

Universidad Tecnológica de Pereira  
Facultad de Ingeniería Mecánica  
Diseño I  
Profesor: Libardo Vanegas Useche

9 de septiembre de 2016

# CAPÍTULO 5 TEORÍA DE FATIGA



# TEMAS DE LA PRESENTACIÓN

---

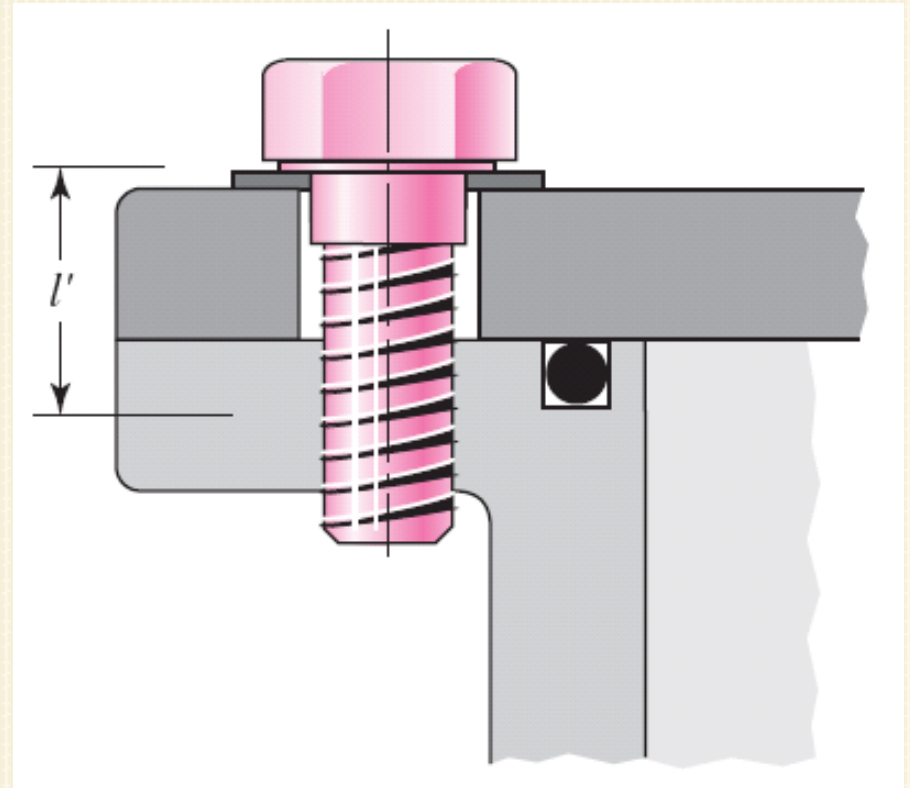
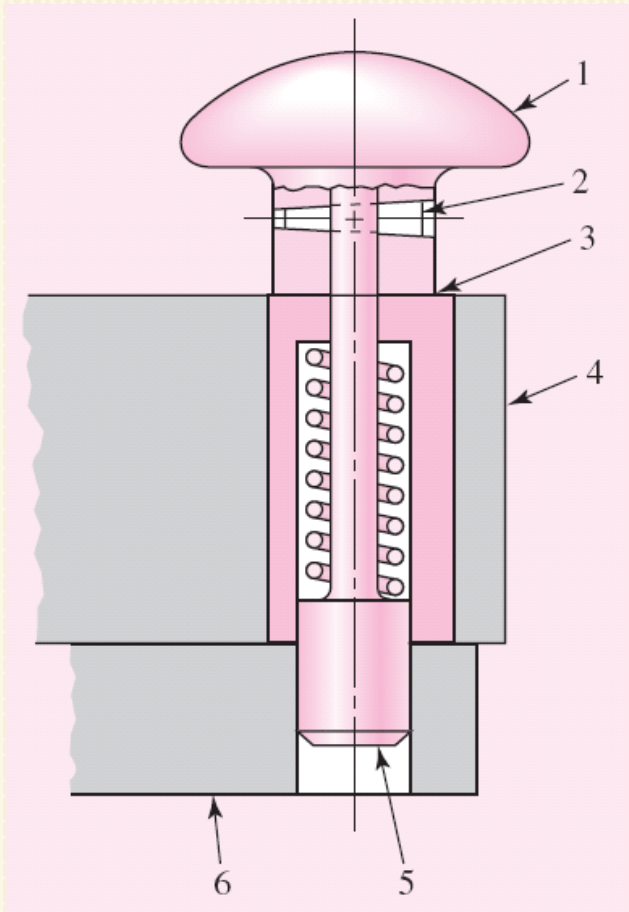
- ✘ Introducción
- ✘ Historia de la fatiga
- ✘ Algunos accidentes causados por fatiga
- ✘ Mecanismo de falla por fatiga
- ✘ Regímenes de fatiga
- ✘ Modelos de falla por fatiga
- ✘ Modelo vida-esfuerzo

# INTRODUCCIÓN

---

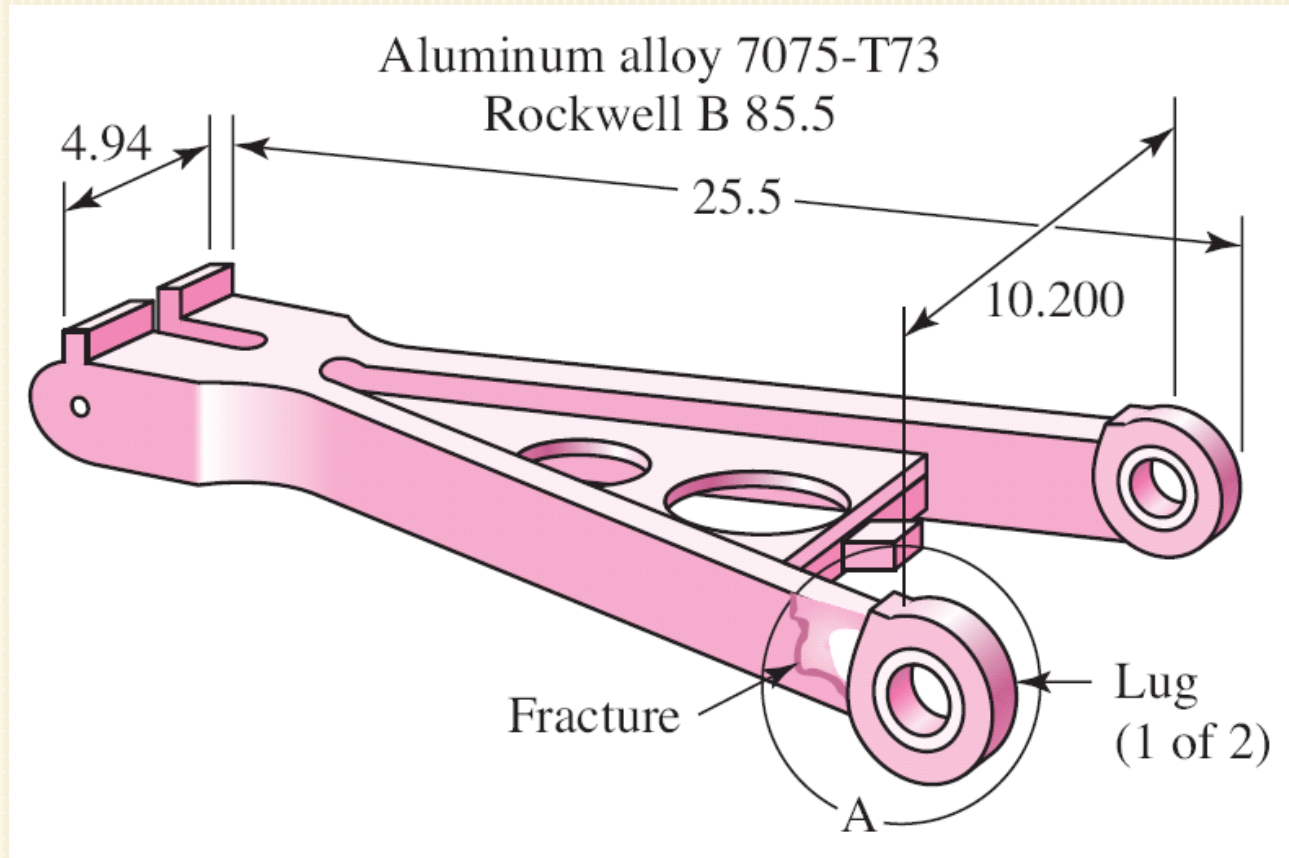
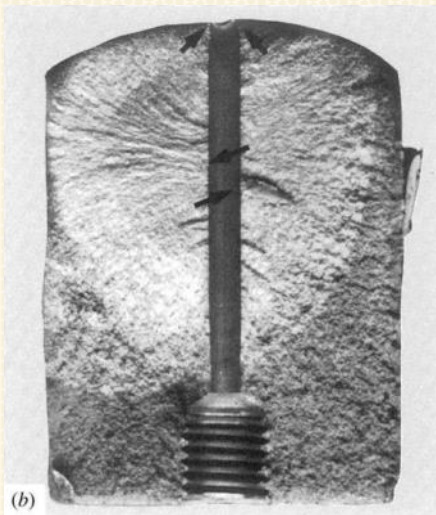
- × **Fatiga** es una falla asociada con **cargas variables**:  
*es una **falla** de un material sometido a **cargas variables** (cíclicas), después de cierto número de repeticiones (ciclos) de carga*
- × Ejemplo: alambre flexionado en dos sentidos
- × **Muchos** elementos están sometidos a cargas variables:
  - + Árboles de transmisión de potencia
  - + Cigüeñales
  - + Bielas
  - + Resortes
  - + Estructuras de puentes

