

## Determinación de coeficientes que influyen sobre el límite de resistencia a la fatiga. Diseño del software Fatiga 1.0

P. Almaguer-Zaldivar, H. Santiago-Cuenca, L. Pérez-Vallejo

Recibido el 12 de marzo de 2009; aceptado el 26 de junio de 2009

### Resumen

En este trabajo se realiza un análisis sobre el fenómeno de la fatiga en elementos de máquinas y estructurales. En el mismo se muestran las gráficas  $\sigma - N$  y  $\sigma_{media} - \sigma_a$  para un acero para estructuras CT4. Se analizan coeficientes que influyen sobre el límite de resistencia a la fatiga y la manera de determinarlos, tanto gráfica como analíticamente y por último se exponen las características generales del software Fatiga 1.0, diseñado y elaborado para la comprobación a la fatiga de árboles y ejes.

**Palabras claves:** resistencia de materiales, fatiga, curvas  $\sigma - N$ , software Fatiga 1.0.

### Template for the mechanical engineering magazine.

#### Abstract

In this work is carried out an analysis about the phenomenon of the fatigue in elements of machines and structurals. The graphs  $\sigma - N$  and  $\sigma_{media} - \sigma_a$  are shown for a steel for structures CT4. Are exposed coefficients that have influence on the limit to the fatigue and the way of determining them, so much graphic as analytically and lastly, are exposed the general characteristics of the software Fatigue 1.0, designed and elaborated for the fatigue's calculus of shafts and axles..

**Key words:** Strength of materials, fatigue, curves S – N, software Fatiga 1.0

## 1. Introducción.

Durante mucho tiempo el hombre tropezó con fenómenos de destrucción de elementos de máquinas y estructurales que provocaron grandes pérdidas materiales y humanas, sin poder determinar las verdaderas causas de dichos fenómenos. Pudieran citarse ejemplos de una gran cantidad de destrucciones desastrosas que conoció la humanidad.

Inevitablemente al construir un elemento de máquina o una estructura chocamos con la pregunta ¿cómo hacerlos más resistentes y de que manera evitar la destrucción?

El ingeniero moderno debe aplicar rigurosamente los métodos de cálculo científicamente argumentados para crear una estructura segura y tenaz, capaz de funcionar fiablemente y que sea ventajosa desde el punto de vista económico.

Las causas más difundidas de destrucción de las construcciones son el incremento paulatino de las pequeñas grietas iniciales hasta alcanzar su longitud crítica. Esto se conoce con el nombre de destrucción retardada en condiciones de las tensiones de funcionamiento no altas que finaliza con una destrucción frágil catastrófica.

Los mecanismos de la destrucción retardada son distintos para diferentes materiales, cargas, condiciones de explotación, etc. A los tipos más difundidos de destrucción retardada pertenecen la destrucción por fatiga, la destrucción en condiciones de fluencia, la destrucción originada por la acción de medios agresivos, la destrucción prolongada de materiales polímeros viscoelásticos, así como sus combinaciones, como lo es por ejemplo la destrucción por fatiga en un medio corrosivo.

Al ensayar una probeta, siempre que la tensión máxima no excede el límite elástico del material, esta recupera sus condiciones originales al ser retirada la carga. Así, es posible concluir que una carga dada puede ser aplicada repetidas veces, procurando que las tensiones se mantengan dentro del límite elástico. Esta conclusión es correcta para cargas que se repitan algunas docenas o centenas de veces. Sin embargo, no es correcta cuando las cargas son repetidas miles o millones de veces. En estos casos la rotura puede

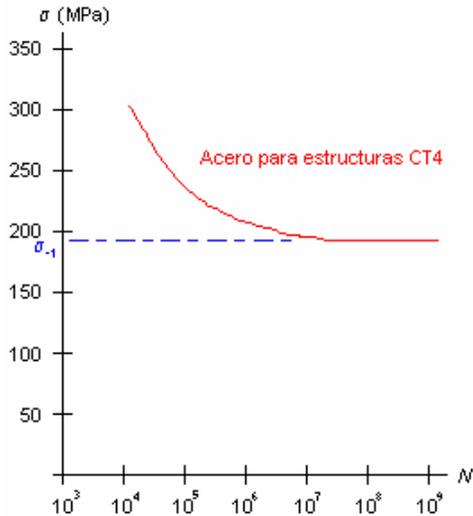
ocurrir para tensiones mucho menores que el límite de rotura estático. Este fenómeno es conocido como fatiga. El fallo a fatiga tiene una naturaleza frágil, aún cuando el material tiene normalmente un comportamiento dúctil.

