Caracterización de Materiales

Tema 7. Caracterización en fatiga

Isidro Carrascal Vaquero

Soraya Diego Cavia

José Antonio Casado del Prado

Diego Ferreño Blanco

Jesús Setién Marquínez

DPTO. DE CIENCIA E INGENIERÍA
DEL TERRENO Y DE LOS MATERIALES

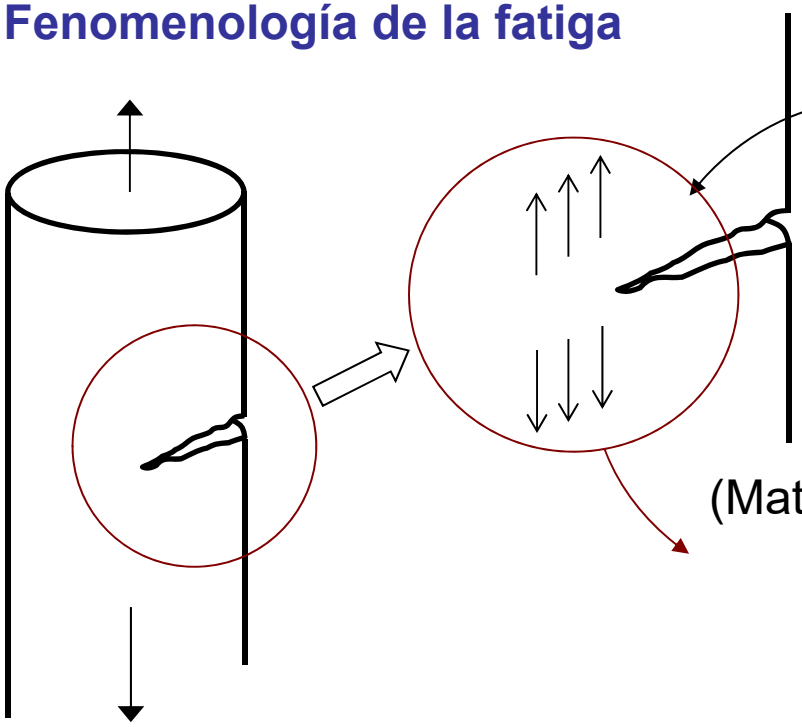
Este tema se publica bajo Licencia:
Creative Commons BY-NC-SA 4.0

ÍNDICE:

1. INTRODUCCIÓN
2 CARGAS CÍCLICAS
3 VIDA TOTAL EN FATIGA
4 CURVAS S-N
5 CURVAS ε-N
6 ENFOQUE GLOBAL
7 CARACTERIZACIÓN DE COMPONENTES NO FISURADOS
8 CRECIMIENTO DE FISURAS POR FATIGA
9 DETERMINACIÓN DE LA LEY DE PARIS
10 FACTORES INFLUYENTES EN LA PROPAGACIÓN
11 MICROMECANISMOS DE FATIGA

1. INTRODUCCIÓN

Fenomenología de la fatiga



Fisura (defecto)

- de fabricación
- **producido por fisuración**
- **daño en funcionamiento**

(Material + defectos) + Solicitación **Vs.** Condición local crítica para la fractura (Tenacidad)

- La experiencia demuestra que los componentes estructurales sometidos a **tensiones oscilantes en el tiempo** pueden manifestar daño por fisuración **incluso cuando las tensiones son de pequeña entidad**.
- Este fenómeno se denomina **fatiga**.

1. INTRODUCCIÓN

Ejemplos históricos:

- LIBERTY SHIPS (1943)
- ACCIDENTE DEL VUELO B-737 DE ALOHA AIRLINES (1988)
- ACCIDENTE DEL PRESTIGE (2002)
- COLAPSO DE LA PLATAFORMA ALEXANDER KIELLAND (1980)

1. INTRODUCCIÓN

LIBERTY SHIPS (1943):

- En los comienzos de la II Guerra Mundial, la armada alemana hundía cargueros británicos tres veces más rápido que lo que éstos eran capaces de construirlos.
- EEUU colaboró con Gran Bretaña suministrando los cargueros Liberty. A diferencia de los barcos tradicionales, fabricados mediante chapas roblonadas, los Liberty eran estructuras monolíticas completamente soldadas.

1. INTRODUCCIÓN

LIBERTY SHIPS (1943):

- Todo funcionaba bien hasta diciembre de 1943, cuando un barco Liberty navegaba entre Siberia y Alaska….
- De 2700 barcos, 400 experimentaron fracturas de diversa índole, 90 de ellas muy serias. 20 de los barcos se partieron por la mitad espontáneamente.
- Todo ello debido a una "ligera" modificación en el proceso de fabricación.
- CAUSAS: soldadura frágil, con presencia de defectos. Efecto fragilizante de las bajas temperaturas.

1. INTRODUCCIÓN

ACCIDENTE DEL VUELO B-737 DE ALOHA AIRLINES (1988):

- Desprendimiento parcial del fuselaje en pleno vuelo.
- Desaparición de una de las azafatas.
- CAUSAS: procesos de fatiga que condujeron a la fractura en una zona de unión del fuselaje.

1. INTRODUCCIÓN

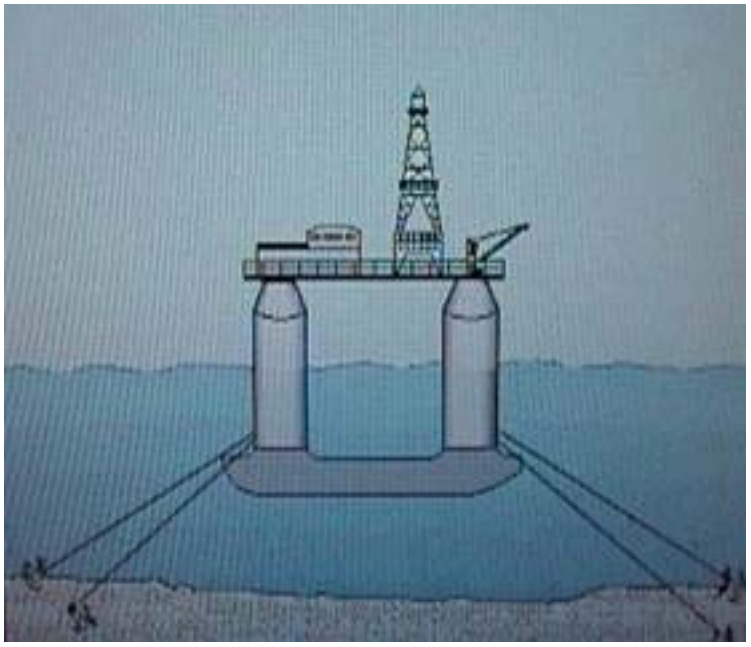
ACCIDENTE DEL PRESTIGE (2002):

- Vertido de 77000 Tm de fuel.
- CAUSAS: Acumulación del daño debido a fatiga térmica y mecánica que condujo a la fractura total del buque (Comisión Permanente de Investigación de Siniestros Marítimos).

1. INTRODUCCIÓN

COLAPSO DE LA PLATAFORMA ALEXANDER KIELLAND (1980)

- Mar del Norte: 123 muertos.
- CAUSAS: soldadura de un sónar en uno de los pontones.



Para mentes curiosas…

http://www.exponent.com/multimedia/

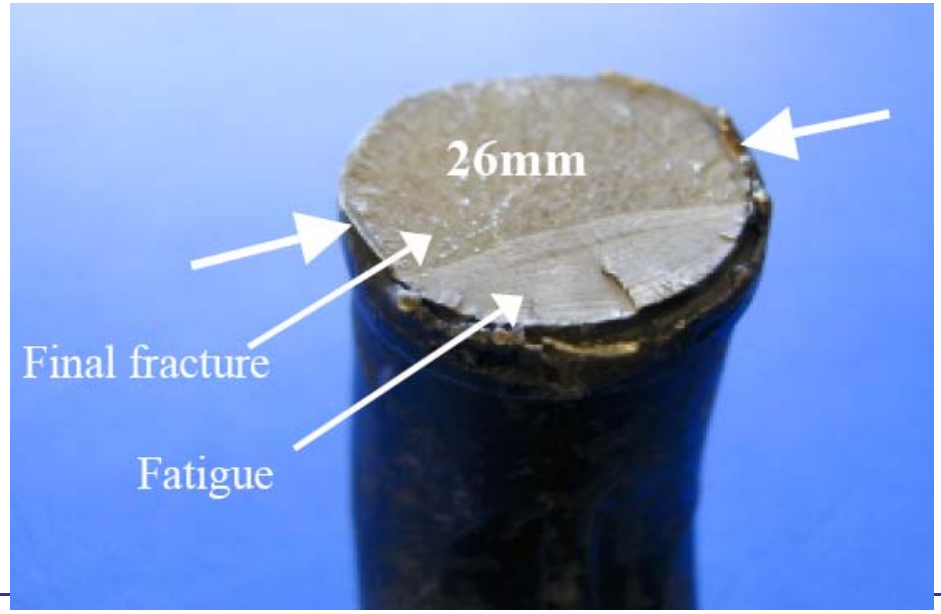
http://www.youtube.com/watch?v=7QVn3NUW_aQ

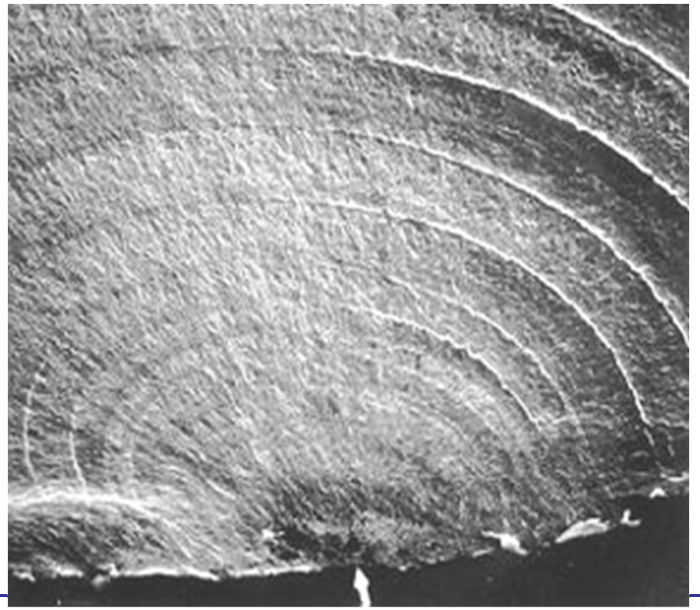
1. INTRODUCCIÓN

Definición de fatiga

- Modo de fallo en los materiales que implica la iniciación y propagación de fisuras en elementos sometidos a tensiones variables en el tiempo.
- Se denomina “proceso subcrítico” pues es un fenómeno previo a la rotura (que puede conducir a ella).

Morfología típica de la fractura: INICIACIÓN Y PROPAGACIÓN





1. INTRODUCCIÓN

S. XIX: Primeros estudios científicos

ALBERT (1829), ensayos de fatiga en cadenas de hierro.

PONCELET (1829) Y RANKINE (1843), WÖHLER (1850-1870), rotura de carriles de tren tras gran número de ciclos con tensiones bajas.

S.XX: Aparición de la MF y aplicación a la fatiga

OROWAN y TAYLOR (1930) desarrollan el concepto de dislocación.

GRIFFITH (1921) e IRWIN (desde 1950) sientan las bases de la MF actual.

PARIS (1961): aplicación de la MF a procesos de fatiga.

Otros autores: extensión a materiales y situaciones estructurales diversos.

1. INTRODUCCIÓN

IDEAS CLAVE:

- Las cargas monótonas no producen daño por fatiga. Deben ser **oscilantes** en el tiempo.
- Se ha estimado que los **costes asociados** con la rotura de componentes y estructuras en los EEUU suponen un 4% del su PIB.
- Se han registrado **miles de accidentes**, en ocasiones con consecuencias fatales.
- Actualmente **disponemos de herramientas de caracterización y de análisis** que permiten dar buena cuenta de los procesos de fatiga tanto en la etapa de diseño de componentes como en las de inspección y evaluación del funcionamiento.
- S. XX y XXI: **Códigos de diseño** en fatiga de elementos estructurales y componentes. Ej: Eurocódigo, ASME, API, FITNET…

1. INTRODUCCIÓN

ESQUEMA GENERAL:

El análisis de vida en fatiga puede realizarse desde **dos puntos de vista**:

1) Estimación de la **vida total** del elemento (**iniciación + propagación**). Tiene su origen en los estudios de Wöhler, Basquin y Goodman (S.XIX), y se basa en estudios experimentales y estadísticos. El parámetro de diseño es la endurancia.

2) Evaluación de vida de un componente a través de la **propagación,** suponiendo la existencia de fisuras de un tamaño determinado. Este enfoque nace con la MF y los trabajos de Paris (años 60).

1. INTRODUCCIÓN

DIFICULTADES INTRÍNSECAS EN EL ANÁLISIS DE FATIGA:

1) Los resultados de laboratorio demuestran que se trata de un fenómeno aleatorio y, por ello, difícil de predecir: probetas idénticas ensayadas en condiciones análogas manifiestan comportamientos en fatiga manifiestamente diferentes. Se han empleado diferentes distribuciones de probabilidad para modelar el comportamiento aleatorio de la fatiga: distribución normal, de valores extremos, Birnbaum-Sanders o de Weibull.
2) Es difícil trasladar los resultados experimentales a situaciones reales.
3) En muchas ocasiones, resulta imposible conocer a priori las condiciones de operación del componente (p.ej., viento, oleaje…).
4) Lo mismo puede decirse de las condiciones ambientales; además, normalmente generan mecanismos sinérgicos difíciles (¿imposibles?) de valorar / predecir.

1. INTRODUCCIÓN

TIPOS DE FATIGA

COMPONENTES NO FISURADOS

No existen fisuras iniciales y la fatiga está controlada por la fase de iniciación

COMPONENTES FISURADOS

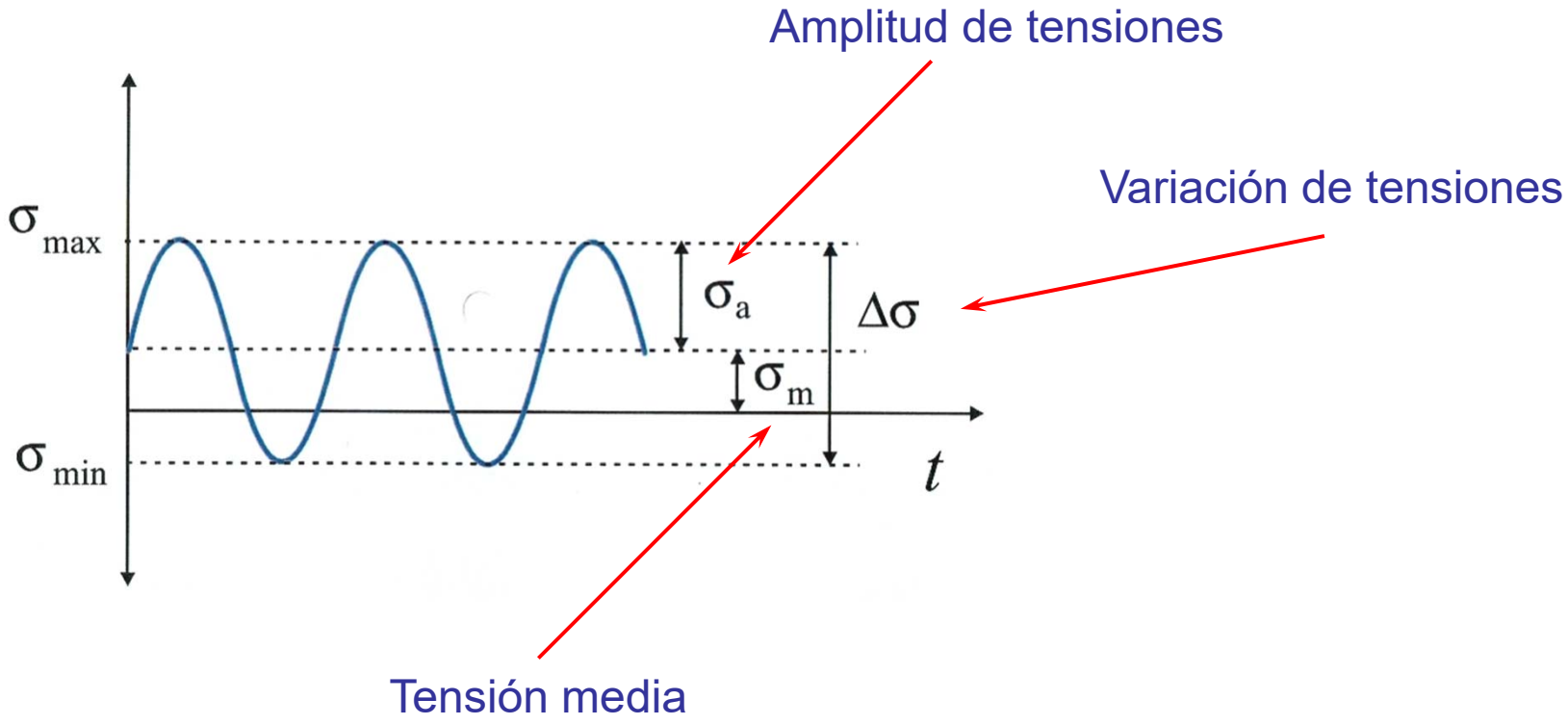
Hay fisuras desde el comienzo del análisis y la fatiga está controlada por la fase de propagación

Fatiga de **alto número de ciclos (curvas S-N):**
- Más de 10000 ciclos hasta rotura
- Tensiones inferiores al límite elástico

Fatiga de **bajo número de ciclos (curvas ε–N):**
- Menos de 10000 ciclos hasta rotura
- Tensiones superiores al límite elástico

2. CARGAS CÍCLICAS

- Caso particular (sencillo) de las cargas oscilantes.
- Evolución de tensiones durante un proceso de carga cíclica.



2. CARGAS CÍCLICAS

Parámetros que caracterizan un proceso de fatiga:

Variación/intervalo de tensiones: $\Delta\sigma = \sigma_{max} - \sigma_{min}$

Amplitud de tensiones: $\sigma_a = \frac{\sigma_{max} - \sigma_{min}}{2}$

Tensión media: $\sigma_m = \frac{1}{2}\{\sigma_{max} + \sigma_{min}\}$

Relación de tensiones: $R = \frac{\sigma_{min}}{\sigma_{max}}$

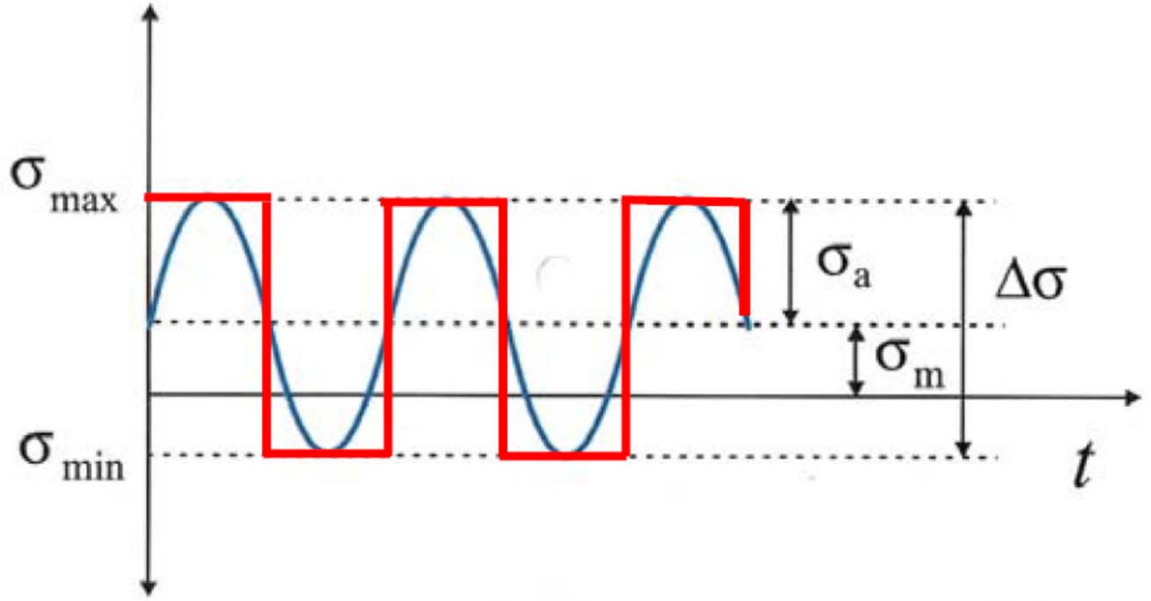
Frecuencia: Medida en Hz (s-1).

