

# **Teorías de falla bajo condiciones de carga fluctuante: Fatiga**

**Carlos Galeano**, Dr. rer. nat.

Departamento de Ingeniería Mecánica y Mecatrónica  
Universidad Nacional de Colombia



UNIVERSIDAD  
**NACIONAL**  
DE COLOMBIA  
SEDE BOGOTÁ  
FACULTAD DE INGENIERÍA

# Fatiga

La fatiga se define como la falla de un material asociada a la acción de una carga variable.

Las primeras observaciones sobre la falla por fatiga se dan a ***principios del siglo XIX*** en los ejes de los vagones de ferrocarriles. Estos elementos exhibían fracturas de tipo frágil aún cuando estaban fabricados de materiales dúctiles.

En 1837 Jean-Victor ***Poncelet*** acuña el término fatiga para este tipo de falla. En 1843 William Macquorn ***Rankine*** publica un estudio de ruptura súbita de los rodamientos de los ejes de ferrocarriles.



# Fatiga

En 1870 el ingeniero alemán August **Wöhler** desarrolla durante 12 años el primer estudio científico formal sobre el fenómeno de fatiga.

El estudio consistió en someter ejes a cargas de **flexión rotativa**. Este trabajo permitió reportar la relación entre la falla y el número de ciclos de carga. Además se encontró que existía un valor límite de carga por debajo del cual los ejes no presentaban falla.

El **diagrama de esfuerzo-vida** (S-N) construido por Wöhler continua siendo una herramienta práctica para el análisis de este tipo de falla.



August Wöhler (22 June 1819 – 21 March 1914)

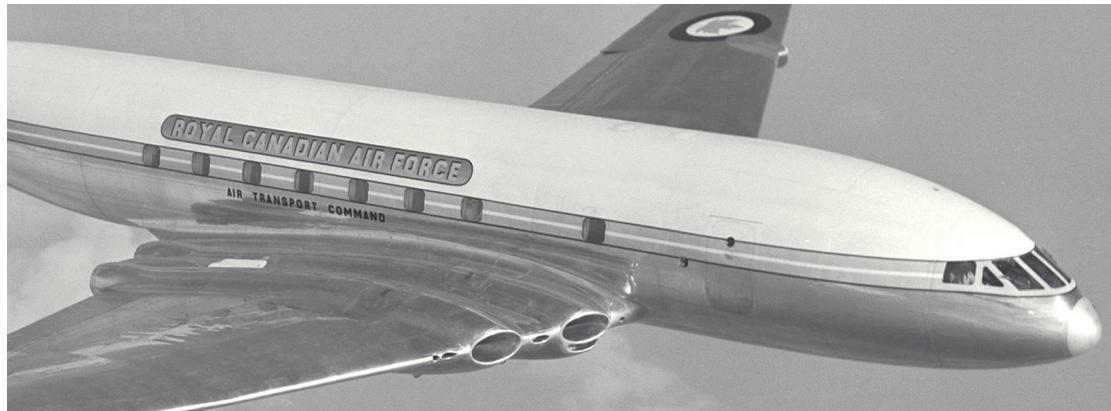
# Accidentes del *Havilland Comet*

El **COMET** es un avión de origen británico que en julio de 1949, tras su primer vuelo, se convirtió en el primer avión comercial a reacción. Además de su notable diseño aerodinámico y sus cuatro motores a reacción, contaba con una cabina presurizada y ventanas de gran tamaño.

Sin embargo, además de estos detalles, su trascendencia histórica en la aviación está enmarcada por eventos trágicos.



# Accidentes del *Havilland Comet*



- Calcutta, Mayo 1953. Ruta: Singapur - Londres.
- Elba, Enero 1954. Ruta: Singapur - Londres.
- Nápoles, Abril 1954. Ruta: Londres - Johannesburgo.



# Accidentes del *Havilland Comet*

Fragmento del fuselaje del Havilland Comet siniestrado el 10 de Enero de 1954.



Imagen tomada de:

[http://lessonslearned.faa.gov/ll\\_main.cfm?TabID=1&LLID=28&LLTypeID=2#null](http://lessonslearned.faa.gov/ll_main.cfm?TabID=1&LLID=28&LLTypeID=2#null)

# Accidentes del *Havilland Comet*

Reconstrucción de los restos del casco del G-ALYP, Elba.

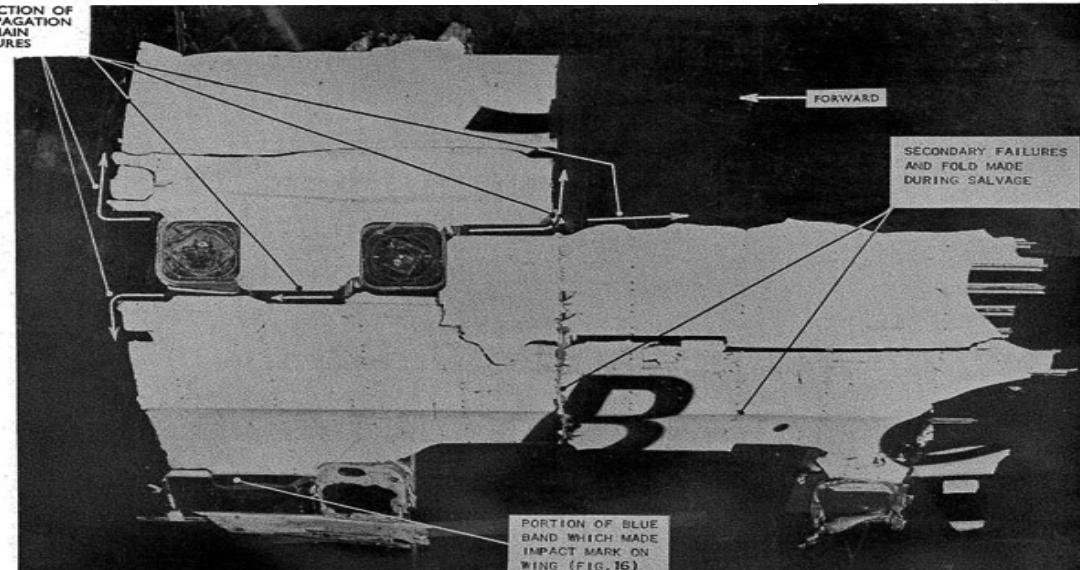
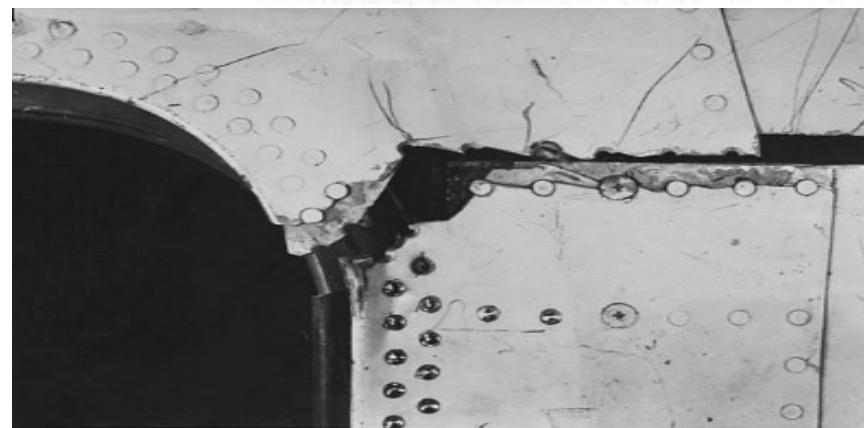


Imagen tomada de:

[http://lessonslearned.faa.gov/ll\\_main.cfm?TabID=1&LLID=28&LLTypeID=2#null](http://lessonslearned.faa.gov/ll_main.cfm?TabID=1&LLID=28&LLTypeID=2#null)

# Accidentes del *Havilland Comet*



Imagen tomada de:

[http://lessonslearned.faa.gov/ll\\_main.cfm?TabID=1&LLID=28&LLTypeID=2#null](http://lessonslearned.faa.gov/ll_main.cfm?TabID=1&LLID=28&LLTypeID=2#null)

# Accidente del Boeing 737 de Aloha airlines

Este Boeing 737 de la aerolínea Aloha Airlines, fue programado para cubrir la ruta entre Hilo y Honolulú (Hawaii) el 28 de abril de 1988, con 95 personas abordo.



Imagen tomada de:

<http://www.wingsnews.org/pilots-lan-ded-a-roofless-plane-aloha-airlines-light-243/>

Veinte minutos después de decolar, a una altura de crucero de 7200 m, sufre una decompresión explosiva.

# Accidente del Boeing 737 de Aloha airlines



Imagen tomada de:

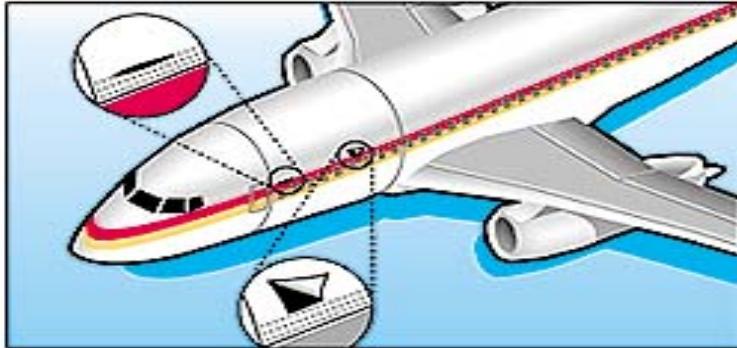
<http://www.wingsnews.org/pilots-landed-a-roofless-plane-aloha-airlines-flight-243/>

Alrededor de 13 min. después del incidente, el avión logra aterrizar en un aereopuesto cercano. Se reportó solo una víctima mortal.



# Accidente del Boeing 737 de Aloha airlines

1



2



3



Se encontró que el avión había cumplido alrededor de 91.000 vuelos cuando el diseño estimaba una vida útil de 75.000 vuelos.

Imagen tomada de:

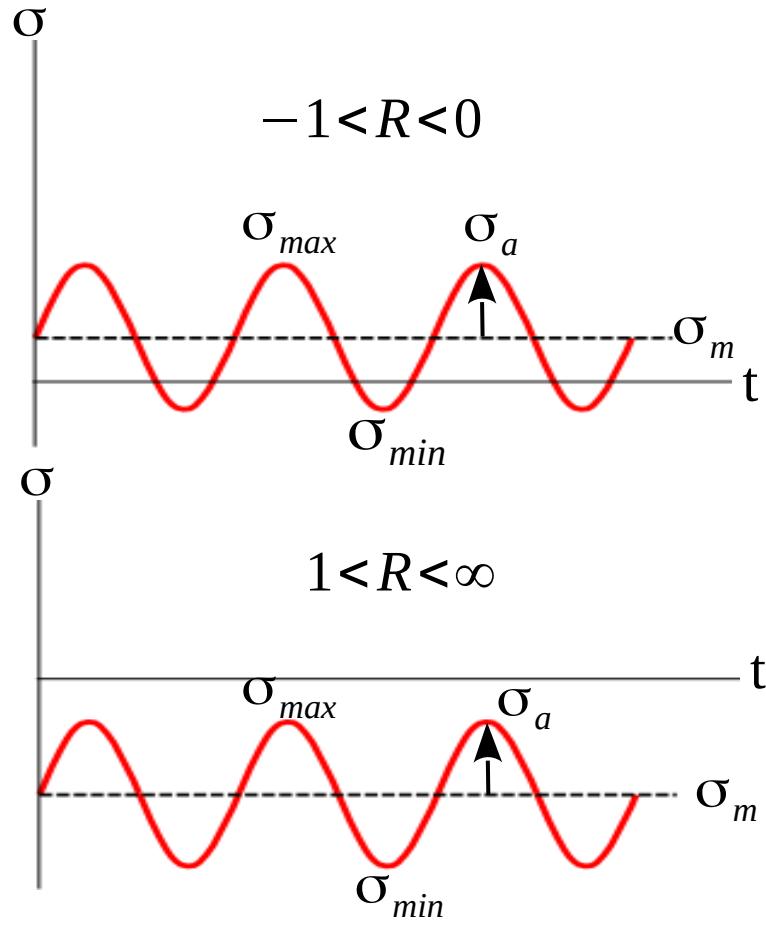
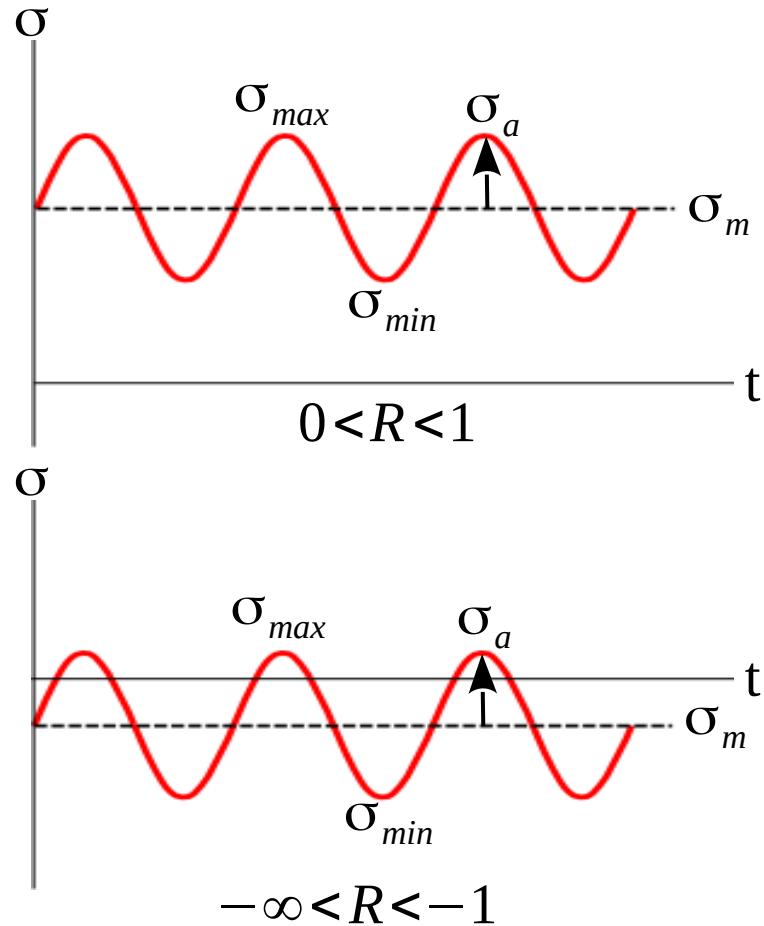
<http://www.wingsnews.org/pilots-landed-a-roofless-plane-aloha-airlines-flight-243/>

# Falla por fatiga



Video tomado de:  
<https://youtu.be/hASI6d3z3BM>

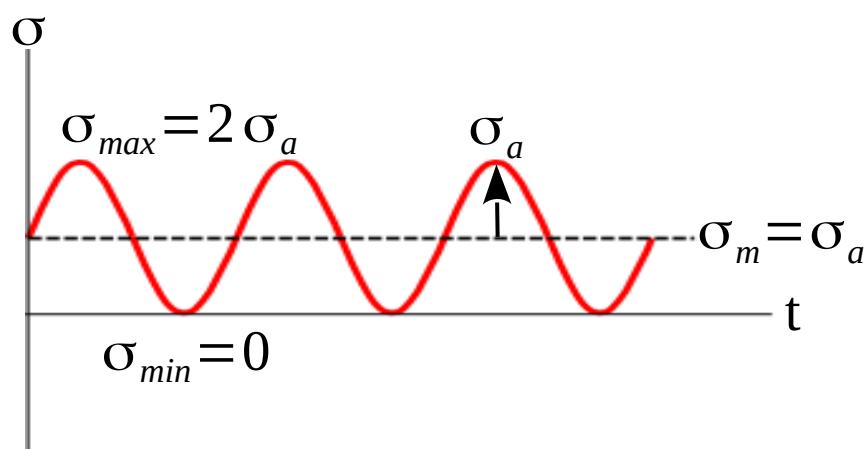
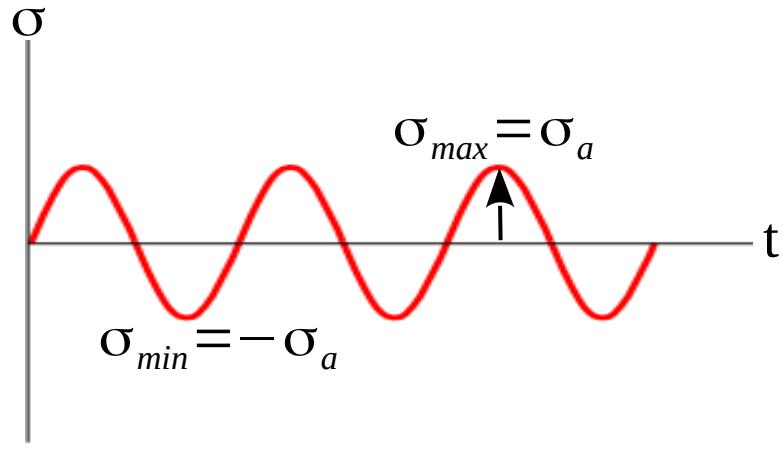
# Cargas fluctuantes



$$R = \frac{\sigma_{min}}{\sigma_{max}}$$

$$A = \frac{\sigma_a}{\sigma_m}$$

# Cargas alternantes y repetidas



$$\begin{aligned}\sigma_m &= 0 \\ R &= \frac{\sigma_{min}}{\sigma_{max}} = -1 \\ A &= \frac{\sigma_a}{\sigma_m} = \infty\end{aligned}$$

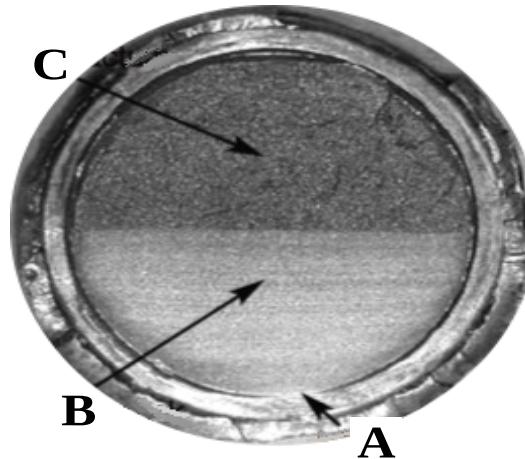
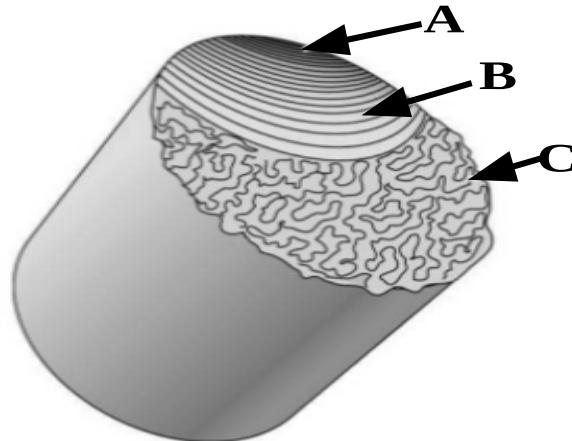
Carga alternante  
pura

$$\begin{aligned}R &= \frac{\sigma_{min}}{\sigma_{max}} = 0 \\ A &= \frac{\sigma_a}{\sigma_m} = 1\end{aligned}$$

Carga repetida

# Mecanismo de falla por fatiga

Falla por fatiga es un proceso de formación y propagación de grieta(s). La nucleación de la grieta (**A**) se produce generalmente en puntos de alta concentración de tensiones. Posteriormente la grieta se propaga por la acción de cargas de tensión (**B**), hasta que finalmente se produce una ruptura súbita por sobrecarga (**C**).