La fatiga es la acumulación de transformaciones mecánicas irreversibles en el material, producto a la acción de cargas cíclicas.

La fatiga debe ser considerada en el diseño de estructuras y elementos de máquinas que estén sometidos a cargas variables. El número de ciclos de carga que deben soportar estos elementos durante su vida útil varía en rangos muy grandes. Por ejemplo, una viga que sostenga una grúa viajera puede ser cargada alrededor de 200 veces en cada jornada de trabajo.

Muchas cargas tienen una naturaleza fluctuante. El tráfico sobre un puente ferroviario causa tensiones que varían de acuerdo a la cantidad de trenes que circulen, la frecuencia con que lo hagan, la carga que transporten, etcétera. En el eje de un automóvil, el estado de carga es completamente contrario cada media revolución de la rueda.

El número de ciclos necesarios para causar el fallo de una probeta sometida a cargas repetidas sucesivas o a cargas reversibles puede ser obtenido experimentalmente para una relación de tensiones determinado. Si se realizan una serie de ensayos, usando diferentes valores de tensiones, los datos obtenidos pueden ser ploteados en una curva tensión  $\sigma$  versus número de ciclos  $N$ . En la figura 1 se muestra una curva típica  $\sigma$ -  $N$  obtenida para un acero CT4. Esta curva es característica para ciclos de cargas simétricos.

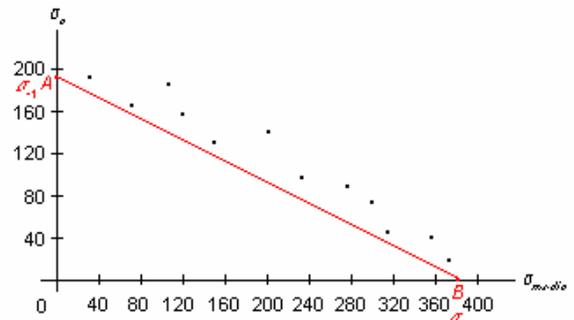


**Figura 1.** Relación  $\sigma$ -  $N$  para un acero CT4 (Ciclo simétrico)

Como se observa para un valor elevado de tensión, es necesario un número relativamente bajo de ciclos de carga para producir la rotura de la probeta, mientras que si se reduce la tensión el número de ciclos necesarios para provocar la rotura aumenta. El valor para el cual la tensión permanece constante para un número ilimitado de ciclos de carga se denomina límite de resistencia a la fatiga y se denota por  $\sigma_{-1}$ , en el caso del acero CT4 este es igual a 190 MPa. Para los aceros de bajo contenido de carbono este valor es aproximadamente la mitad del valor del límite de rotura  $\sigma_r$ .

Para materiales no ferrosos, como por ejemplo el aluminio y el cobre la tensión a la que ocurre la rotura continúa decreciendo a medida que se aumenta el número de ciclos de carga. Para tales metales, es posible definir el límite de resistencia a la fatiga como el valor de tensión correspondiente a la rotura después de un número determinado de ciclos de cargas, por ejemplo 500 millones.

Para ciclos asimétricos de carga se realizan ensayos con diferentes combinaciones de los valores de la tensión media del ciclo  $\sigma_{media}$  y de la amplitud del mismo  $\sigma_a$ . En estos casos se obtiene un diagrama como el que se muestra en la figura 2.



**Figura 2.** Diagrama de resistencia a la fatiga para un acero CT4 (Ciclo asimétrico)

Al ensayar varias probetas se obtienen una serie de puntos, cuyo ajuste sería una curva. Según los ensayos esta curva se puede sustituir por la recta AB. Esto contribuye a aumentar la reserva de resistencia al disminuir el área de trabajo. El punto A del diagrama corresponde al límite de resistencia a la fatiga; mientras que el punto B es el límite de resistencia a la tracción. Ubicando el punto de trabajo, mediante las coordenadas  $(\sigma_{media}, \sigma_a)$  del elemento estudiado es posible conocer su reserva de resistencia; o sea el coeficiente de seguridad con que trabaja.