La experiencia indica que su influencia en el crecimiento de fisura es limitada salvo que vaya acompañada de efectos ambientales, como humedad o elevadas temperaturas.

2. CARGAS CÍCLICAS

Influencia de la forma de la función:

- Onda senoidal, cuadrada, trapezoidal, etc.
- Como en el caso de la frecuencia, la experiencia indica que su influencia en el crecimiento de grietas es limitado salvo en el caso de presencia de algún agente ambiental (Tema 7).



2. CARGAS CÍCLICAS

Ejercicios propuestos:

1) Obtener la tensión media, la amplitud de tensiones y el intervalo de tensiones suponiendo σ_{min} = -100 MPa y σ_{max}=250 MPa.

3. VIDA TOTAL EN FATIGA

TIPOS DE FATIGA

COMPONENTES NO FISURADOS

No existen fisuras iniciales y la fatiga está controlada por la fase de iniciación

COMPONENTES FISURADOS

Hay fisuras desde el comienzo del análisis y la fatiga está controlada por la fase de propagación

Fatiga de **alto número de ciclos (curvas S-N):**
- Más de 10000 ciclos hasta rotura
- Tensiones inferiores al límite elástico

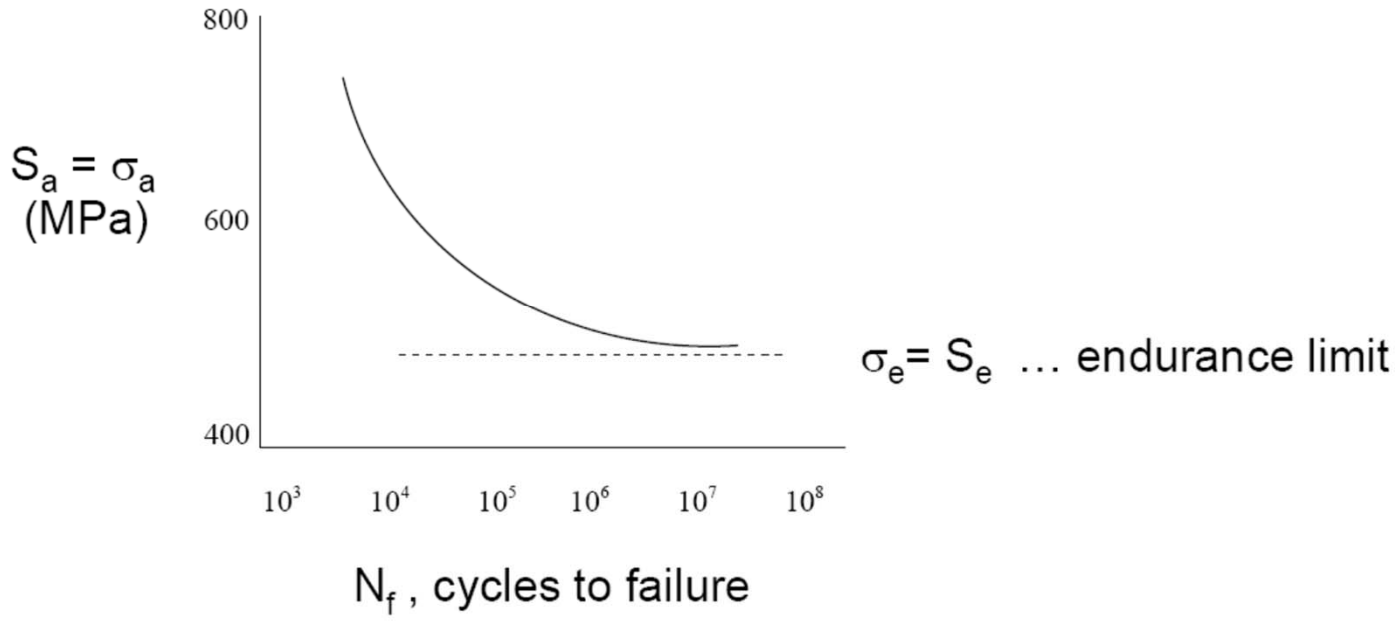
Fatiga de **bajo número de ciclos (curvas ε–N):**
- Menos de 10000 ciclos hasta rotura
- Tensiones superiores al límite elástico

3. VIDA TOTAL EN FATIGA

- Fue el primer enfoque de análisis de la fatiga: propuesto por Wöhler (1860).
- Onda senoidal, cuadrada, trapezoidal, etc.
- Incluye los procesos de **iniciación** de fisura, **propagación** de la misma y **rotura final** del componente.
- Existen **dos métodos** de análisis de fatiga basados en consideraciones de vida total:
  - **ALTO NÚMERO DE CICLOS (HCF):** curvas S-N (curvas de Wöhler)
  - **BAJO NÚMERO DE CICLOS (LCF):** curvas ε-N

4. CURVAS S-N (HCF)

- Tensiones alternativas (**σ_m=0, R=-1**): σ_a Vs. N_f (escala semi-logarítmica).
- En muchos materiales existe una amplitud mínima (**límite a fatiga o endurancia, σ_e**) por debajo de la cual no se da la fatiga. En la práctica, se considera vida infinita para $N_f = 10^7$ ciclos
- Recientemente, investigadores (Bathias, Murakami, and Stanzl-Tschegg) han encontrado en determinados materiales fallos por fatiga por debajo del límite de fatiga para muy alto número de ciclos (10^9 - 10^{10}).



4. CURVAS S-N (HCF)

Ejemplo:

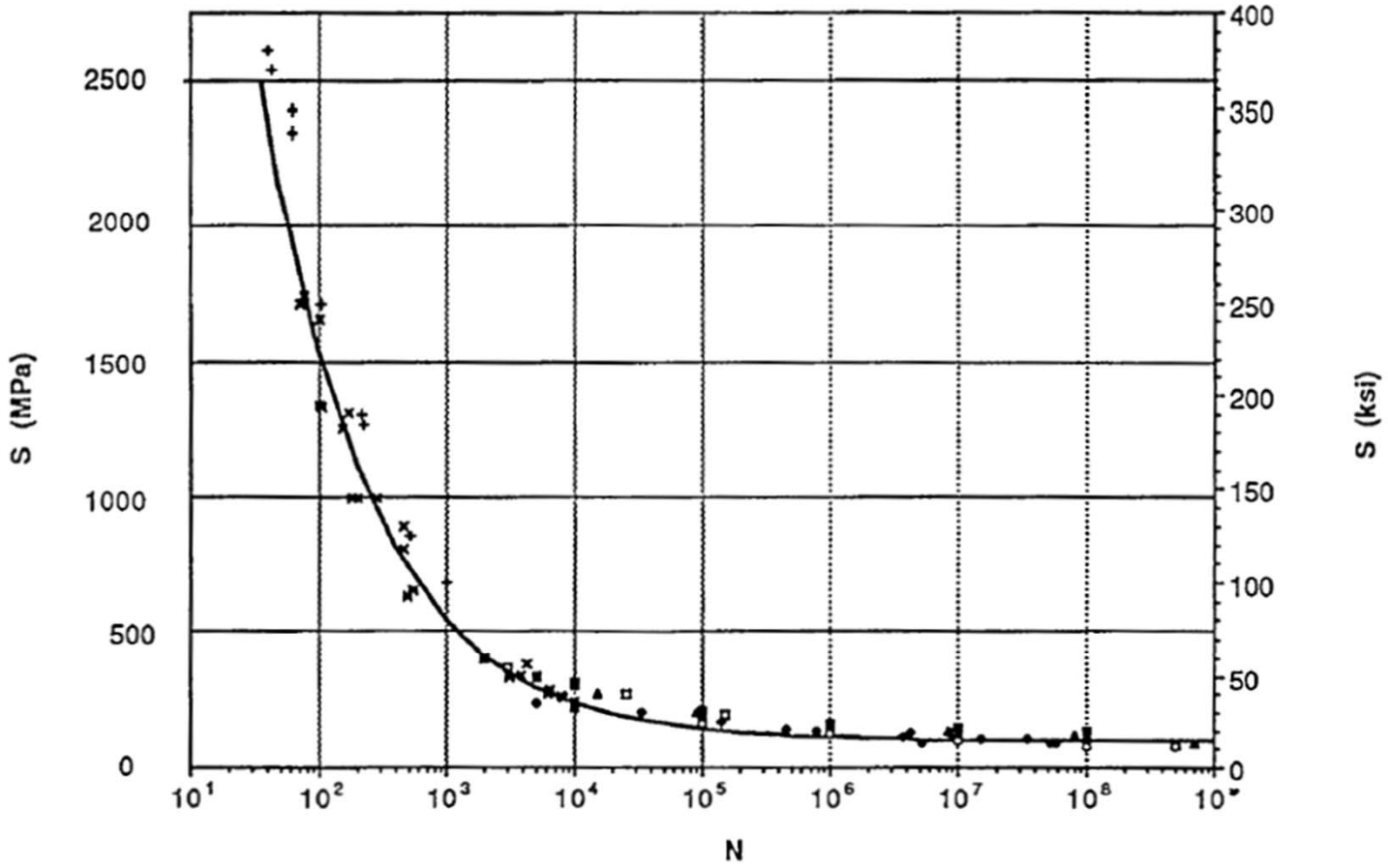


Fig. 1 Fit to fully reversed 6061-T6 fatigue data.

4. CURVAS S-N (HCF)

MODELO DE BASQUIN (1910)

- Válido si: $\sigma_m = 0$; (equivalentemente, $\sigma_{max} = -\sigma_{min}$ o $R = -1$)

$$\Delta\sigma \cdot N_f^a = C_1$$

- Las constantes del material se obtienen a partir de datos experimentales.
  - Típicamente “a” varia entre 1/15 y 1/8 en aceros.

4. CURVAS S-N (HCF)

Ejercicios propuestos:

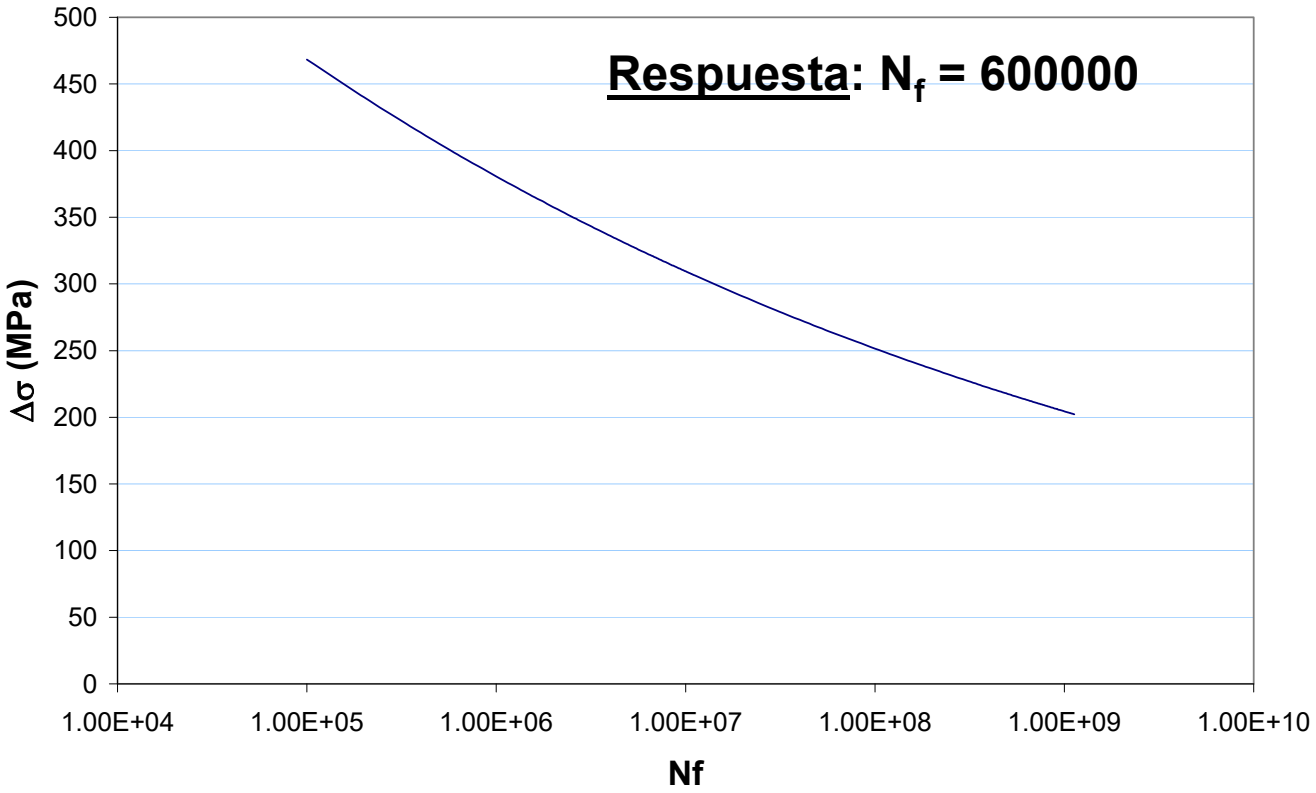
1) Aplicar el modelo de Basquin para estimar el número de ciclos resistidos por un componente estructural sometido a las siguientes condiciones:

   σ_{min}=-200 MPa; σ_{max}=200 MPa; a=0.090; C_1=1320

   ¿Es posible responder a la misma pregunta si σ_{min}=-200 MPa y σ_{max}=200 MPa? Justificar la respuesta.

4. CURVAS S-N (HCF)

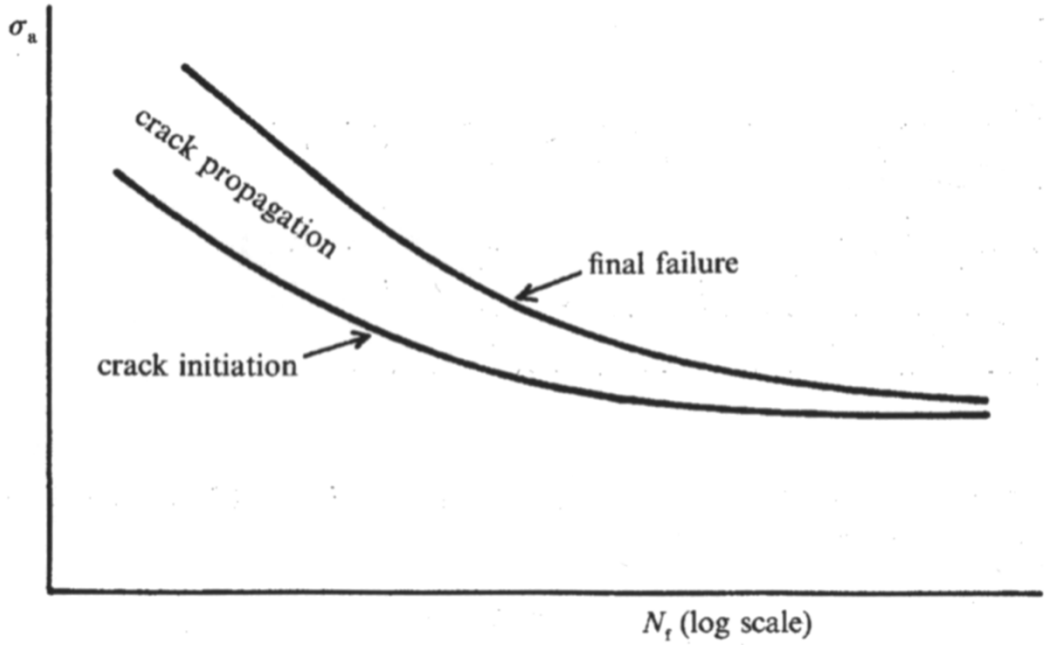
Ejercicios propuestos:



- El modelo de Basquin sólo es aplicable cuando R=-1 (tensiones alternativas), por lo tanto, no es posible responder a la segunda cuestión planteada.

4. CURVAS S-N (HCF)

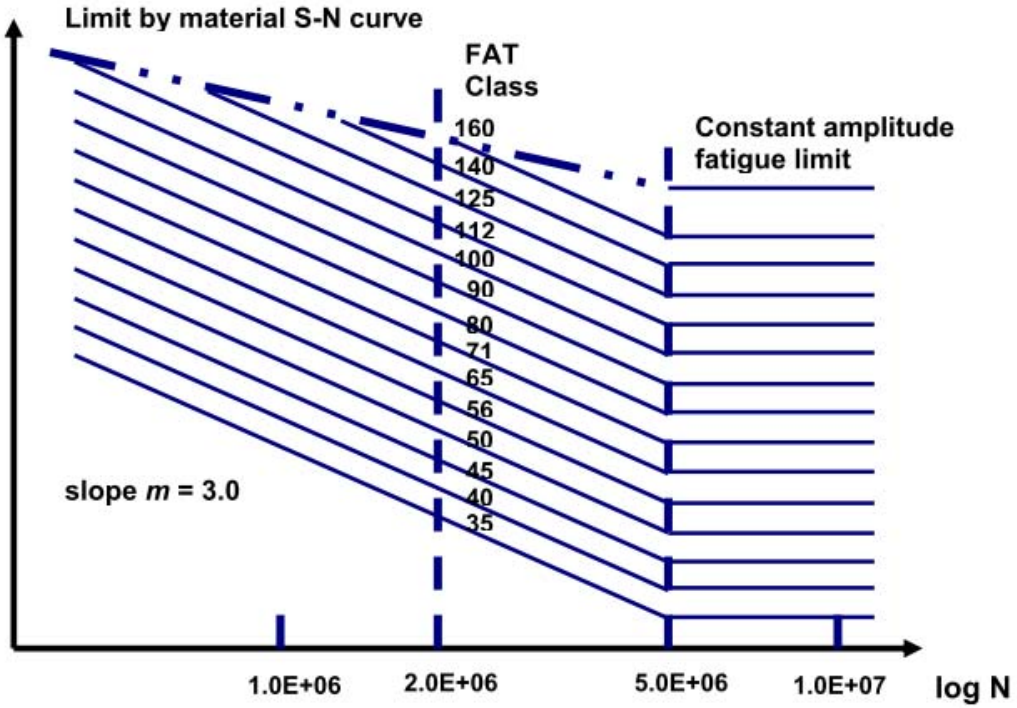
- La vida total de un componente no fisurado comprende tres etapas:
  - Período de iniciación
  - Período de propagación
  - Rotura final
- El procedimiento S-N (o Basquin) no distingue entre cada una de estas etapas.



4. CURVAS S-N (HCF)

•Ejemplo curvas S-N de empalmes soldados:

•Clase FAT: 63



4. CURVAS S-N (HCF)

SITUACIONES NO RECOGINAS POR LAS CURVAS S-N:

a) Tensión media no nula: $\sigma_m \neq 0$.

b) Amplitud variable en el tiempo: $\Delta\sigma$ (t)

- Cada una de estas situaciones se afronta aplicando **modelos empíricos**.

