

# EUROCÓDIGOS

NORMA EUROPEA  
EXPERIMENTAL

UNE-ENV 1999-2  
Marzo 2002



## EUROCÓDIGO 9

### PROYECTO DE ESTRUCTURAS DE ALUMINIO

#### PARTE 2: ESTRUCTURAS SOMETIDAS A FATIGA

**AENOR**

Asociación Española de  
Normalización y Certificación

**9**

Parte 2



## **PREÁMBULO**

Esta publicación contiene la Norma UNE-ENV 1999-2:1998 "Proyecto de Estructuras de Aluminio. Parte 2: Estructuras sometidas a fatiga".

La citada norma experimental, es la versión española de la correspondiente norma europea experimental y contiene las bases para el cálculo de estructuras de aleaciones de aluminio respecto a los estados límites de rotura provocada por fatiga.

Los modelos estructurales tratados en esta norma son: vigas, pórticos arriostrados y sin arriostrar, celosías, placas rigidizadas y cuerpos macizos, realizados con: perfiles laminados, extruidos, piezas forjadas, tubos estirados y piezas fundidas.

La aplicación correcta de esta norma experimental, cuyas bases de cálculo, en ella contenidas, se configuran como de aplicación volumétrica y por tanto no obligatoria, precisa de la utilización conjunta de la misma y de otras normas experimentales que se citan a lo largo de su texto.

En España, es conocido el hecho de que existen especificaciones técnicas a utilizar para el proyecto y ejecución de edificios, que constituyen materia regulada de obligado cumplimiento "reglamentaciones técnicas", como, a título de ejemplo, las Normas Básicas: NBE CT-79 "Condiciones térmicas en los edificios"; NBE CA-88 relativa a las condiciones acústicas; NBE AE-88 relativa a acciones en la edificación; NBE CPI-96 relativa a protección contra incendios, aprobadas todas ellas por diferentes Reales Decretos, y, asimismo, en materia de carreteras cabe citar el Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para Obras de Carreteras y Puentes.

En todo caso, esta publicación servirá para familiarizar a los técnicos españoles con el análisis estructural, respecto a los estados límite de rotura provocada por fatiga, de estructuras de aluminio.

La traducción de esta norma experimental, desde su versión original en inglés a su texto en español, ha sido realizada por el Subcomité 9 del Comité Técnico de Normalización 140 Eurocódigos Estructurales de AENOR.

**Andrés Doñate Megías**

Subdirector General de Normativa  
y Estudios Técnicos y Análisis Económico

*Secretaría General Técnica*

MINISTERIO DE FOMENTO



# norma española experimental

UNE-ENV 1999-2

Marzo 2002

## TÍTULO

**Eurocódigo 9**

**Proyecto de estructuras de aluminio**

**Parte 2: Estructuras sometidas a fatiga**

*Eurocode 9: Design of aluminium structures. Part 2: Structures susceptible to fatigue.*

*Eurocode 9: Conception et dimensionnement des structures en aluminium. Partie 2: Structures sensibles à la fatigue.*

## CORRESPONDENCIA

Esta norma experimental es la versión oficial, en español, de la Norma Europea Experimental ENV 1999-2 de mayo de 1998.

## OBSERVACIONES

## ANTECEDENTES

Esta norma experimental ha sido elaborada por el comité técnico AEN/CTN 140 *Eurocódigos Estructurales* cuya Secretaría desempeña SEOPAN.



ICS 91.010.30; 91.080.10

**Descriptores:** aluminio; ensayo de fatiga; estructura; proyecto de construcción; resistencia a la fatiga después de N ciclos.

Versión en español

**Eurocódigo 9**  
**Proyecto de estructuras de aluminio**  
**Parte 2: Estructuras sometidas a fatiga**

**Eurocode 9: Design of aluminium structures. Part 2: Structures susceptible to fatigue.**

**Eurocode 9: Conception et dimensionnement des structures en aluminium. Partie 2: Structures sensibles à la fatigue.**

**Eurocode 9: Bemessung und Konstruktion von Aluminiumbauten. Teil 2: Ermüdungsanfällige Tragwerke.**

Esta norma europea experimental (ENV) ha sido aprobada por CEN el 1997-10-26 como una norma experimental para su aplicación provisional. El período de validez de esta norma ENV está limitado inicialmente a tres años. Pasados dos años, los miembros de CEN enviarán sus comentarios, en particular sobre la posible conversión de la norma ENV en norma europea (EN).

Los miembros de CEN deberán anunciar la existencia de esta norma ENV utilizando el mismo procedimiento que para una norma EN y hacer que esta norma ENV esté disponible rápidamente y en la forma apropiada a nivel nacional. Se permite mantener (en paralelo con la norma ENV) las normas nacionales que estén en contradicción con la norma ENV hasta que se adopte la decisión final sobre la posible conversión de la norma ENV en norma EN.

Los miembros de CEN son los organismos nacionales de normalización de los países siguientes: Alemania, Austria, Bélgica, Dinamarca, España, Finlandia, Francia, Grecia, Irlanda, Islandia, Italia, Luxemburgo, Noruega, Países Bajos, Portugal, Reino Unido, República Checa, Suecia y Suiza.

**CEN**  
**COMITÉ EUROPEO DE NORMALIZACIÓN**  
European Committee for Standardization  
Comité Européen de Normalisation  
Europäisches Komitee für Normung  
**SECRETARÍA CENTRAL: Rue de Stassart, 36 B-1050 Bruxelles**





## ÍNDICE

	Página
<b>PREÁMBULO .....</b>	<b>10</b>
<b>1 GENERALIDADES.....</b>	<b>13</b>
1.1 Campo de aplicación de la parte 2 del Eurocódigo 9 .....	13
1.1.1 Aplicación .....	13
1.1.2 Tipos de estructuras.....	13
1.1.3 Productos básicos .....	13
1.1.4 Tipos de elementos .....	13
1.1.5 Materiales .....	13
1.1.6 Métodos de unión .....	15
1.1.7 Condiciones ambientales .....	15
1.2 Normas para consulta .....	15
1.3 Distinción entre principios y reglas de aplicación .....	16
1.4 Hipótesis.....	16
1.5 Definiciones.....	16
1.5.1 Términos comunes a todos los Eurocódigos.....	16
1.5.2 Términos especiales utilizados en esta parte 2 del Eurocódigo 9.....	17
1.6 Símbolos .....	20
1.7 Documentos de cálculo.....	22
1.7.1 Planos .....	22
1.7.2 Especificación de fabricación .....	22
1.7.3 Manual de operaciones .....	22
1.7.4 Manual de mantenimiento.....	22
<b>2 BASES DE CÁLCULO.....</b>	<b>23</b>
2.1 Generalidades .....	23
2.1.1 Objeto de cálculo.....	23
2.1.2 Influencia de la fatiga sobre el cálculo .....	23
2.1.3 Mecanismo de rotura .....	23
2.1.4 Emplazamientos potenciales de la fisuración por fatiga.....	23
2.1.5 Condiciones de sensibilidad a la fatiga .....	24
2.1.6 Métodos de cálculo de la fatiga .....	24
2.2 Cálculo de vida útil o segura .....	25
2.2.1 Requisitos previos al cálculo de la vida útil .....	25
2.2.2 Procedimiento para calcular la vida útil .....	25
2.3 Cálculo de la tolerancia a daños .....	26
2.3.1 Requisitos previos al cálculo de la tolerancia a daños.....	26
2.3.2 Determinación de la estrategia de inspección para el cálculo de tolerancia a daños.....	28
2.4 Proyecto asistido por ensayos.....	30

<b>3</b>	<b>CARGAS.....</b>	<b>30</b>
3.1	Causas de las cargas de fatiga .....	30
3.2	Cálculo de las cargas de fatiga .....	31
3.3	Carga de fatiga equivalente.....	31
3.4	Coefficientes parciales de seguridad para la carga de fatiga.....	32
<b>4</b>	<b>ANÁLISIS DE TENSIONES .....</b>	<b>32</b>
4.1	Análisis global de tensiones .....	32
4.1.1	Generalidades .....	32
4.1.2	Utilización de los elementos viga.....	33
4.1.3	Utilización de los elementos membrana y de cáscara.....	33
4.2	Aplicabilidad de las tensiones nominales, de las tensiones nominales modificadas y de las tensiones de punto caliente.....	34
4.2.1	Tensiones nominales .....	34
4.2.2	Tensiones nominales modificadas .....	34
4.2.3	Tensiones de punto caliente.....	34
4.3	Deducción de las tensiones.....	35
4.3.1	Deducción de las tensiones nominales .....	35
4.3.2	Deducción de las tensiones nominales modificadas .....	37
4.3.3	Deducción de las tensiones de punto caliente.....	37
4.3.4	Orientación de las tensiones .....	37
4.4	Parámetros de carreras de tensiones para emplazamientos de iniciación específicos .....	38
4.4.1	Material base, soldaduras a tope con penetración completa y uniones fijadas mecánicamente .....	38
4.4.2	Soldaduras en ángulo y soldaduras a tope con penetración parcial .....	38
4.4.3	Uniones por adherencia .....	38
4.4.4	Piezas fundidas .....	39
4.5	Espectros de tensiones.....	39
4.5.1	Cómputo de ciclos .....	39
4.5.2	Determinación del espectro de tensiones.....	39
<b>5</b>	<b>RESISTENCIA A LA FATIGA.....</b>	<b>41</b>
5.1	Categorías de detalle.....	41
5.1.1	Factores que influyen en la categoría del detalle.....	41
5.1.2	Tablas de categorías del detalle .....	41
5.2	Datos de resistencia a la fatiga .....	42
5.2.1	Detalles clasificados.....	42
5.2.2	Detalles sin clasificar .....	43
5.2.3	Uniones por adherencia .....	43
5.2.4	Tensión de punto caliente .....	56
5.3	Efecto de la tensión media .....	56
5.3.1	Generalidades .....	56
5.3.2	Material base y uniones fijadas mecánicamente.....	56
5.3.3	Uniones soldadas .....	56

5.3.4	Uniones por adherencia .....	56
5.3.5	Zona de baja endurancia.....	56
5.3.6	Cómputo de ciclos para el cálculo de la relación R .....	57
5.4	Efecto del medio ambiente (entorno).....	57
5.5	Técnicas de mejora.....	57
6	REQUISITOS DE CALIDAD.....	58
6.1	Determinación del nivel de calidad requerido .....	58
6.2	Designación de los niveles de calidad en los planos .....	58
6.3	Evaluación de la aptitud para el empleo .....	59
ANEXO A (Informativo)	ANÁLISIS DE LAS TENSIONES.....	60
ANEXO B (Informativo)	GUÍA SOBRE LA EVALUACIÓN POR LA MECÁNICA DE LA FRACTURA .....	65
ANEXO C (Informativo)	ENSAYOS PARA EL CÁLCULO DE LA FATIGA .....	83
ANEXO D (Normativo)	NIVELES DE ACEPTACIÓN DE LA INSPECCIÓN Y DE LA EJECUCIÓN .....	88
ANEXO E (Informativo)	MEJORA DE LA RESISTENCIA A LA FATIGA DE LAS SOLDADURAS.....	96
ANEXO F (Informativo)	FATIGA OLIGOCÍCLICA .....	98
ANEXO G (Informativo)	INFLUENCIA DE LA RELACIÓN R.....	100

## **PREÁMBULO**

### **Objetivos de los Eurocódigos**

Los Eurocódigos Estructurales comprenden un grupo de normas para el diseño de edificaciones y obras de ingeniería civil desde el punto de vista estructural y geotécnico.

Se pretende que sirvan como documentos de referencia para los siguientes propósitos:

- a) Como medio de que los trabajos de edificación e ingeniería civil cumplan con los requisitos esenciales de la Directiva de Productos de Construcción (DPC).
- b) Como marco para desarrollar especificaciones técnicas armonizadas para los productos de construcción.

Cubren la ejecución y el control, solamente hasta el punto en que es necesario para indicar la calidad de los productos de construcción y el nivel de ejecución necesario para cumplir con las prescripciones de las reglas de proyecto.

Hasta que el conjunto necesario de especificaciones técnicas armonizadas para los productos y para los métodos de ensayo de los mismos esté disponible, algunos de los Eurocódigos Estructurales cubren estos aspectos en anexos informativos.

### **Antecedentes al programa de Eurocódigos**

La Comisión de las Comunidades Europeas (CCE) inició el trabajo de establecer un conjunto de reglas técnicas armonizadas para el proyecto de edificaciones y trabajos de ingeniería civil que sirviese, inicialmente, como una alternativa a las diferentes reglas vigentes en los distintos Estados Miembros y que, finalmente, las sustituyese. Estas reglas técnicas se hicieron conocidas como los "Eurocódigos Estructurales".

En 1990, después de consultar a sus respectivos Estados Miembros, la CCE transfirió el trabajo del futuro desarrollo, puesta al día y distribución de los Eurocódigos al CEN, al mismo tiempo que la Secretaría de la EFTA estuvo de acuerdo en apoyar el trabajo del CEN.

El Comité Técnico CEN/TC 250 de CEN es el responsable de todos los Eurocódigos Estructurales.

### **Programa de Eurocódigos**

El trabajo se está desarrollando en los siguientes Eurocódigos Estructurales, cada uno de los cuales está formado por un determinado número de partes:

EN 1991 Eurocódigo 1	Bases de proyecto y acciones en estructuras
EN 1992 Eurocódigo 2	Proyecto de estructuras de hormigón
EN 1993 Eurocódigo 3	Proyecto de estructuras de acero
EN 1994 Eurocódigo 4	Proyecto de estructuras mixtas de hormigón y acero
EN 1995 Eurocódigo 5	Proyecto de estructuras de madera
EN 1996 Eurocódigo 6	Proyecto de estructuras de fábrica
EN 1997 Eurocódigo 7	Proyecto geotécnico
EN 1998 Eurocódigo 8	Disposiciones para el proyecto de estructuras sismorresistentes
EN 1999 Eurocódigo 9	Proyecto de estructuras de aluminio

Se han formado subcomités independientes por CEN/TC 250 para el trabajo en los distintos Eurocódigos mencionados.

Esta parte de los Eurocódigos Estructurales para el Proyecto de Estructuras de Aleaciones de Aluminio, que ha sido finalizada y aprobada para publicación bajo la dirección de la CCE, se publica por CEN como una Norma Europea Experimental (ENV) con una vida inicial de tres años.

Esta norma europea experimental se pretende que se aplique de manera experimental en el proyecto de edificaciones y trabajos de ingeniería civil incluidos en el campo de aplicación que se da en el apartado 1.1 y que se remitan los comentarios oportunos.

Después de dos años, aproximadamente, se invitará a los miembros de CEN a remitir comentarios y opiniones más formales a fin de que se tengan en cuenta para determinar acciones futuras.

Mientras tanto, las observaciones y comentarios a esta norma experimental se deben enviar a la Secretaría del Subcomité CEN/TC 250/SC9 a la siguiente dirección:

Secretariat of CEN/TC 250/SC9  
c/o Norwegian Council for Building Standardization  
Postboks 129 Blindern  
N- 0314 OSLO

o al Organismo Nacional de Normalización correspondiente

NOTA NACIONAL – El Organismo Nacional de Normalización en España es:  
AENOR  
Génova, 6  
28004 MADRID  
Teléfono: 914 326 000  
Fax: 913 104 596

### **Documentos Nacionales de Aplicación (DNA)**

En vista de las responsabilidades de las autoridades de los Estados Miembros sobre la seguridad, la salud y otras materias cubiertas por los requisitos esenciales de la DPC (Directiva Europea de Productos de Construcción), a algunos elementos que afectan a la seguridad de esta norma experimental se les ha asignado valores indicativos que están identificados por un recuadro □. Las autoridades de cada Estado miembro serán las responsables de asignar los valores definitivos a estos elementos que afectan a la seguridad.

Algunas de las normas de apoyo armonizadas, incluidos los Eurocódigos que dan los valores de las acciones que hay que tener en cuenta así como las medidas necesarias para la protección contra el fuego, pueden no estar disponibles en el momento de la publicación de esta norma experimental. Por lo tanto está previsto que cada Estado Miembro o su Organismo de Normalización publique un Documento Nacional de Aplicación (DNA) que dé valores definitivos para los elementos que afectan a la seguridad y que referencie normas de apoyo compatibles y dé una guía nacional para la aplicación de esta norma experimental.

Se pretende que esta norma experimental se utilice conjuntamente con el DNA vigente en el país donde estén situados las edificaciones o los trabajos de ingeniería civil respectivos.

### **Aspectos específicos de esta norma experimental**

#### **Generalidades**

El campo de aplicación del Eurocódigo 9 así como el campo de aplicación de esta parte del Eurocódigo 9, se definen en el apartado 1.1.

Cuando se utilice esta norma experimental en la práctica, se debe prestar una consideración especial a las hipótesis y condiciones que se dan en el apartado 1.4.

Durante el desarrollo de esta norma experimental se han preparado documentos de trabajo que proporcionan comentarios y justificaciones de algunas de las especificaciones de la misma.

**Usos de los anexos**

Los seis capítulos de esta norma experimental se completan con cinco anexos, unos normativos y otros informativos.

Los anexos normativos tienen el mismo rango que los capítulos correspondientes. La mayor parte se han formado trasladando algunas de las reglas de aplicación más detalladas, las cuales se utilizan sólo en casos particulares, fuera de la parte principal del texto para darle mayor claridad.

**Concepto de normas de referencia**

Para la utilización de esta norma experimental se necesita hacer referencia a varias normas CEN o ISO. Éstas se utilizan para definir las características de los productos y procesos que se han supuesto al formular las reglas de cálculo.

Esta norma experimental menciona ciertas "normas de referencia". Cada norma de referencia se refiere total o parcialmente a un cierto número de normas CEN o ISO. Cuando alguna norma de referencia CEN o ISO no esté aún disponible, debe consultarse el documento nacional de aplicación para saber qué norma utilizar en su sustitución. Se supone que sólo se pueden utilizar los grados y calidades que se dan en el anexo normativo B de la parte 1.1 para edificios u obras de ingeniería civil proyectados con esta norma experimental.

**Coefficientes parciales de seguridad**

Esta norma experimental da reglas generales para el proyecto de estructuras de aluminio que se relacionan con los estados límites de los elementos y uniones que intervienen en la rotura estructural debida a la fatiga.

La mayor parte de las reglas se han calibrado a partir de resultados de ensayos para obtener valores realistas de los coeficientes parciales de seguridad para las resistencias  $\gamma_{Mf}$ .

Se da una guía sobre los coeficientes parciales  $\gamma_{Ff}$  apropiados de carga para cuando no se pueda obtener la carga a partir de los códigos de carga existentes.

**Fabricación y montaje**

El capítulo 6 de esta norma experimental está destinado a indicar el nivel mínimo de calidad de ejecución y las tolerancias normales que se han considerado al establecer las reglas de cálculo que se dan en esta norma experimental.

Proporciona también la información relativa a los elementos específicos críticos de una estructura sometida a fatiga que necesita proporcionar el proyectista para definir los requisitos de ejecución y mantenimiento.

**Proyecto asistido por ensayos**

La sección 2.4, generalmente, no es necesaria para los proyectos corrientes, pero está previsto utilizarla conjuntamente con el anexo C, en circunstancias especiales en las cuales pueda resultar apropiada.

## **1 GENERALIDADES**

### **1.1 Campo de aplicación de la parte 2 del Eurocódigo 9**

#### **1.1.1 Aplicación**

- (1) Esta parte 2 proporciona las bases de cálculo de estructuras de aleaciones de aluminio con respecto a los estados límites de la rotura provocada por fatiga. El cálculo de otros estados límites se contempla en la parte 1.
- (2) Esta parte 2 da reglas para el cálculo por los métodos siguientes:
  - Duración de la vida útil
  - Tolerancia a los daños
  - Cálculo por ensayos
- (3) Esta parte 2 contiene los requisitos de calidad de construcción necesarios para asegurarse de que se ponen en práctica las hipótesis de cálculo.

#### **1.1.2 Tipos de estructuras**

- (1) Esta parte 2 cubre:
  - Vigas y estructuras porticadas arriostradas y sin arriostrar
  - Estructuras en celosía
  - Estructuras de placas rigidizadas de construcción plana o en cáscara
  - Cuerpos macizos
- (2) Esta parte 2 no cubre los recipientes sometidos a presión ni las canalizaciones o conductos.

#### **1.1.3 Productos básicos**

- (1) Esta parte 2 cubre:
  - Perfiles laminados
  - Perfiles extruidos
  - Tubos estirados
  - Perfiles compuestos
  - Piezas forjadas
  - Piezas fundidas

#### **1.1.4 Tipos de elementos**

- (2) Esta parte 2 cubre los perfiles abiertos y huecos, incluidos las piezas o elementos contruidos a partir de combinaciones de estos productos.

#### **1.1.5 Materiales**

- (1) Esta parte 2 cubre las aleaciones forjadas listadas con una contraseña en la tabla 1.1.1 y las aleaciones fundidas enumeradas en la tabla 1.1.2.

**Tabla 1.1.1**  
**Aleaciones de aluminio forjadas para estructuras**

Designación de la aleación	Proceso y forma de producto								
	Laminado			Extruido			Estirado	HF con junta soldada	Forjado
	(EN 485)			(EN 755)			(EN 754)	(EN 1592)	(EN 586)
	Chapa <sup>1)</sup>	Banda	Plancha <sup>2)</sup>	Redondo Barra	Tubo	Perfil	Tubo	Tubo	Formas
EN AW-3103	✓	✓	✓					✓	
EN AW-5083	✓	✓	✓	✓	✓	✓ <sup>3)</sup>	✓		✓
EN AW-5052	✓	✓	✓						
EN AW-5454	✓	✓	✓						
EN AW-5754	✓	✓	✓						✓
EN AW-6060				✓	✓	✓	✓		
EN AW-6061	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓		
EN AW-6063				✓	✓	✓	✓		
EN AW-6005A						✓			
EN AW-6082	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓		✓
EN AW-7020	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓		
NOTA 1 – espesor < 6 mm									
NOTA 2 – espesor ≥ 6 mm									
NOTA 3 – sólo perfiles simples									

**Tabla 1.1.2**  
**Aleaciones de aluminio fundidas para estructuras**

Designación de la aleación (EN 1706)	Tipo de pieza fundida	
	En arena	En coquilla
EN AC-42100	✓	✓
EN AC-42200	✓	✓
EN AC-43200	✓	✓
EN AC-44100	✓	✓
EN AC-51300	✓ <sup>1)</sup>	✓ <sup>1)</sup>
NOTA 1 – Formas simples únicamente.		



### 1.1.6 Métodos de unión

- (1) Esta parte cubre los siguientes métodos de unión:
- Soldeo al arco (soldeo MIG y soldeo TIG)
  - Fijación con componentes roscados
  - Roblonado
  - Unión por adhesivo

### 1.1.7 Condiciones ambientales

- (1) P Esta parte cubre aplicaciones estructurales expuestas a condiciones atmosféricas normales y a temperaturas que no pasen de + 100 °C (para el cálculo de fatiga), incluyendo ambientes marinos, excepto para uniones fijadas por adhesivos para las que los límites de temperatura se aplican en el intervalo de -20 °C a 60 °C. Para la aleación de aluminio 5083, los datos se aplican a temperaturas máximas que no superen 65 °C. Los datos relativos a la resistencia a la fatiga no son aplicables a las partes de las estructuras expuestas a ambientes fuertemente corrosivos para los materiales respectivos.
- (2) Si se superan estos límites, puede ser necesario recurrir a los datos de ensayo y a la certificación de fabricación.

## 1.2 Normas para consulta

- (1) Esta norma europea experimental incorpora, con referencias fechadas y sin fechar, disposiciones de otras normas. Estas referencias normativas se citan en los lugares apropiados en el texto.

EN 287-2 – *Cualificación de soldadores. Soldeo por fusión. Parte 2: Aluminio y aleaciones de aluminio.*

EN 288-4 – *Especificación y cualificación de los procedimientos de soldeo para los materiales metálicos. Parte 4: Cualificación del procedimiento de soldeo por arco de aluminio y sus aleaciones.*

EN 485 – *Aluminio y aleaciones de aluminio. Chapas, bandas y planchas.*

EN 586 – *Aluminio y aleaciones de aluminio. Piezas forjadas.*

EN 719 – *Coordinación del soldeo. Tareas y responsabilidades.*

EN 729-2 – *Requisitos de la calidad para el soldeo. Soldeo por fusión de materiales metálicos. Parte 2: Requisitos de calidad completos.*

EN 754 – *Aluminio y aleaciones de aluminio. Barras, tubos y perfiles estirados.*

EN 755 – *Aluminio y aleaciones de aluminio. Redondos, barras, tubos y perfiles extruidos.*

EN 1011-4 – *Soldeo. Recomendaciones para el soldeo de materiales metálicos. Parte 4: Soldeo por arco del aluminio y sus aleaciones.*

EN 1706 – *Aluminio y aleaciones de aluminio. Piezas moldeadas. Composición química y características mecánicas.*

EN 30042 – *Uniones soldadas por arco de aluminio y sus aleaciones soldables. Guía sobre los niveles de calidad en función de las imperfecciones.*

ENV 1991-3 – *Eurocódigo 1: Bases de proyecto y acciones en estructuras. Parte 3: Acciones de tráfico en puentes.*

ENV 1991-5 – *Eurocódigo 1: Bases de proyecto y acciones en estructuras. Parte 5: Acciones inducidas por grúas y maquinaria.*

### 1.3 Distinción entre principios y reglas de aplicación

- (1) En este Eurocódigo se distingue entre principios y reglas de aplicación dependiendo del carácter de los diferentes apartados particulares.
- (2) Los principios comprenden:
  - declaraciones y definiciones generales para las cuales no existe alternativa, así como
  - requisitos y modelos analíticos para los cuales no se permite alternativa, salvo que es establezca específicamente.
- (3) Los principios se identifican por la letra P a continuación del número del apartado.
- (4) Las reglas de aplicación son reglas generalmente reconocidas que siguen los principios y que cumplen sus requisitos.
- (5) Se permitirá el uso de reglas de cálculo alternativas, diferentes de las reglas de aplicación dadas en el Eurocódigo, siempre que se demuestre que las reglas alternativas están de acuerdo con los principios correspondientes y que son al menos equivalentes en lo que respecta a resistencia, capacidad de servicio y durabilidad de la estructura.
- (6) En esta parte, las reglas de aplicación se identifican por un número entre paréntesis, como en este apartado.

### 1.4 Hipótesis

- (1) P Deben aplicarse las siguientes hipótesis:
  - las estructuras están proyectadas y calculadas por personas cualificadas y con la experiencia adecuada;
  - en las fábricas, talleres y obra, se dispone de una supervisión y un control de calidad adecuados;
  - la construcción es llevada a cabo por personal con la formación y la experiencia adecuadas;
  - los materiales y los productos de construcción se utilizan como se indica en este Eurocódigo o en las especificaciones del material o producto correspondiente;
  - la estructura tendrá un mantenimiento adecuado;
  - la estructura se utilizará de acuerdo con las hipótesis del proyecto respectivo.
- (2) P Los métodos de cálculo son válidos únicamente cuando se cumplan también los requisitos de calidad para la ejecución y la mano de obra que se dan en el anexo D, excepto cuando se adopten medidas específicas para permitir que se validen normas de calidad alternativas mediante mecanismos o ensayos de rotura.
- (3) Los valores numéricos identificados por un recuadro □ son indicativos. Los Estados Miembros pueden especificar otros valores.

### 1.5 Definiciones

#### 1.5.1 Términos comunes a todos los Eurocódigos

- (1) P Si no se especifica lo contrario, la terminología utilizada es la de la Norma Internacional ISO 8930.

## 1.5.2 Términos especiales utilizados en esta parte 2 del Eurocódigo 9

(1)P En esta parte 2 del Eurocódigo 9 se utilizan los términos siguientes con los significados que se indican a continuación:

**1.5.2.1 fatiga:** Daño o debilitamiento de una parte de la estructura, debido a la propagación gradual de la fisuración causada por fluctuaciones repetidas de tensiones.

**1.5.2.2 carga de fatiga:** Conjunto de sucesos de carga típicos definido por las posiciones o movimientos de cargas, su variación de intensidad, su frecuencia, y la secuencia de ocurrencia.

**1.5.2.3 suceso de carga:** Secuencia definida de aplicación de carga a la estructura que, por necesidades de cálculo, se supone que se repite con una frecuencia dada.

**1.5.2.4 tensión nominal:** Tensión ejercida en el material de base adyacente al emplazamiento potencial de una fisura, calculada de acuerdo con la teoría elástica simple de resistencia de materiales, es decir, suponiendo que las secciones planas permanecen planas y que se desprecian todos los efectos de concentración de tensiones.

**1.5.2.5 tensión nominal modificada:** Tensión nominal aumentada por un factor de concentración de tensión geométrica apropiado,  $K_{gt}$ , para tener en cuenta los cambios geométricos de sección transversal que no se tienen en cuenta en la clasificación de un detalle constructivo particular.

**1.5.2.6 tensión estructural (también conocida como "tensión geométrica"):** Tensión elástica en un punto dado, teniendo en cuenta todas las discontinuidades geométricas, pero ignorando todas las singularidades locales en las que el radio de transición tiende a cero, tales como las entallas debidas a discontinuidades pequeñas, por ejemplo bordes o talones de soldadura, fisuras, trazos o rasgos parecidos a fisuras, marcas normales de mecanizado, etc. La tensión estructural es, en principio, el mismo parámetro de tensión que la tensión nominal modificada pero, generalmente, se evalúa por un método diferente.

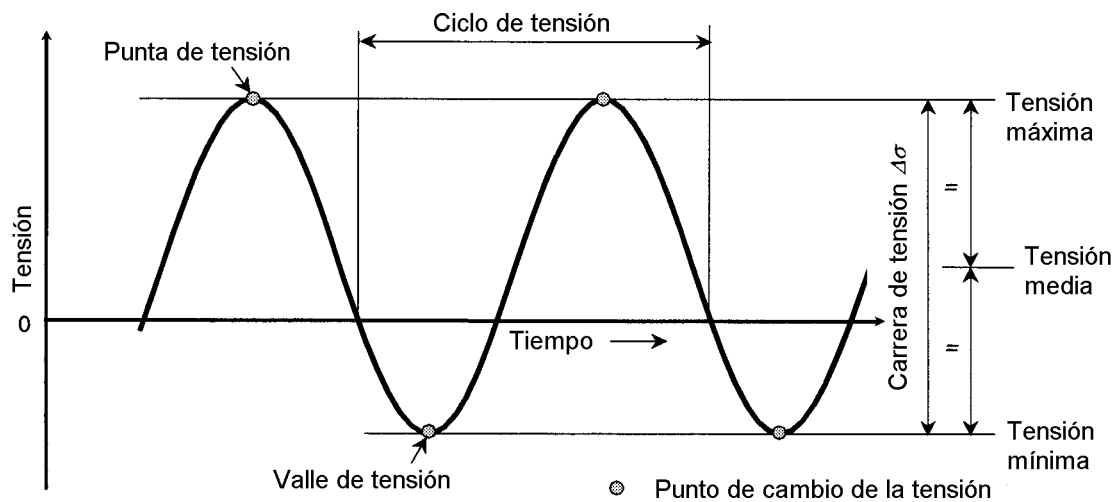
**1.5.2.7 factor de concentración de tensión geométrica  $K_{gt}$ :** Relación entre la tensión estructural, evaluada con la hipótesis del comportamiento elástico lineal del material, y la tensión nominal.

**1.5.2.8 tensión de punto caliente:** Tensión estructural en un punto de iniciación especificado en un tipo de geometría particular tal como un borde de soldadura en una unión en ángulo de perfiles huecos, para la cual se conoce, generalmente, la resistencia a la fatiga, expresada en términos de intervalo o carrera de tensiones de punto caliente.

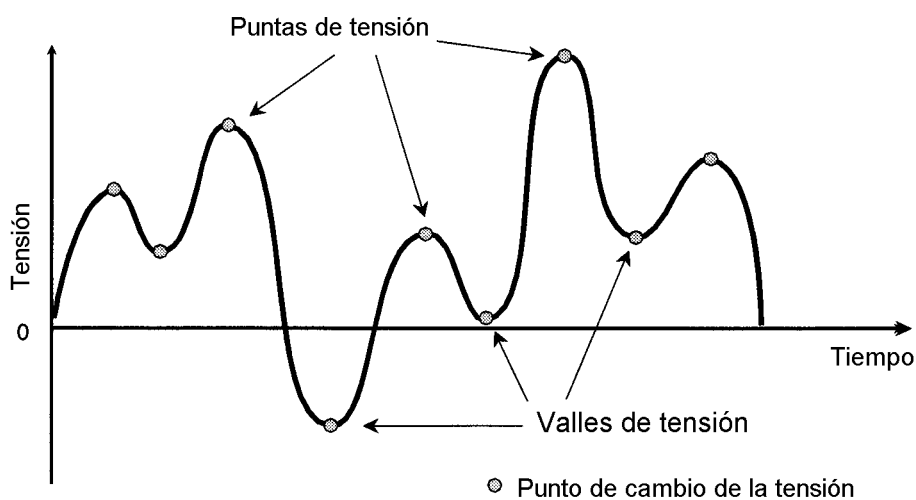
**1.5.2.9 factor local de concentración de tensión de un detalle clasificado  $K_{cd}$ :** Relación entre la tensión punta evaluada por un análisis particular del método de elementos finitos (FEM) en el punto caliente de un detalle clasificado y la tensión nominal.

**1.5.2.10 ciclograma (historia) de tensiones:** Registro cronológico continuo, medido o calculado, de la variación de la tensión en un punto particular de una estructura (normalmente, para la duración de un suceso de carga) (véase la figura 1.5.1).

**1.5.2.11 punto de inflexión de la tensión:** Valor de la tensión observado en un ciclograma de tensión en el que la tasa de variación de tensiones cambia de signo (véase la figura 1.5.1).



a) Amplitud constante



b) Amplitud variable

Fig. 1.5.1 – Terminología relativa a los ciclos y ciclogramas de tensiones

**1.5.2.12 punta de tensión:** Punto de inflexión en el que la tasa de variación de tensión cambia de positiva a negativa (véase la figura 1.5.1).

**1.5.2.13 valle de tensión:** Punto de inflexión en el que la tasa de variación de tensión cambia de negativa a positiva (véase la figura 1.5.1) (También conocida como "depresión de tensión").

**1.5.2.14 amplitud constante:** Referencia a un ciclograma de tensión en el que la tensión alterna entre puntas de tensión y valles de tensión de valores constantes (véase la figura 1.5.1).

**1.5.2.15 amplitud variable:** Referencia a un ciclograma de tensión que contiene más de un valor de tensión de punta o de tensión de valle (véase la figura 1.5.1).

**1.5.2.16 ciclo de tensión:** Parte de un ciclograma de tensión de amplitud constante en la que la tensión empieza y acaba con el mismo valor pero pasando por una punta de tensión y un valle de tensión (en cualquier secuencia). También, (es) una parte específica de un ciclograma de tensión de amplitud variable determinada por un método de cómputo de ciclos (véase la figura 1.5.1).

**1.5.2.17 cómputo de ciclos:** Procedimiento empleado para transformar un ciclograma de tensiones de amplitud variable en un espectro de ciclo de tensiones, cada uno con su carrera de tensiones particular, por ejemplo el método del "Depósito" y el método de "Recogida de lluvia" (véase la figura 4.4.1).

**1.5.2.18 carrera de tensión:** En un ciclo de tensión, diferencia algebraica entre la punta de tensión y el valle de tensión (o entre la tensión máxima y la mínima).

**1.5.2.19 espectro de carrera de tensiones:** Histograma o tabulación de la frecuencia de ocurrencia para todas las carreras de tensiones de magnitudes diferentes registradas o calculadas para un suceso de carga particular (también conocido como "espectro de tensión").

**1.5.2.20 espectro de cálculo:** Conjunto de todos los espectros de carreras de tensiones a considerar para la determinación o la comprobación de la fatiga.

**1.5.2.21 categoría del detalle:** Designación que se da a un punto o lugar particular de iniciación de la fatiga para una dirección dada de fluctuación de la tensión para indicar cuál de las curvas de resistencia a la fatiga es aplicable para la comprobación de la fatiga.

**1.5.2.22 número de ciclos de ruina (endurancia):** Resistencia a la fatiga, o vida hasta la ruina, expresada en ciclos, bajo la acción de un ciclograma o historia de tensiones de amplitud constante.