Al examinar una probeta, un árbol, un eje u otro elemento de máquina o estructura que haya fallado por fatiga se observa que el fallo comenzó en una grieta microscópica o en otro defecto similar. En cada ciclo de carga, la grieta va en aumento. Durante las cargas sucesivas, la grieta se va propagando por toda la sección y el material no dañado resulta insuficiente para soportar las cargas máximas, entonces de forma abrupta ocurre la rotura frágil del elemento debido a la sobrecarga estática. Debido a que el fallo por fatiga puede ser iniciado en una grieta u otra imperfección el estado de la superficie de una probeta tiene un efecto importante en el valor del límite de resistencia a la fatiga obtenido en un ensayo. El límite de resistencia a la fatiga para probetas maquinadas y pulidas es superior que para componentes laminados o forjados, o para otros que se encuentren corroídos. En condiciones de trabajo cercanas al mar, o en otras aplicaciones donde exista alta probabilidad de que se acentúe el fenómeno de la corrosión, debe preverse una

reducción del límite de resistencia a la fatiga incluso superior al 50%.

## 2. Metodología para el cálculo del coeficiente de seguridad a la fatiga.

Es necesario determinar el coeficiente de seguridad a la fatiga y el coeficiente de seguridad a las deformaciones plásticas. Posteriormente ambos deben ser comparados con el coeficiente de seguridad recomendado.

Este coeficiente se calcula en función de determinados parámetros que influyen en la resistencia a la fatiga de un elemento.

Coeficiente de seguridad a la fatiga para tensiones normales.

$$n_{\sigma} = \frac{\sigma_{-1}}{\frac{k_{\sigma}\sigma_a}{\epsilon\beta} + \varphi_{\sigma}\sigma_m} \quad (1)$$

Coeficiente de seguridad a la fatiga para tensiones tangenciales.

$$n_{\tau} = \frac{\tau_{-1}}{\frac{k_{\tau}\tau_a}{\epsilon\beta} + \varphi_{\tau}\tau_m} \quad (2)$$

Coeficiente de seguridad a la fatiga para casos combinados de tensiones.

$$n = \frac{n_{\sigma}n_{\tau}}{\sqrt{n_{\sigma}^2 + n_{\tau}^2}} \quad (3)$$

En las expresiones anteriores:

$\sigma_{-1}; \tau_{-1}$ : es el límite de resistencia a la fatiga que se obtiene de forma experimental.

$\sigma_a; \tau_a$ : es la tensión amplitud del ciclo.

$\sigma_m; \tau_m$ : es la tensión media del ciclo.

El resto de los coeficientes que aparecen en las expresiones se denominarán durante el desarrollo del trabajo.

Si el coeficiente de seguridad a la fatiga calculado ( $n_{cal}$ ) es mayor que cierto valor recomendado ( $n_{rec}$ ) entonces esta garantizada la resistencia a la fatiga.

O sea:

Si:  $n_{cal} \geq n_{rec}$ ; resiste a la fatiga.

Si:  $n_{cal} < n_{rec}$ ; no resiste a la fatiga.

**Nota:** En el caso que se cumpla la primera condición pero la diferencia entre los coeficientes calculado y recomendado sea mayor del 15% debe hacerse un reanálisis del cálculo para valorar el factor económico, pues se estaría sobredimensionando la pieza; es decir, debe cumplirse la relación:

$$\frac{n_{cal} - n_{rec}}{n_{cal}} * 100 \leq 15\% \quad (4)$$

El coeficiente de seguridad recomendado puede determinarse como la multiplicación de tres coeficientes parciales de seguridad:

$$n_{rec} = n_1 * n_2 * n_3 \quad (5)$$

Donde:

- $n_1$ : es el coeficiente que considera el error posible al determinar las cargas y las tensiones. Cuando las tensiones se calculan con gran precisión, este coeficiente se puede señalar igual a 1,2 ÷ 1,5. En el caso de menor exactitud, igual a 2 ÷ 3.
- $n_2$ : es el coeficiente que tiene en cuenta la heterogeneidad del material, su sensibilidad a los posibles defectos en el maquinado de la pieza. En los cálculos por fatiga se considera igual a 1,5 ÷ 2. Este coeficiente se aumenta para materiales de poca homogeneidad (sobre todo en el caso de fundición) y en el de piezas de gran tamaño hasta 3 y más.
- $n_3$ : es el coeficiente de las condiciones de trabajo que tiene en cuenta el grado de responsabilidad de la pieza. Su valor se admite entre 1 y 1,5.