$\sigma_m \neq 0$ ⇨

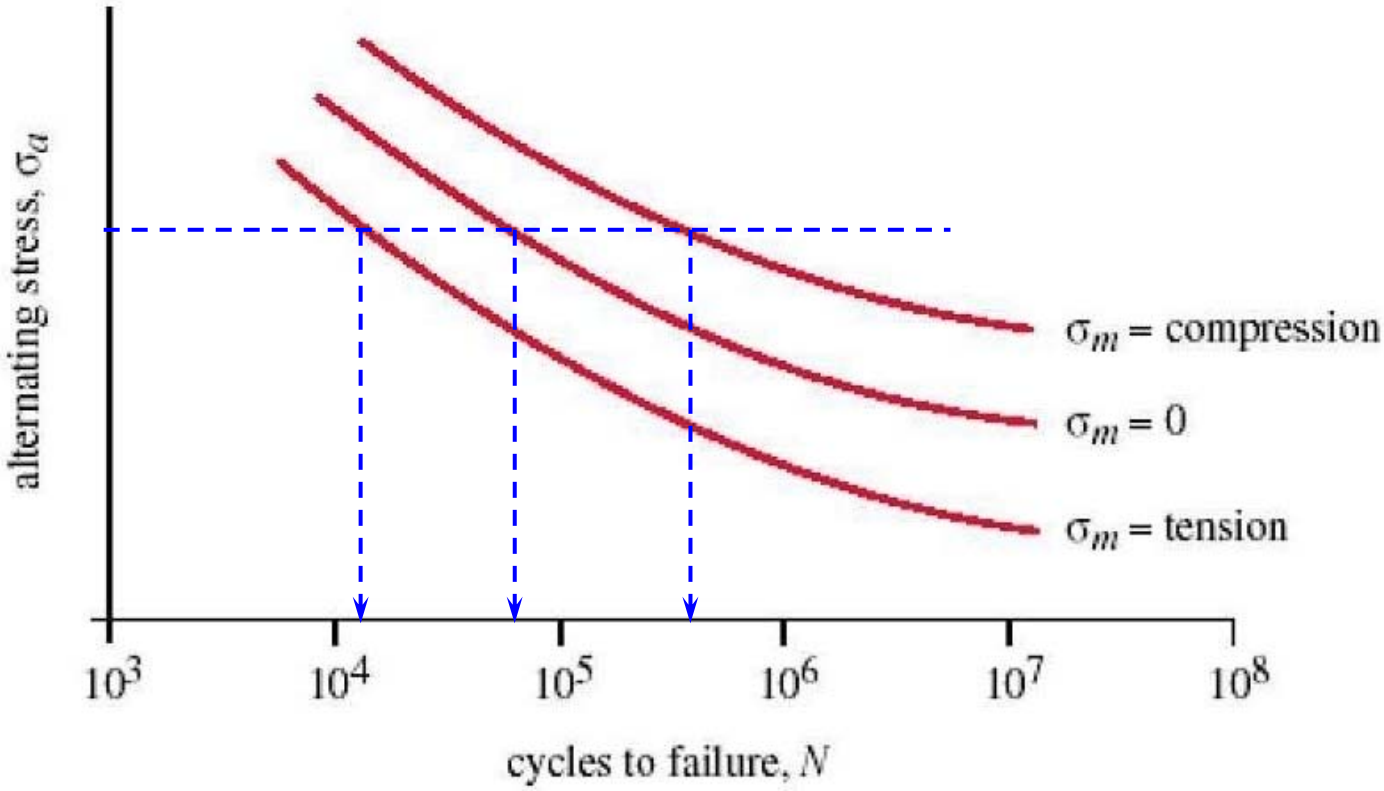
Modelos de:
- Soderberg
- Goodman
- Gerber

$\Delta\sigma(t)$ ⇨ **Regla de Palmgren – Miner (daño acumulado)**

4. CURVAS S-N (HCF)

a) Tensión media no nula: $\sigma_m \neq 0$.

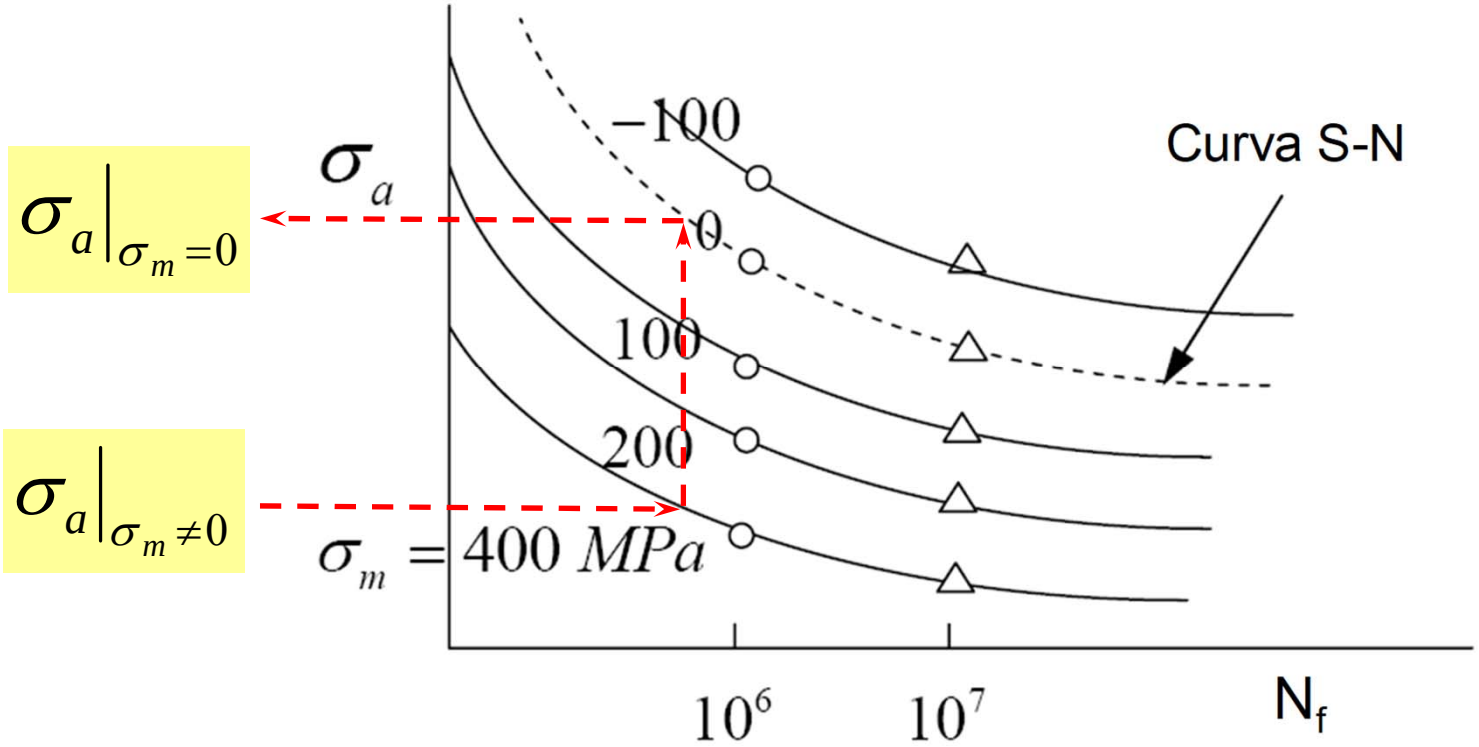
- Los datos experimentales demuestran que cuando σ_m crece, disminuye N_f.



4. CURVAS S-N (HCF)

a) Tensión media no nula: $\sigma_m \neq 0$.

- Se han desarrollado modelos empíricos que permiten obtener la amplitud de tensiones que, con σ_m=0, produce el mismo daño (mismo número de ciclos resistidos) que la amplitud aplicada ($\sigma_m \neq 0$).

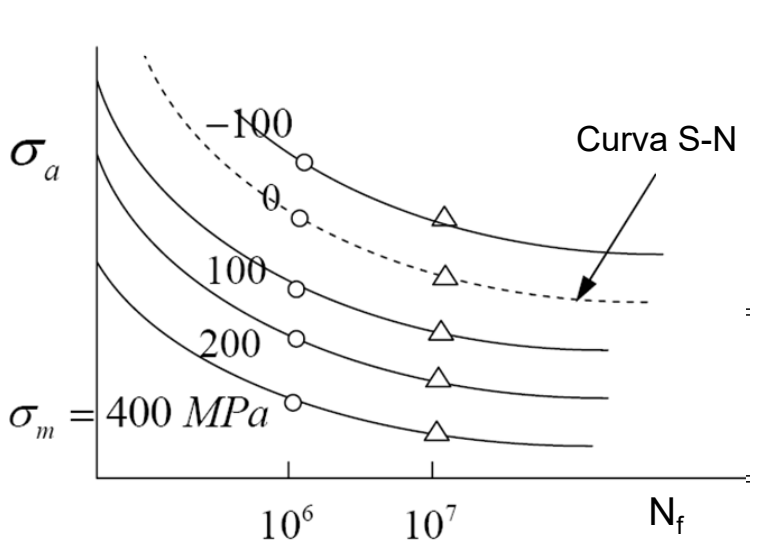


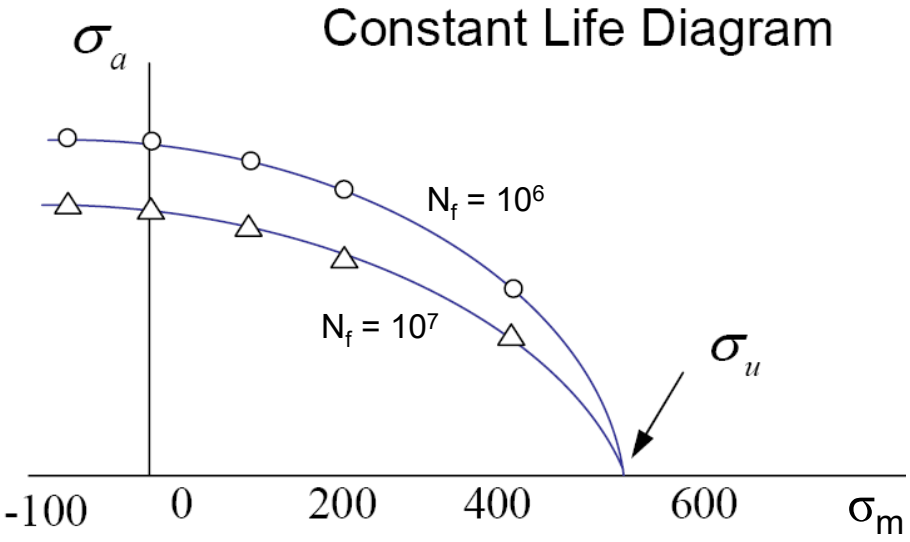
4. CURVAS S-N (HCF)

a) Tensión media no nula ($\sigma_m \neq 0$)

¿Cómo influye el nivel medio en la curva S-N?

Reduce el límite de fatiga





4. CURVAS S-N (HCF)

a) Tensión media no nula: $\sigma_m \neq 0$.

Soderberg:

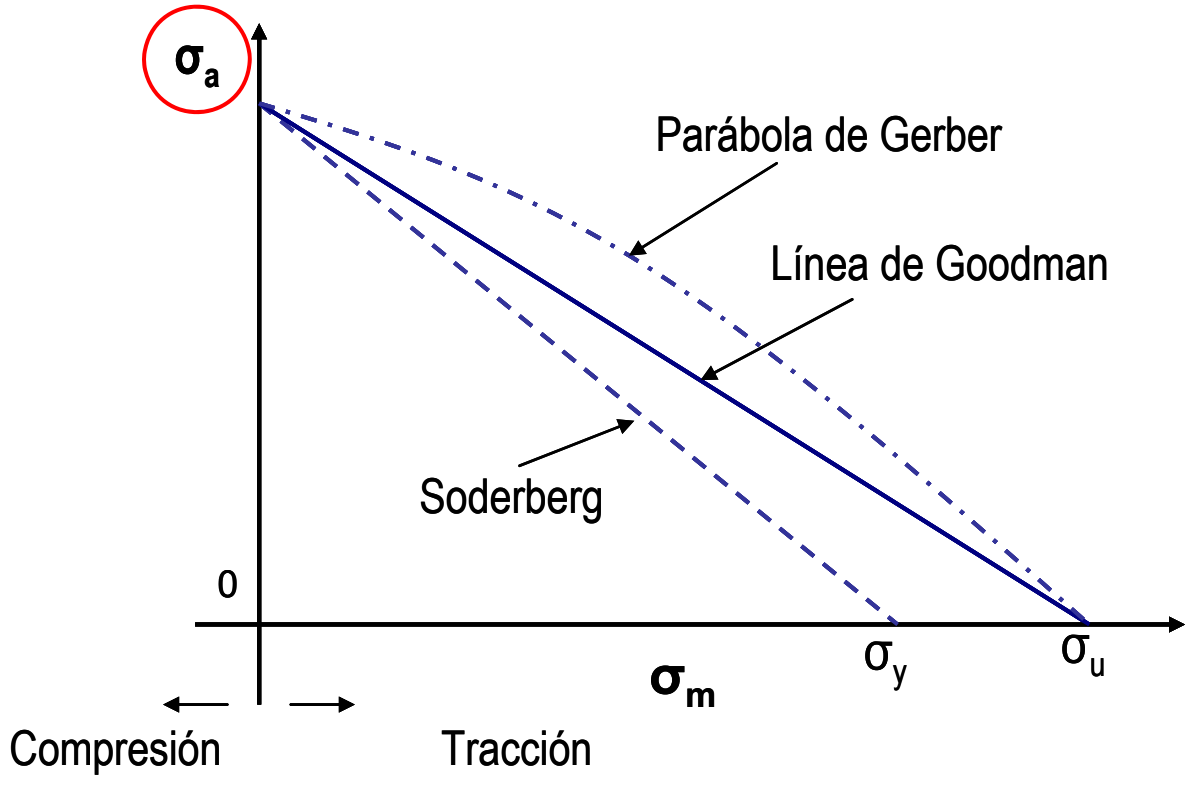
$$\sigma_a\big|_{\sigma_m \neq 0} = \sigma_a\big|_{\sigma_m = 0} \left\{1 - \frac{\sigma_m}{\sigma_Y}\right\}$$

Goodman:

$$\sigma_a\big|_{\sigma_m \neq 0} = \sigma_a\big|_{\sigma_m = 0} \left\{1 - \frac{\sigma_m}{\sigma_{TS}}\right\}$$

Gerber:

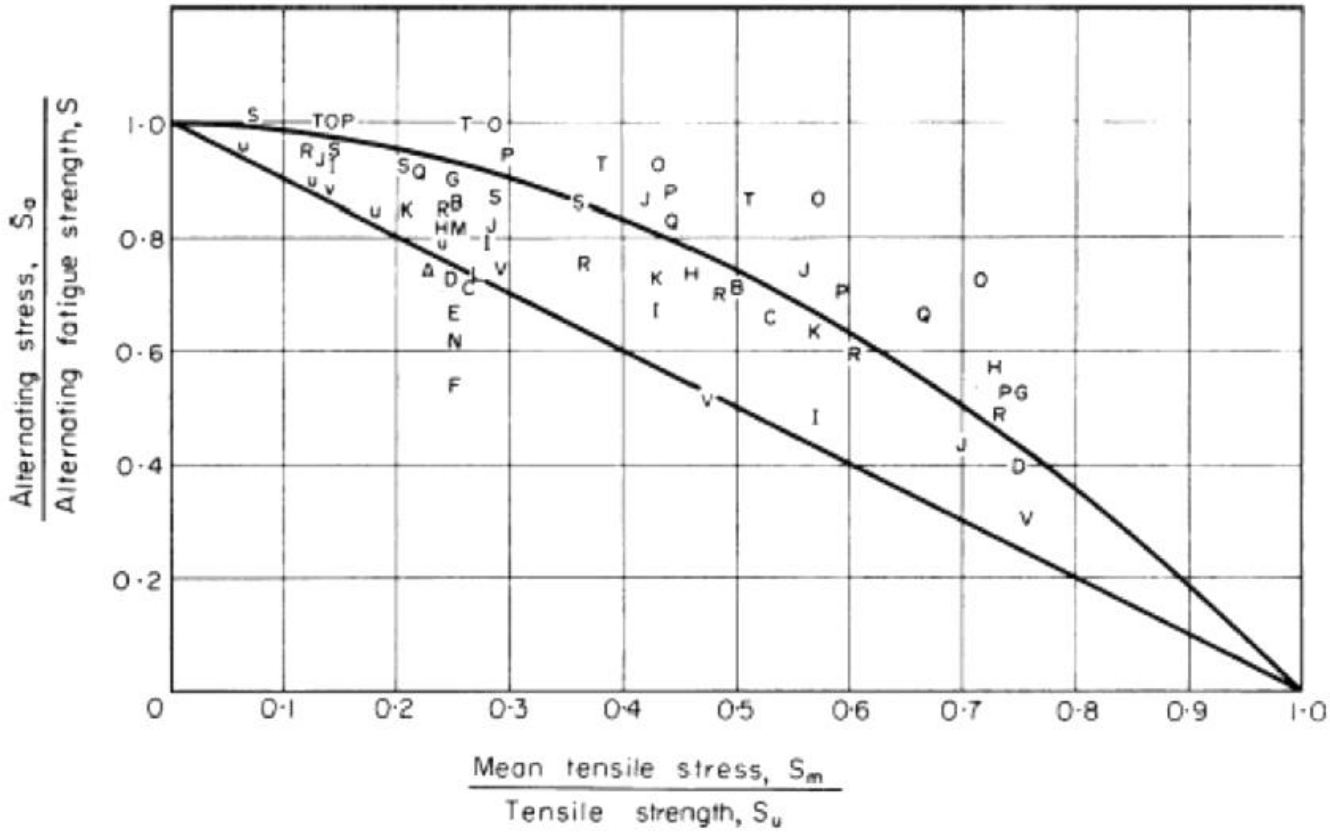
$$\sigma_a\big|_{\sigma_m \neq 0} = \sigma_a\big|_{\sigma_m = 0} \left\{1 - \left(\frac{\sigma_m}{\sigma_{TS}}\right)^2\right\}$$



- Los diversos modelos empíricos disponibles proponen funciones sencillas que dependen del parámetro , $\sigma_{a(\sigma m=0)}$. (el cual determina N_f en la curva S-N convencional).

4. CURVAS S-N (HCF)

a) Tensión media no nula: $\sigma_m \neq 0$.

