14

Diseño para Fatiga

Instituto Técnico
de la Estructura
en Acero



ITEA

ÍNDICE DEL TOMO 14

DISEÑO PARA FATIGA

Lección 14.1: Introducción básica a la fatiga 1

1 INTRODUCCIÓN 4
1.1 Naturaleza de la fatiga 4
1.2 Como afecta la fatiga a las soldaduras 4
1.3 Proceso de crecimiento de las fisuras 5
2 RESISTENCIA A LA FATIGA 6
2.1 Definición de la resistencia a la fatiga y de la vida de fatiga 6
2.2 Factores primarios que afectan a la vida de la fatiga 6
2.3 Curva S-N 6
2.4 Efecto de la tensión media 7
2.5 Efecto de la resistencia mecánica 7
3 CLASIFICACIÓN DE LAS UNIONES 8
3.1 Clases de uniones 8
3.2 Tipos de uniones 8
3.3 Tipos de uniones más comunes 9
4 PARÁMETROS DE TENSIÓN POR FATIGA 11
4.1 Área de tensión 11
4.2 Cálculo del rango de tensión $\Delta\sigma$ 11
4.3 Efectos de las concentraciones de tensión geométricas y otros efectos 11
4.4 Efectos secundarios 11
5 CARGAS POR FATIGA 12
5.1 Tipos de carga 12
5.2 Recuento de ciclos 12

6 CÁLCULO DE DAÑOS 14
7 RESUMEN FINAL 15
8 BIBLIOGRAFÍA 15
9 BIBLIOGRAFÍA ADICIONAL 15

Lección 14.2: Introducción avanzada a la fatiga 17

1 INTRODUCCIÓN 20
2 CARACTERÍSTICAS DE LAS SUPERFICIES DE ROTURA POR FATIGA 21
3 NATURALEZA DEL PROCESO DE LA FATIGA 24
4 CARGA DE FATIGA 27
5 DATOS DE LA VIDA A LA FATIGA 29
5.1 Curvas de la resistencia a fatiga 29
5.2 Ensayos de fatiga 31
5.3 Presentación de los datos de los ensayos de fatiga 32
6 FACTORES PRIMARIOS QUE AFECTAN A LA VIDA DE LA FATIGA 34
6.1 Efectos del material 34
6.2 Efectos de la tensión media 36
6.3 Efectos de la entalladura 37
6.4 Efectos del tamaño 39
6.5 Efectos del acabado superficial 41
6.6 Efectos de la tensión residual 42
6.7 Efectos de la corrosión 43
7 PROCEDIMIENTO DE RECUENTO DE CICLOS PARA CARGAS DE AMPLITUD VARIABLE 45
7.1 El método del embalse 45
7.2 El método de recuento de la "Recogida de lluvia" 47
7.3 Métodos del diagrama de superación 49
7.4 Carga en bloque 51
7.5 Aspectos de la frecuencia y del espectro 51

8 RESUMEN FINAL 54
9 BIBLIOGRAFÍA 54

Lección 14.3: Efecto del trabajo del hombre sobre la resistencia a la fatiga de la soldadura longitudinal y transversal 57

1 INTRODUCCIÓN 60
2 SOLDADURAS LONGITUDINALES 62
3 SOLDADURAS A TOPE TRANSVERSALES 63
3.1 Efectos de los defectos internos 64
3.2 Efecto del procedimiento de soldadura 65
4 OTRAS SOLDADURAS 68
4.1 Generalidades 68
4.2 Soldaduras en ángulo transversales 68
4.3 Uniones con carga y sin carga 70
5 INSPECCIÓN 71
5.1 Inspección de las soldaduras longitudinales 71
5.2 Inspección de las soldaduras a tope transversales 72
5.3 Inspección de otras soldaduras 73
6 ELECCIÓN DE CALIDAD 74
7 CONSIDERACIONES DEL DISEÑO 75
8 RESUMEN FINAL 76
9 BIBLIOGRAFÍA 76
10 BIBLIOGRAFÍA ADICIONAL 76

Lección 14.4.1: Comportamiento de la fatiga en secciones huecas (I) 77

1 INTRODUCCIÓN 80
2 ENFOQUE DE LA TENSIÓN GEOMÉTRICA O DE LA TENSIÓN DEL PUNTO CRÍTICO 81
2.1 Definición del coeficiente geométrico de la tensión y del coeficiente de concentración de tensiones 81
2.2 Definición de la vida a la fatiga 83

2.3 Efecto del espesor 84
2.4 Límite de fatiga 85
2.5 Clase de fatiga y curvas $\Delta\sigma$-N 85
2.6 Fatiga de ciclo pequeño 87
2.7 Procedimiento de cálculo 87
3 MÉTODO DE CLASIFICACIÓN 89
4 OTROS MÉTODOS 90
4.1 Método de la tensión de comparación 90
4.2 Método del esfuerzo cortante a la penetración 90
4.3 Relación a la resistencia estática 90
5 EFECTO DE LOS MOMENTOS DE FLEXIÓN SECUNDARIOS 91
6 CONEXIONES SIMPLES Y UNIONES 93
7 COEFICIENTES PARCIALES DE SEGURIDAD 94
8 DAÑO ACUMULATIVO 95
9 RESUMEN FINAL 96
10 BIBLIOGRAFÍA 96

Lección 14.4.2: Comportamiento de la fatiga en secciones huecas (II) ... 97

1 INTRODUCCIÓN 100
2 MODELACIÓN DE LA ESTRUCTURA 101
3 CONEXIONES EXTREMO CON EXTREMO Y UNIONES 104
4 MÉTODO DE LA TENSIÓN GEOMÉTRICA 108
4.1 Curvas de referencia 108
4.2 Determinación de las tensiones geométricas mediante el modelo F.E. 108
4.3 Coeficiente de concentración de tensiones 109
4.4 Vida a la fatiga 113
5 MÉTODO DE CLASIFICACIÓN 119
6 REQUISITOS GENERALES PARA LAS SOLDADURAS 121
7 RESUMEN FINAL 122
8 BIBLIOGRAFÍA 122
9 BIBLIOGRAFÍA ADICIONAL 122

Problema Resuelto 14.3 (i) y (ii): Determinación de la resistencia a la fatiga de uniones de sección hueca mediante el método de la tensión geométrica/determinación de la resistencia a la fatiga de uniones de sección hueca de acuerdo con Eurocódigo 3 mediante el método de clasificación 123

1 DETERMINACIÓN DE LA RESISTENCIA A LA FATIGA DE UNIONES DE SECCIÓN HUECA MEDIANTE EL MÉTODO DE LA TENSIÓN GEOMÉTRICA 125

2 DETERMINACIÓN DE LA RESISTENCIA A LA FATIGA DE UNIONES DE SECCIÓN HUECA DE ACUERDO CON EUROCÓDIGO 3 MEDIANTE EL MÉTODO DE CLASIFICACIÓN 128

Lección 14.5: Técnicas de mejora en uniones soldadas 131

1 INTRODUCCIÓN 134
1.1 Generalidades 134
1.2 El potencial para la mejora de la resistencia a la fatiga 134
2 MÉTODOS DE MEJORA – PRINCIPIOS OPERATIVOS 137
3 ALGUNOS MÉTODOS DE MEJORA Y SU EFECTO SOBRE LA RESISTENCIA A LA FATIGA 141
3.1 Técnicas de soldadura mejoradas 141
3.1.1 El perfil mejorado de la AWS 141
3.1.2 Electrodos especiales 141
3.2 Rectificado 142
3.3 Refusión del borde de la soldadura 143
3.3.1 Repaso con electrodo de wolframio en gas inerte (TIG) 143
3.3.2 Repaso con fundente 144
3.4 Métodos de la tensión residual 144
3.4.1 Martilleado 145
3.4.2 Granallado 145
3.5 Combinaciones 146
4 APLICACIÓN DE LOS MÉTODOS DE MEJORA A ESTRUCTURAS REALES 147

5 MÉTODOS DE MEJORA Y REGLAS PARA EL CÁLCULO 148
5.1 Reglas actuales para el cálculo que incorporan técnicas de mejora 148
5.2 Soldaduras mejoradas y efectos del tamaño 149
5.3 Modificaciones futuras de las reglas de cálculo 149
6 RESUMEN FINAL 151
7 BIBLIOGRAFÍA 151

Lección 14.6: Comportamiento de fatiga de uniones atornilladas 153

1 INTRODUCCIÓN 156
2 COMPORTAMIENTO ANTE LA FATIGA DE TORNILLOS CARGADOS A TRACCIÓN 157
2.1 Emplazamiento del colapso 157
2.2 Influencia de la tensión media y del material 157
2.3 La curva de cálculo de fatiga para tornillos a tracción 158
2.4 Comparación entre la resistencia máxima y la resistencia a la carga de fatiga de un tornillo 159
3 COMPORTAMIENTO ANTE FATIGA DE UNIONES ATORNILLADAS CARGADAS A TRACCIÓN 160
3.1 El principio del efecto del pretensado 160
3.2 El efecto del emplazamiento del área de contacto 161
4 FATIGA DE UNIONES ATORNILLADAS CARGADAS A CORTANTE 165
4.1 El principio de la transferencia de carga 165
4.2 Concentración de tensiones alrededor de los agujeros 165
4.3 Emplazamiento del agotamiento 165
5 CURVAS DE CÁLCULO DE FATIGA PARA UNIONES CARGADAS A CORTANTE 167
5.1 Tornillos no pretensados 167
5.2 Tornillos pretensados 167
6 OBSERVACIONES RELATIVAS A LA MAGNITUD DEL PRETENSADO 168
7 RESISTENCIA A FATIGA DE LOS TORNILLOS DE ANCLAJE 169
8 RESUMEN FINAL 170
9 BIBLIOGRAFÍA 170

Problema Resuelto 14.2: Cálculo de la vida a la fatiga de una unión tubular con tornillos de alta resistencia cargados a tracción 171

1 RESUMEN 174
2 INTRODUCCIÓN 175
3 COMPROBACIÓN DE LA RESISTENCIA ESTÁTICA 176
3.1 Estado límite de rotura 176
3.1.1 Fuerzas internas 176
3.1.2 Resistencia proyectada 176
3.1.2.1 Resistencia a la tracción proyectada del tubo 176
3.1.2.2 Resistencia a la tracción proyectada de los tornillos 176
3.1.3 Condiciones 177
4 CÁLCULOS DE LA VIDA A LA FATIGA 178
4.1 Cálculo de la vida a la fatiga para la soldadura 178
4.2 Cálculos de vida a la fatiga de los tornillos 178
4.2.1 Pretensado de los tornillos 178
4.2.2 Comportamiento de los tornillos transmisores de fuerzas externas 179
4.2.3 Apriete del tornillo 180
4.2.4 Influencia del nivel del pretensado sobre la fatiga de los tornillos 180
5 CONCLUSIONES 182
6 BIBLIOGRAFÍA 183

Lección 14.7: Análisis de la confianza y los factores de seguridad aplicados al cálculo de la fatiga 185

1 INTRODUCCIÓN 188
2 ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE LAS CURVAS S-N 189
3 CONCEPTO DE SEGURIDAD Y COEFICIENTES PARCIALES DE SEGURIDAD 195
3.1 Determinación de los coeficientes parciales de seguridad 195
4 RESUMEN FINAL 200
5 BIBLIOGRAFÍA 200

Lección 14.8: Conceptos básicos de cálculo de fatiga en el Eurocódigo 3 201

1 INTRODUCCIÓN 204
2 IMPLICACIONES PRÁCTICAS DE LOS CRITERIOS DE DISEÑO 205
2.1 Factores principales que afectan a la resistencia a fatiga 205
2.2 Criterios de agotamiento por fatiga 206
2.3 Tensiones calculadas para la evaluación de la fatiga 206
3 ESPECTRO DE LA TENSIÓN PREVISTA 209
3.1 Historia de la tensión 209
3.2 Histograma de tensión 210
4 CONCEPTO DE LA CLASIFICACIÓN DE LAS CURVAS DE CÁLCULO DE FATIGA 211
5 RESULTADOS DE ENSAYOS DE FATIGA 214
6 REGLA DEL DAÑO ACUMULADO, CONCEPTO DEL RANGO DE TENSIÓN EQUIVALENTE 215
6.1 La suma de Palmgren-Miner 215
6.2 Rango de tensión equivalente 215
6.3 Rango de tensión equivalente para una curva S-N con una constante de doble pendiente 215
7 EFECTOS DE LA TENSIÓN RESIDUAL 218
8 RESUMEN FINAL 220
9 BIBLIOGRAFÍA 220