# INTRODUCCIÓN – RESORTES Y TORNILLOS



# INTRODUCCIÓN - TREN DE ATERRIZAJE

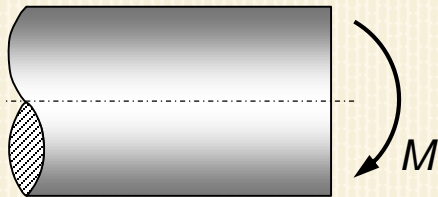
Ensamble  
brazo-torque  
de un tren de  
aterrizaje de  
aleación de  
aluminio  
7075-T73



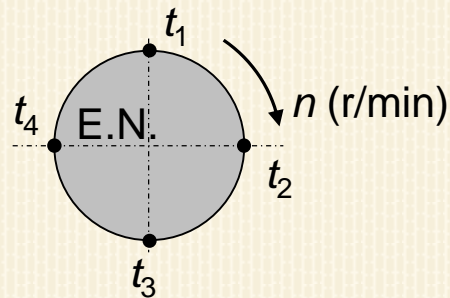
← Agujero de lubricación que provocó falla por fatiga

# INTRODUCCIÓN – ELEMENTOS ROTATIVOS

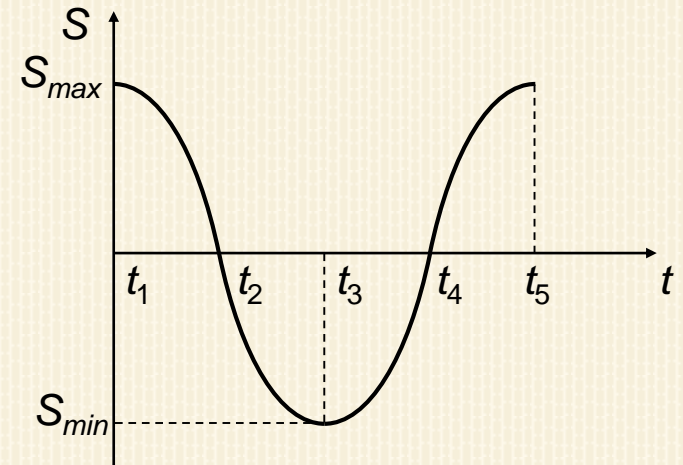
- ✘ En particular los **elementos rotativos** están generalmente sometidos a **esfuerzos variables**:



(a) Eje giratorio sometido a flexión



(b) Cualquier punto en la periferia soporta un esfuerzo que varía desde el máximo (en tracción) hasta el mínimo (en compresión) y viceversa

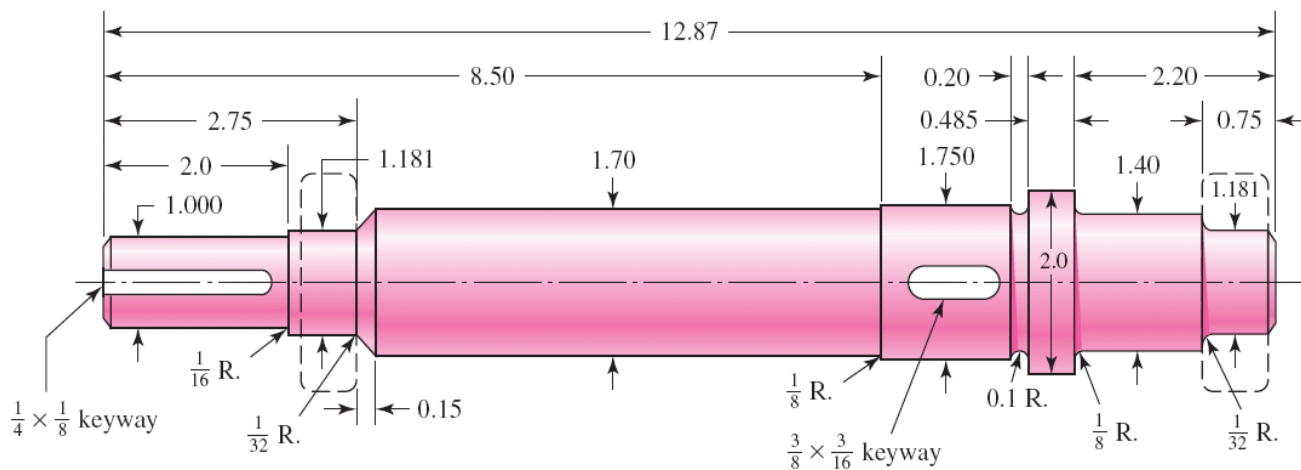
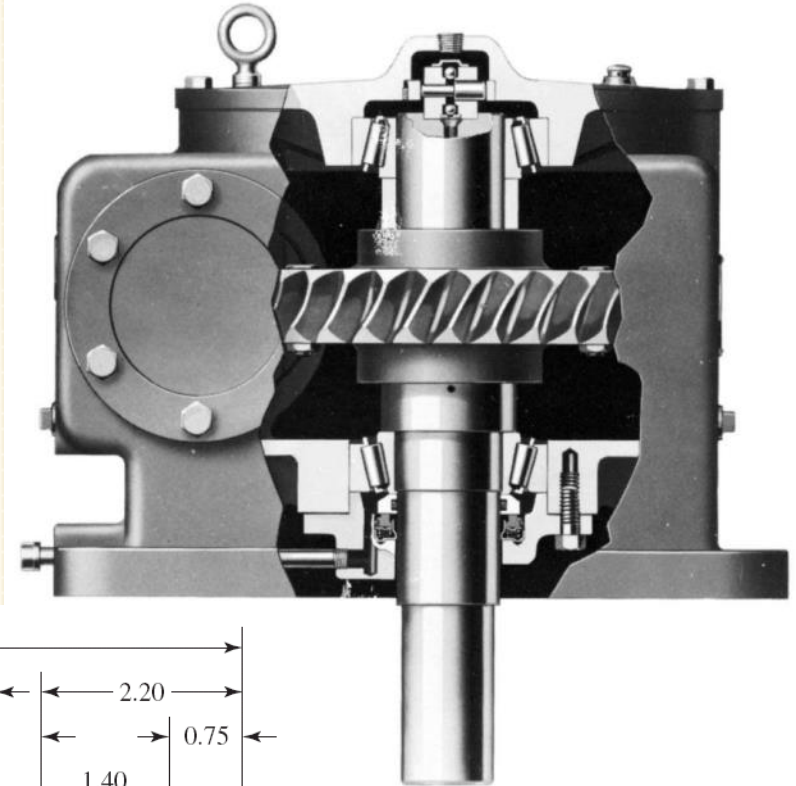


(c) Variación sinusoidal del esfuerzo en cualquier punto de la sección; en los puntos de la periferia se da la mayor amplitud

# INTRODUCCIÓN - ÁRBOLES Y ENGRANAJES

Reductor de velocidades de tornillo sinfín →

Cigüeñal ([http://imgs.evisos.com/2008/06/5/ciguenal-motor-john-deere-4045\\_74bfbb6814a\\_3.jpg](http://imgs.evisos.com/2008/06/5/ciguenal-motor-john-deere-4045_74bfbb6814a_3.jpg))



← Árbol de un ventilador accionado por un engrane

# HISTORIA DE LA FATIGA

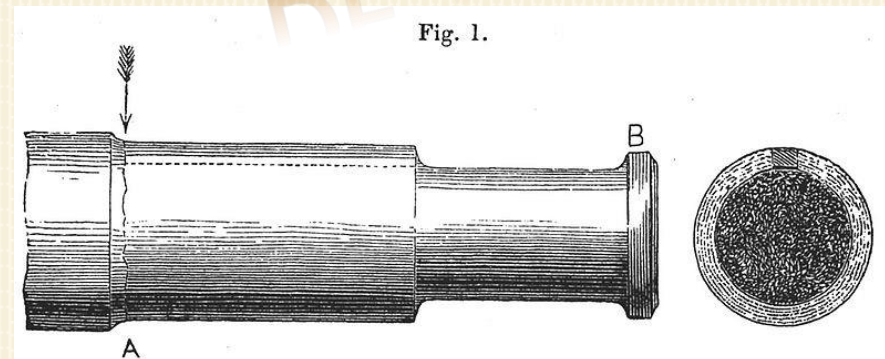
- ✘ El fenómeno de fatiga fue observado por primera vez en el **siglo XIX** cuando los ejes de los carros de ferrocarril comenzaron a fallar después de un corto tiempo de servicio
- ✘ Ejes dúctiles  
*¡falla de tipo frágil!*

TRAIN CRASH...