**1.5.2.23 curva de resistencia a la fatiga:** Relación cuantitativa entre la carrera (rango) de tensiones y el número de ciclos de ruina (endurancia), utilizada para la comprobación de la fatiga de una categoría de detalle constructivo, trazada sobre ejes logarítmicos en esta norma (véase la figura 1.5.2).

**1.5.2.24 resistencia de referencia a la fatiga:** Carrera o rango de tensiones de amplitud constante  $\Delta\sigma_c$  para una categoría particular de detalle para un número de ciclos de ruina  $N = 2 \times 10^6$  (véase la figura 1.5.2).

**1.5.2.25 límite de fatiga con amplitud constante:** Carrera (rango) de tensiones por debajo de la cual deben situarse todas las carreras de tensiones del espectro de cálculo para ignorar el daño por fatiga (véase la figura 1.5.2).

**1.5.2.26 límite de truncamiento:** Límite por debajo del cual las carreras de tensiones del espectro de cálculo pueden omitirse del cálculo de daños acumulativo (véase la figura 1.5.2).

**15.2.27 vida de cálculo:** Periodo de tiempo de referencia durante el cual se requiere que una estructura se comporte de forma segura con una probabilidad aceptable de que no se producirá la ruina estructural debida a la fisuración por fatiga.

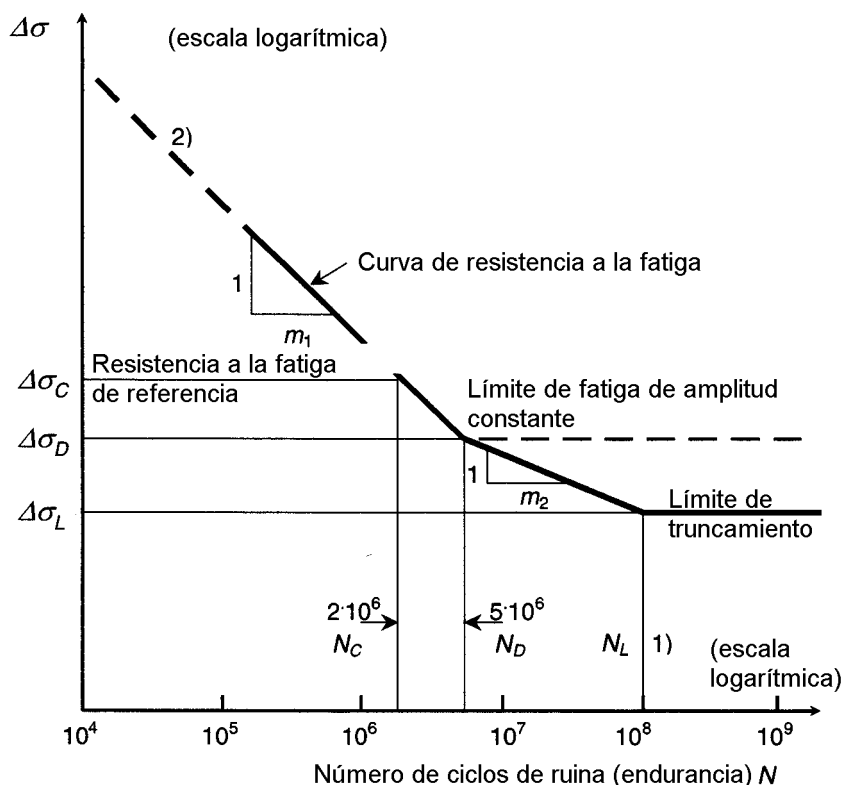
**1.5.28 vida útil (duración de vida):** Periodo de tiempo durante el cual se estima que una estructura se comporta con total seguridad, con una probabilidad aceptable de que no se producirá la ruina provocada por fisuración por fatiga, cuando se utiliza el método de cálculo de la duración de vida útil.

**1.5.29 daño por fatiga:** Relación entre el número de ciclos de una carrera de tensiones dada, que es necesario mantener durante un periodo especificado de servicio, y el número de ciclos de ruina (endurancia) del detalle bajo la misma carrera de tensiones.

**1.5.2.30 sumatorio de Miner:** Suma de los daños debidos a todos los ciclos en un espectro de carreras de tensiones (o en un espectro de cálculo), basada en la regla de Palmgren-Miner.

**1.5.2.31 tren de carga de fatiga equivalente:** Tren de carga simplificado, generalmente una carga única aplicada un número determinado de veces de tal manera que se puede utilizar en lugar de un conjunto de carga más realista o concreto, dentro de un intervalo o rango de condiciones dado, para producir una cantidad equivalente de daño por fatiga, hasta un nivel de aproximación aceptable.

**1.5.2.32 carrera de tensiones equivalente:** Carrera de tensiones en un detalle, originada por la aplicación de una carga de fatiga equivalente.



NOTA 1 – Para ciertas condiciones ambientales, véase el apartado 5.4.

NOTA 2 – Para  $N < 10^5$ , véase el apartado 5.3.5.

**Fig. 1.5.2 – Curva de resistencia a la fatiga**

## 1.6 Símbolos

D	Daño por fatiga calculado para un periodo de servicio dado.
$D_L$	Daño por fatiga calculado para toda la vida de cálculo.
$L_{adh}$	Longitud efectiva de las uniones por solape fijadas por adhesivos.
N	Número (o número total) de ciclos de carreras de tensiones.
$N_i$	Número de ciclos de ruina (endurancia) bajo la carrera de tensiones $\Delta\sigma_i$ .
$N_C$	Número de ciclos (2 millones) al que se define la resistencia a la fatiga de referencia.

$N_D$	Número de ciclos (5 millones) al que se define el límite de fatiga con amplitud constante.
$N_L$	Número de ciclos (100 millones) al que se define el límite de truncamiento.
$R$	Tensión mínima dividida por la tensión máxima en una historia de tensiones de amplitud constante o en un ciclo obtenido de un ciclograma de tensiones de amplitud variable. También se aplica en el contexto de la intensidad de tensiones.
$T_f$	Tiempo que necesita una fisura para crecer desde un tamaño detectable hasta un tamaño crítico de rotura.
$T_i$	Intervalo de inspección o control.
$T_L$	Vida de cálculo.
$T_S$	Vida segura (duración de vida útil).
$f_{v,adh}$	Resistencia característica a cortadura (esfuerzo cortante) de un adhesivo.
$k_{adh}$	Factor de resistencia a la fatiga de uniones encoladas o con adhesivos.
$k_N$	Número de desviaciones típicas por encima del número medio previsto de ciclos de carga.
$k_F$	Número de desviaciones típicas por encima de la intensidad media prevista de la carga.
$l_d$	Longitud de fisura mínima detectable.
$l_f$	Longitud de fisura crítica para la rotura.
$m$	Constante de la pendiente inversa de una curva de resistencia a la fatiga $\log \Delta\sigma - \log N$ .
$m_1$	Valor de $m$ para $N \leq 5 \times 10^6$ ciclos.
$m_2$	Valor de $m$ para $5 \times 10^6 < N \leq 10^8$ ciclos.
$n_i$	Número de ciclos de la carrera de tensiones $\Delta\sigma_i$ .
$\gamma_{Ff}$	Coefficiente parcial de seguridad para la intensidad de la carga de fatiga.
$\gamma_{Mf}$	Coefficiente parcial de seguridad para la resistencia a la fatiga.
$\sigma_{m\acute{a}x}, \sigma_{m\acute{i}n.}$	Valores máximo y mínimo de las tensiones fluctuantes en un ciclo de tensiones.
$\Delta\sigma$	Carrera de tensión nominal (tensión normal).
$\Delta\sigma_{adh}$	Tensión efectiva de cortadura en un adhesivo.
$\Delta\sigma_C$	Resistencia de referencia a la fatiga a 2 millones de ciclos (tensión normal).
$\Delta\sigma_D$	Límite de fatiga con amplitud constante.
$\Delta\sigma_L$	Límite de truncamiento.
$\Delta\sigma_R$	Resistencia a la fatiga (tensión normal).
$\log$	Logaritmo decimal (de base 10).

## **1.7 Documentos de cálculo**

### **1.7.1 Planos**

- (1) P Los planos deben contener todos los detalles de todas las uniones sensibles a la fatiga, incluyendo las dimensiones o medidas de los componentes y las tolerancias de fijación, las dimensiones o tamaños y los tipos de elementos de fijación, así como las dimensiones de las gargantas, lados y penetraciones de las soldaduras.
- (2) P La clase de fatiga requerida debe estar indicada para las uniones soldadas correspondientes, de acuerdo con el apartado 6.2.

### **1.7.2 Especificación de fabricación**

- (1) P La especificación de fabricación debe incluir todos los requisitos especiales para la preparación, el montaje, la unión, el tratamiento posterior y la inspección de los materiales, tal como se definen en las tablas 5.1.1 a 5.1.5 de categoría de detalles correspondientes, para asegurarse de que se alcanzan las resistencias a la fatiga requeridas. Véase también el anexo D.

### **1.7.3 Manual de operaciones**

- (1) P El manual de operaciones debe incluir:
  - Detalles de los trenes de cargas de fatiga y la vida de cálculo supuesta en el proyecto.
  - Todos los requisitos necesarios para controlar la intensidad y la frecuencia de las cargas durante el servicio.
  - Limitaciones sobre la modificación futura de la estructura, en particular la realización de los agujeros o del soldeo de las fijaciones.
  - Instrucciones para el desmontaje y el remontaje de las partes, por ejemplo, el apretado de los elementos de fijación.
  - Métodos de reparación aceptables en el caso de daños accidentales en servicio (por ejemplo mellas o abolladuras, penetraciones, desgarros, etc.).

### **1.7.4 Manual de mantenimiento**

- (1) P El manual de mantenimiento debe incluir un calendario de toda inspección necesaria en servicio de las partes críticas a la fatiga. Cuando se ha empleado un cálculo de tolerancia a los daños, éste debe incluir:
  - los métodos de inspección;
  - los emplazamientos para inspección;
  - la frecuencia de las inspecciones;
  - las dimensiones máximas admisibles para la fisura antes de que sea necesaria su corrección;
  - detalles de los métodos de reparación o de sustitución aceptables para las partes fisuradas por fatiga.



## **2 BASES DE CÁLCULO**

### **2.1 Generalidades**

#### **2.1.1 Objeto del cálculo**

- (1) P El objeto de calcular una estructura con respecto al estado límite de fatiga debe ser el asegurar, con un nivel de probabilidad aceptable, que su comportamiento es satisfactorio durante toda su vida de cálculo, de tal manera que la estructura no presente fallo o ruina por fatiga durante la vida de cálculo ni que sea susceptible de requerir una reparación prematura de daños causados por fatiga.

#### **2.1.2 Influencia de la fatiga sobre el cálculo**

- (1) P Las estructuras sometidas a una variación frecuente de las cargas en servicio pueden ser sensibles a la rotura por fatiga y deben comprobarse con relación a este estado límite.
- (2) P El grado de cumplimiento de los criterios de estado límite último o de servicio dados en la parte 1-1 del Eurocódigo 9 no se debe utilizar como medida del riesgo de la rotura por fatiga (véase el apartado 2.1.3).
- (3) P La influencia potencial de la fatiga sobre el cálculo debe establecerse lo más pronto posible. Deben tenerse en cuenta los factores siguientes:
- a) Debe hacerse una previsión precisa de la secuencia completa de cargas de servicio durante toda la vida de cálculo.
  - b) Debe determinarse con precisión la respuesta elástica de la estructura bajo la acción de dichas cargas.
  - c) El cálculo o diseño de los detalles, los métodos de fabricación y el grado de control de calidad pueden tener una influencia importante sobre la resistencia a la fatiga y puede ser necesario controlarlos de forma más precisa que para las estructuras calculadas para otros estado límites (véase el capítulo 5 y el anexo D). Esto puede tener una influencia significativa sobre los costes de proyecto y de construcción.

#### **2.1.3 Mecanismo de rotura**

- (1) P Debe suponerse que la rotura por fatiga se inicia normalmente en un punto sometido a una tensión alta (debido a un cambio brusco de geometría, a una tensión residual de tracción o a discontinuidades afiladas semejantes a fisuras). Las fisuras por fatiga se propagarán crecientemente bajo la acción del cambio cíclico de tensión. Normalmente, permanecen estables bajo una carga constante. La rotura última se produce cuando la sección transversal restante es insuficiente para soportar la carga más alta aplicada.
- (2) P Debe suponerse que las fisuras por fatiga se propagan aproximadamente en ángulos rectos con relación a la dirección de la carrera de tensión principal máxima. La tasa o velocidad de propagación aumenta exponencialmente. Por este motivo, el crecimiento de la fisura es frecuentemente lento en las primeras fases, y las fisuras por fatiga tienden a ser invisibles durante la mayor parte de su vida. Esto puede entrañar problemas de detección en servicio (véase el anexo B).

#### **2.1.4 Emplazamientos potenciales de la fisuración por fatiga**

- (1) P Deben considerarse los siguientes lugares de iniciación de las fisuras por fatiga asociados a detalles especificados:
- a) bordes y raíces de las soldaduras por fusión;
  - b) esquinas o ángulos mecanizados;
  - c) agujeros punzonados o perforados;

- d) bordes cizallados o serrados;
  - e) superficies sometidas a una presión de contacto alta (erosión);
  - f) fondos de rosca en elementos de fijación roscados.
- (2) P Las fisuras por fatiga pueden iniciarse también en rasgos o características sin especificar, que no obstante pueden ocurrir en la práctica. Cuando proceda, deben considerarse los siguientes:
- a) discontinuidades de material o defectos de soldadura;
  - b) entallas o estrías debidas a daños mecánicos;
  - c) picaduras de corrosión.

### 2.1.5 Condiciones de sensibilidad a la fatiga

- (1) Al determinar la probabilidad de sensibilidad a la fatiga, debería tenerse en cuenta lo siguiente:
- a) Relación alta entre cargas dinámicas y estáticas: las estructuras móviles o de elevación, tales como los vehículos de transporte terrestre o marítimo, grúas, etc., están más probablemente predispuestas a los problemas de fatiga que las estructuras fijas, salvo que estas últimas soporten predominantemente cargas móviles, como en el caso de los puentes.
  - b) Aplicaciones frecuentes de carga: Esto se traduce en un alto número de ciclos en la vida de cálculo. Las estructuras o elementos esbeltos con frecuencia propias (naturales) bajas son particularmente propicias a la resonancia y por tanto a la ampliación de las tensiones dinámicas, incluso cuando las tensiones de cálculo estáticas son bajas. Las estructuras sometidas fundamentalmente a cargas hidráulicas, tales como el viento, y las estructuras que soportan maquinaria deberían comprobarse cuidadosamente en lo relativo a los efectos de la resonancia.
  - c) Utilización de soldadura: Algunos detalles de soldadura comúnmente utilizados tienen una baja resistencia a la fatiga. Esto no se aplica solamente a las uniones entre elementos, sino también a cualquier pieza de fijación a un elemento sometido a una carga, tanto si la unión resultante se considera "estructural" como si no.
  - d) Complejidad del detalle de unión: Las uniones (nudos) complejos se traducen frecuentemente en altas concentraciones de tensiones debidas a las variaciones locales en la rigidez del camino de la carga. Aunque éstas pueden, frecuentemente, tener un efecto pequeño sobre la capacidad estática última de la unión, pueden tener un efecto grave sobre la resistencia a la fatiga. Si la fatiga es dominante, la forma de la sección transversal del elemento debería seleccionarse para garantizar la suavidad y la simplicidad del diseño de la unión, de forma que puedan calcularse las tensiones y puedan garantizarse normas adecuadas de fabricación y de inspección.
  - e) Medio ambiente: En algunos ambientes térmicos y químicos, la resistencia a la fatiga puede verse reducida si no está protegida la superficie del metal.

### 2.1.6 Métodos de cálculo de la fatiga

- (1) P **Cálculo de la vida útil:** Este método se basa en el cálculo de daños durante la vida de cálculo (teórica) de la estructura, utilizando datos del número de ciclos de ruina de límite inferior normalizados y un límite superior estimado de la carga de fatiga. Esto proporcionará una estimación conservadora de la vida a fatiga y la inspección en servicio no debe, normalmente, considerarse esencial para la seguridad. El método se describe en el apartado 2.2.

- (2) P **Cálculo de la tolerancia a los daños:** Este método se basa en limitar el crecimiento o desarrollo de la fisuración por fatiga mediante un programa de inspección obligatorio. Una vez que la fisura por fatiga ha alcanzado un tamaño prefijado, la pieza en cuestión debe ser reparada o sustituida. El método se describe en el apartado 2.3.

NOTA – El método puede ser adecuado para aplicarlo en ciertas situaciones en las que una estimación de la vida útil muestra que la fatiga tiene un efecto significativo sobre la economía del cálculo, y un riesgo más alto de fisuración por fatiga durante la vida de cálculo puede justificar que se prefiera este método frente al permitido cuando dicho riesgo es menor y se utilizan principios de cálculo de la vida útil. Aunque el método está previsto para obtener un riesgo de rotura estructural última comparable al que se ha supuesto para el cálculo de la vida útil, puede producir un riesgo más alto de pérdida temporal de aptitud al servicio.

- (3) P **Cálculo por ensayos:** Este método debe aplicarse cuando los datos necesarios de carga, de respuesta, de resistencia a la fatiga o los datos de crecimiento de la fisura no están disponibles en las normas o en otras fuentes para una aplicación particular. Los datos de ensayo sólo se pueden utilizar en lugar de los datos normalizados con la condición de que se obtengan y se apliquen en condiciones controladas. Se da una guía en el apartado 2.4 y en el anexo C.

## 2.2 Cálculo de vida útil o segura

### 2.2.1 Requisitos previos al cálculo de la vida útil

- (1) P La historia de servicio prevista de la estructura debe estar disponible en términos de secuencia y de frecuencia de carga. Alternativamente, la respuesta de tensión en todos los emplazamientos potenciales de iniciación (de la fisuración) deben estar disponibles en términos de historia o ciclograma de tensiones.
- (2) P Las características de resistencia a la fatiga en todos los emplazamientos potenciales de iniciación deben estar disponibles en términos de curvas de resistencia a la fatiga.
- (3) P Las normas de calidad utilizadas en la fabricación de los componentes que contengan enclaves potenciales de iniciación deben estar definidas.

### 2.2.2 Procedimiento para calcular la vida útil

- (1) P En primer lugar, deben comprobarse los enclaves potenciales de iniciación de la fisuración por fatiga en regiones de la estructura que contienen las fluctuaciones más altas de tensiones y/o las concentraciones más importantes de tensiones.
- (2) P El procedimiento básico debe ser el siguiente (véase la figura 2.2.1):
- a) Se debe obtener una estimación del límite superior de la secuencia de cargas de servicio para la vida de cálculo de la estructura (véase el capítulo 3).
  - b) Debe estimarse la historia o ciclograma de tensiones resultante en los emplazamientos de iniciación potenciales que se van a comprobar (véanse los apartados 4.1 y 4.2 ó 4.3).
  - c) Cuando se utilicen las tensiones nominales, modificar el ciclograma de tensiones en toda zona de concentración de tensiones geométricas que no esté ya incluida en la categoría del detalle, aplicando un factor de concentración de tensiones apropiado (véase el apartado 4.2).
  - d) El ciclograma de tensiones debe reducirse a un número de ciclos equivalente ( $n_i$ ) de carreras de tensión  $\Delta\sigma_i$  diferentes utilizando una técnica de cómputo de ciclos (véase el apartado 4.4).
  - e) Los ciclos deben clasificarse en orden descendente de amplitud  $\Delta\sigma_i$  para formar un espectro de carreras de tensión, donde  $i = 1, 2, 3$ , etc., para la primera, segunda, tercera banda del espectro (véase el apartado 4.5).
  - f) Categorizar el detalle de acuerdo con las tablas 5.1.1 a 5.1.5. Para la categoría del detalle y la carrera de tensión de cálculo ( $\Delta\sigma_i$ ) apropiadas, determinar el número de ciclos de ruina o endurancia admisible ( $N_i$ , etc.), a partir del apartado 5.2.1.

g) Calcular el daño total  $D_L$  para todos los ciclos utilizando el sumatorio de Miner, donde:

$$D_L = \sum n_i / N_i \quad (2.1)$$

h) Calcular la vida útil  $T_S$ , donde

$$T_S = T_L / D_L \quad (2.2)$$

y donde la vida de cálculo de  $T_L$  tiene las mismas unidades que  $T_S$ .

i) Si  $T_S$  es menor que  $T_L$ , deben emprenderse una o más de las acciones siguientes:

- recalcular la estructura o el elemento para reducir los niveles de tensión;
- cambiar el detalle por otro de categoría superior (véase el apartado 5.1);
- utilizar una aproximación al cálculo de la tolerancia a los daños, cuando proceda (véase el apartado 2.3).

## **2.3 Cálculo de la tolerancia a daños**

### **2.3.1 Requisitos previos al cálculo de la tolerancia a daños**

- (1) P El cálculo de la tolerancia a daños debe utilizarse únicamente cuando se aplican las condiciones de los apartados (2) a (6) siguientes.
- (2) P El cálculo de la tolerancia a daños debe aplicarse en todos los emplazamientos de iniciación cuando el daño  $D_L$  para la vida de cálculo completa, obtenida de acuerdo con el apartado 2.2, sea superior a 1.

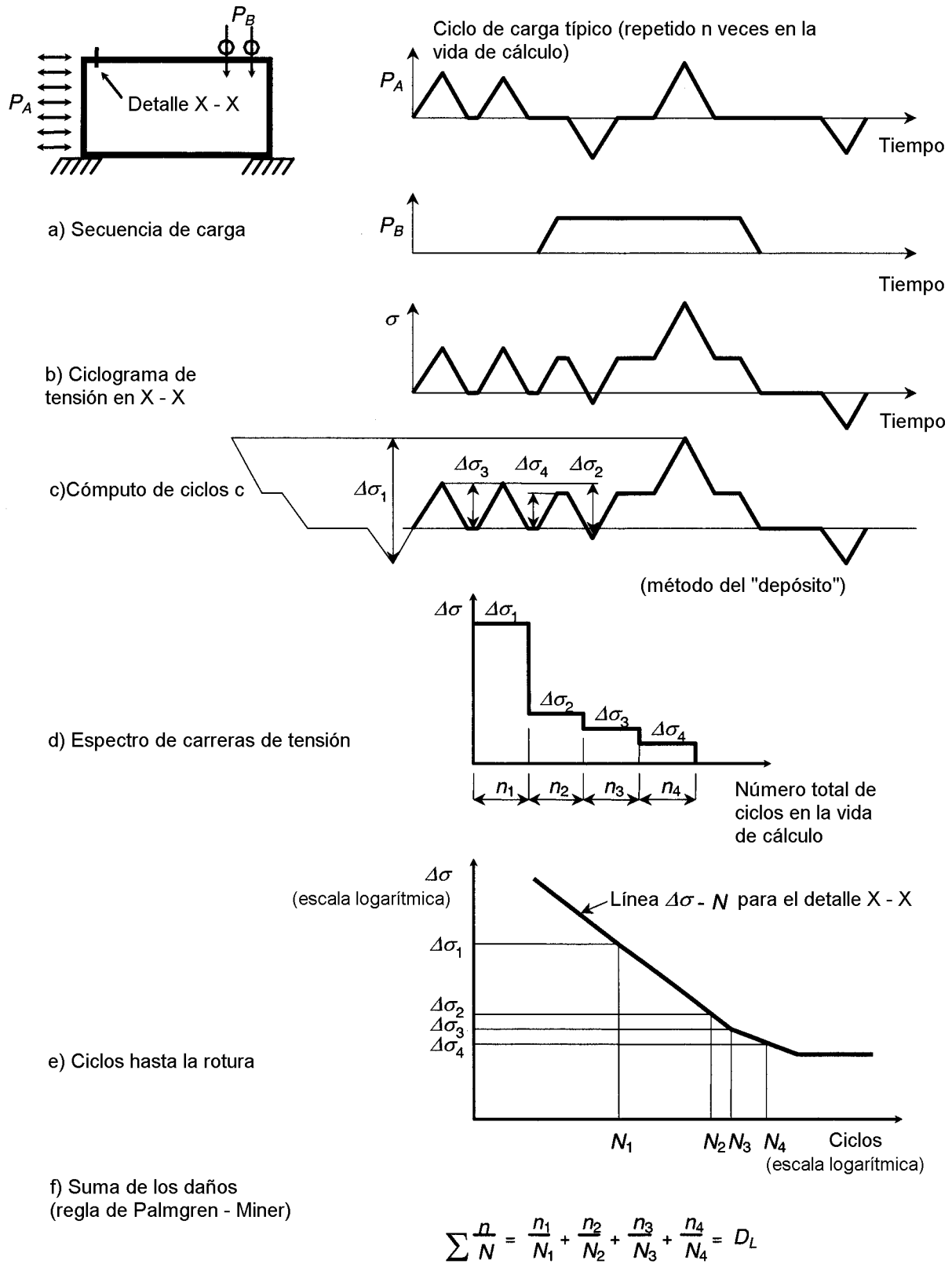


Fig. 2.2.1 – Procedimiento para la determinación de la fatiga

- (3) P Los emplazamientos de inicio de la fisuración por fatiga determinados en (2) deben estar en o próximos a una superficie que debe estar inmediatamente accesible en servicio. La única excepción debe darse cuando se han dispuesto caminos de carga seguros alternativos y se han diseñado los detalles para asegurarse que las fisuras se detendrán sin propagación más allá del primer camino de carga.
- (4) P El procedimiento que se indica en el apartado 2.3.2 debe aplicarse para determinar la frecuencia de inspección y el tamaño de fisura máximo admisible antes de que sea necesario proceder a su corrección.
- (5) Deben estar disponibles métodos prácticos de inspección que sean capaces de detectar las fisuras y de medir su extensión bien antes de que hayan alcanzado su tamaño crítico de rotura.
- (6) El manual de mantenimiento debe especificar la información listada en el apartado 1.8.4 (1) para cada emplazamiento de fisura determinado en el apartado (2).

### 2.3.2 Determinación de la estrategia de inspección para el cálculo de tolerancia a daños

- (1) P En cada emplazamiento potencial de iniciación en el que la vida útil  $T_s$  sea inferior a la vida de cálculo  $T_L$ , ésta debe calcularse de acuerdo con el apartado 2.2.
- (2) P El manual de mantenimiento debe especificar que la primera inspección de cada emplazamiento de iniciación potencial debe tener lugar antes de que haya finalizado la vida útil.
- (3) P El manual de mantenimiento debe especificar que las inspecciones siguientes deben realizarse a intervalos regulares  $T_i$  donde

$$T_i \leq 0,5 T_f$$

donde  $T_f$  es el tiempo calculado para que una fisura, que se ha iniciado en el emplazamiento determinado, crezca desde una longitud de superficie detectable  $l_d$  hasta una longitud crítica de rotura  $l_f$  (véase la figura 2.3.1).

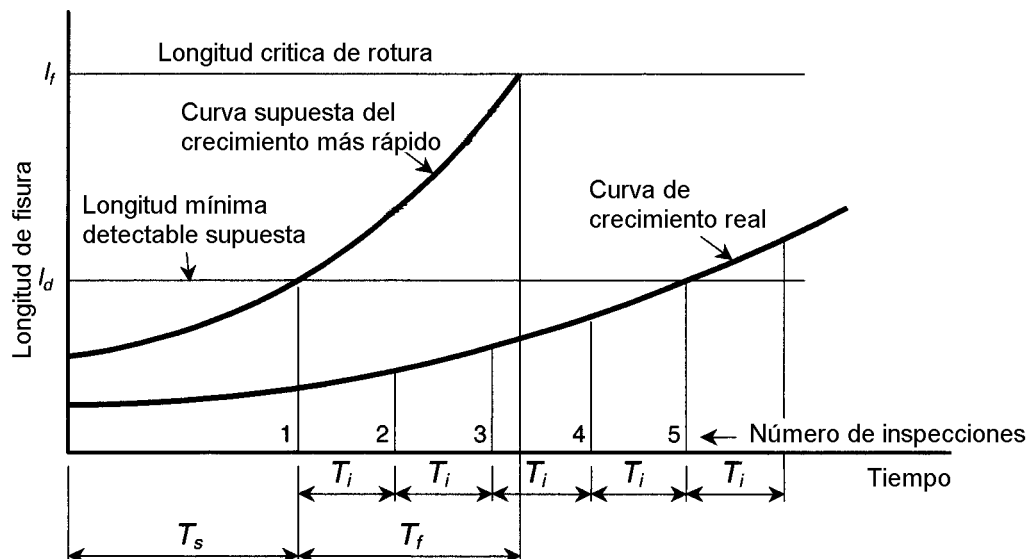


Fig. 2.3.1 – Estrategia de inspección para el cálculo de tolerancia a daños

- (4) P La longitud mínima supuesta de fisura superficial expuesta debe tener en cuenta la accesibilidad del emplazamiento, el estado o condición probable de la superficie y el método de inspección. Salvo que se realicen ensayos específicos para demostrar que se pueden detectar longitudes más cortas con una probabilidad superior al 90%, el valor supuesto para  $l_d$  no debe ser inferior al valor de la tabla 2.3.1 donde la longitud total de fisura es accesible para la inspección.

**Tabla 2.3.1**  
**Valores de seguridad mínimos de la longitud de fisura superficial detectable en mm**

Método de inspección	Emplazamiento de la fisura		
	Superficie lisa plana	Superficie rugosa, exterior del cordón	Ángulo vivo, talón o borde de soldadura
Visual, con ayuda de ampliación	20	30	50
Ensayos por líquidos penetrantes	5	10	15
NOTA – Los valores anteriores suponen un acceso próximo, buena iluminación y la eliminación de los recubrimientos superficiales.			

- (5) P Cuando cualquier otra parte estructural o no estructural permanente impida un acceso total a la fisura, la longitud imprecisa de fisura debe añadirse al valor apropiado en la tabla 2.3.1 para obtener el valor de  $l_d$  para los fines de cálculo.
- (6) Cuando se utilizan espesores de construcción considerables y cuando el emplazamiento de iniciación está sobre una superficie inaccesible (por ejemplo la raíz de una soldadura a tope por un solo lado en un elemento tubular), puede ser apropiado planear una estrategia de inspección basada en la utilización de ensayos por ultrasonidos para detectar y medir las fisuras antes de que alcancen la superficie accesible. Pero no debería recurrirse a dicha estrategia sin realizar previamente ensayos y evaluación.
- (7) P El valor de  $l_f$  debe ser tal que la sección neta, teniendo en cuenta la forma probable del perfil de la fisura a través del espesor, debe ser capaz de soportar los esfuerzos de tracción estáticos máximos bajo la carga ponderada, calculados de acuerdo con la parte 1.1 de esta norma experimental, sin una propagación inestable de la fisura.
- (8) P El valor  $T_f$  debe determinarse mediante cálculo y/o ensayos, suponiendo la carga ponderada (véase el apartado 3.4), como sigue:
- El método de cálculo debe estar basado en los principios de la mecánica de la fractura (véase el anexo B). Debe utilizarse una relación de crecimiento o propagación de la fisura con un límite superior. Alternativamente, pueden obtenerse datos específicos sobre la propagación de fisuras a partir de probetas de ensayo normalizadas utilizando el mismo material que en el camino de propagación de las fisuras. En este caso, la tasa o velocidad de propagación de las fisuras debe ponderarse de acuerdo con el factor de ensayo de fatiga  $F$  (véase la tabla C.1).
  - Cuando la propagación de las fisuras se obtiene a partir de ensayos estructurales o de componentes (parciales) que simulan los materiales correctos así como la geometría y el método de fabricación apropiados, el patrón o modelo de esfuerzo aplicado correspondiente debe aplicarse a la probeta (véase el anexo C). Las velocidades de propagación de las fisuras registradas entre las longitudes de fisura  $l_d$  y  $l_f$  deben ponderarse por el factor de ensayo de fatiga  $F$  (véase la tabla C.1).
- (9) P El manual de mantenimiento debe especificar las acciones a emprender en el caso de que se descubra una fisura por fatiga durante una inspección de mantenimiento regular, como sigue:
- Si la longitud de fisura medida es inferior a  $l_d$ , no es necesaria acción reparadora alguna.
  - Si la longitud de fisura medida es igual o superior a  $l_d$ , el componente debe evaluarse sobre una base de aptitud para el empleo con vistas a determinar la duración de la autorización de explotación de la estructura con total seguridad sin necesidad de una reparación o de una sustitución (véase el anexo B). En el caso de una explotación prolongada, debe aumentarse la frecuencia de inspección en el emplazamiento en cuestión.
  - Si la longitud de fisura medida es superior a  $l_f$ , la estructura debe ser puesta inmediatamente fuera de servicio.

## 2.4 Proyecto asistido por ensayos

- (1) P La verificación de la resistencia a la fatiga de un proyecto (de estructura) mediante los ensayos apropiados, debe aceptarse como un método alternativo a los dados en los apartados 2.2 y 2.3.
- (2) P Cuando los datos para una verificación completa de un proyecto por cálculo solamente, de acuerdo con los apartados 2.1 ó 2.2, sean insuficientes, debe proporcionarse una evidencia adicional mediante un programa específico de ensayos. En este caso, los datos de ensayos pueden requerirse por una o varias de las razones siguientes:
- a) El ciclograma (historia) o el espectro de carga aplicada, para cargas simples o múltiples indistintamente, no está disponible y está más allá de los métodos prácticos de cálculo teórico (véanse los apartados 3.1 y 3.2). Esto puede aplicarse particularmente a las estructuras móviles sometidas a cargas hidráulicas o aerodinámicas en las que pueden producirse efectos dinámicos o de resonancia. En el anexo C.1 se dan directrices sobre los métodos de ensayo.
  - b) La geometría de la estructura es lo suficientemente compleja como para que las estimaciones de los esfuerzos ejercidos por los elementos o campos de tensiones locales estén más allá de los métodos prácticos de cálculo (véase el capítulo 4). En el anexo C.2 se dan directrices sobre los métodos de ensayo.
  - c) Los materiales, los detalles dimensionales, o los métodos de fabricación de los elementos o de las uniones son diferentes de los que se dan en las tablas 5.1.1 a 5.1.5. En el anexo C.3 se dan directrices sobre los métodos de ensayo.
  - d) Los datos sobre la propagación o crecimiento de las fisuras son necesarios para la verificación del cálculo de la tolerancia a los daños.
- (3) P Los ensayos pueden realizarse sobre estructuras completas de prototipo o de producción o sobre partes componentes de estas estructuras. El grado de adaptación de los materiales, detalles dimensionales y métodos de fabricación de la estructura o del componente de ensayo a la estructura de producción final debe tener en cuenta el tipo de información obtenida del ensayo.
- (4) P Los datos de ensayo sólo deben utilizarse, en lugar de los datos de referencia, si se han obtenido y aplicado utilizando procedimientos controlados (véase el anexo C.3).

## 3 CARGAS

### 3.1 Causas de las cargas de fatiga

- (1) P Deben identificarse todas las causas o motivos de tensiones fluctuantes en la estructura. Particular atención deben recibir los motivos siguientes:
- a) cargas móviles superpuestas, incluyendo las vibraciones procedentes de estructuras fijas;
  - b) cargas medioambientales, tales como viento, olas, etc.;
  - c) fuerzas de aceleración ejercidas sobre las estructuras móviles;
  - d) cambios de temperatura.
- (2) P Las cargas de fatiga deben obtenerse aplicando la Norma Europea Experimental ENV 1991 Eurocódigo 1 u otra norma de cargas reconocida cuando esté disponible.



### 3.2 Cálculo de las cargas de fatiga

- (1) P Las cargas de fatiga deben describirse, normalmente, en términos de espectro de carga de cálculo, que define un intervalo de intensidades de un suceso de carga móvil específico y el número de veces que se aplica cada nivel de intensidad durante la vida de cálculo de la estructura. Cuando existe la probabilidad de que ocurran dos o más sucesos de carga móvil independientes, entonces será necesario especificar el intervalo o ajuste de fase entre ellos.
- (2) P Una evaluación realista de la carga de fatiga es esencial para calcular la vida de la estructura. Cuando no existan datos publicados sobre las cargas móviles, debe recurrirse a los datos obtenidos a partir de estructuras existentes sometidas a efectos similares.
- (3) P El registro de medidas continuas de deformaciones o flechas durante un período de muestreo apropiado puede proporcionar datos de carga para el posterior análisis de la respuesta. Debe ponerse un cuidado especial para evaluar los efectos de ampliación dinámicos cuando las frecuencias de carga están próximas a una de las frecuencias naturales o propias de la estructura. Una guía adicional se da en el anexo C.1.
- (4) P El espectro de carga de cálculo debe seleccionarse sobre la base de que se trata de una estimación de límite superior de las condiciones de servicio acumuladas sobre toda la vida de cálculo de la estructura. Deben tenerse en cuenta todos los efectos potenciales o probables sobre la explotación y el medio ambiente procedentes de la utilización previsible de la estructura durante dicho periodo.
- (5) P El grado de confianza a utilizar para la intensidad del espectro de carga de cálculo debe basarse en el valor medio previsto más  $k_F$  desviaciones típicas, donde  $k_F = 2$ . El grado de confianza aplicable para el número de ciclos en el espectro de la carga de cálculo debe estar basado en el valor medio previsto más  $k_N$  desviaciones típicas, donde  $k_N = 2$ . Véase también el apartado 3.4 (2). El grado de confianza aplicable para el número de ciclos en el espectro de la carga de cálculo debe estar basado en el valor medio previsto más  $k_N$  desviaciones típicas, donde  $k_N = 2$ . Véase también el apartado 3.4 (2).