Lección 14.9: Eurocódigo 3: Clasificación de detalles constructivos 221

1 INTRODUCCIÓN 224
2 PRESENTACIÓN GENERAL DEL ESTUDIO DEL CASO 225
3 NOTAS SOBRE LAS FIGURAS DETALLADAS 2-7 DEL ESTUDIO DEL CASO 228
4 RESUMEN FINAL 246
5 BIBLIOGRAFÍA ADICIONAL 246

Problema Resuelto 14.1: Cálculo de la vida a la fatiga para detalles soldados en las vigas de un puente-grúa 247

1 INTRODUCCIÓN 250
2 CARGA Y CICLOS APLICADOS 251
3 CATEGORIZACIÓN 252
4 CÁLCULOS DE LAS TENSIONES 253
5 EVALUACIÓN PARA EL CARRO DE PUENTE-GRÚA TRANSPORTANDO LA CARGA MÁXIMA DE 15 TONELADAS (150 kN) 256
5.1 Los daños causados por las tensiones de flexión pueden calcularse utilizando la ecuación: 256
5.2 Daños bajo carga máxima debidos a las tensiones tangenciales 257
5.3 Evaluación para las tensiones de compresión directas producidas por las cargas por rueda locales 257
6 EVALUACIÓN PARA EL CARRO DE PUENTE-GRÚA EN RETORNO VACÍO 258
7 EVALUACIÓN PARA EL CARRO EN RETORNO CON UNA CARGA DE 7 TONELADAS (70 kN) 259
8 COMBINACIÓN DE LOS DAÑOS CALCULADOS Y DETERMINACIÓN DE LA VIDA A LA FATIGA 260
9 CONCLUSIÓN 261

Lección 14.10: Fundamentos de la mecánica de la fractura 263

1 INTRODUCCIÓN 266
2 ANTECEDENTES DE LA MECÁNICA DE LA FRACTURA MODERNA 267
3 EFECTOS DEL MODO DE CARGA 269
4 EFECTOS DE LA GEOMETRÍA DE LA GRIETA 270
5 EFECTOS DE LA GEOMETRÍA DEL COMPONENTE FINITO 272
6 EFECTOS DE LA FLUENCIA LOCAL EN LA PUNTA DE LA GRIETA 274
7 LA IMPORTANCIA DEL COEFICIENTE DE INTENSIDAD DE TENSIÓN 275
8 RESUMEN FINAL 276
9 REFERENCIAS 276
10 BIBLIOGRAFÍA ADICIONAL 276

Lección 14.11: Análisis de tensiones en cuerpos fracturados 277

1 INTRODUCCIÓN 280
2 SOLUCIÓN BÁSICA PARA UN RANGO DE TENSIÓN EN UN PROBLEMA DE ELASTICIDAD PLANA 281
2.1 Método de Westergaard 281
2.2 Definición de z (o de sus derivadas) para el caso de una grieta a través del espesor de longitud 2a en una placa infinita (figura 2) 282
2.3 Determinación de z en el caso del problema de Griffith 283
3 RANGO DE TENSIÓN ELÁSTICO EN EL BORDE DE LA GRIETA BAJO CONDICIONES DE APERTURA GENERALES 284
4 PLASTICIDAD 285
4.1 El modelo de Irwin 285
4.2 Contorno de la zona plástica en base a los criterios de Von Mises y Tresca (figura 5) 286
4.2.1 Criterio de Von Mises 286
4.2.2 Criterio de Tresca 287
5 MODELO DE LA FLUENCIA DEL FRENTE DE LA GRIETA DE D. S. DUGDALE (1960) Y BAREN BLATT (1962) 288
5.1 Dimensión de la zona plástica 288
5.2 Desplazamiento de la apertura del borde de la grieta 289
6 RESUMEN FINAL 290
7 BIBLIOGRAFÍA 291

Lección 14.12: Determinación de los factores de intensidad de tensión 293

1 INTRODUCCIÓN 296
2 SOLUCIONES ANALÍTICAS 298
3 EL PRINCIPIO DE BUECKNER Y LAS FUNCIONES DE PESO 300
4 ANÁLISIS DE LOS ELEMENTOS FINITOS DE CUERPOS FRACTURADOS 303
5 SOLUCIONES TESTIGO A PARTIR DE ECUACIONES PARAMÉTRCAS 305
6 EFECTOS DE LA PLASTICIDAD 310

7 RESUMEN FINAL 311
8 BIBLIOGRAFÍA 311
APÉNDICE 313

Lección 14.13: Mecánica de la fractura aplicada a la fatiga 317

1 INTRODUCCIÓN 320
2 COMPORTAMIENTO DE LA PROPAGACIÓN DE LA GRIETA EN LA MECÁNICA DE LA FRACTURA 321
3 DETERMINACIÓN DE LA VIDA BAJO AMPLITUD CONSTANTE 322
4 CARGA DE AMPLITUD VARIABLE 324
5 EFECTOS UMBRAL 326
6 EFECTOS DE LAS TENSIONES RESIDUALES 328
7 RESUMEN FINAL 329

Lección 14.14: Mecánica de la fractura: Aplicaciones en ingeniería estructural 331

1 SEGURIDAD, DURABILIDAD Y CONFIANZA 334
1.1 Introducción a los conceptos de seguridad y resistencia 334
1.2 Conceptos de la propagación de los daños 335
1.3 Conceptos del proyecto que consideran los daños 337
1.4 Análisis de la confianza y del riesgo 340
2 METODOLOGÍA DE LA PREDICCIÓN DE LA VIDA 342
2.1 Introducción 343
2.2 Efectos del comportamiento de la propagación de grieta 343
2.2.1 Tamaño inicial de la grieta 343
2.2.2 Carga 344
2.2.3 Propiedades del material 344
2.2.4 Propiedades de la estructura 345
2.2.5 Longitud crítica de la grieta 345
2.3 Modelos de predicción de la propagación de la grieta de fatiga 345
2.3.1 Distribución inicial del defecto 346
2.3.2 Utilización 346

2.3.3 Propiedades del material 347
2.3.4 Análisis del coeficiente de intensidad de tensión del borde de la grieta 347
2.3.5 Modelos de integración de los daños 348
2.3.6 Longitud final de la grieta 349
3 RESUMEN FINAL 350
4 BIBLIOGRAFÍA 350
5 BIBLIOGRAFÍA ADICIONAL 351

Lección 14.15: Mecánica de la fractura aplicada "ad hoc" 353

1 INTRODUCCIÓN 356
2 DESARROLLO DEL PERFIL DE LA GRIETA 357
3 INICIACIÓN MÚLTIPLE DE LAS GRIETAS 360
4 CRITERIOS DE AGOTAMIENTO FINAL 362
5 TRATAMIENTOS AVANZADOS 365
6 RESUMEN FINAL 366
7 BIBLIOGRAFÍA 366
DIAPOSITIVAS COMPLEMENTARIAS 367

ESDEP TOMO 14
DISEÑO PARA FATIGA

Lección 14.1: Introducción básica a la Fatiga

OBJETIVOS/CONTENIDO

Resumir los factores principales que afectan a la resistencia a la fatiga, en contraposición a la resistencia estática, de las uniones soldadas e ilustrar el método para efectuar una comprobación de la fatiga.

CONOCIMIENTOS PREVIOS

Lección 13.1.2: Introducción al Diseño de Uniones

Lección 13.2.1: Generalidades sobre Uniones Soldadas

LECCIONES AFINES

Lección 14.12: Determinación de los Factores de Intensidad de Tensión

Lección 14.13: Mecánica de la Fractura Aplicada a la Fatiga

RESUMEN

Esta lección ofrece una explicación del mecanismo de la fatiga y de la influencia de la soldadura sobre dicho mecanismo. Resume los factores primarios que afectan a la resistencia a la fatiga e introduce las curvas S-N. Se presenta la clasificación de los detalles de fatiga y se revisan los detalles importantes. Se resume el cálculo de la carrera de tensión. Se presentan los tipos principales de carga de fatiga y las bases para su cálculo, junto con una introducción del recuento de ciclos y de los cálculos de los daños para las cargas de amplitud mixta.

NOMENCLATURA

a	parámetro de cálculo de la resistencia de la soldadura
$\Delta\sigma_R$	rango de tensión
$\Delta\sigma_D$	tensión no propagadora, es decir, el rango de tensión de amplitud constante por debajo de la cual las fisuras no aumentarán
N	número de ciclos de resistencia a la fatiga

1. INTRODUCCIÓN

1.1 Naturaleza de la Fatiga

La fatiga es el mecanismo mediante el cual las fisuras se incrementan en una estructura. El crecimiento tan sólo se produce bajo tensiones cíclicas. La rotura final se produce normalmente en zonas sometidas a tensión de tracción cuando la sección transversal reducida se hace insuficiente para soportar la carga máxima sin que se produzca la rotura. En condiciones de servicio normales, las fisuras no se propagan mientras la carga sobre la estructura sea estacionaria. Muchas estructuras, tales como pórticos de edificios, no experimentan la suficiente tensión cíclica como para originar problemas de fatiga. Este no es el caso de otras estructuras, tales como puentes, grúas y plataformas petrolíferas, en las que la carga dinámica constituye una proporción mayor de la carga total.

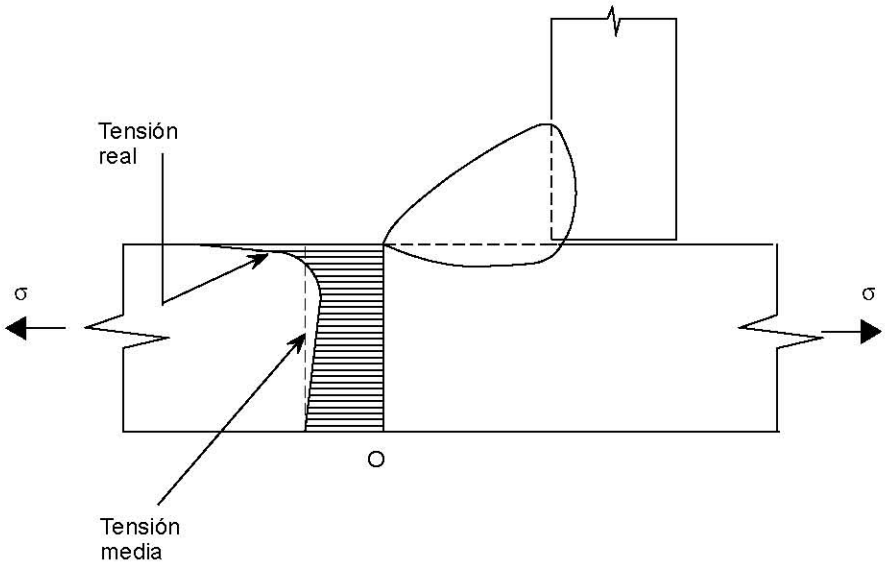


Figura 2 Distribución típica de las tensiones en el borde de una soldadura

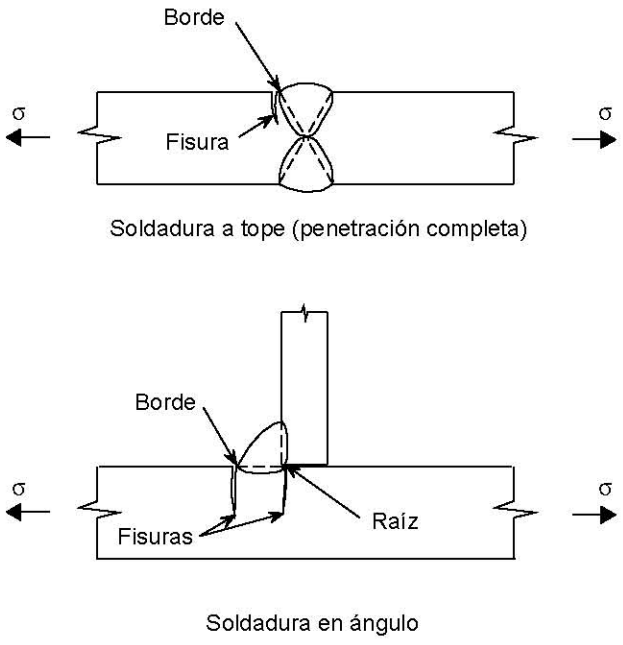


Figura 1 Concentraciones de tensiones locales en soldaduras

1.2 Cómo Afecta la Fatiga a las Soldaduras

En las estructuras metálicas soldadas, es casi seguro que las roturas de fatiga comenzarán a propagarse a partir de las soldaduras y no desde otras uniones, debido a que:

- La mayor parte de los procesos de soldadura dejan minúsculas discontinuidades metalúrgicas a partir de las que pueden propagarse las fisuras. Como resultado de ello, el período inicial, que normalmente es necesario para que aparezca una fisura en un material forjado, es o muy corto o inexistente. De esta manera, las fisuras pasan la

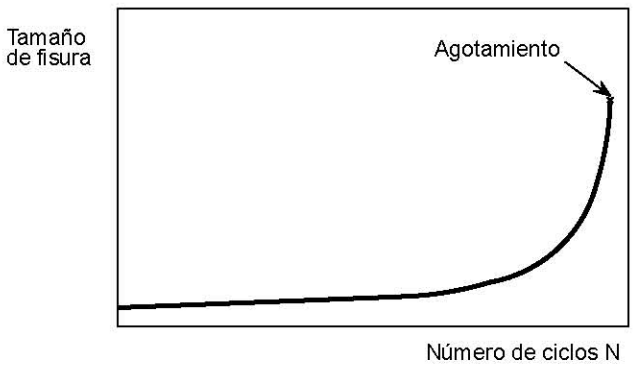


Figura 3 Curva de crecimiento de fisuras

mayor parte de su vida propagándose, es decir, haciéndose más largas.