# Mecanismo de falla por fatiga

Los puntos de nucleación de grietas se generan por concentración de tensiones asociados a discontinuidades en el material.

Estas discontinuidades pueden ser microscópicas (inclusiones, segregaciones, precipitaciones de partículas duras, etc.) o macroscópicas (cuñeros, orificios, cambios de sección, defectos en la fabricación, etc.).



# Mecanismo de falla por fatiga

Falla de un perno debido a fatiga por flexión unidireccional. La falla se origina en **A**, se propaga por la región **B**, antes de una fractura rápida, evidenciada en la región **C**.

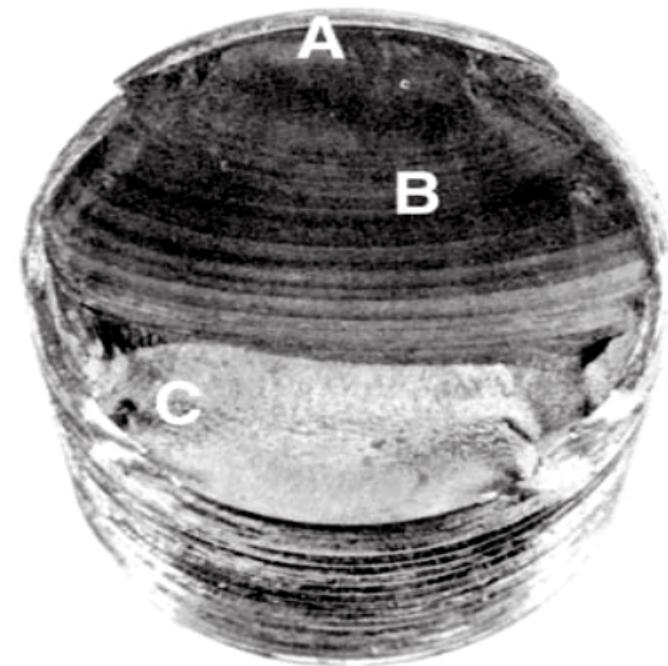


Imagen tomada de: ASM Handbook, Vol. 12:  
Fractography, 2nd printing, 1992, ASM International,  
Materials Park, OH 44073-0002, fig 50, p. 120.

# Mecanismo de falla por fatiga

Falla por fatiga de un eje de acero AISI 4320. La falla se origina en las esquinas del cuñero **B**, y progresó hasta la fractura final en **C**. La zona de ruptura final es pequeña, indicando que las cargas fueron bajas.



Imagen tomada de: ASM Handbook, Vol. 12:  
Fractography, 2nd printing, 1992, ASM International,  
Materials Park, OH 44073-0002, fig 51, p. 120.

# Mecanismo de falla por fatiga

Ejemplo de falla por fatiga en un acero aleado. Se observa que la grieta inicial se forma en una zona cercana al centro de la sección transversal. El crecimiento se produce simétricamente, debido a la carga de tensión, hasta la falla súbita evidenciada por una zona de fractura frágil.

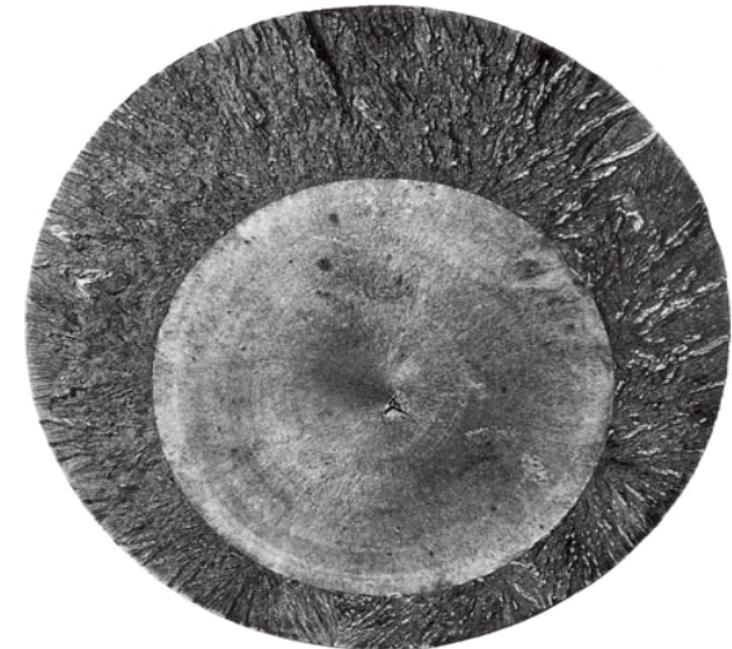


Imagen tomada de: ASM Handbook, Vol. 12:  
Fractography, 2nd printing, 1992, ASM International,  
Materials Park, OH 44073-0002, fig 570, p. 342.

# Mecanismo de falla por fatiga

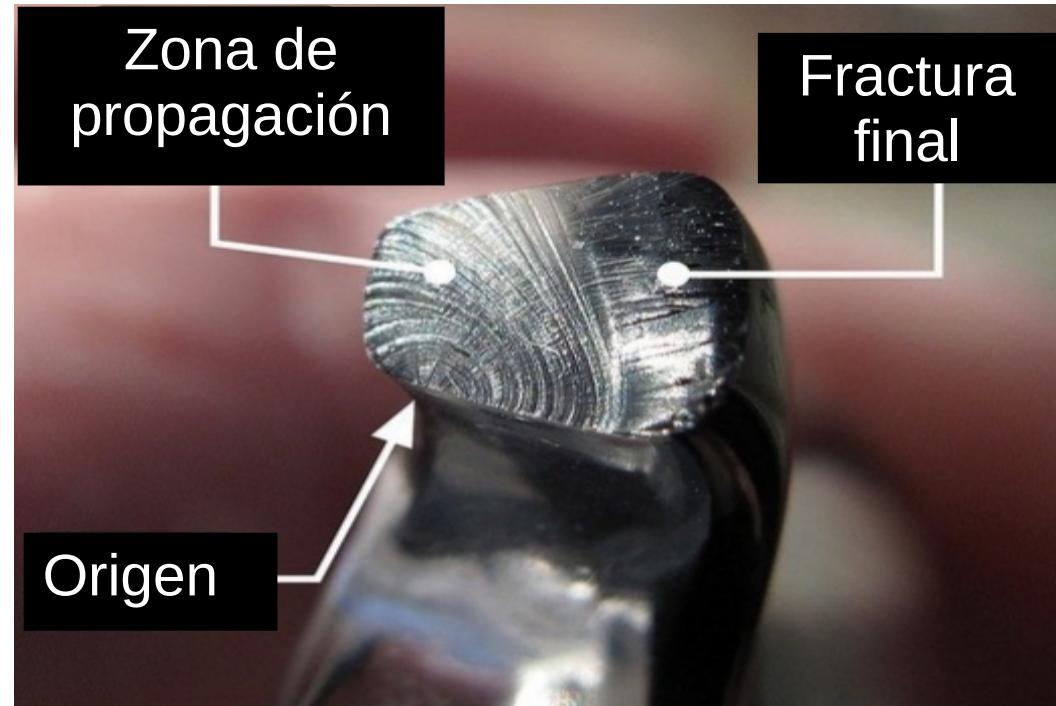
Falla por fatiga en una biela forjada hecha de acero AISI 8640. La grieta por fatiga se inicia en la borde superior. La grieta se propaga alrededor del agujero de lubricación. Se distingue también la zona de falla final. Observe el pronunciado labio en la fractura final a la derecha.



Imagen tomada de: ASM Handbook, Vol. 12: Fractography, 2nd printing, 1992, ASM International, Materials Park, OH 44073-0002, fig 523, p. 332.

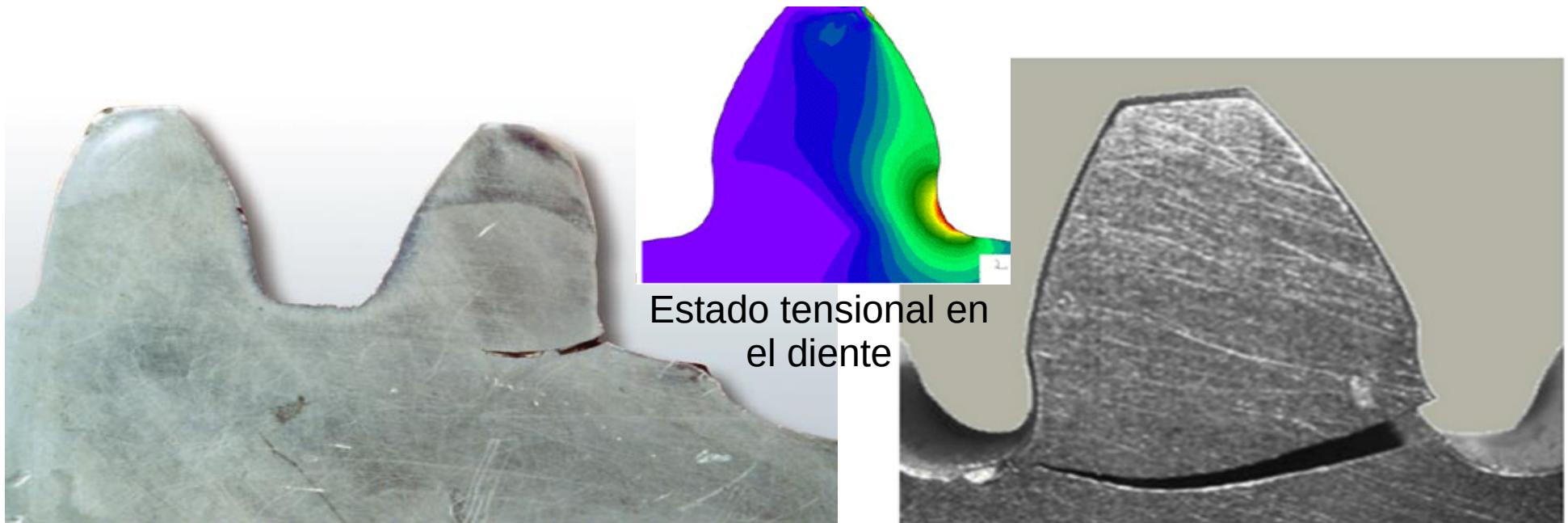
# Mecanismo de falla por fatiga

Falla por fatiga en un gancho. Se observa que la grieta se origina en la zona interna del gancho, la cual está cargada a tensión.

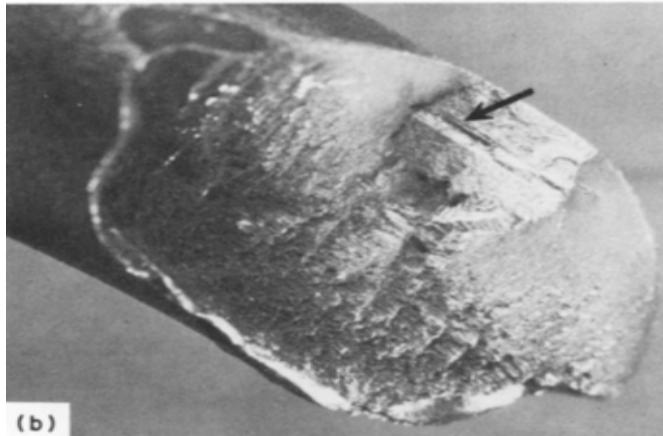
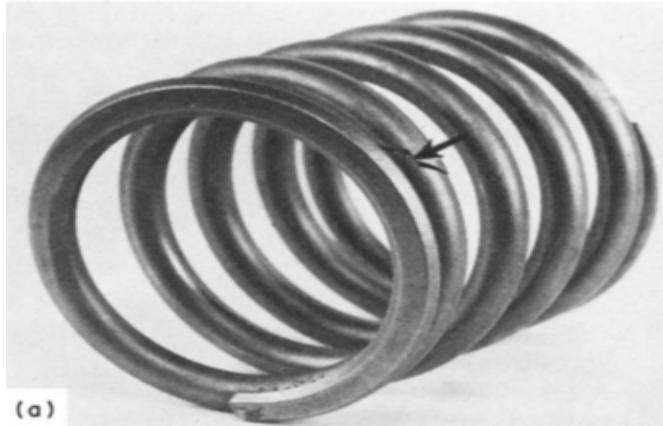


# Mecanismo de falla por fatiga

Falla por fatiga volumétrica en los dientes de un engrane recto. Nótese que el inicio de la grieta se produce en la base del diente, en la zona del filete.



# Mecanismo de falla por fatiga

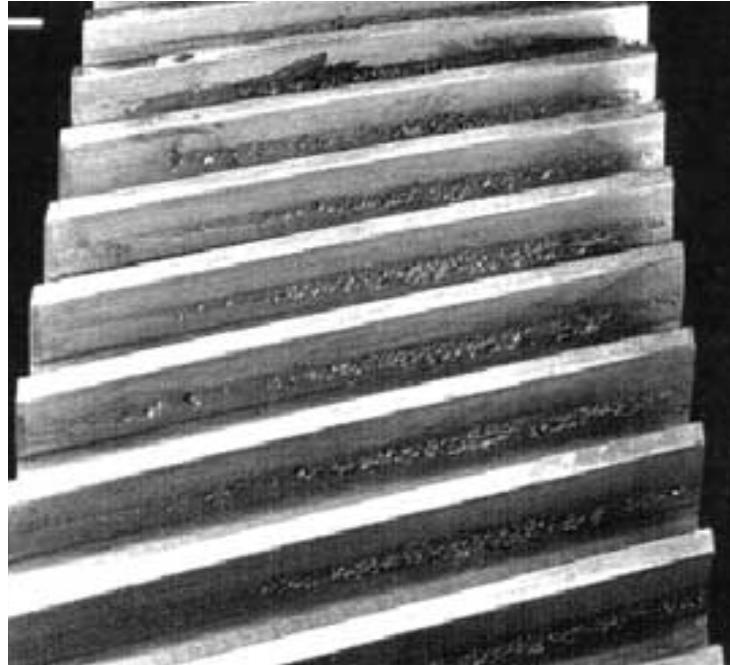


Falla por fatiga en resorte helicoidal.



# Fatiga superficial

La fatiga superficial, o *pitting*, es una falla asociada a los esfuerzos de contacto, también llamados esfuerzos de Hertz.



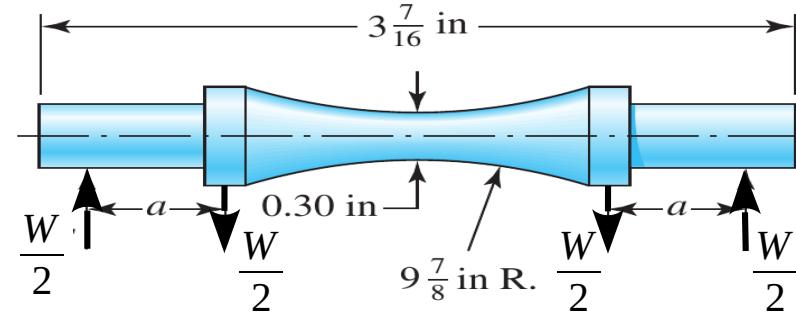
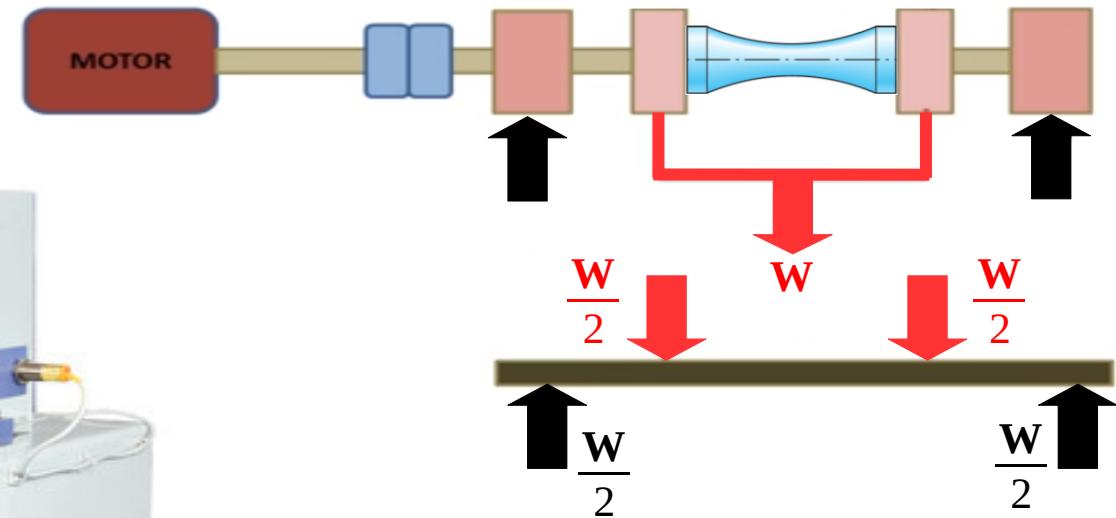
# Medición de la resistencia a la fatiga de los materiales

Máquina de flexión rotativa de Moore.