### 3.3 Carga de fatiga equivalente

- (1) P Una carga de fatiga equivalente simplificada debe utilizarse únicamente en lugar de una carga de fatiga más realista si se cumplen las condiciones siguientes:
  - a) La estructura de aleación de aluminio debe caer dentro del intervalo de formas y dimensiones estructurales básicas para el que se calculó originalmente la carga de fatiga equivalente.
  - b) La carga real debe ser de intensidad y de frecuencia similares y debe aplicarse de una manera análoga que la carga supuesta en el cálculo u obtención de la carga de fatiga equivalente.
  - c) Los valores de  $m_1$ ,  $m_2$ ,  $N_D$  y  $N_L$  supuestos en el cálculo de la carga de fatiga equivalente deben ser los mismos que los apropiados para el detalle que se está evaluando.

NOTA – Algunas cargas de fatiga equivalentes pueden obtenerse suponiendo una pendiente continua simple cuando  $m_2 = m_1$ , y  $\Delta\sigma_L = 0$ . Para la mayoría de aplicaciones que implican numerosos ciclos de baja amplitud esto se traducirá en una estimación de vida muy conservadora.

- d) La respuesta dinámica de la estructura debe ser suficientemente baja para que los efectos de resonancia, que se verán afectados por las diferencias de masa, de rigidez y de coeficiente de amortiguación, tengan un efecto pequeño sobre la suma global de los daños.
- (2) P En el caso de que una carga de fatiga equivalente se calcule específicamente para una aplicación estructural de aleación de aluminio, deben tenerse en cuenta todos los aspectos contemplados en el apartado 3.3 (1).

### 3.4 Coeficientes parciales de seguridad para la carga de fatiga

- (1) Cuando la carga de fatiga se ha calculado de acuerdo con los requisitos especificados en el apartado 3.2, para proporcionar un nivel aceptable de seguridad puede suponerse un coeficiente parcial de seguridad sobre la intensidad de carga  $\gamma_{Ff} = 1,0$ .
- (2) Cuando la carga de fatiga se ha basado en grados de confianza distintos de los especificados en el apartado 3.2 (4), puede suponerse que se garantiza un nivel aceptable de seguridad aplicando los coeficientes parciales de seguridad sobre las cargas de la tabla 3.4.1.

**Tabla 3.4.1**  
Coeficientes parciales de seguridad para la intensidad de la carga de fatiga  $\gamma_{Ff}$

$k_F$	$\gamma_{Ff}$	
	$k_N = 0$	$k_N = 2$
0	1,5	1,4
1	1,3	1,2
2	1,1	1,0

## 4 ANÁLISIS DE TENSIONES

### 4.1 Análisis global de tensiones

#### 4.1.1 Generalidades

- (1) P El método de análisis debe seleccionarse de manera que proporcione una predicción exacta de la respuesta de tensión elástica de la estructura a la carga de fatiga especificada.

NOTA – Puede suceder que un modelo elástico utilizado para la evaluación estática (estado límite último o de servicio), de acuerdo con la parte 1.1 de esta norma experimental, no sea necesariamente apropiado para la determinación de la fatiga.

- (2) P Los efectos dinámicos deben incluirse en el cálculo de la historia o ciclograma de tensión, excepto cuando se aplique una carga equivalente que permita ya obtener tales efectos.
- (3) P Cuando la respuesta elástica esté afectada significativamente por el grado de amortiguación, éste debe determinarse mediante ensayo (véase el anexo C).
- (4) P No debe suponerse una redistribución plástica de esfuerzos entre los elementos de estructuras hiperestáticas.
- (5) P El efecto rigidizador de todos los restantes materiales que están fijados de manera permanente a la estructura de aleación de aluminio debe tenerse en cuenta en el análisis elástico.
- (6) P Para el análisis global de estructuras hiperestáticas y de los pórticos en celosía con uniones rígidas o semi-rígidas debe utilizarse modelos de análisis de elementos finitos elásticos, excepto cuando los datos de deformaciones se hayan obtenido de estructuras prototipo o de modelos físicos exactamente a escala.

NOTA – El término "análisis elástico por elementos finitos" se utiliza para designar todas las técnicas analíticas en las que los elementos y las uniones estructurales están representados por disposiciones de barras, vigas, membranas, cáscaras, piezas sólidas u otras formas de elementos. El propósito de este análisis es determinar el estado de tensión que permite mantener la compatibilidad de desplazamiento y equilibrio estático (o dinámico).

#### **4.1.2 Utilización de los elementos viga**

- (1) P Los elementos viga deben ser aplicables al análisis global de las estructuras de vigas, porticadas o en celosía sometidas a las limitaciones que se indican en los apartados (2) a (8) siguientes.
- (2) P Los elementos viga no deben utilizarse para el análisis de fatiga de estructuras de chapas rigidizadas de construcción plana o en cáscara ni para los elementos fundidos o forjados excepto cuando estos tengan una forma prismática simple.
- (3) P Las propiedades de rigidez axial, de flexión, de esfuerzo cortante y de torsión de la sección de los elementos viga deben calcularse de acuerdo con la teoría elástica lineal suponiendo que las secciones planas permanecen planas. No obstante, debe considerarse el alabeo de la sección transversal debido a la torsión.
- (4) Los dispositivos de unión soldados, roblonados o fijados por adhesivos de longitud mayor que la mitad de la profundidad o canto del elemento deberían considerarse cuando se calculan las propiedades de rigidez de la sección (por ejemplo cubrejuntas y rigidizadores longitudinales).
- (5) P Cuando se utilicen elementos viga en estructuras con perfiles abiertos o elementos de sección hueca propicios al alabeo, que estén sometidos a esfuerzos de torsión, los elementos deben tener 7 grados de libertad incluyendo el alabeo. Alternativamente, debe utilizarse elementos cáscara para modelar la sección transversal.
- (6) P Las propiedades de sección para los elementos viga adyacentes a las intersecciones de elementos deben tener en cuenta la rigidez aumentada debido al tamaño de la zona de la unión y a la presencia de componentes adicionales (por ejemplo cartelas, cubrejuntas, etc.).
- (7) P Las propiedades de rigidez de los elementos viga utilizados para modelar zonas de unión en intersecciones en ángulo entre piezas abiertas o huecas en las que sus secciones transversales no se llevan a cabo totalmente a través de la unión (por ejemplo nudos tubulares sin rigidizar), o en las que el detalle es semi-rígido (por ejemplo uniones con abrazadera angular o placa de extremo atornillada), deben evaluarse utilizando, indistintamente, elementos cáscara o conectando los elementos por medio de resortes. Los resortes deben poseer una rigidez suficiente para cada grado de libertad y su rigidez debe determinarse mediante ensayos o por modelos de elementos cáscara de la unión.
- (8) P Cuando se utilicen elementos de viga para modelar una estructura con excentricidades entre los ejes de los elementos en las uniones o cuando las cargas y coacciones se aplican sobre los elementos en otros puntos que sus ejes, deben utilizarse elementos de enlace rígidos en dichas posiciones para mantener el equilibrio estático correcto. Cuando sea necesario, deben utilizarse resortes similares a los indicados en el apartado 4.1.2 (7).

#### **4.1.3 Utilización de los elementos membrana y de cáscara**

- (1) P Los elementos membrana sólo deben aplicarse a aquellas partes de una estructura en las que se sabe que las tensiones de flexión fuera de plano son despreciables.
- (2) P Los elementos cáscara deben aplicarse a todos los tipos de estructuras excepto cuando se utilicen elementos fundidos, forjados o mecanizados de forma compleja que impliquen campos de tensiones tridimensionales, en cuyo caso deben utilizarse piezas macizas.
- (3) P Cuando, dentro del análisis global, se utilizan elementos membrana o cáscara, para tener en cuenta los efectos globales de concentración de tensiones tales como los que se relacionan en el apartado 4.2.2, el tamaño o anchura de malla debe ser lo bastante pequeño en la parte del elemento que contiene el emplazamiento de iniciación para determinar o evaluar la totalidad del efecto (véase el anexo A).

## **4.2 Aplicabilidad de las tensiones nominales, de las tensiones nominales modificadas y de las tensiones de punto caliente**

### **4.2.1 Tensiones nominales**

- (1) P Las tensiones nominales deben utilizarse directamente para la evaluación de los emplazamientos de iniciación en elementos o piezas y uniones simples cuando se aplican las condiciones siguientes:
- a) Los detalles asociados con el emplazamiento están razonablemente de acuerdo con los requisitos apropiados a la categoría de detalle de las tablas 5.1.1 a 5.1.5.
  - b) La categoría del detalle se ha establecido mediante un ensayo de acuerdo con el anexo C y cuando los resultados están expresados en términos de tensiones nominales.
  - c) Los efectos geométricos globales, tales como los que se relacionan en el apartado 4.2.2, no están presentes en la proximidad inmediata del emplazamiento de iniciación.
  - d) El emplazamiento de iniciación de la fisura está localizado en la raíz de una soldadura en ángulo o de una soldadura a tope con penetración parcial.

### **4.2.2 Tensiones nominales modificadas**

- (1) P Las tensiones nominales modificadas deben utilizarse en lugar de las tensiones nominales cuando el emplazamiento de iniciación está en la vecindad de uno o más de los siguientes efectos globales de concentración de tensiones geométricas (véase la figura 4.2.1), con la condición de que se apliquen siempre las condiciones de los apartados 4.2.1 (a) y (b):
- a) cambios globales en la forma de la sección transversal, por ejemplo esquinas con ángulos entrantes o muescas;
  - b) cambios globales de rigidez alrededor de la sección transversal del elemento en uniones en ángulo sin rigidizar entre perfiles abiertos o huecos;
  - c) cambios de dirección o de alineación más allá de los que se permiten en las tablas 5.1.1 a 5.1.5;
  - d) desgarramiento por cortante y deformación en elementos placados anchos o perfiles huecos;
  - e) efectos de flexión fuera de plano no lineales en componentes esbeltos tales como chapas planas cuando la tensión estática está próxima a la tensión crítica elástica, por ejemplo campo de tracción en almas (véase la parte 1 de esta norma experimental).

### **4.2.3 Tensiones de punto caliente**

- (1) P Las tensiones de punto caliente deben utilizarse únicamente cuando se aplican las condiciones siguientes:
- a) el emplazamiento de iniciación está en un borde de soldadura en una unión con geometría compleja donde la tensión nominal no está definida claramente; o
  - b) se ha establecido una categoría de detalle de punto caliente mediante ensayo de acuerdo con los anexos A y C cuando los resultados se han expresado en términos de tensión de punto caliente, para el modo de carga apropiado;
  - c) las tensiones de flexión sobre las cáscaras se generan en uniones flexibles de acuerdo con el apartado 4.1.2 (7).

### **4.3 Deducción de las tensiones**

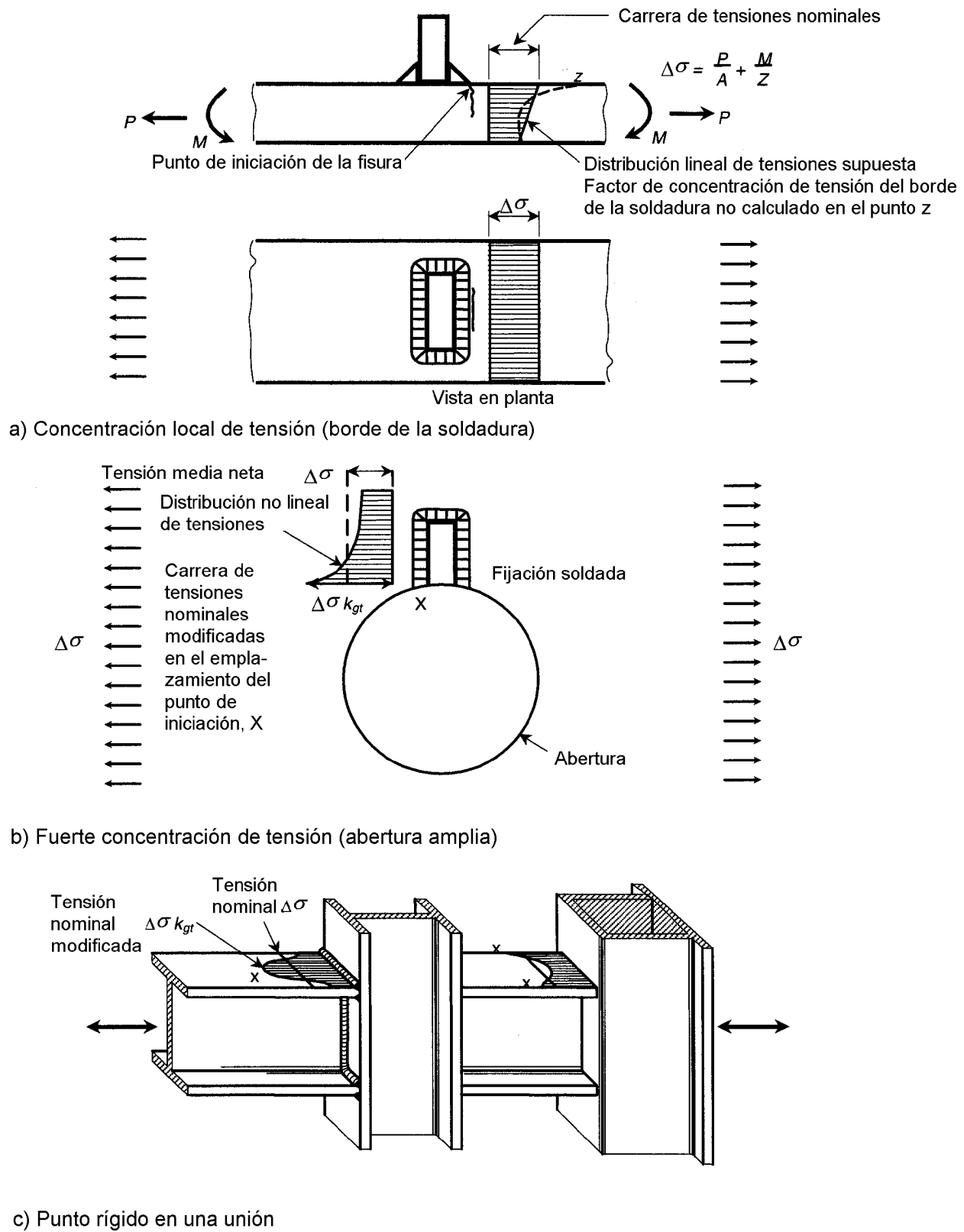
#### **4.3.1 Deducción de las tensiones nominales**

##### **4.3.1.1 Modelos estructurales que utilizan elementos viga**

- (1) P Las tensiones axiales y cortantes en el emplazamiento de iniciación deben calcularse a partir de los esfuerzos axiales, de flexión, cortantes y de torsión en la sección respectiva utilizando las características de sección elástica lineal.
- (2) P Las áreas de las secciones transversales y los módulos de la sección deben tener en cuenta todos los requisitos específicos de las tablas 5.1.1 a 5.1.5.

##### **4.3.1.2 Modelos estructurales que utilizan elementos de membrana y cáscara**

- (1) P Cuando la distribución de tensiones axiales es lineal a través de la sección del elemento alrededor de ambos ejes, las tensiones en el punto de iniciación pueden utilizarse directamente.
- (2) P Cuando la distribución axial es no lineal a través de la sección del elemento alrededor de uno u otro eje, las tensiones a través de la sección deben integrarse para obtener el esfuerzo axial y los momentos flectores. Estos últimos deben utilizarse conjuntamente con las áreas de la sección transversal y los módulos de sección apropiados de acuerdo con las tablas 5.1.1 a 5.1.5 para obtener las tensiones nominales.



**Fig. 4.2.1 – Efecto de las concentraciones de tensiones sobre las tensiones nominales y las tensiones nominales modificadas**

### 4.3.2 Deducción de las tensiones nominales modificadas

#### 4.3.2.1 Modelos estructurales que utilizan elementos viga

- (1) P Las tensiones nominales deben multiplicarse por los factores apropiados de concentración de tensiones elásticas,  $K_{gt}$ , de acuerdo con la posición del emplazamiento o punto de iniciación y el tipo de campo de tensión.
- (2) P Los factores  $K_{gt}$  deben tener en cuenta todas las discontinuidades geométricas, excepto aquellas que ya están incorporadas dentro de la categoría del detalle (véanse las tablas 5.1.1 a 5.1.5).
- (3) P Los factores  $K_{gt}$  deben determinarse por uno de los métodos siguientes:
  - a) soluciones estándar para factores de concentración de tensiones (véase el anexo A);
  - b) subestructuración de la geometría circundante utilizando elementos cáscara teniendo en cuenta (2), y aplicando las tensiones nominales a los límites o contornos;
  - c) medición de las deformaciones elásticas sobre un modelo físico que incorpore las discontinuidades geométricas totales, pero que excluya aquellos rasgos o características ya incorporados dentro de la categoría del detalle [véase el apartado (2)].

#### 4.3.2.2 Modelos estructurales que utilizan elementos membrana, cáscara o macizos

- (1) P Cuando la tensión nominal modificada vaya a obtenerse a partir del análisis global en la zona del emplazamiento de iniciación, dicha tensión debe seleccionarse sobre la base siguiente:
  - a) las concentraciones de tensiones locales, tales como el detalle clasificado y el perfil de la soldadura ya incluidos en la categoría del detalle, deben omitirse;
  - b) la malla en la zona del punto de iniciación debe ser lo bastante fina para predecir exactamente el campo de tensión general alrededor de dicho punto (véase el anexo A) pero sin incorporar los efectos descritos en el apartado (a).

### 4.3.3 Deducción de las tensiones de punto caliente

- (1) P La tensión de punto caliente es la tensión principal predominantemente transversal a la línea de borde de la soldadura y se debe evaluar, en general, por métodos numéricos o experimentales (véase el anexo A), excepto cuando se disponga de soluciones estándar. Para los casos simples, como el que se muestra en la figura 4.2.1 (c), la tensión de punto caliente debería evaluarse multiplicando la tensión nominal por el factor de concentración de tensiones geométricas,  $K_{gt}$ , definido como la concentración de tensiones teóricas evaluada para el material elástico lineal omitiendo todas las influencias (locales o geométricas) ya incluidas en la curva de cálculo  $\Delta\sigma$ -N del detalle clasificado considerado como una referencia.
- (2) P En general, para las configuraciones estructurales para las que los factores estándar de concentración de tensiones no son aplicables y en las que, por lo tanto, se requieren análisis especiales, la tensión de fatiga en el borde de la soldadura debería omitir los efectos de la concentración de tensiones debidos al detalles clasificado considerado como una referencia, p. ej. la geometría del borde de la soldadura.

### 4.3.4 Orientación de las tensiones

- (1) P La carrera de tensión principal debe ser la mayor diferencia algebraica existente entre las tensiones principales que actúan en planos principales cuyo ángulo de desviación no es superior a 45°.
- (2) P Para determinar si un detalle es perpendicular o paralelo al eje de una soldadura si el ángulo de dirección de la tensión principal de tracción es inferior a 45° con relación al eje de la soldadura, debe suponerse que aquél es paralelo a éste.

#### 4.4 Parámetros de carreras de tensiones para emplazamientos de iniciación específicos

##### 4.4.1 Material base, soldaduras a tope con penetración completa y uniones fijadas mecánicamente (véanse las tablas 5.1.5, 5.1.2, 5.1.3 y puntos de iniciación 1, 2, 3, 7 y 9 en la tabla 5.1.3)

- (1) P Las fisuras que se inician en bordes de soldadura, agujeros de elementos de fijación, superficies de rozamiento, etc., y que se propagan a través del material de base o del metal de soldadura totalmente penetrada, deben evaluarse utilizando la carrera de tensiones principales nominales en el elemento en el punto particular respectivo (véase la figura 4.2.1).
- (2) P Los efectos de la concentración de tensiones locales del perfil de la soldadura, de los agujeros de tornillos y roblones, etc., deben ignorarse dado que ya se tienen en cuenta en los datos de resistencia  $\Delta\sigma$ -N para la clase de detalle apropiada. No deben calcularse (véanse las tablas 5.1.1 a 5.1.5).

##### 4.4.2 Soldaduras en ángulo y soldaduras a tope con penetración parcial (véanse los puntos de iniciación 4, 5, 6, 8 y 11 en la tabla 5.1.3)

- (1) La iniciación de fisuras a partir de las raíces de la soldadura y su propagación a través de la garganta de la soldadura deberían evaluarse utilizando la suma vectorial de los esfuerzos cortantes en el metal de la soldadura basándose en una dimensión efectiva de garganta (véase la figura 4.1).

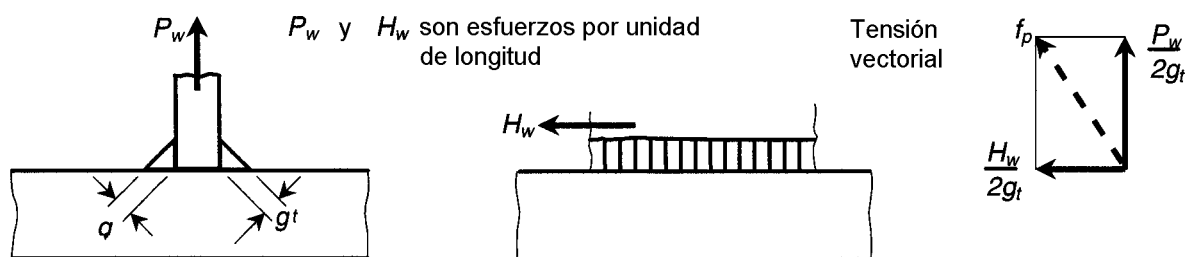


Fig. 4.4.1 – Tensiones en gargantas de soldaduras

- (2) En uniones solapadas en un plano, la tensión por unidad de longitud de soldadura puede calcularse en base a la superficie media para los esfuerzos axiales y a un módulo polar elástico del grupo de soldaduras para los momentos flectores en el plano (véase la figura 4.4.2).
- (3) P En las uniones en T, debe tenerse en cuenta todo efecto de rigidez axial diferente a lo largo de la unión [véase la figura 4.2.1 (c)].
- (4) Cuando las soldaduras en ángulo simples o las soldaduras a tope con penetración incompleta estén sometidas a momentos flectores fuera del plano, las tensiones en la raíz deberían calcularse utilizando una distribución de tensiones lineal a través de la garganta (véase la figura 4.4.3).
- (5) No debería admitirse ninguna concesión por el contacto sobre la cara de la raíz en las uniones soldadas con penetración parcial.

##### 4.4.3 Uniones por adherencia (véase la tabla 5.1.5)

- (1) P Para las uniones de solape que fallan en la línea de adherencia, la carrera efectiva de tensión cortante  $\Delta\sigma_{adh}$  debe basarse en el esfuerzo por unidad de anchura de la junta dividido por la longitud efectiva de solape  $L_{adh}$ , donde:

$L_{adh}$  = longitud de solape  $L$ , cuando  $L \leq 15$  mm (véase la tabla 5.1.5)

$L_{adh}$  = 15 mm, cuando  $L > 15$  mm



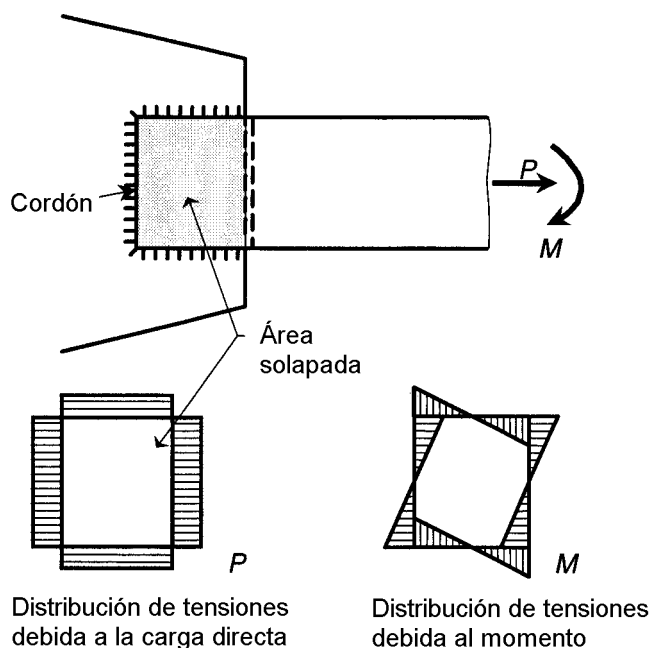


Fig. 4.4.2 – Tensiones en uniones solapadas

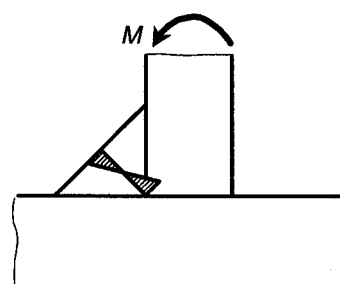


Fig. 4.4.3 – Tensiones en la raíz de una soldadura en ángulo

#### 4.4.4 Piezas fundidas

- (1) P La tensión estructural principal debe obtenerse utilizando el método de elementos finitos o el análisis experimental de tensiones en el caso de formas complejas, cuando no están disponibles las soluciones normalizadas.

### 4.5 Espectros de tensiones

#### 4.5.1 Cómputo de ciclos

- (1) El cómputo de ciclos es un procedimiento para la distribución de una historia o ciclograma de tensiones complejo en un espectro conveniente de ciclos en términos de carrera de tensión  $\Delta\sigma$ , un número de ciclos  $n$  y, si es necesario, una relación  $R$  (véanse las figuras 2.2.1 y 5.3). Se utilizan diferentes métodos.
- (2) Para ciclogramas de tensiones cortos, donde los sucesos de carga simples se repiten un número de veces, se recomienda el método del "depósito". Este método es fácil de visualizar y sencillo de utilizar (véase la figura 4.5.1). Cuando hay que utilizar ciclogramas de tensiones largos, tales como los que se obtienen de medir deformaciones en estructuras reales (véase el anexo C) se recomienda el método de "recogida de lluvia" o "achique de alberca". Ambos métodos son adecuados para los análisis por ordenador (cálculo electrónico).

#### 4.5.2 Determinación del espectro de tensiones

- (1) La catalogación de los ciclos en orden decreciente de amplitud  $\Delta\sigma$  se traduce en un espectro de tensiones. Para facilitar el cálculo puede ser necesario simplificar un espectro complejo en menos bandas. Un método conservador es agrupar bandas juntas en grupos más amplios que contienen el mismo número total de ciclos, pero cuya amplitud es igual que la de la banda más alta del grupo. Más exactamente, la media ponderada de todas las bandas de un grupo puede calcularse utilizando la potencia  $m$ , donde  $m$  es la pendiente inversa de la curva  $\Delta\sigma - N$ , que se va a utilizar más probablemente (véase la figura 4.5.2).

La utilización de un valor medio aritmético es insegura.

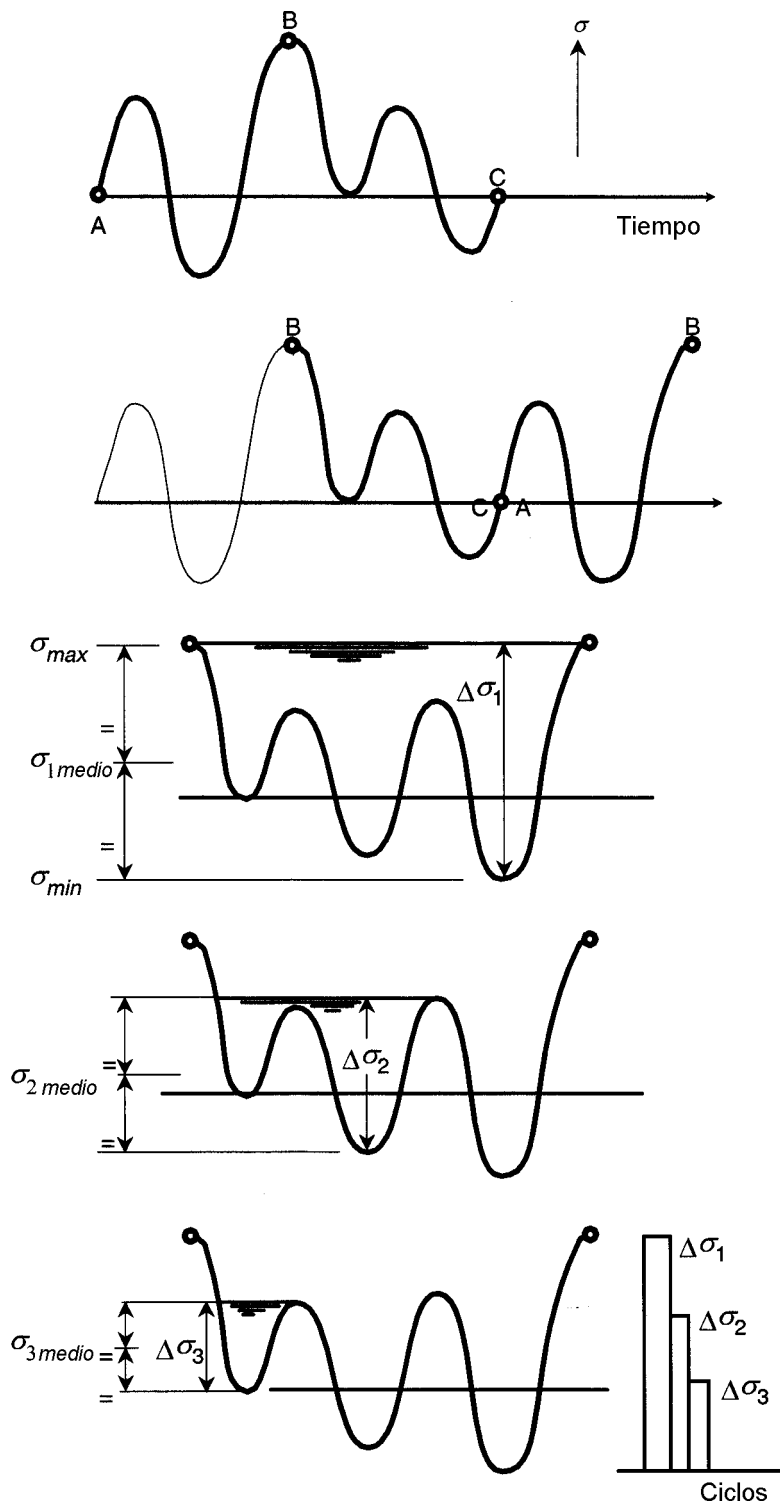


Fig. 4.5.1 – Método del "depósito" ("achique de alberca") para el cómputo de ciclos

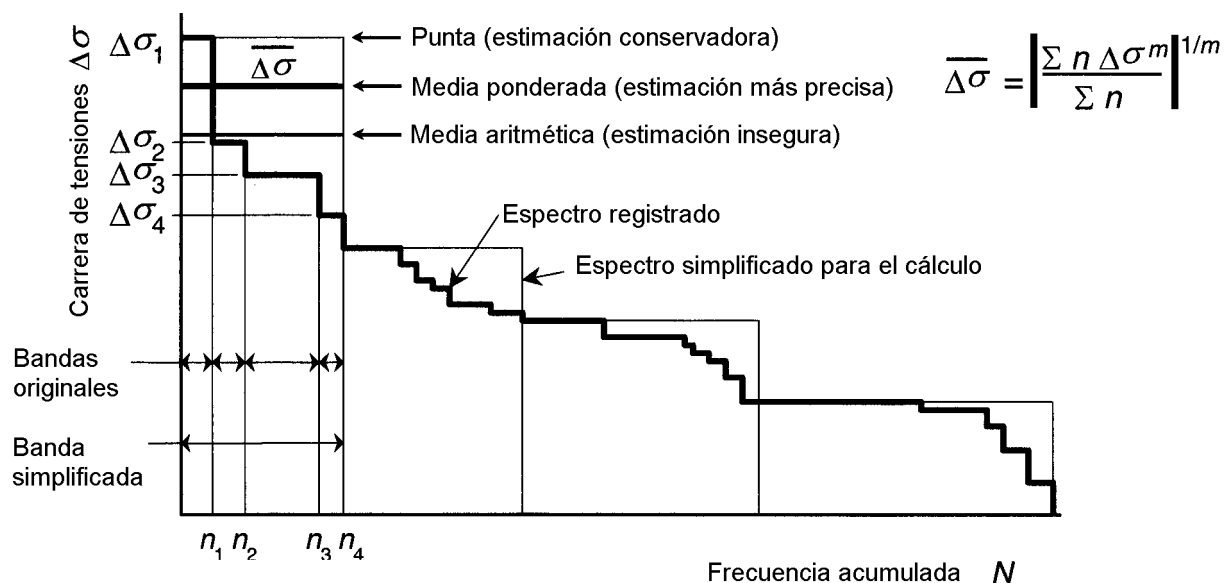


Fig. 4.5.2 – Espectro simplificado de carreras de tensión

## 5 RESISTENCIA A LA FATIGA

### 5.1 Categorías de detalle

#### 5.1.1 Factores que influyen en la categoría del detalle

(1) P La resistencia a la fatiga de un detalle debe tener en cuenta los factores siguientes:

- a) la dirección de la tensión fluctuante respecto del detalle;
- b) la ubicación de la zona de iniciación de la fisura en el detalle;
- c) la disposición geométrica y la proporción relativa del detalle.

(2) La resistencia a la fatiga puede depender también de lo siguiente:

- d) la forma del producto;
- e) el material (a menos que esté soldado);
- f) el método de fabricación;
- g) el grado de inspección después de la fabricación;
- h) el nivel de calidad (en el caso de soldaduras y piezas fundidas).

#### 5.1.2 Tablas de categorías del detalle

(1) Las categorías del detalle para los detalles más corrientemente utilizados se han dividido en cinco grupos básicos, a saber:

- a) detalles no soldados de aleaciones forjadas y fundidas (véase la tabla 5.1.1);
- b) detalles soldados en la superficie de elemento cargado (véanse las tablas 5.1.2 (a) y 5.1.2 (b));

- c) detalles soldados en uniones de extremo (véase la tabla 5.1.3);
- d) uniones fijadas mecánicamente (véase la tabla 5.1.4);
- e) uniones fijadas por adhesivos (véase la tabla 5.1.5);

## 5.2 Datos de resistencia a la fatiga

### 5.2.1 Detalles clasificados

- (1)P La forma generalizada de la relación  $\Delta\sigma$ -N se indica en la figura 1.5.2, trazada sobre escalas logarítmicas. La curva de cálculo representa el nivel del valor medio menos 2 veces la desviación típica por debajo de la línea media obtenida de los datos experimentales.
- (2)P La relación básica de cálculo de la fatiga para endurancias o números de ciclos de ruina menores de  $5 \times 10^6$  ciclos se define por la ecuación:

$$N_i = 2 \times 10^6 \times \left( \frac{\Delta\sigma_c}{\Delta\sigma_i} \frac{1}{\gamma_{Ff} \gamma_{Mf}} \right)^{m_i} \quad (5.1)$$

donde

$N_i$  es el número previsto de ciclos hasta la ruina de una carrera de tensión  $\Delta\sigma_i$ ;

$\Delta\sigma_c$  es el valor de referencia de la resistencia a la fatiga a  $2 \times 10^6$  ciclos, en función de la categoría del detalle;

$\Delta\sigma_i$  es la carrera de tensiones principales en el detalle y es constante para todos los ciclos;

$m_i$  es la pendiente inversa de la curva  $\Delta\sigma$ -N, en función de la categoría del detalle;

$\gamma_{Ff}$  es el coeficiente parcial de seguridad que permite incertidumbres en el espectro de carga y en el análisis de la respuesta (véase el apartado 3.4);

$\gamma_{Mf}$  es el coeficiente parcial de seguridad para las incertidumbres en los materiales y en la ejecución [véase el apartado 5.2.1 (3)].