- La mayor parte de las soldaduras estructurales presentan un perfil sin pulir. Normalmente, los cambios acusados de dirección se localizan en los bordes de las soldaduras a tope y en los bordes y primeros cordones de las soldaduras en ángulo (véase la figura 1). Estos puntos ocasionan concentraciones de tensión locales del tipo que se muestra en la figura 2. Por lo tanto, las pequeñas discontinuidades cercanas a estos puntos reaccionarán igual que si se encontraran en un elemento sometido a mayor tensión y se propagarán con más rapidez.

1.3 Proceso de Crecimiento de las Fisuras

El estudio de la mecánica de fractura muestra que la velocidad de crecimiento de una fisura es proporcional a la raíz cuadrada de su longitud, con la misma fluctuación y el mismo grado de concentración de tensión. Por esta razón, las fisuras de fatiga pasan la mayor parte de su vida en forma de fisuras muy pequeñas que resultan difíciles de detectar. Tan sólo en las últimas etapas de su vida comienza la fisura a causar una pérdida significativa del área de la sección transversal, tal y como muestra la figura 3. Este comportamiento plantea problemas para la inspección de estructuras en servicio.

2. RESISTENCIA A LA FATIGA

2.1 Definición de la Resistencia a la Fatiga y de la Vida de Fatiga

La resistencia a la fatiga de un componente soldado se define como el rango de tensión ($\Delta\sigma_R$) que, fluctuando a una amplitud constante, origina el agotamiento del componente tras un número especificado de ciclos (N). El rango de tensión es la diferencia entre los puntos máximo y mínimo del ciclo (véase la figura 4). El número de ciclos hasta la rotura se denomina resistencia o vida a la fatiga.

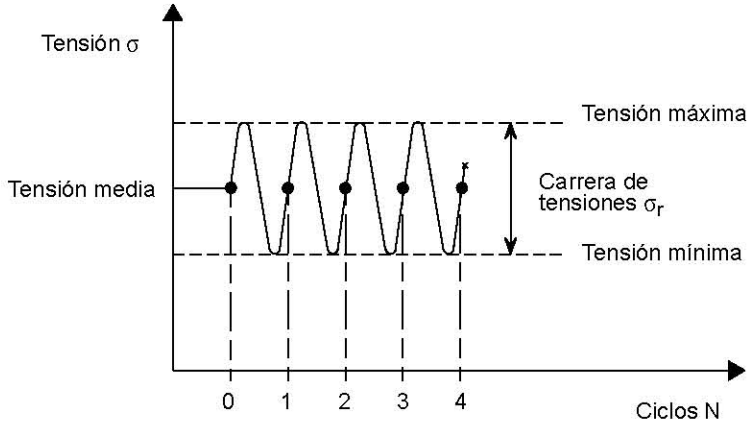


Figura 4 Historia de la tensión de amplitud constante

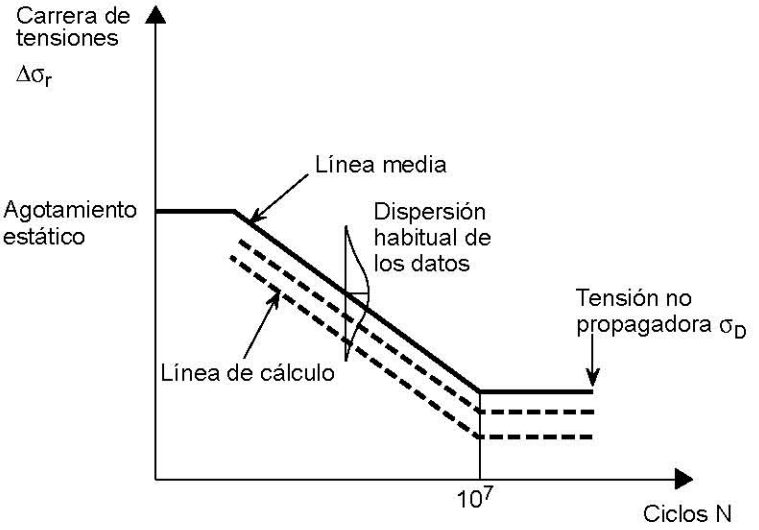


Figura 5 Curva de resistencia a la fatiga (S-N) para ensayos con cargas de amplitud constante

2.2 Factores Primarios que Afectan a la Vida de la Fatiga

Para propósitos prácticos de diseño existen dos factores principales que afectan a la vida de la fatiga de una unión, concretamente:

- El rango de tensión ($\Delta\sigma_R$) en el punto de iniciación de una fisura. Hay reglas especiales para el cálculo de esta tensión.
- La resistencia a la fatiga de la unión. Esta resistencia es primordialmente una función de la geometría y se define mediante el parámetro "a", que varía de unión a unión.

Es posible calcular la vida de la fatiga (N), o resistencia, en número de ciclos hasta la rotura a partir de la expresión:

$$N = \frac{a}{\Delta \sigma_R^m} \qquad (1)$$

o

$$\log N = \log d - m \log \Delta \sigma_R \qquad (2)$$

donde m es una constante, igual a 3 para la mayoría de las uniones soldadas. Por lo tanto, las predicciones de la vida se muestran particularmente sensibles a la precisión de la estimación de la tensión.

2.3 Curva S-N

La expresión que relaciona N y $\Delta \sigma_R^m$ puede trazarse en una escala logarítmica como una línea recta, ecuación (2), y se la denomina una curva S-N. En la figura 5 se muestra un ejemplo. Esta relación

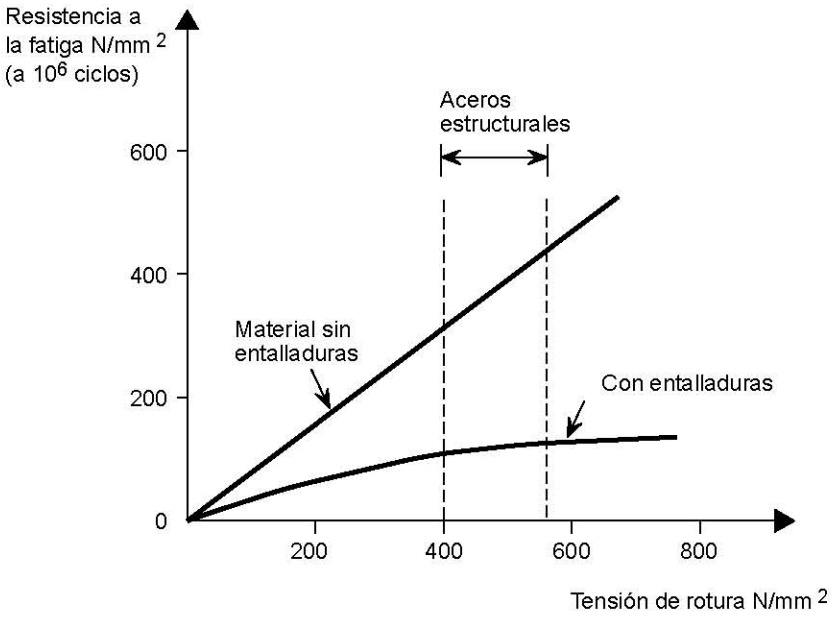


Figura 6 Efectos de resistencia mecánica

se mantiene para un amplio campo de resistencia a la fatiga. Se ve limitada en el extremo inferior de la resistencia a la fatiga por la rotura estática, que se produce cuando se supera la resistencia límite del material. En resistencias a la fatiga que superen unos 5-10 millones de ciclos, los rangos de tensión son generalmente demasiado pequeños para permitir la propagación bajo una carga de amplitud constante. Este límite se denomina la tensión no propagadora ($\Delta\sigma_D$). Por debajo de este rango de tensión las fisuras no se propagarán.

Para cálculo resulta habitual la utilización de curvas S-N que ofrecen resistencias a la fatiga aproximadamente un 25% por debajo de los valores de rotura medios, tal y como se muestra en la figura 5. Se utiliza "a" para la definición de estas líneas.

2.4 Efecto de la Tensión Media

En uniones no soldadas la resistencia se reduce a medida que la tensión media se hace más traccional. En las uniones soldadas, normalmente la resistencia no se reduce en estas circunstancias. Este comportamiento se produce debido a que las tensiones de retracción (o tensiones residuales), que están bloqueadas en las zonas de soldadura durante la fabricación, a menudo alcanzan la fluencia por tracción. La fisura no puede distinguir entre tensión residual o aplicada. Así pues, para los propósitos de cálculo, la curva S-N siempre asume lo peor, es decir, que la tensión máxima del ciclo se encuentre en el límite elástico por tracción. Resulta especialmente importante tener en cuenta este punto ya que significa que las roturas por fatiga pueden propagarse en partes de elementos que normalmente están "a compresión".

2.5 Efecto de la Resistencia Mecánica

La velocidad de propagación de la fisura no se ve afectada significativamente por las desviaciones de la tensión de prueba, o por la resistencia a la rotura por tracción dentro del campo de los aceros de baja aleación utilizados para propósitos estructurales generales. Estas características tan sólo afectan al período de iniciación, el cual, al ser despreciable en las soldaduras, ejerce una influencia muy pequeña sobre la vida a la fatiga. Este comportamiento contrasta con la fatiga de las uniones no soldadas en las que el aumento de la resistencia mecánica tiene normalmente como resultado una mejora en la resistencia a la fatiga, tal y como se muestra en la figura 6.

3. CLASIFICACIÓN DE LAS UNIONES

3.1 Clases de Uniones

El parámetro de resistencia a la fatiga (K_2) de diferentes uniones soldadas varía de acuerdo con la gravedad del efecto de la concentración de tensiones. Puesto que hay una amplia variedad de uniones utilizadas habitualmente, las uniones con valores de K_2 similares se agrupan juntas en una clase de unión independiente y se les asigna un valor de K_2 específico.

Estos datos se han obtenido a partir de ensayos de fatiga de amplitud variable realizados sobre probetas simples que contenían diferentes tipos de uniones soldadas. Para las uniones utilizadas con mayor frecuencia se ha observado la conveniencia de dividir los resultados en catorce clases principales. Estas clases son:

La tabla anterior se ha tomado del Eurocódigo 3 [1]. No incluye los datos de S-N para las uniones tubulares huecas no rigidizadas.

3.2 Tipos de Uniones

Normalmente hay varios tipos de uniones dentro de cada clase. Cada uno de los tipos presenta una descripción muy específica que define la geometría tanto microscópica como macroscópicamente. Las características principales que afectan al tipo de unión y por lo tanto a su clasificación son:

- Forma del elemento:

  por ejemplo, chapa, perfil laminado, acero para armaduras de hormigón.

- Emplazamiento de la iniciación anticipada de la fisura.

Categoría de unión $\Delta \sigma_c$ (N/mm^2)	d	m
160	$7{,}962\ 10^{12}$	3
140	$5{,}636\ 10^{12}$	3
125	$3{,}990\ 10^{12}$	3
112	$2{,}825\ 10^{12}$	3
100	$2{,}000\ 10^{12}$	3
90	$1{,}416\ 10^{12}$	3
80	$1{,}002\ 10^{12}$	3
71	$0{,}710\ 10^{12}$	3
63	$0{,}502\ 10^{12}$	3
56	$0{,}356\ 10^{12}$	3
50	$0{,}252\ 10^{12}$	3
45	$0{,}178\ 10^{12}$	3
40	$0{,}126\ 10^{12}$	3
36	$0{,}089\ 10^{12}$	3

Tal y como se muestra en la figura 7, es posible trazar estas clases como una familia de curvas S-N. La diferencia entre los rangos de tensión entre curvas vecinas oscila normalmente entre un 15 y un 20%.