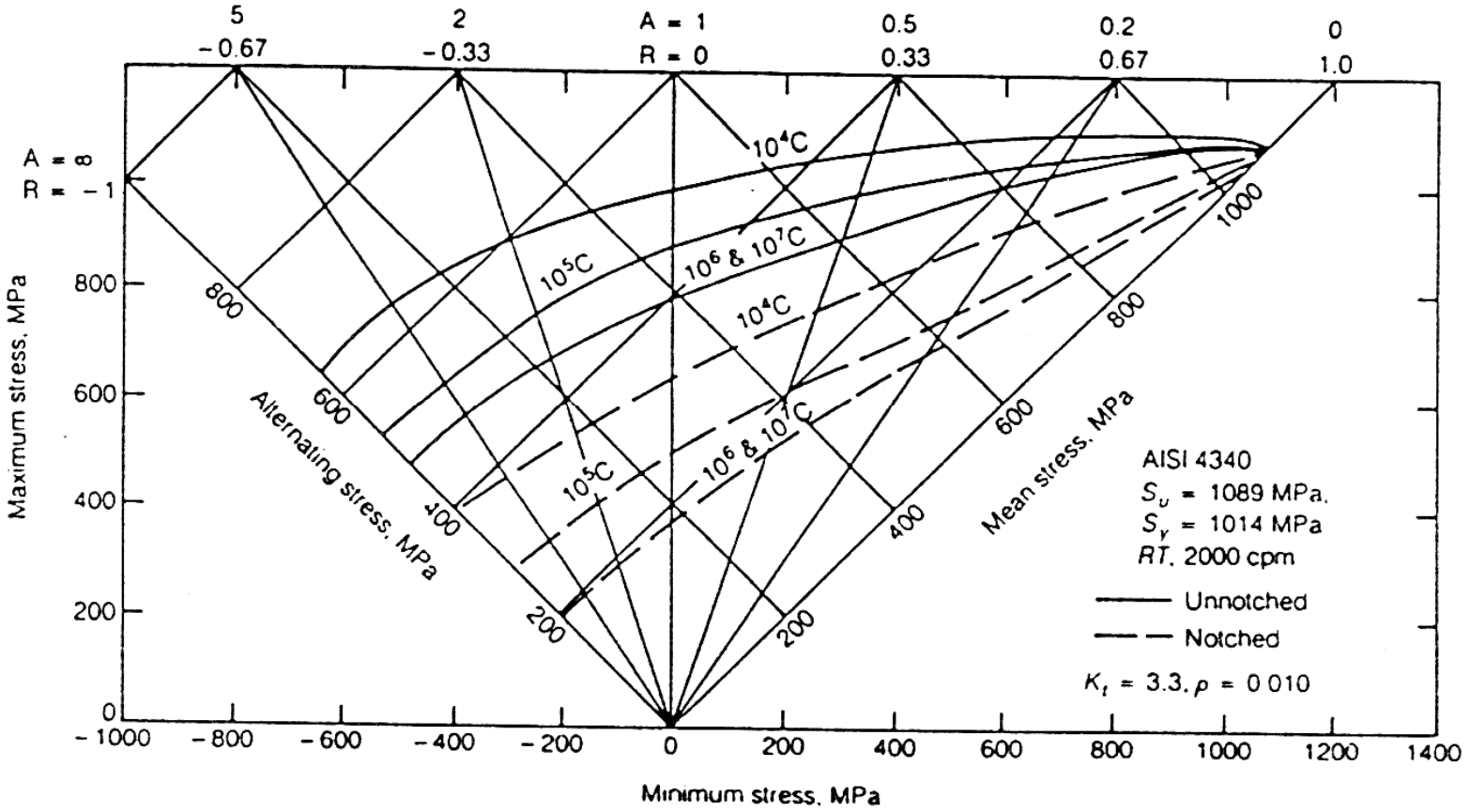


Based on 5×10^8 Cycles. (From P. G. Forrest, *Fatigue of Metals*, Pergamon Press, London, 1962)

4. CURVAS S-N (HCF)

a) Tensión media no nula: $\sigma_m \neq 0$.

Diagramas maestros usados en diseño incluyen elementos entallados



4. CURVAS S-N (HCF)

a) Tensión media no nula: $\sigma_m \neq 0$.

OBSERVACIONES GENERALES:

- La mayoría de los datos experimentales se sitúan entre las curvas de Gerber y de Goodman.
- La expresión propuesta por Goodman funciona bien con materiales frágiles, siendo muy conservadora para materiales dúctiles y, finalmente, la expresión de Gerber es adecuada para materiales dúctiles.
- La línea de Soderberg es, por lo general, excesivamente conservadora (lo cual no es necesariamente malo, dadas las grandes incertidumbres en cualquier situación de fatiga).

4. CURVAS S-N (HCF)

Ejercicios propuestos:

1) A partir de los siguientes parámetros del modelo de Basquin

   a=0.090; C_1=1320

   Determinar las curvas S-N del material para σ_m = -200, -100, 0, 100 y 200 MPa, respectivamente. Suponer que el límite elástico del material vale σ_Y=600 MPa.

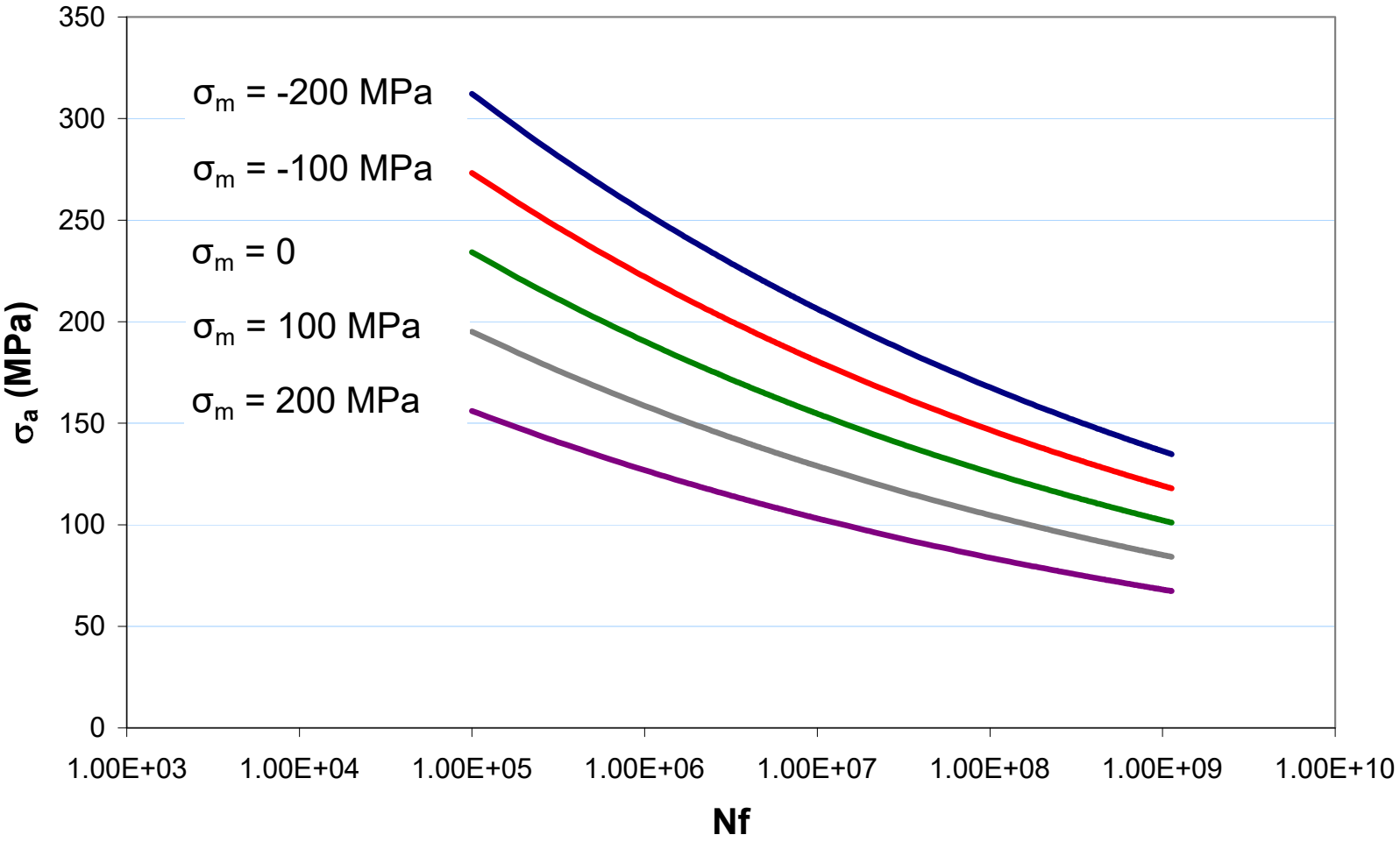
$$\Delta\sigma \cdot N_f^a = C_1 \Rightarrow \sigma_a\big|_{\sigma_m=0} = \frac{C_1}{2} N_f^{-a}$$

$$\sigma_a\big|_{\sigma_m\neq 0} = \sigma_a\big|_{\sigma_m=0}\left\{1-\frac{\sigma_m}{\sigma_Y}\right\} \Rightarrow \sigma_a\big|_{\sigma_m=0} = \frac{\sigma_a\big|_{\sigma_m\neq 0}}{\left(1-\frac{\sigma_m}{\sigma_Y}\right)}$$

$$\sigma_a\big|_{\sigma_m\neq 0} = \frac{C_1}{2}\left(1-\frac{\sigma_m}{\sigma_Y}\right)\left(N_f\right)^{-a}$$

4. CURVAS S-N (HCF)

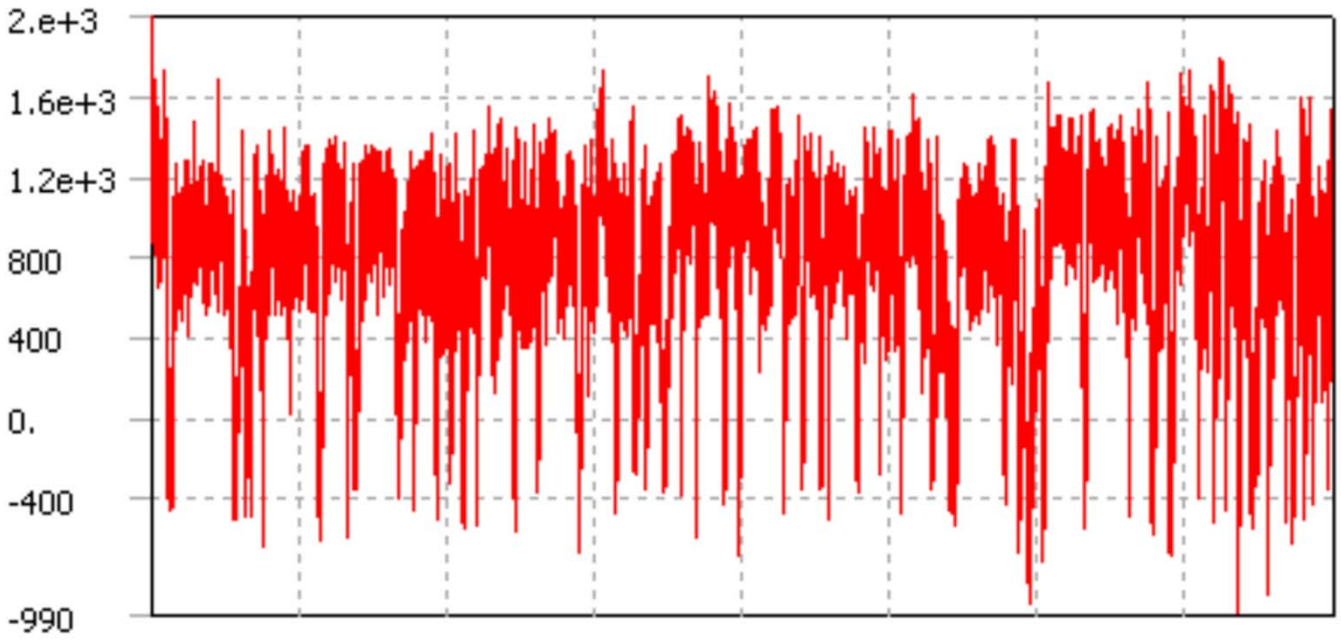
Ejercicios propuestos:



4. CURVAS S-N (HCF)

b) Amplitud variable en el tiempo Δσ (t)

- **¿Cómo resolver una situación como esta?**



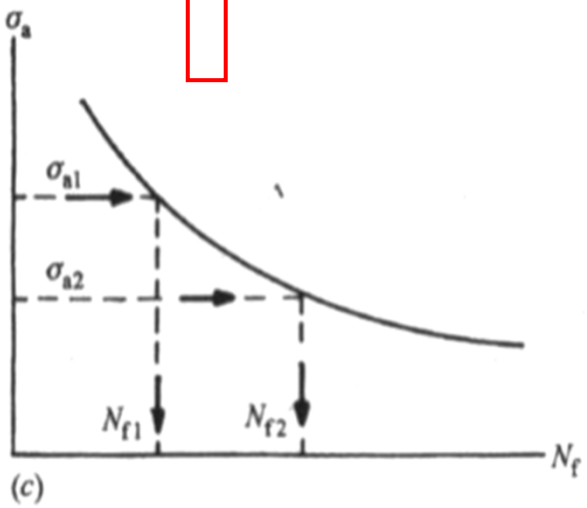
- La literatura científica proporciona una serie de **modelos de daño acumulado**. De entre ellos destaca el modelo de **Palmgren-Miner** (o regla de Miner, 1945).

4. CURVAS S-N (HCF)

b) Amplitud variable en el tiempo Δσ (t)

SECUENCIA DE ACTUACIONES (REGLA DE MINER):

- Corregir los datos a R=-1 (Soderberg, Goodman, Gerber, etc.).
- Ordenar los datos en i=1..M bloques de amplitud constante.
- Calcular el daño asociado con cada bloque "i": $d_i = \frac{N_i}{N_{fi}}$
- Obtener el daño total: $D = \sum_i \frac{N_i}{N_{fi}}$
- Condición de rotura: $D = 1$



4. CURVAS S-N (HCF)

Ejercicios propuestos:

1) Una aleación de aluminio, habitualmente empleada en componentes aeronáuticos presenta un comportamiento en fatiga, analizado a través de una ley tipo Basquin, con los parámetros a=0.090; C_1=1100.Un componente estructural, fabricado con dicha aleación continúa en servicio tras $3.5 \cdot 10^8$ ciclos en las siguientes condiciones: σ_a=75 MPa, R=-1.

   Determinar la amplitud de tensión máxima admisible para asegurar, al menos, 10.000 ciclos de vida remanente (suponiendo R=-1).

4. CURVAS S-N (HCF)

Ejercicios propuestos:

1) Una aleación de aluminio, habitualmente empleada en componentes aeronáuticos presenta un comportamiento en fatiga, analizado a través de una ley tipo Basquin, con los parámetros a=0.090; C_1=1100.Un componente estructural, fabricado con dicha aleación continúa en servicio tras $3.5 \cdot 10^8$ ciclos en las siguientes condiciones: σ_a=75 MPa, R=-1.

   Determinar la amplitud de tensión máxima admisible para asegurar, al menos, 10.000 ciclos de vida remanente (suponiendo R=-1).

$$\frac{N_1}{N_{f1}} + \frac{N_2}{N_{f2}} = 1$$

$$\Delta\sigma \cdot N_f^a = C_1 \quad \Rightarrow (2 \cdot 75)\left(N_{f1}\right)^{0.09} = 1100 \quad \Rightarrow N_{f1} = 4.12 \cdot 10^9$$

$$\frac{3.5 \cdot 10^8}{4.12 \cdot 10^9} + \frac{10000}{N_{f2}} = 1 \quad \Rightarrow N_{f2} = 10929$$

$$\Delta\sigma \cdot N_f^a = C_1 \quad \Rightarrow (2 \cdot \sigma_{a2})(10929)^{0.09} = 1100 \quad \Rightarrow \sigma_{a2} = 238\ MPa$$

4. CURVAS S-N (HCF)

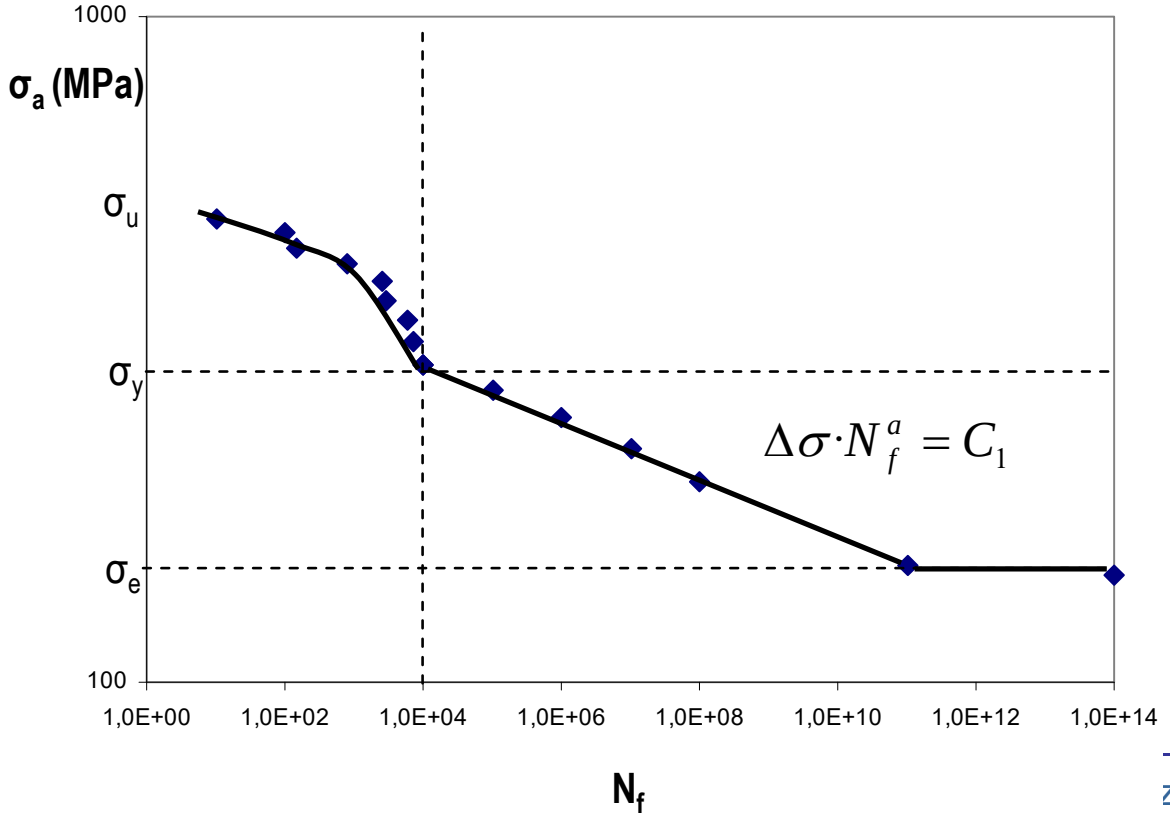
b) Amplitud variable en el tiempo Δσ (t)

OBSERVACIONES GENERALES:

- Se trata de un modelo aproximado pero de gran utilidad. Sin embargo, presenta **notables limitaciones**:
  - Ignora la naturaleza intrínsecamente aleatoria de los procesos de fatiga.
  - La regla de Miner considera que cada bloque actúa con independencia de los demás. Por lo tanto, **no considera** que el **orden en el cual se aplican las secuencias de bloques de amplitud constante** puede influir notablemente en el resultado final. En algunos casos, bloques de baja amplitud seguidos de otros de gran amplitud causan un daño mayor que el que predice el modelo.
  - No permite tener en cuenta los efectos de **sobrecargas** (que pueden ralentizar el proceso de avance de una fisura).

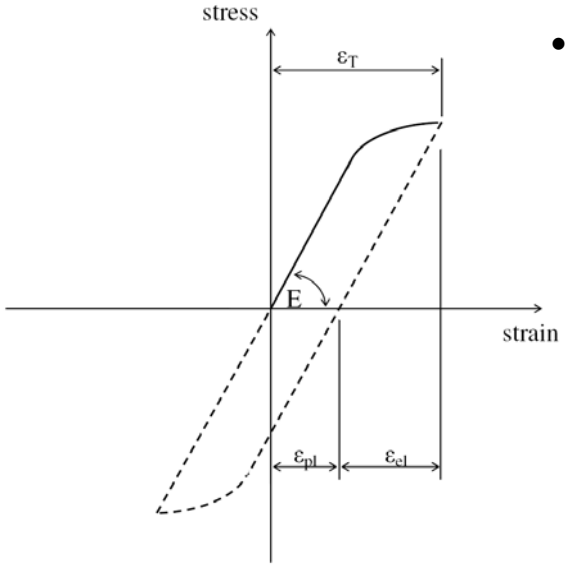
5. CURVAS ε-N (LCF)

- Si las tensiones superan el límite elástico la Ley de Basquin deja de representar el comportamiento en fatiga del material.
- A este tipo de proceso se le denomina Fatiga de Bajo Número de Ciclos (**LCF**), ya que normalmente $N_f < 10000$.