- (3) Para las aplicaciones normales en las que el cálculo está conforme con esta norma experimental, incluyendo los requisitos de fabricación del anexo D, puede aplicarse un valor de  $\gamma_{Mf} = 1.0$  [pero véase el apartado 5.2.3 (3)] en el caso de uniones fijadas por adhesivos).
- (4) El límite de fatiga con amplitud constante,  $\Delta\sigma_D$ , ocurre a  $5 \times 10^6$  ciclos, suponiéndose que por debajo de él los ciclos de tensiones de amplitud constante no son dañinos. No obstante, incluso si ocurren ciclos ocasionales por encima de este nivel, estos provocarán una propagación que, de extenderse la fisura, causará que los ciclos de amplitud inferior llegarán a ser perjudiciales. Por esta razón, la pendiente logarítmica inversa  $m_2$  de las curvas básicas  $\Delta\sigma$  - N entre  $5 \times 10^6$  y  $10^8$  ciclos debería cambiarse a  $m_2$  para las condiciones de carga de un espectro general, donde  $m_2 = m_1 + 2$ .
- (5) Todos los ciclos de tensión por debajo del límite de truncamiento  $\Delta\sigma_L$ , que ocurre a  $10^8$  ciclos, deben suponerse como no perjudiciales.
- (6) La relación  $\Delta\sigma$ -N está totalmente descrita por la categoría del detalle con doble número  $\Delta\sigma_c$  -  $m_1$ , donde  $\Delta\sigma_c$  es un número entero expresado en unidades de  $N/mm^2$ . Sus valores se dan en las tablas 5.1.1 a 5.1.5. Las curvas  $\Delta\sigma$ -N se dan en las figuras 5.2.1 a 5.2.5.

- (7) Para definir un intervalo finito de categorías y para permitir que una categoría se pueda aumentar o reducir en un intervalo geométrico constante, en la tabla 5.2.6 se da un intervalo estándar de valores  $\Delta\sigma_c$ . Un aumento (o una reducción) de 1 categoría significa seleccionar el valor  $\Delta\sigma_c$  más grande (o más pequeño) siguiente, conservando invariable  $m_1$  y  $m_2$ .
- (8) P Las categorías de detalle son seguras para todos los valores de tensión media (véase el apartado 5.3) pero no permiten la utilización de otro entorno que no sea un ambiente normal (véase el apartado 5.4).
- (9) La utilización de la constante de pendiente inversa  $m_2 = m_1 + 2$  puede ser conservadora para algunos espectros. Cuando un cálculo depende críticamente de esta zona y cuando se tiende a una economía máxima, puede ser apropiado considerar la utilización de ensayos de componentes (véase el anexo C.3.1) o aplicar el análisis de la fractura (véase el anexo B).
- (10) P Los valores de la categoría del detalle indicados entre paréntesis en las tablas 5.1.2 (b) y 5.1.3 sólo son obtenibles con unos altos niveles de calidad de la soldadura que no son inmediatamente verificables por las técnicas normales de ensayos no destructivos. Con el fin de cumplir las necesidades de aseguramiento de la calidad, los valores entre paréntesis sólo deberían utilizarse cuando se apliquen procedimientos especiales de inspección que hayan demostrado su capacidad para detectar y evaluar dimensiones críticas de la discontinuidad de la soldadura, que deben estar establecidos mediante ensayos o aplicando la mecánica de la fractura (véanse los anexos B y C).

### 5.2.2 Detalles sin clasificar

- (1) Los detalles que no estén totalmente cubiertos por las tablas 5.1.1 a 5.1.5 deberían determinarse por referencia a datos publicados cuando éstos estén disponibles. Alternativamente, pueden realizarse ensayos de aceptación de fatiga de acuerdo con el anexo C.3.

### 5.2.3 Uniones por adherencia

- (1) El cálculo de las uniones por adherencia debería considerar lo siguiente:
  - La carga de desgarro o despegue debería reducirse a un mínimo.
  - Las concentraciones de tensiones deberían minimizarse.
  - Las deformaciones en el metal de base deberían mantenerse por debajo del límite de elasticidad.
  - La conversión química o la anodización de las superficies mejora generalmente la duración de vida a la fatiga en comparación con el desengrasado o la abrasión mecánica.
  - Los ambientes agresivos reducen generalmente la duración a la fatiga.
- (2) La resistencia de referencia a la fatiga de un nudo con solape mediante adhesivos que falla en la línea de unión viene definida por la siguiente ecuación:

$$\Delta\sigma_c = k_{c,adh} \cdot f_{v,adh} \quad (5.2)$$

donde

$k_{c,adh}$  es el valor del factor de resistencia a la fatiga de la unión por adherencia  $k_{adh}$  a  $N = 2 \times 10^6$  ciclos;

$f_{v,adh}$  es la resistencia característica a cortante del adhesivo obtenida de un ensayo estático estándar de cortante y solape (véase la parte 1.1 de esta norma experimental).

- (3) Para las aplicaciones críticas, se recomienda realizar ensayos en condiciones representativas de geometría, de fabricación y de medio ambiente. En caso contrario, debería utilizarse un valor alto de  $\gamma_{MF}$ .



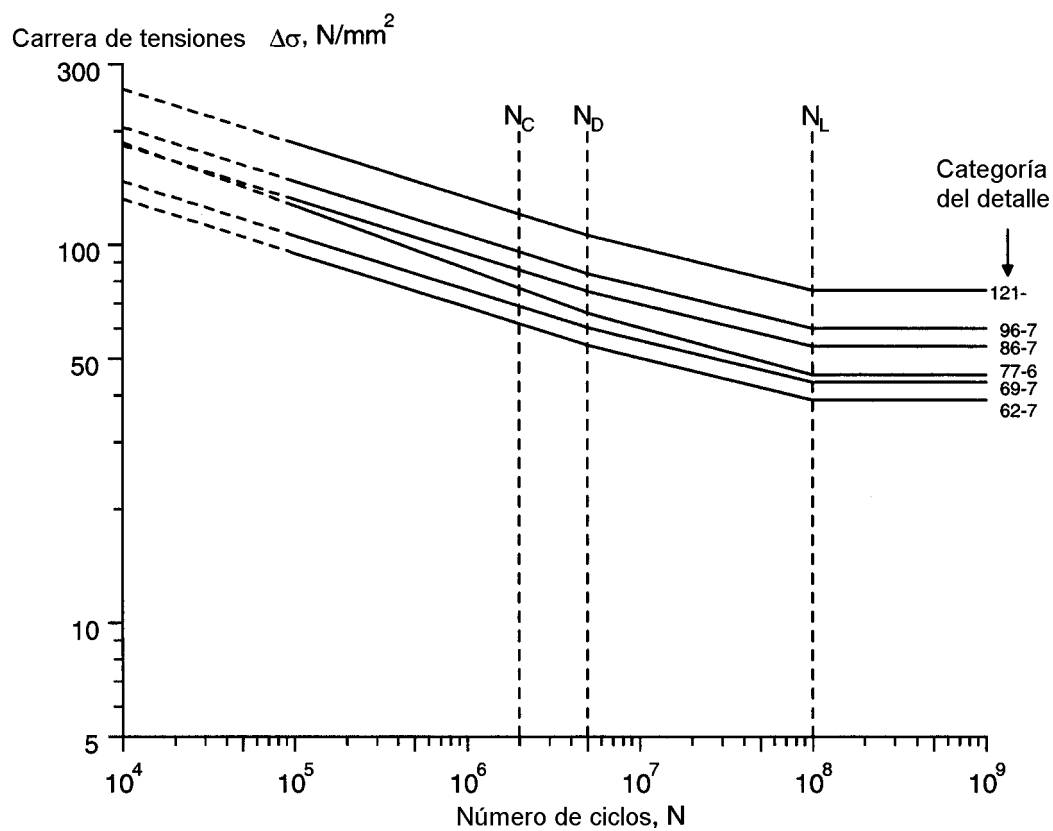


Fig. 5.2.1 – Curvas  $\Delta\sigma$ -N para material base

Tabla 5.2.1  
Valores numéricos de  $\Delta\sigma$  (N/mm<sup>2</sup>) para material base

Categoría de detalle ( $N = 2 \times 10^6$ )		$N = 10^5$	$N_D = 5 \times 10^6$	$N_L = 10^8$
$\Delta\sigma_c$	$m_1$	$\Delta\sigma$	$\Delta\sigma_D$	$\Delta\sigma_L$
121	7	185,6	106,2	76,1
96	7	147,3	84,2	60,4
86	7	131,9	74,4	54,1
77	6	126,9	66,1	45,5
69	7	105,9	60,5	43,4
62	7	95,1	54,4	39,0





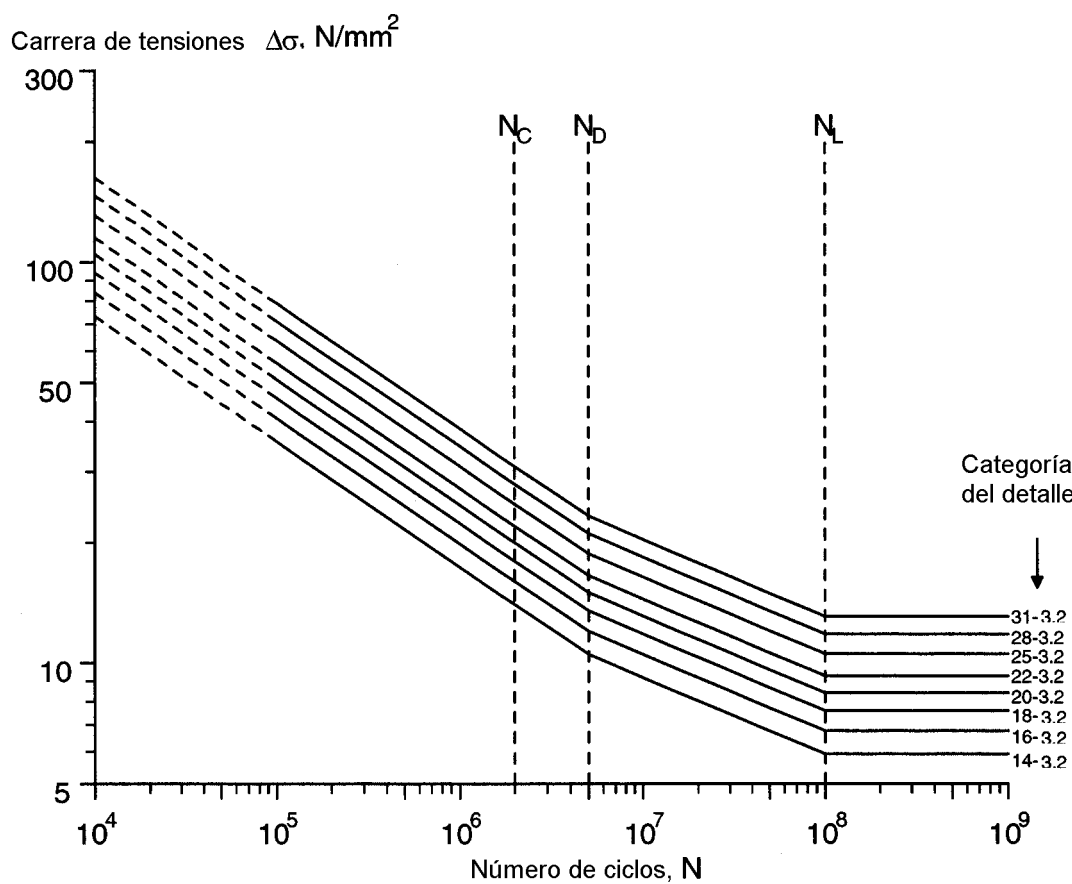


Fig. 5.2.2 (a) – Curvas  $\Delta\sigma$ -N para elementos con fijaciones soldadas  
- Borde de soldadura transversal

Tabla 5.2.2 (a)

Valores numéricos de  $\Delta\sigma$  ( $\text{N/mm}^2$ ) para elementos con fijaciones soldadas - Borde de soldadura transversal

Categoría de detalle ( $N = 2 \times 10^6$ )		$N = 10^5$	$N_D = 5 \times 10^6$	$N_L = 10^8$
$\Delta\sigma_c$	$m_1$	$\Delta\sigma$	$\Delta\sigma_D$	$\Delta\sigma_L$
31	3,2	79,1	23,2	13,1
28	3,2	71,4	21,0	11,8
25	3,2	63,8	18,8	10,6
22	3,2	56,1	16,5	9,3
20	3,2	51,0	15,0	8,4
18	3,2	45,9	13,5	7,6
16	3,2	40,8	12,0	6,8
14	3,2	35,7	10,5	5,9

Tipos de productos		Productos laminados, extruidos y forjados					
Lugar de iniciación	Número de referencia	1	2	3	4	5	
	Emplazamiento	Una discontinuidad de soldadura	Ondulación de soldadura	Parada - arranque	Borde o cráter de soldadura	Borde o cráter de soldadura	
Orientación de las tensiones (véase el capítulo 4)		Paralela al eje de soldadura	→	→	→	→	
Aleaciones		Como en la tabla 1.1.1	→	→	→	→	
Requisitos particulares	Dimensionales	Penetración completa			Soldadura en ángulo discontinua	Agujero contra-perfil centrado en el eje de soldadura	
		Soldadura a tope por ambos lados			$G \leq 2.5 L$	$R \leq 25 \text{ mm}$	
	Fabricación	Soldeo automático continuo					
		Las capas superiores de soldadura amoladas a ras en dirección de Ds					
		Todas las barras de respaldo (y las soldaduras de fijación) deben ser continuas →					
	Inspección/Ensayos	Como en la tabla D.1 del anexo D	→	→	→	→	
	Norma de calidad	Como en la tabla D.2 del anexo D	→	→	→	→	
Análisis de tensiones	Parámetros de tensión	Tensión nominal en el punto de iniciación	→	→	→	→	
		Todo material de fijación ha de estar incluido en las propiedades o características de sección				→	
	Concentraciones de tensiones ya admitidas	Discontinuidades de soldadura permitidas por la tabla D.1 del anexo D				→	
							presencia de agujero de contra-perfil
Número de tipo		2,14	2,15	2,16	2,17	2,18	
Categoría de detalle $\Delta\sigma_c - m_l$		(60-4,5) 55-4,5	44-4,5	35-4	31-3,5	28-3,5	
Legenda: → requisitos continuos de izquierda a derecha    ( ) Antes de utilizar los valores entre paréntesis véase 5.2.1 (10)							

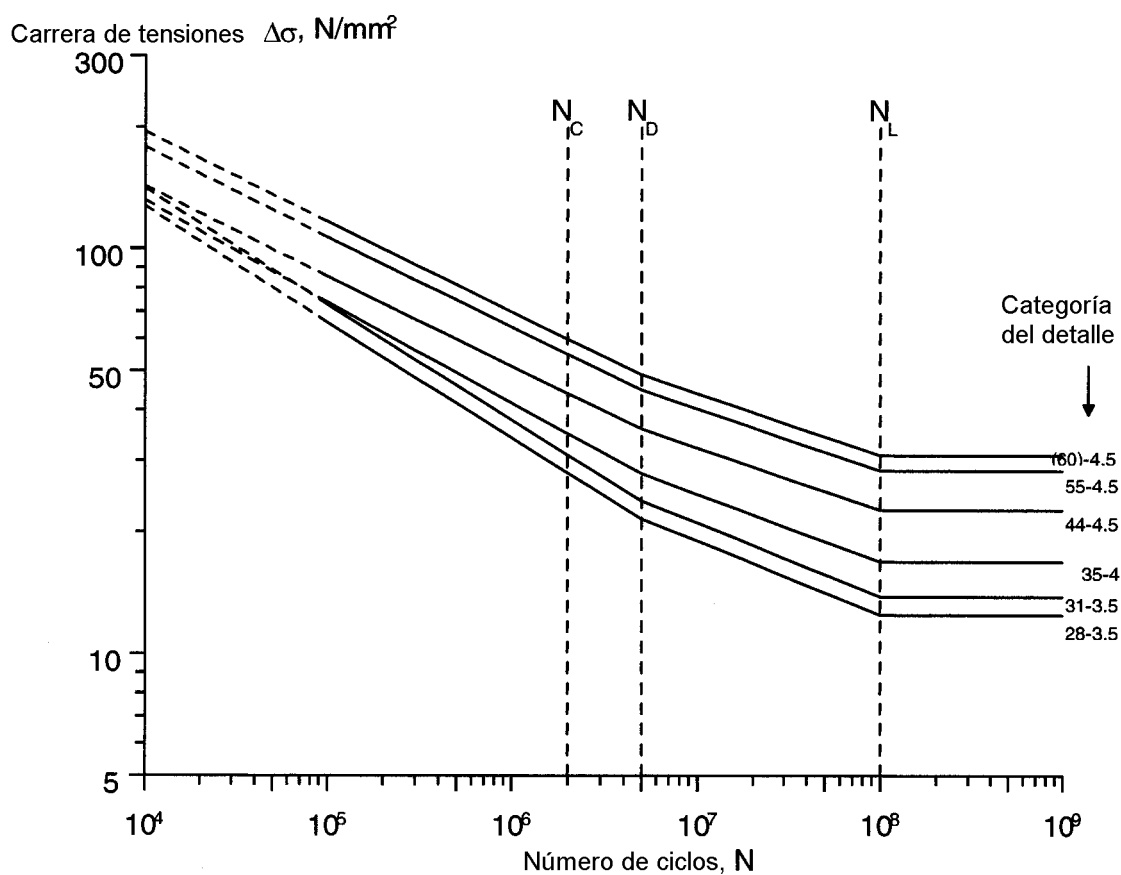


Fig. 5.2.2 (b) – Curvas  $\Delta\sigma$ -N para elementos con fijaciones soldadas. Soldaduras longitudinales

Tabla 5.2.2 (b) – Valores numéricos de  $\Delta\sigma$  (N/mm<sup>2</sup>) para elementos con fijaciones soldadas. Soldaduras longitudinales

Categoría de detalle ( $N = 2 \times 10^6$ )		$N = 10^5$	$N_D = 5 \times 10^6$	$N_L = 10^8$
$\Delta\sigma_c$	$m_1$	$\Delta\sigma$	$\Delta\sigma_D$	$\Delta\sigma_L$
(60)	4,5	116,8	48,9	30,9
55	4,5	107,0	44,9	28,3
44	4,5	85,6	35,9	22,6
35	4	74,0	27,8	16,8
31	3,5	73,0	23,9	13,8
28	3,5	65,9	21,6	12,5

Tipos de producto			Productos laminados, extruidos y forjados									Piezas fundidas			
Lugares de iniciación	Número de referencia		1, 2	3, 2	4	5	6	7		8	9, 10	11	como los tipos 3.1 a 3.10		
	Emplazamientos		Discontinuidad superficial o interna	Borde de soldadura o discontinuidad interna	Raíz de soldadura	Discontinuidad de raíz	Raíz sin fundir	Borde de soldadura	Borde de soldadura	Raíz de soldadura	Borde de soldadura	Raíz de soldadura			
Orientación de las tensiones (véase 4 ....)			Perpendicular al eje de soldadura → → → → → → → → → →												
Aleaciones			Según la tabla 1.1.1 → → → → → → → → → →											tabla 1.1.2	
Requisitos particulares	Dimensionales	Tipo de nudo	<b>A tope en línea</b> → → → →				<b>En cruz o en T</b> →			<b>Solape</b> →			como los tipos 3.1 a 3.10		
		Tipo de soldadura	A tope →		→	→	→	A tope				En ángulo →			
		Preparación	Por ambos lados →		Por un solo lado →										
		Penetración	Completa → → →			Parcial		Completa	Parcial →						
		Transición	Inclinación en cuña L1 a 4 para cambio de anchura o de espesor →												
	Fabricación	Raíz	Amolada →		Respalada	Sin respaldo		Amolada							
		Coronación	Amolada a ras												
		Extremos	Placas de prolongación utilizadas en los extremos, cortadas y amoladas a ras en dirección de Δσ → → →												
	Inspección/Ensayos		Como en la tabla D.1 del anexo D → → → → → → → → →												
	Norma de Calidad		Como en la tabla D.2 del anexo D → → → → → → → → →												
Análisis de tensiones	Parámetro de tensión		Garganta neta + tensión específica de desalineación (sin contar el sobreespesor) →						Sección neta		Garganta neta	Sección neta	Garganta neta		
	Efectos de la concentración de tensiones incluidos en la categoría del detalle		Perfil, desalineación y discontinuidades no especificadas admitidas por la tabla D.2 del anexo D → → → →												
							Efecto rigidizador de elemento transversal			Puntas de tensión en extremos de soldadura					
Número de tipo			3.1	3.2	3.3	3.4	3.5	3.6	3.7	3.8	3.9	3.10	311 a 3.20		
<b>Categoría del detalle</b> Δσ <sub>c</sub> -m <sub>1</sub>		Planos, macizos	(55-6) <b>44-5</b>	(39-4) <b>35-4</b>	(35-4) <b>25-3,2</b>	(29-3,2) <b>18-3,2</b>	<b>14-3,2</b>	como en la tabla 5.1.2 (a), tipos 2.1 a 2.9		<b>18-3,2</b>	como los tipos 3.6 y 3.7		<b>14-3,2</b>	como los tipos 3.1 a 3.10 menos 1 categoría del detalle	
		Perfiles abiertos	(44-5) <b>28-4</b>	(35-4) <b>28-4</b>											
		Huecos	NA	NA											
<b>Legenda:</b> N.A. = no aplicable, → requisitos continuos de izquierda a derecha ( ) Antes de utilizar los valores entre paréntesis, véase el apartado 5.2.1 (10)															

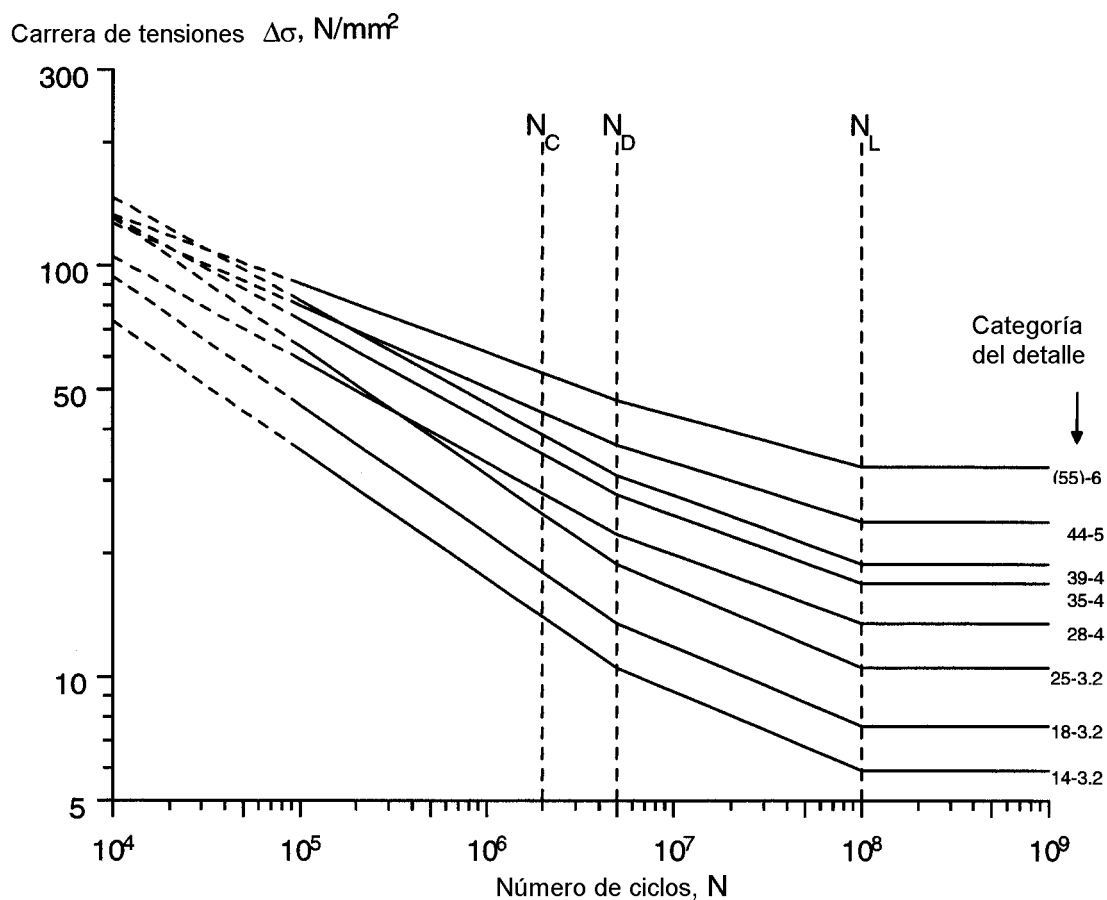
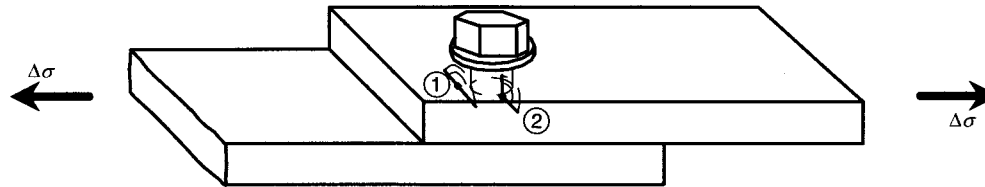


Fig. 5.2.3 – Curvas  $\Delta\sigma$ -N para uniones entre elementos soldados

Tabla 5.2.3  
Valores numéricos de  $\Delta\sigma$  (N/mm<sup>2</sup>) para uniones entre elementos soldados

Categoría de detalle ( $N_0 = 2 \times 10^6$ )		$N = 10^5$	$N_D = 5 \times 10^6$	$N_L = 10^8$
$\Delta\sigma_c$	$m_1$	$\Delta\sigma$	$\Delta\sigma_D$	$\Delta\sigma_L$
(55)	6	90,6	47,2	32,5
44	5	80,1	36,6	23,9
39	4	82,5	31,0	18,8
35	4	74,0	27,8	16,8
28	4	59,2	22,3	13,5
25	3,2	63,8	18,8	10,6
18	3,2	45,9	13,5	7,6
14	3,2	35,7	10,5	5,9

**Tabla 5.1.4 – Categorías de detalle para nudos fijados mecánicamente**



Tipo de elemento de fijación		Pretensado (tipo con rozamiento)		Sin pretensar (tipo por contacto)	
		Tornillo de alta resistencia	Roblón tensionado	Tornillo	Roblón remachado
Tipos de producto		Productos laminados, extruidos y forjados →		→	→
Lugar de iniciación	Número de referencia	1, (2)	1, (2)	2	2
	Emplazamiento	En frente del agujero (a veces en el borde del agujero) →		Borde del agujero →	
Orientación de las tensiones		Paralela a la dirección de laminación o de extrusión →		→	→
Aleaciones		como en la tabla 1.1.1 →		→	→
Materiales del elemento de fijación		Acero, $R_{p0.2} \geq 640 \text{ N/mm}^2$ →		Como en la parte 1 →	
Requisitos particulares	Dimensionales	Unión de solape con superficies paralelas planas Arandela de acero debajo de la cabeza del tornillo y de la tuerca		Unión de solape →	
	Fabricación	Mecanizado sólo por fresa de alta velocidad →		→	→
		Agujeros perforados (con avellanado opcional) o punzonados (con avellanado obligatorio si el espesor > 6 mm) →			
	Montaje	Las superficies de enlace desengrasadas o granalladas deben estar totalmente en contacto con una precarga del 30% en todos los tornillos	Las superficies de enlace desengrasadas o granalladas deben estar totalmente en contacto utilizando tornillos provisionales	Los agujeros en las capas deben estar alineados dentro de $\pm 0,5 \text{ mm}$	
	Fijación	Los tornillos deben estar apretados como mínimo al 85% del límite elástico convencional	La cabeza del roblón debe recalarse mientras que el roblón está sometido a una carga igual a 85% del límite elástico convencional como mínimo	Los tornillos deben apretarse como mínimo al 50% del límite elástico convencional salvo que se utilicen contratuercas	Remachar los roblones hasta que las superficies a unir estén en contacto
Análisis de tensiones	Inspección/Ensayos	Comprobación final de la rotación par de apriete/tuerca después de completar el apriete		Comprobación del par de apriete final si no se utilizan contratuercas	
	Parámetros de tensión	Tensión nominal basada en las propiedades de la sección bruta →		Tensión nominal basada en las propiedades de la sección neta	
	Concentraciones de tensiones ya permitidas	Textura de la superficie, geometría del agujero del elemento de fijación, distribución desigual de la carga entre filas de tornillos, excentricidad de la línea de carga sólo en nudos en solape con doble cubrejuntas simétricos →		→	→
Número de tipo		4.1	4.2	4.3	4.4
Categoría del detalle $\Delta\sigma_{e-m1}$		55 - 4	55 - 4	55 - 4	55 - 4
<b>Leyenda:</b> → los requisitos continúan de izquierda a derecha					

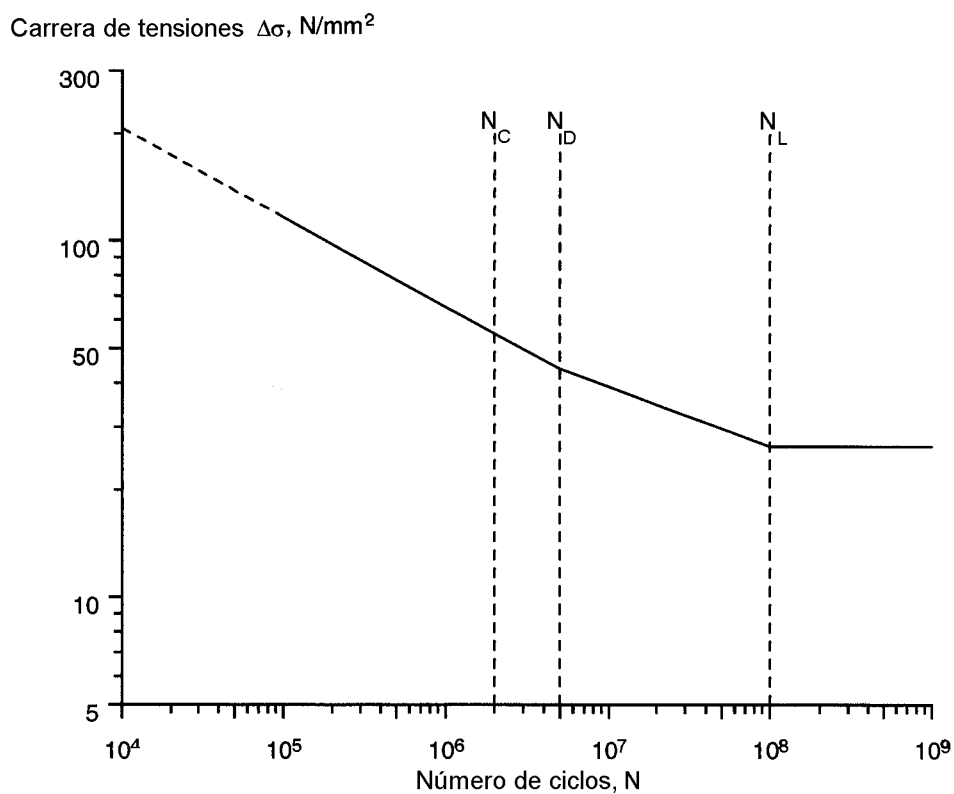
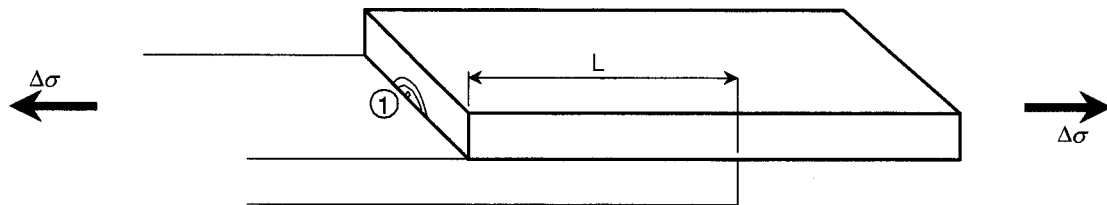


Fig. 5.2.4 – Curva  $\Delta\sigma$ -N para los nudos fijados mecánicamente

Tabla 5.2.4  
Valores numéricos de  $\Delta\sigma$  (N/mm<sup>2</sup>) para nudos fijados mecánicamente

Categoría de detalle ( $N = 2 \times 10^6$ )		$N = 10^5$	$N_D = 5 \times 10^6$	$N_L = 10^8$
$\Delta\sigma_c$	$m_1$	$\Delta\sigma$	$\Delta\sigma_D$	$\Delta\sigma_L$
55	4	116,3	43,7	26,5

**Tabla 5.1.5**  
**Categoría de detalle para uniones por adherencia**



Tipos de productos		Productos laminados, extruidos y forjados
Lugar de iniciación	Número de referencia	1
	Descripción	Sobre la línea de unión en el borde frontal
Orientación de las tensiones		Perpendicular al borde frontal
Aleaciones		Como en la tabla 1.1.1
Adhesivos		Epoxy de uno y dos componentes
Requisitos particulares	Dimensionales	Unión en solape Espesor de la pieza más delgada $\leq 8$ mm
	Fabricación	Mecanizado sólo por fresa de alta velocidad
	Preparación de la superficie	Desengrasado o conversión al cromato
	Montaje	Espesor de la capa de unión dentro de las tolerancias especificadas para el ensayo de resistencia a cortante
	Inspección/Ensayos	Como en la parte 1-1
Análisis de tensiones	Parámetro de tensión	Tensión cortante media basada en una longitud efectiva $L_{adh}$ [véase el apartado 4.4.3 (11)]
	Concentraciones de tensiones ya admitidas	Punta de tensión en el borde frontal, excentricidad de la línea de carga sólo en uniones en solape recubiertas simétricamente con doble cubrejuntas
Categoría del detalle $\Delta\sigma_c - m_1$		$0,11 f_{vadh} - 6$



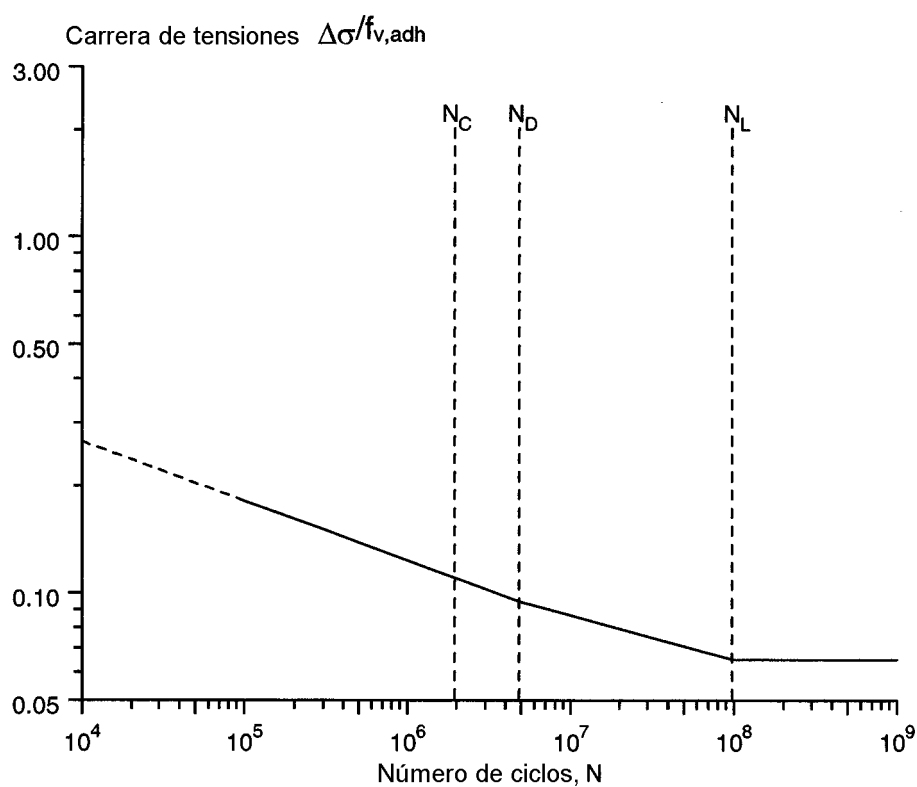


Fig. 5.2.5 – Curva  $\Delta\sigma/f_{v,adh}$  para uniones por adherencia

**Tabla 5.2.5**  
Valores numéricos de  $k_{adh}$  ( $=\Delta\sigma/f_{v,adh}$ ) para uniones por adherencia

Categoría del detalle ( $N = 2 \times 10^6$ )		$N = 10^5$	$N_D = 5 \times 10^6$	$N_L = 10^8$
$\Delta\sigma_c/f_{v,adh}$	$m_I$	$\Delta\sigma/f_{v,adh}$	$\Delta\sigma_D/f_{v,adh}$	$\Delta\sigma_L/f_{v,adh}$
0,11	6	0,181	0,94	0,065

**Tabla 5.2.6**  
Intervalo normal de los valores  $\Delta\sigma_c$  ( $N/mm^2$ )

12, 14, 16, 18, 20, 22, 25, 28, 31, 35, 39, 44, 49, 55, 62, 69, 77, 86, 96, 108, 121, 135
NOTA – No es aplicable a las uniones por adherencia.