Imagen tomada de:

<https://www.indiamart.com/proddetail/digital-fatigue-testing-machine-14173931562.html>



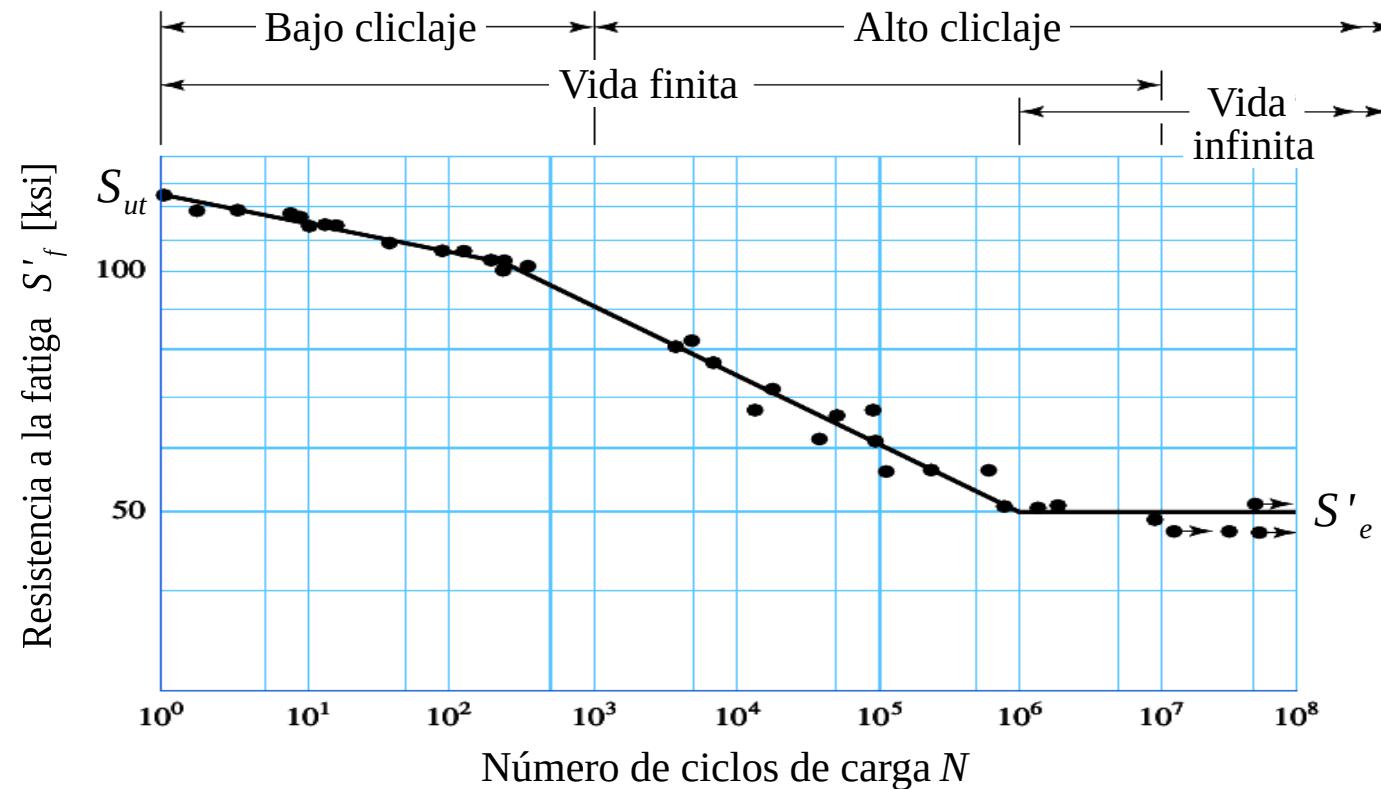
# Medición de la resistencia a la fatiga de los materiales



Video tomado de: <https://www.youtube.com/watch?v=93I6Wk7GZhI>

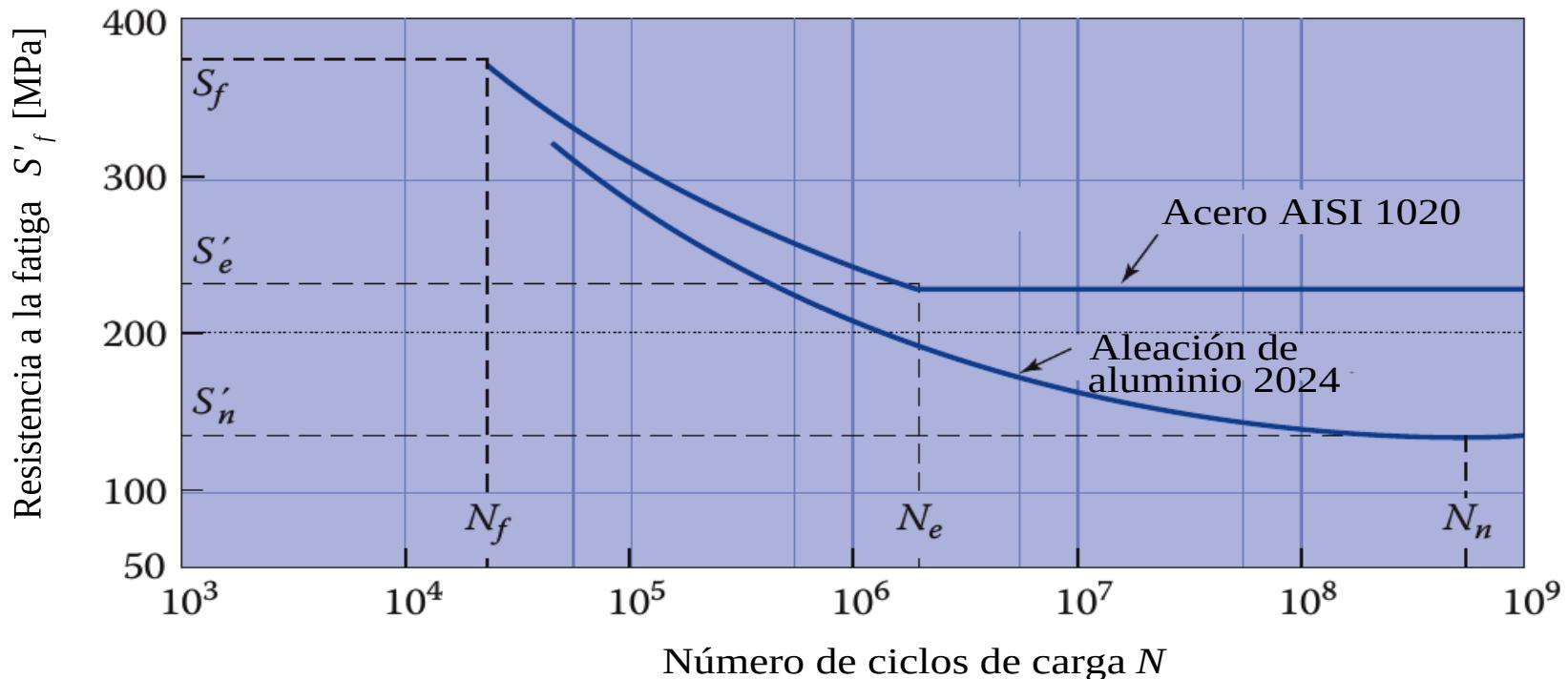
# Medición de la resistencia a la fatiga de los materiales

Diagrama esfuerzo-vida para un acero 4130 con  $S_{ut}=125$  ksi.



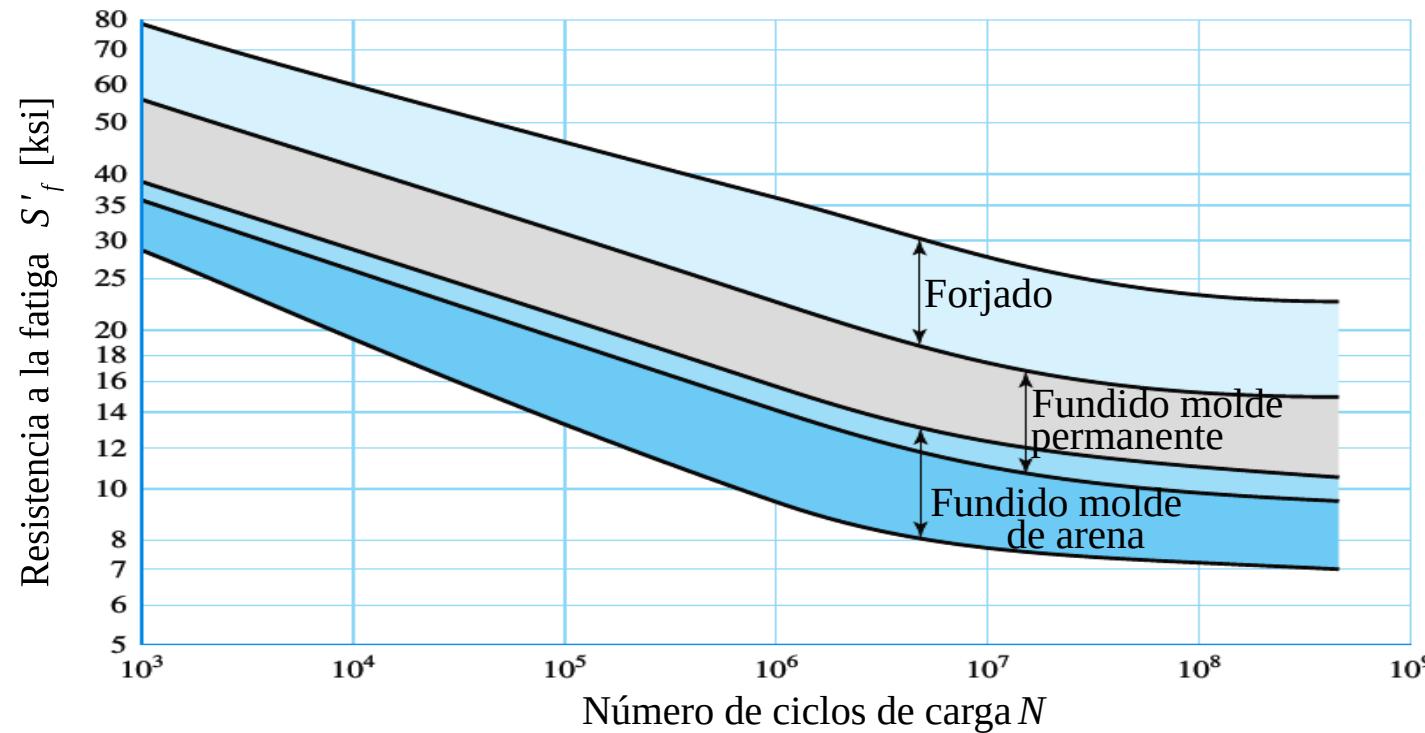
# Medición de la resistencia a la fatiga de los materiales

Comparación resistencia a la fatiga de un acero AISI 1020 y una aleación de aluminio 2024.



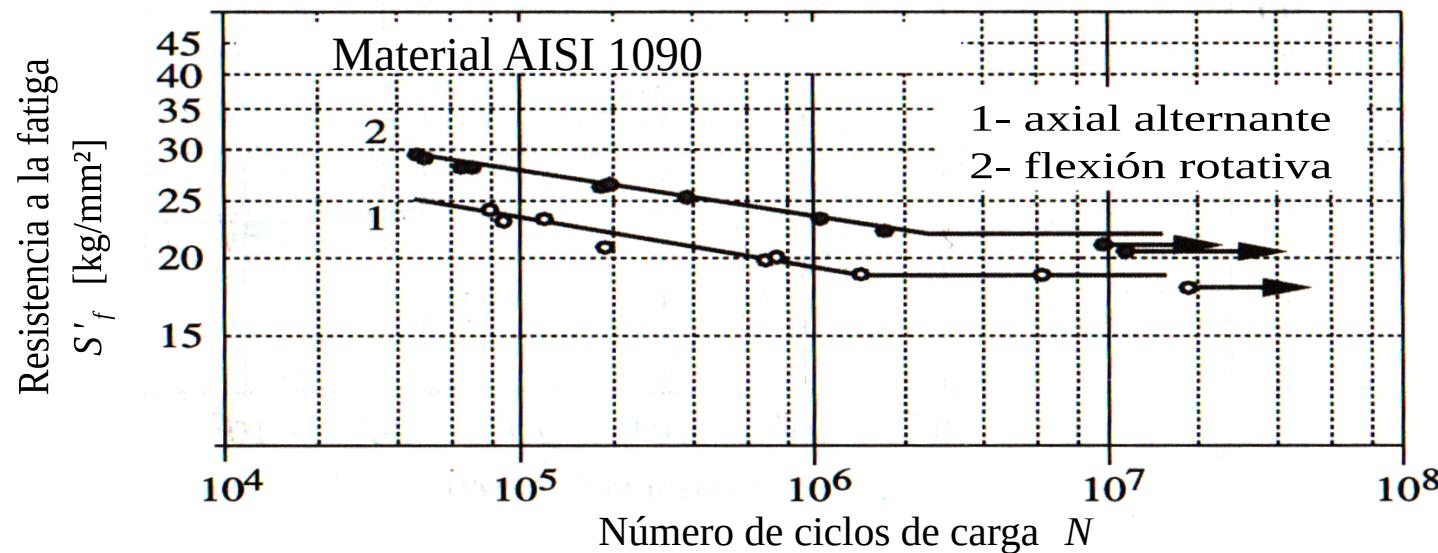
# Medición de la resistencia a la fatiga de los materiales

Bandas de comportamiento de las gráficas de esfuerzo-vida ( $S-N$ ) para algunas aleaciones de aluminio.



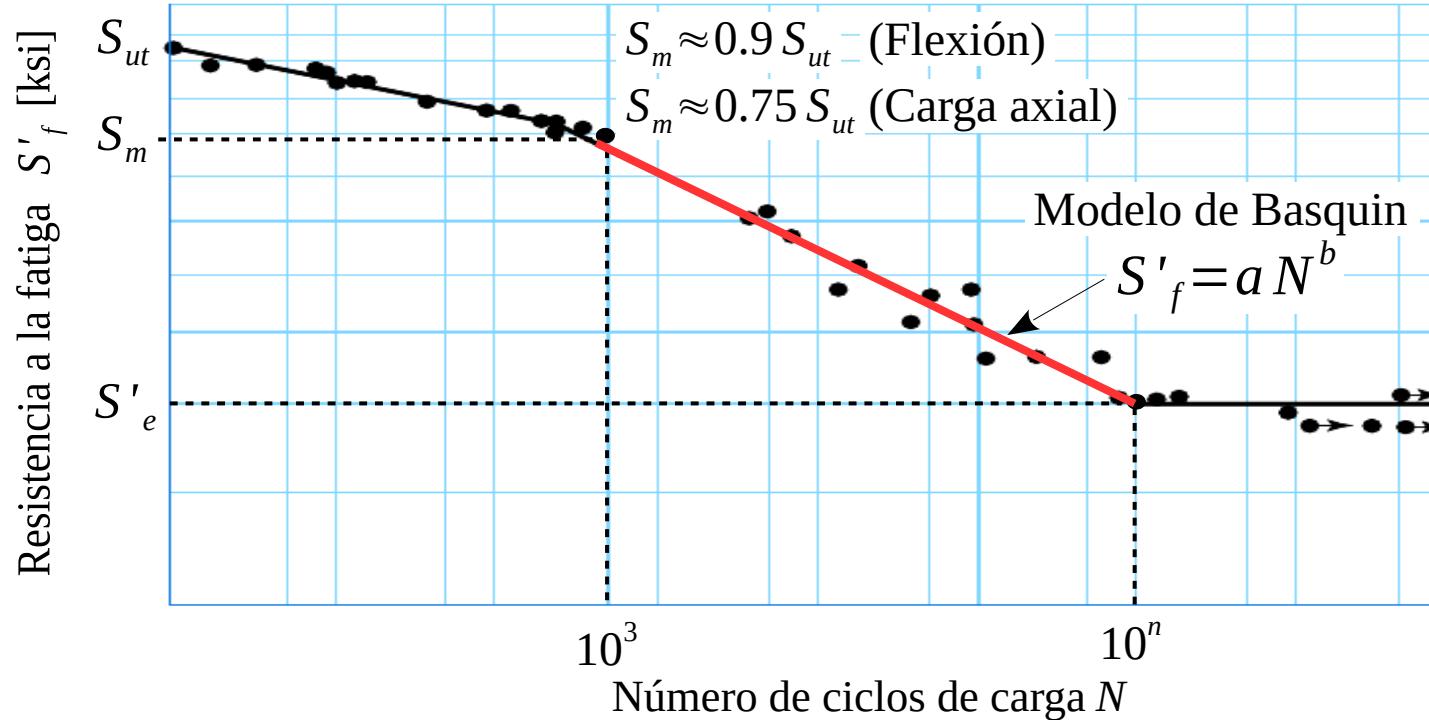
# Medición de la resistencia a la fatiga de los materiales

La naturaleza de la carga empleada en la prueba de fatiga puede influir en los resultados reportados por la misma. Por ejemplo, para el caso de cargas totalmente alternantes, pruebas a flexión y tracción reportan estos valores.



# Medición de la resistencia a la fatiga de los materiales

Ecuación de la curva esfuerzo vida para alto ciclaje:

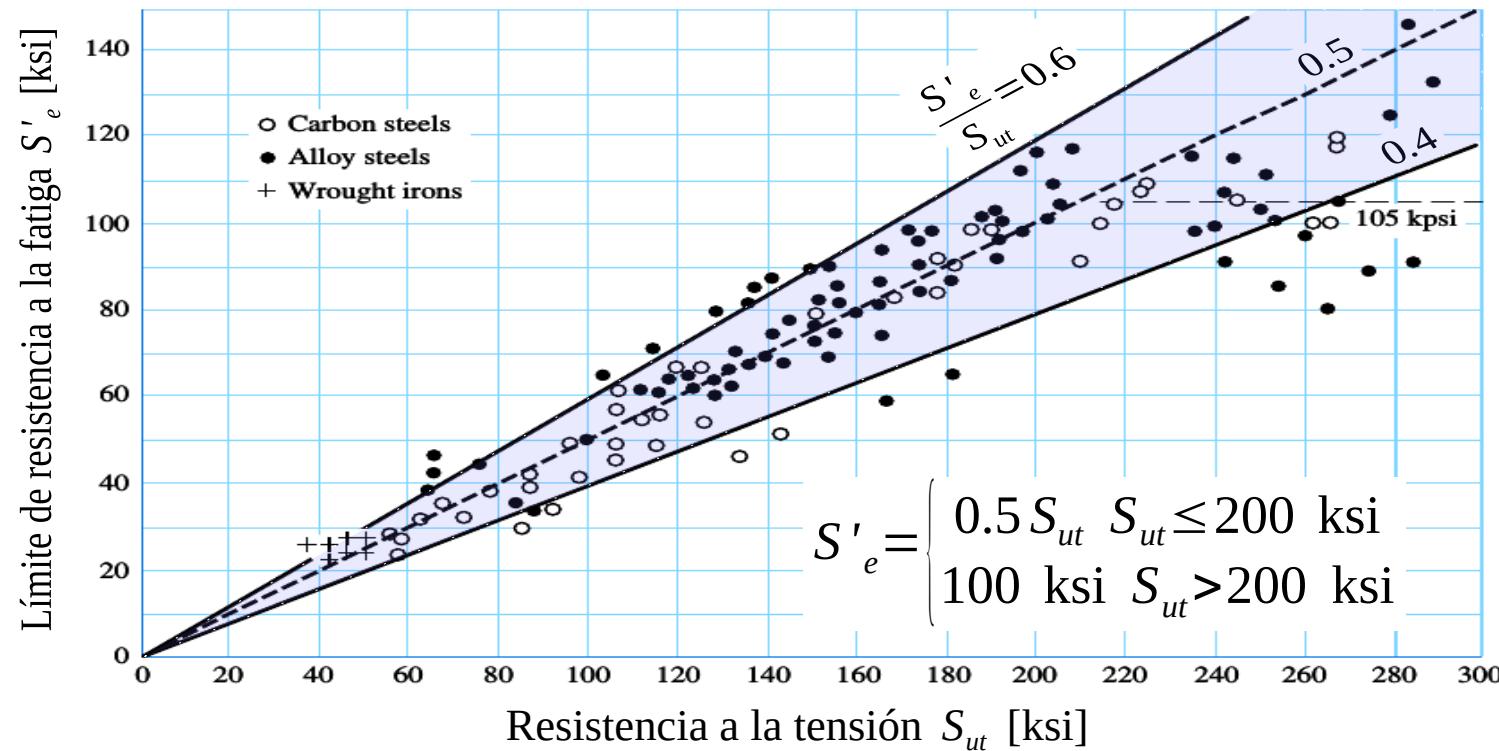


$$a = \left( \frac{S_m^n}{S'_e} \right)^{\frac{1}{n-3}}$$

$$b = \frac{1}{n-3} \log \left( \frac{S'_e}{S_m} \right)$$

# Medición de la resistencia a la fatiga de los materiales

Relación del esfuerzo último a la tensión y la resistencia a la fatiga para aceros.