### Determinación de los coeficientes que influyen sobre el límite de resistencia a la fatiga.

#### Influencia de la concentración de tensiones.

La variación súbita de la forma de la pieza influye sobre el límite de resistencia a la fatiga. Esta influencia viene dada por el coeficiente efectivo de concentración de las tensiones.

Coeficiente de concentración de tensiones ( $k_{\sigma}; k_{\tau}$ ) para cambio de sección.

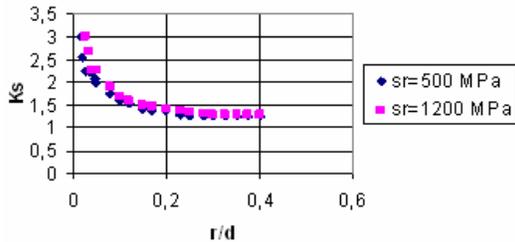
Se determina en función de  $\rho$  y de  $r/d$ :

Si:  $D/d = 2$

D: diámetro mayor en el cambio de sección. d: diámetro menor en el cambio de sección.

r: radio de acuerdo en el cambio de sección.

En el caso de la flexión es el coeficiente  $k_\sigma$  La siguiente gráfica muestra el comportamiento de este coeficiente



**Figura 3.** Coeficiente efectivo de la concentración de tensiones en la flexión de árboles escalonados

La curva inferior corresponde a los aceros de límite de resistencia 500 MPa, mientras la segunda corresponde a los aceros de límite de resistencia 1200 MPa. De la gráfica anterior se obtuvo la siguiente tabla:

Tabla No. 1. Coeficiente efectivo de la concentración de tensiones en la flexión de árboles escalonados

r/d	$\sigma_r=500$ MPa	$\sigma_r=1200$ MPa
0,015	3,000	-
0,021	2,554	-
0,025	2,256	3,000
0,032	2,230	2,660
0,040	2,200	2,275
0,045	2,100	2,268
0,050	2,000	2,260
0,080	1,760	1,912
0,100	1,600	1,680
0,120	1,520	1,608
0,150	1,400	1,500
0,170	1,388	1,460
0,200	1,370	1,400
0,230	1,304	1,370
0,250	1,260	1,350
0,280	1,254	1,320
0,300	1,250	1,300
0,325	1,250	1,300
0,350	1,250	1,300
0,375	1,250	1,300
0,400	1,250	1,300

En el caso que el valor del coeficiente que se desea determinar se encuentre en un valor intermedio, debe interpolarse mediante la siguiente expresión:

$$C_x = C_1 - \frac{C_2 - C_1}{P_2 - P_1} (P_x - P_1) \quad (6)$$

Donde:

$C_x$ : Valor del coeficiente buscado.

$C_1$  y  $C_2$ : Límites menor y mayor respectivamente de los coeficientes en el intervalo que se busca.

$P_x$ : Valor del parámetro de entrada para el coeficiente que se busca.

$P_1$  y  $P_2$ : Límites menor y mayor respectivamente de los parámetros de entrada en el intervalo que se busca.

Ejemplo: En la tabla anterior se desea obtener el valor de  $k_{\sigma_r}$  para una relación de  $r/d = 0.24$  con un  $\sigma_r = 500$  MPa.

Luego:

$$P_x = 0.24$$

Este valor se encuentra entre  $P_1 = 0.23$  y  $P_2 = 0.25$  y los coeficientes tomarán el valor de  $C_1 = 1.304$  y  $C_2 = 1.26$ , sustituyendo en la ecuación anterior se obtiene que para una relación de  $r/d = 0.24$ , entonces  $k_{\sigma_r}$  vale 1.282.

De forma análoga se procede con el resto de los coeficientes que se exponen aquí.

Las siguientes ecuaciones también permiten la determinación de los coeficientes  $k_\sigma$ .