El emplazamiento debe definirse con respecto a la dirección de la fluctuación de la tensión. Una unión estructural cualquiera puede contener más de un emplazamiento de iniciación potencial, en cuyo caso la

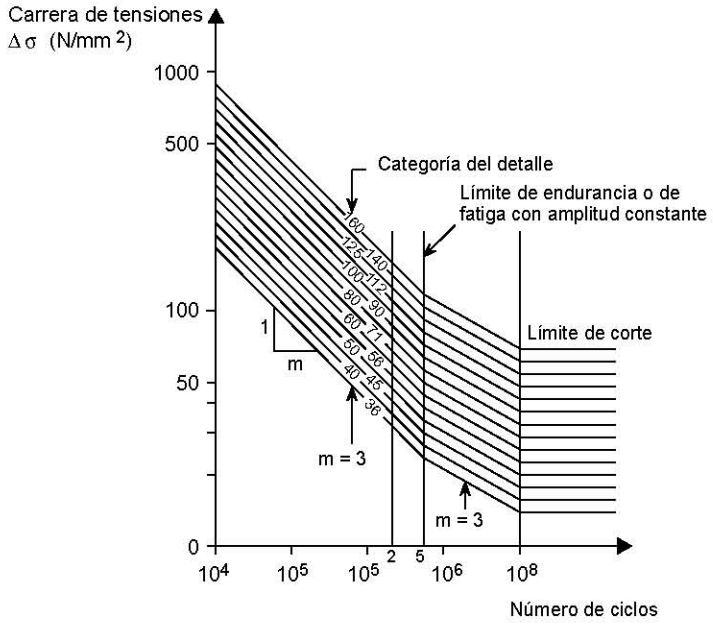


Figura 7 Curvas de resistencia a la fatiga (S-N) de cálculo

unión podría encuadrarse en dos o más tipos de uniones.

- Dimensiones principales:

  por ejemplo, perfil de la soldadura, magnitud del componente, proximidad de los bordes, brusquedad del cambio en la sección transversal.

- Requisitos para la fabricación:

  por ejemplo, el tipo de proceso de soldadura, cualquier pulido de partes concretas de la unión.

- Requisitos para la inspección:

  es posible que resulte necesario aplicar procedimientos de inspección especiales en el caso de las uniones de las clases más altas con el fin de asegurar que no existan defectos perjudiciales de la soldadura.

Debe tenerse presente que si la fatiga resulta crítica en el diseño, los controles extra del trabajo de taller pueden aumentar significativamente el coste total por encima del coste que se limite a considerar la resistencia estática.

Se muestran ejemplos de diferentes tipos de uniones soldadas y sus clases en el Eurocódigo 3: Parte 1.1 [1].

3.3 Tipos de Uniones más comunes

La figura 8 muestra algunas de las uniones más importantes que deben buscarse en las estructuras de acero soldadas. Éstas son:

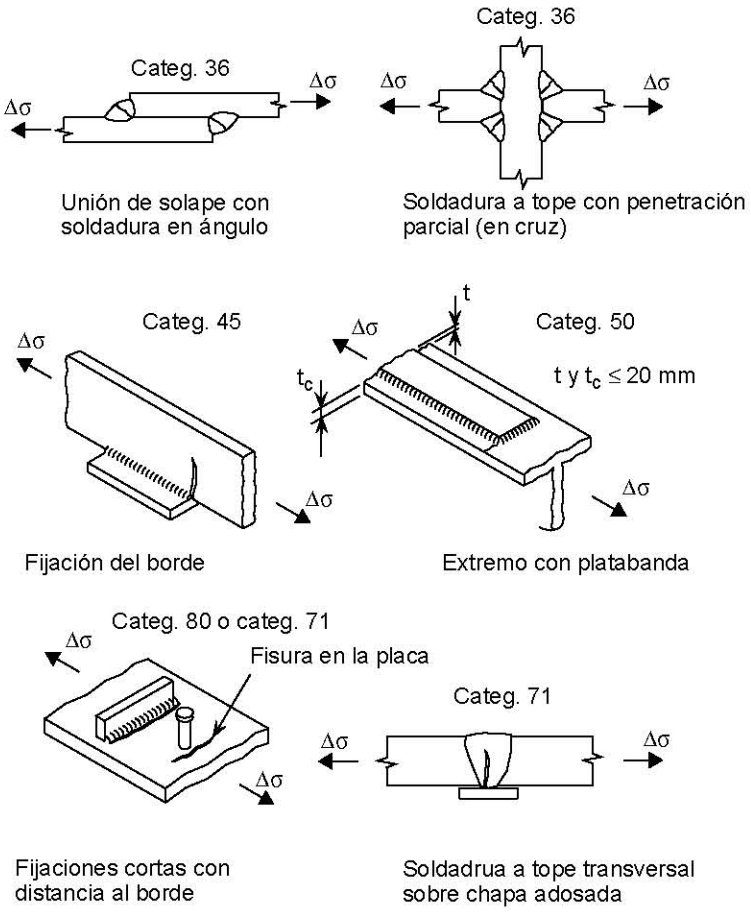


Figura 8a Tipos de detalle y sus categorías de fatiga correspondiente

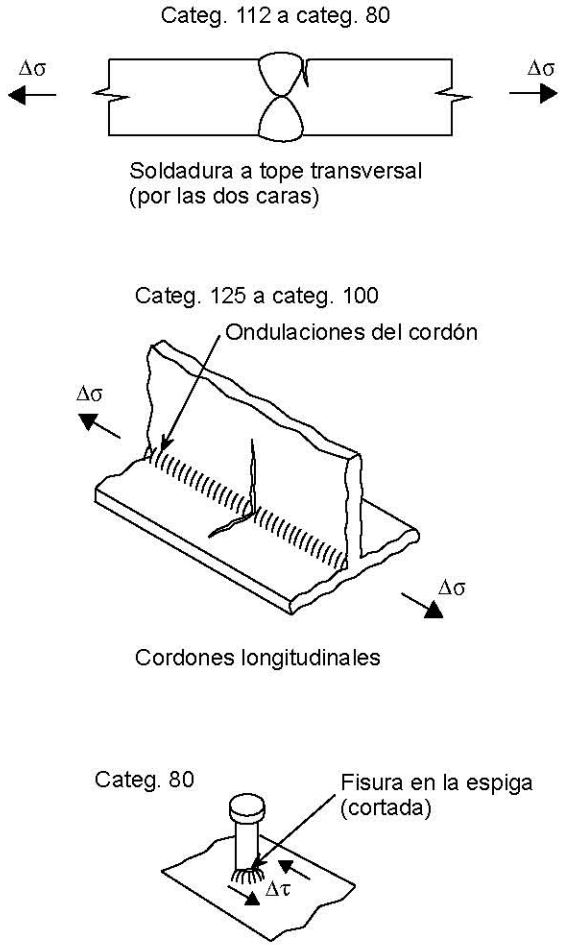


Figura 8b Algunos tipos de detalle habituales y sus categorías de fatiga

- Soldaduras en ángulo que soporten cargas y soldaduras a tope de penetración parcial. Estas uniones pertenecen a la categoría 36 en lo relativo al inicio de rotura en la raíz y propagación a través de la garganta.

- Uniones soldadas de borde. Constituyen la categoría 45. Observése que es posible que la soldadura de unión no esté transfiriendo ninguna tensión. La rotura se extiende al elemento desde el borde de la soldadura.

- Extremos de chapas planas largas, por ejemplo platabandas, pertenecen a la categoría 50.

- La mayor parte de las uniones cortas en la dirección de la tensión son de la categoría 80 ó 71, siempre y cuando no se encuentren en un borde.

- Las soldaduras a tope de penetración completa transversales pueden oscilar de la categoría 12,5 a la 36, dependiendo de cómo estén hechas.

- Se ha observado que las soldaduras largas continuas en estructuras soldadas en obra son de la categoría 100.

Debe tenerse en cuenta que se ha observado que la mayor parte de los emplazamientos potenciales de fatiga de las estructuras soldadas son de la categoría 80 o inferior.

4. PARÁMETROS DE TENSIÓN POR FATIGA

4.1 Área de Tensión

Las áreas de tensión son esencialmente similares a las que se utilizan para el cálculo estático. Para una fisura que se inicie en el borde de una soldadura se utiliza la sección transversal del elemento a través del que se produce la propagación. Para una fisura que se inicie en la raíz y se propague a través de la garganta de la soldadura se utiliza el área mínima de la garganta, tal y como se muestra en la figura 8a.

4.2 Cálculo del Rango de Tensión $\Delta\sigma$

La fluctuación de fuerzas en la estructura se debe calcular elásticamente. No se permite la redistribución plástica.

La tensión sobre la sección transversal crítica es la tensión principal en la posición del borde de la soldadura (en el caso de las fisuras de los bordes de soldaduras). Se utiliza la teoría elástica simple asumiendo que las secciones planas permanecen planas (véase la figura 9). Se ignora el efecto de la concentración de tensiones local causado por el perfil de la soldadura, puesto que este efecto ya se ha contemplado mediante el parámetro "d" que determina la clase de soldadura.

En el caso de roturas en la garganta, se utiliza la suma vectorial de las tensiones sobre la garganta de la soldadura en la posición de la tensión vectorial mayor a lo largo de la soldadura, igual que en el cálculo estático.

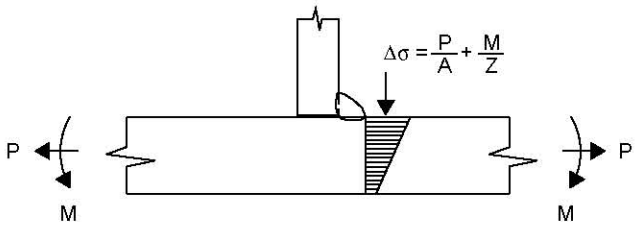


Figura 9 Parámetros de la tensión de cálculo para fisuras que se propagan en el metal de base

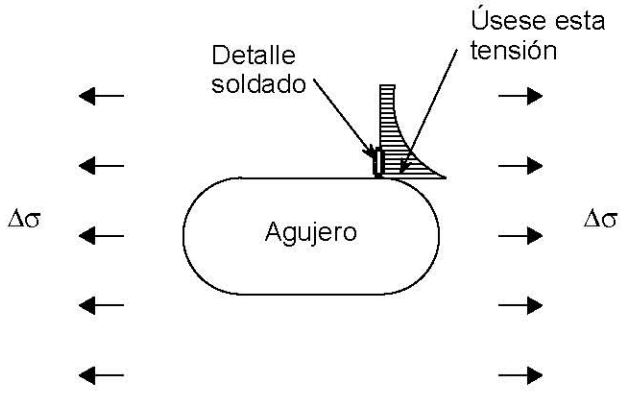


Figura 10 Parámetros de la tensión de cálculo para fisuras que se inician en puntos de concentración de tensiones debidos a la geometría

Se producen excepciones a esta regla en el caso de uniones no reforzadas entre elementos esbeltos tales como tubos. En este caso, el parámetro de la tensión es la Tensión Hot Spot. Esta tensión se calcula en el punto de la iniciación esperada de fisura, teniendo en cuenta la deformación elástica real en la unión, es decir, sin asumir que las secciones planas permanezcan planas.

4.3 Efectos de las Concentraciones de Tensión Geométricas y Otros Efectos

Allí donde un elemento presente grandes cambios en su sección transversal, por ejemplo en el caso de que existan agujeros en el acero, existirán zonas de concentración de tensiones debidas al cambio de la geometría. En el cálculo estático las tensiones se basan en el área neta, ya que normalmente la redistribución plástica reducirá estos valores máximos en la carga límite. Con la fatiga esto no es así y, si hay una unión soldada en el área de elevación de tensión geométrica, se debe utilizar la tensión real, tal y como se muestra en la figura 10.

4.4 Efectos Secundarios

Similarmente, para el cálculo de las tensiones se permiten los efectos secundarios, tales como los debidos a la fijeza de las uniones en estructuras reticulares y el desfase de cortante así como otros efectos deformantes en vigas esbeltas.

5. CARGAS POR FATIGA

5.1 Tipos de Carga

Ejemplos de estructuras y de las cargas que pueden causar fatiga son:

Puentes:	Vehículos comerciales, trenes de mercancías
Grúas:	Izado, cargas en movimiento y cargas estáticas
Plataformas marítimas:	Olas
Chimeneas esbeltas:	Rachas de viento

El objetivo del proyectista consiste en anticipar la secuencia de las cargas de servicio a lo largo de la vida de la estructura. La magnitud de la carga máxima, que resulta vital para los propósitos del cálculo estático, no reviste generalmente un gran interés ya que tan sólo representa un ciclo entre millones. Por ejemplo, las vigas de puentes de autopistas pueden experimentar 100 millones de ciclos significativos a lo largo de su vida. La secuencia es importante ya que afecta al rango de tensión, especialmente si es más de un sistema de carga independiente el que carga la estructura.

Por motivos de conveniencia, normalmente se simplifican las cargas en un espectro de carga, que define una serie de bandas de niveles de carga constante y el número de veces que se experimenta cada banda, tal y como se muestra en la figura 11.