# Medición de la resistencia a la fatiga de los materiales

Relación entre el esfuerzo último a la tensión y la resistencia a la fatiga (bajo carga alterna) para otros materiales:

Para aceros:

$$S'_e = \begin{cases} 0.5 S_{ut} & S_{ut} \leq 200 \text{ ksi (1400 MPa)} \\ 100 \text{ ksi (700 MPa)} & S_{ut} > 200 \text{ ksi} \end{cases}$$

Para hierros:

$$S'_e = \begin{cases} 0.4 S_{ut} & S_{ut} \leq 60 \text{ ksi (420 MPa)} \\ 24 \text{ ksi (170 MPa)} & S_{ut} > 60 \text{ ksi} \end{cases}$$

Para aluminios:

$$S'_{f(5E8)} = \begin{cases} 0.4 S_{ut} & S_{ut} \leq 48 \text{ ksi (340 MPa)} \\ 19 \text{ ksi (130 MPa)} & S_{ut} > 48 \text{ ksi} \end{cases}$$

Para aleaciones de cobre:

$$S'_{f(5E8)} = \begin{cases} 0.4 S_{ut} & S_{ut} \leq 40 \text{ ksi (280 MPa)} \\ 14 \text{ ksi (100 MPa)} & S_{ut} > 40 \text{ ksi} \end{cases}$$

# Medición de la resistencia a la fatiga de los materiales

Aunque la prueba estándar para fatiga es el ensayo de flexión rotativa, pruebas de fatiga con otras cargas totalmente alternantes han sido desarrolladas.

Bajo condición de **carga axial** totalmente alternante:

Para aceros:  $S'_{e} = 0.45 S_{ut}$

Bajo condición de **carga de torsión** totalmente alternante:

Para aceros:  $S'_{es} = 0.29 S_{ut}$

Para hierros:  $S'_{es} = 0.32 S_{ut}$

# Factores que modifican la resistencia a la fatiga

La resistencia a la fatiga, determinada a partir de la prueba estándar, se obtiene para unas condiciones específicas, las cuales normalmente no corresponden con las situaciones de trabajo propias de un elemento mecánico.

$$S_e = C_a \cdot C_b \cdot C_c \cdot C_d \cdot C_e \cdot C_f \cdot S'_e$$

Factores de Marin

$C_a$ : Factor de corrección por acabado superficial.

$C_b$ : Factor de corrección por tamaño.

$C_c$ : Factor de corrección por tipo de carga.

$C_d$ : Factor de corrección por temperatura.

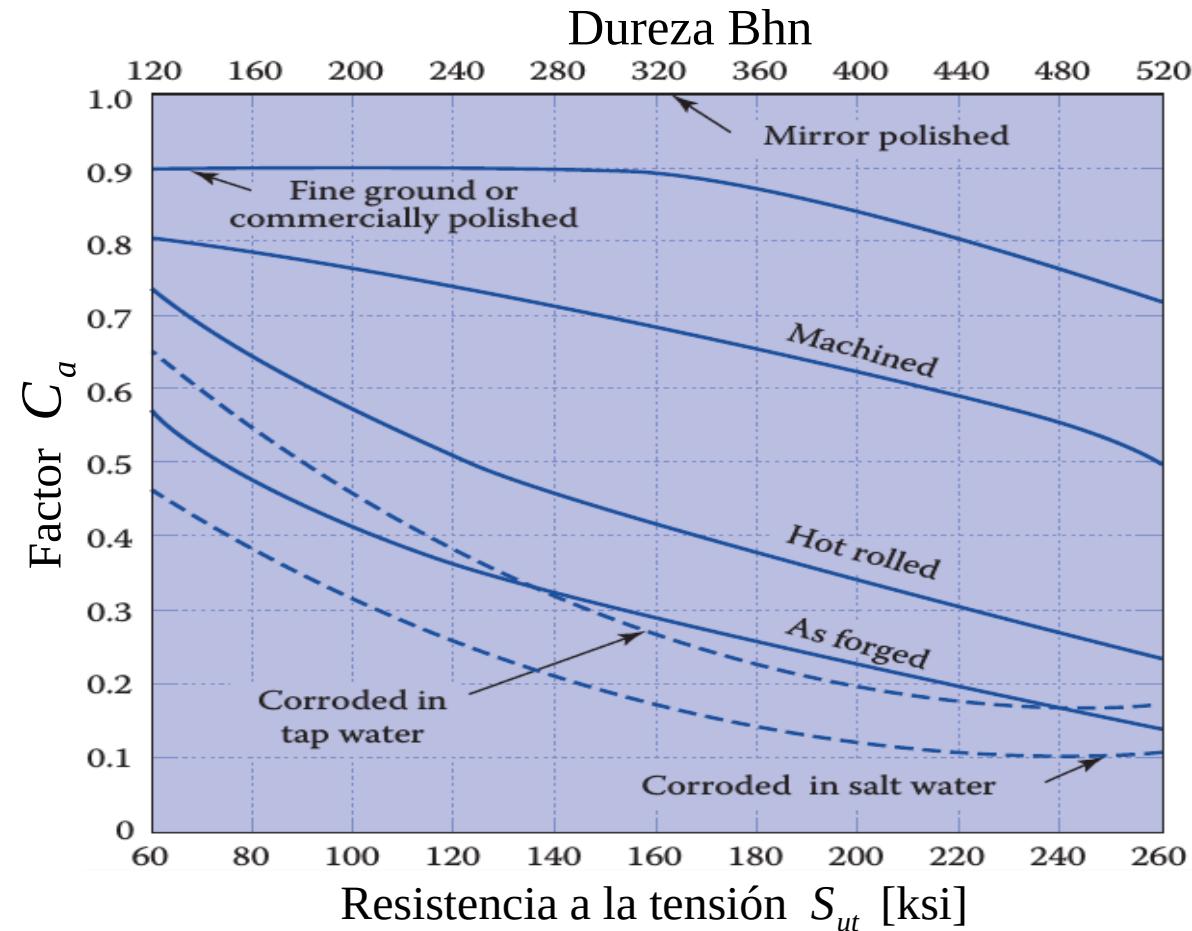
$C_e$ : Factor de corrección por confiabilidad.

$C_f$ : Factor de corrección debido a efectos varios.

# Factores que modifican la resistencia a la fatiga ( $C_a$ )

Este factor considera el efecto del acabado superficial del elemento mecánico en su resistencia a la fatiga.

Como se mencionó la probeta de la prueba estándar de fatiga se pule a espejo, condición que no es compartida con el común de las aplicaciones mecánicas.



# Factores que modifican la resistencia a la fatiga ( $C_a$ )

Estas relaciones pueden ser expresadas analíticamente a través de la expresión:

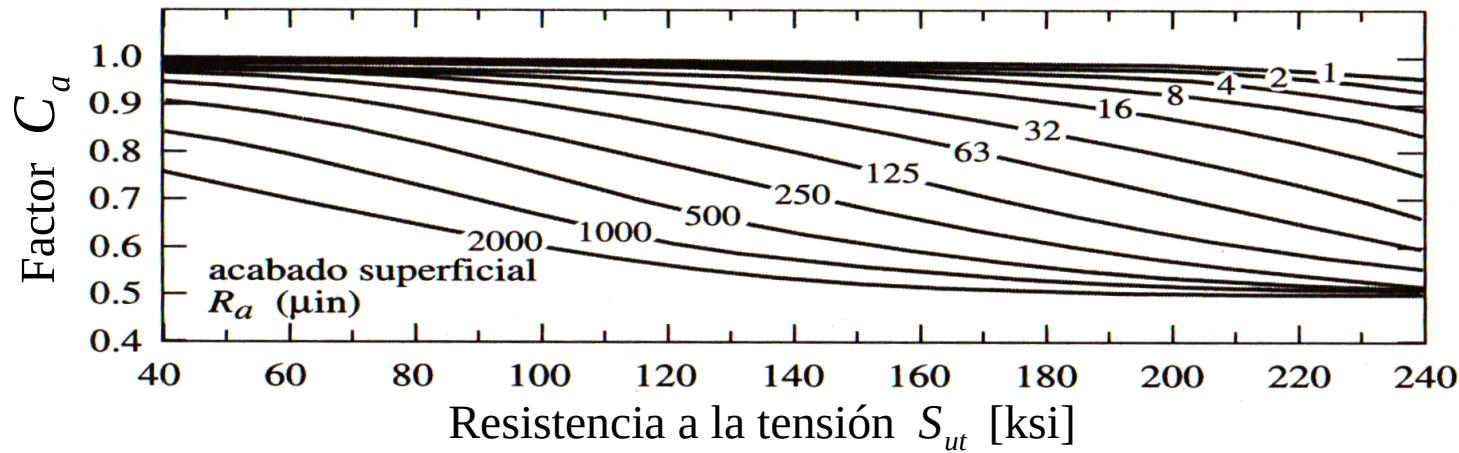
$$C_a = a S_{ut}^b$$

donde los coeficientes de ajuste están dados en la siguiente tabla, de acuerdo al tipo de acabado superficial:

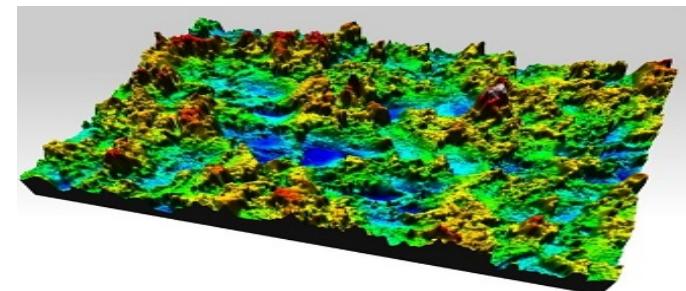
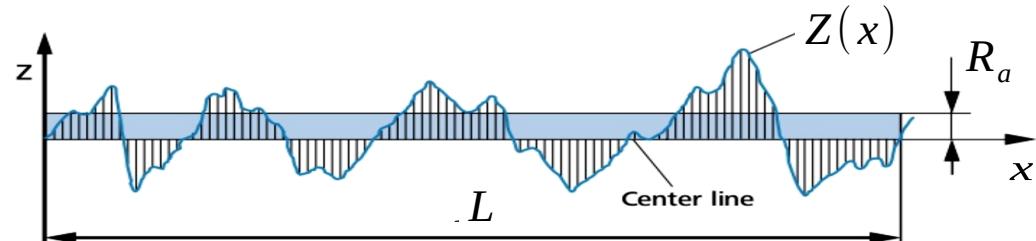
Acabado superficial	Factor $a$		Exponente
	$S_{ut}$ , kpsi	$S_{ut}$ , MPa	$b$
Rectificado	1.34	1.58	-0.085
Maquinado o estirado en frío	2.70	4.51	-0.265
Rolado en caliente	14.4	57.7	-0.718
Forjado	39.9	272.	-0.995

# Factores que modifican la resistencia a la fatiga ( $C_a$ )

Evidentemente, este factor también puede ser relacionado con la rugosidad superficial del elemento mecánico.

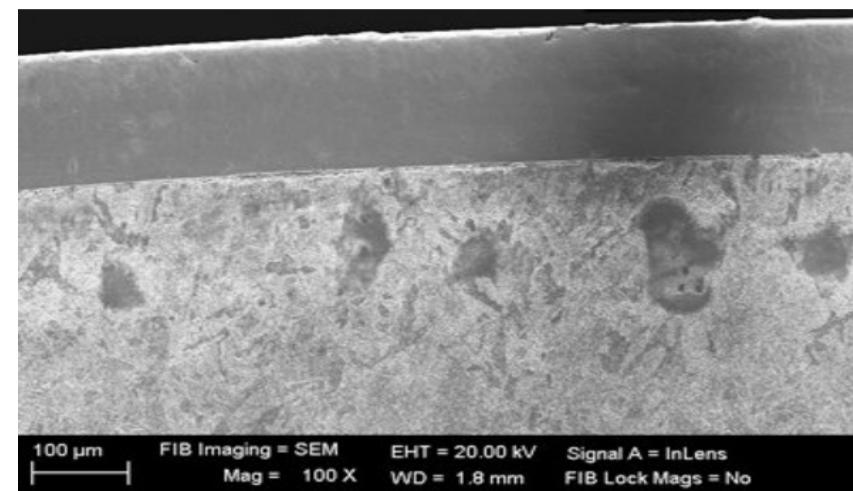
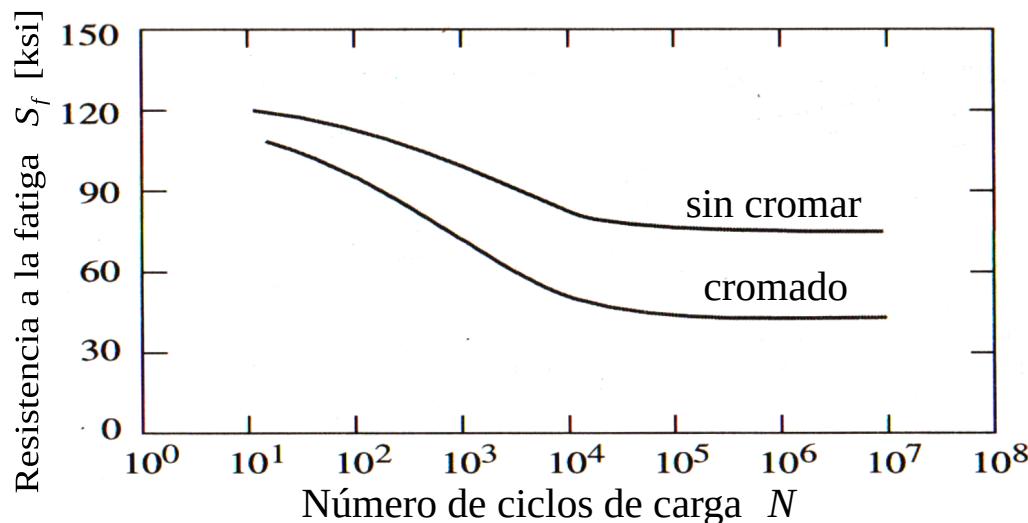


$$R_a = \frac{1}{L} \int_0^L |(Z(x))| dx$$



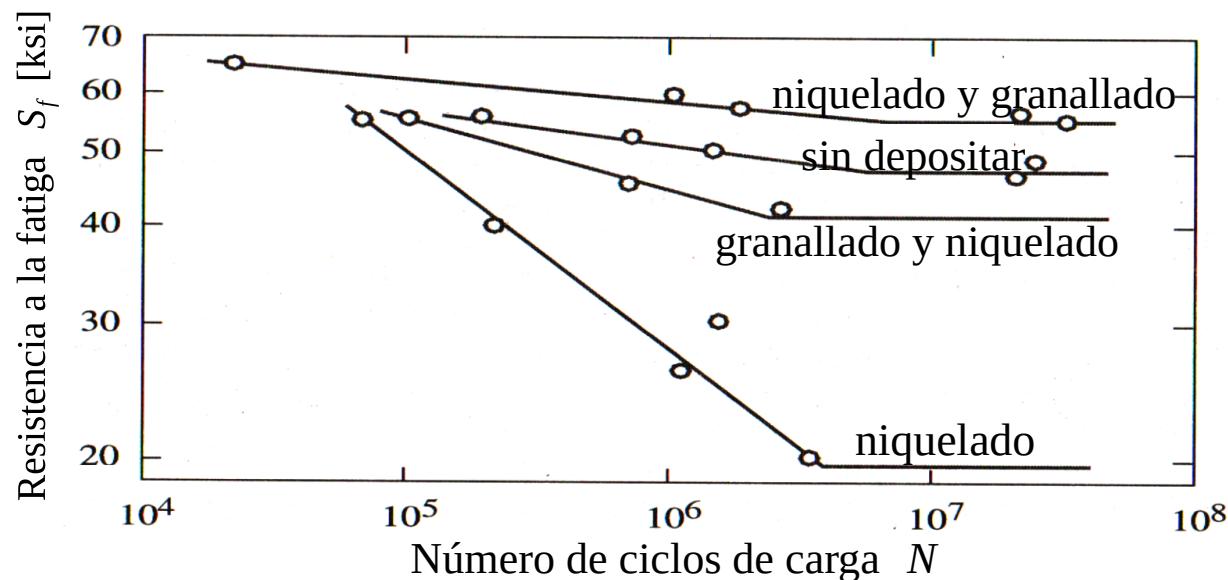
# Factores que modifican la resistencia a la fatiga ( $C_a$ )

Los electrodepositos usando ciertos metales pueden reducir la resistencia a la fatiga. Si bien electrodepositos de metales blandos (cadmio, cobre, zinc, plomo estaño) no afectan seriamente dicha resistencia, el cromado y el niquelado si reducen notablemente este valor.



# Factores que modifican la resistencia a la fatiga ( $C_a$ )

Dadas ciertas condiciones ambientales agresivas que requieran el uso de este tipo de electrodepositos, entonces el uso de tratamientos de granallado pueden ayudar a recuperar los valores de resistencia a la fatiga.



# Factor de corrección por tamaño ( $C_b$ )

Considerando que la probabilidad de la nucleación de una grieta aumenta en la medida que el volumen del elemento mecánico es mayor, entonces es de esperar que la resistencia a la fatiga se afecte por las dimensiones del elemento.

Así, para el caso de elementos con sección circular a flexión rotativa y torsión alternante, el factor de corrección por tamaño a emplear, está dado por:

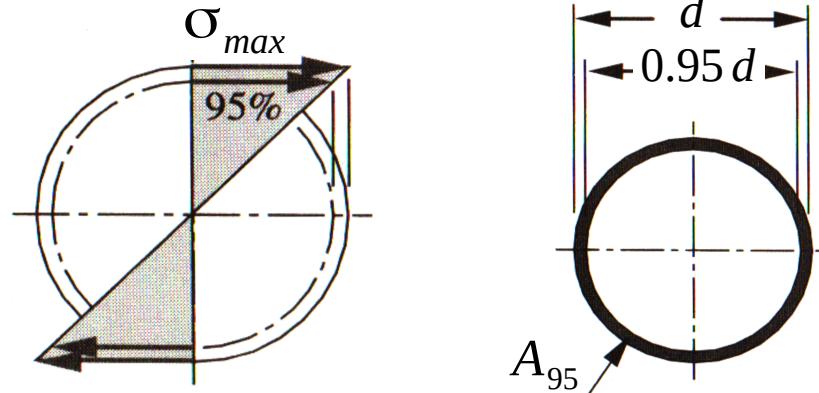
$$C_b = \begin{cases} 1 & d < 0.3 \text{ in} \\ 0.879 d^{-0.107} & 0.3 \leq d \leq 2 \text{ in} \\ 0.91 d^{-0.157} & 2 < d \leq 10 \text{ in} \\ 1.24 d^{-0.107} & 7.62 \leq d \leq 51 \text{ mm} \\ 1.51 d^{-0.157} & 51 < d \leq 254 \text{ mm} \end{cases}$$

Para el caso de carga axial se usa  $C_b = 1$ .

# Factor de corrección por tamaño ( $C_b$ )

Para los casos en los cuales el elemento a flexión rotativa no sea circular, se plantea calcular un *diámetro equivalente* usando como criterio el área más esforzada.