**5.2.4 Tensión de punto caliente.** Los valores de  $\Delta\sigma_c$  para la evaluación de la tensión de punto caliente de bordes de soldadura se dan en la tabla 5.2.7.

**Tabla 5.2.7**  
**Valores de  $\Delta\sigma_c - m_1$  para la evaluación de la tensión de punto caliente**

<b>Espesor del elemento sometido a tensión, T (mm)</b>	<b><math>\Delta\sigma_c - m_1</math></b>
$0 < T \leq 4$	44 - 3,2
$4 < T \leq 10$	39 - 3,2
$10 < T \leq 15$	35 - 3,2
$15 < T \leq 25$	31 - 3,2
$25 < T \leq 40$	28 - 3,2
$T > 40$	25 - 3,2

### 5.3 Efecto de la tensión media

#### 5.3.1 Generalidades

- (1) Los datos de resistencia a la fatiga dados en el apartado 5.2 se refieren a condiciones de tensión media de tracción alta. Cuando la tensión media es de compresión o tiene un valor bajo de tracción, la vida a fatiga puede prolongarse en ciertas condiciones. Para más información, véanse los apartados 5.3.2 a 5.3.6 y el anexo G.

#### 5.3.2 Material base y uniones fijadas mecánicamente

- (1) El factor de aumento de la duración a la fatiga que se da en el anexo G puede considerarse siempre que a las tensiones aplicadas se les sumen los efectos de las tensiones residuales de tracción y de falta de ajuste.

#### 5.3.3 Uniones soldadas

- (1) P No debe hacerse ninguna consideración para la tensión media en nudos o uniones soldadas, excepto en las circunstancias siguientes:
- a) Cuando se hayan realizado ensayos que representen el estado final real de la tensión (incluidas las tensiones residuales y de falta de ajuste) en la estructura y que demuestren un aumento consistente en la resistencia a la fatiga con una tensión media decreciente.
  - b) Cuando se van a utilizar técnicas de mejora que han demostrado que producen tensiones de compresión residuales y cuando las tensiones aplicadas no son de tal magnitud como para que las tensiones residuales de compresión se vean reducidas por el efecto de la fluencia en servicio (véase el anexo E).

#### 5.3.4 Uniones por adherencia

- (1) P No debe admitirse efecto alguno de tensión media sin una justificación por medio de un ensayo.

#### 5.3.5 Zona de baja endurancia

- (1) P En la zona de endurancia entre  $10^3$  y  $10^5$ , debe comprobarse que la carrera de tensión de cálculo no produce una tensión de tracción máxima que supere la resistencia de cálculo del estado límite último para el detalle (véase la parte 1 de esta norma experimental). La Nota 2 en la figura 1.5.2 indica esta posibilidad.
- (2) Para ciertos detalles, pueden utilizarse resistencias más altas de fatiga para relaciones R negativas para  $N < 10^5$  ciclos (véase el anexo F).

### 5.3.6 Cómputo de ciclos para el cálculo de la relación R

El método para obtener las tensiones máxima, mínima y media para ciclos individuales en un espectro utilizando el método de cómputo del "depósito" debe ser como el que se indica en la figura 4.5.1.

### 5.4 Efecto del medio ambiente (entorno)

- (1) P La categoría de detalla  $\Delta\sigma_c$  dada en las tablas 5.1.1 a 5.1.5 y en el apartado 5.2.2 debe reducirse de acuerdo con la tabla 5.4.1 para ciertas combinaciones de aleación y de medio ambiente cuando la temperatura ambiente media durante la vida no pase de 65 °C.

NOTA – Para ambientes marinos, la temperatura ambiente media durante la vida no debería pasar de 30 °C.

**Tabla 5.4.1**  
**Número de categorías de detalle en que debe reducirse  $\Delta\sigma_c$  de acuerdo con el medio ambiente y la aleación respectivos <sup>1)</sup>**

Aleación			Entorno							
Serie	Composi- ción básica	Tasas de protección (véase la parte 1.1)	Rural	Industrial / Urbano		Marino			Sumergido	
				Moderado	Severo	No industrial	Moderado	Severo	Agua fría	Agua de mar
3 000 <sup>3)</sup>	AlMnCu	A	—	—	(P)	—	—	— <sup>5)</sup>	—	— <sup>5)</sup>
5 000	AlMg	A	0	0	(P) <sup>4)</sup>	0	0	0 <sup>5)</sup>	0	0 <sup>5)</sup>
5 000	AlMgMn	A	0	0	(P) <sup>4)</sup>	0	0	0 <sup>5)</sup>	0	1 <sup>5)</sup>
6 000	AlMgSi	B	0	0	(P) <sup>4)</sup>	0	0	1 <sup>5)</sup>	0	2 <sup>5)</sup>
7 000	AlZnMg	C	0	0	(P) <sup>4)</sup>	0	0	2 <sup>5)</sup>	0	3 <sup>5)</sup>
NOTA 1 — Véase la tabla 5.2.1 (7).										
NOTA 2 — Para condiciones en las que la tabla 5.4.1 requiere una reducción en la categoría del detalle y la temperatura media supera 30 °C, debería pedirse consejo a un especialista.										
NOTA 3 — Datos no disponibles.										
NOTA 4 — (P) muy dependiente de la composición química del entorno. Puede requerirse una protección mantenida regularmente para evitar el riesgo de exposiciones locales que pueden ser particularmente nocivas para la iniciación de la fisuración.										
NOTA 5 — El valor de N <sub>D</sub> debería aumentarse de 5 x 10 <sup>6</sup> a 10 <sup>7</sup> ciclos. El valor de N <sub>L</sub> debería aumentarse de 10 <sup>8</sup> a 2 x 10 <sup>8</sup> ciclos.										

### 5.5 Técnicas de mejora

- (1) La resistencia a la fatiga de ciertos tipos de detalle que se muestran en las tablas 5.1.1 a 5.1.5 se puede mejorar por la aplicación de técnicas especiales de fabricación. Estas técnicas son, generalmente, caras de aplicar y presentan dificultades de control de calidad. No debería recurrirse a ellas para fines de dimensionamiento o proyecto general, salvo que la fatiga sea particularmente crítica para el coste económico global de la estructura, en cuyo caso debería recurrirse a un especialista. Estas técnicas se utilizan más frecuentemente para superar las deficiencias existentes en el proyecto.
- (2) Las técnicas siguientes se han utilizado en aleaciones de aluminio y se han mostrado como las más eficaces para aplicaciones de elevado número de ciclos:
- Introducción de tensiones residuales de compresión en el emplazamiento de iniciación de la fisuración. Esto se puede realizar en los bordes de soldaduras transversales por martillado. El método de expansión en frío puede utilizarse en los agujeros de los tornillos.
  - Reducción del efecto de concentración de tensiones en el emplazamiento de iniciación de la fisuración. Esto se puede realizar por amolado de los bordes de soldaduras transversales hasta obtener un perfil liso.
- (3) En el anexo E se da información adicional sobre técnicas de mejora.

## 6 REQUISITOS DE CALIDAD

### 6.1 Determinación del nivel de calidad requerido

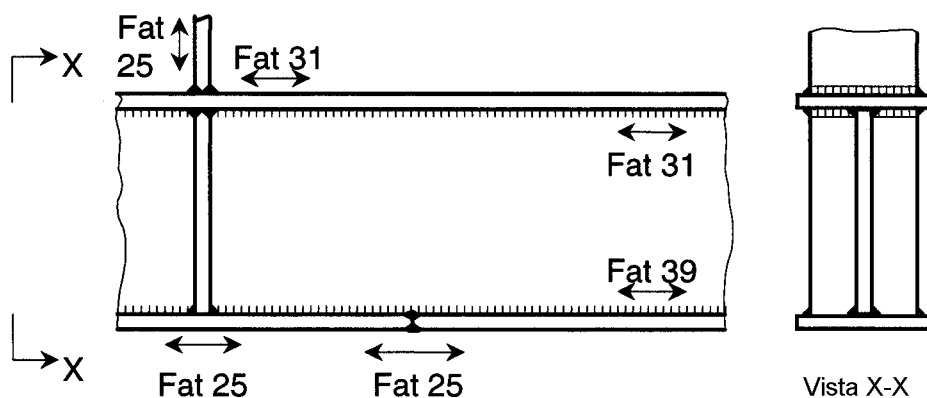
- (1) P Las categorías de detalle de las tablas 5.1.1 a 5.1.5 representan la máxima resistencia a fatiga admitida por este código para el detalle en cuestión cuando está fabricado con los requisitos de calidad del anexo D, y no deben superarse sin proceder a una justificación adicional mediante ensayo (véase el anexo C).
- (2) P Los detalles de clase más alta requieren frecuentemente una inspección adicional y exigen normas de ejecución más estrictas (véase el anexo D), que pueden tener un efecto negativo sobre el coste económico de fabricación. Las normas de inspección y de ejecución deben estar determinadas por el nivel de calidad apropiado para los requisitos particulares de comportamiento a la fatiga y no por la resistencia máxima potencial a la fatiga.
- (3) P El nivel de calidad requerido para un detalle debe obtenerse determinando la más baja curva de resistencia a la fatiga a partir de la cual el sumatorio de Miner  $D_L$  no supera el valor 1 (véase el apartado 2.2.2 (2) g). Cuando las fluctuaciones de tensión en un detalle se producen en más de una dirección, pueden encontrarse diferentes requisitos de clase para cada una de las direcciones.
- (4) P El nivel de calidad para uniones o nudos soldados debe determinarse a partir de la tabla 6.1.1.

**Tabla 6.1.1**  
**Determinación del nivel de calidad para uniones soldadas**

Categoría inferior de detalle $\Delta\sigma_c$ para la cual $\Delta_L \leq 1^{(1)}$	Nivel de calidad requerido
62, 55	Fat 62
49, 44	Fat 49
39, 35	Fat 39
31, 28	Fat 31
25, 22	Fat 25
20 e inferior	Normal
NOTA 1 – Suponiendo que $m_1$ y $m_2$ permanecen constantes.	

### 6.2 Designación de los niveles de calidad en los planos

- (1) P Para que la inspección pueda concentrarse particularmente en aquellas partes de la estructura que son críticas para la fatiga, deberían realizarse las acciones siguientes:
- Determinar, mediante cálculo, aquellas zonas de la estructura en las que los requisitos de resistencia a la fatiga superan la categoría de detalle 20.
  - Indicar en los planos detallados, en todos los detalles en dichas zonas, el nivel de calidad requerido según la tabla 6.1.1 y la dirección de fluctuación de la tensión como se indica en la figura 6.2.1.
  - Todo plano que contenga un detalle con una resistencia a la fatiga requerida superior a 20 debe tener incorporada la nota general siguiente:  
  
"Los detalles que requieren un nivel de calidad superior al normal están indicados con un número "Fat" y una flecha (véase el anexo D de la Norma Europea Experimental EN V 1999-2)".



**Fig. 6.2.1 – Método para la identificación de la clase de fatiga requerida en los planos**

- (2) Los mismos principios pueden aplicarse para designar los niveles de calidad requeridos en las zonas críticas de las piezas fundidas.

### **6.3 Evaluación de la aptitud para el empleo**

- (1) En el caso de que exista una no conformidad marginal con los requisitos de la calidad del anexo D y de que la acción correctora fuera:
- a) perjudicial para la integridad de la estructura; o
  - b) poder realizar una evaluación técnica crítica (ECA) y tener unas graves consecuencias económicas,
- será necesaria la información siguiente:
- a) los requisitos relativos a las tensiones estáticas y cíclicas en el detalle en cuestión;
  - b) las dimensiones del defecto;
  - c) las propiedades de los materiales en la zona del defecto;
  - d) detalles del medio ambiente.
- (2) La vida a fatiga puede determinarse, indistintamente, utilizando la mecánica de la fractura (véase el anexo A) o mediante ensayos de los detalles representativos (véase el anexo C).

**ANEXO A (Informativo)****ANÁLISIS DE LAS TENSIONES****A.1 Utilización de los elementos finitos para el análisis de la fatiga****A.1.1 Tipos de elementos****A.1.1.1 Elementos viga**

- (1) Los elementos viga se utilizan principalmente para el análisis de tensiones nominales en pórticos y estructuras similares. Un elemento viga convencional para el análisis de pórticos tridimensionales tiene 6 grados de libertad en cada nodo de extremo: tres desplazamientos y tres giros. Este elemento puede describir el comportamiento a torsión correctamente sólo en los casos en que la sección transversal no está predispuesta al alabeo, o que el alabeo pueda ocurrir libremente. El análisis de las tensiones de alabeo es imposible cuando se analizan estructuras abiertas de paredes delgadas.
- (2) Usualmente, los elementos viga están unidos rígidamente los unos a los otros en los nudos. Alternativamente, pueden especificarse también uniones articuladas. No obstante, en numerosas estructuras, las uniones son semi-rígidas. Además, en las uniones tubulares la rigidez está desigualmente repartida, lo que origina momentos flectores suplementarios. Tales características estructurales requieren una modelización más sofisticada que el uso de uniones rígidas o articuladas.

**A.1.1.2 Elementos membrana**

- (1) Los elementos membrana están previstos para modelar estructuras de chapas que están cargadas en el plano. No pueden tratar las tensiones de flexión de las cáscaras. Los elementos placa triangulares y rectangulares son adecuados para resolver campos de tensiones nominales sobre las membranas de estructuras grandes con chapas rigidizadas.

**A.1.1.3 Elementos de cáscara delgada**

- (1) Los programas de elementos finitos contienen varios tipos de elementos de cáscara delgada. Éstos incluyen elementos planos, elementos de curvatura simple y elementos de curvatura doble. Los campos de deformación se formulan corrientemente como lineales (elemento de 4 nodos) o parabólicos (elemento de 8 nodos). En general, los elementos cáscara son adecuados para resolver las tensiones estructurales estáticas de acuerdo con la teoría de las cáscaras. La tensión de plano medio es igual a la tensión de membrana, y las tensiones de superficie superior y de superficie inferior son tensiones de flexión superpuestas ejercidas en la membrana y en la cáscara.
- (2) Los elementos de cáscara delgada pueden modelar solamente los planos medios de las chapas. El espesor real del material se da como una propiedad únicamente para el elemento. Existen también cáscaras delgadas con espesor variable, que son útiles para modelar estructuras de fundición, por ejemplo. El inconveniente más importante con los elementos de cáscara delgada es que no pueden modelar la distribución real de la rigidez y de las tensiones en el interior, y en la vecindad de la zona de soldadura de la intersección de cáscaras.

**A.1.1.4 Elementos de cáscara gruesa**

- (1) Algunos programas de elementos finitos incluyen también los elementos denominados cáscara gruesa. Éstos permiten una deformación por cortante transversal de la cáscara en la dirección del espesor, que hay que tener en cuenta. Los elementos de cáscara gruesa trabajan mejor que los de cáscara delgada, por ejemplo en detalles en los que la distancia entre intersecciones de cáscaras adyacentes es pequeña, dando lugar así a tensiones tangenciales importantes.

#### **A.1.1.5 Elementos con deformación plana**

- (1) A veces es útil estudiar los campos de tensiones locales alrededor de las entallas con un modelo 2-D local. Entonces, una sección transversal de espesor unitario puede modelarse como una estructura bidimensional utilizando elementos con deformación plana.

#### **A.1.2 Guía adicional sobre la utilización de los elementos finitos**

- (1) Para modelar estructuras con campos de tensión y de deformación tridimensionales se necesitan elementos sólidos. Los elementos isoparamétricos curvos con 20 nodos son, generalmente, los más adecuados. En componentes soldados, se requieren a veces dichos elementos para modelar la zona de intersección de las chapas o de las cáscaras.

#### **A.2 Factores de concentración de tensiones**

- (1) Los valores de los factores de concentración de tensiones y de los valores de entalla para las geometrías más corrientes pueden obtenerse de datos ya publicados (véanse las referencias A.4.1 y A.4.2)
- (2) Los valores típicos de  $K_{gt}$  para las esquinas redondeadas de una chapa plana se dan en la figura A.2.1.

#### **A.3 Tensiones de punto caliente**

- (1) El método de la tensión de punto caliente se utiliza principalmente para uniones en las que la orientación del borde de la soldadura es transversal al componente de tensión fluctuante, y se supone que la fisura se propaga desde el borde de la soldadura. La aproximación no es adecuada para las uniones en las que las fisuras crecieran desde los defectos internos o desde la raíz de una soldadura en ángulo. Comparada con el método de las tensiones nominales, esta aproximación es más adecuada en los casos siguientes:
  - a) no existe una tensión nominal claramente definida debido a efectos geométricos complejos;
  - b) la discontinuidad de la estructura no es comparable con alguno de los detalles clasificados incluidos en las reglas de cálculo (método de las tensiones nominales);
  - c) por las razones mencionadas, se utiliza el método de los elementos finitos para modelizar cáscaras y/o elementos macizos;
  - d) el ensayo de las estructuras prototipo se realiza utilizando mediciones con métodos extensométricos;
  - e) los desplazamientos y las desalineaciones angulares superan las tolerancias de fabricación especificadas como consistentes con las curvas de cálculo  $\Delta\sigma$ -N utilizadas en el método de las tensiones nominales.
- (2) Para las uniones de nudos tubulares la carrera de tensión de punto caliente debería evaluarse en los emplazamientos suficientes para caracterizar totalmente el comportamiento a la fatiga de cada unión. Por ejemplo, será necesario considerarla en el caso de una unión tubular definida en al menos cuatro puntos equidistantes alrededor de la periferia de la unión. Para cualquier tipo particular de carga, por ejemplo carga axial, esta carrera de tensión de punto caliente es el producto de la carrera de tensión nominal en la riostra de la celosía por el factor apropiado de concentración de tensiones (SCF).
- (3) La tensión punto caliente se define como el mayor valor de la tensión directa alrededor de la intersección riostra/cordón de la extrapolación al borde de la soldadura de la distribución de la tensión geométrica cerca del borde de la soldadura. Esta tensión de punto caliente incorpora los efectos de la geometría general de la unión, es decir las dimensiones relativas de la riostra y cordón, pero omite la influencia de concentración de tensiones de la propia soldadura, que se traduce en una distribución local de tensiones (véase la figura A.3.1).

- (4) El cálculo de la tensión de punto caliente puede realizarse de varias maneras, por ejemplo por estudios de modelos físicos, por análisis de elementos finitos, o utilizando fórmulas paramétricas semi-empíricas. La posición del "punto caliente" en relación con los puntos de arzón y de baste puede determinarse por los dos primeros métodos pero no en todos los casos por ecuaciones paramétricas. Cuando se utilizan modelos físicos, debería velarse para obtener la tensión geométrica extrapolada al pie de la soldadura como se ha descrito anteriormente. Cuando los cálculos por elementos finitos no consideran cualquier efecto de la geometría de la soldadura, la tensión de punto caliente en el borde de la soldadura se puede estimar a partir del valor obtenido en la intersección riostra/cordón de la viga. Las fórmulas paramétricas deberían utilizarse con precaución, dadas sus limitaciones inherentes; en particular sólo deberían utilizarse dentro de los límites de aplicabilidad correspondientes a la fórmula respectiva que se esté considerando.

#### **A.4 Referencias bibliográficas**

**A.4.1** Peterson, R.E: 'Stress concentration factors' John Wiley and Sons Inc., 1974.

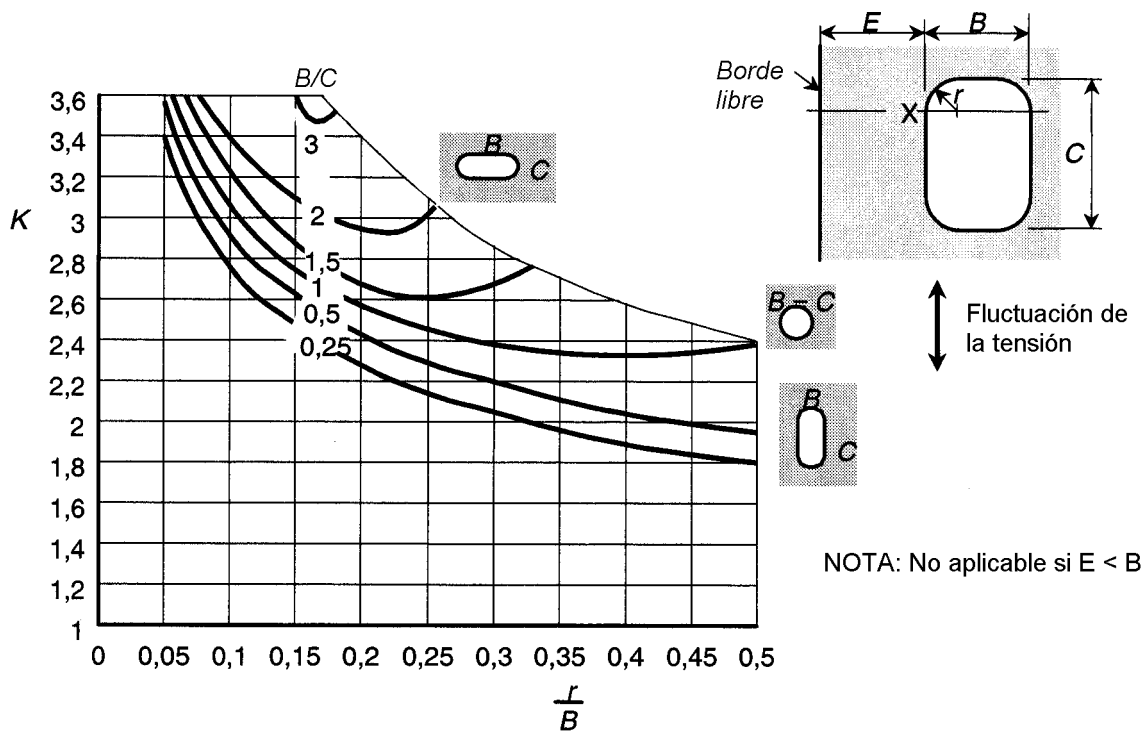
**A.4.2** Roark, J.R. and Young, W.C.: 'Formulas for stress and strain', McGraw Hill, 1973.

**A.4.3** Niemi, E.: 'Stress determination for fatigue analysis of welded components', (International Institute of Welding document 1221-93), Abington Publishing, Cambridge, 1995.

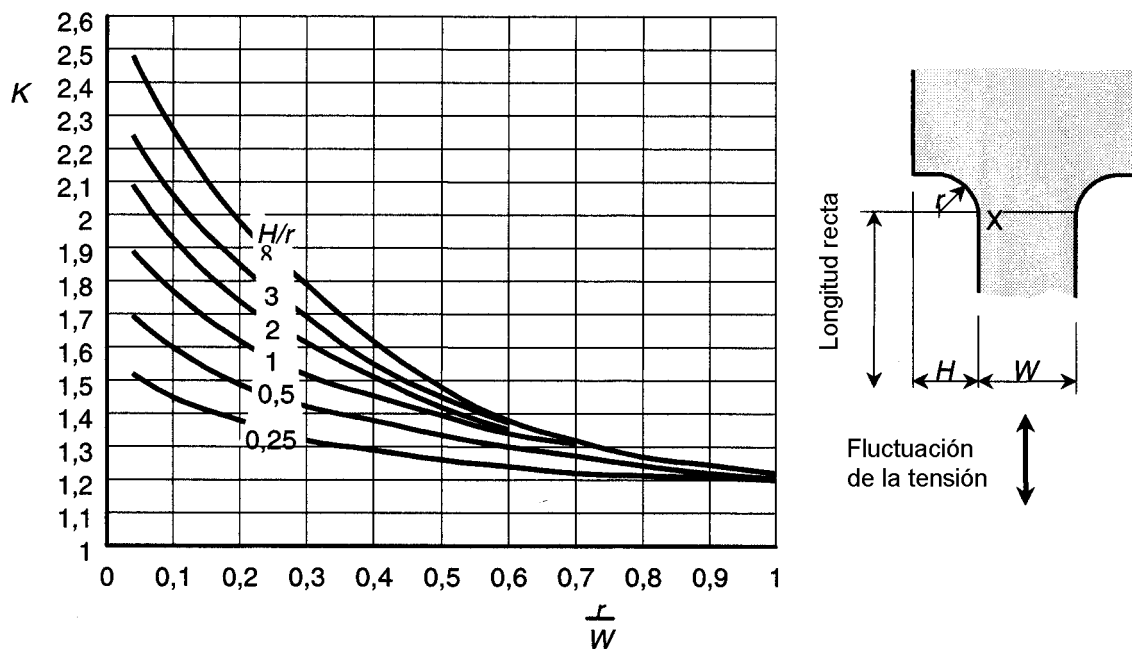
**A.4.4** BS7608 'Code of practice for fatigue design and assessment of steel structures', British Standards Institute 1993.

**A.4.5** Hobbacher, A.: 'Recommendations on fatigue of welded components', IIW Doc. XIII-1539-94/XV-845/-94.



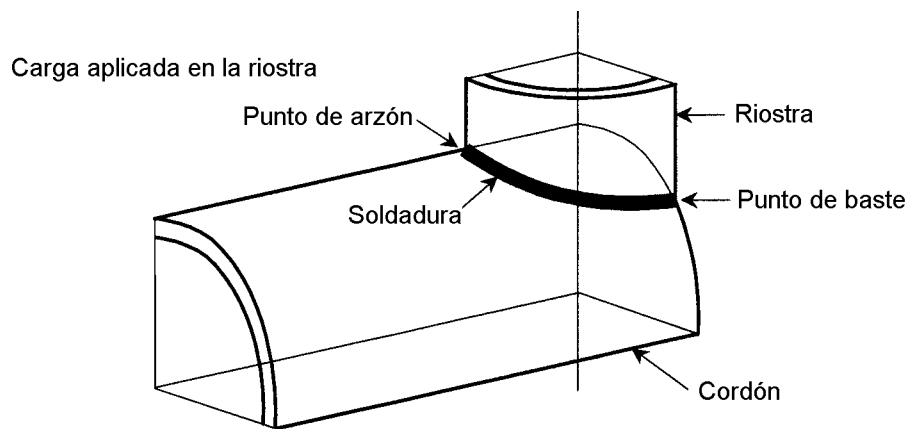


a) Factor de concentración de la tensión de fatiga para las aberturas no reforzadas basado en una tensión neta en el punto X

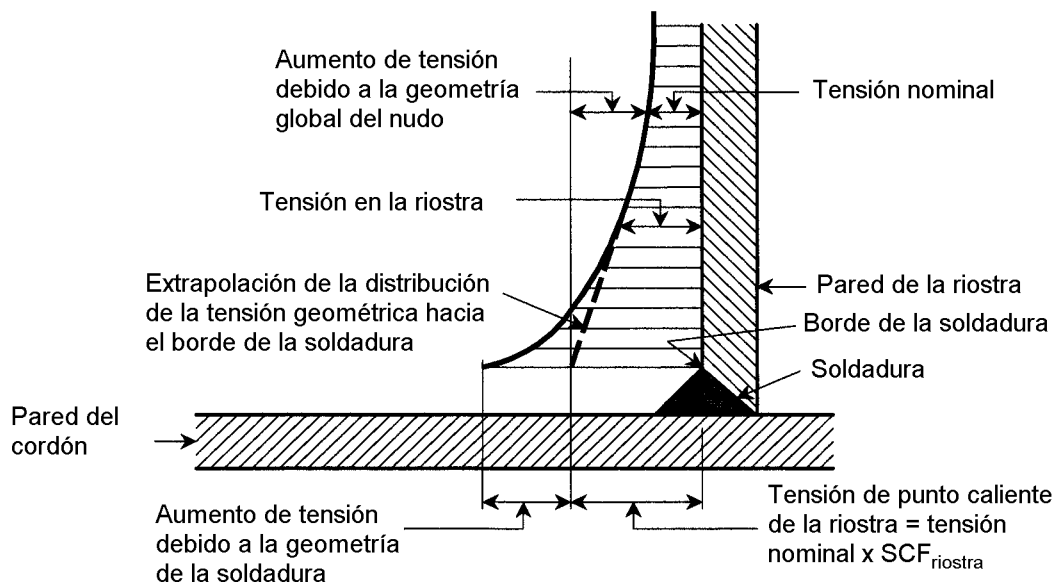


b) Factor de concentración de la tensión de fatiga para los ángulos entrantes basado en una tensión neta en el punto X

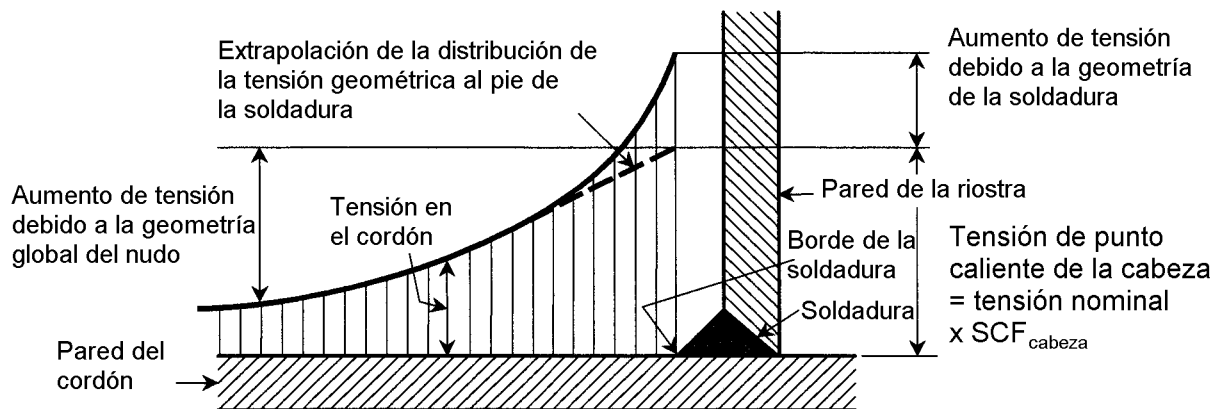
Fig. A.2.1 – Factores típicos de concentración de tensiones de esquinas redondeadas en una chapa plana



a) Nomenclatura para uniones de nudo



b) Distribución de tensiones en la riostra



c) Distribución de tensiones en el cordón

Fig. A.3.1 – Ejemplo de tensiones de punto caliente en una unión tubular de celosía

## ANEXO B (Informativo)

### GUÍA SOBRE LA EVALUACIÓN POR LA MECÁNICA DE LA FRACTURA

#### B.1 Objeto y campo de aplicación

- (1) Este anexo tiene por objeto proporcionar información sobre la utilización de la mecánica de la fractura para evaluar la propagación de las fisuras por fatiga a partir de discontinuidades planas agudas. Principalmente se utiliza en la evaluación de:
  - los defectos conocidos (incluidas las fisuras por fatiga encontradas en servicio);
  - los defectos supuestos (incluyendo la consideración del nudo original o los límites de detección END);
  - La tolerancia a los defectos (incluida la determinación de la aptitud para el empleo de los defectos de fabricación para requisitos particulares de servicio).
- (2) El método cubre la propagación de fisuras por fatiga perpendicularmente a la dirección de la tensión de tracción principal (Modo 1).

#### B.2 Principios

##### B.2.1 Dimensiones de los defectos

- (1) La propagación de la fatiga se supone que arranca de un defecto plano preexistente con un frente de fisura agudo orientado perpendicularmente a la dirección de la fluctuación de la tensión de tracción principal,  $\Delta\sigma$ , en dicho punto.
- (2) Las dimensiones de los defectos preexistentes se indican en la figura B.2.1 y dependen de si los defectos son superficiales o si están totalmente embebidos dentro del material

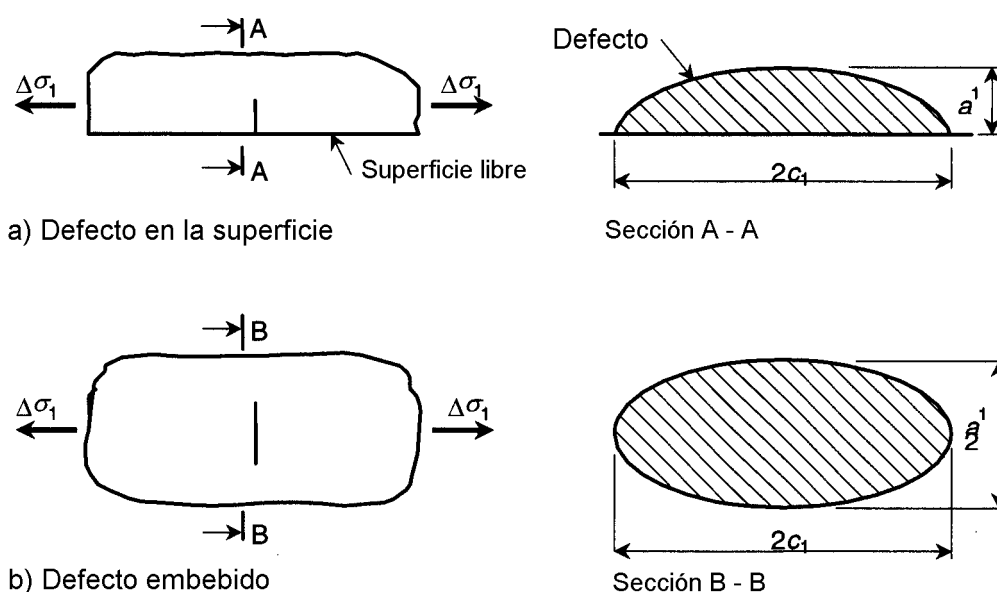


Fig. B.2.1 – Defectos planos preexistentes

### B.2.2 Relación de propagación de las fisuras

- (1) Bajo la acción de la carrera de tensiones cíclicas  $\Delta\sigma$ , el frente de fisura penetrará en el material de acuerdo con la ley de propagación de las fisuras. En la dirección de "a", la tasa de propagación viene dada por:

$$da/dN = A \left( \Delta\sigma a^{0.5} y \right)^m \quad (B.1)$$

donde

A es la constante del material de tasa de crecimiento de la fisura por fatiga (FCGR);

m es el exponente de la tasa de crecimiento de la fisura;

y es el factor de geometría de las fisuras, que depende de la forma, de la orientación y de las dimensiones de contorno de la fisura.

NOTA – Las unidades más comunes para los factores de intensidad de las tensiones  $\Delta K$  son MPam<sup>0.5</sup> (Nmm<sup>-2</sup> m<sup>0.5</sup>) y, para la tasa de crecimiento de la fisura da/dN, son m/ciclo. Los datos que se dan en el capítulo B.3 únicamente son válidos para dichas unidades.

- (2) La fórmula anterior puede escribirse también en la forma

$$da/dN = A \Delta K^m \quad (B.2)$$

donde

$\Delta K$  es la carrera de intensidad de tensiones y es igual a  $\Delta\sigma a^{0.5}$  y.

- (3) Después de la aplicación de N ciclos de carrera de tensión  $\Delta\sigma$ , la fisura crecerá desde la dimensión  $a_1$  hasta la dimensión  $a_2$  de acuerdo con la integración siguiente.

$$N = \int_{a_1}^{a_2} \frac{da}{A(\Delta K)^m} \quad (B.3)$$

- (4) Para el caso general A,  $\Delta K$  y m son función de "a".
- (5) Para más información sobre las técnicas de la mecánica de la fractura, particularmente para las estructuras soldadas, véanse las referencias B.8.1 y B.8.2.