Las estructuras esbeltas, con frecuencias naturales lo bastante bajas como para responder a la frecuencia de carga, pueden sufrir una amplificación dinámica de la tensión. Esta amplificación puede acortar la vida considerablemente.

El Eurocódigo 1 [2] constituye una fuente útil de información.

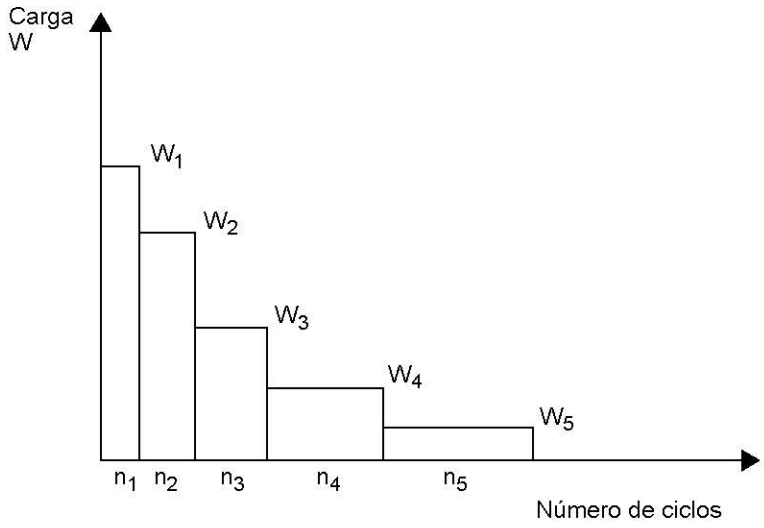


Figura 11 Espéctro de carga de cálculo

5.2 Recuento de Ciclos

En la práctica, la mayor parte de las historias de tensiones en las estructuras reales son del tipo de amplitud constante, que se muestra en la figura 12, en contraposición al de amplitud variable que se muestra en la figura 4. Estas historias constituyen un problema a la hora de definir el número y amplitud de los ciclos.

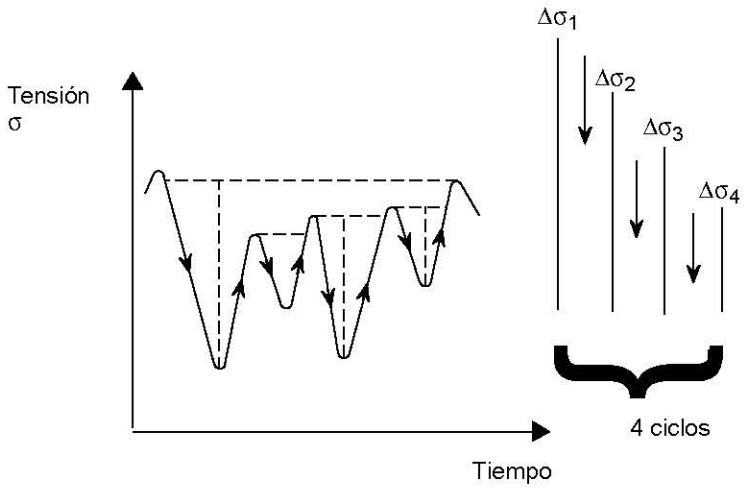


Figura 12 Historia de tensiones de amplitud variable y espectro resultante de tensiones

El primer paso consiste en descomponer la secuencia en un espectro de tensiones, tal y como se muestra en la figura 12, utilizando un método de recuento de ciclos. Es posible utilizar varios métodos. Los dos que se utilizan con mayor frecuencia son el Método de Recogida de Lluvia y el Método de el Embalse. Este último, fácil de utilizar manualmente para historias de tensiones cortas, se describe en la lección 14.2. El primero resulta más conveniente para el análisis de historias de tensiones largas utilizando un ordenador.

6. CÁLCULO DE DAÑOS

Bajo cargas de amplitud variable, la vida se calcula mediante el cálculo de los daños totales efectuados por cada ciclo del espectro de tensiones. En la práctica, este espectro se simplifica a un número manejable de bandas, tal y como se muestra en la figura 13.

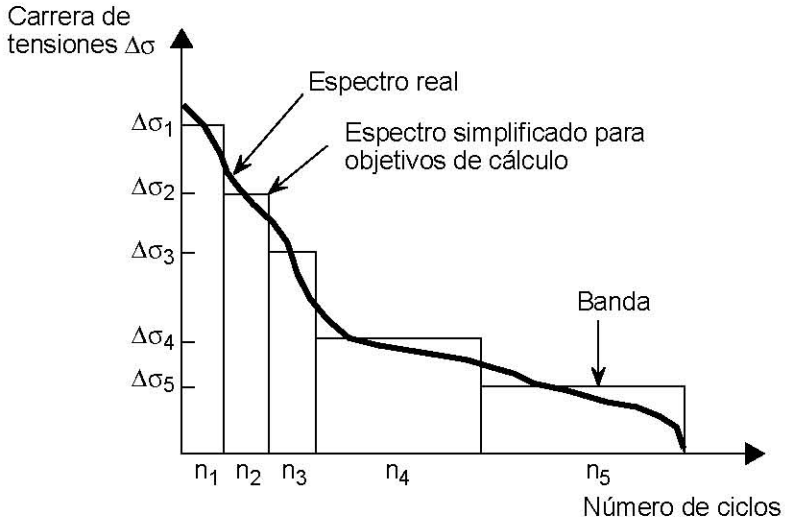


Figura 13 Simplificación del espectro de tensiones

Los daños ocasionados por cada banda del espectro se definen como donde n representa el número necesario de $\frac{n}{N}$ ciclos en la banda durante la vida de cálculo y N representa la resistencia a la fatiga bajo ese rango de tensión (véase la figura 14).

Si se ha de prevenir la rotura antes de que finalice la vida de cálculo especificada, debe cumplirse la regla de Palmgren-Miner. Esta regla indica que los daños efectuados por todas las bandas juntas no debe ser superior a la unidad, es decir:

$$\frac{n_1}{N_1} + \frac{n_2}{N_2} + \ldots\ldots \frac{n_n}{N_n} \leq 1$$

Debe tenerse en cuenta que, cuando se producen cargas de amplitud variable, las bandas del espectro con valores de $\Delta\sigma$ inferiores a $\Delta\sigma_D$ pueden continuar causando daños. Los daños se producen debido a que los ciclos de mayor amplitud pueden comenzar a propagar la fisura. Una vez que ésta comienza a propagarse, los ciclos más bajos se hacen efectivos. En este caso, el límite de fatiga de amplitud constante horizontal $\Delta\sigma_D$ que se muestra en la figura 5 se reemplaza por una línea inclinada con un gradiente logarítmico de $\frac{1}{m+2}$.

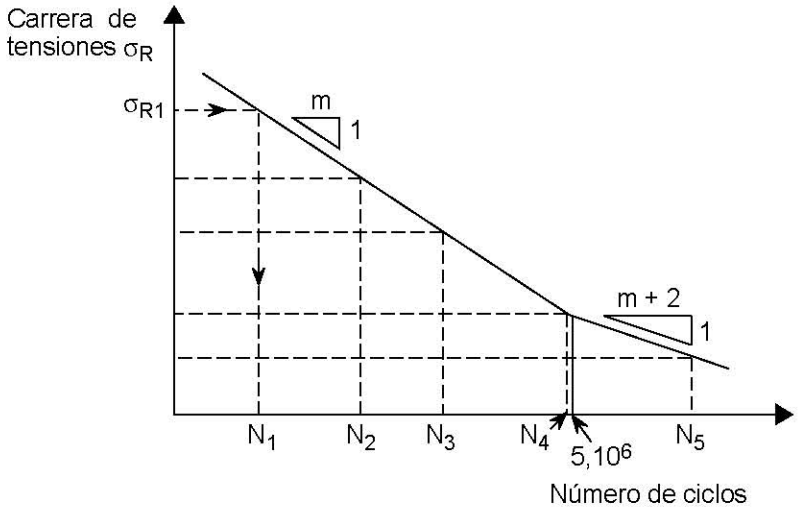


Figura 14 Determinación de la anchura de cada banda

7. RESUMEN FINAL

- La fatiga y el colapso estático (bien sea por rotura bien sea por pandeo) dependen de varios factores diferentes, concretamente:
  - La fatiga depende de la secuencia de la carga de servicio total (no de un caso de carga extrema).
  - La fatiga de las soldaduras no mejora como consecuencia de mejores características mecánicas.
  - La fatiga se muestra muy sensible a la geometría de las uniones.
  - La fatiga precisa de una predicción más exacta de la tensión elástica.
  - La fatiga supone más exigencias para el trabajo del hombre y la inspección.
- Por lo tanto, es importante verificar tempranamente en el cálculo si es probable que la fatiga sea crítica. No puede confiarse en los márgenes de seguridad aceptables frente a un colapso estático para ofrecer la seguridad adecuada frente a la fatiga.
- Las áreas con una relación de tensiones dinámicas/estáticas elevada y que contengan uniones de la categoría baja 36 deben ser las primeras en inspeccionarse. La verificación debe cubrir todas las uniones soldadas a un elemento, aunque sea insignificante, y no limitarse a las uniones estructurales principales. Téngase en cuenta que esta verificación debe incluir las adiciones soldadas a la estructura en servicio.
- Si la fatiga es crítica, la elección de uniones se verá limitada. Deberá perseguirse la simplicidad de las uniones y la uniformidad del recorrido de las tensiones.
- Esté preparado para un mayor coste de las estructuras críticas con respecto a la fatiga.

8. BIBLIOGRAFÍA

[1] Eurocódigo 3: “Design of Steel Structures”: ENV1993-1-1: Part 1.1: General Rules and Rules for Buildings, CEN 1992.

[2] Eurocódigo 1: “Basis of Design and Actions on Structures”, CEN

9. BIBLIOGRAFÍA ADICIONAL

1. Maddox, S.J. “Fatigue Strength of Welded Structures“, Cambridge, Abington Publishing, 1991.

2. Gurney, T. R., “Fatigue of Welded Structures”, 2nd ed., Cambridge University Press, 1991.

3. Narayanan, R. (ed), “Structures Subjected to Repeated Loading”, London, Elsevier Applied Science, 1991.

ESDEP TOMO 14
DISEÑO PARA FATIGA

Lección 14.2: Introducción Avanzada a la Fatiga

OBJETIVOS/CONTENIDO

Introducir los conceptos y definiciones principales relativos al proceso de la fatiga e identificar los factores principales que influyen sobre el comportamiento ante la fatiga de los materiales, componentes y estructuras.

CONOCIMIENTOS PREVIOS

Lección 14.1: Introducción Básica a la Fatiga

LECCIONES AFINES

RESUMEN

Se describe el proceso físico del inicio de las roturas por fatiga en probetas lisas y entalladas bajo la influencia de cargas cíclicas y se discute la importancia de este proceso para la fatiga de las estructuras reales.

Se explica la base de los diferentes métodos de recuento de los ciclos de tensiones para cargas de amplitud variable. Se describen los efectos del espectro de frecuencias y del diagrama de superación.

1. INTRODUCCIÓN

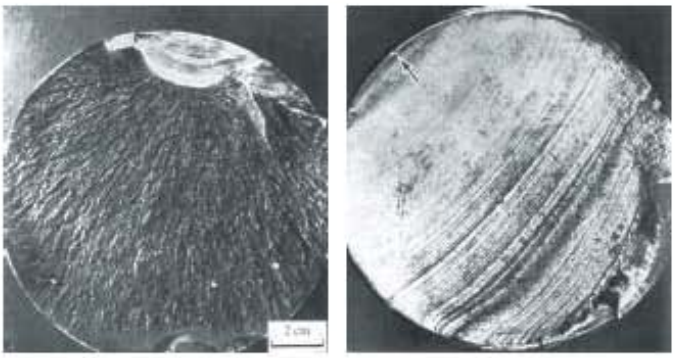
Normalmente se habla de la fatiga como un proceso durante el cual se acumulan daños en un material sometido a cargas cíclicas, produciéndose finalmente el agotamiento incluso si la carga máxima está muy por debajo del límite elástico del material. La fatiga es un proceso de reducción de la resistencia local que se produce en materiales industriales tales como aleaciones metálicas, polímeros y compuestos, como por ejemplo hormigón y plásticos reforzados con fibras embebidas. A pesar de que los detalles fenomenológicos del proceso pueden variar de un material a otro, la siguiente definición proporcionada por ASTM [1] da cabida a los agotamientos por fatiga en todos los materiales:

> Fatiga: el proceso de alteración estructural permanente, **progresivo y localizado**, que se produce en un material sometido a condiciones que originan tensiones cíclicas y deformaciones en algún punto o puntos, y que puede culminar en fisuras o en rotura total tras un número suficiente de oscilaciones.