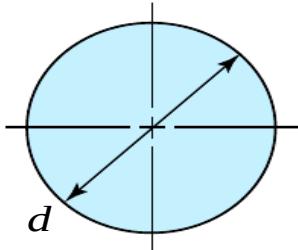
Entonces, considerando un elemento de sección circular a flexión rotativa, el área que soporta esfuerzos iguales o superiores al 95% del esfuerzo máximo está definida como:



$$A_{95} = \pi \left[ \frac{d^2 - (0.95d)^2}{4} \right]$$

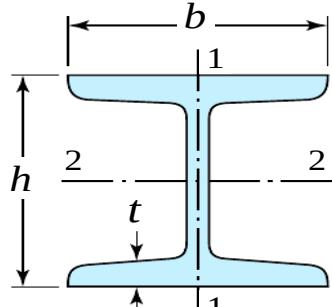
$$A_{95} = 0.0766 d^2$$

# Factor de corrección por tamaño ( $C_b$ )



no rotativo

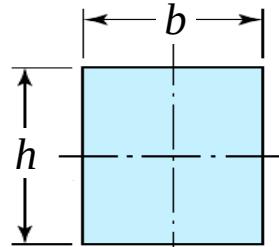
$$A_{95} = 0.010462 d^2$$



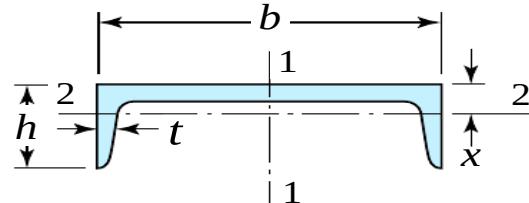
no rotativo

$$A_{95_{1-1}} = 0.10 bt$$

$$A_{95_{2-2}} = 0.05 bh, \quad t > 0.025 b$$



$$A_{95} = 0.05 bh$$



no rotativo

$$A_{95_{1-1}} = 0.05 bh, \quad t > 0.025 b$$

$$A_{95_{2-2}} = 0.05 bx + t(h-x)$$

Para casos de elementos no rotativos, un diámetro equivalente puede ser calculado usando la analogía del área más esforzada.

$$d_{eq} = \sqrt{\frac{A_{95}}{0.0766}}$$

# Factor de corrección por tipo de carga ( $C_c$ )

Como ya se mencionó, el tipo de carga tendrá un efecto en el valor de la resistencia a la fatiga del material.

Por ejemplo, la resistencia a la fatiga para pruebas de fatiga bajo carga axial alternaente es aproximadamente el 85% del valor de la resistencia a la fatiga reportada por el ensayo de flexión rotativa.

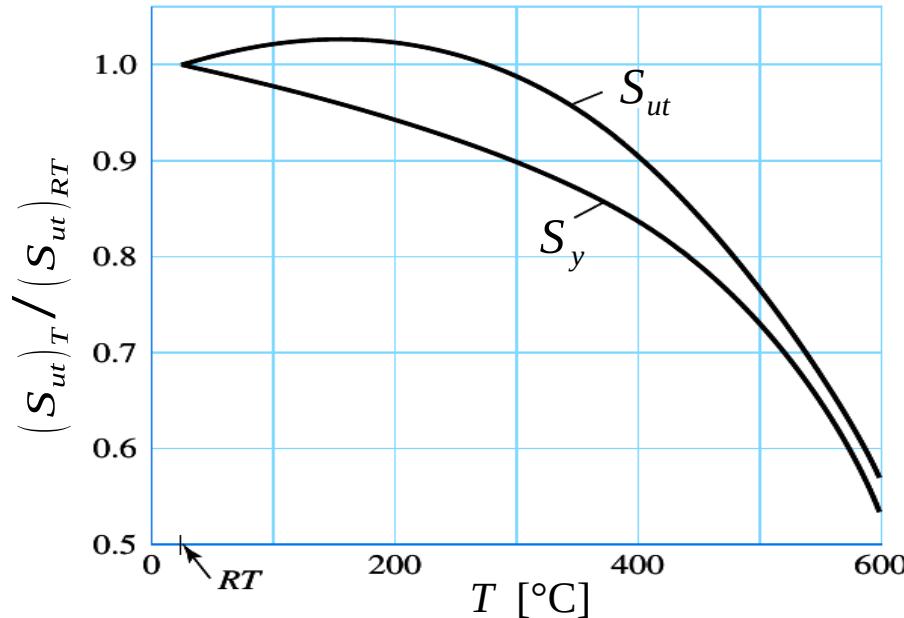
$$C_c = \begin{cases} 1 & \text{Flexión} \\ 0.85 & \text{Axial} \\ 0.59 \text{ ó } 1 & \text{Torsión} \\ 1 & \text{Carga combinada} \end{cases}$$

Para casos de carga combinada no se aplica este factor de corrección, pero el efecto de los esfuerzos mixtos se trata incorporando un esfuerzo equivalente.

# Factor de corrección por temperatura ( $C_d$ )

La prueba estándar a flexión rotativa se realiza a temperatura ambiente. Este factor considera los efectos de la temperatura de operación del elemento mecánico sobre la resistencia a la fatiga del material.

La resistencia a la fatiga en los aceros se reduce progresivamente a altas temperaturas. Para temperaturas ligeramente superiores a la ambiental, la resistencia a la fatiga de los aceros aumenta hasta alcanzar los 250 °C (480 °F).



# Factor de corrección por temperatura ( $C_d$ )

Efecto de la temperatura en el esfuerzo último a tensión en los aceros.

Temperatura [°C]	$(S_{ut})_T / (S_{ut})_{RT}$	Temperatura [°F]	$(S_{ut})_T / (S_{ut})_{RT}$
20	1.000	70	1.000
50	1.010	100	1.008
100	1.020	200	1.020
150	1.025	300	1.024
200	1.020	400	1.018
250	1.000	500	0.995
300	0.975	600	0.963
350	0.943	700	0.927
400	0.900	800	0.872
450	0.843	900	0.797
500	0.768	1000	0.698
550	0.672	1100	0.567
600	0.549		

$$C_d = 0.975 + 0.432 \times 10^{-3} T_F - 0.115 \times 10^{-5} T_F^2 + 0.104 \times 10^{-8} T_F^3 - 0.595 \times 10^{-12} T_F^4 \quad (70 \text{ F} \leq T_F \leq 1000 \text{ F})$$

# Factor de corrección por confiabilidad ( $C_e$ )

Se debe recordar la característica estocástica del fenómeno de fatiga. Existe una considerable dispersión de los resultados de resistencia a la fatiga obtenidos para un mismo material.

Se reporta que para los aceros, la desviación estándar de estos valores es inferior al 8%. Así, asumiendo que estos valores se ajustan a una **distribución normal**, la probabilidad de tener un valor de resistencia a la fatiga mayor o igual que  $C_e S'_e$  está dada por:

$$P(X \geq C_e S'_e) = P(Z \geq Z^*) \text{ con: } \left\{ \begin{array}{l} Z = \frac{X - \mu}{\sigma} \\ Z^* = \frac{C_e S'_e - S'_e}{0.08 S'_e} = \frac{C_e - 1}{0.08} \end{array} \right.$$

# Factor de corrección por confiabilidad ( $C_e$ )

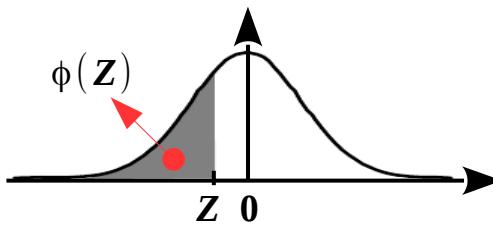
Así por ejemplo, para un valor  $C_e=0.8$ , la probabilidad correspondiente se puede calcular a partir de una tabla de valores de probabilidad acumulada para la distribución normal estándar, obteniendo:

$$P(X \geq 0.8S'_e) = P(Z \geq -2.5) = 99.38\%$$

De forma similar se calculan los valores para el coeficiente de confiabilidad presentados en la siguiente tabla.

Confiabilidad %	Factor $C_e$
50	1.000
90	0.897
95	0.868
99	0.814
99.9	0.753
99.99	0.702
99.999	0.659
99.9999	0.620

# Factor de corrección por confiabilidad ( $C_e$ )



Z	0	0.01	0.02	0.03	0.04	0.05	0.06	0.07	0.08	0.09
0.0	0.5000	0.5040	0.5080	0.5120	0.5160	0.5199	0.5239	0.5279	0.5319	0.5359
0.1	0.5398	0.5438	0.5478	0.5517	0.5557	0.5596	0.5636	0.5675	0.5714	0.5753
0.2	0.5793	0.5832	0.5871	0.5910	0.5948	0.5987	0.6026	0.6064	0.6103	0.6141
0.3	0.6179	0.6217	0.6255	0.6293	0.6331	0.6368	0.6406	0.6443	0.6480	0.6517
0.4	0.6554	0.6591	0.6628	0.6664	0.6700	0.6736	0.6772	0.6808	0.6844	0.6879
0.5	0.6915	0.6950	0.6985	0.7019	0.7054	0.7088	0.7123	0.7157	0.7190	0.7224
0.6	0.7257	0.7291	0.7324	0.7357	0.7389	0.7422	0.7454	0.7486	0.7517	0.7549
0.7	0.7580	0.7611	0.7642	0.7673	0.7704	0.7734	0.7764	0.7794	0.7823	0.7852
0.8	0.7881	0.7910	0.7939	0.7967	0.7995	0.8023	0.8051	0.8078	0.8106	0.8133
0.9	0.8159	0.8186	0.8212	0.8238	0.8264	0.8289	0.8315	0.8340	0.8365	0.8389
1	0.8413	0.8438	0.8461	0.8485	0.8508	0.8531	0.8554	0.8577	0.8599	0.8621
1.1	0.8643	0.8665	0.8686	0.8708	0.8729	0.8749	0.8770	0.8790	0.8810	0.8830
1.2	0.8849	0.8869	0.8888	0.8907	0.8925	0.8944	0.8962	0.8980	0.8997	0.9015
1.3	0.9032	0.9049	0.9066	0.9082	0.9099	0.9115	0.9131	0.9147	0.9162	0.9177
1.4	0.9192	0.9207	0.9222	0.9236	0.9251	0.9265	0.9279	0.9292	0.9306	0.9319
1.5	0.9332	0.9345	0.9357	0.9370	0.9382	0.9394	0.9406	0.9418	0.9429	0.9441
1.6	0.9452	0.9463	0.9474	0.9484	0.9495	0.9505	0.9515	0.9525	0.9535	0.9545
1.7	0.9554	0.9564	0.9573	0.9582	0.9591	0.9599	0.9608	0.9616	0.9625	0.9633
1.8	0.9641	0.9649	0.9656	0.9664	0.9671	0.9678	0.9686	0.9693	0.9699	0.9706
1.9	0.9713	0.9719	0.9726	0.9732	0.9738	0.9744	0.9750	0.9756	0.9761	0.9767
2	0.9772	0.9778	0.9783	0.9788	0.9793	0.9798	0.9803	0.9808	0.9812	0.9817
2.1	0.9821	0.9826	0.9830	0.9834	0.9838	0.9842	0.9846	0.9850	0.9854	0.9857
2.2	0.9861	0.9864	0.9868	0.9871	0.9875	0.9878	0.9881	0.9884	0.9887	0.9890
2.3	0.9893	0.9896	0.9898	0.9901	0.9904	0.9906	0.9909	0.9911	0.9913	0.9916
2.4	0.9918	0.9920	0.9922	0.9925	0.9927	0.9929	0.9931	0.9932	0.9934	0.9936
2.5	0.9938	0.9940	0.9941	0.9943	0.9945	0.9946	0.9948	0.9949	0.9951	0.9952
2.6	0.9953	0.9955	0.9956	0.9957	0.9959	0.9960	0.9961	0.9962	0.9963	0.9964
2.7	0.9965	0.9966	0.9967	0.9968	0.9969	0.9970	0.9971	0.9972	0.9973	0.9974
2.8	0.9974	0.9975	0.9976	0.9977	0.9977	0.9978	0.9979	0.9979	0.9980	0.9981
2.9	0.9981	0.9982	0.9982	0.9983	0.9984	0.9984	0.9985	0.9985	0.9986	0.9986
3	0.9987	0.9990	0.9993	0.9995	0.9997	0.9998	0.9998	0.9999	0.9999	1.0000

# Factor de corrección por efectos diversos ( $C_f$ )

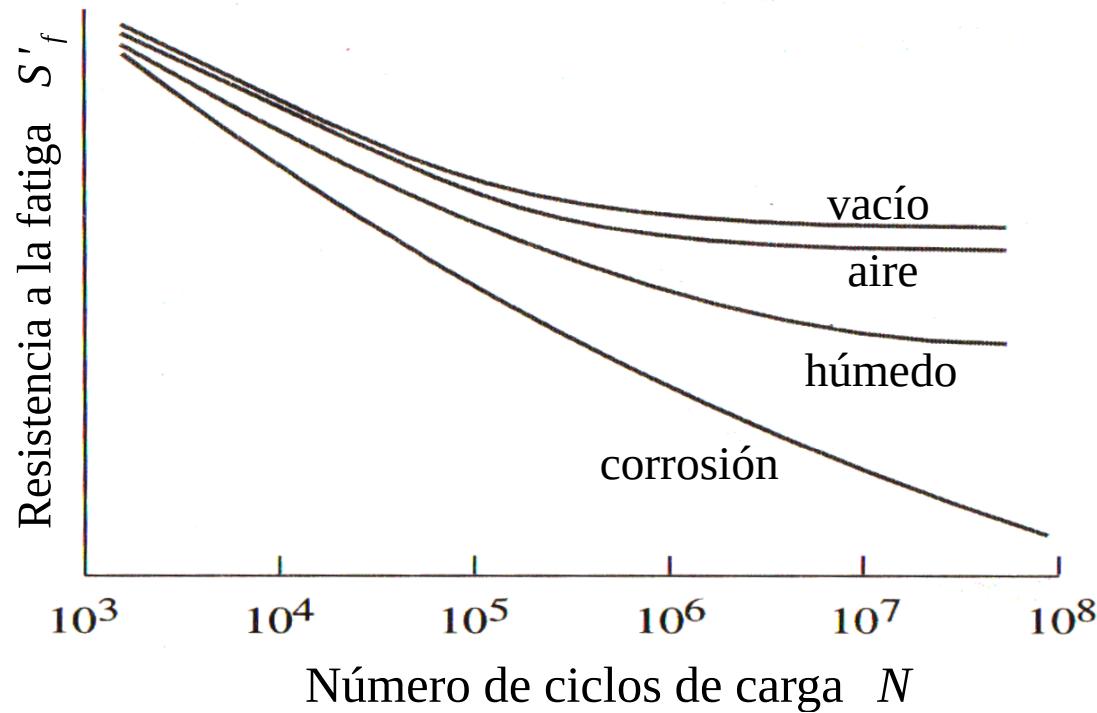
Este término incorpora el efecto de otros factores sobre el valor de la resistencia a fatiga de un elemento mecánico. Estos factores pueden ser, por ejemplo, la presencia de **esfuerzos residuales, corrosión, recubrimientos electrolíticos, ambiente de trabajo**, etc.

Particularmente, los esfuerzos residuales superficiales de compresión afectan positivamente la resistencia a la fatiga del material. Entonces, procedimientos como el granallado, el martillado y el laminado en frío incrementan la resistencia a la fatiga de la pieza.

Los procesos de forja introducen esfuerzos residuales en direcciones específicas, de modo que la resistencia a la fatiga en estos casos será una propiedad también direccional.

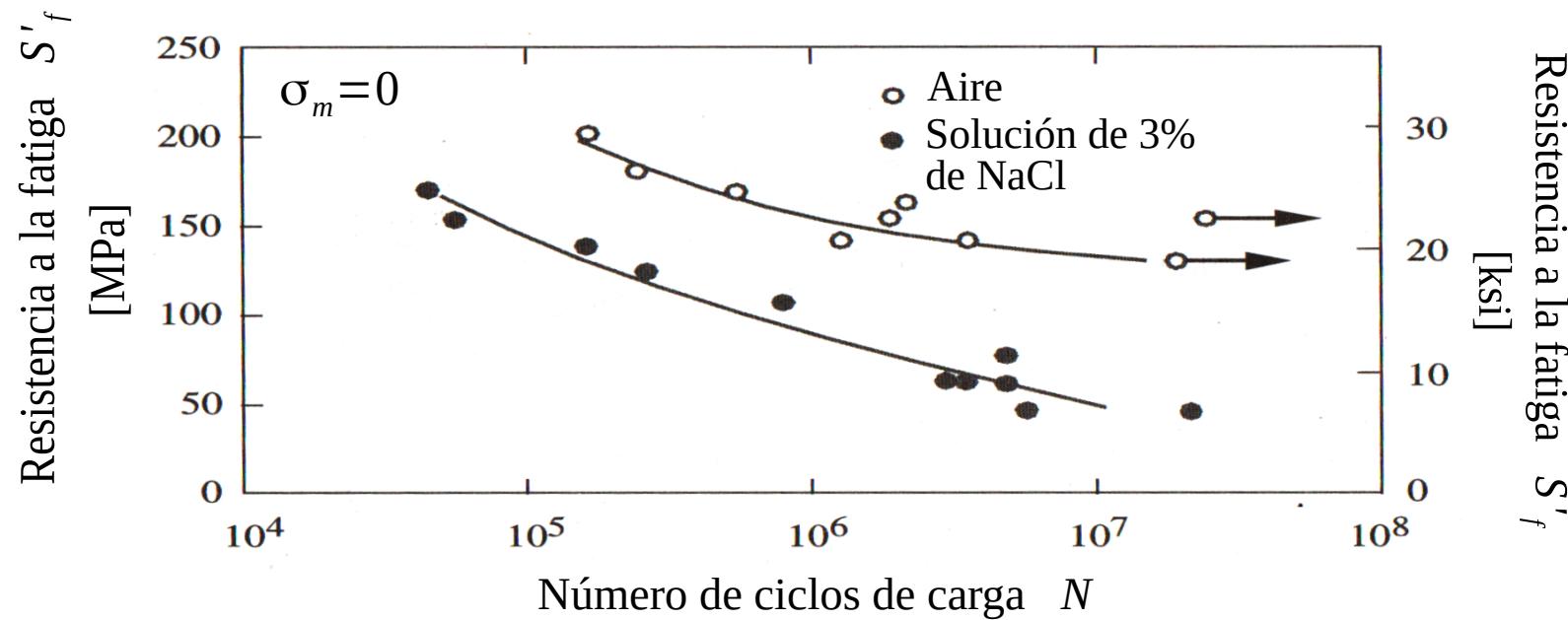
# Factor de corrección por efectos diversos ( $C_f$ )

Efecto del ambiente de trabajo sobre la resistencia a la fatiga del acero.



# Factor de corrección por efectos diversos ( $C_f$ )

Efecto del agua de mar sobre la resistencia a la fatiga del aluminio.



# Efecto de la concentración de tensiones

Se usará el termino muesca para denotar una discontinuidad geométrica que modifica bruscamente el flujo de carga en un elemento mecánico.