5. CURVAS ε-N (LCF)

- Experimentalmente se comprueba que el fenómeno se describe mejor trabajando con las deformaciones:
- Deformación total (parte elástica + plástica): $\varepsilon_T = \varepsilon_{el} + \varepsilon_{pl}$

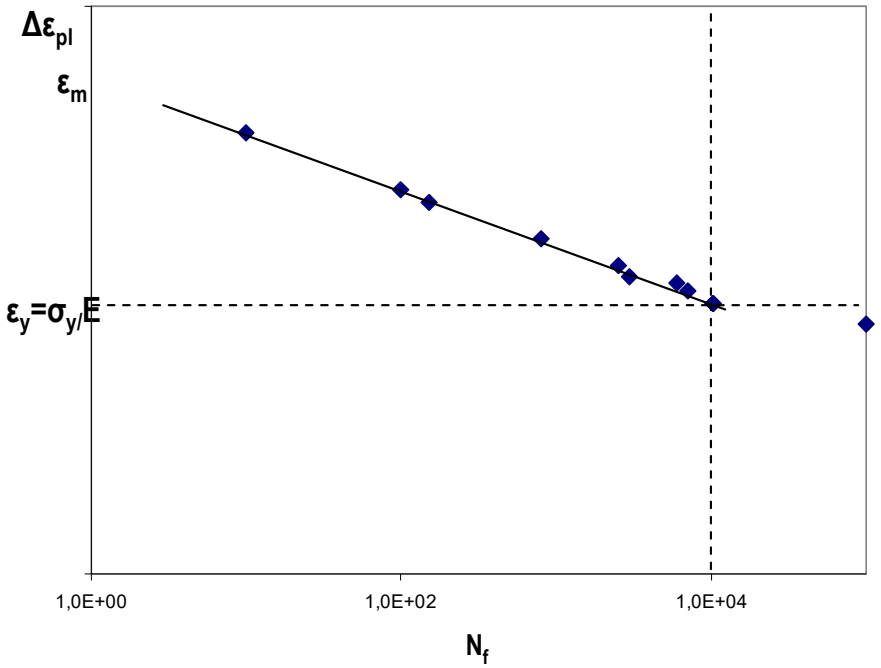


$$\Delta\varepsilon_{pl} \cdot N_f^b = C_2$$

Típicamente:

(b ~ 0.5 - 0.7)

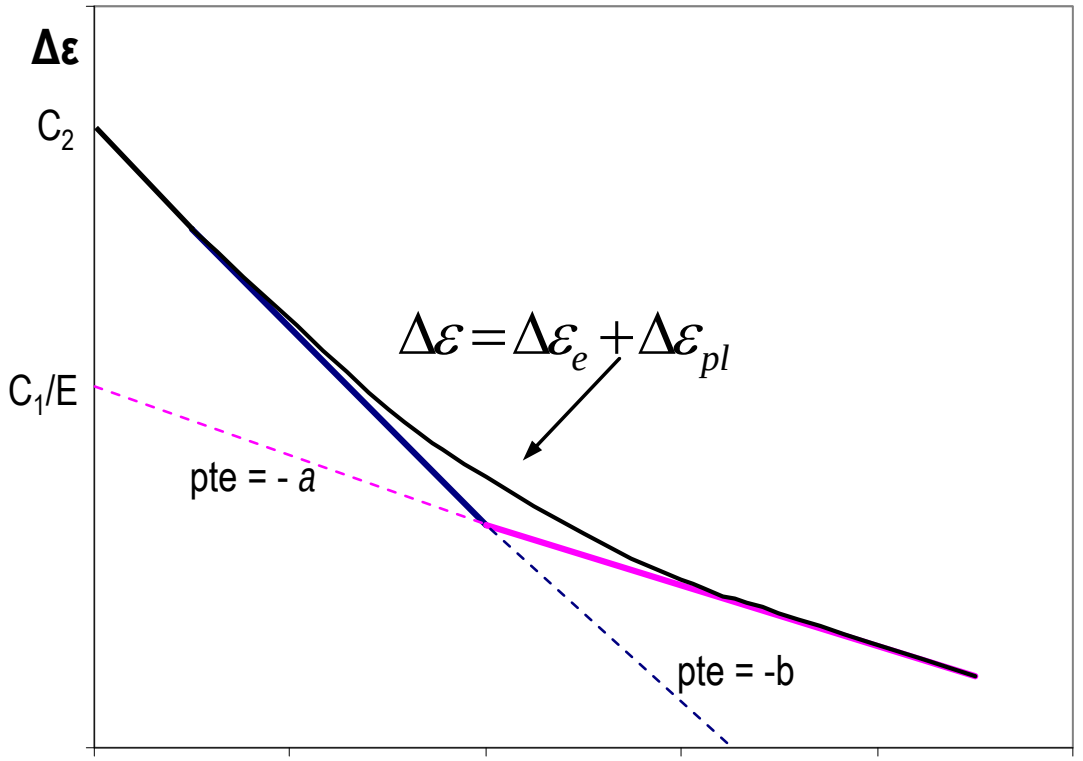
- La solicitación externa se representa a través de la variación de deformación plástica, $\Delta\varepsilon_{pl}$, dando lugar a la Ley de **Coffin-Manson (1954)**:



6. ENFOQUE GLOBAL DE LA VIDA TOTAL EN FATIGA

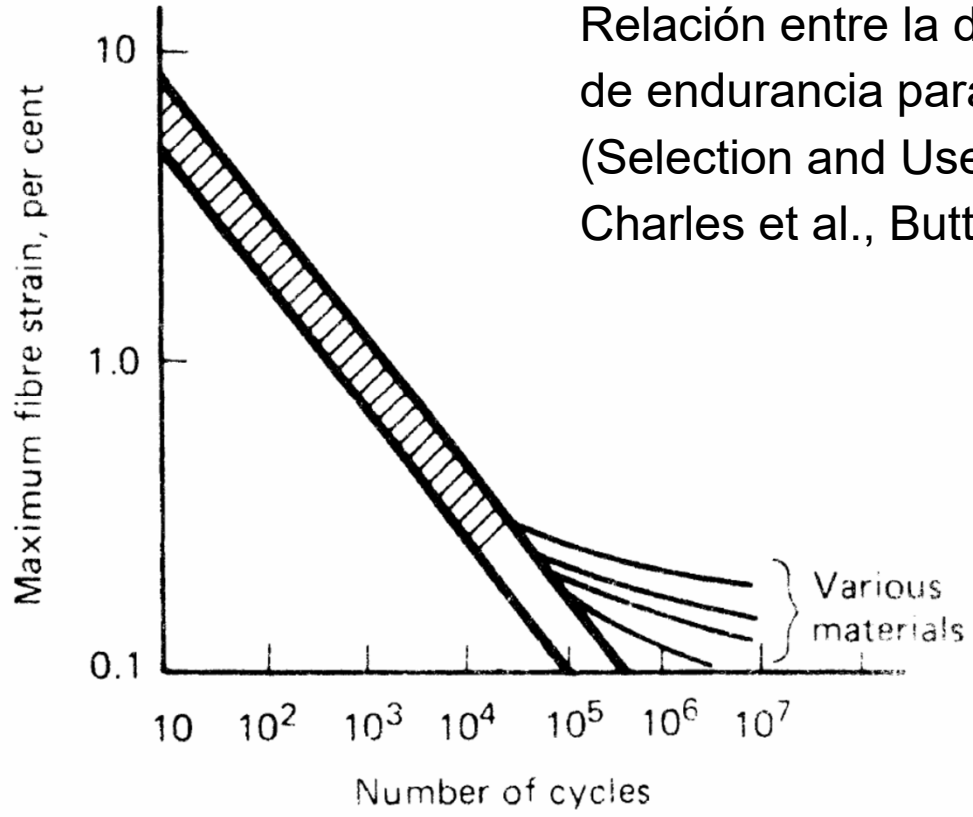
Aproximación General HCF/LCF:

$$\Delta\varepsilon = \Delta\varepsilon_e + \Delta\varepsilon_{pl} = \frac{\Delta\sigma}{E} + \Delta\varepsilon_{pl} = \frac{C_1}{E} N_f^{-a} + C_2 N_f^{-b}$$



6. ENFOQUE GLOBAL DE LA VIDA TOTAL EN FATIGA

Aproximación General HCF/LCF:

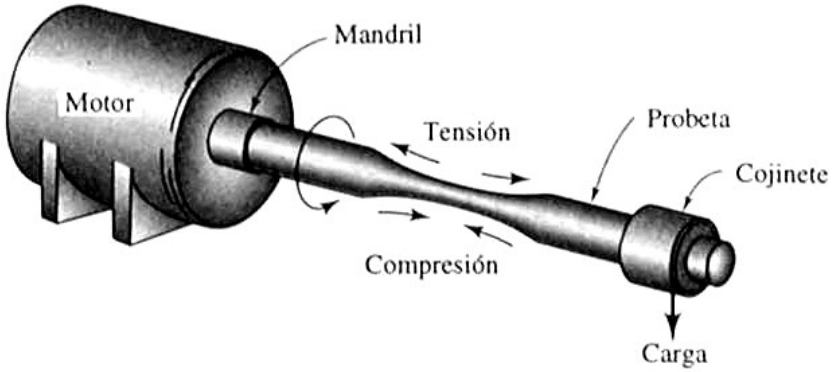


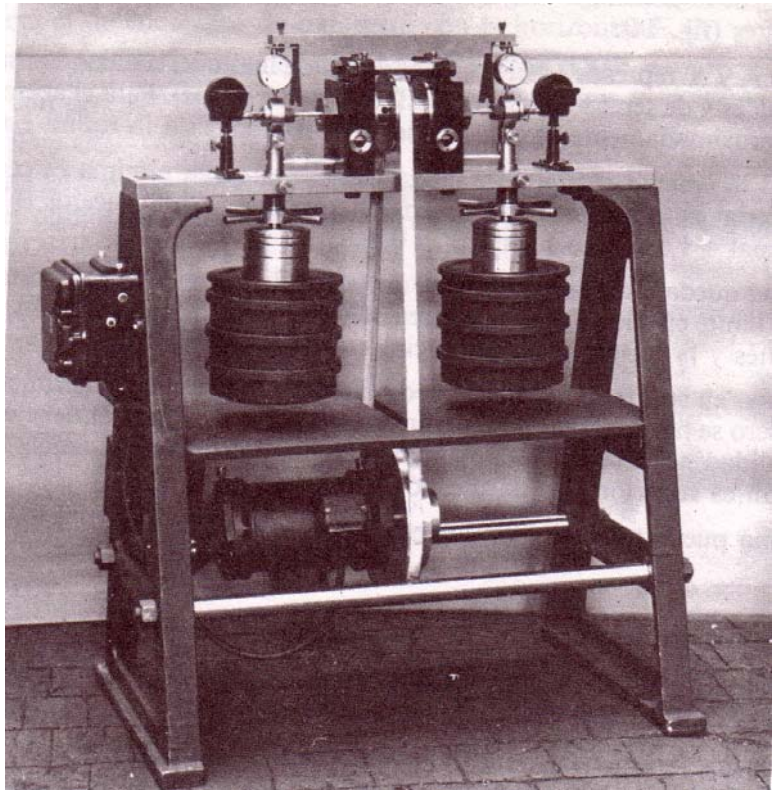
Relación entre la deformación máxima y el límite de endurancia para diferentes materiales (Selection and Use of Engineering Materials, J.A. Charles et al., Butterworth-Heinemann, 2001).

7. CARACTERIZACIÓN DE MATERIALES/COMPONENTES NO FISURADOS

Curvas S-N (Whöler)

- Flexión rotativa (R= -1)





7. CARACTERIZACIÓN DE MATERIALES/COMPONENTES NO FISURADOS

Curvas S-N (Whöler)

- Amplitud de tensiones σ_a (R=-1) vs Número de ciclos hasta rotura (N_f)
- $\sigma_e \rightarrow$ **límite de fatiga o enduracia**
- Si $\sigma_a < \sigma_e$ (límite de fatiga o enduracia), la vida se considera infinita
- σ_e aprox. 0.35- 0.50 σ_u en aceros y bronces.
- Vida infinita $N_f = 10^7$ ciclos

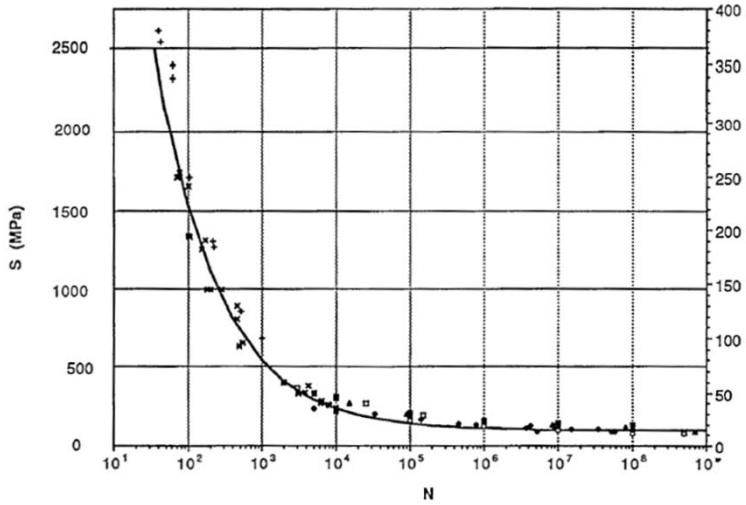
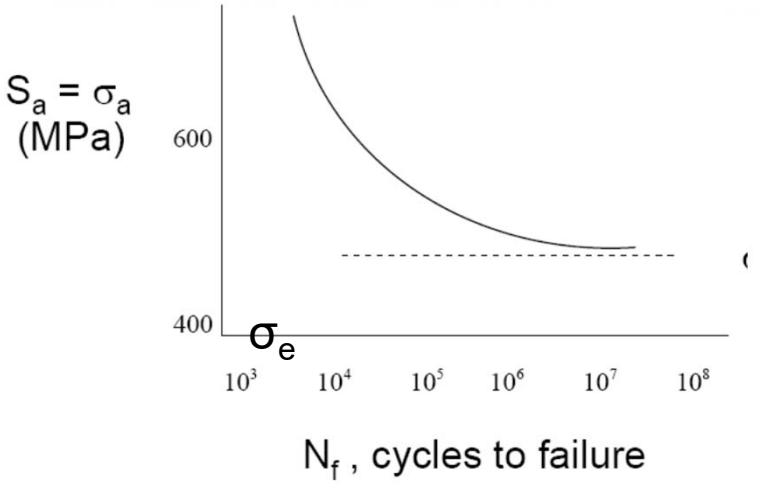


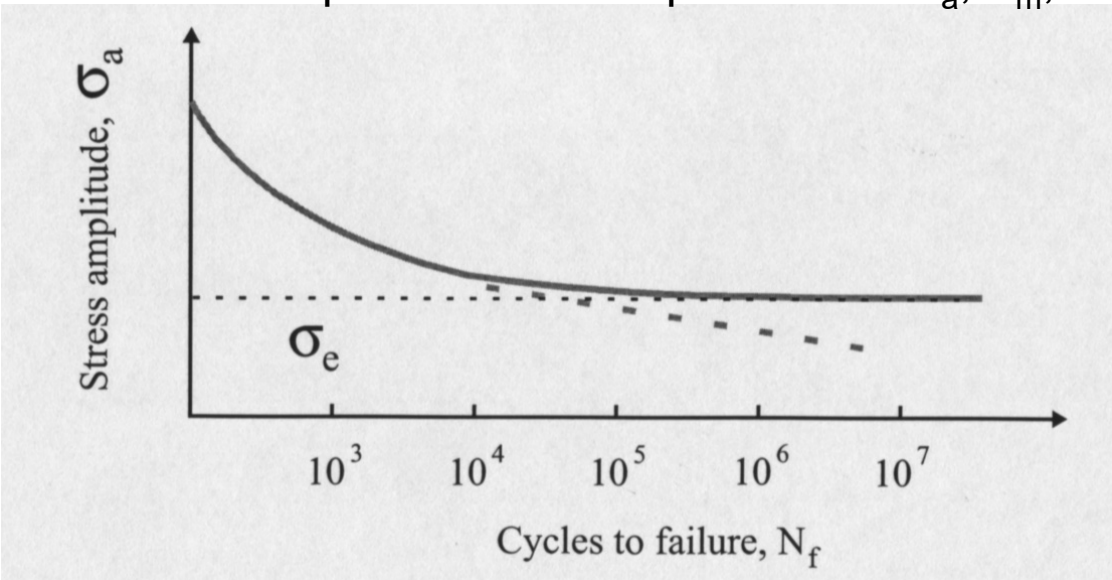
Fig. 1 Fit to fully reversed 6061-T6 fatigue data.



7. CARACTERIZACIÓN DE MATERIALES/COMPONENTES NO FISURADOS

Curvas S-N (Whöler)

- Generalmente las curvas de Whöler se construyen para ciclos alternantes (R= -1)
- La curva es válida para un valor específico de σ_a, σ_m, R,…

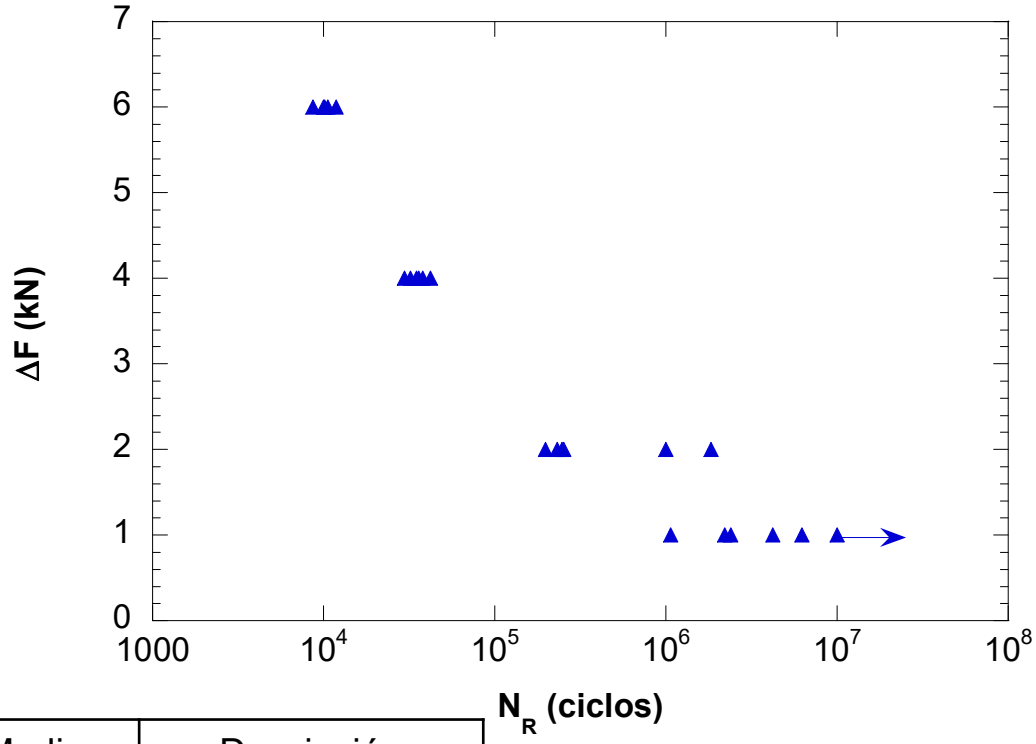


- No todos los materiales presentan límite de fatiga
- Bajo condiciones ambientales determinadas puede desaparecer
- Mucha dispersión en resultados → análisis estadístico

7. CARACTERIZACIÓN DE MATERIALES/COMPONENTES NO FISURADOS

Curvas S-N (Whöler)