Las palabras resultadas en la definición anterior indican las características importantes del proceso para la fatiga en materiales metálicos. La fatiga es un proceso progresivo en el que los daños se desarrollan lentamente durante las primeras etapas y se aceleran rápidamente hacia el final. Así pues, la primera etapa consiste en una fase de iniciación de una fisura, que en el caso de piezas lisas y débilmente entalladas sometidas a ciclos de cargas reducidas, puede suponer más del 90 por ciento de su vida. En la mayor parte de los casos, el proceso de iniciación está confinado a una pequeña área, normalmente de elevada tensión local, donde se acumulan los daños durante el esfuerzo. En partes adyacentes de los componentes, en las que las tensiones tan sólo son ligeramente menores, es posible que no se produzcan daños por la fatiga y, por lo tanto, estas partes tienen una vida a la fatiga infinita. Normalmente, el proceso de iniciación produce varias microfisuras que pueden propagarse independientemente en mayor o menor medida hasta que una de ellas se hace dominante mediante un proceso de fusión y las microfisuras comienzan a interactuar. Bajo una carga de fatiga estable, esta fisura se propaga lentamente, pero su propagación comienza a acelerarse cuando la reducción de la sección transversal aumenta el campo local de tensiones cerca del frente de la fisura. El agotamiento final se produce en forma de rotura inestable cuando el área restante es demasiado pequeña para soportar la carga. En muchos casos, estas etapas del proceso de la fatiga pueden relacionarse con características distintivas de la superficie de rotura de los componentes que han fallado bajo cargas cíclicas. Por lo tanto, la presencia de estas características puede utilizarse para identificar la fatiga como la causa probable del agotamiento.

2. CARACTERÍSTICAS DE LAS SUPERFICIES DE ROTURA POR FATIGA

En la diapositiva 1 se muestran las superficies de rotura típicas en componentes mecánicos que estuvieron sometidos a cargas de fatiga. Una característica típica de la morfología de la superficie que resulta evidente en ambas macrografías la constituye la zona plana y lisa de la superficie que exhibe marcas. Esta zona representa la porción de la superficie de rotura en la que la fisura se propagó de modo lento y estable. Las regiones más irregulares, que muestran evidencias de una deformación plástica importante, son el área de fractura final a través de la cual la fisura progresó de modo inestable. Las marcas superficiales pueden formar anillos concéntricos que apuntan hacia las áreas de iniciación. El origen de la rotura de fatiga puede ser más o menos distintivo. En algunos casos, es posible identificar un defecto como el origen de la fisura, mientras que en otros no se observa una razón aparente que explique a qué es debido que la fisura se haya iniciado en un punto concreto de la superficie de rotura. Si la sección crítica está sometida a una elevada concentración de tensiones, la iniciación de la fatiga puede producirse en muchos puntos, a diferencia del caso de las piezas no entalladas, en las que normalmente la fisura se propaga únicamente a partir de un punto (véase la figura 1). Si bien la presencia de cualquier defecto en el origen de la fisura puede indicar la causa del agotamiento por fatiga, el área de la propagación de la fisura puede proporcionar información con respecto a la magnitud de las cargas de fatiga, así como acerca de la variación en el patrón de carga. En primer lugar, la magnitud relativa de las áreas de crecimiento lento y de rotura final proporcionan una indicación acerca de las



Diapositiva 1

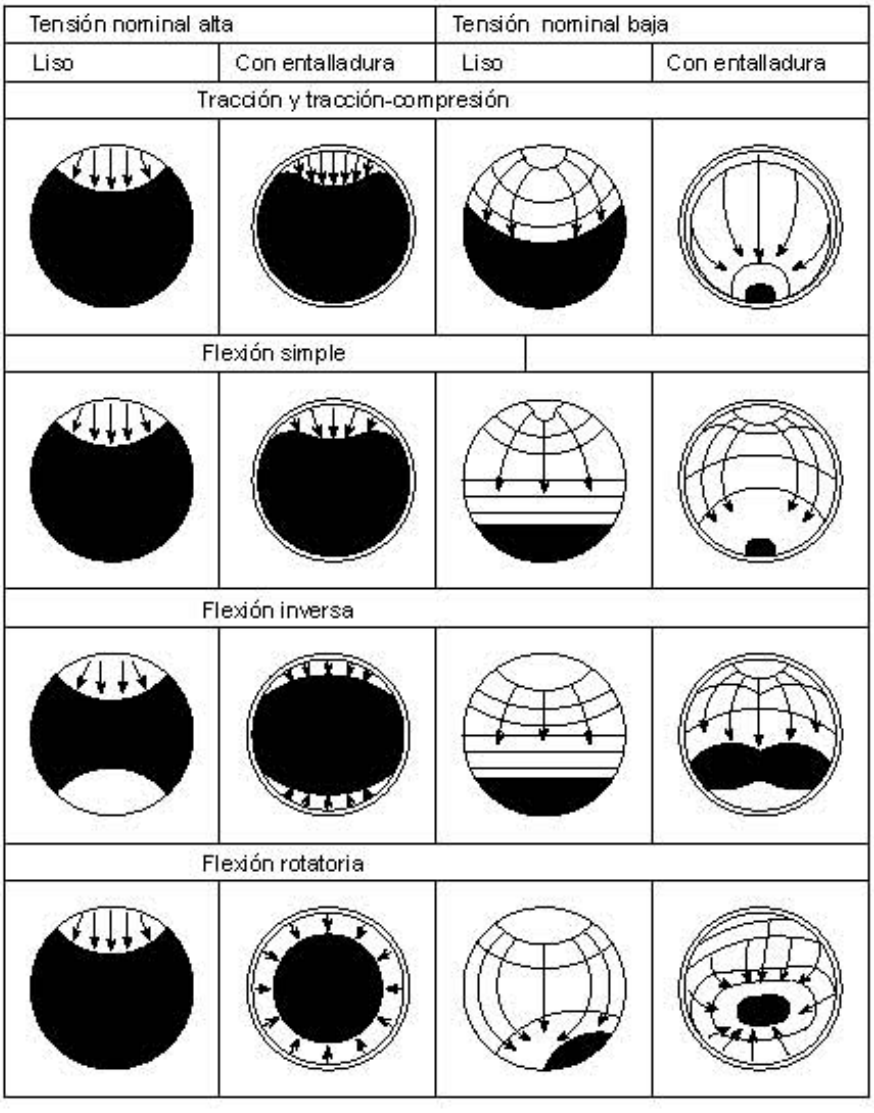


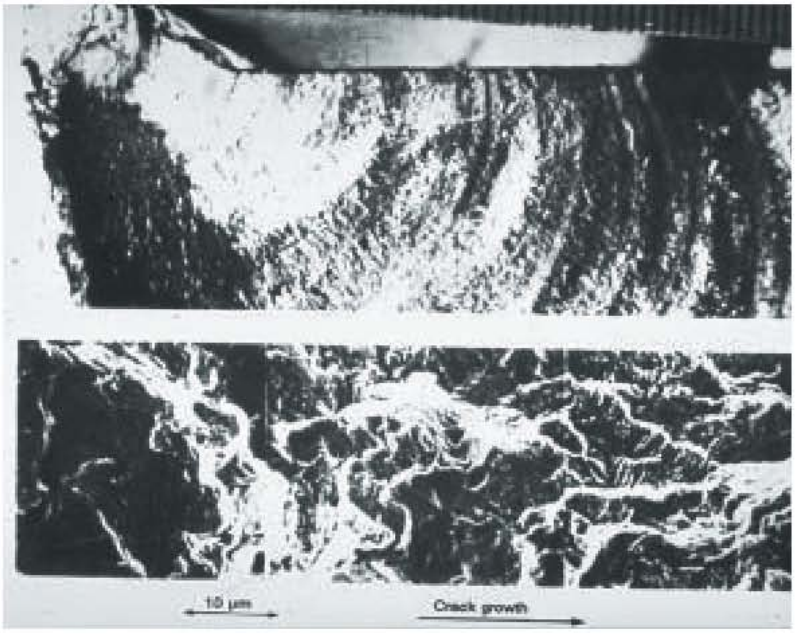
Figura 1 Esquemas de superficies de rotura a tensión alta y baja



Diapositiva 2

tensiones máximas y de la resistencia a la fatiga del material. Así pues, un área de rotura final grande en un material concreto indica una carga máxima elevada, mientras que un área reducida indica que la carga fue menor durante la rotura. Igualmente, en el caso de una tensión máxima fija, el área relativa correspondiente a la propagación lenta de la fisura aumenta con la resistencia a la fatiga del material (o con la resistencia a la tracción si la rotura final es una rotura por sobrecarga totalmente dúctil).

Las marcas superficiales se forman cuando la fisura se propaga intermitentemente y a diferentes velocidades durante variaciones aleatorias del patrón de carga bajo la influencia de un entorno corrosivo cambiante. Por lo tanto, las marcas no se observan en las superficies de probetas de fatiga ensayadas bajo condiciones de carga de amplitud constante, sin periodos de inicio-paro. La propagación media de la fisura es del orden de unos pocos milímetros por millón de ciclos en el caso de la fatiga de ciclo grande, y es evidente que la distancia entre bandas en las marcas superficiales no constituye una medida de la velocidad del avance de la fisura en cada ciclo de carga. No obstante, el examen mediante microscopio electrónico a ampliaciones de entre 1.000x y 30.000x puede revelar ondas características en la superficie, denominadas estriaciones de fatiga (véase la diapositiva 2). A pesar de que sus apariencias son en cierta manera similares, estas líneas no son las marcas superficiales descritas anteriormente, ya que una marca de playa puede contener miles de estriaciones. Durante cargas de fatiga de amplitud constante, a velocidades de propagación relativamente altas en materiales dúctiles, tales como acero inoxidable y aleaciones de aluminio, la separación entre las estriaciones representa el avance de la fisura en cada ciclo de carga. Pero, a tensiones reducidas, la fatiga de ciclo grande ocurrirá allí donde la distancia entre las estriaciones es inferior a la distancia atómica (-2.5 x 10^{-8} m) por ciclo. Bajo estas condiciones, la fisura no avanza simultáneamente a lo largo de su frente,



Diapositiva 3

sino que la propagación se produce tan sólo a lo largo de algunas porciones durante unos pocos ciclos, deteniéndose entonces mientras continúa a lo largo de otros segmentos. Las estriaciones, como las que muestra la figura 3, no se observan cuando la fisura se propaga mediante otros mecanismos, tales como fusión de microporos o, en los materiales frágiles, microclivaje.

En los aceros de construcción, la fisura puede propagarse por medio de estos tres mecanismos y puede resultar difícil observar las estriaciones. En la diapositiva 3 se muestra un ejemplo de marcas de playa y estriaciones en la fractura que se originó en un defecto importante de un acero C-Mn soldado con un límite elástico de aproximadamente 360 Mpa.

3. NATURALEZA DEL PROCESO DE LA FATIGA

A partir de la descripción de las superficies que presentan roturas por fatiga, es posible identificar tres etapas en el proceso de la fatiga:

Etapa I: Iniciación de una fisura

Etapa II: Propagación de una fisura dominante

Etapa III: Rotura final

La fisuración por fatiga en los metales se asocia siempre con la acumulación de deformaciones plásticas irreversibles. El proceso de la fisura que se describe a continuación es aplicable a las probetas lisas fabricadas en materiales dúctiles.

