: la resina epoxi se adhiere perfectamente sobre la superficie de acero preparada al chorro de arena (grado Sa 21/2) proporcionando un efecto barrera muy eficaz y por sus características

el repintado posterior liga perfectamente. El zinc incluido en las capas de imprimación proporciona al acero una protección activa como es la protección catódica pues el zinc, en contacto con el acero forma un par eléctrico que hace que en presencia de oxígeno (y agua) se oxida el zinc y no el hierro.

Sin embargo, la eficacia de esta protección acaba con la oxidación de todo el zinc por lo que se debe confiar la protección al efecto barrera y dejar la protección catódica para alargar la vida útil de la protección en las zonas donde haya fallado el efecto barrera. La elección de una o dos capas de imprimación se hará según la importancia de la agresividad del ambiente. Y como la efectividad de este tratamiento depende de la existencia de contacto entre hierro y zinc, es necesario que la preparación de las superficies tenga una calidad como mínimo del grado Sa 21/2.

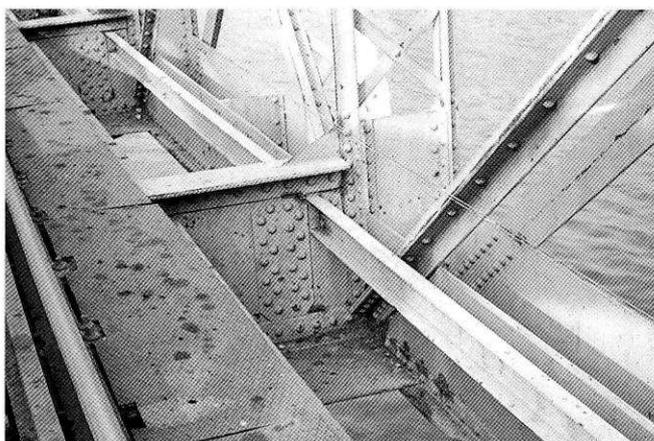
b) En ambiente medianamente agresivo.

- Estructuras de edificios en ciudades de atmósfera húmeda.
  - Estructuras en zonas industriales de industria media.
  - Elementos estructurales o puntos localizados de la estructura no accesibles o con peligro de condensaciones, cuando la zona donde se ubica el edificio es muy benigna desde el punto de vista del ataque de la corrosión.
  - Preparación de la superficie a pintar con cepillo hasta grado St-3 o chorro de arena hasta grado Sa 2.
  - Imprimación con clorocaucho en diversas variantes con un espesor de la capa de pintura seca de 30-35  $\mu$ .
  - Capa gruesa intermedia de clorocaucho con un espesor de la capa de pintura seca de 40  $\mu$ .
  - Capa de acabado de clorocaucho con un espesor de la capa de pintura seca de 30-35  $\mu$ .
- O también, sobre la misma preparación, la formulación de tipo alcídica siguiente:
- Imprimación anticorrosiva sintética de cromato de zinc amarillo de un espesor de 35  $\mu$  de película seca.
  - Capa gruesa gris intermedia 60-70  $\mu$ .
  - Esmalte sintético brillante de acabado 30-35  $\mu$ .

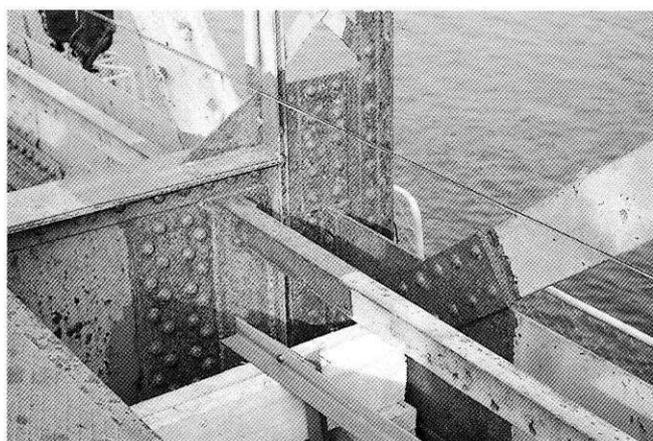
c) En ambiente neutro

- Construcciones rurales.
- Construcciones urbanas en la meseta.
- Elementos estructurales netos protegidos con fábrica de ladrillo, etc.
- Preparación de la superficie a pintar con cepillo hasta grado St-2.
- Imprimación antioxidante de óxido de hierro o de minio de plomo electrolítico al aceite (35  $\mu$ ).
- Dos manos de acabado con esmalte sintético o de aluminio (35  $\mu$  cada capa).