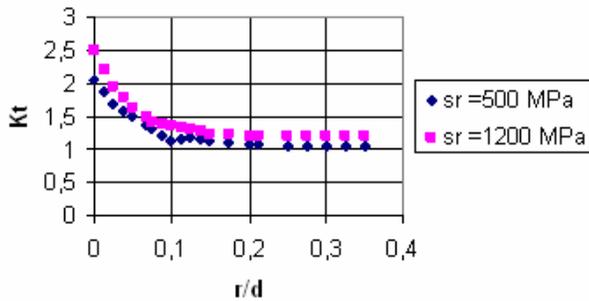
Para  $\sigma_r = 500$  MPa:

$$k_\sigma = 24490(r/d)^6 - 33737(r/d)^5 + 18323(r/d)^4 - 4995,7(r/d)^3 + 727,65(r/d)^2 - 57,165(r/d) + 3,5277 \quad (7)$$

Para  $\sigma_r = 1200$  MPa:

$$k_\sigma = 28738(r/d)^6 - 40428(r/d)^5 + 22581(r/d)^4 - 6388,8(r/d)^3 + 973,01(r/d)^2 - 79,173(r/d) + 4,3899 \quad (8)$$

En el caso de la torsión es el coeficiente  $k_{\tau}$ . La siguiente gráfica muestra el comportamiento de este coeficiente.



**Figura 4.** Coeficiente efectivo de la concentración de tensiones en la torsión de árboles escalonados.

La curva inferior corresponde a los aceros de límite de resistencia 500 MPa, mientras la segunda corresponde a los aceros de límite de resistencia 1200 MPa.

La gráfica anterior se obtuvo de la tabla No. 2:

**Tabla No. 2.** Coeficiente efectivo de la concentración de tensiones en la torsión de árboles escalonados.

r/d	$\sigma=500$ MPa	$\sigma=1200$ MPa
0,0000	2,0500	2,5000
0,0125	1,8680	2,2188
0,0250	1,6860	1,9375
0,0375	1,5920	1,7863
0,0500	1,4980	1,6350
0,0675	1,3682	1,4898
0,0750	1,3125	1,4275
0,0875	1,2188	1,3963
0,1000	1,1250	1,3650
0,1125	1,1563	1,3388
0,1250	1,1875	1,3125
0,1375	1,1613	1,2813
0,1500	1,1350	1,2500
0,1750	1,1025	1,2238
0,2000	1,0700	1,1975
0,2125	1,0682	1,1975
0,2500	1,0625	1,1975
0,2750	1,0625	1,1975
0,3000	1,0625	1,1975
0,3250	1,0625	1,1975
0,3500	1,0625	1,1975

El coeficiente  $k_{\tau}$  se obtiene de las siguientes ecuaciones en función de r/d:

Para  $\sigma=500$  MPa

$$k_{\tau} = -12605(r/d)^6 + 12811(r/d)^5 - 4546,5(r/d)^4 + 551,46(r/d)^3 + 36,305(r/d)^2 - 14,179(r/d) + 2,0423 \quad (9)$$

Para  $\sigma=1200$  MPa

$$k_{\tau} = 5686,4(r/d)^6 - 8906,1(r/d)^5 + 5478,6(r/d)^4 - 1716,5(r/d)^3 + 297,71(r/d)^2 - 28,804(r/d) + 2,5119 \quad (10)$$

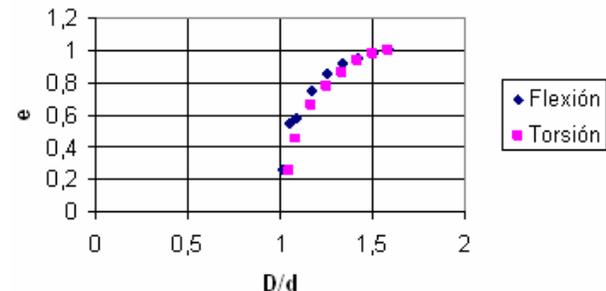
Ya se planteó antes que estas ecuaciones pueden utilizarse cuando el diámetro mayor en el cambio de sección es el doble del diámetro menor. Si la relación D/d es distinta de 2 es necesario determinar el coeficiente de corrección  $\psi$  (Figura 5).  $\psi$  en función de la relación D/d y del tipo de sollicitación. (Curva 1 para la flexión, curva 2 para la torsión).

$$k_{\sigma} = 1 + \epsilon [(k_{\sigma})_0 - 1] \quad (11)$$

Donde:

$(k_{\sigma})_0$  ó  $(k_{\tau})_0$ : es el coeficiente efectivo determinado mediante los gráficos de las figuras 3 ó 4; tablas 1 ó 2; o a través de las ecuaciones (7), (8), (9), (10).

Para la torsión se procede de igual manera pero se determina entonces el  $k_{\tau}$ .