### B.3 Datos A y m de crecimiento de las fisuras

- (1) A y m se obtienen a partir de las medidas de crecimiento de las fisuras realizadas sobre probetas patrón entalladas orientadas en la dirección LT, TL o ST (véase, por ejemplo, la figura B.3.1) utilizando métodos de ensayo normalizados (por ejemplo, véase la referencia B.8.3). El diseño de probeta debe ser uno para el cual esté disponible una solución precisa de factor (K) de intensidad de tensiones (es decir, la relación entre la carga aplicada y el tamaño o dimensión de la fisura "a").

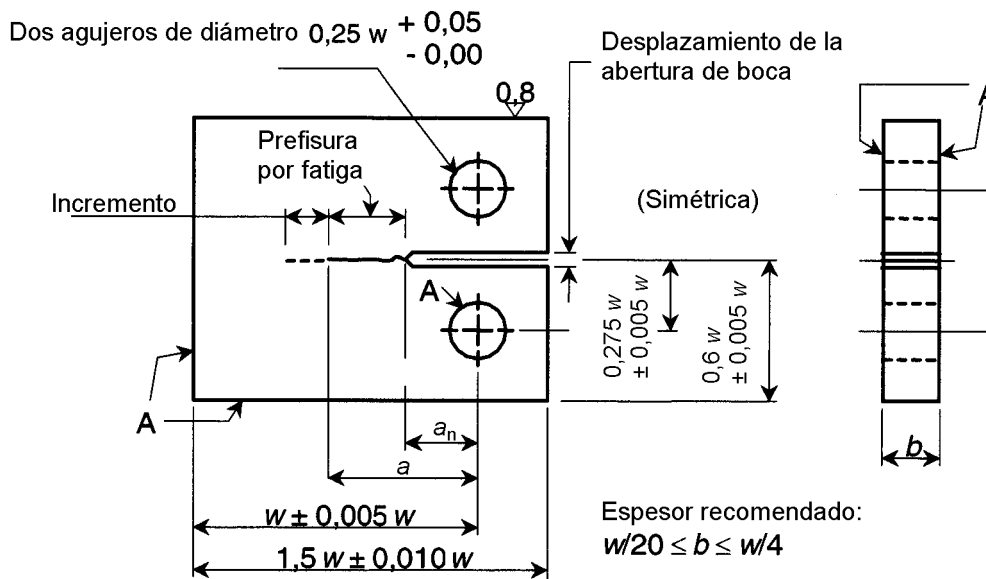
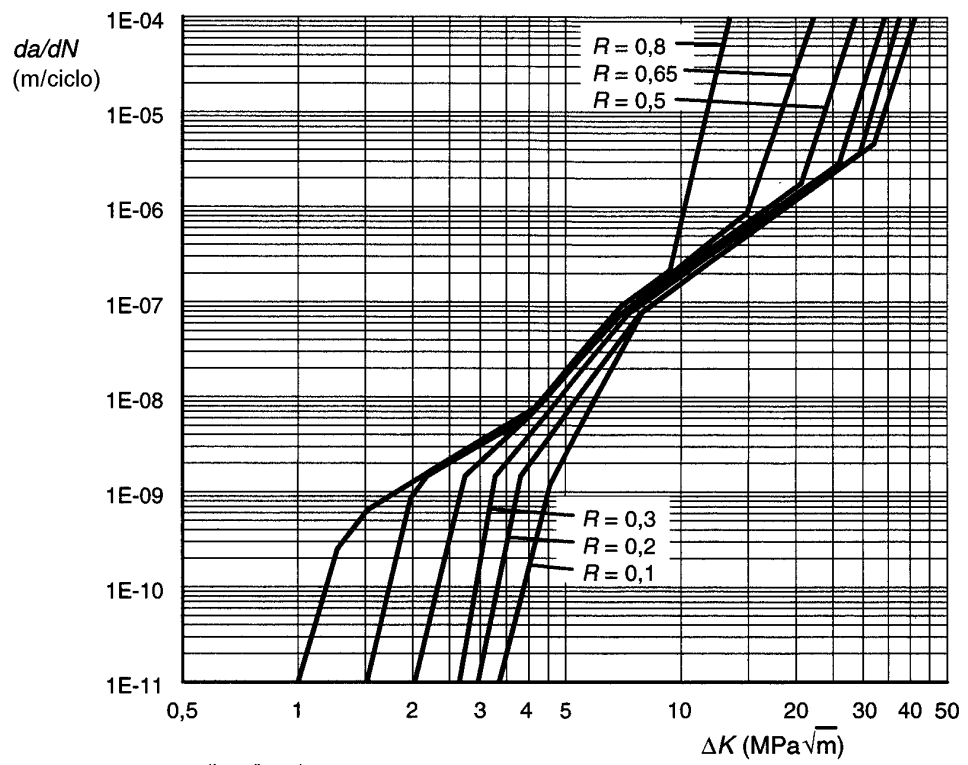
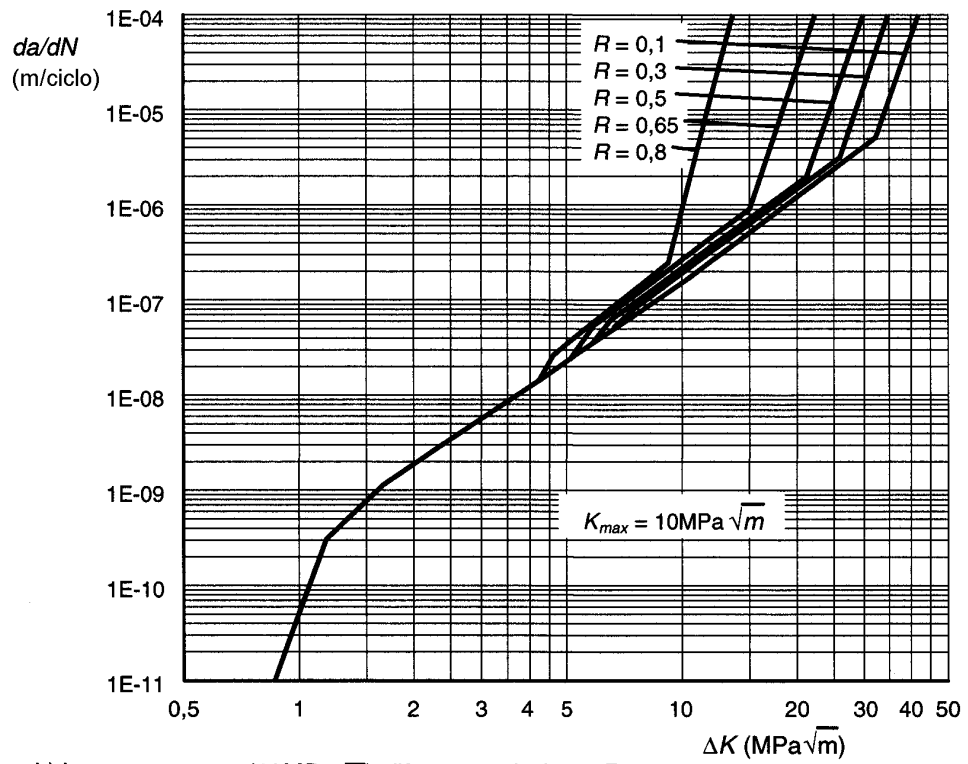


Fig. B.3.1 – Probeta típica de crecimiento de la fisura (ejemplo de la referencia B.8.3)

- (2) El ensayo comprende la carga cíclica controlada por ordenador de la probeta a una relación de intensidad de tensiones aplicada constante ( $K_{\min.}/K_{\max.}$ ),  $R$ , para condiciones de ensayo  $R^c$ , o a un valor constante  $K_{\max.}$  para condiciones de ensayo  $K^c_{\max.}$  [véase la referencia B.8.7)], así como la medición exacta del crecimiento de la fisura desde la entalla.
- (3) Si se obtienen valores discretos de la longitud de fisura "a", se ajusta una curva suave a los datos utilizando el método de ensayo especificado en la norma de ensayo. La tasa de crecimiento de la fisura,  $da/dN$ , para una longitud de fisura dada se calcula entonces como el gradiente de la curva en este valor "a".
- (4) El valor correspondiente de la carrera de los factores de intensidad de tensiones,  $\Delta K$ , se obtiene utilizando la solución apropiada  $K$  para la probeta de ensayo, conjuntamente con la carrera de tensión aplicada. Los resultados  $da/dN$  con relación a  $\Delta K$  se trazan con plotter utilizando escalas logarítmicas.
- (5) Para una utilización general, las curvas de crecimiento de las fisuras pueden requerirse para diferentes valores de  $R$ . La figura B.3.2 muestra una serie típica de curvas  $da/dN$  vs  $\Delta K$  para la aleación de extrusión de aluminio AA6005A-T6 (AlMgSi 0.7). En la figura B.3.2 (a), las condiciones de ensayo son una relación constante de intensidad de tensiones  $K_{\min.}/K_{\max.}$ ,  $R^c$ , y en la figura B.3.2 (b), el resultado de un ensayo  $K^c_{\max.}$  a una  $K_{\max.}$  constante de  $10 \text{ MPa (m)}^{1/2}$  se combina con las ramas conservadoras de las curvas de la figura B.3.2 (a). Esta combinación de los resultados de los datos  $R^c$  y  $K^c_{\max.}$  es una aproximación técnica conservadora y puede utilizarse para la predicción de la vida en el caso de tensiones de tracción residuales altas o de evaluaciones de fisuras de fatiga cortas. Los valores de  $m$  y  $A$  para la figura B.3.2 se dan en las tablas B.3.2 (a) y (b).
- (6) La hipótesis formulada en la referencia B.8.1, ecuación A4-11, según la cual las tasas de propagación de las fisuras por fatiga son proporcionales al cubo de la relación de los módulos de Young con respecto al acero, se utiliza como escala para comparar las FCGR de diferentes aleaciones de aluminio. En la figura B.3.3 (a), se trazan las curvas  $R^c$ -FCGR de aleaciones de aluminio forjadas de relación  $R = 0,1$  y en la figura B.3.3 (b) se añaden los datos correspondientes para  $R = 0,8$ . La figura B.3.4 muestra el conjunto de curvas  $R^c$ -FCGR de tres aleaciones de fundición inyectada por gravedad en coquillas para  $R = 0,1$  y  $R = 0,8$ . La figura B.3.5 representa los datos combinados de los ensayos  $R^c$  y  $K^c_{\max.}$  de aleaciones de aluminio forjadas para  $R = 0,1$  y  $R = 0,8$ . Los valores de  $m$  y  $A$  de las envolventes FCGR de límite superior para las figuras B.3.3 y B.3.5 se dan en las tablas B.3.3 y B.3.5 respectivamente.
- (7) Los entornos corrosivos pueden afectar a los valores  $A$  y  $m$ . Los datos de ensayo obtenidos en condiciones de humedad ambiental serán adecuados para cubrir la mayor parte de las condiciones atmosféricas normales.



a) R = Constante ( $k_{min}/k_{max}$ ) diferentes relaciones R



b)  $k_{max}$  = Constante ( $10 \text{ MPa}\sqrt{m}$ ) diferentes relaciones R

Fig. B.3.2 – Curvas típicas de crecimiento de las fisuras por fatiga para aleaciones de aluminio 6005A T6LT

**Tabla B.3.2 (a)**  
**Datos de la tasa de crecimiento de las fisuras por fatiga para la Norma Europea**  
**EN AN 6005-T6 LT,  $R-K_{\min}/K_{\max}$  = constante**

Relación-R	Intensidad de tensión ΔK MPam <sup>0,5</sup>	m	A	R-ratio	Intensidad de tensión ΔK MPam <sup>0,5</sup>	m	A
0,100	3,30	15,00	0,1657E-18	0,500	2,00	16,29	0,1243E-15
	4,50	7,51	0,1293E-13		2,72	3,85	0,3174E-10
	8,00	2,96	0,1673E-09		4,20	4,86	0,7414E-11
	32,4	11,97	0,4100E-23		6,50	2,80	0,3406E-09
	41,61	11,97	0,4100E-23		21,00	12,23	0,1211E-21
	60,00	11,97	0,4100E-23		29,16	12,23	0,1211E-21
					42,50	12,23	0,1211E-21
0,200	2,90	18,53	0,2679E-19	0,650	1,50	16,93	0,1042E-13
	3,80	5,86	0,5949E-12		1,95	4,42	0,4418E-10
	7,50	2,92	0,2227E-09		2,20	2,38	0,2206E-09
	29,60	12,43	0,2253E-23		3,55	4,76	0,1068E-10
	37,98	12,43	0,2253E-23		6,00	3,05	0,2326E-09
	55,00	12,43	0,2253E-23		15,00	12,00	0,6084E-20
					22,17	12,00	0,6084E-20
0,300	2,60	18,67	0,1774E-18	0,800	1,00	13,03	0,999E-11
	3,40	5,23	0,2470E-11		1,28	4,99	0,7289E-10
	7,35	2,82	0,3060E-09		1,55	2,50	0,2168E-09
	26,00	12,40	0,8411E-23		3,50	6,03	0,2611E-11
	34,49	12,40	0,8411E-23		4,60	3,11	0,2225E-09
	50,00	12,40	0,8411E-23		9,20	15,93	0,9830E-22
					13,48	15,93	0,9830E-22

**Tabla B.3.2 (b)**  
**Datos de la tasa de crecimiento de las fisuras por fatiga para la Norma Europea**  
**EN AA-6005A-T6 LT,  $K_{\max} \cdot 100 \text{ MPA(m)}^{0,5} = \text{constante}$**

Relación-R	Intensidad de tensión $\Delta K$ MPam <sup>0,5</sup>	m	A	R-ratio	Intensidad de tensión $\Delta K$ MPam <sup>0,5</sup>	m	A	
0,100	0,85	11,09	0,6069E-10	0,500	0,85	11,09	0,6069E-10	
	1,16	3,74	0,1807E-09		1,16	3,74	0,1807E-09	
	1,60	2,68	0,2969E-09		1,60	2,69	0,2960E-09	
	8,00	2,96	0,1673E-09		5,55	4,76	0,1081E-11	
	32,40	11,97	0,4103E-23		6,50	3,05	0,2326E-09	
	41,61	11,97	0,4103E-23		21,00	12,04	0,6081E-21	
					29,16	12,04	0,6081E-21	
0,300	0,85	11,09	0,6069E-10	0,650	0,85	11,09	0,6069E-10	
	1,16	3,74	0,1807E-09		1,16	3,74	0,1807E-09	
	1,60	2,71	0,2935E-09		1,60	2,69	0,2960E-09	
	6,70	5,51	0,1413E-11		4,95	4,76	0,1081E-10	
	7,35	2,82	0,3060E-09		6,00	3,05	0,2326E-09	
	26,00	12,40	0,8421E-23		15,00	12,04	0,6081E-20	
	34,49	12,40	0,8421E-23		22,17	12,04	0,6081E-20	
				0,800	0,85	11,09	0,6069E-10	
					1,16	3,74	0,1807E-09	
					1,60	2,71	0,2927E-09	
					4,15	6,01	0,2689E-11	
					4,60	3,11	0,2225E-09	
					9,20	15,93	0,9819E-22	
					13,48	15,93	0,9819E-22	

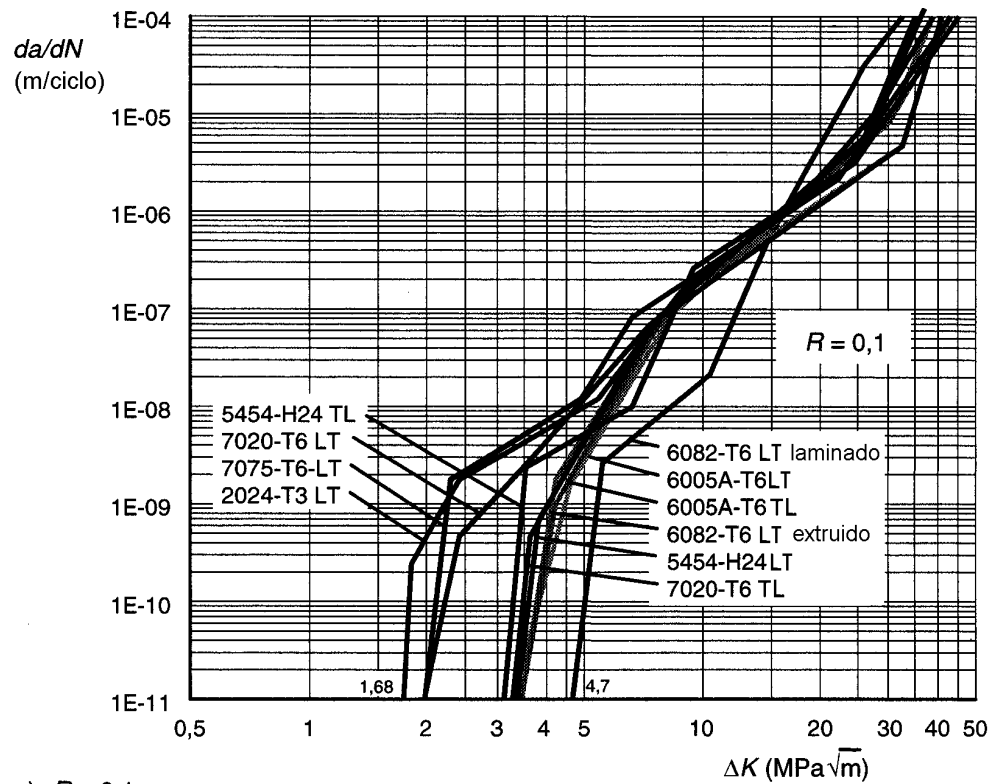
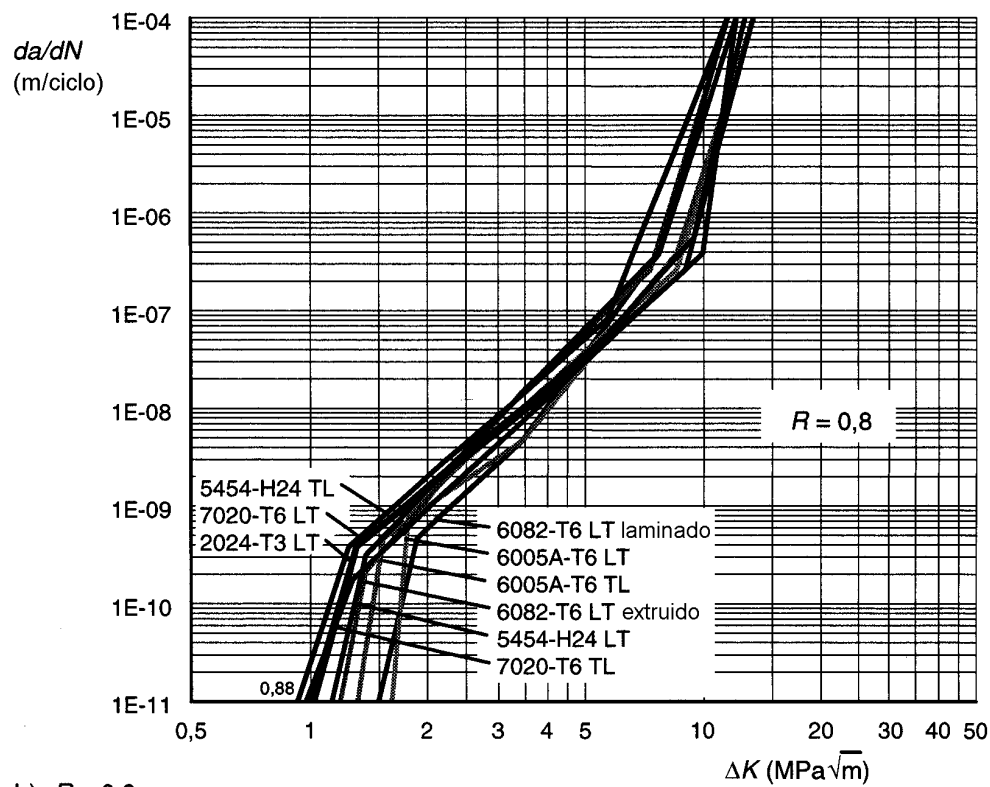
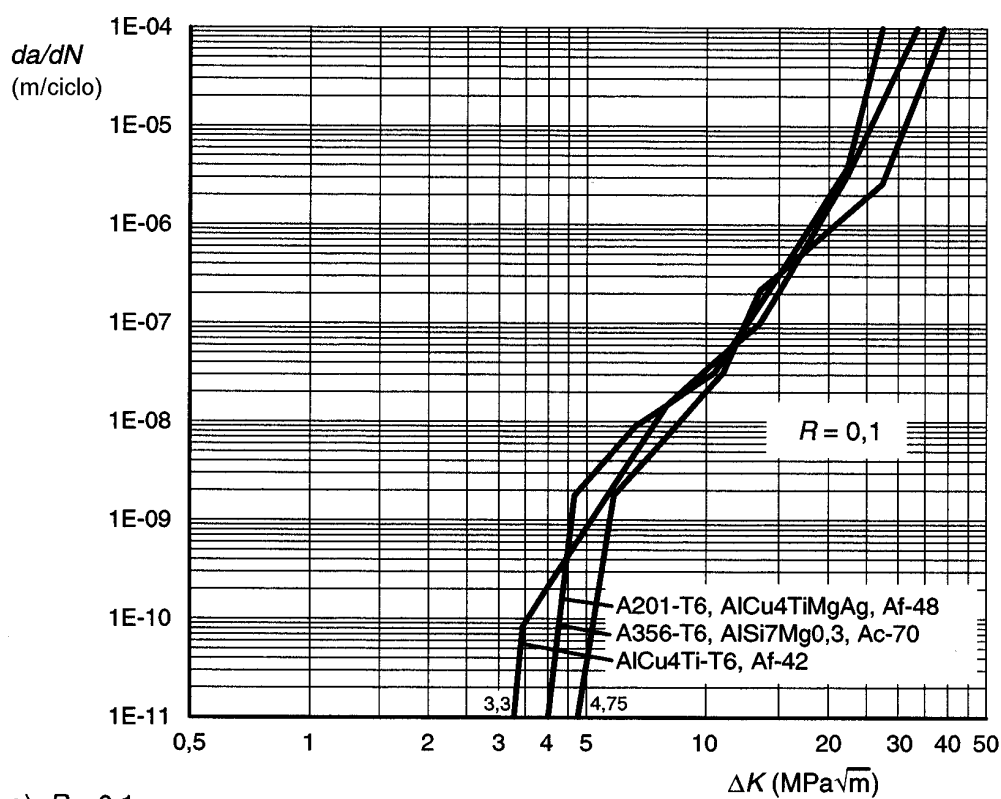
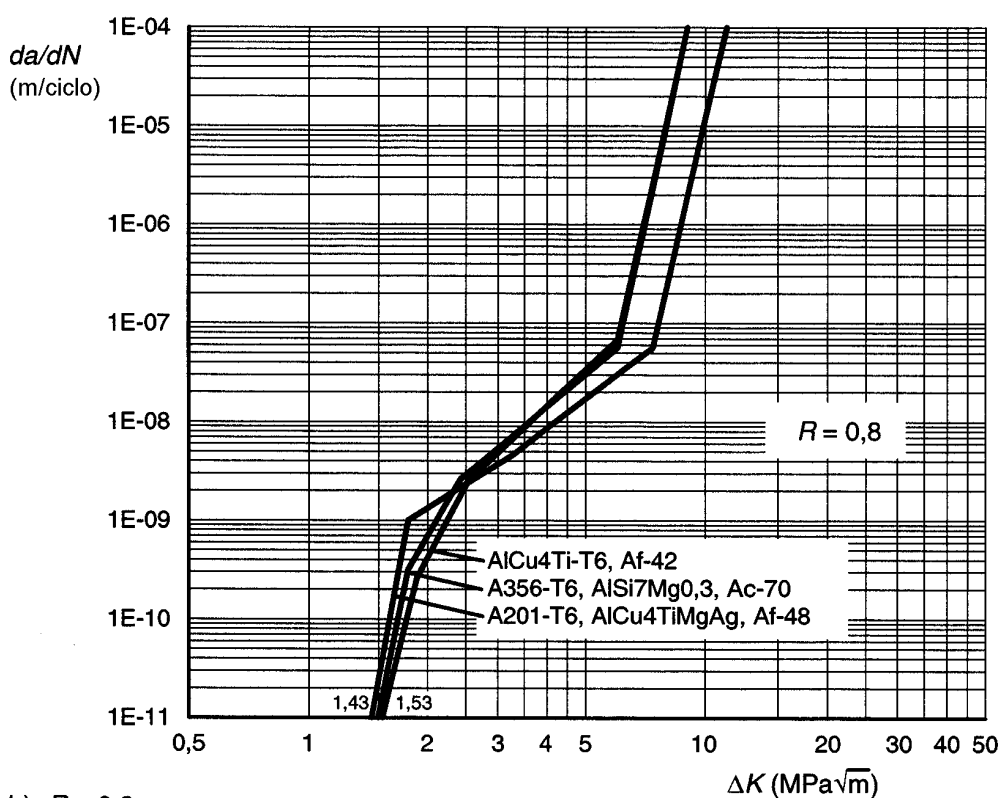
a)  $R = 0,1$ b)  $R = 0,8$ 

Fig. B.3.3 – Curvas típicas de la tasa de crecimiento de las fisuras por fatiga para diversas aleaciones forjadas





a)  $R = 0,1$



b)  $R = 0,8$

Fig. B.3.4 – Curvas típicas de crecimiento de las fisuras por fatiga para distintas aleaciones fundidas

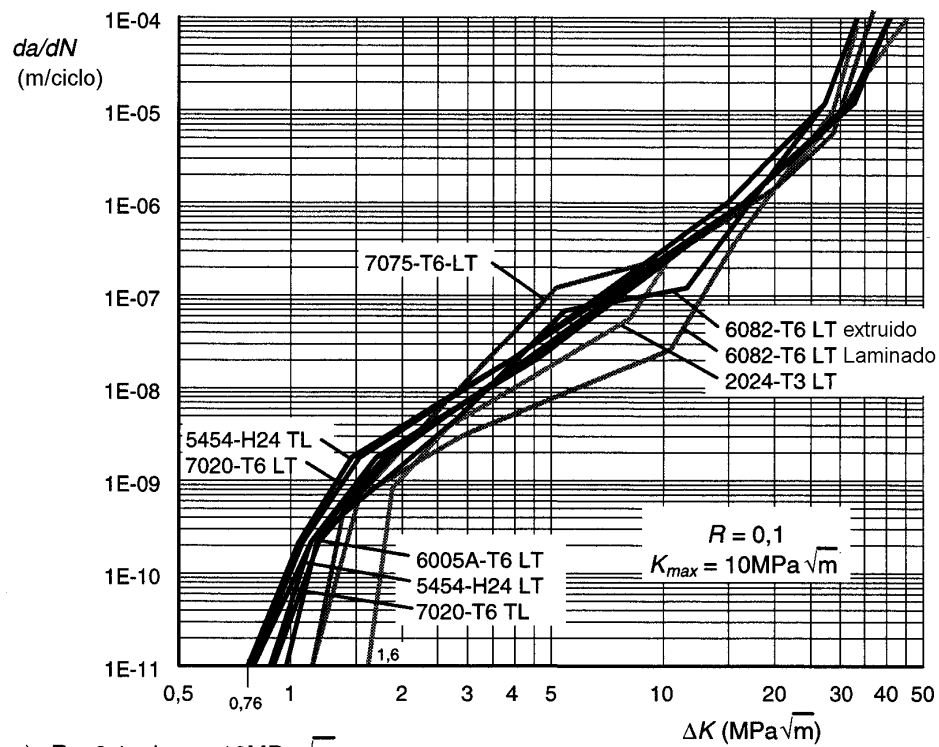
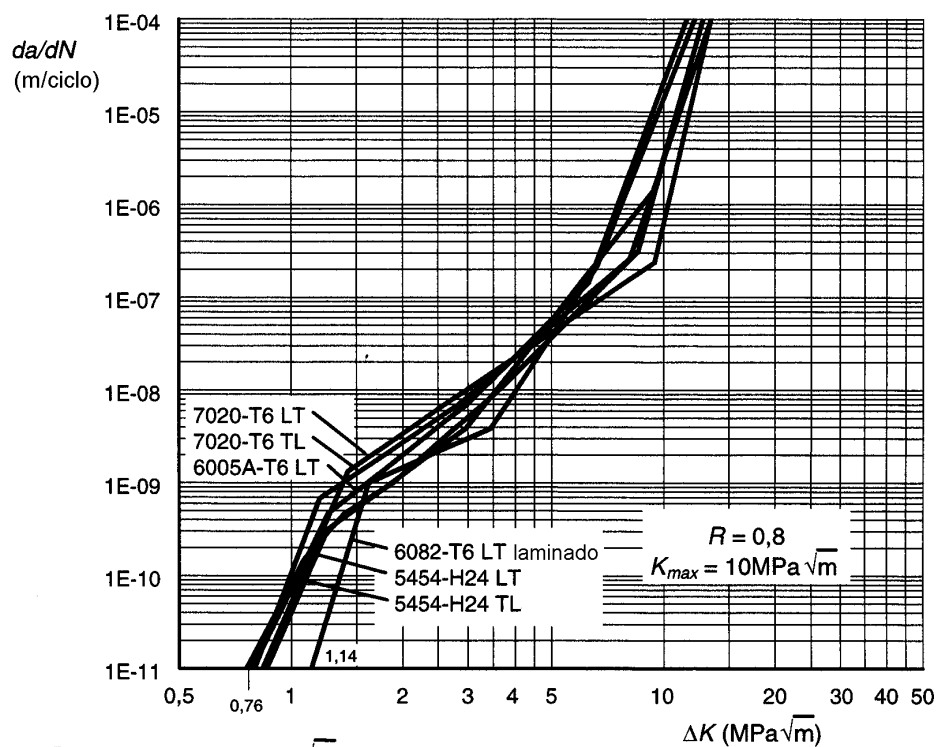
a)  $R = 0,1$ ;  $K_{max} = 10 \text{ MPa}\sqrt{m}$ b)  $R = 0,8$ ;  $K_{max} = 10 \text{ MPa}\sqrt{m}$ 

Fig. B.3.5 – Curvas típicas de crecimiento de las fisuras por fatiga para distintas aleaciones forjadas  
( $K_{máx.} = 10 \text{ MPa}\sqrt{m}$ )

**Tabla B.3.3**

**Datos de la tasa de crecimiento de las fisuras por fatiga para aleaciones forjadas,  $R = K_{\min}/K_{\max} = \text{constante}$**

Relación-R	Intensidad de tensión $\Delta K$ MPa $m^{0,5}$	m	A
a) 0,100	1,68	3,3	0,2541E-18
	1,89	3,4	0,4065E-10
	2,96	4,1	0,4886E-09
	4,75	6,6	0,2951E-12
	6,70	2,8	0,4838E-09
	19,51	5,9	0,4080E-13
	28,71	9,8	0,3072E-17
b) 0,800	0,87	10,43	0,4276E-10
	1,24	3,33	0,1959E-09
	2,27	2,98	0,2603E-09
	3,40	6,36	0,4155E-11
	5,44	8,34	0,1454E-12
	11,45	8,34	0,1454E-12

NOTA – Estos valores son envolventes de límite superior obtenidos de las curvas que se muestran en las figuras B.3.3 (a) y (b).

**Tabla B.3.4**

**Tasa de crecimiento de las fisuras por fatiga para aleaciones fundidas,  $R = K_{\min}/K_{\max} = \text{constante}$**

Relación-R	Intensidad de tensión $\Delta K$ MPa $m^{0,5}$	m	A
a) 0,100	3,28	35,46	0,5102E-29
	3,45	11,01	0,7184E-16
	4,60	6,50	0,7051E-13
	8,85	3,85	0,2260E-10
	23,07	19,12	0,3475E-31
	27,30	19,12	0,3475E-31
b) 0,800	1,42	21,24	0,6086E-14
	1,76	5,47	0,4520E-10
	5,82	12,34	0,2537E-15
	8,70	12,34	0,2537E-15

**Tabla B.3.5**

**Datos de la tasa de crecimiento de las fisuras por fatiga para aleaciones forjadas,  $K_{\max} = 10 \text{ MPa}(m)^{0,5}$  constante**

Relación-R	Intensidad de tensión $\Delta K$ MPa $m^{1/2}$	m	A
0,100	0,76	9,13	0,1211E-09
	1,26	2,77	0,5266E-09
	19,50	5,95	0,4190E-13
	28,71	8,79	0,3072E-17
	34,48	8,79	0,3072E-17
0,800	0,76	9,30	0,1268E-09
	1,22	2,84	0,4560E-09
	4,37	5,28	0,1243E-10
	6,76	11,02	0,2128E-15
	11,45	11,02	0,2128E-15

#### B.4 Función geométrica y

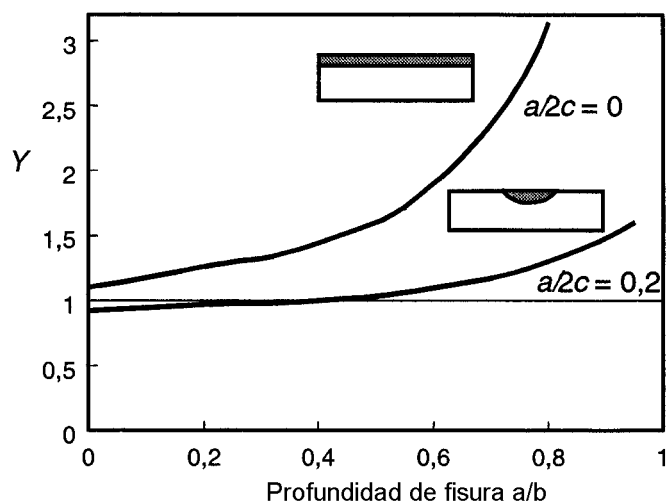
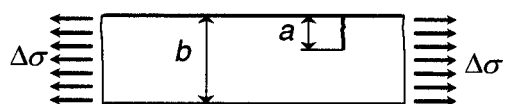
- (1) La función geométrica  $y$  depende de las dimensiones de la fisura (forma y tamaño), de las dimensiones de contorno de la superficie del material circundante y del patrón de tensiones en la zona por la que pasa la fisura.
- (2) Esta información puede obtenerse de los análisis de elementos finitos del detalle utilizando elementos de extremo de fisura. La intensidad de la tensión para diferentes longitudes de fisura se calcula utilizando el procedimiento de la integral  $J$ . Alternativamente, se puede calcular a partir del campo de desplazamiento o de tensión alrededor del extremo de la fisura, o de la energía total de deformación elástica.
- (3) Las soluciones publicadas para las geometrías comúnmente utilizadas (material base y uniones soldadas) son una fuente alternativa de valores  $y$ . Los datos de referencia se dan frecuentemente en términos de  $Y$  donde  $Y = y\pi^{-0.5}$ . Un ejemplo típico para una fisura de rotura de superficie en una chapa lisa se muestra en la figura B.4.1 a). Si la fisura está situada en un borde de soldadura en la superficie de la chapa, entonces puede hacerse un ajuste adicional para el efecto de concentración de tensiones locales utilizando el coeficiente de mayoración  $M_K$  (véase la figura B.4.1 b).
- (4) El producto de  $Y$ , para la chapa lisa, por  $M_K$ , para el borde de la soldadura, da la variación de  $y$  como el crecimiento de la fisura a través del espesor del material (véase la figura B.4.1 c).
- (5) Para más información sobre las soluciones de  $y$  publicadas, véanse las referencias B.8.1, B.8.3 y B.8.5.