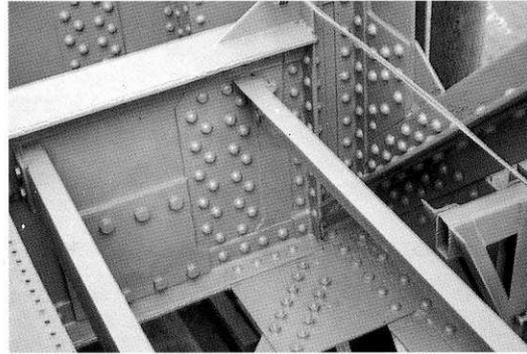
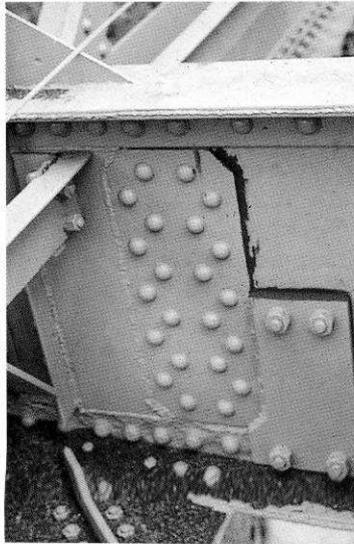
En la figura siguiente se muestran cuatro fases de la rehabilitación de una estructura atacada por la corrosión. Se observa el refuerzo en el alma taladrada por la corrosión y que consiste en reponer la sección resistente desaparecida por medio de un cubrejuntas. Asimismo, es de notar el sellado de juntas para aumentar la vida de la protección al impedir entrada de humedad.



a.



b.



23. a. Nudo a rehabilitar.  
 b. Limpieza del nudo.  
 c. Refuerzo y sellado de juntas.  
 d. Nudo rehabilitado.

Otras consideraciones sobre esta técnica de reparación de estructuras afectadas por corrosión:

- Se dice que el hierro se corroe más por fallo de la pintura o protección que por otras causas.
- No se debe pintar sobre zonas corroídas, pues con seguridad se desprenderá: la imprimación debe estar bien ligada al metal.
- Una opción a la pintura es el tratamiento del hierro viejo por inmersión en ácido fosfórico diluido caliente, capaz de formar una capa protectora. El inconveniente es que las piezas deben ser desmontadas para tratarlas en taller.
- Para evitar el anterior problema se añade a la solución una sustancia sintética (polivinilcelulosa o cera) para proporcionar una consistencia de gel o pasta y que pueda mantenerse en superficies verticales o invertidas.
- Tras comprobar si la superficie está seca y libre de óxido, polvo o grasa, se procede a colocar una primera capa (mejor dos) de imprimación con minio de plomo, cromato, fosfato o polvo de zinc.
- Pueda aplicarse de modo manual, pero siempre falla. Es preferible la deposición electrostática y evitar el uso del zinc, pues también suele deteriorarse con facilidad.

En el caso de forjados en mal estado, puede apuntarse lo siguiente:

- Es difícil aplicar reglas de cálculo, por las excesivas variantes que pueden encontrarse:
  - \* eliminar la causa de la corrosión.
  - \* restaurar la primitiva capacidad portante del forjado.
- En casos leves: soldar chapas en las alas deterioradas, previa limpieza y saneamiento, habiendo realizado un estudio de soldabilidad.
- Más difícil de detectar y corregir la corrosión del alma de los perfiles, generalmente ocultas por las bovedillas. Suele aparecer en las zonas que soportan mayor cortante, es decir, en los extremos.
- Si hay muchas viguetas afectadas quizá convenga sustituir todo el forjado: a) eliminando el existente; b) construyendo uno nuevo sobre él.

## BIBLIOGRAFÍA

- Addleson, L. **"Fallos en los edificios"**. Consejo General de Aparejadores y Arq. Técnicos, 1982. "Lesiones en los edificios: Síntomas, causas, reparación" (2 tomas), CEAC, 1980.
- Centre Belgo-Luxembourgeois d'information de l'acier. **"Aciers patinables"**. Civil Engineering. Varios números.
- Chapeau, W. **"Lamellar tearing"**. Association Internationale des Ponts et Charpentes (3/1978).
- Daussy, R. **Pathologie de la construction métallique**. Annales de l'Institut technique du bâtiment et des travaux publics (12-1979).
- Eichler, F. **"Patología de la Construcción"**, Ed. Blume, 1979.
- Eldrige, H.J. **"Defectos comunes"**, Ed. G.G., 1982.
- Gili, G. / Wittfoht, H.: **Puentes. Ejemplos Internacionales**. Barcelona, 1975.
- Maquoi, R / Massonet, Ch.: **Leçons a tirer des accidents survenus a quatre grands ponts métalliques en caisson**.
- Martínez Lasheras, R y otros. Curso de rehabilitación. Tomo 5: Las estructuras. Colegio O. de Arquitectos de Madrid. 1985
- Monjo Carrió, J., Maldonado Ramos, L. **"Patología y técnicas de intervención en estructuras arquitectónicas"** Ed. Munnilla-Lería. Madrid, 2001.
- Sealey, A.: **Bridges and aqueducts**. Hugh Evelyn. London 1976.
- Sfintesco, D.: **Un centenaire**. Construction Métallique (4-1972).
- Vallette, M.: **Etude sur les vieux tabliers en fer du réseau de l'Etat trancáis**. Association Internationale des Ponts et Charpentes.
- Varios autores. Tratado de Rehabilitación. Tomo 3: Patología y técnicas de intervención. Elementos estructurales. Ed. Munnilla-Lería. Madrid, 1998.