En la fatiga de ciclo grande, la tensión máxima en forma de cargas cíclicas, que finalmente cause el agotamiento por fatiga, puede estar muy por debajo del límite elástico del material, y no se produce una deformación plástica a gran escala. Sin embargo, las deformaciones plásticas pueden acumularse en una superficie libre como resultado de los movimientos de dislocación. Las dislocaciones son defectos lineales en la estructura reticular que pueden desplazarse y multiplicarse bajo la acción de la tensión tangencial, dejando una deformación permanente. La movilidad de la dislocación y, por lo tanto, la cantidad de deformación (o deslizamiento) es mayor en una superficie libre que en el interior de materiales cristalinos debido a la ausencia de la contención que suponen las juntas intergranulares. La orientación individual de los granos en los metales estructurales policristalinos es aleatoria. No obstante, cada grano tiene una estructura atómica ordenada que origina propiedades direccionales. La deformación, por ejemplo, se produce en planos cristalográficos de fácil deslizamiento a lo largo de los que las dislocaciones pueden desplazarse con más facilidad que en otros planos. Puesto que el deslizamiento está controlado principalmente por la tensión tangencial, la deformación por deslizamiento se produce a lo largo de planos cristalográficos que están orientados cerca de 45° con respecto a la dirección de la tensión de tracción. Los resultados de esta deformación consisten en que los planos atómicos se deslizan con relación a sus iguales, produciéndose una discontinuidad de la superficie en bandas de deslizamiento. Durante ciclos adicionales, la deformación de la banda de deslizamiento se intensifica en la superficie y se extiende hacia el interior del grano, produciéndose las llamadas bandas de deslizamiento persistentes (PSBs). El nombre es producto de la observación que se hizo, en los primeros estudios de la fatiga, de que la banda de deslizamiento reaparecería -"persistiría"- en el mismo lugar, una vez que se hubiera eliminado una fina capa superficial mediante elastopulido. La acumulación del flujo plástico local origina surcos y senos superficiales llamados extrusiones e intrusiones, respectivamente, figura 2. La cohesión entre las capas de la banda de deslizamiento se ve debilitada por la oxidación de las superficies recientes y por el endurecimiento del material deformado. En cierto momento de este proceso se desarrollan pequeñas fisuras en las intrusiones. Estas microfisuras pueden propagarse a lo largo de los planos de deslizamiento, es decir, se trata de un proceso promovido por la tensión tangencial. La propagación en el modo tangencial, denominada etapa de propagación I, se extiende por unos pocos granos. Durante ciclos continuados, las microfisuras de los diferentes granos se fusionan, produciéndose una o unas pocas fisuras dominantes. La carrera de tensión asociada a la fisura dominante ocasiona una propaga-

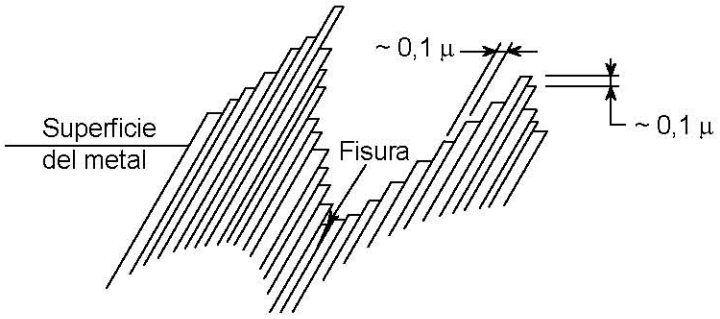


Figura 2 Banda de deslizamiento con extrusiones e intrusiones generadas en la superficie de un grano sujeto a tensión cíclica. La fisura se inicia en la intrusión

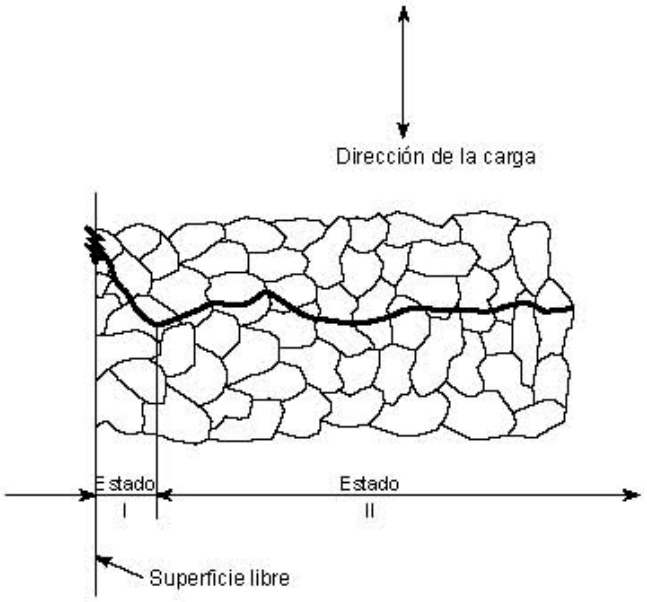


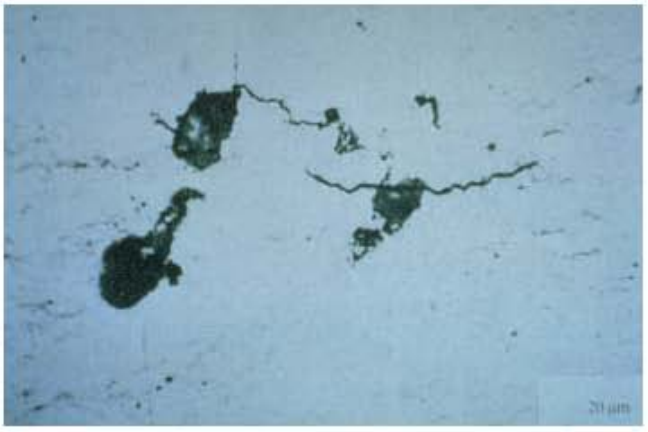
Figura 3 Propagación de fisura en estado I y II en material policristalino

ción adicional, bajo la acción primaria de la tensión principal máxima; a ésta se la denomina etapa de propagación II. El recorrido de la fisura es ahora esencialmente perpendicular al eje de la tensión de tracción. No obstante, el avance de la fisura sigue estando influido por la orientación cristalográfica de los granos y se propaga en un recorrido en zig-zag a lo largo de los planos de deslizamiento y planos de clivaje, de grano a grano (véase la figura 3). La mayor parte de las roturas de fatiga avanzan a través de las juntas intergranulares, tal y como se indica en la figura 3, es decir, en un modo transcristalino. Sin embargo, a altas temperaturas o en un entorno corrosivo, las juntas intergranulares pueden hacerse más débiles que la matriz del grano, produciéndose una propagación intercristalina de la fisura. La superficie de rotura creada por la etapa de propagación II de la fisura se caracteriza, en los metales dúctiles, por estriaciones cuya densidad y anchura puede relacionarse con el nivel de tensión aplicado.

Puesto que la aparición de la fisura está relacionada con la magnitud de la tensión, cualquier concentración de tensión en forma de defectos superficiales internos o externos puede reducir acusadamente la vida a la fatiga, especialmente cuando la fase de iniciación ocupa una parte significativa de la vida total. Así pues, una pieza que presente una superficie lisa y pulida tiene generalmente una mayor resistencia a la fatiga que otra que presente una superficie sin labrar. La iniciación de una fisura también puede verse facilitada por inclusiones, que se comportan como concentradores internos de las tensiones. En los materiales dúctiles, las deformaciones de la banda de deslizamiento en las inclusiones son mayores que en ningún otro, y las roturas de fatiga pueden iniciarse aquí a menos que dominen otros concentradores de la tensión.

En materiales de alta resistencia, especialmente aceros y aleaciones de aluminio, se observa a menudo un mecanismo de iniciación diferente. En estos materiales, que son altamente resistentes a la deformación por deslizamiento, es posible que la interfase entre la matriz y la inclusión sea relativamente débil, por lo que las fisuras se iniciarán aquí si se produce la descohesión en la superficie de la inclusión, ayudada por el aumento de la carrera de tensión/deformación existente alrededor de ésta. La diapositiva 4 muestra pequeñas roturas por fatiga que se originan en inclusiones situadas en un acero de gran resistencia. Alternativamente, una inclusión dura y frágil puede romperse y se puede iniciar una rotura de fatiga en los bordes de la rotura de clivaje.

Tras la discusión anterior, resulta evidente que no es posible hacer una distinción clara



Diapositiva 4

entre la aparición de una fisura y la propagación de la etapa I. Por lo tanto, "iniciación de una fisura" es un término más bien impreciso que se utiliza para describir una serie de acontecimientos que conducen a la fisura de la etapa II. A pesar de que la etapa de iniciación incluye una cierta cantidad de propagación de la fisura, lo pequeño de la escala de la fisura en comparación con dimensiones microestructurales, tales como tamaño del grano, invalida un análisis de esta fase de propagación basado en la mecánica de la fractura. En cambio, las tensiones y deformaciones locales se relacionan normalmente con constantes de los materiales en los modelos de predicción que se utilizan para calcular la extensión de la etapa I. Normalmente, las constantes de los materiales se obtienen a partir de pruebas realizadas sobre probetas no entalladas sometidas a ciclos controlados de tensión o deformación.

4. CARGA DE FATIGA

La forma más simple de espectro de tensiones al que puede someterse un elemento estructural consiste en una historia tensión-tiempo de amplitud constante o sinusoidal con una carga media constante, tal y como se ilustra en la figura 4. Dado que se trata de un patrón de carga de fácil definición y cuya reproducción en laboratorio es sencilla, constituye la base de la mayor parte de los ensayos de fatiga. Los seis parámetros que se indican a continuación se utilizan para definir un ciclo de tensión de amplitud constante:

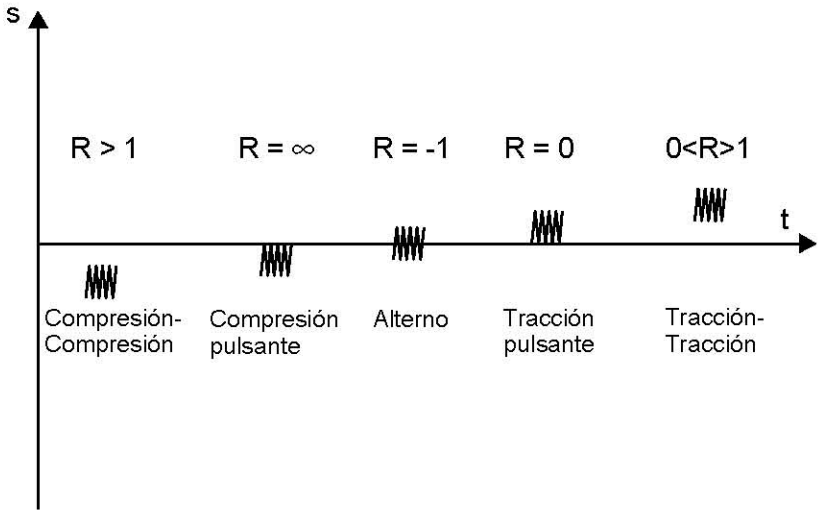


Figura 5 Ciclos de tensiones con diferentes tensiones medias y valores de R

S_{max} = tensión máxima del ciclo

S_{min} = tensión mínima del ciclo

S_m = tensión media del ciclo = $\frac{1}{2}(S_{max} + S_{min})$

S_a = amplitud de la tensión = $\frac{1}{2}(S_{max} - S_{min})$

AS = rango de tensión = $S_{max} - S_{min} = 2S_a$

R = ratio de las tensiones = $\frac{S_{min}}{S_{max}}$

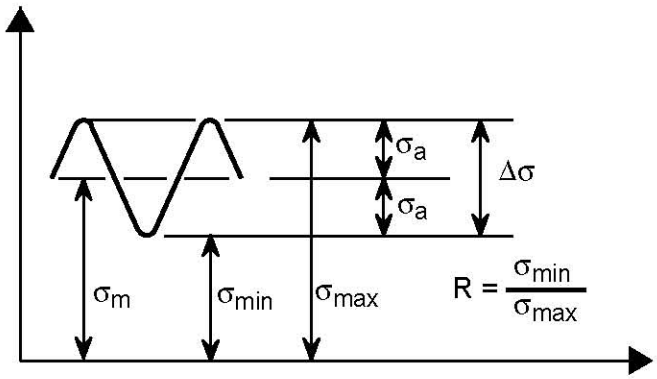


Figura 4 Parámetros de tensión que se usan para definir una carga de amplitud constante

El ciclo de la tensión se define exclusivamente mediante dos cualesquiera de las cantidades anteriores, excepto combinaciones de la carrera de tensión y de la amplitud de la tensión. En la figura 5 se muestran varios patrones de la tensión, con definiciones que se ajustan a la terminología ISO [ ].

La rango de tensión es el parámetro primario que influye sobre la vida a la fatiga, con la tensión media como parámetro secundario. A menudo se utiliza el ratio de las tensiones como indicación de la influencia de las cargas medias, pero el efecto de una carga media constante no es igual al de la tensión media constante. La diferencia entre las curvas S-N con tensión media constante o con ratio-R constante se discute en la sección que se ocupa de los ensayos de fatiga.

La frecuencia de los ensayos es necesaria para definir una historia de la tensión, pero en el caso de la fatiga de materiales metálicos, la frecuencia no es un parámetro importante, excepto a altas temperaturas, cuando la fluencia interactúa con la fatiga o cuando la corrosión influye sobre la vida a la fatiga. En ambos casos, una menor frecuencia de ensayos tiene como resultado una vida más corta.