**Figura 5.** Coeficiente de corrección.

En la siguiente tabla se muestra el comportamiento del coeficiente de corrección:

**Tabla No. 3.** Coeficiente de corrección.

D/d	Flexión	Torsión
1,0000	0,0000	0,0000
1,0166	0,2666	0,0000
1,0498	0,5498	0,2500
1,0830	0,5830	0,4498
1,1660	0,7500	0,6660
1,2500	0,8496	0,7832
1,3330	0,9160	0,8650
1,4160	0,9480	0,9320
1,5000	0,9800	0,9800
1,5830	1,0000	1,0000

Las ecuaciones que permiten determinar el coeficiente son:

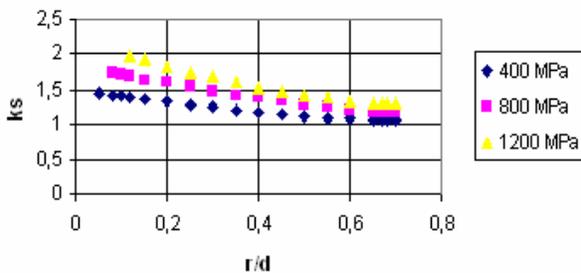
Para la flexión:

$$\begin{aligned} \varepsilon = & -1535,6(D/d)^6 + 12117(D/d)^5 - 39678(D/d)^4 + \\ & + 69015(D/d)^3 - 67255(D/d)^2 + \\ & + 34819(D/d) - 7482,3 \end{aligned} \quad (12)$$

Para la torsión:

$$\begin{aligned} \varepsilon = & -670,5(D/d)^6 + 5424,5(D/d)^5 - 18244(D/d)^4 + \\ & + 32651(D/d)^3 - 32799(D/d)^2 + \\ & + 17538(D/d) - 3900,1 \end{aligned} \quad (13)$$

En el caso de árboles escalonados sometidos a tracción - compresión también se expresa la influencia de la concentración de tensiones mediante el coeficiente  $k_{\sigma}$ . La gráfica que muestra el comportamiento de este se muestra en la figura 6 como función de la relación r/d y el límite de resistencia del material.



**Figura 6.** Coeficiente efectivo de la concentración de tensiones en la tracción - compresión de árboles escalonados

**Tabla No. 4.** Coeficiente efectivo de la concentración de tensiones en la tracción - compresión de árboles escalonados.

r/d	$\sigma=400$ MPa	$\sigma=800$ MPa	$\sigma=1200$ MPa
0,05	1,45		
0,08	1,41	1,730	
0,1	1,40	1,700	
0,12	1,39	1,698	1,975
0,15	1,36	1,640	1,920
0,2	1,32	1,600	1,830
0,25	1,28	1,540	1,750
0,3	1,26	1,460	1,675
0,35	1,205	1,420	1,600
0,4	1,18	1,375	1,525
0,45	1,14	1,325	1,460
0,5	1,12	1,275	1,420
0,55	1,10	1,250	1,375
0,6	1,08	1,200	1,340
0,65	1,06	1,175	1,300
0,67	1,06	1,160	1,298
0,68	1,06	1,160	1,298
0,7	1,06	1,160	1,298

Mediante las ecuaciones (8), (9) y (10) es posible obtener también los valores de este coeficiente.

Para  $\sigma=400$  MPa.

$$\begin{aligned} k_{\sigma} = & 53,788(r/d)^6 - 127,27(r/d)^5 + 117,79(r/d)^4 - \\ & - 52,942(r/d)^3 + 12,09(r/d)^2 - 2,076(r/d) + 1,5279.. \end{aligned} \quad (14)$$

$R^2 = 0,9988$

Para  $\sigma=800$  MPa.

$$\begin{aligned} k_{\sigma} = & 76,192(r/d)^6 - 158,67(r/d)^5 + 123,56(r/d)^4 - \\ & - 43,312(r/d)^3 + 6,7267(r/d)^2 - 5,285(r/d) + 1,8251 \end{aligned} \quad (15)$$

$$R^2 = 0,9987$$

Para  $\sigma = 1200$  MPa.

$$k_t = 191,8(r/d)^6 - 478,37(r/d)^5 + 471,26(r/d)^4 - 231,67(r/d)^3 + 60,27(r/d)^2 - 9,519(r/d) + 2,5651 \quad (16)$$

$$R^2 = 0,9998$$

Para los árboles donde los concentradores de tensión sean chaveteros los coeficientes  $k_{\sigma}$  y  $k_{\tau}$  se determinan de las tablas 5 y 6 respectivamente.