[http://fr.wikipedia.org/wiki/Catastrophe\\_ferroviaire\\_de\\_Meudon](http://fr.wikipedia.org/wiki/Catastrophe_ferroviaire_de_Meudon)

ACCIDENTE  
DE TREN...

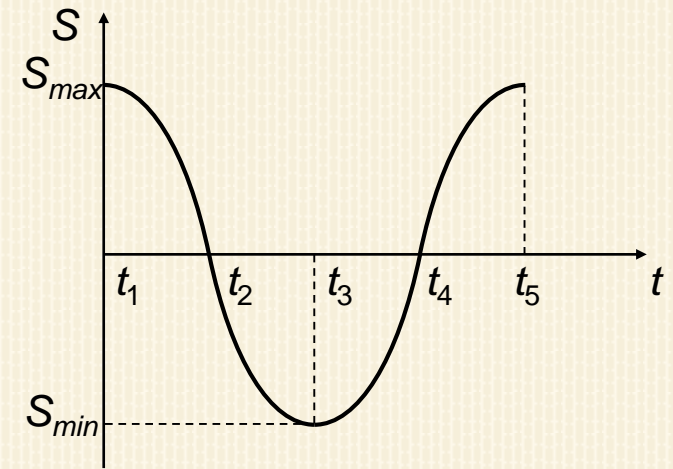
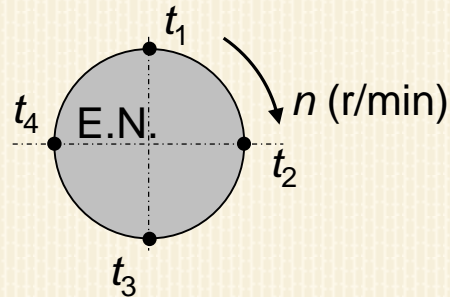
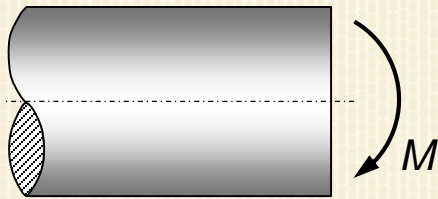
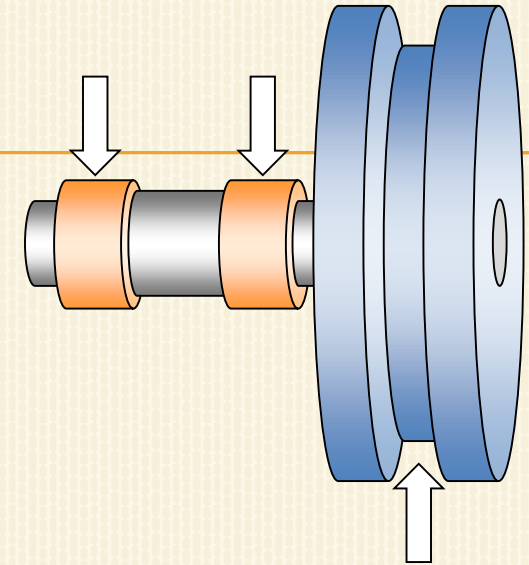


Joseph Glynn, Paper No 617, Proc. [ICE en:1844](#)  
scanned by [Peterlewis](#) 09:04, 28 May 2007  
Drawing of a fatigue failure in an axle, 1843.

[http://en.wikipedia.org/wiki/File:Tender\\_fatigued\\_axle.JPG](http://en.wikipedia.org/wiki/File:Tender_fatigued_axle.JPG)



# HISTORIA DE LA FATIGA



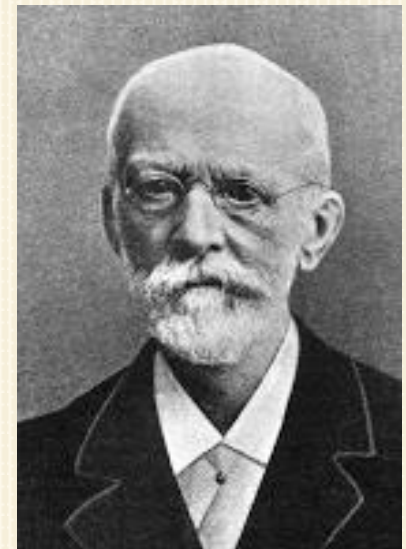
(a) Eje giratorio sometido a flexión

(b) Cualquier punto en la periferia soporta un esfuerzo que varía desde el máximo (en tracción) hasta el mínimo (en compresión) y viceversa

(c) Variación sinusoidal del esfuerzo en cualquier punto de la sección; en los puntos de la periferia se da la mayor amplitud

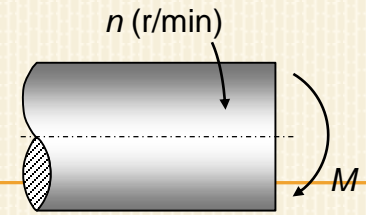
# HISTORIA DE LA FATIGA

- ✘ Poncelet – usó por primera vez el término fatiga en **1839** → *tesis: el material se había cansado y fragilizado*
- ✘ Rankine – realizó estudio sobre las causas de la ruptura de los ejes de ferrocarril **1843** → *tesis: el material se había cristalizado y fragilizado*
- ✘ August Wöhler – en **1871**, después de 20 años de investigación experimental, publicó sus estudios. → *número de ciclos: culpable de la falla; pero el material NO se se había cansado NI fragilizado.* Encontró la existencia teórica de un **límite de fatiga**



<http://themechanicalknack.blogspot.com.co/2013/03/august-wohlers-study-on-fatigue.html>

# HISTORIA DE LA FATIGA



Introduction to PSFATIGUE

## Wöhler's Experiment

ENGINEERING.

May 19, 1871.]

349

### WÖHLER'S EXPERIMENTS ON THE "FATIGUE" OF METALS.

(Continued from page 347.)

The last of the series of testing machines employed by Herr Wöhler, which we shall here to describe here, is that in which the test bars were fixed in position at the ends of a horizontally rotating axis, their outer ends being fixed. Under three circumstances all sides of the test bars were exposed to tension and compression alternately, the maximum variation of strain on any particular fibre being three equal to the sum of the maximum tensile and compressive strains, so that the fibre was essentially strained.

The machine employed by Herr Wöhler for carrying out tests of this character is illustrated by the annexed Figs. 24 and 25. It consists of a simple wooden frame, carrying bearings, &c., in which there revolve the axis, *a*, this end being driven by a belt on the pulley, *b*. In the ends of the shaft or axis, *a*, are formed slightly conical sockets, into which are driven the ends of the bars to be tested. After being thus fixed, the projecting ends of the test bars are turned up by the aid of a slide rest, so that they run truly with the axis, *a*, and their outer ends are then fixed with the bearings, *c*. To these bearings are attached the spring dynamometers, *d*, by the aid of which any desired load was imposed upon the test rods.