EJEMPLO

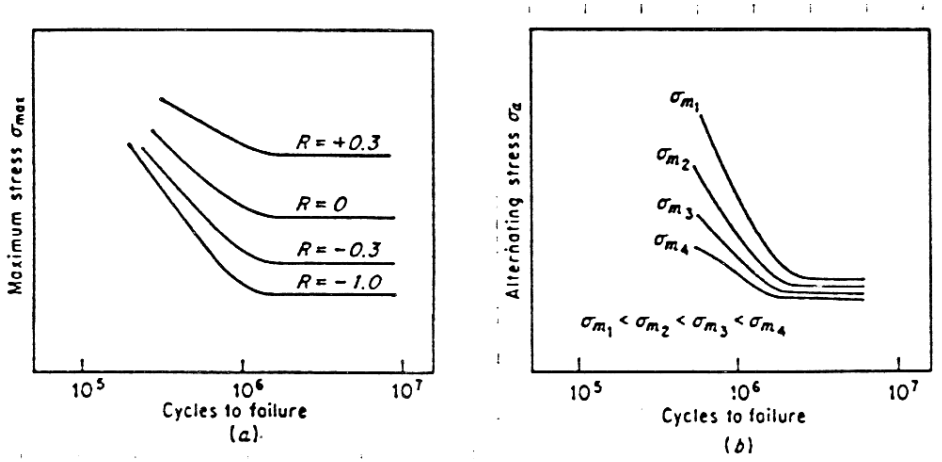


ΔF	Valor máximo	Valor mínimo	Media	Desviación estándar
6	**8.669**	**11.822**	**10.319**	**1.026 (10%)**
4	**29.605**	**42.248**	**35.474**	**4.430 (12,5%)**
2	**197.480**	**1.834.100**	**627.650**	**666.470 (106 %)**
1	**1.068.800**	**10.000.000**	**4.359.100**	**3.307.100 (76 %)**

7. CARACTERIZACIÓN DE MATERIALES/COMPONENTES NO FISURADOS

Curvas S-N (Whöler)

- Diferentes representación de los datos
  - **σ_a-N_R para σ_m = cte (caso particular σ_m = 0)**
  - **σ_{max}-N_R para σ_m = cte (caso particular σ_m = 0)**
  - **σ_{max}-N_R para σ_{min} = cte**
  - **σ_{max}-N_R para R = cte**
- **Influencia de σ_m**
  - **Si R↑ → mayor límite de fatiga**
  - **Si σ_m ↑ → menor límite de fatiga (para igual σ_a)**



7. CARACTERIZACIÓN DE MATERIALES/COMPONENTES NO FISURADOS

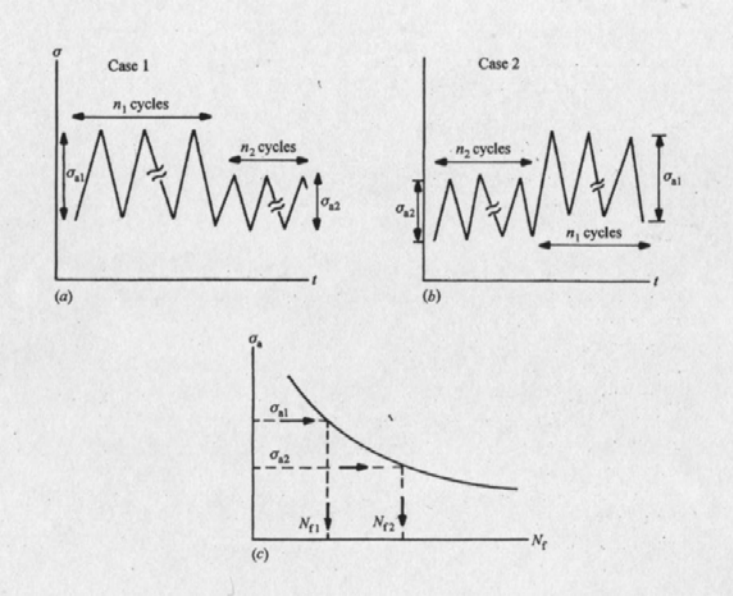
Curvas S-N (Whöler)

- Factores que influyen en el límite de fatiga
  - Frecuencia y Temperatura
  - Acritud: $\sigma_e \uparrow$ si se produce una acritud homogene previa
  - Fatiga previa: <u>understressing</u> (fatiga por debajo de $\sigma_e \uparrow$ 30 %)
    <u>overstressing</u>: $\sigma_e \downarrow$ (fatiga por encima de σ_e que producen daño)
  - Tensiones internas
  - Estado y naturaleza de las superficies. Las marcas de mecanizado $\downarrow \sigma_e$ sensiblemente (20 % de diferencia con pulidas) Tratamientos mecánicos que generan estados de compresión en superficie (shot penning) mejoran el σ_e. Igual que tratamientos de endurecimiento (nitruración y cementación)
  - Estructura del metal, tamaño y orientación del grano ($\sigma_e \downarrow$ si # $\downarrow$)
  - Efecto entalla, inclusiones y grietas
  - Corrosión, el σ_e físico es nulo

7. CARACTERIZACIÓN DE MATERIALES/COMPONENTES NO FISURADOS

DAÑO ACUMULADO

- Anteriormente se ha considerado σ_a constante
- ¿Que ocurre si σ_a no es constante?
- Mediante la definición del daño provocado por cada bloque de variación de tensiones (**daño acumulado**)
- Influencia de la secuencia de cargas



$$d = \frac{n_i}{N_{fi}}$$ Daño

$$\sum_i \frac{n_i}{N_{fi}} = 1$$ Daño acumulado (**Regla de Miner**)

7. CARACTERIZACIÓN DE MATERIALES/COMPONENTES NO FISURADOS

❑ Determinación del límite de fatiga: Método STAIR-CASE

- Ensayo de fatiga monótona en torno a σ_e con N_e determinado
- Repetir ensayo sobre otra probeta con σ±d (si supera/rompe)

S	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
230			x							
220		0		x				x		
210	0				x		0		0	
200						0				

- Contar nº de ensayos válidos (0) y no válidos (X)
- Indicar suceso **menos** frecuente (**SMF**) → no válido (4);
- Valor medio de la resistencia a fatiga:

$$\mathbf{m = S_0 + d\cdot([A/N] \pm 0.5)\ MPa}$$ (+ si SMF es VALIDO)

- Desviación típica de la resistencia a fatiga:

$$\mathbf{s = 1.62\cdot d\cdot(\{[B\cdot N - A^2]/N^2\} + 0.029)\ MPa}$$

  - **S_0:** Menor valor de σ en que aparece el SMF (210 MPa)
  - **d**: escalón (10 MPa); mayor precisión → ↓d

7. CARACTERIZACIÓN DE MATERIALES/COMPONENTES NO FISURADOS

Stair-case

S	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	i	n_i	in_i	$i^2 n_i$
230			x								2	1	2	4
220		0		x				x			1	2	2	2
210	0				x		0		0		0	1	0	0
200						0								
											N	4		
											A		4	
											B			6

- **A** = $\Sigma i \cdot n_i$
  - **i**: nº de nivel desde S_0; i = 0 para $\sigma = S_0$
  - **n_i**: nº de SMF en el nivel i-esimo
- **N** = Σn_i = nº de SMF
- **B** = $\Sigma i^2 \cdot n_i$
- Para considerarse válido s ≥ 5.3 MPa

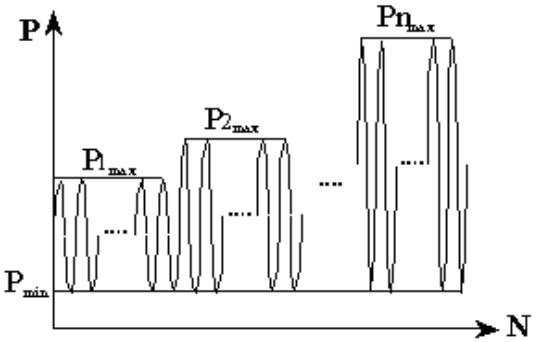
$m = S_o + d\,([A/N] - 0.5)$
$= 210 + 10\,([4/4] - 0.5)$ MPa
$= 215$ MPa

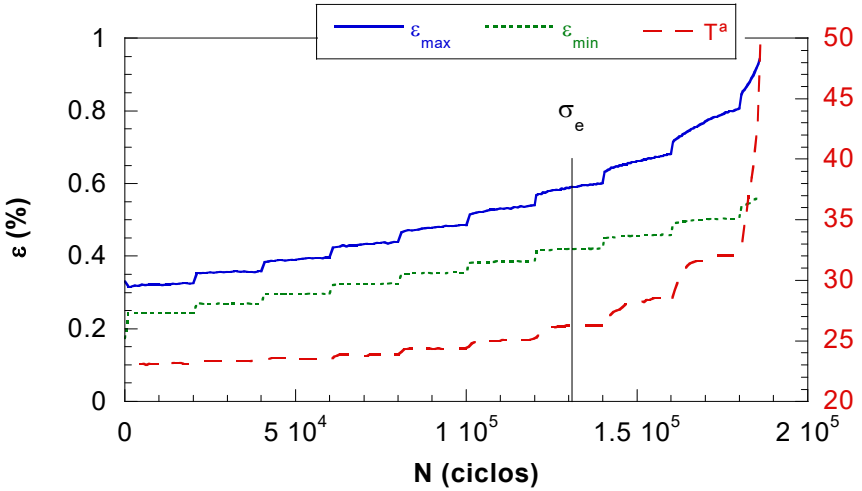
$s = 1.62.d\,(\{[B.N-A^2]/N^2\} + 0.029)$
$= 1.62.\ 10\,(\{[24 - 16]/16\} + 0.029)$ MPa
$= 8.6$ MPa

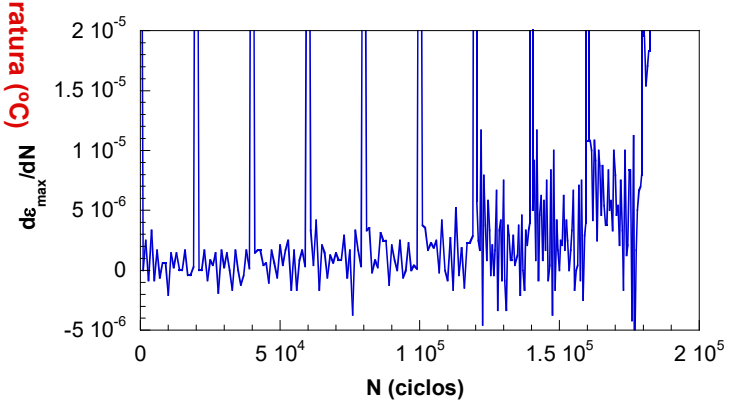
➢ Ejemplo: Limite de fatiga = **215 ± 8.6 MPa**

7. CARACTERIZACIÓN DE MATERIALES/COMPONENTES NO FISURADOS

- **METODO LOCATI:** Ensayo acelerado de fatiga
  - Bloques de ciclos de carga creciente, comenzando por valores inferiores al σ_e
  - Evaluación de la deformación maxima, def. minima, temperatura, $d\varepsilon_{max}/dN$
  - Cambio brusco → $\boldsymbol{\sigma_e}$

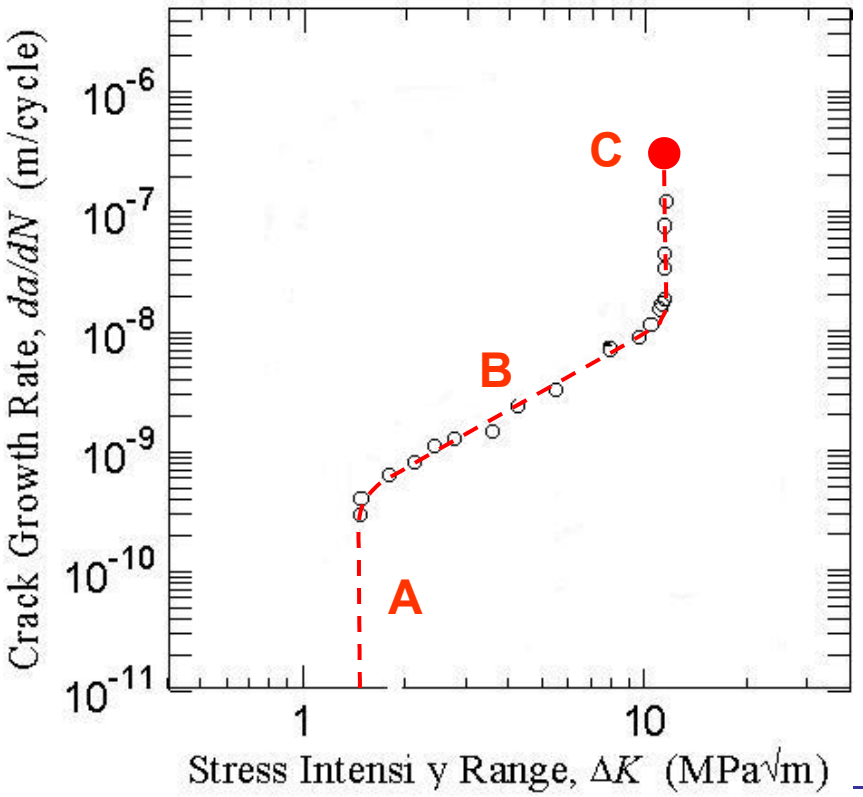






8. CRECIMIENTO DE FISURAS POR FATIGA

- En 1961 las ideas de MFEL fueron aplicadas por primera vez al crecimiento de grietas por Paris, Gómez y Anderson.
- Experimentalmente observó que la velocidad de crecimiento de una disura, da/dN, depende del incremento del factor de intensidad de tensiones, ΔK:



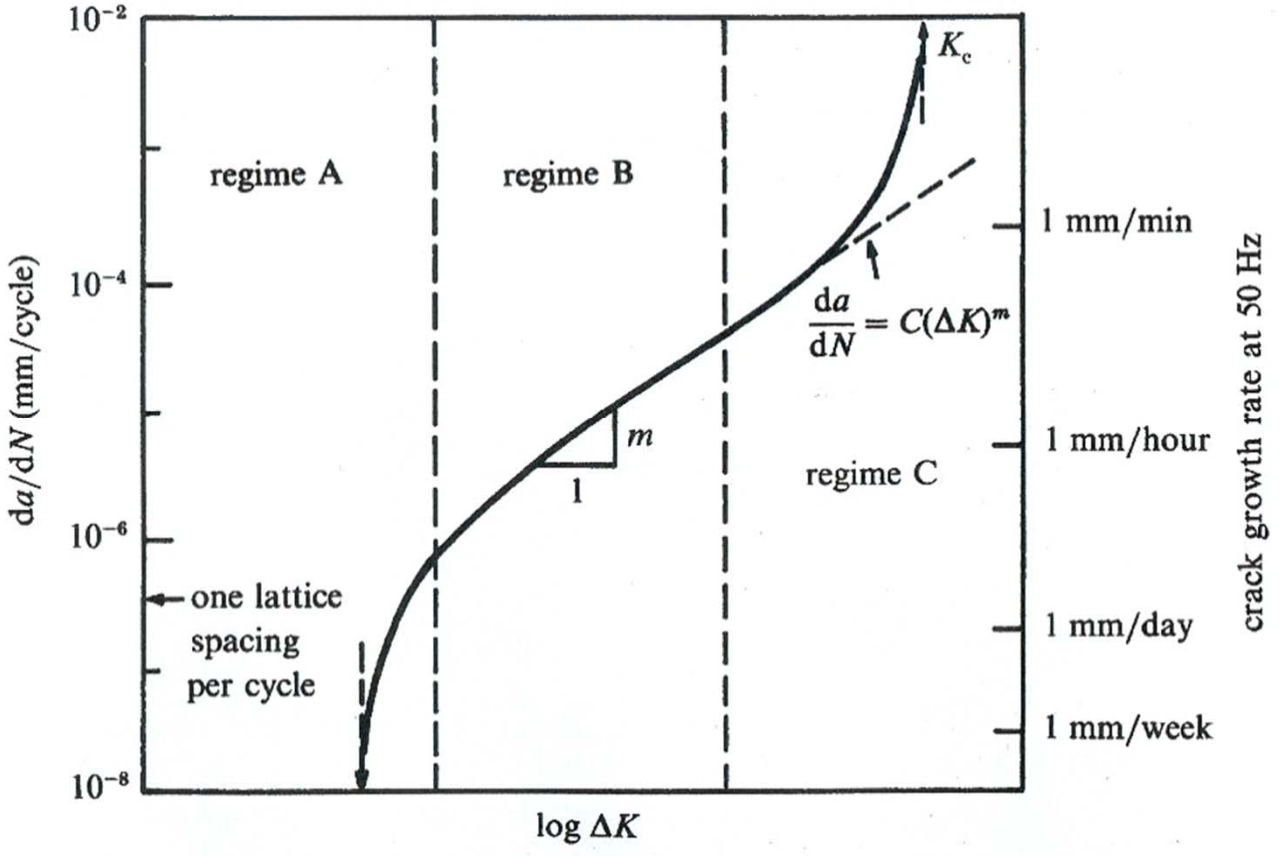
- Fenomenológicamente, pueden distinguirse tres regiones de comportamiento:

8. CRECIMIENTO DE FISURAS POR FATIGA

A: Crecimiento lento (próximo a umbral)

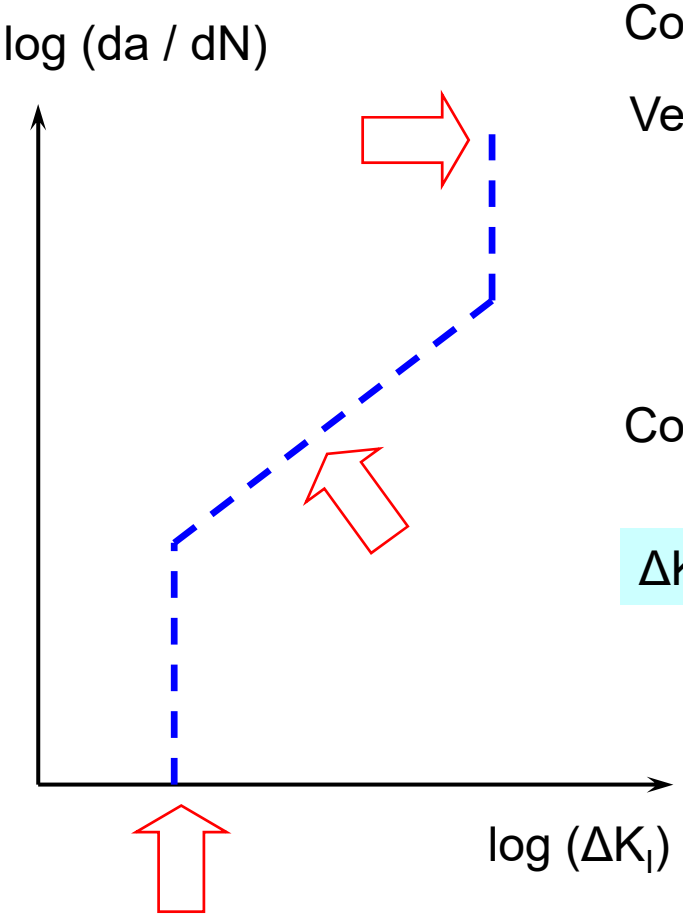
B: Crecimiento con velocidad intermedia (régimen de Paris)

C: Crecimiento a alta velocidad (próximo a fractura)



8. CRECIMIENTO DE FISURAS POR FATIGA

MODELADO DEL FENÓMENO:



Condición de iniciación: $\Delta K_I \geq \Delta K_{th}$

Velocidad de propagación (Ley de Paris):

$$\frac{da}{dN} = C\left(\Delta K_I\right)^m$$

Condición de rotura (MFEL): $K_I\left(\sigma_{\max}\right) = K_{Ic}$

ΔK_{th}, C, m, K_{Ic}: Propiedades del material

Table 1: Numerical parameters in the Paris equation.

alloy	m	A
Steel	3	10^{-11}
Aluminum	3	10^{-12}
Nickel	3.3	4×10^{-12}
Titanium	5	10^{-11}

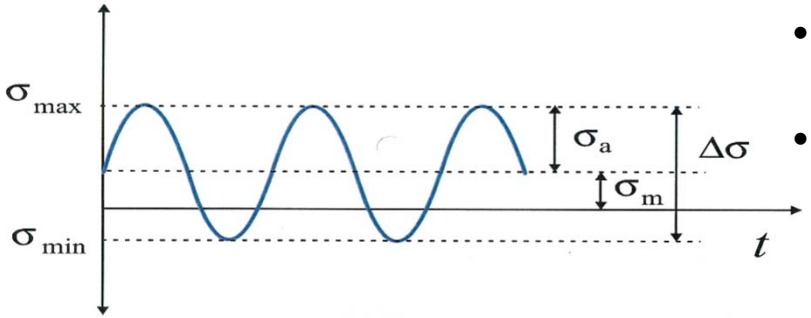
8. CRECIMIENTO DE FISURAS POR FATIGA

RÉGIMEN A:

- Simplificadamente, el intervalo del FIT, ΔK, debe superar un umbral ΔK_{th}, que depende del material, para que se produzca el avance de la fisura.
- En la práctica, lo que sucede es que, cuando $\Delta K < \Delta K_{th}$, la fisura propaga a velocidades no detectables.
- **Definición práctica**: Cuando la velocidad de crecimiento de la fisura cae por debajo de 10^{-8} mm/ciclo, se considera que la fisura se ha detenido; en esa situación, ΔK se denomina ΔK_{th}.
- Este límite representa una velocidad media de propagación menor de un espacio interatómico por ciclo. ¿Cómo es esto posible?
  - Se se considera que hay gran número de ciclos en los que no se produce avance alguno, es decir, la fisura crece un espacio interatómico en un ciclo determinado y a continuación se estabiliza durante varios ciclos.