Para el caso de *carga estática*, el efecto de concentración del esfuerzo produce un sobre-esfuerzo dado por

$$\sigma_{\text{real max}} = K_t \sigma_{\text{nom}}$$

$$\tau_{\text{real max}} = K_{ts} \tau_{\text{nom}}$$

Para el caso de cargas variables, estos efectos deben ser considerados incluso para materiales dúctiles. Sin embargo, el efecto de la concentración debe ser modificado por la sensibilidad a la muesca del material  $q$ :

$$K_f = 1 + q(K_t - 1)$$

$$K_{fs} = 1 + q_s(K_{ts} - 1)$$

# Efecto de la concentración de tensiones

Este factor de sensibilidad a la fatiga está dado por

$$q = \frac{1}{1 + \frac{\sqrt{a}}{\sqrt{r}}} \quad 0 \leq q \leq 1$$

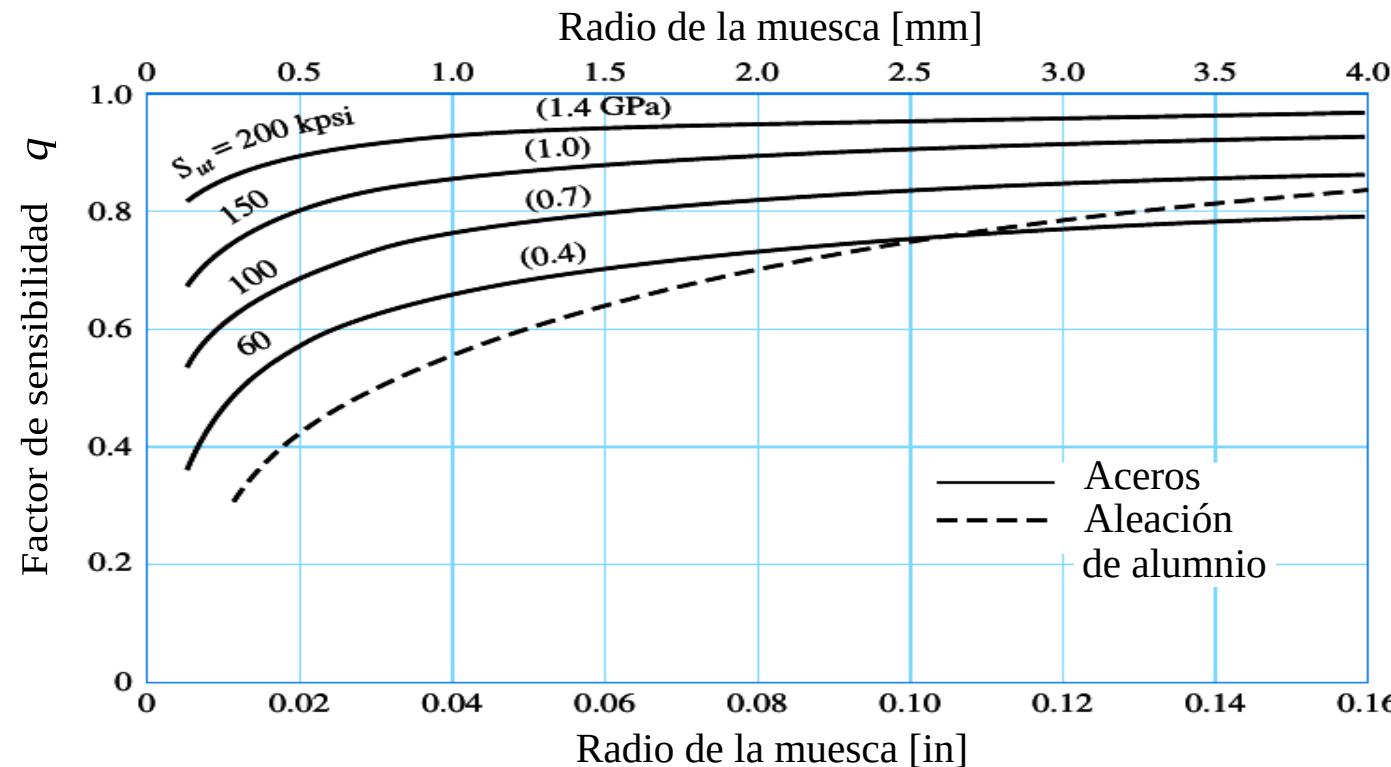
donde  $r$  es el radio de la muesca y  $\sqrt{a}$  es la **constante de Neuber**.

Valor de la constante de Neuber para aceros y aluminios. Para cargas torsionales tomar el  $S_{ut}$  superior al nominal.

$S_{ut}$ [ksi]	$\sqrt{a}$ [in <sup>0.5</sup> ]	$S_{ut}$ [ksi]	$\sqrt{a}$ [in <sup>0.5</sup> ]
50	0.130	10	0.500
55	0.118	15	0.341
60	0.108	20	0.264
70	0.093	25	0.217
80	0.080	30	0.180
90	0.070	35	0.152
100	0.062	40	0.126
110	0.055	45	0.111
120	0.049		
130	0.044		
140	0.039		
160	0.031		
180	0.024		
200	0.018		
220	0.013		
240	0.009		

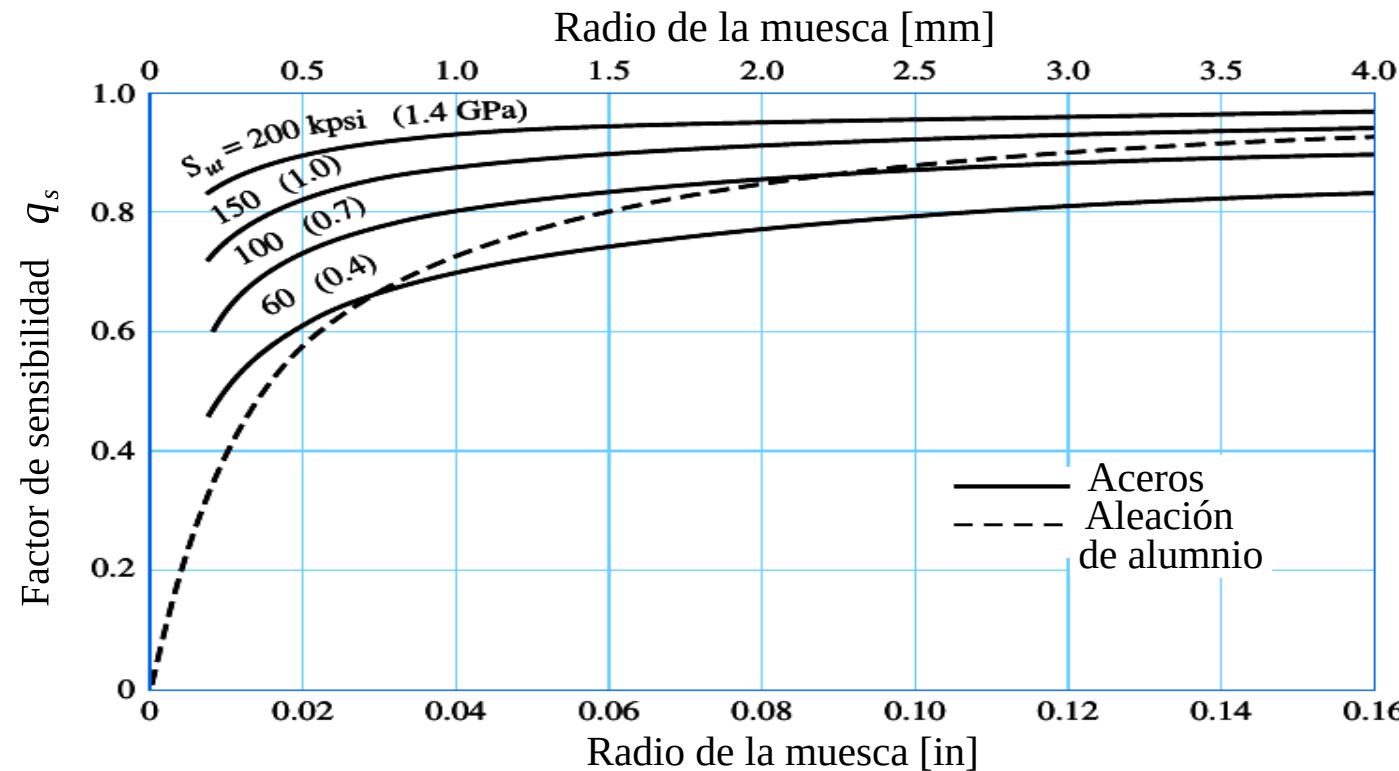
# Efecto de la concentración de tensiones

Comportamiento del factor de sensibilidad a la entalla para aceros y la aleación de aluminio *UNS A92024-T*.



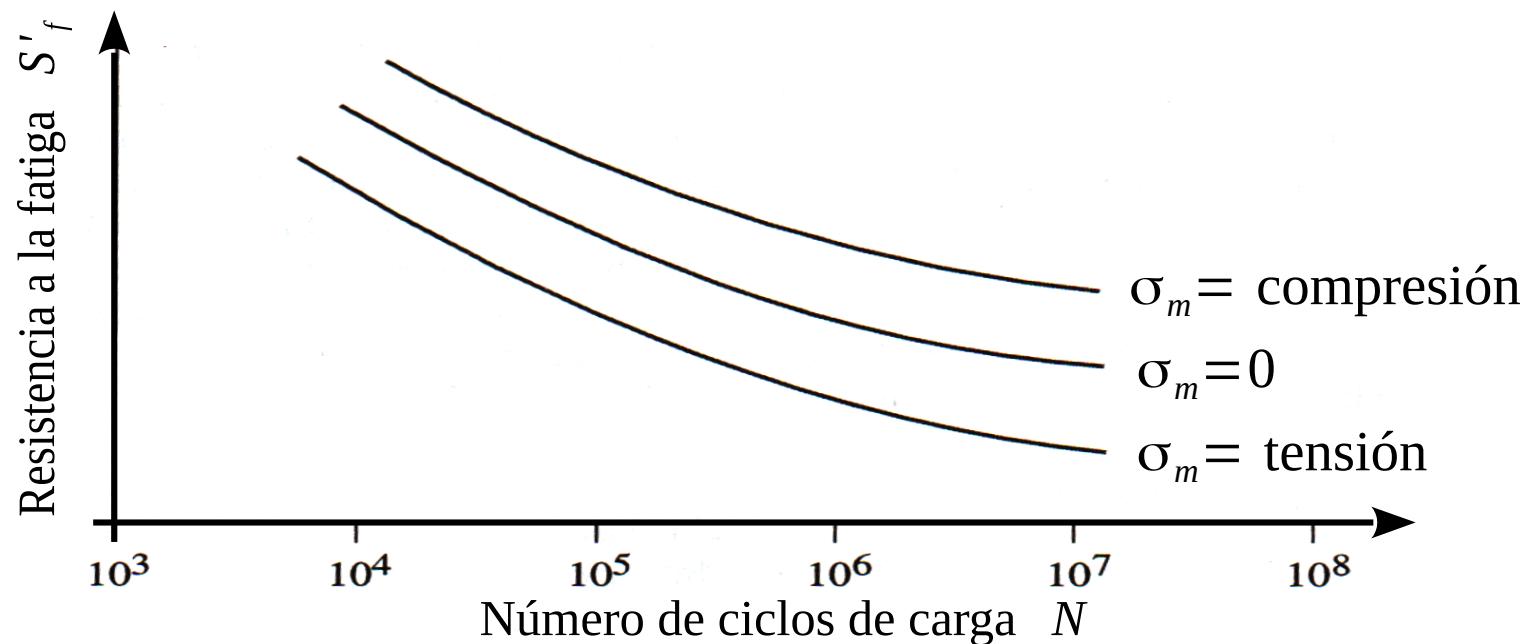
# Efecto de la concentración de tensiones

Comportamiento del factor de sensibilidad a la entalla a cortante para aceros y la aleación de aluminio *UNS A92024-T*.



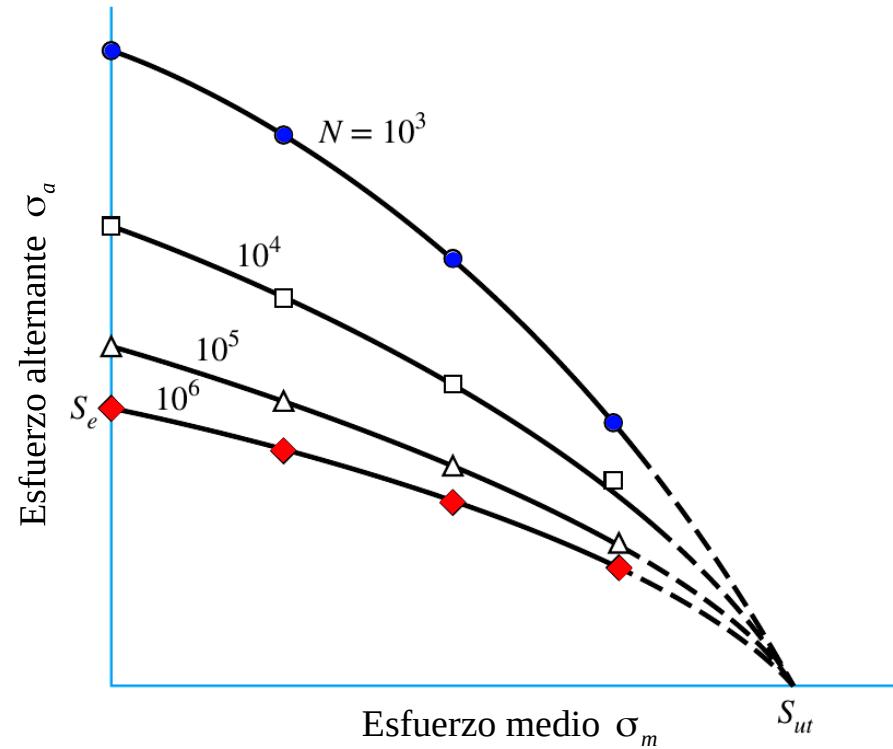
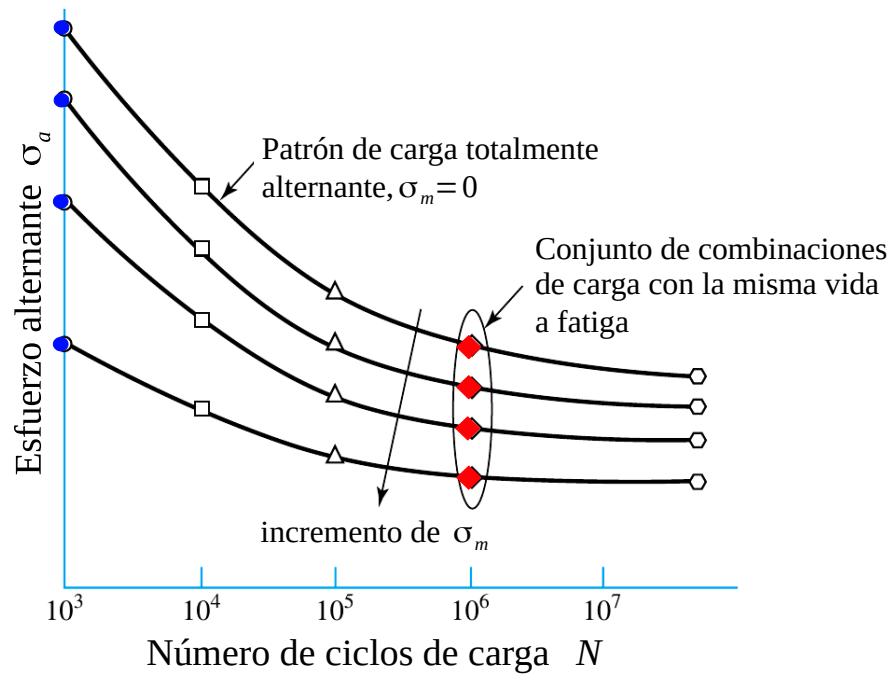
# Efecto de la presencia de esfuerzos medios

En la gráfica se aprecia el efecto de la componente media de esfuerzo en la resistencia a la fatiga. Como es de esperarse las componentes medias de tensión aceleran la falla por fatiga.



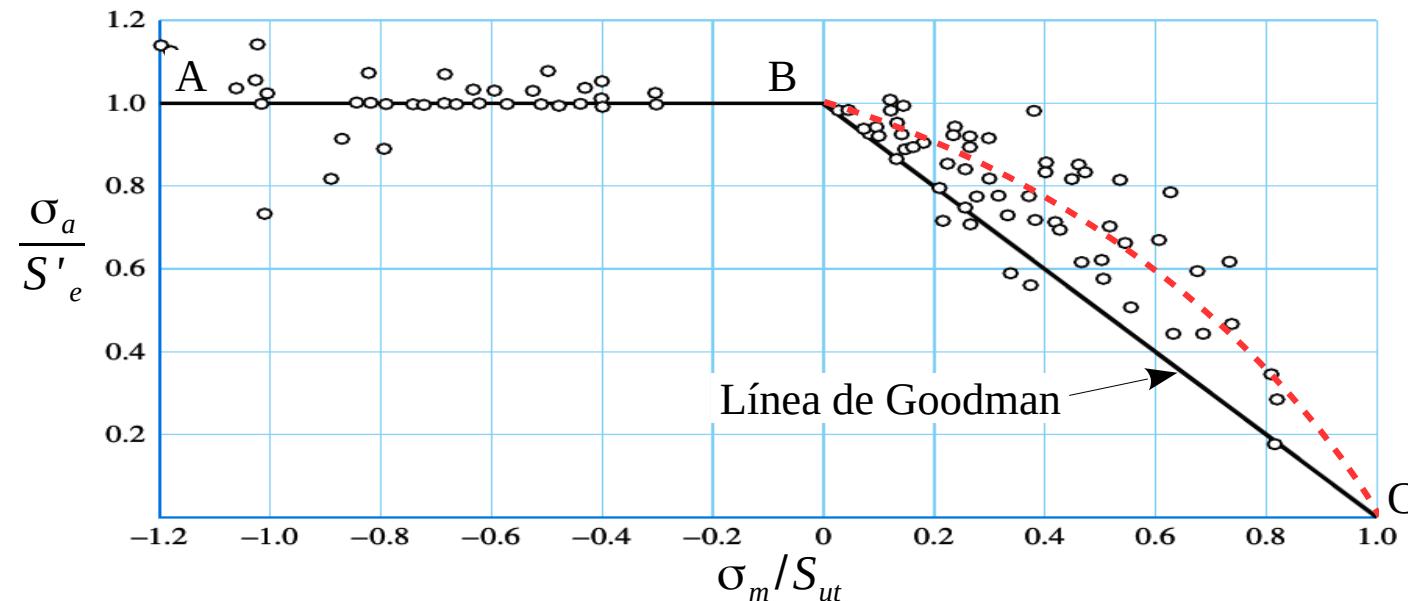
# Efecto de la presencia de esfuerzos medios

Si se organizan los puntos del diagrama de esfuerzo vida en un diagrama  $\sigma_m - \sigma_a$  se pueden identificar patrones de carga que producen la misma vida a fatiga.