**Tabla No. 5.** Coeficiente efectivo de la concentración de tensiones normales en árboles con chaveteros

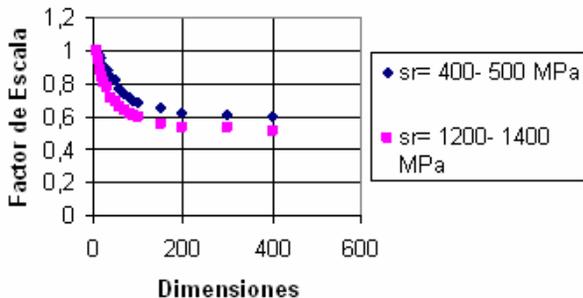
$\sigma_f$ (MPa)	500	750	1000
$k_{\tau}$	1.5	1.75	2.0

**Tabla No. 6.** Coeficiente efectivo de la concentración de tensiones tangenciales en árboles con chaveteros.

$\sigma_f$ (MPa)	600	700	800	900	1000
$k_{\tau}$	1.5	1.6	1.7	1.8	1.9

**Influencia de las dimensiones absolutas de las piezas.**

Los ensayos demuestran que mientras mayores sean las dimensiones absolutas de las piezas, tanto menor será el límite de resistencia a la fatiga de las mismas. La influencia de este factor se expresa a través del **coeficiente de influencia de las dimensiones absolutas de la sección (factor de escala)**. El mismo se determina del gráfico de la figura 7 en función del límite de resistencia de la pieza y las dimensiones de la misma:



**Figura 7.** Factor de escala.

La curva superior corresponde a los aceros de límite de resistencia 400 - 500 MPa y la inferior a los aceros de límite de resistencia 1200 - 1400 MPa. Para valores intermedios del límite de resistencia se debe interpolar entre las dos curvas. Por falta de datos experimentales se toma  $k_{\sigma} = k_{\tau}$ .

El gráfico anterior se obtuvo de la tabla que se muestra a continuación:

**Tabla No. 7.** Factor de escala.

d (mm)	$\sigma = 400- 500$ MPa	$\sigma = 1200-1400$ MPa
6,5	1,000	1,000
10	0,980	0,944
15	0,960	0,884
20	0,920	0,840
25	0,899	0,810
30	0,880	0,780
40	0,840	0,720
50	0,820	0,700
60	0,77	0,66
70	0,74	0,64
80	0,72	0,62
90	0,7	0,61
100	0,68	0,6
150	0,648	0,56
200	0,625	0,542
300	0,61	0,532
400	0,6	0,52

Las ecuaciones siguientes permiten determinar el valor de este coeficiente.

Para  $\sigma = 400 - 500$  MPa

$$\epsilon = -4 \times 10^{-15} * d^6 + 4 \times 10^{-12} * d^5 - 2 \times 10^{-09} * d^4 + 2 \times 10^{-07} * d^3 + 10^{-05} * d^2 - 0,0055 * d + 1,0333 \quad (17)$$

Para  $\sigma = 1200 - 1400$  MPa.

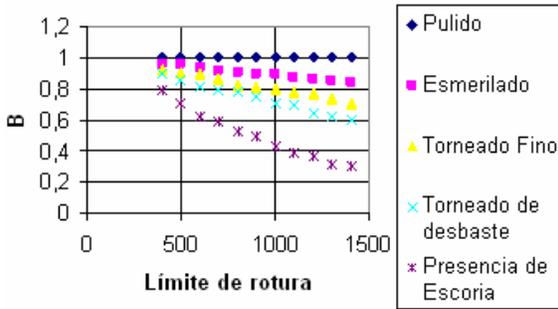
$$\epsilon = 2 \times 10^{-14} * d^6 - 2 \times 10^{-11} * d^5 + 9 \times 10^{-09} * d^4 - 2 \times 10^{-06} * d^3 + 0,0002 * d^2 - 0,0157 * d + 1,0829 \quad (18)$$

**Influencia de la calidad de la superficie y del acabado superficial:  $\beta$ .**

Se ha demostrado por los ensayos realizados que el mal tratamiento de la superficie de la pieza reduce el límite de resistencia a la fatiga.

La influencia de este factor esta expresada por el coeficiente  $\beta$ . El siguiente nomograma expresa

esta dependencia en función del límite de resistencia y del acabado superficial.