En la figura 6 se muestran historias de tiempo-tensión típicas obtenidas a partir de estructuras

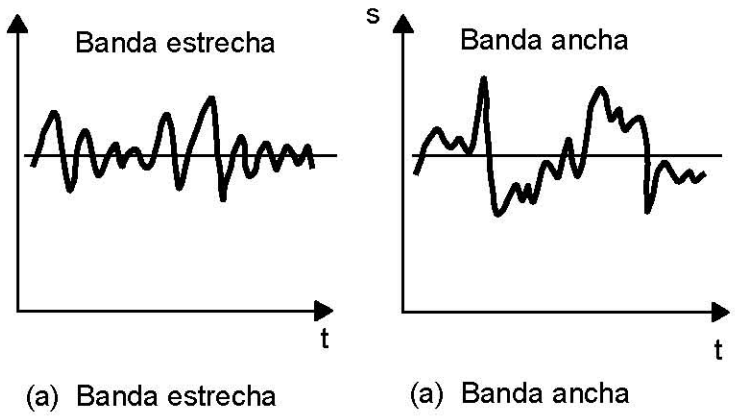


Figura 6 Historias de tiempo-tensión bajo servicio

reales. La secuencia de la figura 6a presenta una tensión media constante, los ciclos de tensiones individuales resultan fácilmente identificables y es necesario evaluar esta historia de la tensión únicamente en términos de la carrera de tensión. Las desviaciones de la tensión más "aleatorias" de la figura 10b se denominan un proceso de banda ancha debido a que la función de la potencia por unidad volumétrica (una representación gráfica de la energía frente a la frecuencia) abarca un amplio campo de frecuencias, en contraste con la de la figura 6a, que esencialmente contiene una frecuencia. La diferencia se ilustra en la figura 7. La historia de la carga de la figura 6, puede interpretarse como una variación de la carga principal con desviaciones menores superpuestas que podrían ser causadas, por ejemplo, por vibraciones de segundo orden o por perturbaciones electrónicas en el sistema de adquisición de carga. En caso de desviaciones reales de la carga media, no sólo el campo, sino también la media de cada ciclo han de ser registrados con el fin de calcular la influencia de la carga media sobre la acumulación de daños. En ambos casos resulta necesario eliminar los ciclos más pequeños, puesto que es posible que estén por debajo del límite de fatiga y, por lo tanto, no causen daños por fatiga, o debido a que no representen ciclos de carga reales. Así pues, resulta necesario un procedimiento de evaluación más complicado para la identificación y el recuento de los ciclos de tensión individuales más importantes y de sus tensiones medias asociadas. Los métodos de conteo, tales como el del par del campo, el de la recogida de lluvia y el de el embalse, han sido diseñados para lograr este objetivo. Estos procedimientos se describen el punto 7.

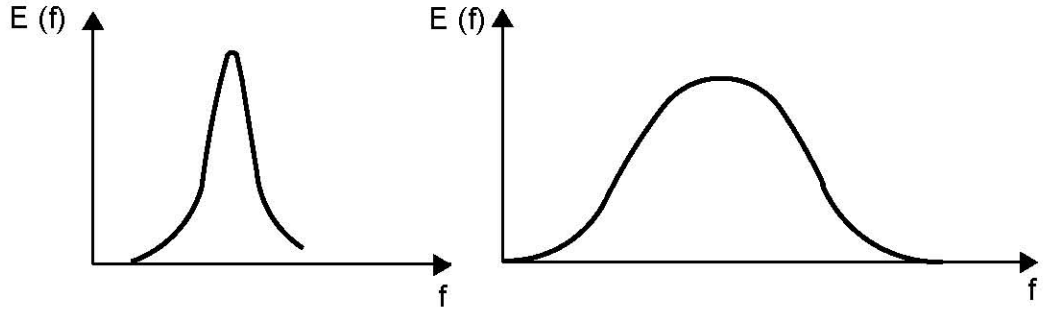


Figura 7 Espectros de densidad de energía para las dos historias de tiempo-tensión de la figura 6

5. DATOS DE LA VIDA A LA FATIGA

Es posible expresar la vida total a la fatiga en términos de ciclos hasta el agotamiento de la siguiente manera:

$$N_t = N_i + N_p \qquad (1)$$

donde N_i y N_p son el número de ciclos empleados en las etapas de iniciación y de propagación, respectivamente. Como ya se ha indicado, estas dos etapas son de naturalezas diferentes y su duración está controlada por diferentes parámetros materiales. La vida de los componentes no entallados, por ejemplo, está dominada por la iniciación de la fisura. Pero, en piezas fuertemente entalladas o que contengan defectos que favorezcan la vida de las fisuras, por ejemplo, uniones soldadas, la etapa de propagación de la fisura domina y es posible utilizar los datos de esta propagación para la evaluación de la vida a la fatiga, mediante el análisis de la mecánica de la fractura. Así pues, son necesarios diferentes métodos de prueba para la evaluación de las propiedades de fatiga de estos tipos de componentes.

5.1 Curvas de la Resistencia a Fatiga

Los datos de la fatiga para aquellos componentes cuyas vidas consisten en una fase de iniciación seguida por la propagación de la fisura se presentan normalmente en forma de curvas S-N, donde la tensión aplicada S se traza frente al número total de ciclos hasta el agotamiento, N (= N_t). A medida que la tensión disminuye, la vida en ciclos hasta el agotamiento aumenta, tal y como se ilustra en la figura 8. Las curvas S-N para aleaciones férricas y de titanio muestran una tensión limitadora por debajo de la cual no se produce el agotamiento; esto se denomina el límite de fatiga con amplitud constante o el límite de resistencia a la fatiga. El punto de inversión o "rodilla" de la curva se encuentra normalmente en el rango de ciclo 10^5 a 10^7. En las aleaciones de aluminio y en otras aleaciones no férricas, no existe una asíntota de la tensión y en cualquier nivel de tensión existe una vida a la fatiga finita. No obstante, todos los materiales exhiben una curva relativamente plana en la zona de los ciclos grandes, es decir, a vidas superiores a aproximadamente 10^5 ciclos.

Una característica diferencial de los ensayos de fatiga es la gran dispersión de los datos de la resistencia a la fatiga, lo cual es particularmente evidente cuando se prueban varias probetas en el mismo nivel de tensión, tal y como se ilustra en la figura 9. El trazado de los datos para un nivel de tensión concreto a lo largo de un eje de resistencia logarítmico ofrece una distribución a la que es posible aproximarse mediante la distribución Gaussiana (o normal), de aquí que se diga que los datos de la resistencia tengan una distribución logarítmica normal. Alternativamente, puede utilizarse la distribución de Weibull, pero la elección no es importante, ya que se necesitan alrededor de 200 probetas, probadas al mismo nivel de tensión, para hacer una distinción estadísticamente significativa entre ambas distribuciones. Este número es aproximadamente un orden de magnitud superior a la cantidad de pro-

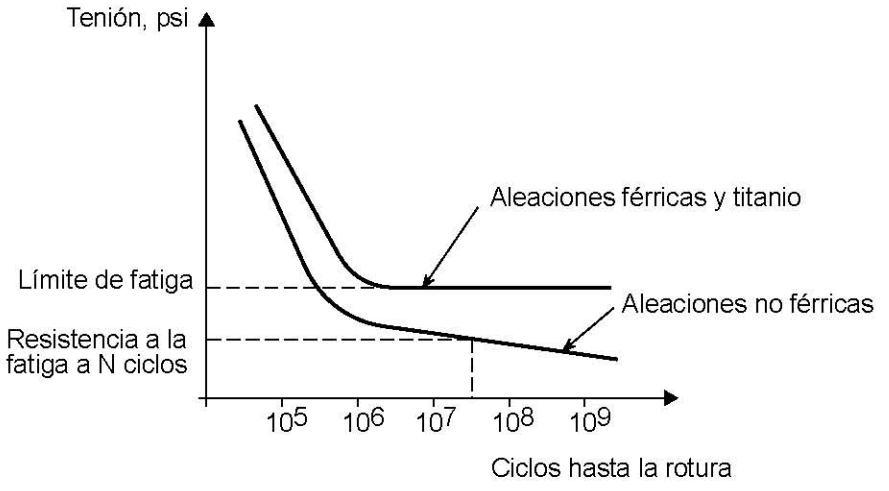


Figura 8 Curvas de resistencia a la fatiga (S-N) sin especificación de los límites de fatiga (esquema)

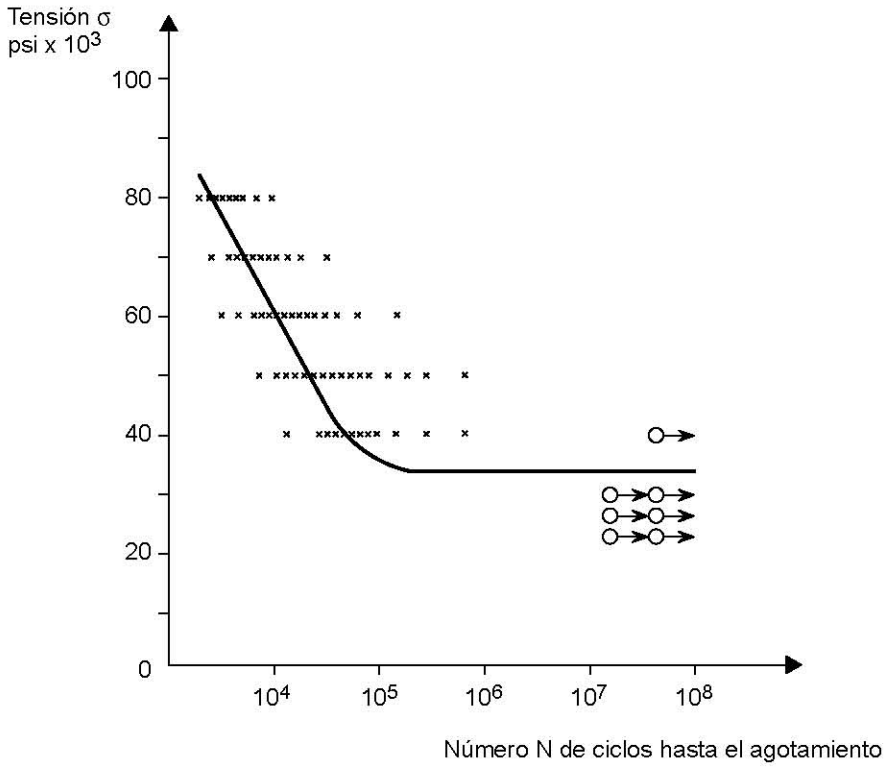


Figura 9 Dispersión de los datos de fatiga

betas que normalmente hay disponibles para los ensayos de fatiga en un nivel de tensión.

Asumiendo que la distribución de la vida sea logarítmica normal, es posible utilizar la curva de la vida media asociada y la desviación típica para definir una curva S-N de cálculo para cualquier probabilidad de agotamiento que se desee.

Cuando la etapa de propagación de la fisura domina la vida a la fatiga, los datos de cálculo pueden obtenerse a partir de las curvas de la propagación de la fisura, de lo que se muestra esquemáticamente un ejemplo en la figura 10. El coeficiente K de intensidad de la tensión describe tan sólo la carrera de tensión cercana al extremo de la fisura, y, por lo tanto, se utiliza en el cálculo contra la rotura inestable. Igualmente, puede esperarse que el campo del coeficiente de la intensidad de la tensión, ΔK, gobierne la propagación de la fisura de fatiga. Paris [3] fue el primero en probar la validez de esta afirmación, que posteriormente fue verificada por muchos otros investigadores. La curva de la propagación de la fisura, que presenta una forma sigmoidal, se extiende por tres regiones, tal y como se indica esquemáticamente en la figura 10. En la Zona I, la velocidad de propagación de la fisura cae asintóticamente a medida que ΔK disminuye hacia un límite o umbral, ΔK_{th}, por debajo del cual no se produce ninguna propagación de la fisura. Los datos de la resistencia de la vida de fatiga y los datos de la propagación de la fisura muestran una considerable dispersión y es necesario evaluar los resultados de las pruebas mediante métodos estadísticos con el fin de derivar datos de cálculo útiles.

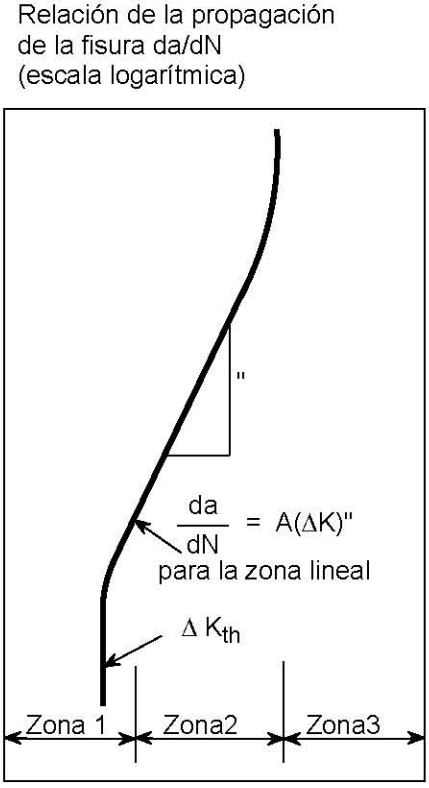


Figura 10 Curva de la propagación de la fisura, con tres zonas de parámetros de influencia diferentes