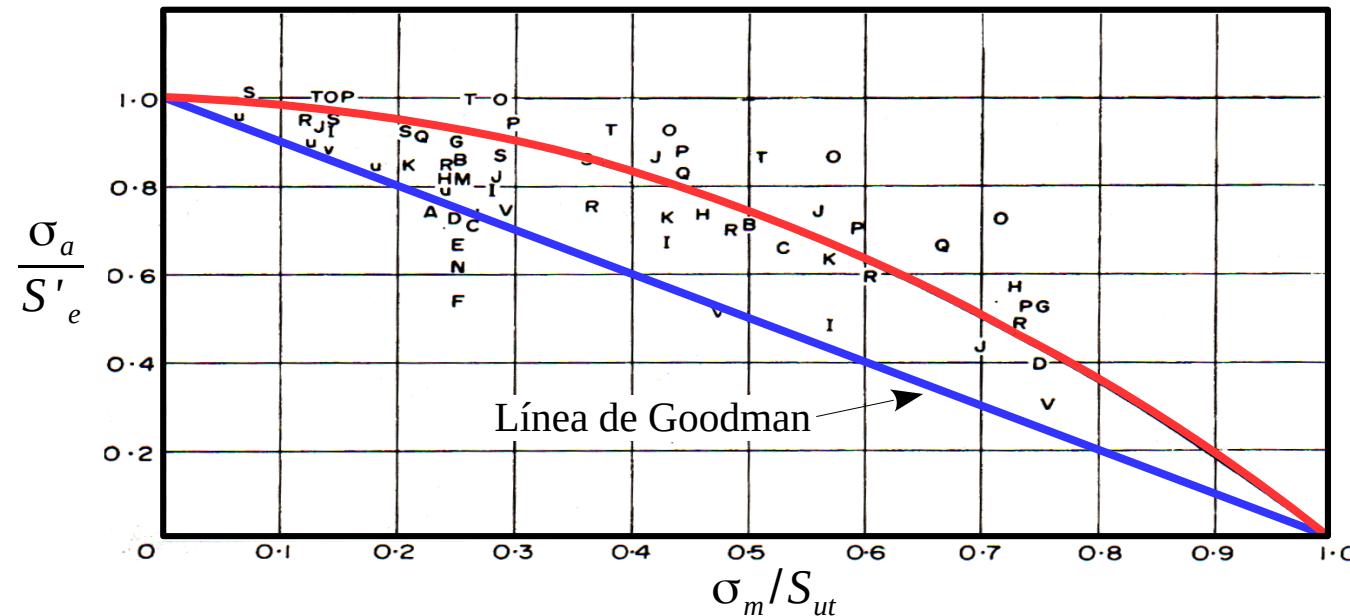
# Efecto de la presencia de esfuerzos medios

Resultados de pruebas realizadas a probetas de **diferentes aceros**, sometidas a  $10^6$  ciclos de carga. Los puntos representan las combinaciones de esfuerzos alternante y medio que produjeron falla.



# Efecto de la presencia de esfuerzos medios

Efecto del esfuerzo medio sobre el límite de resistencia a la fatiga en las **aleaciones de aluminio**. Los puntos corresponden a combinaciones de esfuerzo medio y alterante que producen falla a  $5 \times 10^8$  ciclos de carga.



# Efecto de la presencia de esfuerzos medios

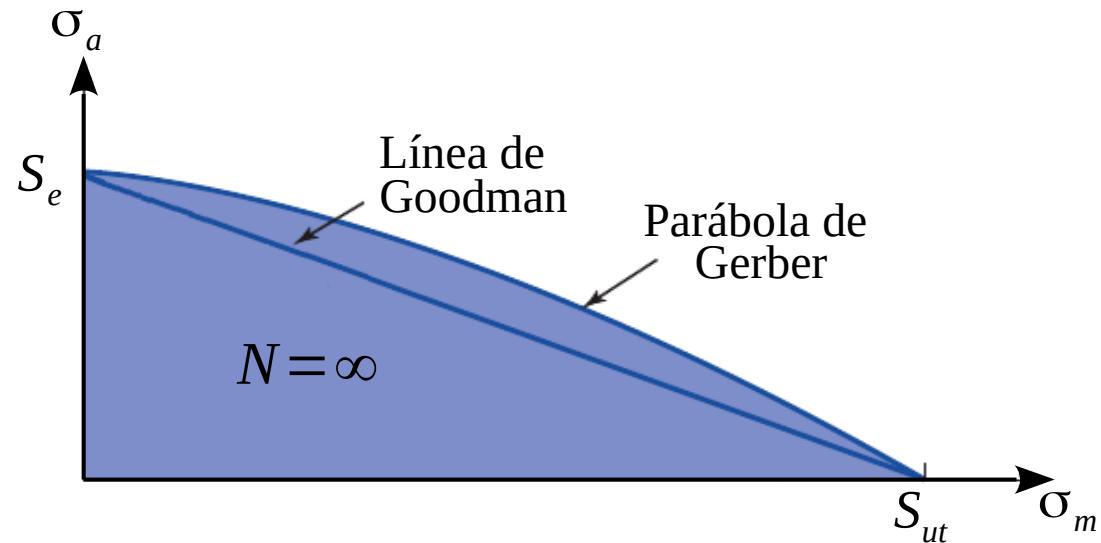
A partir de estas observaciones experimentales es posible formular dos teorías de falla que explican la falla por fatiga bajo condiciones de carga fluctuante.

Línea de Goodman:

$$\sigma_a = S_e \left( 1 - \frac{\sigma_m}{S_{ut}} \right)$$

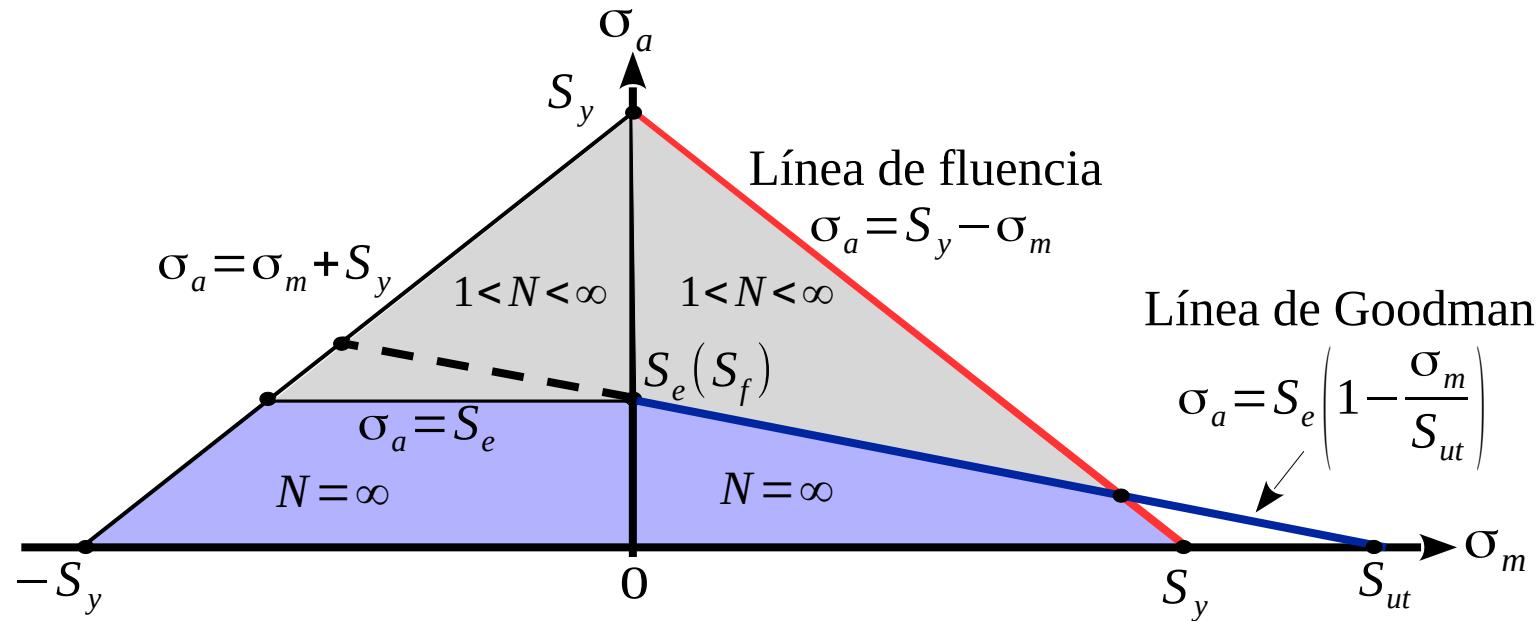
Parábola de Gerber:

$$\sigma_a = S_e \left( 1 - \frac{\sigma_m^2}{S_{ut}^2} \right)$$



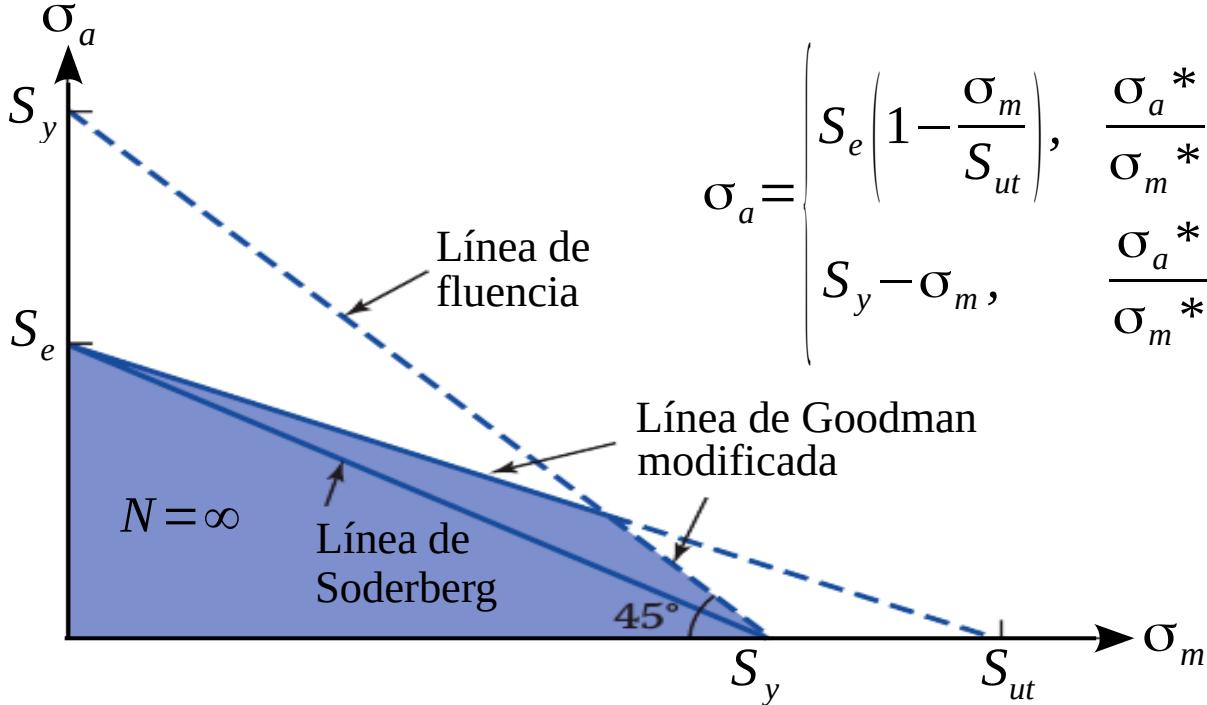
# Efecto de la presencia de esfuerzos medios

Zona de seguridad definida de acuerdo con la **Línea de Goodman** en la zona de tensión. Nótese que para valores bajos en la relación **A**, se prefiere usar la línea de fluencia como límite de falla.



# Efecto de la presencia de esfuerzos medios

Incluyendo el concepto de fluencia para condiciones de carga cercanas a la estática, se tiene:



Línea de *Goodman modificada*:

$$\sigma_a = \begin{cases} S_e \left(1 - \frac{\sigma_m}{S_{ut}}\right), & \frac{\sigma_a^*}{\sigma_m^*} \geq A_{\text{crit}} \\ S_y - \sigma_m, & \frac{\sigma_a^*}{\sigma_m^*} < A_{\text{crit}} \end{cases}$$

con:  $A_{\text{crit}} = \frac{S_e(S_{ut} - S_y)}{S_{ut}(S_y - S_e)}$

Línea de *Soderberg*:

$$\sigma_a = S_e \left(1 - \frac{\sigma_m}{S_y}\right)$$

# Efecto de la presencia de esfuerzos medios

Las ecuaciones básicas para el cálculo del factor de seguridad a la fatiga usando la *línea de Goodman*:

Ecuaciones	Intersección	
Línea de Goodman: $\sigma_a = S_e \left(1 - \frac{\sigma_m}{S_{ut}}\right)$	$\sigma'_a = \frac{AS_e S_{ut}}{AS_{ut} + S_e}$	$n_f = \frac{1}{\frac{\sigma_a^*}{S_e} + \frac{\sigma_m^*}{S_{ut}}}$
Línea de carga: $\sigma_a = A\sigma_m = \frac{\sigma_a^*}{\sigma_m^*}\sigma_m$	$\sigma'_m = \frac{\sigma'_a}{A}$	
Línea de fluencia: $\sigma_a = S_y - \sigma_m$	$\sigma'_a = \frac{AS_y}{1+A}$	
Línea de carga: $\sigma_a = A\sigma_m = \frac{\sigma_a^*}{\sigma_m^*}\sigma_m$	$\sigma'_m = \frac{S_y}{1+A}$	
Línea de Goodman: $\sigma_a = S_e \left(1 - \frac{\sigma_m}{S_{ut}}\right)$	$\sigma'_{m'} = \frac{(S_y - S_e)S_{ut}}{S_{ut} - S_e}$	$A_{crit} = \frac{S_e(S_{ut} - S_y)}{S_{ut}(S_y - S_e)}$
Línea de fluencia: $\sigma_a = S_y - \sigma_m$	$\sigma'_a = S_y - \sigma'_{m'}$	

# Efecto de la presencia de esfuerzos medios

Las ecuaciones básicas para el cálculo del factor de seguridad a la fatiga usando la *curva de Gerber*:

Ecuaciones	Intersección	
Curva de Gerber: $\sigma_a = S_e \left( 1 - \frac{\sigma_m^2}{S_{ut}^2} \right)$	$\sigma'_a = \frac{A^2 S_{ut}^2}{2 S_e} \left[ \sqrt{1 + \left( \frac{2 S_e}{A S_{ut}} \right)^2} - 1 \right]$	$\left[ \sqrt{1 + \left( \frac{2 \sigma_m * S_e}{S_{ut} \sigma_a *} \right)^2} - 1 \right]$
Línea de carga: $\sigma_a = A \sigma_m = \frac{\sigma_a *}{\sigma_m *} \sigma_m$	$\sigma'_m = \frac{\sigma'_a}{A}$	
Línea de fluencia: $\sigma_a = S_y - \sigma_m$	$\sigma'_a = \frac{A S_y}{1 + A}$	
Línea de carga: $\sigma_a = A \sigma_m = \frac{\sigma_a *}{\sigma_m *} \sigma_m$	$\sigma'_m = \frac{S_y}{1 + A}$	$\left[ \sqrt{1 + \left( \frac{S_{ut}}{S_e} \right)^2} \left( 1 - \frac{S_y}{S_e} \right) - 1 \right]$
Curva de Gerber: $\sigma_a = S_e \left( 1 - \frac{\sigma_m^2}{S_{ut}^2} \right)$	$\sigma'_m = \frac{S_{ut}^2}{2 S_e} \left[ \sqrt{1 + \left( \frac{2 S_e}{S_{ut}} \right)^2} \left( 1 - \frac{S_y}{S_e} \right) - 1 \right]$	
Línea de fluencia: $\sigma_a = S_y - \sigma_m$	$\sigma'_a = S_y - \sigma'_m$	$n_f = \frac{\sigma_a *}{2 S_e} \left( \frac{S_{ut}}{\sigma_m *} \right)$

# Efecto de la presencia de esfuerzos medios

Diagrama maestro de fatiga para el acero AISI 4340 con  $S_y = 147$  ksi y  $S_{ut} = 158$  ksi.

Condición de carga punto A:

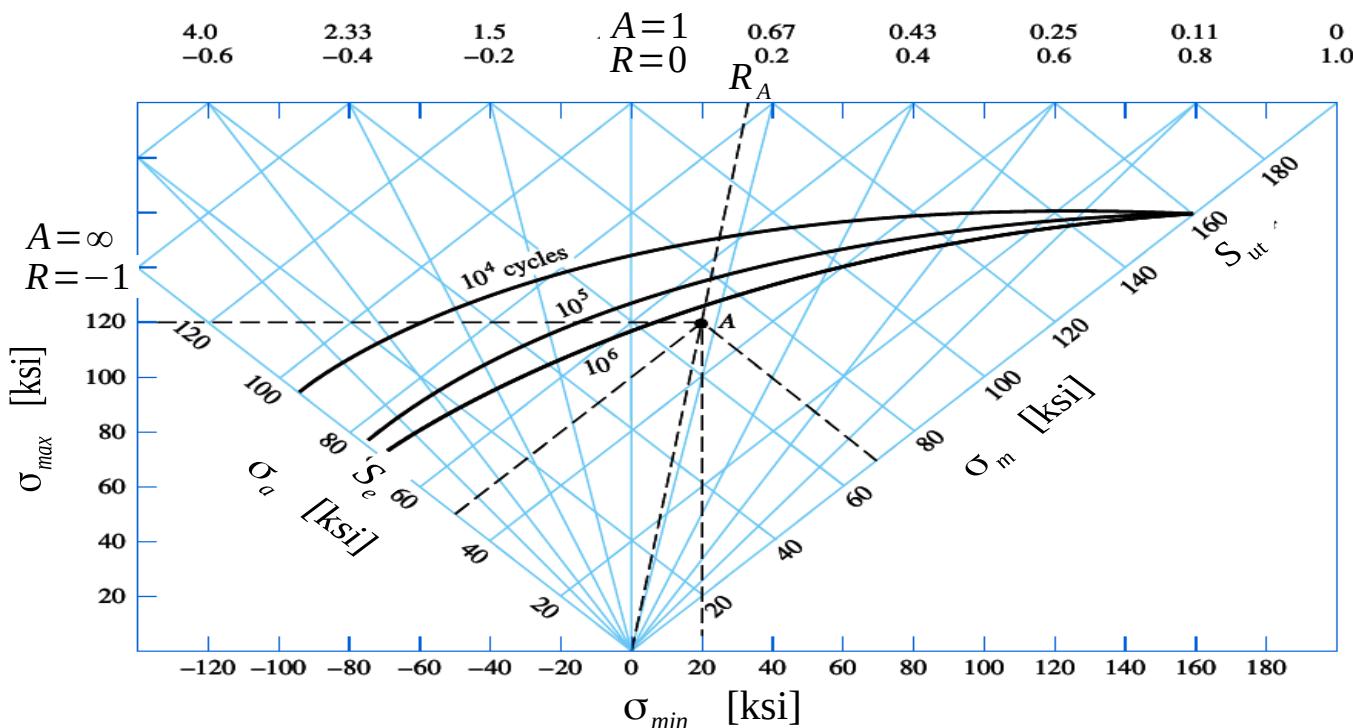
$$\sigma_{max} = 120 \text{ ksi}$$

$$\sigma_{min} = 20 \text{ ksi}$$

$$\sigma_a = 50 \text{ ksi}$$

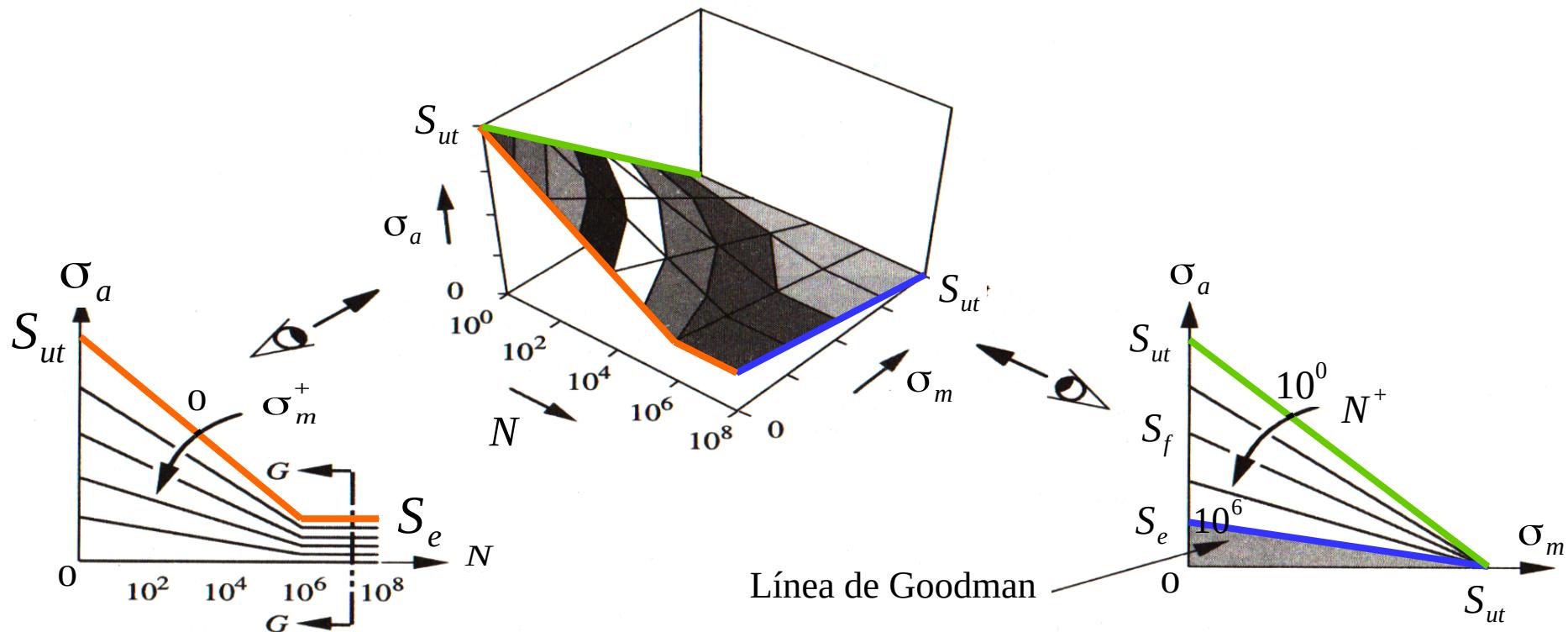
$$\sigma_m = 70 \text{ ksi}$$

Modificado de: H. J. Grover, Fatigue of Aircraft Structures, U.S. Government Printing Office, Washington, D.C., 1966, pp. 317-322.