#### B.5 Integración del crecimiento de la fisura

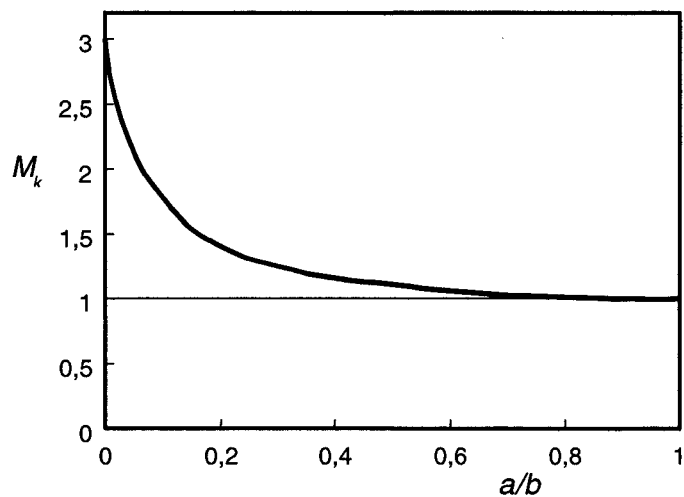
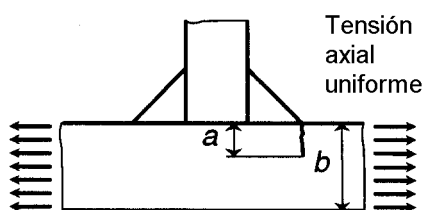
- (1) Para el caso general de un ciclograma de tensión con amplitud variable, se ha obtenido un espectro de tensiones (véase el apartado 2.2). En la práctica, el espectro completo debería aplicarse en 10 secuencias idénticas, como mínimo, con las mismas carreras de tensión y relaciones  $R$ , pero con un décimo del número de ciclos. El bloque con la mayor amplitud debería aplicarse el primero en cada secuencia (véase la figura 4.5.1). El incremento del crecimiento de la fisura se calcula utilizando el polígono de crecimiento de fisuras para la relación  $R$  apropiada, para cada bloque de ciclos de tensiones de amplitud constante.
- (2) En la zona de las soldaduras, salvo que el patrón de tensiones residuales se conozca realmente, debería utilizarse, indistintamente, una relación  $R$  alta ( $R = 0,8$ ) o una curva de crecimiento de fisura constante,  $K_{\text{máx}}$ .
- (3) La longitud de fisura " $a$ " se integra sobre esta base hasta que se alcanza la dimensión de fisura máxima  $a_2$  requerida y se calculan los valores.

#### B.6 Evaluación de la dimensión de fisura máxima $a_2$

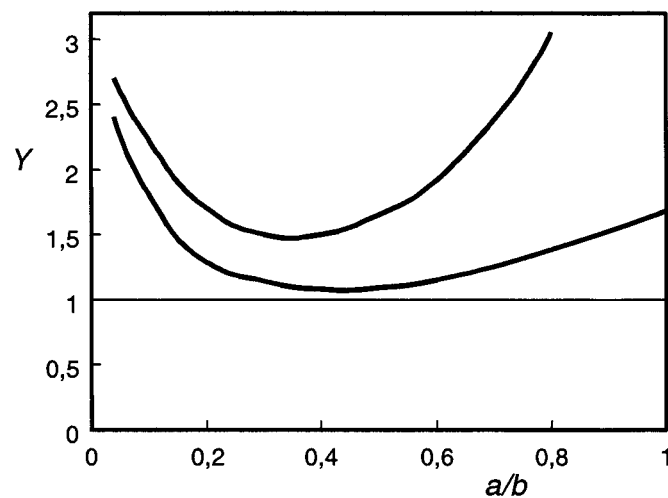
- (1) Esta dimensión se determinará, usualmente, sobre la base del desgarramiento dúctil de sección neta bajo la máxima carga de tracción aplicada con el coeficiente parcial apropiado (véase la parte 1.1 de esta norma experimental). Para más información sobre la tenacidad a la fractura (resiliencia), véanse las referencias B.8.1 y B.8.2.



a) Valor de  $Y$  para una chapa lisa



b) Valor de  $M_k$  para la concentración de tensiones en el borde de la soldadura

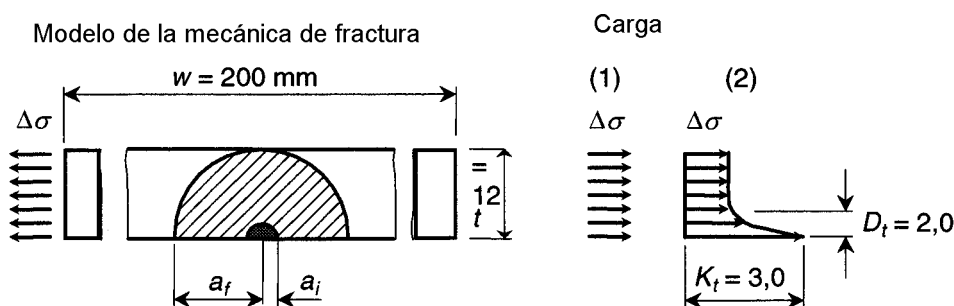


c) Valor  $Y$  para una unión soldada

Fig. B.4.1 – Utilización de soluciones geométricas estándar típicas para el valor  $y$

**B.7 Cálculo de la longitud de fisura inicial,  $a_i$ , basado en los datos FCGR de tasa de crecimiento de la fisura por fatiga del Anexo B y en las tensiones de referencia de fatiga a 2 millones de ciclos para una fisura de superficie semicircular**

- (1) La longitud de fisura por fatiga inicial calibrada,  $a_i$ , se ha determinado para las carreras de tensiones de referencia por fatiga a 2 millones de ciclos en el caso (1) de una tracción uniforme y (2) un gradiente de tensión. Para ello, se utilizó la envolvente conservadora propuesta para las curvas de crecimiento de la fisura por fatiga que se muestran en las figuras B.3.3 - B.3.5 y se listan en las tablas B.3.3 a B.3.5. El modelo de mecánica de la fractura era una fisura superficial semicircular en una chapa de 12 mm de espesor y 200 mm de anchura sometida a dos casos de carga (véase la figura B.7.1).



**Fig. B.7.1 – Geometría de la fisura y distribución de las tensiones para el cálculo de las longitudes de fisura en el caso de una fisura superficial semicircular**

- (2) Los dos casos de carga utilizados eran:

Caso de carga 1: Carrera de tensión de tracción uniforme,  $\Delta\sigma = 80 \text{ N/mm}^2$   
(Carrera de tensiones de referencia a  $2 \times 10^6$  ciclos)

Caso de carga 2: Gradiente de tensión,  $K_t = 3,0$ ,  $D_t = 2,00 \text{ mm}$ ,  $\Delta\sigma = 80 \text{ N/mm}^2$   
( $K_t$  en superficie 3,0 y 2,0 mm por debajo de la superficie, 1,0, decrecimiento parabólico, DCF5)

- (3) Se utilizaron las siguientes curvas de tasa de crecimiento de la fisura por fatiga (FCGR):

1) Aleación forjada WAA	$R = K_{\min.}/K_{\max.} = \text{constante},$	$R = 0,1 \text{ y } R = 0,8$
2) Aleación forjada WAA	$K_{\max.} = 10 \text{ MPa (m)}^{0,5} \text{ constante},$	$R = 0,1 \text{ y } R = 0,8$
3) Aleación fundida	$R = K_{\min.}/K_{\max.} = \text{constante},$	$R = 0,1 \text{ y } R = 0,8$
4) AA6005A-T6LT	$R = K_{\min.}/K_{\max.} = \text{constante},$	$R = 0,1 \text{ y } R = 0,8$
5) AA6005A-T6LT	$K_{\max.} = 10 \text{ MPa (m)}^{0,5} \text{ constante},$	$R = 0,1 \text{ y } R = 0,8$

- (4) La propagación de la fisura por fatiga se estudió en dos fases

Fase 1: Longitud inicial de fisura  $a_i = 0,05 \text{ mm}$ , longitud final de fisura,  $a_f = 2,05 \text{ mm}$

Fase 2: Longitud inicial de fisura  $a_i = 2,0 \text{ mm}$ , longitud final de fisura,  $a_f = 12 \text{ mm}$

- (5) La tensión de superficie igual a tres veces la tensión global disminuye parabólicamente, alcanza la tensión global a 2 mm por debajo de la superficie y permanece constante a través del espesor restante a la misma carrera de tensiones de referencia que en el primer caso.

La vida a fatiga es igual al crecimiento de la fisura por fatiga desde la longitud inicial de la fisura,  $a_i$ , hasta la longitud final de la fisura,  $a_f$ , dada por el espesor de la chapa. El fenómeno de la propagación de fisuras por fatiga en el caso de fisuras cortas se calcula aproximadamente utilizando las curvas FCGR de constante  $K_{\max.}$  en la zona, donde la longitud de la fisura es menor que 2 mm. De 2 mm en adelante se utilizan las curvas FCGR correspondientes a la relación  $R$  ( $R = K_{\min.}/K_{\max.}$ ) aplicada. En el caso de aleaciones de aluminio fundidas, las curvas de constante  $K_{\max.}$  se calculan aproximadamente por la curva de relación  $R = 0,8$  del conjunto de curvas FCGR de  $R$  constante.

- (6) Las tablas B.7.1 (a) y (b), para aleaciones forjadas y fundidas, respectivamente, muestran las variaciones de la dimensión de fisura inicial máxima tolerable prevista en función de la carrera de tensiones de referencia de fatiga, de la relación R y de la distribución de tensiones.
- (7) Las tablas B.7.2 a B.7.5 muestran las variaciones en la vida o duración a fatiga prevista en una carrera de tensión  $80\text{N/mm}^2$  en función de la longitud inicial de la fisura  $a_i$  y de la curva de crecimiento de la fisura por fatiga. Se han utilizado la relación R y la distribución de tensiones.

## **B.8 Referencias**

**B.8.1** IIW guidance on assessment of the fitness for purpose of welded structures. IIW Draft for Development doc. SST-1157-90.

**B.8.2** Guidance on some methods for the derivation of acceptance levels for detects in fusion welded joints. British Standard Published Document 6493:1991.

**B.8.3** Standard test method for measurement of fatigue crack growth rates, ASTM E647-93.

**B.8.4** Fatigue crack propagation in aluminium, IIW Document XIII-B77-90.

**B.8.5** Stress intensity factor equations for cracks in three-dimensional finite bodies. ASTM STP 791, 1983, ppl-238 - I -265.

**B.8.6** Graf, U: 'Fracture mechanics parameters and procedures for the fatigue behaviour estimation of welded aluminium components', 1992.

**B.8.7** Simulations of short crack and other low closure loading conditions utilising contact  $K_{\text{máx}}$   $\Delta K$ -decreasing fatigue crack growth procedures. ASTM STP 1149-1992, pp. 197-220.

**Tabla B.7.1**  
**Longitud inicial de fisura prevista  $a_i$  para distintas carreras de tensiones a  $2 \times 10^6$  ciclos**

<b>a) Aleaciones de aluminio forjadas</b>				
<b>Datos de límite superior de crecimiento de la fisura por fatiga obtenidos de las tablas B.3.3 y B.3.5</b>				
Carrera de tensiones	Tracción uniforme		Kt = 3,0, Dt = 2,0 mm, DCF5]	
Relación de intensidad de las tensiones R:	0,1	0,8	0,1	0,8
N/mm <sup>2</sup>	mm	mm	mm	mm
16	8,57	6,68	6,28	4,06
20	6,63	4,79	4,00	1,99
25	4,82	3,00	2,19	0,266
25 <sup>1)</sup>	—	—	0,11	0,11
31	3,22	1,42	0,44	0,07
31 <sup>1)</sup>	—	1,42	0,051	0,051
39 <sup>1)</sup>	1,24	0,52	0,025	0,025
49 <sup>1)</sup>	0,30	0,26	0,014	0,014
62 <sup>1)</sup>	0,14	0,13	0,0073	0,0073
77 <sup>1)</sup>	0,078	0,075	—	—
96 <sup>1)</sup>	0,042	0,042	—	—
121 <sup>1)</sup>	0,023	0,023	—	—

NOTA 1 – FCGR:  $WAK_{m\acute{a}x}$ , 10 MPa (m)<sup>0,5</sup>, una sola fase, es decir el valor de FCG desde  $a_i$  hasta el espesor de la chapa de 12 mm.

<b>b) Aleaciones de aluminio fundidas</b>				
<b>Límite superior de la tasa de crecimiento de la fisura por fatiga obtenida de la tabla B.3.4</b>				
Carrera de tensiones	Tracción uniforme		Kt = 3,0, Dt = 2,0 mm, DCF5]	
Relación de intensidad de las tensiones R:	0,1	0,8	0,1	0,8
N/mm <sup>2</sup>	mm	mm	mm	mm
16	11,99	6,46	11,99	3,33
20	11,88	4,49	11,56	1,83
25	10,99	2,97	9,09	0,391
31	8,87	1,92	5,90	0,200
39	6,51	1,17	3,32	0,1067
49	4,48	0,71	0,072	0,062
62	2,86	0,42	0,036	0,035
77 <sup>1)</sup>	1,80	—	—	—
77	0,295	0,259	0,022	0,0219
96 <sup>1)</sup>	1,082	—	—	—
96	0,162	0,159	—	—
121 <sup>1)</sup>	0,621	—	—	—
121	0,096	0,095	—	—

NOTA 1 – FCGR: CAAR constante, R = 0,1, una sola fase, es decir el valor FCG desde  $a_i$  hasta el espesor de la chapa de 12 mm.



**Tabla B.7.2**  
**Previsión de la vida de fatiga basada en los datos de límite superior de crecimiento de la fisura por fatiga**  
**para aleaciones de aluminio forjadas de las tablas B.3.3 y B.3.5**

<b>a) Tracción uniforme - Fase 2</b>					
Tipo FCGR:		$R = K_{\min.}/K_{\max.} = \text{constante}$		$K_{\max.} = 10 \text{ MPa(m)}^{0.5} \text{ constante}$	
Relación de intensidad de tensiones R:		0,1	0,8	0,1	0,8
Longitud de la fisura $a_i$ mm	Carrera de intensidad de tensiones $\text{MPa(m)}^{0.5}$	Resistencia a la fatiga, ciclos	Resistencia a la fatiga, ciclos	Resistencia a la fatiga, ciclos	Resistencia a la fatiga, ciclos
12,00	13,88	—	—	—	—
11,00	12,97	1 428	3	1 411	2
10,00	12,03	3 172	8	3 131	6
9,00	11,08	5 347	17	5 271	15
8,00	10,12	8 123	37	7 996	40
7,00	9,16	11 749	80	11 545	110
6,00	8,20	16 614	185	16 293	336
5,00	7,25	23 258	464	22 854	1 163
4,00	6,30	33 728	1 312	32 319	4 295
3,00	5,31	61 317	3 452	46 887	12 007
2,00	4,25	149 999	16 791	71 997	33 860

<b>b) Gradiente de tensión- Fase 2</b>					
Tipo FCGR:		$R = K_{\min.}/K_{\max.} = \text{constante}$		$K_{\max.} = 10 \text{ MPa(m)}^{0.5} \text{ constante}$	
Relación de intensidad de tensiones R:		0,1	0,8	0,1	0,8
Longitud de la fisura $a_i$ mm	Carrera de intensidad de tensiones $\text{MPa(m)}^{0.5}$	Resistencia a la fatiga, ciclos	Resistencia a la fatiga, ciclos	Resistencia a la fatiga, ciclos	Resistencia a la fatiga, ciclos
12,00	15,61	—	—	—	—
10,00	14,65	2 027	2	2 009	1
9,00	14,00	3 214	3	3 184	2
8,00	13,26	4 580	6	4 535	3
7,00	12,42	6 196	10	6 130	6
6,00	11,51	8 166	17	8 070	12
5,00	10,51	10 655	31	10 516	28
4,00	98,42	13 950	64	13 745	77
3,00	8,19	18 618	158	18 303	275
2,00	6,72	26 049	547	25 524	1 590

Tabla B.7.3

**Predicción de la resistencia a la fatiga basada en los datos de límite superior de crecimiento de la fisura por fatiga para las aleaciones de aluminio fundidas de la tabla B.3.4 y de la aleación de aluminio forjada AA 6005A-T6 de la tabla B.3.2 (a)**

<b>a) Tracción uniforme - Fase 2</b>					
Tipo FCGR:		CAA $R = K_{\min}/K_{\max} = \text{constante}$		AA6005 A $R = K_{\min}/K_{\max} = \text{constante}$	
Relación de intensidad de tensiones R:		0,1	0,8	0,1	0,8
Longitud de la fisura $a_i$ mm	Carrera de intensidad de tensiones MPam <sup>0,5</sup>	Resistencia a la fatiga, ciclos	Resistencia a la fatiga, ciclos	Resistencia a la fatiga, ciclos	Resistencia a la fatiga, ciclos
12,00	13,88	—	—	—	—
11,00	12,97	2 016	0	2 725	11
10,00	12,03	4 670	0	6 092	47
9,00	11,08	8 267	0	10 346	172
8,00	10,12	13 294	1	15 849	681
7,00	9,16	20 552	4	23 148	3 031
6,00	8,20	32 302	16	33 107	8 369
5,00	7,25	57 146	63	50 251	16 049
4,00	6,30	116 025	312	96 452	27 648
3,00	5,31	279 046	1 692	246 958	46 490
2,00	4,25	938 072	6 154	997 170	83 056

<b>b) Gradiente de tensión - Fase 2</b>					
Tipo FCGR:		CAA $R = K_{\min}/K_{\max} = \text{constante}$		AA6005 A $R = K_{\min}/K_{\max} = \text{constante}$	
Relación de intensidad de tensiones R:		0,1	0,8	0,1	0,8
Longitud de la fisura $a_i$ mm	Carrera de intensidad de tensiones MPam <sup>0,5</sup>	Resistencia a la fatiga, ciclos	Resistencia a la fatiga, ciclos	Resistencia a la fatiga, ciclos	Resistencia a la fatiga, ciclos
12,00	15,61	—	—	—	—
11,00	15,19	1 182	0	1 808	1
10,00	14,65	2 517	0	3 793	3
9,00	14,00	4 081	0	6 035	7
8,00	13,26	5 978	0	8 636	16
7,00	12,42	8 367	0	11 742	38
6,00	11,51	11 505	0	15 572	109
5,00	10,51	15 835	1	20 477	383
4,00	9,42	22 202	3	27 074	1 776
3,00	8,19	33 164	13	36 609	6 769
2,00	6,74	64 980	94	59 496	15 333

**Tabla B.7.4**  
**Predicción de la resistencia a la fatiga basada en los datos de límite superior de crecimiento de la fisura por fatiga para aleaciones de aluminio forjadas de la tabla B.3.3 y de la aleación de aluminio forjada AA 6005A-TG de la tabla B.3.2 (b)**

<b>a) Tracción uniforme - Fase 1</b>					
Tipo FCGR:		WAA $K_{\text{máx.}} 10 \text{ MPa(m)}^{0.5}$ constante		AA6005 A $K_{\text{máx.}} 10 \text{ MPa(m)}^{0.5}$ constante	
Relación de intensidad de tensiones R:		0,1	0,8	0,1	0,8
Longitud de la fisura $a_i$ mm	Carrera de intensidad de tensiones $\text{MPa(m)}^{0.5}$	Resistencia a la fatiga, ciclos	Resistencia a la fatiga, ciclos	Resistencia a la fatiga, ciclos	Resistencia a la fatiga, ciclos
2,05	4,30	—	—	—	—
1,85	4,07	7 139	7 527	14 355	13 409
1,65	3,83	15 518	16 395	31 119	29 712
1,45	3,58	25 527	27 031	51 031	49 116
1,25	3,32	37 759	40 089	75 212	72 732
1,05	3,03	53 169	56 627	105 451	102 341
0,85	2,72	73 424	78 502	144 855	141 042
0,65	2,38	101 802	109 388	199 471	194 885
0,45	1,98	146 015	158 005	283 365	278 004
0,25	1,47	231 455	253 422	444 329	438 619
0,05	0,66	5 561 901	5 604 650	19 522 952	19 515 242

<b>b) Gradiente de tensión - Fase 1</b>					
Tipo FCGR:		WAA $K_{\text{máx.}} 10 \text{ MPa(m)}^{0.5}$ constante		AA6005 A $K_{\text{máx.}} 10 \text{ MPa(m)}^{0.5}$ constante	
Relación de intensidad de tensiones R:		0,1	0,8	0,1	0,8
Longitud de la fisura $a_i$ mm	Carrera de intensidad de tensiones $\text{MPa(m)}^{0.5}$	Resistencia a la fatiga, ciclos	Resistencia a la fatiga, ciclos	Resistencia a la fatiga, ciclos	Resistencia a la fatiga, ciclos
2,05	6,82	—	—	—	—
1,85	6,70	1 905	673	3 995	2 335
1,65	6,61	3 877	1 395	8 124	4 760
1,45	6,55	5 923	2 170	12 405	7 290
1,25	6,48	8 015	2 978	16 778	9 883
1,05	6,36	10 188	3 847	21 316	12 591
0,85	6,08	12 553	4 869	26 240	15 567
0,65	5,71	15 315	6 243	31 964	19 112
0,45	5,14	18 765	8 350	39 063	23 666
0,25	4,10	24 176	13 294	50 033	31 961
0,05	1,99	42 254	32 843	85 148	66 467

**Tabla B.7.5**  
**Predicción de la resistencia a fatiga basada en los datos de límite superior de crecimiento de la fisura**  
**por fatiga para aleaciones de aluminio fundidas de la tabla B.3.4**

<b>a) Tracción uniforme - Fase 1</b>			
Relación de intensidad de tensiones R:		0,1	0,8
Longitud de la fisura $a_i$	Carrera de intensidad de tensiones $MPa(m)^{0,5}$	Resistencia a fatiga	Resistencia a fatiga
mm		ciclos	ciclos
2,05	4,30	—	—
1,85	4,07	398 937	1 736
1,65	3,83	1 154 022	4 119
1,45	3,58	2 688 305	7 506
1,25	3,32	7 563 667	12 541
1,05	3,03	99 972 200	20 495
0,85	2,72	3,630109E+09	34 172
0,65	2,38	3,462941E+11	60 895
0,45	1,98	1,719760E+14	125 648
0,25	1,47	3,335859E+18	1 3278 202
0,05	0,66	1,680181E+30	6,315015E+12

<b>b) Tracción uniforme - Fase 1</b>			
Relación de intensidad de tensiones R:		0,1	0,8
Longitud de la fisura $a_i$	Carrera de intensidad de tensiones $MPa(m)^{0,5}$	Resistencia a fatiga	Resistencia a fatiga
mm		ciclos	ciclos
2,05	6,82	—	—
1,85	6,70	11 723	47
1,65	6,61	24 415	101
1,45	6,55	38 268	165
1,25	6,48	52 852	235
1,05	6,36	68 809	319
0,85	6,08	88 282	442
0,65	5,71	116 339	685
0,45	5,14	163 937	1 100
0,25	4,10	335 864	2 136
0,05	1,99	1,638740E+13	17 145

## ANEXO C (Informativo)

### ENSAYOS PARA EL CÁLCULO DE LA FATIGA

#### C.1 Determinación de los datos de carga

##### C.1.1 Estructuras fijas sometidas a cargas mecánicas

- (1) Esta designación incluye estructuras tales como los puentes, los puentes-grúa y soportes de maquinaria. Estructuras similares existentes sometidas a las mismas fuentes de cargas pueden utilizarse para obtener la amplitud, la sincronización y la frecuencia de las cargas aplicadas.
- (2) Los transductores de deformación, de flecha o de aceleración fijados a componentes seleccionados que se han calibrado bien bajo cargas aplicadas conocidas pueden registrar el modelo de esfuerzos durante un periodo de trabajo típico de la estructura, utilizando un equipo de adquisición de datos analógicos o digitales. Los componentes deberían seleccionarse de manera que las magnitudes principales de carga puedan deducirse independientemente utilizando los coeficientes de influencia obtenidos a partir de las cargas de calibración.
- (3) Alternativamente, pueden montarse células de carga en las interfaces entre la carga aplicada y la estructura y obtener un registro continuo utilizando el mismo equipo.
- (4) El decremento de masa, de rigidez y logarítmico de la estructura, debería estar dentro del 30% del decremento de la estructura final, y la frecuencia propia de los modos que entrañan las fluctuaciones de deformación más grandes deberían estar dentro del 10%. Si éste no es el caso, la respuesta de carga debería verificarse posteriormente sobre una estructura hecha según el proyecto final.
- (5) La componente de frecuencia del espectro de carga obtenido del periodo de servicio debería multiplicarse por la relación entre la vida de cálculo y el periodo de servicio para obtener el espectro de cálculo final. Si procede, debería hacerse también una consideración sobre el crecimiento en intensidad o frecuencia, o una extrapolación estadística a partir del periodo medido para la vida de cálculo.

##### C.1.2 Estructuras fijas sometidas a cargas ambientales

- (1) Esto incluye estructuras tales como mástiles, chimeneas y estructuras en cubierta de plataformas marinas. Los métodos para obtener los espectros de carga son básicamente los mismos que en el apartado C.1.1 excepto que el periodo de servicio será necesario, generalmente, alargarlo debido a la necesidad de obtener un espectro representativo de las cargas ambientales tales como las cargas de viento y de las olas. Los daños por fatiga tienden a limitarse a una banda específica del espectro global de cargas debido a los efectos de resonancia inducidos por la corriente fluida. Este fenómeno tiene tendencia a ser muy específico en la dirección, en la frecuencia y en la amortiguación. Por esta razón, es necesaria una mayor precisión en la simulación tanto de las características estructurales (masa, rigidez y amortiguación) como de las propiedades aerodinámicas (geometría de la sección transversal).
- (2) Se recomienda verificar la carga posteriormente sobre una estructura como la del proyecto final si los datos de carga originales se han obtenido de estructuras con una frecuencia o amortiguación natural que difiere en más del 10%, o si la forma de la sección transversal no es idéntica.
- (3) Un espectro de cálculo final puede obtenerse en términos de dirección, intensidad y frecuencia de carga, modificado adecuadamente mediante la comparación de los datos de carga durante el periodo de recogida de datos y los registro meteorológicos obtenidos durante una vida de cálculo típica de la estructura.

### **C.1.3 Estructuras móviles**

- (1) Esto incluye estructuras tales como los grúas móviles y otras estructuras sobre ruedas, los vehículos y las estructuras flotantes. En estos tipos de estructura, la geometría de la superficie de rodaje debería estar definida adecuadamente en términos de forma y amplitud de ondulaciones y frecuencia, ya que ésta tendrá un efecto significativo sobre la carga dinámica ejercida sobre la estructura.
- (2) Otros efectos de carga, tales como la carga y descarga, pueden medirse utilizando los principios precisados en el apartado C.1.1.
- (3) Las superficies de rodaje tales como las pistas de ensayo construidas al efecto pueden utilizarse para obtener ciclogramas de carga para proyectos de prototipos. Los datos de carga procedentes de estructuras previas deberían utilizarse con precaución, dado que pequeñas diferencias, particularmente en el diseño del bogie o carretón, pueden alterar substancialmente la respuesta dinámica. Se recomienda verificar la carga sobre el proyecto final si no se han adoptado los ensayos de fatiga a escala natural (véase el capítulo C.3).

## **C.2 Obtención de los datos de tensión**

### **C.2.1 Datos del ensayo de componentes**

- (1) En elementos simples, cuando los componentes del esfuerzo principal en la pieza se pueden calcular o medir fácilmente, sería adecuado ensayar componentes que contengan el nudo o el detalle que va a analizar.
- (2) Una probeta adecuada de dimensiones idénticas a la utilizada en el cálculo o diseño final debería calibrarse utilizando un método conveniente tal como extensómetros de resistencia eléctrica, redes de franjas de moiré o técnicas termoelásticas. Los extremos del componente deberían estar suficientemente alejados de la zona local de interés para que los efectos locales en el punto de aplicación de las cargas aplicadas no afecte la distribución de tensiones en el punto. Los componentes de fuerza y los gradientes de tensión en la zona de interés deberían ser idénticos a los de la estructura en su conjunto.
- (3) Los coeficientes de influencia pueden obtenerse a partir de cargas aplicadas estáticamente que permitirán determinar la distribución de las tensiones para cualquier combinación deseada de componentes de carga. Si es necesario, los coeficientes pueden obtenerse a partir de probetas reducidas, siempre que la componente global esté igualmente reducida.

### **C.2.2 Datos del ensayo de la estructura**

- (1) En ciertos tipos de estructura tales como las cáscaras, la continuidad del material estructural puede impedir el aislamiento de los componentes con esfuerzos aplicados simples. En este caso, los datos de tensión deberían obtenerse a partir de prototipos o de estructuras de producción.
- (2) Pueden utilizarse métodos de medida similares a los empleados para el ensayo de componentes. Para la mayor parte del uso general, se recomienda aplicar las cargas estáticas como componentes independientes de manera que las tensiones puedan combinarse utilizando los coeficientes de influencia individuales para el punto respectivo. La carga debería pasar por un ciclo de acomodación antes de obtener los datos relativos a los coeficientes de influencia.

### **C.2.3 Verificación del ciclograma de tensiones**

- (1) El mismo método ya descrito en el apartado C.2.2 puede utilizarse para verificar el ciclograma de tensión en un punto durante el ensayo de prototipos bajo una carga especificada. En este caso, el equipo de adquisición de datos utilizado en el apartado C.1.1 debería utilizarse para registrar, indistintamente, el ciclograma de tensiones completo o para realizar una operación de cómputo de ciclos. Este último puede utilizarse para predecir la vida una vez que se ha seleccionado la curva  $\Delta\sigma$ -N apropiada.

- (2) Otra opción, que puede utilizarse en el caso de ciclogramas de carga inciertos, consiste en mantener el dispositivo que computa los ciclos fijado permanentemente a la estructura en servicio.

### **C.3 Determinación de los datos de endurancia**

#### **C.3.1 Ensayo de componente**

- (1) Cuando se conocen los datos del ciclograma de tensiones o del espectro de esfuerzos, el ensayo de componentes puede realizarse para verificar el diseño de las partes críticas de la estructura. El componente a ensayar debería estar fabricado con las mismas dimensiones y procedimientos que se han previsto utilizar en el diseño final. Todos estos aspectos deberían estar totalmente documentados antes de realizar la fabricación del componente para su ensayo. Además, debería documentarse cualquier método de ensayo no destructivo y los criterios de aceptación, junto con el informe del inspector sobre la calidad de los nudos o uniones que se van a ensayar.
- (2) Las probetas deberían cargarse de una manera similar a la descrita en el apartado C.1.1. Deberían utilizarse extensómetros para verificar que las fluctuaciones de tensiones coinciden con las requeridas. El posicionamiento de los extensómetros debería ser tal que les permita registrar el parámetro de tensión correcto (véase el apartado 7.5). Si el extensómetro registra la tensión nominal, debería estar situado a 10 mm, como mínimo, de cualquier borde de soldadura. Cuando el gradiente de tensión es muy fuerte, deberían utilizarse tres extensómetros para permitir realizar la interpolación correspondiente.
- (3) Para obtener una curva  $\Delta\sigma$ -N a fines de cálculo, debería ensayarse un mínimo de ocho probetas idénticas para que la endurancia se sitúe en un intervalo de  $10^4$  a  $10^7$  ciclos. Los ensayos deberían realizarse con referencia a los procedimientos normalizados apropiados. Debería calcularse una curva media y obtener una curva de cálculo que es paralela a la curva media en un diagrama bilogarítmico, pero apartada un valor no inferior a 2 desviaciones típicas ni superior al 80% del valor de la resistencia, adoptando el menor de ambos valores. Esto permite obtener variaciones en producción más amplias que las previstas normalmente en un juego o conjunto simple de probetas de fatiga.
- (4) Para los cálculos de tolerancia a los daños, debería obtenerse un registro del crecimiento de las fisuras por fatiga con los ciclos.
- (5) Alternativamente, si se conoce el ciclograma de la tensión de cálculo y si está disponible una instalación de amplitud variable, la probeta puede ensayarse bajo el ciclograma de tensión sin factorizar.

#### **C.3.2 Ensayo a escala natural**

- (1) El ensayo a escala natural puede realizarse en las condiciones de servicio reales, o en una instalación de ensayo con los componentes de carga de ensayo aplicados por métodos de control hidráulico u otros análogos.
- (2) Las condiciones de fabricación de la estructura deberían ser las mismas que para el ensayo de componentes descritas en el apartado C.3.1.
- (3) Las cargas aplicadas no deberían superar las cargas nominales.
- (4) Cuando las cargas de servicio varían de una manera aleatoria entre límites establecidos, deberían estar representadas por una serie de cargas equivalentes convenida entre el suministrador y el comprador.
- (5) Alternativamente, la(s) carga(s) de ensayo debería(n) ser igual(es) a la(s) carga(s) sin factorizar.
- (6) La aplicación de cargas a la muestra debería reproducir exactamente las condiciones de aplicación previstas para la estructura o el componente en servicio.
- (7) Los ensayos deberían continuar hasta que se produzca la rotura o hasta que la muestra sea incapaz de resistir la carga total de ensayo debido al daño sufrido.

- (8) El número de aplicaciones de la(s) carga(s) de ensayo hasta la rotura debería contarse con precisión y registrarse con observaciones del desarrollo progresivo de las fisuras.

### C.3.3 Aceptación

- (1) El criterio de aceptación depende de si a la estructura se la piden prestaciones de vida segura o de tolerancia a los daños. Véase a) y b) a continuación:

- a) Para la aceptación de un cálculo de vida segura, la vida hasta la rotura determinada mediante ensayo, ajustada para tener en cuenta el número de resultados de ensayo disponible, no debería ser menor que la vida de cálculo, definida en el apartado 2.2 como sigue:

$$T_m \geq T_L \times F \quad (C.1)$$

donde

$T_L$  es la vida media de calculo (en ciclos);

$T_m$  es la vida media hasta la rotura (en ciclos);

$F$  es un factor que depende del número efectivo de resultados de ensayo disponibles, como se define en la tabla C.1.

**Tabla C.1**  
**Factor de ensayo de fatiga F**

Resultados de ensayos	Número de muestras ensayadas							
	1	2	4	6	8	9	10	100
Todas las muestras idénticas se ensayan hasta la rotura. Rotas todas las muestras, los factores son establecidos sobre la media logarítmica suponiendo que la desviación típica de la población es igual a log 0,176	3,80	3,12	2,73	2,55	2,48	2,44	2,40	2,09
Todas las muestras idénticas se ensayan simultáneamente. Rotura de la primera muestra con desviación típica de población supuesta igual a log 0,176	3,80	2,67	2,01	1,75	1,60	1,54	1,54	0,91

- b) La aceptación de un cálculo de tolerancia a los daños depende de la vida de una fisura que alcanza un tamaño que podría ser detectado por un método de inspección que puede aplicarse en servicio. Depende también de la tasa de crecimiento de la fisura, de las consideraciones de longitud crítica de la fisura y de las implicaciones para la seguridad residual de la estructura y los costes de reparación.

- (2) Los criterios de factorización de la vida medida y de aceptación variarán de una aplicación a otra y deberían acordarse con el ingeniero responsable de la aceptación.

### C.4 Datos del crecimiento de la fisura

En el anexo B se da una guía sobre la obtención de datos relativos al crecimiento de las fisuras.



### C.5 Informe

- (1) A la conclusión de cualquier ensayo realizado de acuerdo con esta sección, debería recopilarse un certificado de ensayo tipo que contenga la siguiente información:
  - a) nombre y dirección del laboratorio de ensayo;
  - b) referencia de acreditación de la instalación de ensayo (si procede);
  - c) fecha del ensayo;
  - d) nombre(s) del/de los inspector(es);
  - e) descripción de la muestra ensayada, por medio de:
    - 1) referencia al número de serie cuando sea apropiado; o
    - 2) referencia al (a los) número(s) de plano cuando sea apropiado; o
    - 3) descripción con croquis o diagramas; o
    - 4) fotografías;
  - f) descripción de los sistemas de carga aplicados incluyendo las referencias a otras normas europeas cuando proceda;
  - g) registro de aplicaciones de carga y reacciones medidas a la carga, por ejemplo flecha, deformación, vida;
  - h) resumen de cargas y deformaciones y de las tensiones en los puntos de aceptación críticos;
  - i) registro de la endurancia (número de ciclos hasta la rotura) y modo de rotura;
  - j) registro de emplazamientos de observaciones por referencia a (e 2-4) anterior;
  - k) notas de cualquier comportamiento observado relativo a la seguridad o a la capacidad de servicio del objeto sometido al ensayo, por ejemplo, naturaleza y situación o posición de la fisuración en el ensayo de fatiga;
  - l) registro de las condiciones ambientales en el momento del ensayo cuando proceda;
  - m) declaración de la autoridad de validación para todos los equipos de medida utilizados;
  - n) definición del propósito o de los objetivos del ensayo;
  - o) declaración de cumplimiento o incumplimiento de los criterios de aceptación correspondientes, si procede;
  - p) registro de los nombres y cargos de las personas responsables del ensayo y de la redacción del informe;
  - q) número de serie del informe y fecha de publicación.