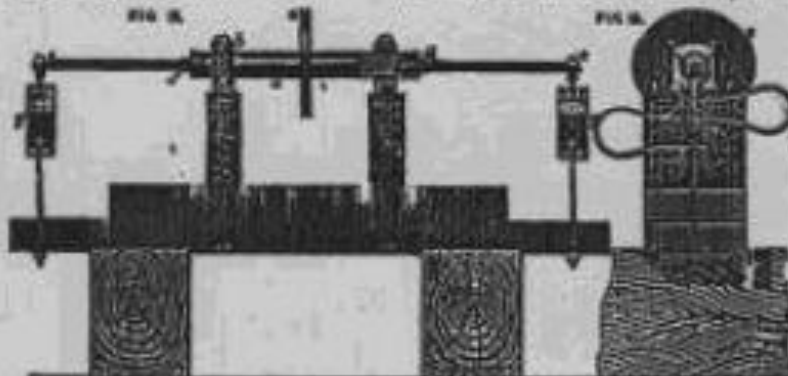
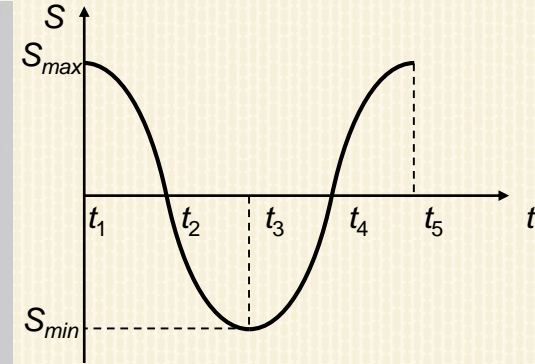
was in their case superior to those of the "E" pattern. The results recorded in the Table appended are for cast-iron which we will now proceed to notice. In the first place, bar No. 10, although it stood 4,321,320 revolutions without actually failing, yet when it was taken out of the machine it showed a fracture at the sharp corner indicating that breakage had already commenced. This bar it will be noted was a somewhat irregular bar, it having stood twice as many revolutions as those required by bars Nos. 11 and 12, although these latter bars were subjected to 33 per cent. the maximum strain.

Again, the irregularities from bars Nos. 27 and 28 broke in the enlarged portion close to the socket, this result being no doubt due to the "grain" of that point. Regarding the latter point, the maximum strain upon the fibres due to the load would be at the place of fracture, 22,324 lb. per square inch in the case of Nos. 27 and 28,270 lb. per square inch in the case of No. 28. The Krupp's steel bars Nos. 29 and 30 also broke in the enlarged portion close to the socket, the maximum strain on the fibres in the place of fracture being in these cases 28,473 lb. and 22,750 lb. per square inch respectively.

In the case of the Krupp's steel bars of "E" form, Nos. 31 to 35 inclusive, the difference between the diameters of the parts marked *d* and *d'*, on the diagram E, were as follows: In No. 31, the

TABLE No. VIII.—Showing the Results obtained by Wöhler's Tests of cast-iron and steel bars of the "E" form. (See the Appendix illustrated on the preceding pages.)

No.	Material	Form	Max. Strain (lb./sq. in.)	Revolutions	Remarks
10	Cast-iron	E	22,324	4,321,320	Bar broken at sharp corner
11	Cast-iron	E	22,324	1,100,000	Bar broken at enlarged portion
12	Cast-iron	E	22,324	1,100,000	Bar broken at enlarged portion
27	Cast-iron	E	22,324	1,100,000	Bar broken at enlarged portion
28	Cast-iron	E	22,324	1,100,000	Bar broken at enlarged portion
29	Krupp's steel	E	28,473	1,100,000	Bar broken at enlarged portion
30	Krupp's steel	E	22,750	1,100,000	Bar broken at enlarged portion
31	Krupp's steel	E	22,324	1,100,000	Bar broken at enlarged portion
32	Krupp's steel	E	22,324	1,100,000	Bar broken at enlarged portion
33	Krupp's steel	E	22,324	1,100,000	Bar broken at enlarged portion
34	Krupp's steel	E	22,324	1,100,000	Bar broken at enlarged portion
35	Krupp's steel	E	22,324	1,100,000	Bar broken at enlarged portion



Durability & Fatigue Life Estimation - FAT318

2 - 4

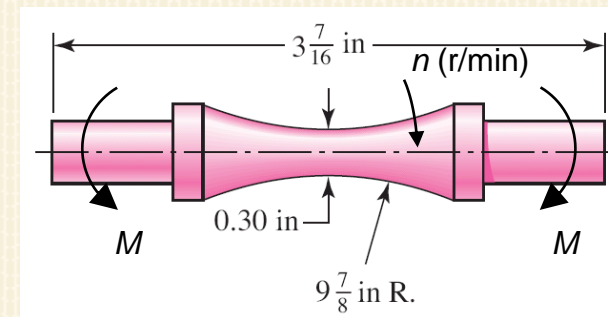
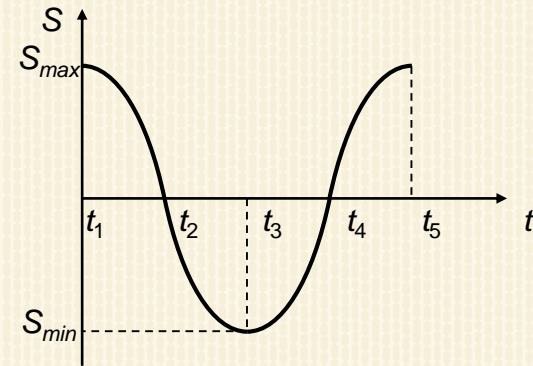
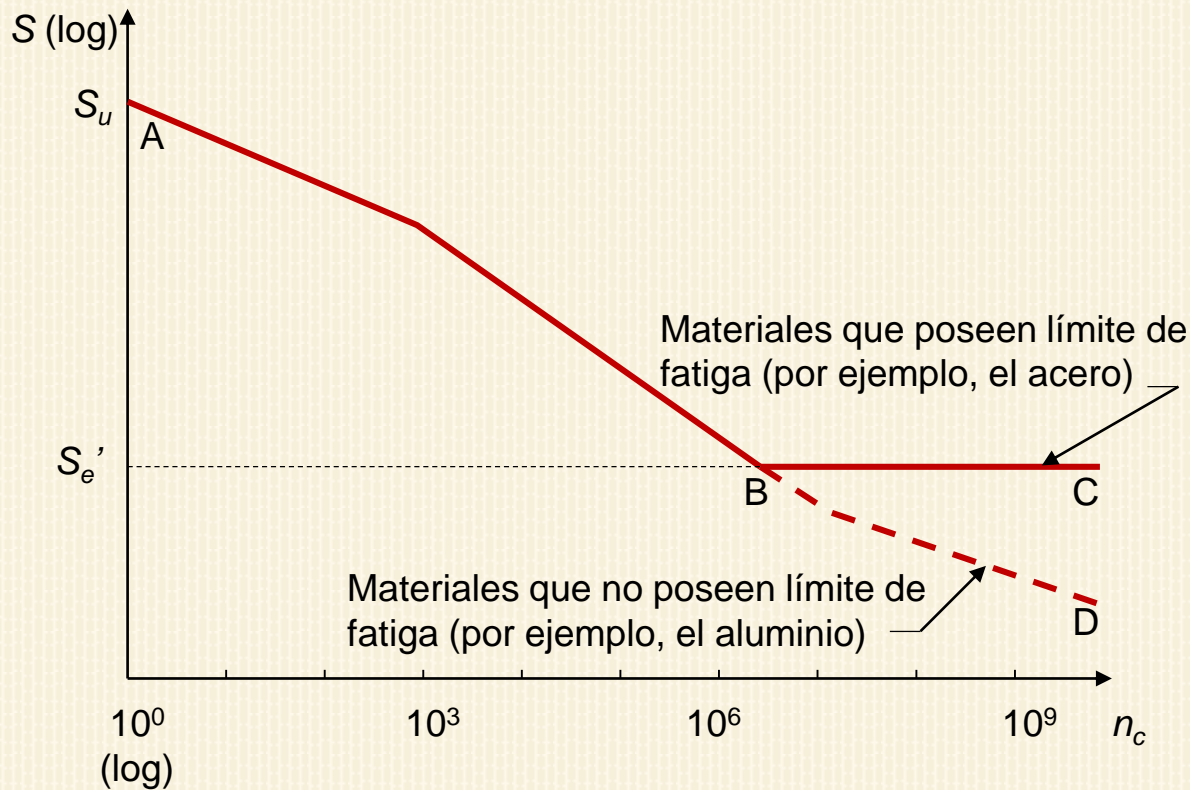
Copyright © 1980 PCA Engineer

<http://www.atzonline.com/index.php%3Bdo=show/site=a4e/sid=3759751764abce359b154b086938971/alloc=38/id=61/special=Special+Simulation>