8. CRECIMIENTO DE FISURAS POR FATIGA

RÉGIMEN B: La integración de la Ley de Paris permite determinar el número de ciclos remanente hasta rotura:



- Si $\sigma_{min} > 0$: $\Delta K_I = K_I(\sigma_{max}) - K_I(\sigma_{min})$
- Si $\sigma_{min} < 0$: $\Delta K_I = K_I(\sigma_{max})$

$$\frac{da}{dN} = C(\Delta K_I)^m \Rightarrow \frac{da}{dN} = C\left[M\,\Delta\sigma\sqrt{\pi a}\right]^m \Rightarrow \frac{da}{a^{m/2}} = C(M\,\Delta\sigma)^m\,\pi^{m/2}\,dN$$

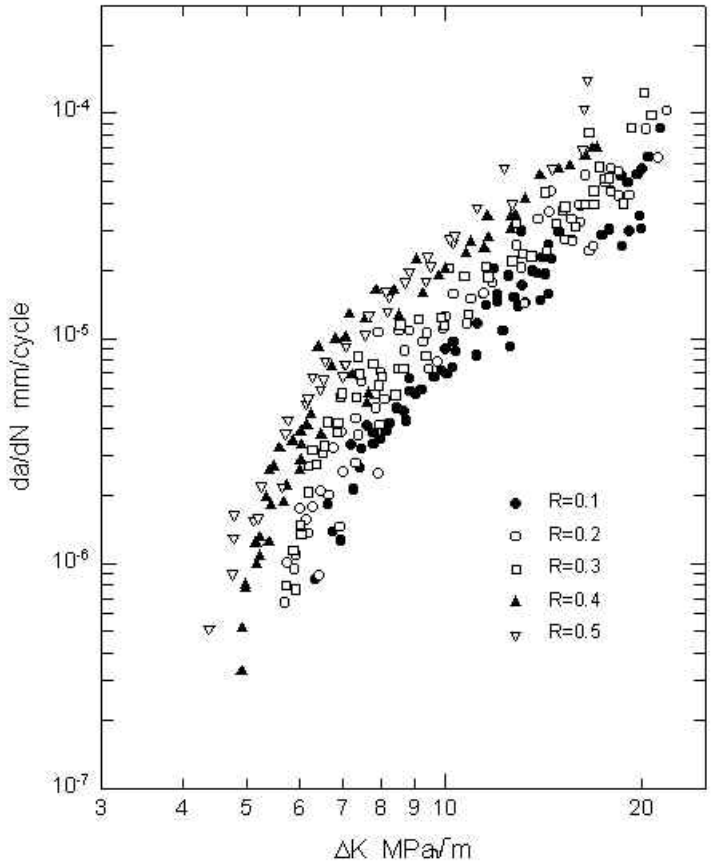
$$\int_{a_0}^{a_c}\frac{da}{a^{m/2}} = C(M\,\Delta\sigma)^m\,\pi^{m/2}\int_0^N dN \Rightarrow N = \frac{1}{C(M\,\Delta\sigma)^m\,\pi^{m/2}}\int_{a_0}^{a_c}\frac{da}{a^{m/2}}$$

$$\int_{a_0}^{a_c}\frac{da}{a^{m/2}} = C(M\,\Delta\sigma)^m\,\pi^{m/2}\int_0^N dN \Rightarrow N = \frac{1}{C(M\,\Delta\sigma)^m\,\pi^{m/2}}\int_{a_0}^{a_c}\frac{da}{a^{m/2}}:\begin{cases} m\neq 2: & N = \dfrac{a_c^{\,1-\frac{m}{2}} - a_0^{\,1-\frac{m}{2}}}{\left(1-\frac{m}{2}\right)C(M\,\Delta\sigma)^m\,\pi^{m/2}} \\ m = 2: & N = \dfrac{\ln\left(\frac{a_c}{a_0}\right)}{C(M\,\Delta\sigma)^m\,\pi^{m/2}} \end{cases}$$

8. CRECIMIENTO DE FISURAS POR FATIGA

RÉGIMEN B:

- Los parámetros propios del material, m y C, se determinan experimentalmente.
- En metales m varia típicamente entre 2 y 4, mientras que en cerámicos y polímeros puede llegar hasta 100.
- En aquellos casos en los que M no sea independiente de la longitud de fisura, la integral deberá ser resuelta numéricamente.
- El modelo asume que el crecimiento de fisura es independiente de la relación tensional $R=\sigma_{min} / \sigma_{max}$.



8. CRECIMIENTO DE FISURAS POR FATIGA

RÉGIMEN B:

- La integración de la Ley de Paris exige conocer las longitudes inicial y final de fisura, a_0 y a_c:
- ¿Cómo determinar experimentalmente la **longitud de fisura inicial**?
  - Existen varias técnicas: inspección visual, ultrasonidos, rayos X, etc.
  - Si un equipo de resolución "x" no detecta fisuras debe asumirse, conservadoramente, la existencia de una fisura de tamaño "x".
- ¿Cómo determinar la **longitud final de la fisura** (suponiendo que se trate de la de rotura)?

$$K_I(\sigma_{\max}) = K_{Ic} \quad \Rightarrow \quad M\,\sigma_{\max}\sqrt{\pi\,a_c} = K_{Ic} \quad \Rightarrow \quad a_c = \frac{1}{\pi}\left(\frac{K_{Ic}}{M\,\sigma_{\max}}\right)^2$$

8. CRECIMIENTO DE FISURAS POR FATIGA

Régimen B

A partir del análisis anterior surge una idea muy importante: **Incluso cuando existan fisuras detectadas en un componente o estructura no es necesario retirarlo de servicio!**

Para que esta afirmación tenga sentido debemos evaluar la vida remanente. El componente puede continuar operativo siempre que sea inspeccionado periódicamente

8. CRECIMIENTO DE FISURAS POR FATIGA

Régimen C

El fallo de la estructura o componente tras un proceso de fatiga puede producirse por dos mecanismos diferentes:

- Para valores de ΔK elevados la velocidad de propagación se dispara hasta llegar a la Fractura final al alcanzarse la tenacidad a fractura del material.

  Ej: Muchos aceros a bajas temperaturas

- Colapso plástico de la sección remanente .

  Ej: Temperatura ambiente en materiales dúctiles

9. OBTENCIÓN DE LA LEY DE PARIS

Objetivo: Determinación de la ley de Paris

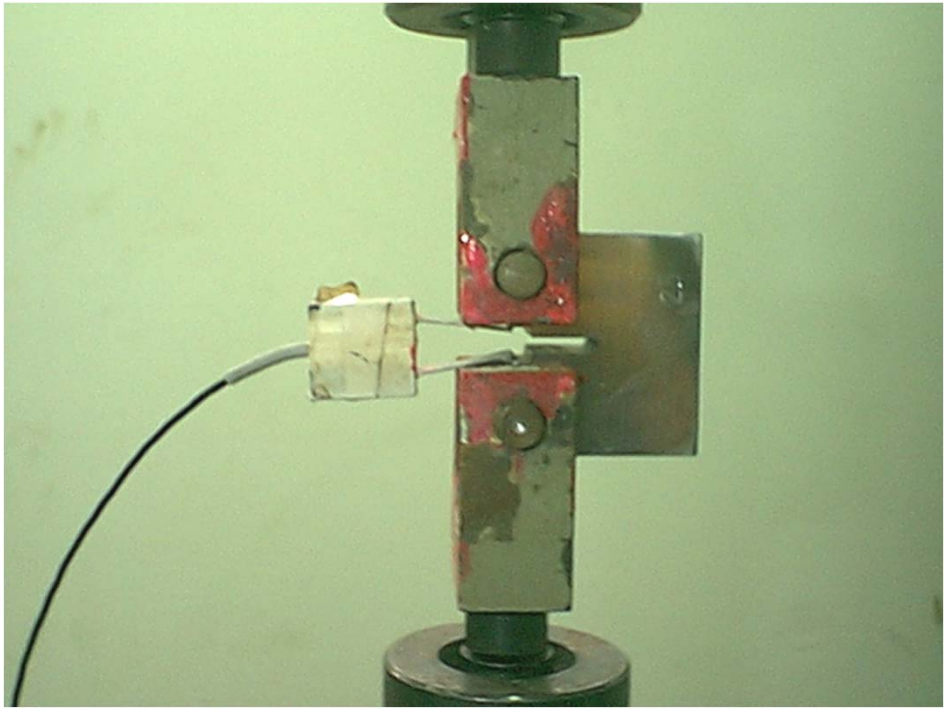
Metodología: Basándose en la MFEL se determina la velocidad de propagación de fisuras en función de ΔK.

1. Elección de probeta típica en MF (CT,SENB,...)
2. Sistema de aplicación de cargas (Amplitud cte.)
3. Método de seguimiento de avance de fisura en función de N.
4. Obtención de velocidad de propagación media en zona II.
5. Determinación umbral ΔK_{th}
6. Representación Log. da/dN-log ΔK y ajuste con parámetros de Paris.

Normativa: ASTM E-647

9. OBTENCIÓN DE LA LEY DE PARIS

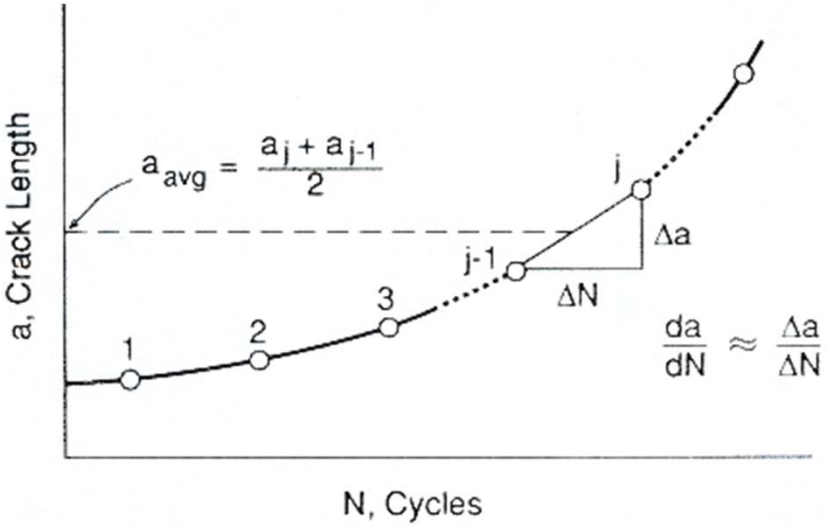
1. Elección de probeta típica en MF (CT)
2. Sistema de aplicación de cargas (Amplitud cte.)

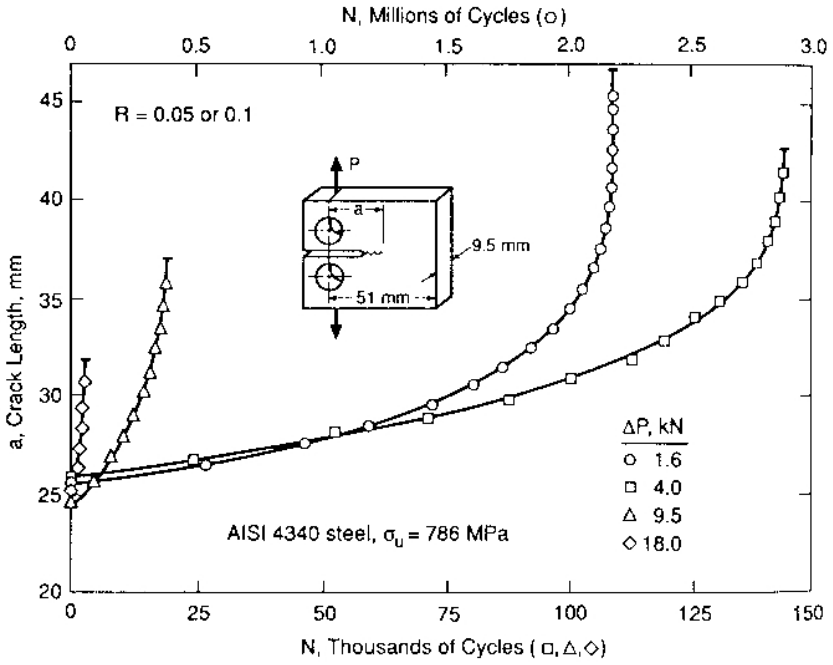


$$\Delta K = \frac{\Delta P}{B\sqrt{W}} f\left(\frac{a}{W}\right)$$

9. OBTENCIÓN DE LA LEY DE PARIS

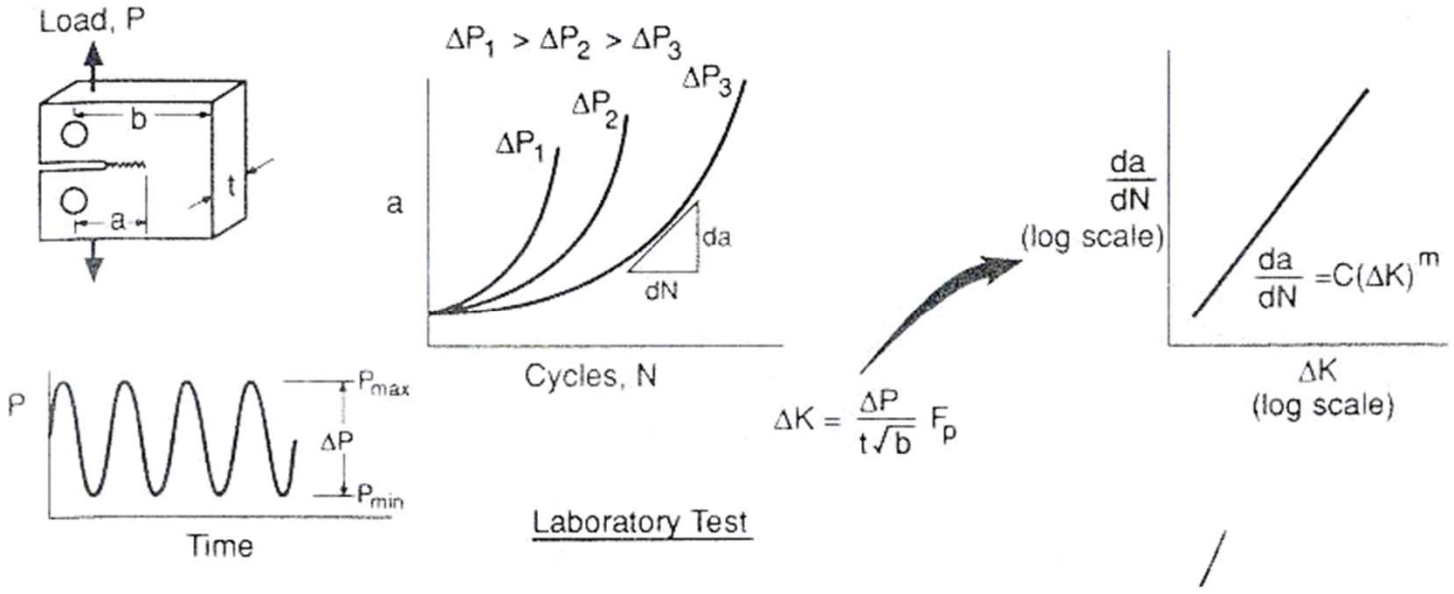
3. Método de seguimiento de avance de fisura en función del tiempo (f) ó N ciclos: M. ópticos, flexibilidad...





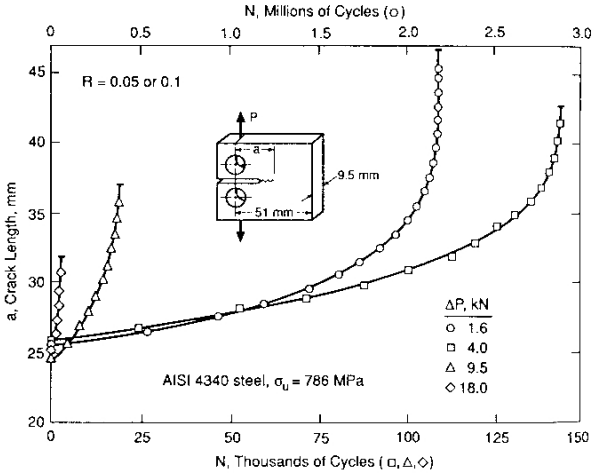
9. OBTENCIÓN DE LA LEY DE PARIS

4. Obtención de velocidad de propagación media en zona II.
5. Representación da/dN-logΔK y ajuste con parámetros de Paris.