**ANEXO D (Normativo)****NIVELES DE ACEPTACIÓN DE LA INSPECCIÓN Y DE LA EJECUCIÓN****D.1 Uniones soldadas****D.1.1 Generalidades**

- (1) Estos requisitos son esenciales para garantizar la aplicación segura de las reglas de cálculo [véase el apartado 1.4(2)P].
- (2) El nivel de calidad requerido para cada unión (nudo) soldada debe obtenerse de los planos de detalle (véase el apartado 6.2).
- (3) Los niveles de calidad superiores al nivel "Normal" se indican por un número "Fat" y una flecha.
- (4) Cuando no exista un número "Fat" en una unión, debe suponerse que sólo es necesario el nivel de calidad "Normal".
- (5) Cuando en una unión exista un número "Fat", pero con una flecha en un sentido únicamente, debe suponerse que el nivel de calidad "Normal" es necesario en el otro sentido.

**D.1.2 Control de calidad del soldeo****D.1.2.2 Requisitos de calidad**

- (1) El fabricante debe cumplir los requisitos de calidad de la Norma Europea EN 729-2.

**D.1.2.2 Coordinación del soldeo**

- (1) El personal de coordinación del soldeo debe tener unos conocimientos técnicos profundos de acuerdo con la Norma Europea EN 719.

**D.1.2.3 Procedimientos de soldeo**

- (1) Los procedimientos de soldeo deben estar aprobados según la Norma Europea EN 288-4.

**D.1.2.4 Cualificación del soldador**

- (1) Los soldadores deben estar cualificados de acuerdo con la Norma Europea EN 287-2.

**D.1.2.5 Procesos de soldeo**

- (1) El control del soldeo debe estar de acuerdo con la Norma Europea EN 1011-1 y 4.

**D.1.3 Métodos y extensión o alcance de la inspección**

- (1) Los métodos y el alcance mínimo de la inspección deben estar de acuerdo con la tabla D.1 para los fines de la inspección final del trabajo, salvo que se acuerde otra cosa con el comprador.

**Tabla D.1**  
**Métodos y alcance de la inspección para las soldaduras de producción**

Etapas de inspección	Características que requieren inspección	Tipo de unión	Orientación <sup>4)</sup>	Tipo de soldadura	Nivel de calidad requerido	Número de uniones de cada tipo <sup>1)3)</sup> %				
						Líquidos penetrantes	Ultrasónicos		Radiográficos	
Etapas 1: Inmediatamente antes del soldeo Inspección visual y dimensional	Estado de la superficie, preparación y dimensiones de montaje, requisitos relativos a la plantilla de soldeo y a la sujeción por puntos	Todos	Todas	Todos	Todos	100				
Etapas 2: Después de completar el soldeo <sup>2)</sup> Inspección visual y dimensional	Geometría global de las soldaduras, discontinuidades de perfil discontinuidades de superficie	Todos	Todas	Todos	Todos	100				
Etapas 3: Después de la inspección visual Ensayos no destructivos	(a) Discontinuidades de superficie (b) Discontinuidades subsuperficiales	A tope	Transversal	A tope por ambos lados	Normal Fat 25 Fat 31 Fat 39 Fat 49					
							8 mm ≤ t < 25 mm	t ≥ 25 mm	t < 8 mm	t ≥ 8 mm
						100S/S	5	20	5 DF	—
						100	100	100	5 DF	—
						100	100	100	20	—
						100	100	100	100	—
						100	100	100	100	100
		En T, Cruciforme	Transversal	A tope por un solo lado	Sin respaldo con respaldo	Normal Fat 25	100S/S 100	100 <sup>5)</sup> 100	100 100	5 DF —
		En T, Cruciforme	Transversal	A tope	Normal Fat 25 Fat 31	100S/S 100 100	— — —	20 100 100	— — —	— — —
		En T, Cruciforme	Transversal	En ángulo	Normal Fat 25 Fat 31	100S/S 20 100	— — —	— — —	— — —	— — —
		Con solape	Transversal	En ángulo	Normal	100				
		Todos	Longitudinal	Todos	Normal Fat 25 Fat 31 Fat 39 Fat 49 Fat 62	100 WE 100 WE 100 S/S 100 S/S 100 100	— — — — — —	— — — — — —	— — — — — 5	— — — — — 20

(Continúa)

**Tabla D.1** (*Fin*)

Etapas de inspección	Características que requieren inspección	Tipo de unión	Orientación <sup>4)</sup>	Tipo de soldadura	Nivel de calidad requerido	Número de uniones de cada tipo <sup>1) 3)</sup> %
Etapla 4: Después de los ensayos no destructivos <sup>5)</sup> Ensayos destructivos	Discontinuidades subsuperficiales	A tope	Transversal	A tope	Fat 39 FAt 49	%  2 (3 macrografías) 5 (3 macrografías)
				Longitudinal	A tope	Fat 61
		En T, Cruciforme	Longitudinal	A tope	Fat 49	2 (3 macrografías)
				En ángulo	Fat 49	2 (3 macrografías + 2 ensayos de rotura)
NOTA 1 – Cuando se va a inspeccionar menos del 100% de las uniones, la muestra debería incluir, como mínimo, una soldadura de cada unión cuando se requiere un procedimiento de soldeo diferente. En el caso de ensayos destructivos, al menos deberían incluirse dos soldaduras por cada unión. En cualquier caso, en el inicio de la producción deberían inspeccionarse las cinco primeras uniones de cada tipo. En el caso de incumplimiento de la tabla D.2, deberían ensayarse cinco uniones adicionales antes de volver a la inspección parcial recomendada. Cuando no exista una recomendación específica para los ensayos no destructivos, esto se indica por un guión.						
NOTA 2 – Cuando el acceso para inspección de una unión puede ser eliminado por cualquier trabajo posterior antes de completar todo el soldeo, dicha unión debería ser inspeccionada antes de realizar el trabajo mencionado.						
NOTA 3 – W/E dentro de 20 mm del extremo de la soldadura; s/s dentro de 20 mm de una parada o de un arranque; DF se aplica solamente cuando los cordones finales de la soldadura hayan de ser mecanizadas a ras.						
NOTA 4 – "Transversal" se aplica a todas las soldaduras cuyo eje está orientado en un ángulo mayor que 45° con respecto al eje longitudinal del elemento. Las soldaduras cuyos ángulos son inferiores a 45° se tratan como longitudinales. Todas las soldaduras dentro de una longitud de 100 mm de la unión entre los elementos portantes o los puntos de carga principales se tratan como soldaduras transversales.						
NOTA – Para fines de detección, la inspección radiográfica puede utilizarse en lugar de la ultrasónica. No obstante, la inspección ultrasónica puede ser necesaria para determinar el cumplimiento de las discontinuidades con lo especificado en la tabla D.2.						
NOTA – Cuando se utilizan chapas de ensayo de prolongación para ensayos no destructivos, deberían estar situadas de manera que cumplan la nota al pie de la página 1. Cuando se muestrean componentes de producción para ensayos destructivos, debería ejecutarse el número apropiado de componentes adicionales en el momento de la fabricación.						

#### **D.1.4 Niveles de calidad**

##### **D.1.4.1 Control de calidad total**

- (1) El nivel B de la Norma Europea EN 30042 debe utilizarse como guía general para la identificación de los intervalos de tiempo relativos al control de montaje o de soldeo.

##### **D.1.4.2 Aceptación final**

- (1) Los niveles de calidad requeridos para la aceptación final de las soldaduras de producción y para todas las acciones correctoras debe estar de acuerdo con la tabla D.2, con el fin de evitar cualquier reparación innecesaria.

**Tabla D.2**  
**Niveles de aceptación para las soldaduras de producción**

Característica	Parámetro	Tipo de soldadura	Condiciones particulares <sup>1)</sup>	Referencia a la figura D.2.1	Dimensiones	Criterios de aceptación según el nivel de calidad requerido <sup>2), 3) 4)</sup>						Acciones correctoras <sup>5)</sup>
						Normal	Fat 25	Fat 31	Fat 39	Fat 49	Fat 62	
Geometría global de la soldadura	Emplazamiento <sup>6)</sup>	Todas				D ± 10	D ± 5	D ± 5	D ± 5	D ± 5	D ± 5	E
	Tipo de soldadura	Todas				D	D	D	D	D	D	E
	Extensión (longitud)	Todas				D + 10 - 0	D + 10 - 0	D + 10	D + 10 - 0	D + 10 - 0	D + 10 - 0	E
Discontinuidades de perfil	Espesor de garganta real	Todas		i, ii, iii	a, ≥ a, ≤	D (50) D + 5	D D + 4	D D + 4	D D + 3	D D + 3	D D + 3	R DS
	Longitud del lado	En ángulo		i	z ≥	D (50)	D (50)	D (50)	D	D	D	R
	Ángulo del pie o borde (interfaz y entrecordón)	Todas	Transversal Longitudinal	i, ii i, ii	θ ≥ θ ≥	90° 90°	120° 90°	150° 90°	165° 90°	175° 90°	– 175°	DS/R DS/R
	Sobreespesor excesivo	A tope	Transversal Longitudinal	ii ii	h ≤ h ≤	6 6	5 6	4 5	2 4	0,5 3	– 0,5	DS DS
	Abertura incompleta o raíz cóncava	A tope	Transversal Longitudinal	ii ii	h ≤ h ≤	0 (50) 0,1 t	NP 0,1t	NP 0,1t	NP 0,1t	NP 0,05t	– NP	R R
	Defecto de alineación	A tope Todas Todas	Transversal, a tope Transversal, en cruz Longitudinal	iv v iv, v	h ≤ h ≤ h ≤	D + 0,2t D + 0,4t D + 0,4t	D + 0,1t D + 0,2t D + 0,4t	D + 0,05t – D + 0,4t	D + 0,05t – D + 0,4t	D + 0,05t – D + 0,4t	– – D + 0,4t	E E E
	Mordedura <sup>7)</sup>	Todas En ángulo Todas	Transversal (no unión de solape) Transversal (unión de solape) Longitudinal	iv, v iv iv, v	h <sub>1</sub> + h <sub>2</sub> ≤ l ≤ h <sub>1</sub> + h <sub>2</sub> ≤ l ≤ h <sub>1</sub> + h <sub>2</sub> ≤	0,05t 25 0,03t 10 0,1t	0,05t 25 NP NP 0,1t	0,03t 10 – – 0,1t	NP NP – – 0,1t	NP NP – – 0,05t	– – – – 0,05t	R R R R R
Discontinuidades de rotura de superficie	Falta de penetración en la raíz	S/S a tope	Transversal Longitudinal	iii iii	h ≤ h ≤	D + 0,05t (50) D + 0,01t (50)	– D + 0,1t	– D + 0,1t	– D + 0,05t	– D + 0,05t	– –	R R
	Porosidad	Todas	Transversal Longitudinal	vi vi	d ≤ Σd ≤ d ≤ Σd ≤	2 10 [100] 2 20 [100]	1 5 [100] 1 10 [100]	1 5 [100] 1 5 [100]	NP NP NP NP	NP NP NP NP	– – NP NP	R R R R
	Falta de fusión	Todas		vii	l ≤	NP	NP	NP	NP	NP	NP	R
	Fisuras	Todas			l ≤	NP	NP	NP	NP	NP	NP	R

(Continúa)

**Tabla D.2 (Fin)**  
**Niveles de aceptación para las soldaduras de producción**

Característica	Parámetro	Tipo de soldadura	Condiciones particulares <sup>1)</sup>		Referencia a la figura D.2.1	Dimensiones	Criterios de aceptación según el nivel de calidad requerido <sup>2) 3) 4)</sup>						Acciones correctoras <sup>5)</sup>	
							Normal (Fat 20)	Fat 25	Fat 31	Fat 39	Fat 49	Fat 62		
Discontinuidades subsuperficiales	Falta de penetración por fusión en la raíz	A tope	Todas		vii, viii	$h \leq$	3	3	3	3	3	NP	R	
			Transversal	Profundidad total $h^1 \leq 6$	vii, viii	$\Sigma l \leq$	1,5t[100]	1,5t[100]	NP	NP	NP	NP	R	
					$l \leq$	10	5	NP	NP	NP	NP	R		
					$l^1 \geq$	10	10	NP	NP	NP	NP	R		
					$l \leq$	NL	10	5	NP	NP	NP	R		
			$l^1 \geq$	NL	10	10	NP	NP	NP	R				
	Longitudinal	Profundidad total $h^1 \leq 6$	vii, viii	$\Sigma l \leq$	3t[100]	1,5t[100]	1,5t[100]	1,5t[100]	1,5t[100]	NP	R			
			vii, viii	$l \leq$	NL	NL	10	5	NP	NP	R			
				$l^1 \geq$	NL	NL	NL	NL	10	5	NP	R		
				$l \leq$	NL	NL	NL	NL	NL	NL	NL	R		
			$l^1 \geq$	NL	NL	NL	NL	NL	NL	NL	R			
Separación en la raíz	En ángulo/ PP A tope			1,v	$h \leq$	2 (100) 3	2	2	2	2	1	R		
Inclusiones de cobre	Todas					NA	NA	NP	NP	NP	NP	R		
Inclusiones sólidas y otras	Todas				$d \leq$	NA	NA	2	1	NP	NP	R		
Porosidad	Todas			vi, vii	$d \leq$ $A \leq$	NA	NA	2 3%	1 2%	1 1%	NP NP	R R		
Fisuras	Todas					NP	NP	NP	NP	NP	NP	R		
NOTA 1 –	Para la definición de la orientación véase la nota 4 a pie de página en la tabla D.1.				<b>Leyenda:</b>				SS	Por una sola cara (incluyendo soldaduras a tope en perfiles huecos).				
NOTA 2 –	Todas las dimensiones están en milímetros, salvo que se indique lo contrario.				D	Dimensión especificada en los planos.				( )	Longitud de soldadura, sobre la que puede promediarse la medida (en mm).			
NOTA 3 –	El espesor se refiere al espesor mínimo del elemento en la soldadura respectiva. Para espesores mayores de 20 mm, el valor de t se toma igual a 20. Cuando la dimensión permitida h de una discontinuidad está relacionada con t, el valor máximo admitido no será, en ningún caso, inferior a 0,3 mm.				DS	Amolado suave.								
					E	Referencia al proyectista.				[ ]	Longitud de soldadura, sobre la que se hace la suma [en mm].			
					NL	Sin límite.								
					NP	NO permitido (se aplica a discontinuidades que son detectables por métodos de ensayo no destructivos que se dan en tabla D.1).				NA	No aplicable normalmente (véase la tabla D.1).			
NOTA 4 –	Cuando se da más de un valor, se aplican ambos.									-	No aplicable (véanse las tablas 5.1.2 y 5.1.3).			
NOTA 5 –	Véase la nota 1 de la tabla D.1.				PP	Penetración parcial.				A	Porcentaje de área (de porosidad) observada en la radiografía en 100 mm cualquiera de longitud soldada.			
NOTA 6 –	Sometido a todos los restantes requisitos de emplazamiento.				R	Reparación por soldeo según un procedimiento cualificado.								
NOTA 7 –	"con solape" se aplica a toda fijación soldada en ángulo cuya longitud en sentido longitudinal pase de 50 mm.									1	Longitud paralela al eje de la soldadura.			
NOTA 8 –	Cualquier línea recta paralela al eje de la soldadura.													

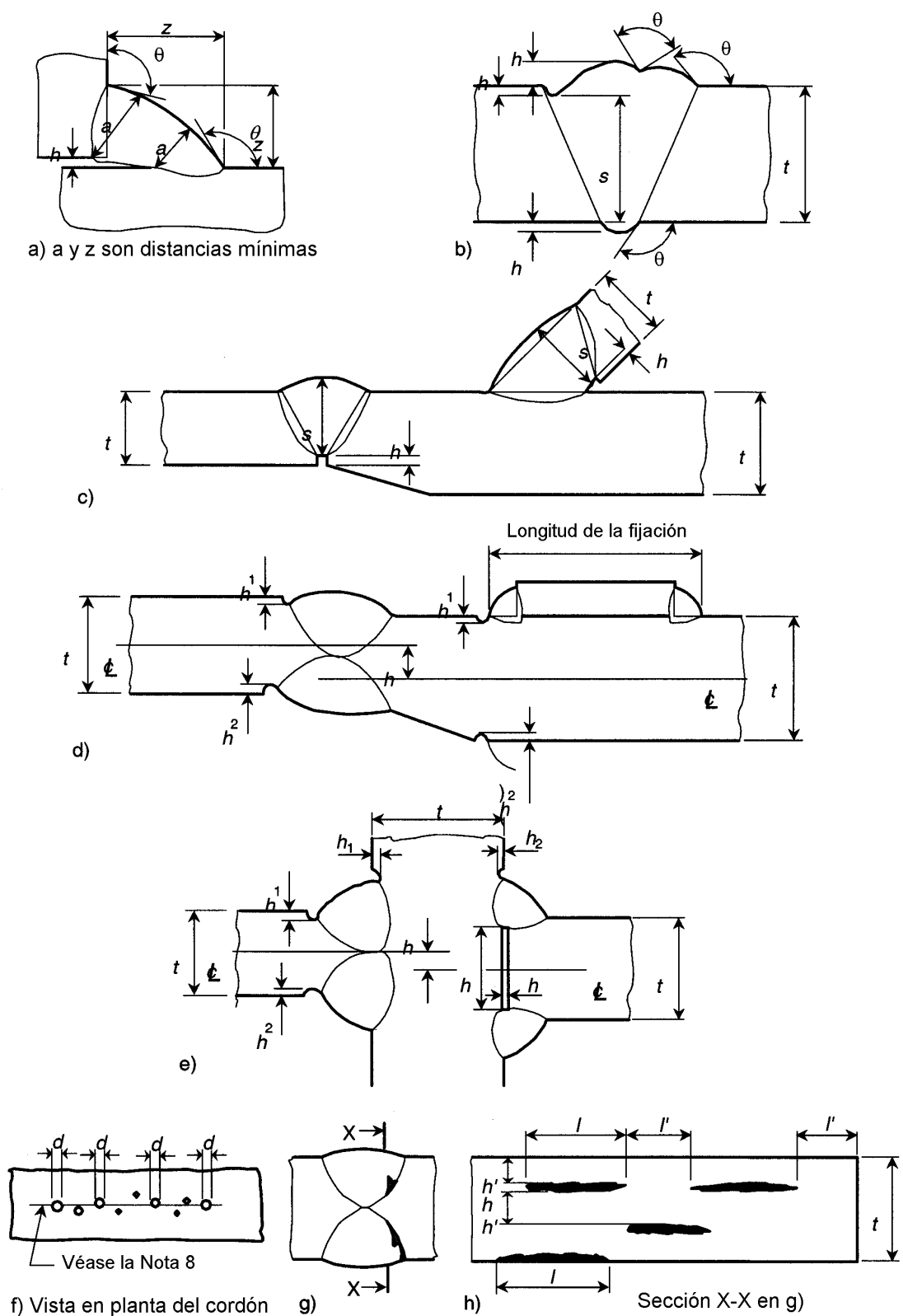


Fig. D.2.1 – Dimensiones de las discontinuidades de soldadura



## D.2 Piezas fundidas

### D.2.1 Métodos y alcance de inspección

- (1) Los métodos y el alcance mínimo de la inspección deben estar de acuerdo con la tabla D.3 para los fines de la inspección final del trabajo.

**Tabla D.3**  
**Campo de aplicación de la inspección para piezas fundidas**

Nivel de calidad requerido	Tipo de inspección	
	De Superficie	Volumétrica
Normal	100% visual	—
Fat 25	100% líquido penetrantes	10% Radiografía
Fat 31	100% líquido penetrantes	100% Radiografía
Fat 39	100% líquido penetrantes	100% Radiografía
Fat 49	100% líquido penetrantes	100% Radiografía
Fat 62	100% líquido penetrantes	100% Radiografía
Fat 77	100% líquido penetrantes	100% Radiografía

### D.2.2 Aceptación final

- (1) Los niveles de calidad requeridos para la aceptación final de las piezas fundidas deben ser los que se dan en la tabla D.4.

**Tabla D.4**  
**Niveles de calidad para piezas fundidas**

Nivel de calidad requerido	Tipo de discontinuidad	
	Fisuras	Dimensión máxima de los poros (mm)
Normal	No permitidas	3,0
Fat 25	No permitidas	2,2
Fat 31	No permitidas	1,5
Fat 39	No permitidas	0,9
Fat 49	No permitidas	0,5
Fat 62	No permitidas	0,3
Fat 77	No permitidas	0,2

**ANEXO E (Informativo)****MEJORA DE LA RESISTENCIA A LA FATIGA DE LAS SOLDADURAS****E.1 Generalidades**

- (1) En los casos en que las fisuras por fatiga se inicien en el borde de la soldadura, la capacidad de las uniones soldadas puede mejorarse. En la práctica, tales métodos se utilizan normalmente con las soldaduras sometidas a las tensiones más altas o para mejorar las soldaduras que tienen una resistencia débil.
- (2) En los casos en los que se utilizan técnicas de mejora especificadas, puede obtenerse una mejora del 30% de la rotura por fatiga en un borde de soldadura. La mejora máxima se logra por la combinación de dos métodos tales como el mecanizado (o amolado) y el martillado con los que puede alcanzarse una doble mejora de los métodos individuales.
- (3) Aquí se consideran los métodos siguientes:
  - mecanización o amolado;
  - repaso por soldeo TIG o con plasma;
  - martillado (granallado, martillado con aguja o con martillo);
- (4) Para todos los métodos, deberían considerarse los aspectos siguientes:
  - debe estar disponible un procedimiento adecuado de trabajo;
  - antes de aplicar las medidas de mejora, uno debe asegurarse de que no están presentes fisuras de superficie en los emplazamientos críticos. Esto debería efectuarse por líquidos penetrantes u otros métodos END adecuados;
  - para una mejora en la zona de la vida a fatiga a medio y a largo plazo, la capacidad puede mejorarse en un 30% sobre la medida por la carrera de tensiones;
  - en la zona de vida a corto plazo, donde las tensiones locales superan el límite elástico, el periodo de iniciación es una fracción pequeña (independientemente de la entalla) y la mejora es entonces pequeña. Por lo tanto, no existirá mejora en el cálculo a  $10^5$  ciclos. (La curva  $\Delta\sigma - N$  se gira entonces con valores fijos a  $10^5$ );
  - los emplazamientos potenciales de rotura por fatiga, distintos de los que ya se estén mejorando, deberían considerarse: p. ej. si se mejora la zona del pie de la soldadura, los emplazamientos tales como la garganta de la soldadura o las fisuras internas (penetración parcial) podrían constituir el factor de limitación para la vida a la fatiga y debería considerarse la utilidad de los métodos de mejora;
  - en condiciones de corrosión libre en el agua, la mejora se pierde frecuentemente. Los métodos que implican tensiones de compresión (martillado) son menos sensibles. Por lo tanto, si hay que alcanzar la mejora es necesaria una protección contra la corrosión.

**E.2 Mecanizado o amolado**

- (1) El mecanizado puede realizarse con una desbarbadora giratoria de alta velocidad y tiene las ventajas de que produce una definición más precisa del redondeado, deja marcas paralelas a la dirección de la tensión y permite el acceso a los ángulos o esquinas. Alternativamente, puede utilizarse una amoladora de disco si el acceso lo permite, véase la figura E.2.1. En ambos casos, el radio de la cabeza o de la arista de corte debe ser elegido correctamente.

- (2) Para garantizar la eliminación de intrusionas, etc., el desbarbado ha de alcanzar hasta una profundidad de 0,5 mm, como mínimo, por debajo de la parte inferior de cualquier mordedura visible, etc., etc., pero no debería superar 2 mm o el 5% del espesor de la chapa, adoptándose el menor de ambos valores, véase la figura E.2.2. La débil reducción del espesor de la chapa, y el aumento correspondiente de la tensión, es insignificante para espesores de 10 mm o superiores. En el caso de soldaduras de pasadas múltiples deberían tratarse, al menos, dos bordes de soldadura. También, debería ponerse cuidado para garantizar que se mantiene el espesor de garganta requerido.

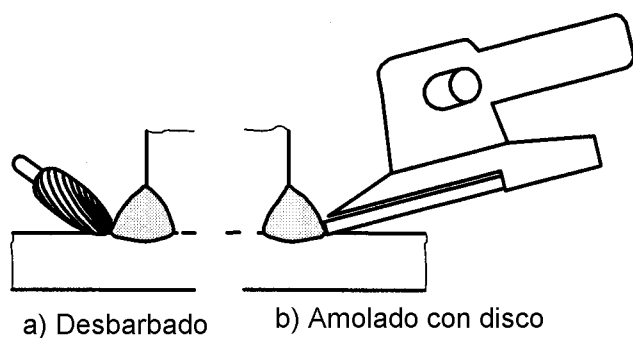


Fig. E.2.1 – Técnicas de mecanizado/amolado

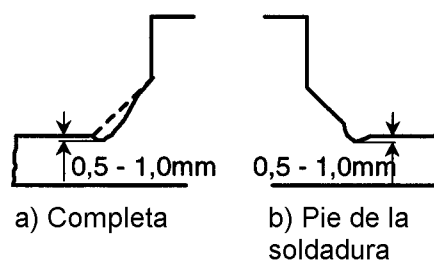


Fig. E.2.2 – Geometrías de perfil

### E.3 Repaso por TIG o plasma

- (1) Aunque el soldeo TIG es sólo un proceso práctico para estructuras fabricadas con chapas de 4 mm o menos de espesor, se puede utilizar para mejorar la resistencia a la fatiga en los casos en que el borde de soldadura es el emplazamiento crítico. Durante la nueva fusión de la zona del borde existente, las inclusiones y mordeduras pueden eliminarse y el radio del borde puede aumentarse, lo que reduce el factor de concentración de tensiones locales.
- (2) El equipo estándar de repaso TIG puede utilizarse, sin la adición de material de aportación alguno. El repaso por arco TIG es sensible a la habilidad del operario y es importante tener las superficies limpias para evitar los poros. Deben elaborarse procedimientos detallados.
- (3) La mejora debe verificarse mediante ensayos.

### E.4 Martillado

- (1) Los mayores beneficios se obtienen, normalmente, con métodos en los que se introducen tensiones residuales de compresión. Los métodos más comunes son el martillado con martillo, el martillado con aguja y el granallado. El martillado es un proceso de deformación en frío en el que el impacto de una herramienta deforma plásticamente la superficie. El material circundante (elástico) comprimirá el volumen deformado. Las altas cargas de servicio de compresión pueden reducir el nivel de las tensiones residuales y deben tenerse en cuenta cuando se aplica el espectro de cargas aleatorias.
- (2) Deberían elaborarse procedimientos para todos los métodos de martillado: Pasadas, deformación del borde de la soldadura, e indentación (huella) para el martillado con martillo y con haz de alambres; intensidad, superficie cubierta y deformación de banda Almen para el granallado.

## ANEXO F (Informativo)

### FATIGA OLIGOCÍCLICA

#### F.1 Introducción

- (1) Cuando carreras de tensiones altas aplicadas menos de  $10^5$  veces producen daños significativos, las curvas  $\Delta\sigma$ -N dadas en el apartado 5.2 para ciertos detalles y relaciones - R pueden ser innecesariamente conservadoras. Los datos que se dan a continuación pueden utilizarse para obtener una predicción de vida más precisa.

#### F.2 Modificación de las curvas $\Delta\sigma$ -N

- (1) Para una endurance comprendida entre  $10^3$  y  $10^5$  ciclos, la curva de cálculo de fatiga puede definirse así:

$$N_i = \left( \frac{\Delta\sigma_c}{\Delta\sigma_i} \right) \times 20^{m_0/m_1} \times 10^5 \quad (F.1)$$

donde

$N_i$  es el número calculado de ciclos hasta la rotura de una carrera de tensiones  $\Delta\sigma_i$ ;

$\Delta\sigma_c$  es el valor de referencia de resistencia a la fatiga a  $2 \times 10^6$  ciclos en función de la categoría del detalle;

$\Delta\sigma_i$  es la carrera de tensiones principales en el detalle, y es constante para todos los ciclos;

$m_0$  es la pendiente logarítmica inversa de la curva  $\Delta\sigma$ -N en el intervalo de  $10^3$  y  $10^5$  ciclos, en función de la categoría del detalle, de la aleación y del valor R;

$m_1$  es la pendiente logarítmica inversa de la curva  $\Delta\sigma$  - N, en función de la categoría del detalle, véanse las tablas 5.1.1 a 5.1.5 ó 5.2.1.

- (2) Véase también el apartado 5.3.4 (1).

#### F.3 Datos de ensayo

- (1) La tabla F.3.1 da valores de  $m_0$  para detalles seleccionados de ciertos productos de aleación forjada que se han obtenido de datos de ensayos.
- (2) Para relaciones R ente  $R = -1$  y  $R = 0$ , puede utilizarse una interpolación lineal de valor inverso  $m_0$ .
- (3) El valor de R puede basarse sólo en las tensiones aplicadas, sin tener en cuenta las tensiones residuales.

**Tabla F.3.1**  
**Valores de  $m_0$**

Número del tipo de detalle	Tabla de la categoría de detalle	Aleaciones	Tipo de producto	$m_0$	
				$R = -1$	$R \geq 0$
1,1	5.1.1	7020	Chapa fina y plancha	5,0	$m_1$
1,2		6000 series	Chapa fina y plancha	4,0	$m_1$
1,3		7020	Extrusiones conformadas	4,0	$m_1$
1,4		6000 series	Extrusiones conformadas	4,0	$m_1$
3,6	5.1.3	} como para la tabla 1.1.1	} como para la tabla 1.1.1	3,0	$m_1$
3,7				3,0	$m_1$
3,8				3,0	$m_1$
3,9				3,0	$m_1$
4,1	5.1.4	7020	} como para la tabla 1.1.1	3,3	$m_1$
4,2		7020		3,3	$m_1$
4,3		7020		3,3	$m_1$
4,4		7020		3,3	$m_1$

## ANEXO G (Informativo)

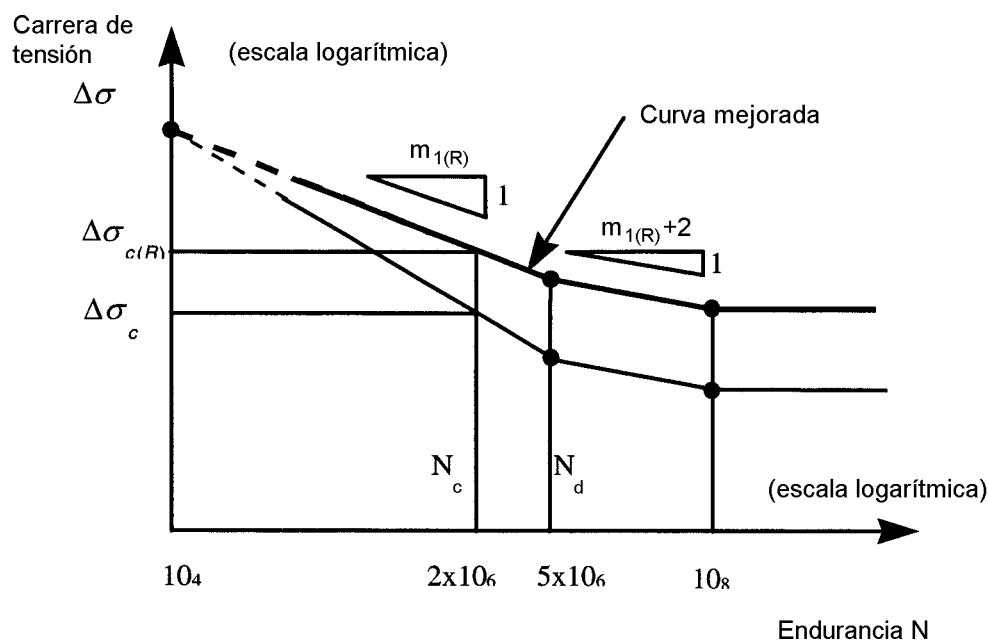
## INFLUENCIA DE LA RELACIÓN R

## G.1 Elevación de la resistencia a la fatiga

- (1) Para valores de relación de tensión aplicados inferiores a  $R = +0,5$ , la resistencia de referencia a la fatiga  $\Delta\sigma_c$  puede mejorarse por un factor de la relación R,  $f(R)$ , y la resistencia de referencia a la fatiga  $\Delta\sigma_{c(R)}$  a  $2 \times 10^6$  ciclos mejorada viene dada por

$$\Delta\sigma_{c(R)} = f(R) \Delta\sigma_c \quad (G.1)$$

- (2) El valor de  $f(R)$  depende del valor de R y del tipo de componente y de detalle (véase el apartado G.2).
- (3) La resistencia a fatiga a  $10^4$  ciclos no debería elevarse.
- (4) La pendiente básica  $m_{1(R)}$  de las curvas  $\Delta\sigma$ -N mejoradas debe ajustarse de acuerdo con los valores de  $\Delta\sigma_c$  a  $10^4$  y  $2 \times 10^6$  ciclos (véase la figura G.1.1).

Fig. G.1.1 – Mejora de la curva  $\Delta\sigma$ -N

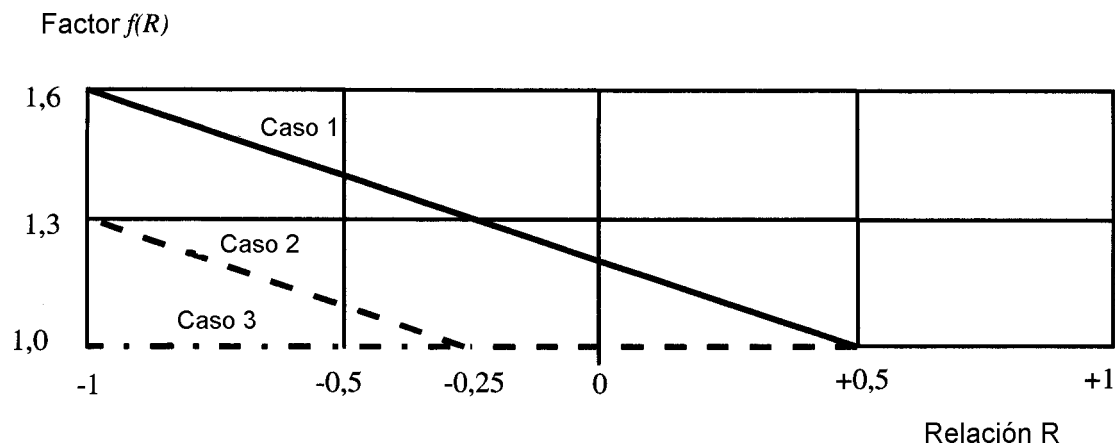
## G.2 Casos de mejora

## G.2.1 Caso 1

- (1) Este caso se aplica a los emplazamientos de iniciación en el material de base y en productos forjados en elementos estructurales alejados de las uniones. Puede aplicarse también a estructuras en las que se ha producido una relajación de tensiones efectiva.
- (2) Además de las tensiones aplicadas, debe contarse con cualquier pre-carga o falta de fijación.
- (3) Los valores de  $f(R)$  se dan en la tabla G.2.1 y en la figura G.2.1.

**Tabla G.2.1**  
**Valores de  $f(R)$  para el Caso 1**

R	$f(R)$
$< -1$	1,6
$> -1$ $< +0,5$	$1,2 - 0,4R$
$> +0,5$	1,0



**Figura G.2.1 – Factor de elevación de la resistencia  $f(R)$  a  $2 \times 10^2$  ciclos**

### G.2.2 Caso 2

- (1) Se aplica a emplazamientos de iniciación asociados con uniones fijadas mecánicamente o soldadas en elementos estructurales simples, donde las tensiones residuales  $\sigma_{res}$  se han establecido, teniendo en cuenta cualquier precarga o falta de fijación.
- (2) La relación - R efectiva  $R_{eff}$  debería estimarse así:  

$$R_{eff} = (2\sigma_{res} - \Delta\sigma) / (2\sigma_{res} + \Delta\sigma)$$

donde

$\Delta\sigma$  es la carrera de tensiones aplicada.
- (3) Los valores de  $f(R)$  se dan en la tabla G.2.2 y en la figura G.2.1.

**Tabla G.2.2**  
**Valores de  $f(R)$  para el Caso 2**

$R_{eff}$	$f(R)$
$< -1$	1,3
$> -1$ $< -0,25$	$0,9 - 0,4R$
$> -0,25$	1,0

### G.2.3 Caso 3

- (1) Este caso se aplica a montajes estructurales complejos donde no es practicable el control de las tensiones residuales.
- (2) En este caso,  $f(R)$  debería considerarse igual a la unidad para todas las relaciones R.

---

---

**AENOR** Asociación Española de  
Normalización y Certificación

Dirección C Génova, 6  
28004 MADRID-España

Teléfono 91 432 60 00

Fax 91 310 40 32