Publication of Wöhler's fatigue experience, 1871

# HISTORIA DE LA FATIGA

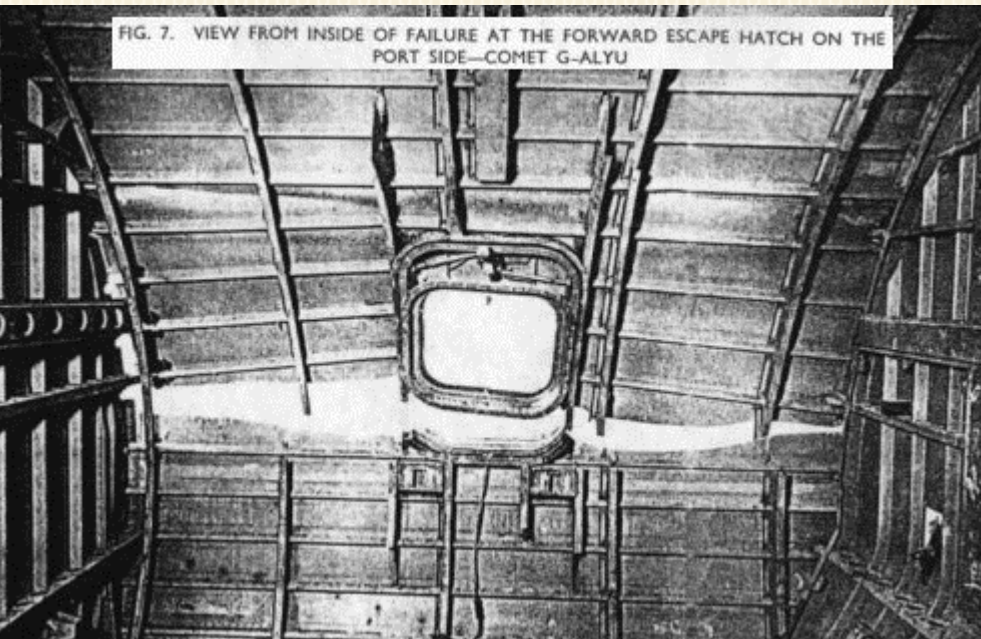
✘ Wöhler hizo pruebas de **flexión giratoria**



Budynas and Nisbett (2008) Shigley's Mechanical Engineering Design, 8th edition, MacGraw-Hill, U.S.A.

# ALGUNOS ACCIDENTES CAUSADOS POR FATIGA

- ✘ 1842 (Mayo 8) Accidente de tren Versalles-Paris: ~53 muertos y ~40 seriamente heridos (*eje de locomotora roto*)
- ✘ 1953-54 Havilland Comet (Comet británico) (1ª aeronave a reacción comercial para pasajeros): 3 aeronaves se partieron en el aire. Estos accidentes fueron causados por *ciclos de presurización y despresurización de la cabina (concentración de esfuerzos en las esquinas - relativamente agudas - de los agujeros para las ventanas y en los agujeros de los pasadores)*



# ALGUNOS ACCIDENTES CAUSADOS POR FATIGA

- ✘ **1842 (Mayo 8)** Accidente de tren Versalles-Paris: ~53 muertos y ~ 40 seriamente heridos (*eje de locomotora roto*)
- ✘ **1953-54** Havilland Comet (Comet británico) (1ª aeronave a reacción comercial para pasajeros): 3 aeronaves se partieron en el aire. Estos accidentes fueron causados por *ciclos de presurización y despresurización de la cabina (concentración de esfuerzos en las esquinas - relativamente agudas - de los agujeros para las ventanas y en los agujeros de los pasadores)*
- ✘ **1988** Boeing 737 (Aloha Airlines): perdió un tercio de la parte superior de la cabina en pleno vuelo (aterrizó con pérdidas mínimas de vida)



<http://morefuelplease.blogspot.com/2010/04/aloha-airlines-flight-24322-years-later.html>

# MECANISMO DE FALLA POR FATIGA

## Tres etapas:

### ✘ **Iniciación de grietas**

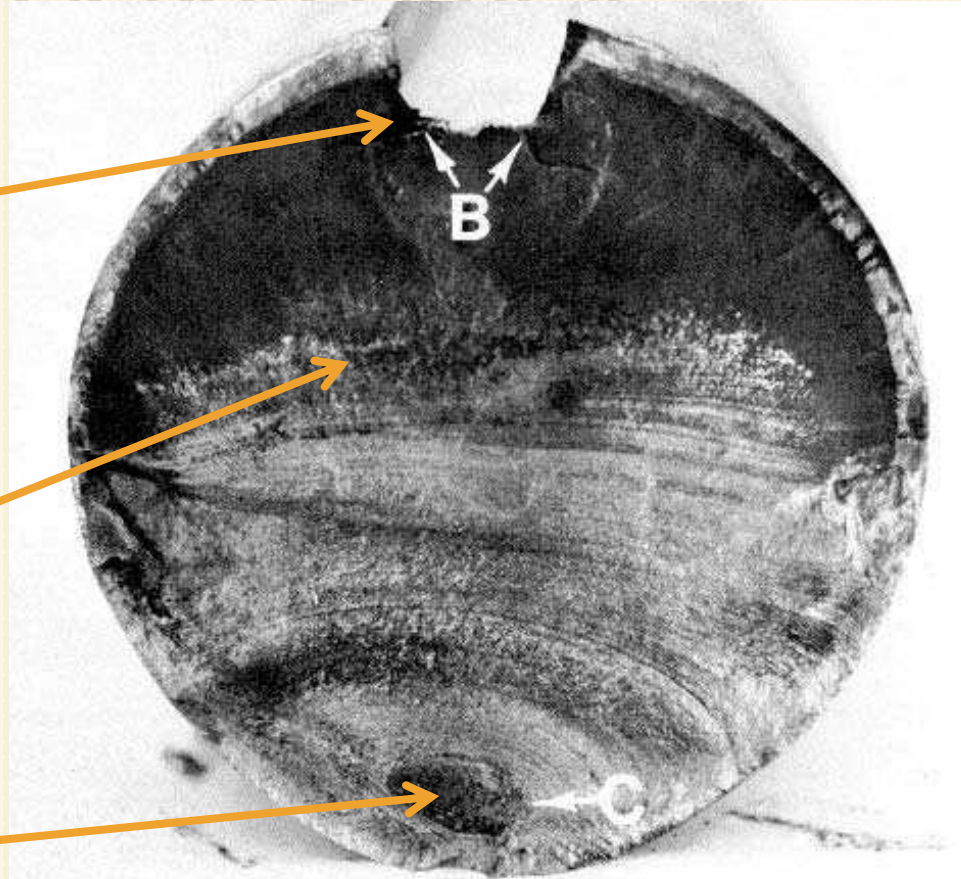
Deformación plástica →  
microgrietas (usualmente cerca a  
alguna discontinuidad)

(El proceso comienza con movimiento de  
dislocaciones, formando finalmente bandas de  
deslizamiento persistentes que producen pequeñas  
grietas)

### ✘ **Crecimiento o propagación de grietas**

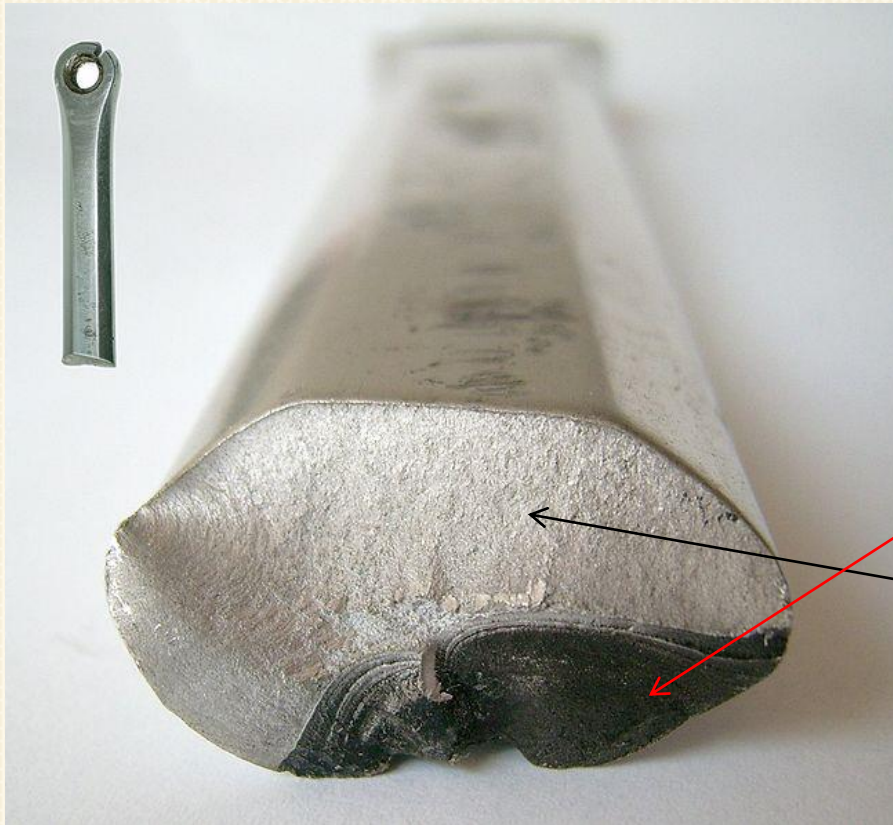
Estriaciones y marcas de playa  
(Crecimiento de grieta de etapa II)