# Efecto de la presencia de esfuerzos medios

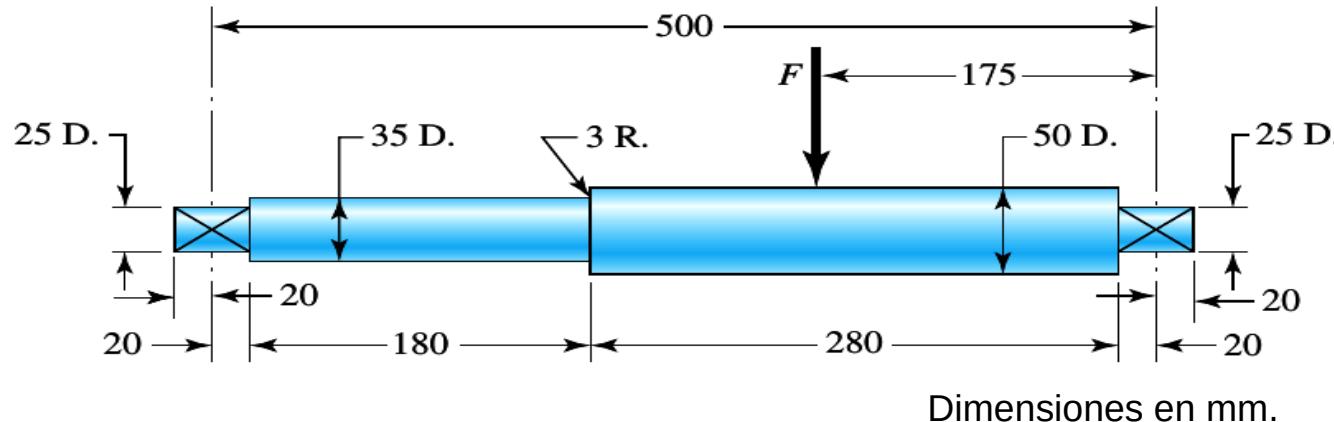
Superficie de falla a fatiga para condiciones de esfuerzo medio, alternante y ciclos de carga.



# Ejercicio 1: Carga alternante

## Tensión uniaxial

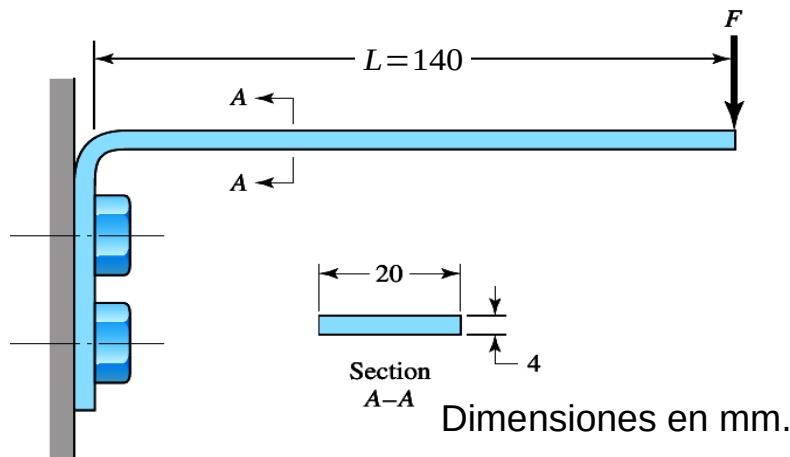
El eje rotativo mostrado en la figura esta maquinado en acero AISI 1020 CD. Considerando una carga  $F=8 \text{ kN}$ , determine el factor de seguridad a fatiga basado en vida infinita. Si no tiene vida infinita, estime el número de ciclos de carga que puede resistir el eje.



# Ejercicio 2: Carga fluctuante

## Tensión uniaxial

La figura muestra un resorte plano de sección rectangular. El resorte es precargado durante el ensamble, obteniéndose una deflexión inicial de 2 mm. Durante su funcionamiento el resorte sufre una deflexión repetida adicional de 4mm. El material del resorte es un acero de alto carbono, templado y temperado hasta una dureza 490 Bhn. En la zona del doblez, con radio interno de 4mm, se tiene un concentrador de esfuerzo  $K_t=1.7$ . Estime que el esfuerzo de fluencia es el 90% del esfuerzo último del material. Encuentre el factor de seguridad a fatiga empleando el criterio de *Goodman modificado*.



Para una viga en voladizo se tiene:

$$y_{max} = \frac{FL^3}{3EI}$$

Para los aceros es válida la aproximación:

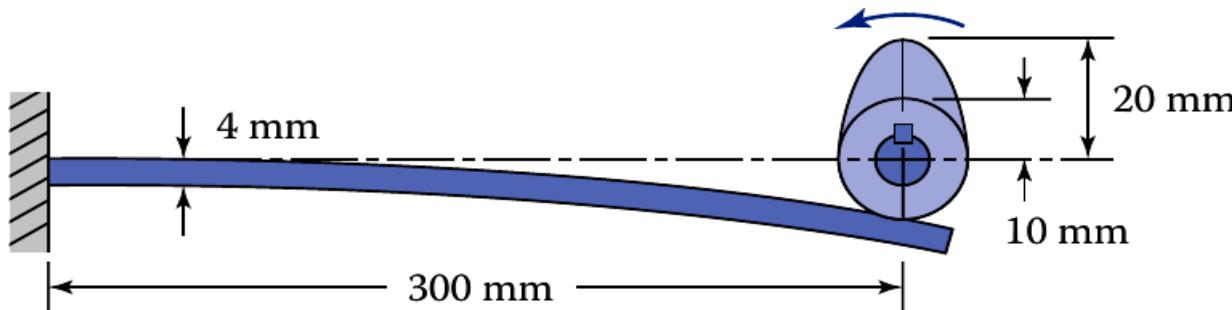
$$S_{ut} = 3.45 H_{Bhn}$$

$$S_{ut} : [\text{MPa}]$$

# Ejercicio 3: Carga fluctuante

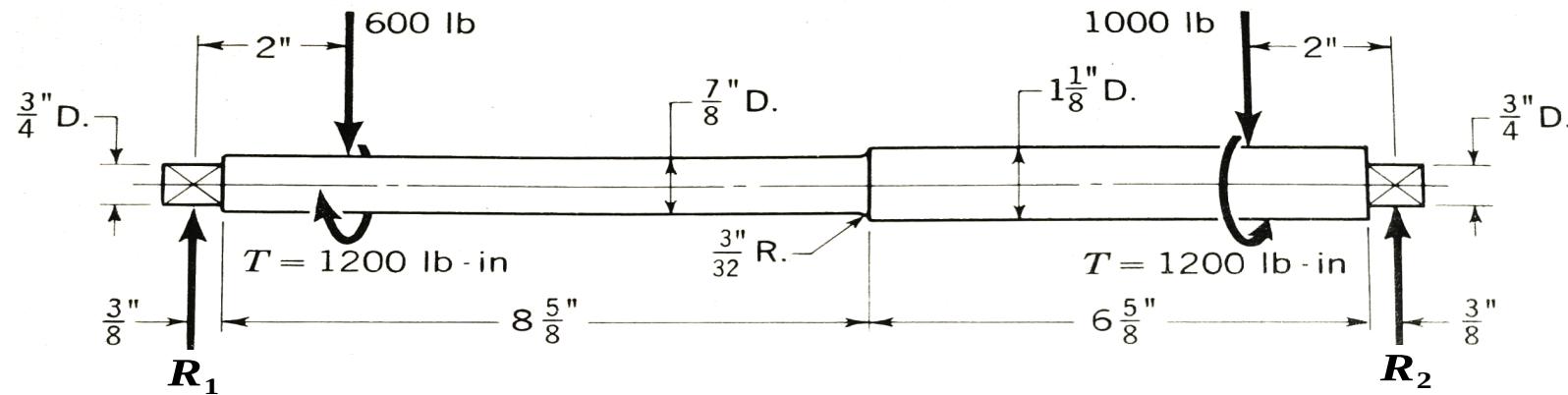
## Tensión uniaxial

El resorte plano de la figura, con sección rectangular de 24 mm de ancho y 4 mm de espesor, está fabricado con acero AISI 1050CD. Si se conoce que al retirar la leva el resorte se encuentra sin deformación, determine el factor de seguridad a fatiga del resorte. Compare los resultados obtenidos con diferentes teorías de falla por fatiga.



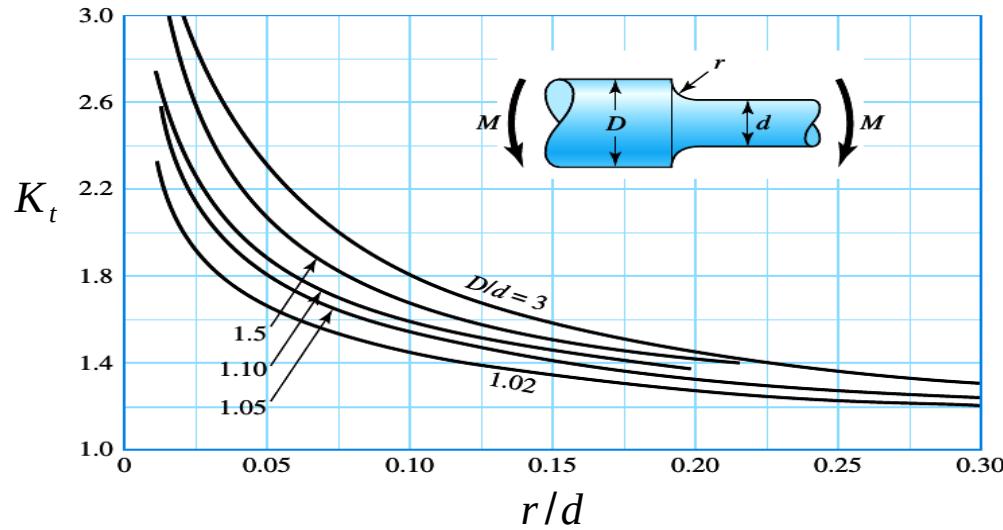
# Ejercicio 4: Cargas combinadas

La figura muestra un eje de acero AISI 1050, templado y revenido a 400 F. Sabiendo que las cargas externas son constantes, que el eje es maquinado y rectificado en las zonas críticas y que la temperatura de trabajo es de 200 F, calcular el factor de seguridad a la fatiga para una confiabilidad del 99.999%.

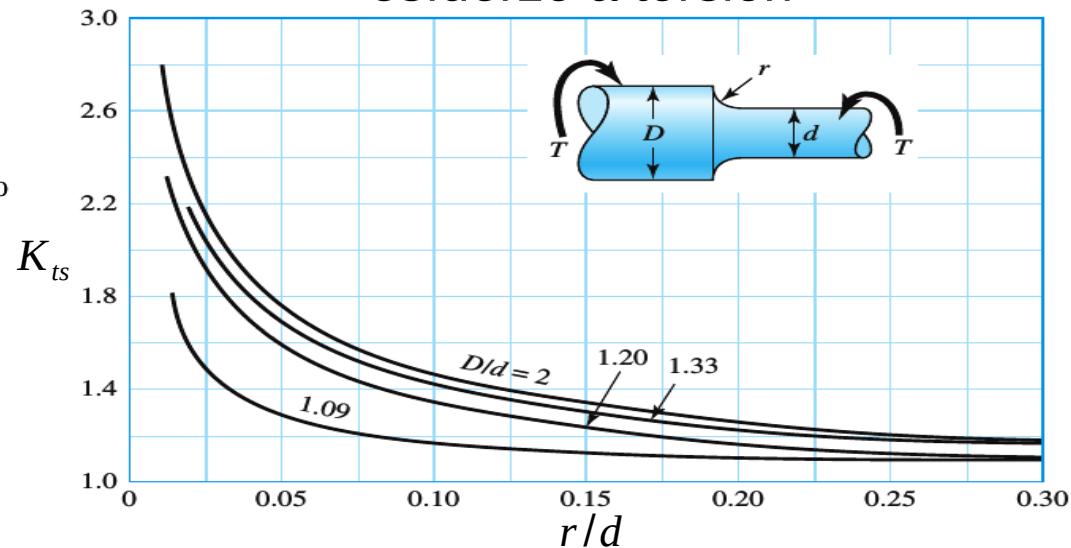


# Ejercicio 4: Cargas combinadas

Factores teóricos de concentración del esfuerzo a flexión

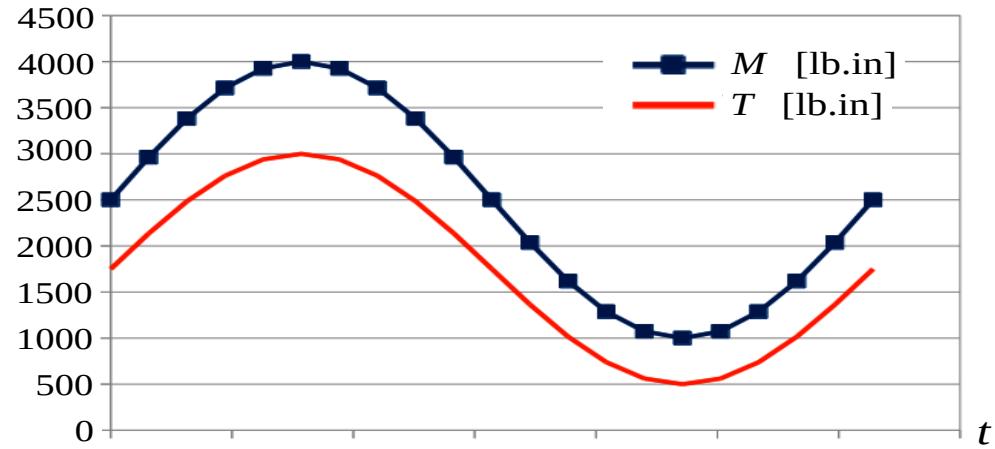
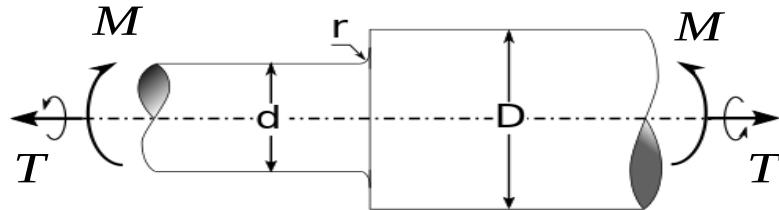


Factores teóricos de concentración del esfuerzo a torsión



# Ejercicio 5: Cargas combinadas

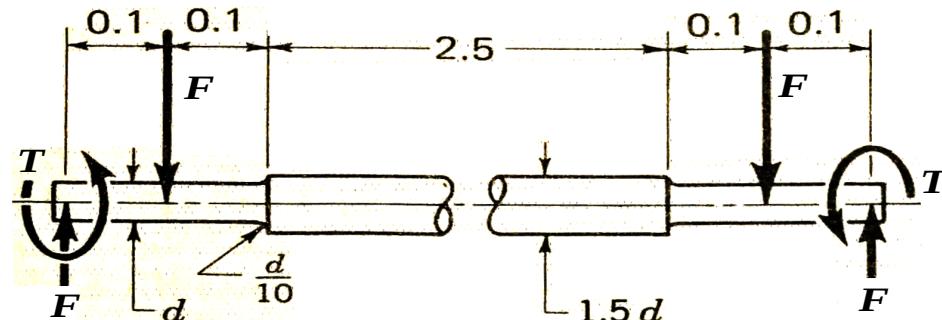
Dada la porción de eje mostrada en la figura, sometida a unas cargas de flexión y torsión fluctuantes, determine una expresión para el cálculo del diámetro mínimo requerido bajo consideraciones de fatiga asumiendo  $n_f=2.0$ . Considere que el cambio de sección está definido por  $D/d=1.5$  y  $r/d=1/8$ . Asuma una temperatura de trabajo de 20 C y una confiabilidad del 99.99%.



Usando como criterio de fatiga la *línea de Goodman*, calcule el diámetro mínimo para aceros con diferentes valores de  $S_{ut}$ , desde 30 ksi hasta 250 ksi.

# Ejercicio 6: Cargas combinadas

La barra de torsión de la figura está sometida a un conjunto de cargas transversales estáticas, con  $F=3.5 \text{ kN}$  y a un torque  $T$  que varía cíclicamente entre  $0$  y  $280 \text{ N.m}$ . El material de la barra es acero AISI 4130 templado y revenido a  $540 \text{ C}$ . Los escalones de los extremos han sido maquinados y rectificados, mientras que la superficie del escalón central se encuentra como ha salido de la forja. Se estima que la temperatura de trabajo de este componente será de  $80 \text{ C}$ . Determine el diámetro mínimo requerido en este componente bajo consideraciones de fatiga, si se requiere en el elemento vida infinita, una confiabilidad del  $99.99\%$  y un factor de seguridad de 1.8.



Dimensiones en m.