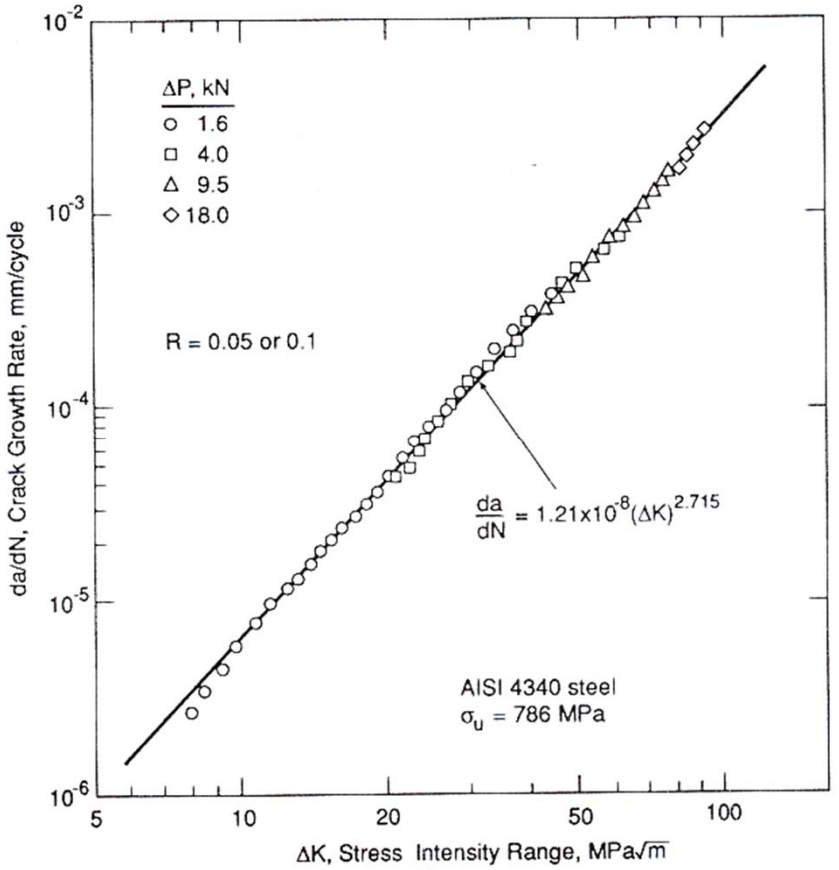


9. OBTENCIÓN DE LA LEY DE PARIS

Ejemplo: Determinación de da/dN_{II}, m y C en aceros tipo AISI4130.



$$\Delta K = \frac{\Delta P}{B\sqrt{W}} f\left(\frac{a}{W}\right)$$



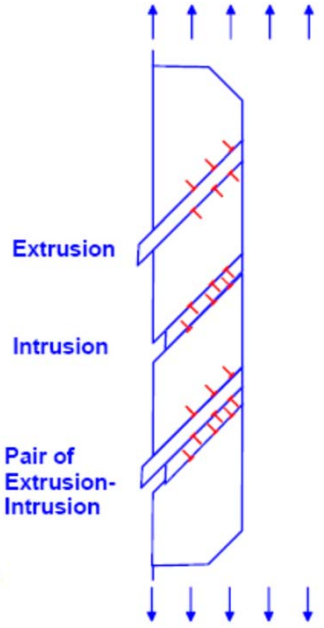
10. FACTORES INFLUYENTES EN LA PROPAGACIÓN

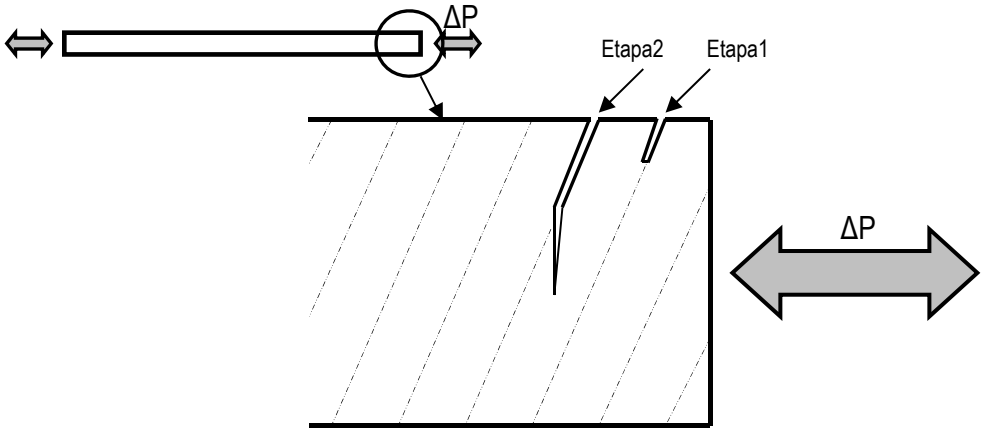
Régimen	A Crecimiento lento	B Zona de Paris	C Crecimiento rápido
Microscopia rotura	Modo II (cortante) Facetas frágiles	Estrías (modo I) Plano ondas	Clivajes, microh.
Influencia microestructura	Alta	Baja	Alta
Efecto R	Alto	Bajo	Alto
Efecto ambiente	Alto	*	Bajo
Nivel tensional Zona plástica	$r_c < d_g$	$r_c > d_g$	$r_c >> d_g$
*Dependiente de ambiente, frecuencia y material CBT,CF.			

11. MICROMECANISMOS DE FATIGA

Componentes no fisurados

Fatiga de Bajo Número de Ciclos: la plastificación ocasionada por las altas tensiones aplicadas genera rugosidad en la superficie del componente o estructura. Dicha rugosidad provoca que se forme la fisura, en una primera etapa a lo largo de un plano de deslizamiento (fase que se corresponde fundamentalmente con la iniciación) y finalmente (segunda etapa) de forma perpendicular a la variación de tensiones actuante, tal y como se verá para el caso de Fatiga de Componentes Fisurados.





11. MICROMECANISMOS DE FATIGA

Componentes no fisurados

Fatiga de Alto Número de Ciclos: aunque la tensión aplicada sea inferior al límite elástico se producirá una plastificación local allá donde exista una entalla, una raspadura o un cambio de sección que actúe como concentrador de tensiones. Esta plastificación local generará la aparición de fisuras de forma similar a como se produce en la Fatiga de Bajo Número de Ciclos, consumiendo la iniciación la mayor parte de la vida en fatiga.

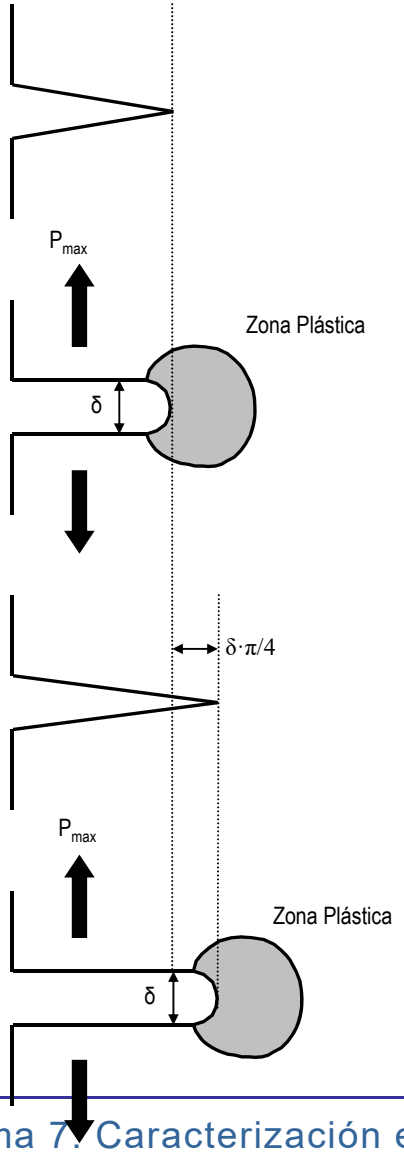
De lo dicho se deduce que la existencia de concentradores de tensiones limita enormemente la vida en Fatiga de Alto Número de Ciclos.

11. MICROMECANISMOS DE FATIGA

Componentes fisurados

La aplicación de tensiones de tracción genera una zona plástica en el frente de fisura que hace que este último se enrome o redondee una determinada magnitud, δ, generando nueva superficie de fisura. Una vez alcanzada la tracción máxima, a medida que avanza el ciclo de carga las tracciones se reducen y la nueva superficie creada se pliega hacia delante, provocando la extensión de la fisura (aproximadamente π·δ/4).

El proceso se repite a cada ciclo de cargas.

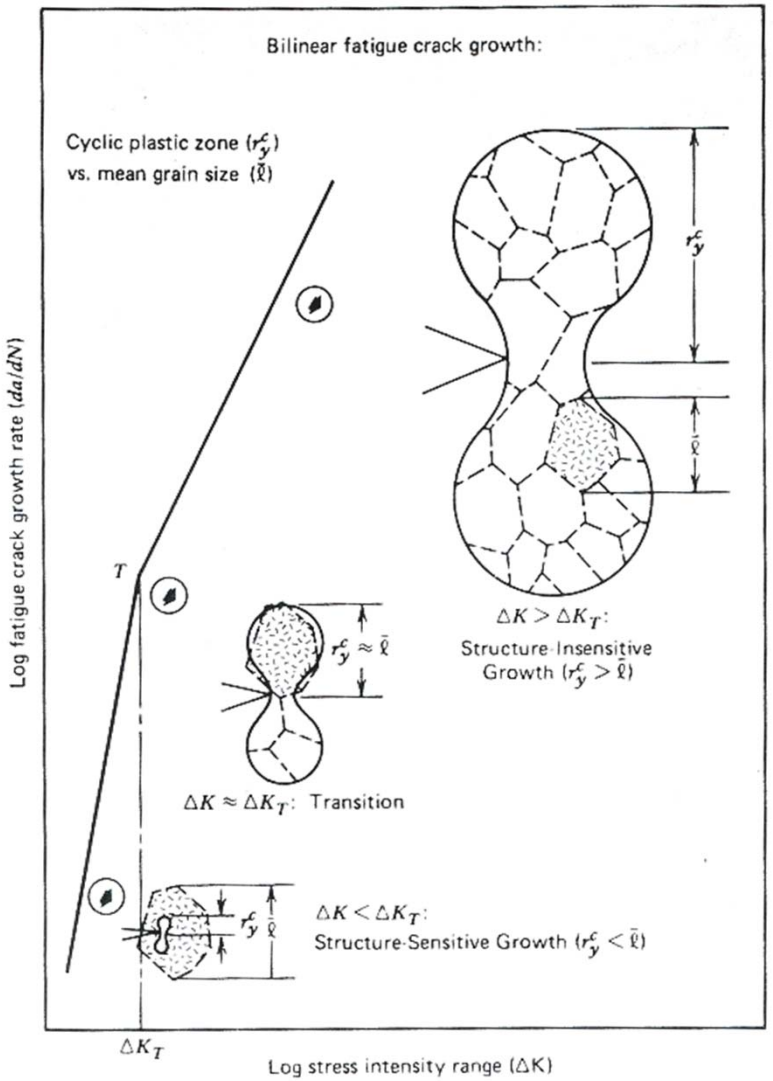


11. MICROMECANISMOS DE FATIGA

Componentes fisurados

Regiones A y B

Modos de propagación:

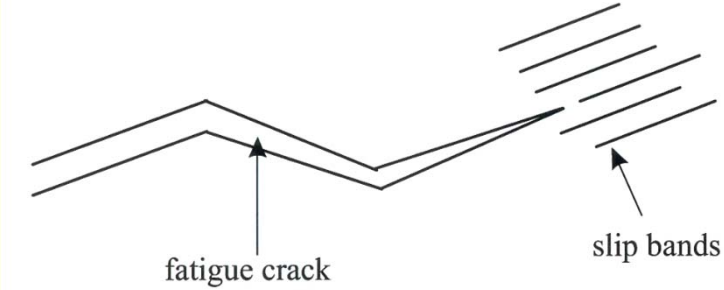


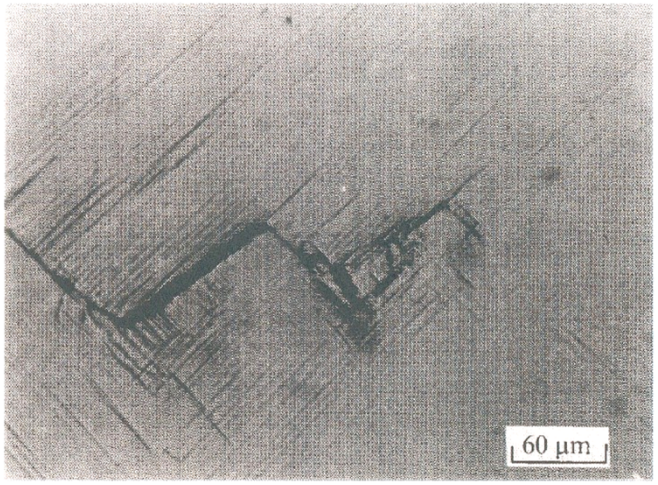
11. MICROMECANISMOS DE FATIGA

Componentes fisurados

Región A

Zona umbral: r_y<d. La propagación tiene lugar a través de los planos de deslizamiento. Modo II de fractura (cortante)



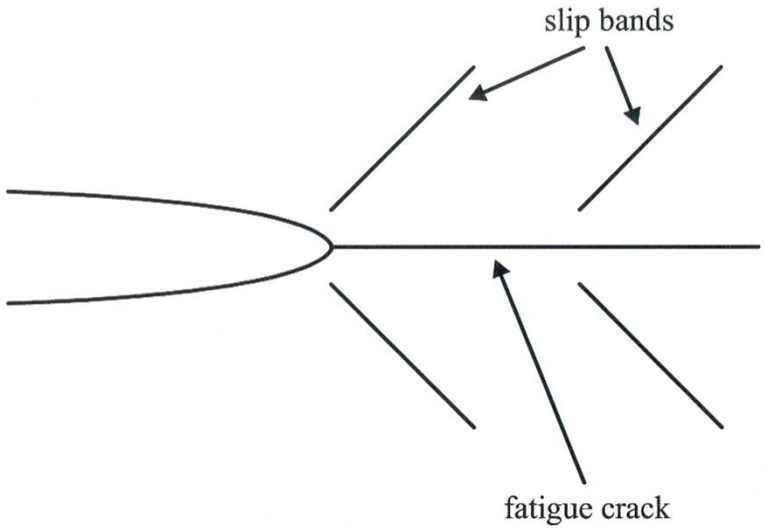


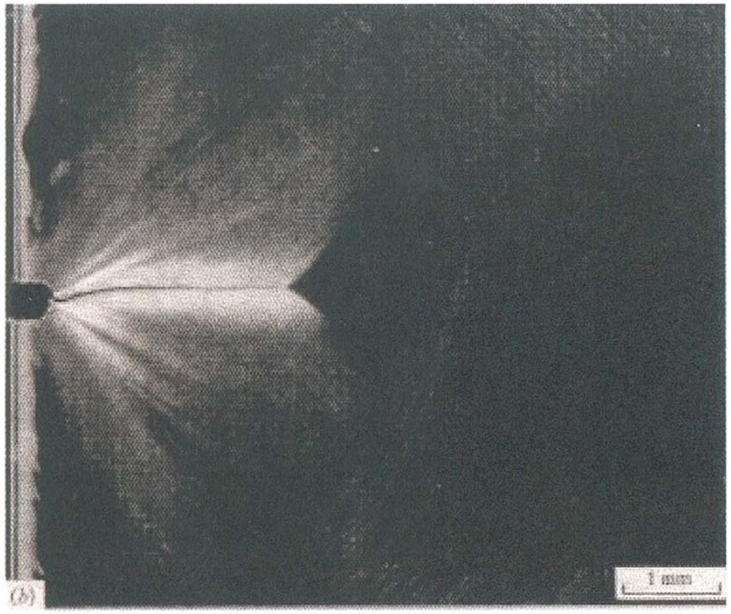
11. MICROMECANISMOS DE FATIGA

Componentes fisurados

Región B

Zona II Ley de Paris: r_y>d. La implicación de muchos planos de deslizamiento simultáneos hace que la grieta propague por la intersección entre ellos. ESTRIAS-Modo I de fractura (tracción):



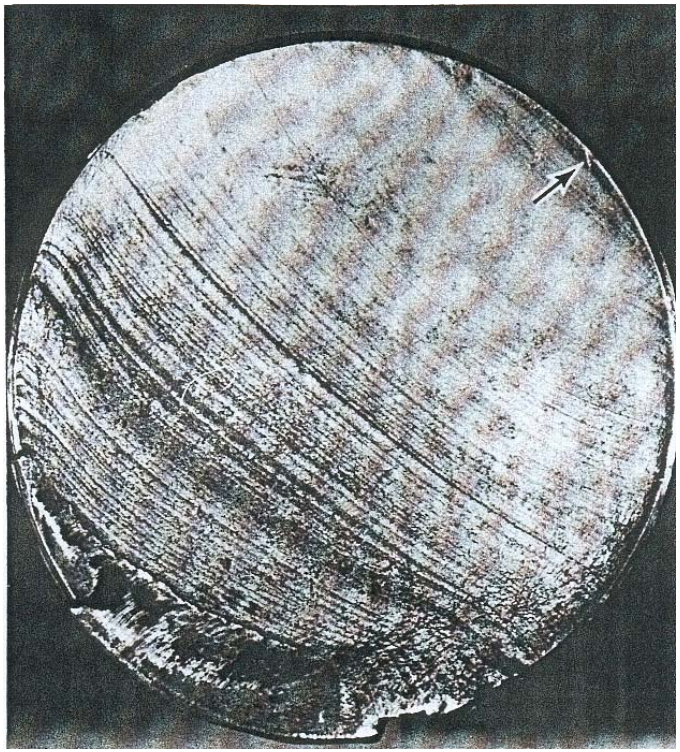


11. MICROMECANISMOS DE FATIGA ASPECTOS FRACTOGRÁFICOS

Régimen B

Una fisura propagándose por fatiga deja unas marcas características conocidas como estrías o líneas de playa. Dichas marcas son, a menudo, la evidencia más clara de una rotura causada por fatiga.

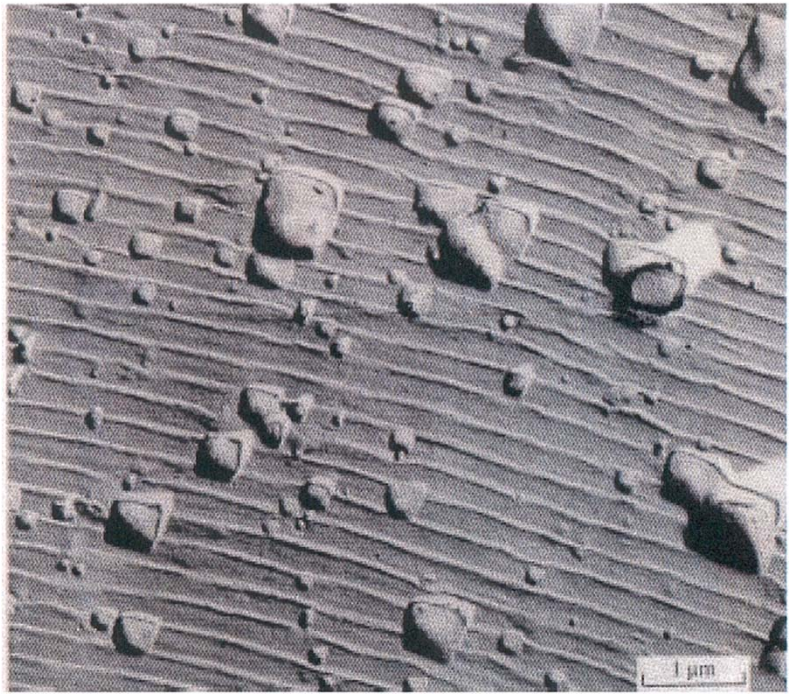
Las estrías son las marcas que sobre las superficie de propagación deja el avance de la fisura en varios ciclos.



11. MICROMECANISMOS DE FATIGA

Régimen B

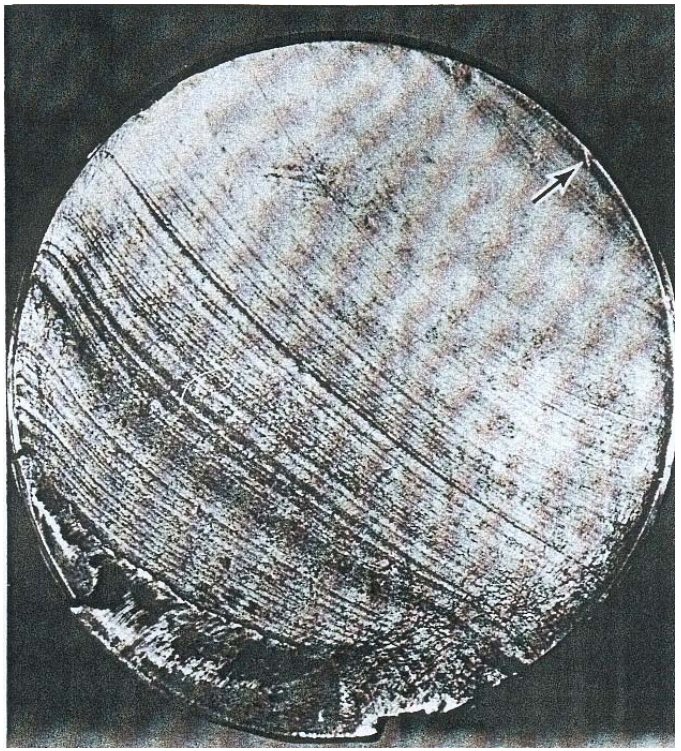
$$\frac{da}{dN} \approx \Delta\delta_t = \beta \frac{(\Delta K)^2}{\sigma_y' E'}$$



11. MICROMECANISMOS DE FATIGA

Régimen C

En la sección final de rotura desaparecen las líneas de crecimiento, pudiendo desarrollarse:

1. Micromecanismos de clivaje y/o desgarro dúctil si la rotura es por fractura

2. Microhuecos si es debida a un proceso de plastificación de la sección remanente.