### ✘ **Fractura repentina de tipo frágil**



Fractura de fatiga de un árbol de acero AISI 4320. La falla por fatiga inició en el extremo del chavetero en los puntos *B* y progresó hasta la fractura final en *C*. La *fractura final* es *pequeña*, indicando que las cargas eran pequeñas

# MECANISMO DE FALLA POR FATIGA



Fractura de una manivela de aluminio

Zona oscura: crecimiento lento de grieta

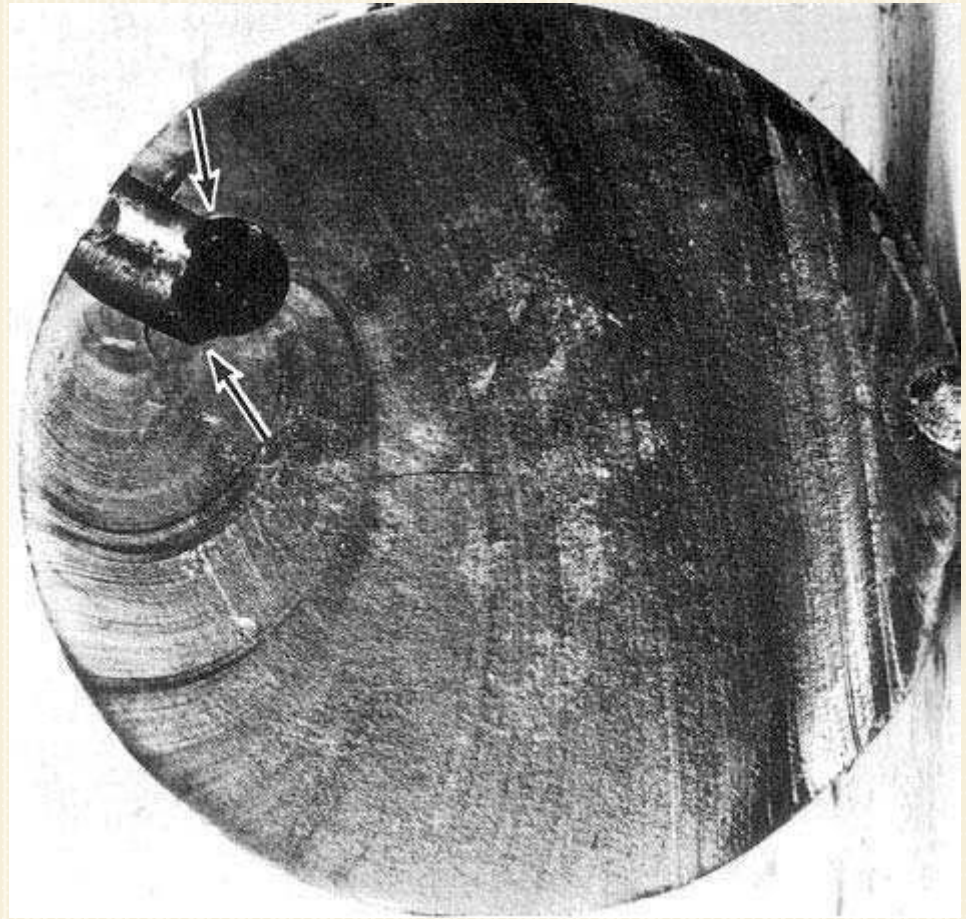
Zona brillante: fractura súbita

[https://en.wikipedia.org/wiki/Fatigue\\_\(material\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Fatigue_(material))



# MECANISMO DE FALLA POR FATIGA

Superficie de fractura por fatiga de un pin de acero AISI 8640. Las esquinas agudas de los agujeros para lubricación desalineados suministraron la concentración de esfuerzos que iniciaron dos grietas de fatiga (indicadas por las flechas)

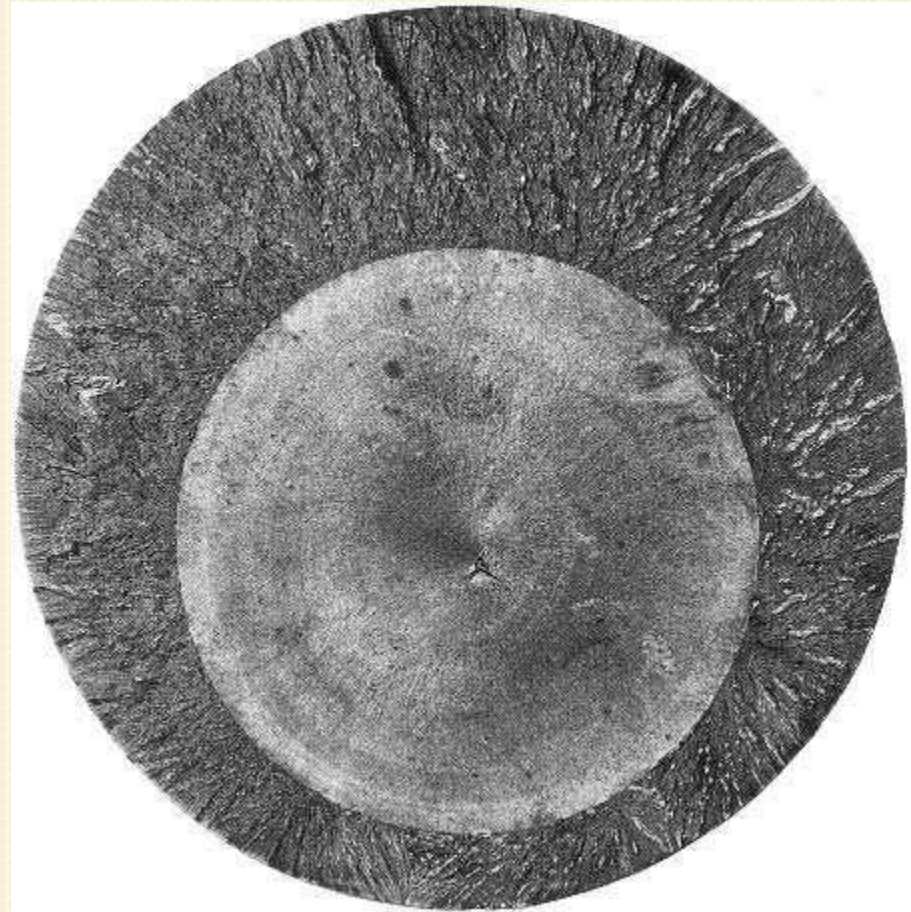


# MECANISMO DE FALLA POR FATIGA

Superficie de fractura por fatiga de un émbolo de acero de 200 mm de diámetro de un martillo de forja.

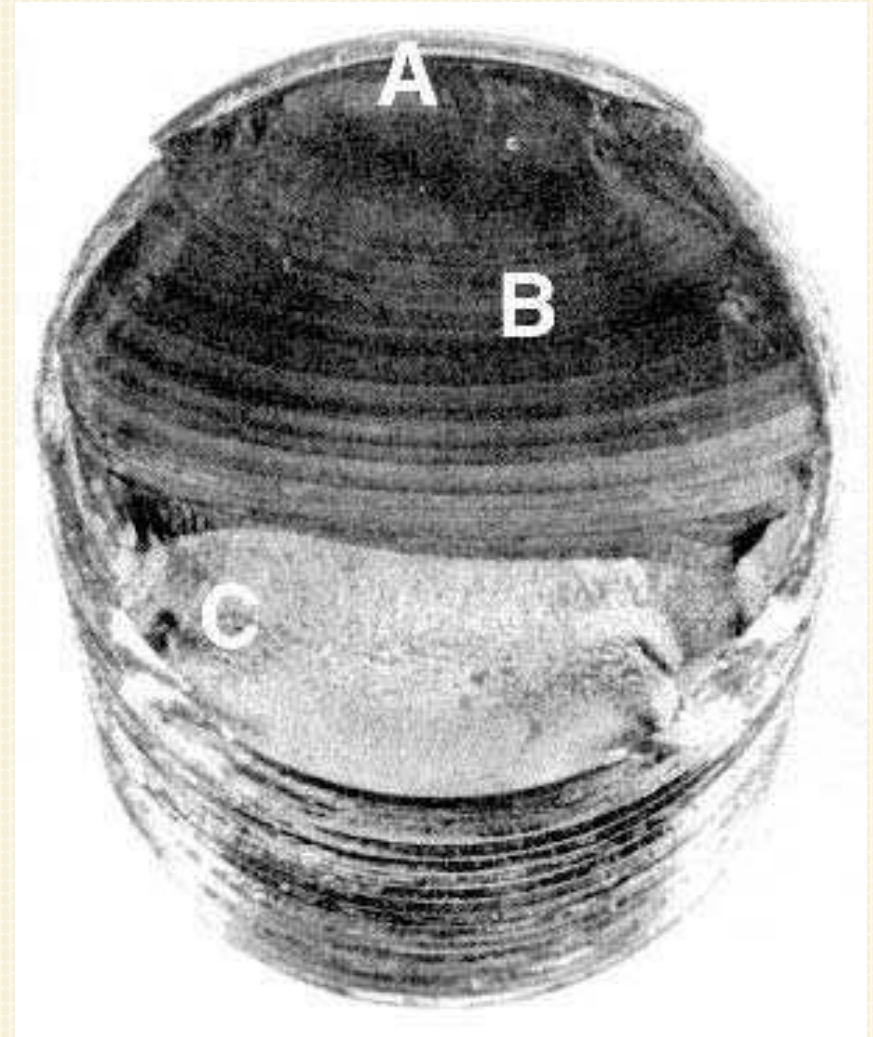
Este es un ejemplo de falla por fatiga causada por tracción pura donde no hay concentración de esfuerzos en la superficie y una grieta se puede iniciar en cualquier parte de la sección transversal.

En este caso, la grieta inicial se formó en una “escama”, creció simétricamente hacia afuera y finalmente produjo la fractura frágil sin aviso.



# MECANISMO DE FALLA POR FATIGA

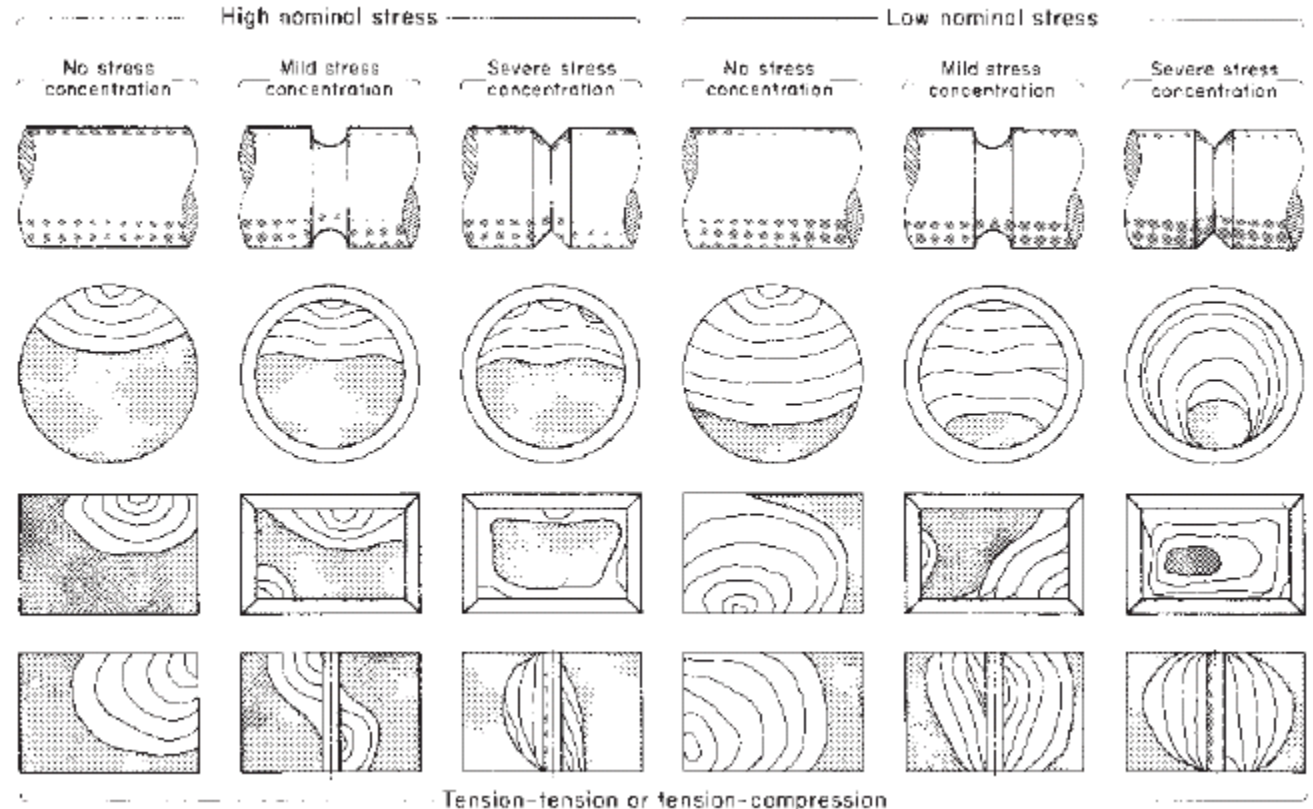
Falla por fatiga de un perno debida a flexión unidireccional repetida. La falla se inició en el fondo de la rosca en A, se propagó a través de más de la mitad de la sección transversal en B (ver marcas de playa), antes de la fractura súbita final en C.



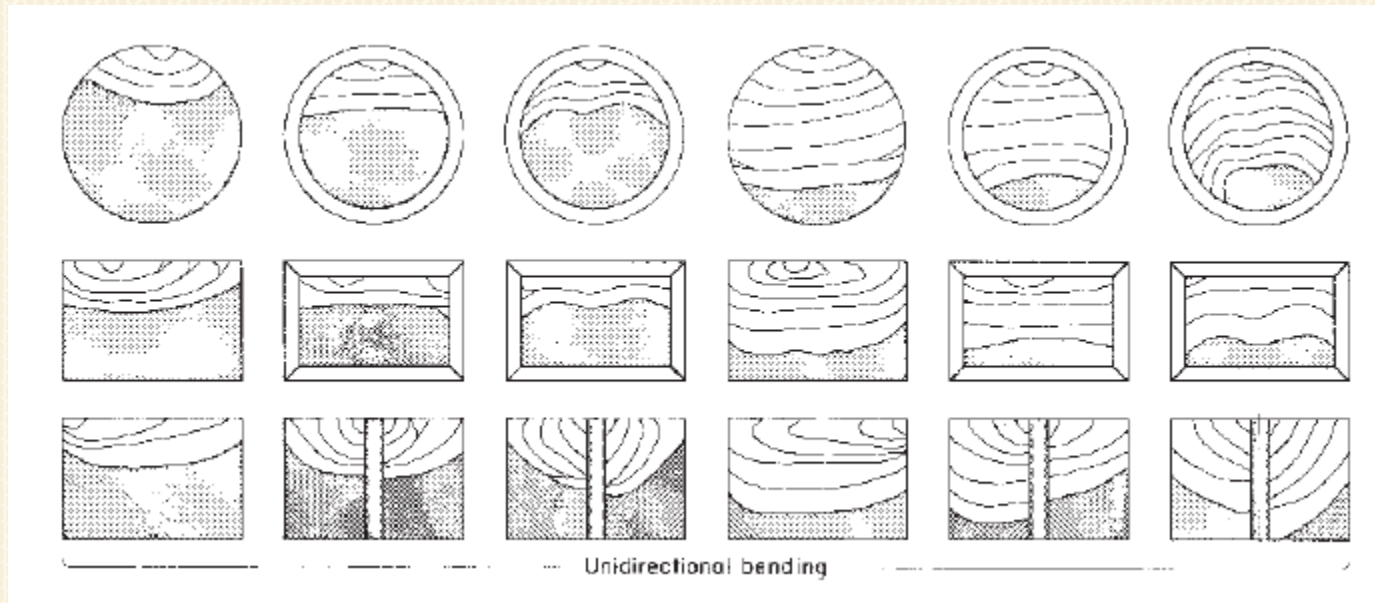
# MECANISMO DE FALLA POR FATIGA

**Figure 6-2**

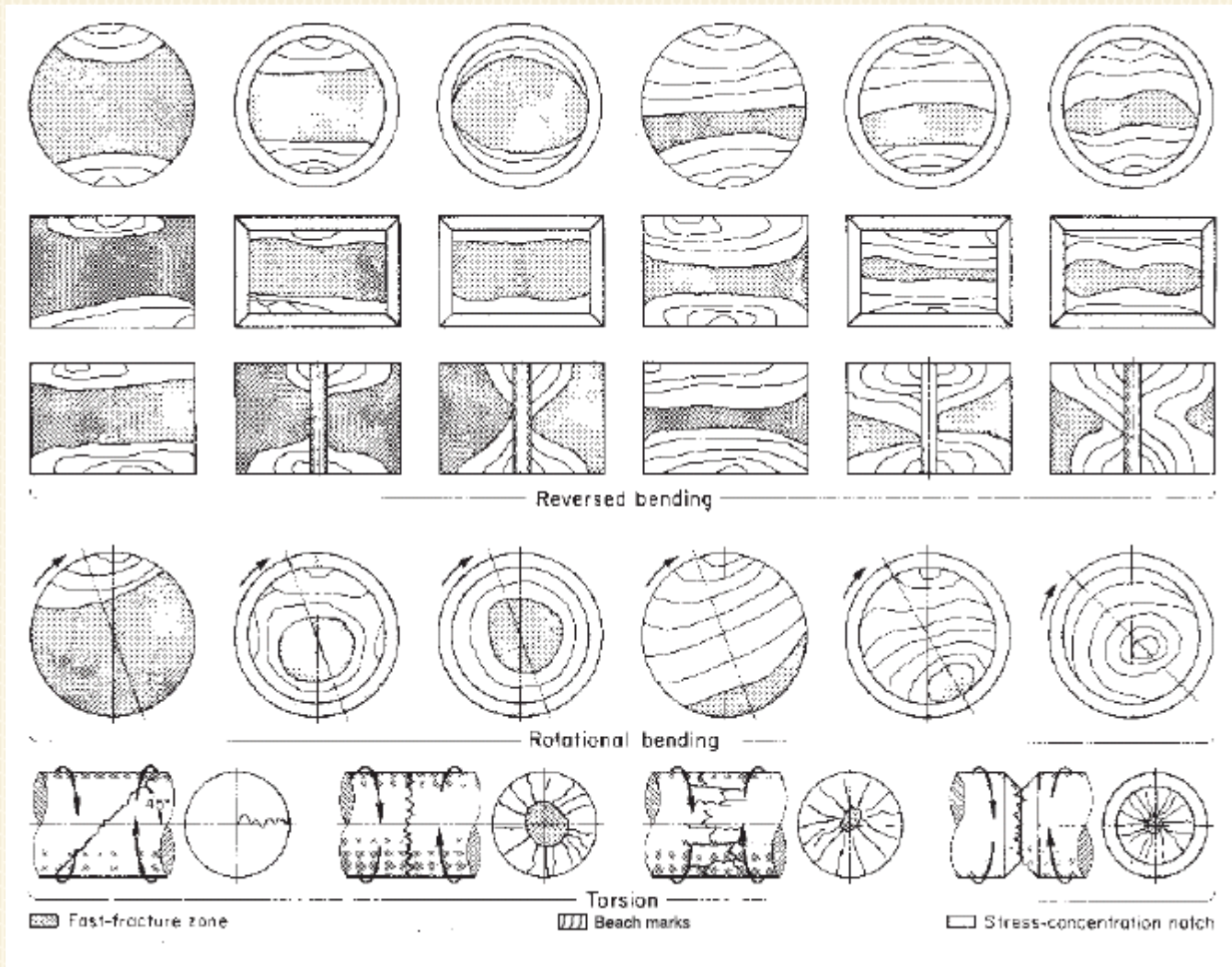
Schematics of fatigue fracture surfaces produced in smooth and notched components with round and rectangular cross sections under various loading conditions and nominal stress levels. (From *ASM Handbook, Vol. 11: Failure Analysis and Prevention, ASM International, Materials Park, OH 44073-0002, fig 18, p. 111. Reprinted by permission of ASM International®, www.asminternational.org.*)



# MECANISMO DE FALLA POR FATIGA



# MECANISMO DE FALLA POR FATIGA



# REGÍMENES DE FATIGA

---

- × **Fatiga de bajo ciclaje** (*Low Cycle Fatigue: LCF*)
  - $n_c < 10^2$  a  $10^4$  ( $n_c < \sim 10^3$ )
  - *Ejemplo: cargas pico que ocurren muy pocas veces*
- × **Fatiga de alto ciclaje** (*High Cycle Fatigue: HCF*)
  - $n_c > 10^2$  a  $10^4$  ( $n_c > \sim 10^3$ )
  - *Ejemplo: elementos rotativos como árboles y cigüeñales, bielas y resortes.*

# MODELOS DE FALLA POR FATIGA

## 1. Procedimiento vida-esfuerzo

- El más antiguo
- El que se estudia en este curso
- Adecuado para el **diseño** de piezas de HCF cuando la variación de los esfuerzos sea conocida y consistente → máquinas rotativas

## 2. **Método vida-deformación**

- Adecuado para LCF para predecir la **iniciación de grietas** (complejo → requiere de computador)

## 3. **Mecánica de fractura**

- Adecuado para predecir la vida LCF en la etapa de propagación de grietas → **predecir duración de elementos agrietados**

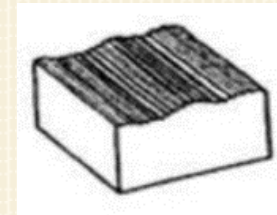


# MODELO VIDA-ESFUERZO

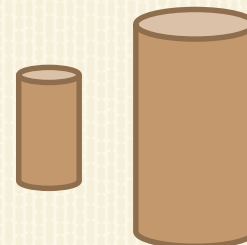
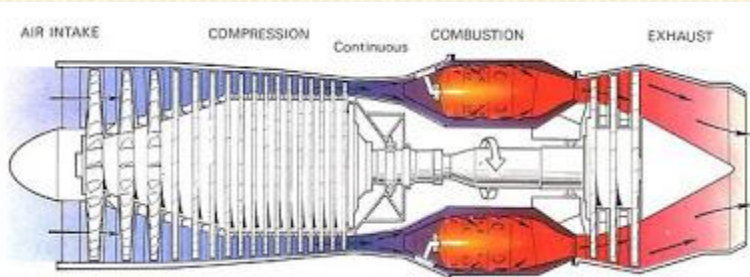
- ✘ Consiste en aplicar ecuaciones de diseño por fatiga basadas en resultados **experimentales**
- ✘ Se tienen en cuenta las siguientes **propiedades**: el límite de fatiga o resistencia a la fatiga y la resistencia de fluencia o esfuerzo último
- ✘ **Factores que indican en la resistencia a la fatiga**
  - + Estado superficial, tamaño, temperatura, medio circundante, esfuerzos residuales, tratamientos superficiales, etc.

$$\frac{1}{N} = K_f \left( \frac{S_m}{S_u} + \frac{S_a}{S_n} \right)$$

$$S_e', S_n, S_u, S_y$$



<http://es.slideshare.net/dayana0410/acabados-superficiales-exposicion-de-dibujo>



<http://www.taringa.net/post/offtopic/14924802/Como-funciona-un-motor-a-reaccion-aviones.html>

<https://como-evitar.net/la-corrosion/>

# RESUMEN

---

- × Introducción:
  - + **Fatiga** es la **falla** de un material sometido a **cargas variables**, después de cierto **número de ciclos de carga**
  - + Se presenta en elementos rotativos, resortes, tornillos, aeronaves, vehículos...
- × Historia:
  - + Experimentos de flexión giratoria de Wöhler (en 1971) – límite de fatiga
  - + Accidentes de trenes, aviones, puentes, máquinas
- × Mecanismo de falla: iniciación, crecimiento lento y fractura súbita
- × Regímenes de fatiga:
  - + Fatiga de bajo ciclaje (LCF) (hasta  $10^3$  ciclos)
  - + Fatiga de alto ciclaje (LCF) (más de  $10^3$  ciclos)
- × Modelos de falla por fatiga:
  - + Vida-esfuerzo
  - + Vida-deformación
  - + Mecánica de fractura