**Figura 8.** Influencia de la calidad de la superficie y del acabado superficial.

En la siguiente tabla también se obtienen los valores del coeficiente de influencia de la calidad de la superficie.

**Tabla No. 8.** Influencia de la calidad de la superficie y del acabado superficial.

$\sigma$ (MPa)	Pulido	Esmerilado	Torneado o fino	Torneado de desbaste	Presencia de escoria
400	1	0,960	0,930	0,900	0,790
500	1	0,958	0,902	0,850	0,705
600	1	0,940	0,895	0,810	0,620
700	1	0,920	0,860	0,790	0,590
800	1	0,910	0,820	0,780	0,530
900	1	0,900	0,810	0,750	0,500
1000	1	0,894	0,800	0,708	0,430
1100	1	0,870	0,780	0,690	0,390
1200	1	0,865	0,770	0,640	0,370
1300	1	0,856	0,740	0,620	0,320
1400	1	0,840	0,710	0,600	0,310

Las ecuaciones que permiten obtener el valor del coeficiente de influencia de la calidad de la superficie son:

Para el pulido

$$\beta = 1 \quad (19)$$

Para el esmerilado

$$\beta = -8 \times 10^{-12} \sigma^6 + 4 \times 10^{-9} \sigma^5 - 9 \times 10^{-7} \sigma^4 + 0,0001 \sigma^3 - 0,0069 \sigma^2 + 0,2219 \sigma - 1,8596 \quad (20)$$

Para el torneado fino:

$$\beta = 10^{-11} \sigma^6 - 6 \times 10^{-9} \sigma^5 + 10^{-06} \sigma^4 - 0,0001 \sigma^3 + 0,0076 \sigma^2 - 0,2289 \sigma + 3,7114 \quad (21)$$

Para el torneado de desbaste:

$$\beta = -5 \times 10^{-12} \sigma^6 + 3 \times 10^{-9} \sigma^5 - 5 \times 10^{-07} \sigma^4 + 5 \times 10^{-5} \sigma^3 - 0,0028 \sigma^2 + 0,0664 \sigma + 0,4196 \quad (22)$$

En presencia de escoria:

$$\beta = -2 \times 10^{-12} \sigma^6 + 9 \times 10^{-10} \sigma^5 - 2 \times 10^{-7} \sigma^4 + 10^{-5} \sigma^3 - 0,0001 \sigma^2 - 0,0238 \sigma + 1,567 \quad (23)$$

**Coefficiente de sensibilidad del material a la asimetría del ciclo ( $\phi_a, \phi_b$ ).**

Se determina como función de  $\sigma_r$  de la tabla No. 9.

**Tabla No. 9.** Coeficiente de sensibilidad del material a la asimetría del ciclo (Tabla 12.1 página 329.)

Coeficientes	$\sigma$ (MPa)				
	320 – 420	400 – 500	500 – 750	700 – 1050	1050 – 1250
$\phi_a$	0	0	0	0.10	0.20
$\phi_b$	0	0	0.05	0.05	0.10

**Determinación del coeficiente de seguridad a las deformaciones plásticas.**

También debe garantizarse la resistencia del material a las deformaciones plásticas. Para ello se determina el coeficiente de seguridad a estas deformaciones. O sea:

- Para tensiones normales.

$$n_\sigma = \frac{\sigma_f}{\sigma_{MAX}} \quad (24)$$

- Para tensiones tangenciales.

$$n_\tau = \frac{\tau_f}{\tau_{MAX}} \quad (25)$$

- En el caso que existan tensiones combinadas.

$$n = \frac{n_\sigma n_\tau}{\sqrt{n_\sigma^2 + n_\tau^2}} \quad (26)$$

De los coeficientes de seguridad determinados, se escoge el menor de ellos y se compara con el coeficiente de seguridad recomendado.

## Software Fatiga 1.0. Sistema para la comprobación a la fatiga de árboles y ejes.

**Fatiga V 1.0:** es un programa para el cálculo del coeficiente de seguridad a la fatiga en árboles escalonados y con chaveteros y la evaluación de los conocimientos que poseen los estudiantes del tema Fatiga. Aunque fue diseñado con el propósito fundamental de ser utilizado con fines docentes puede utilizarse en el diseño y comprobación de los árboles.

Con Fatiga 1.0 es posible obtener el coeficiente de seguridad a la fatiga en árboles sometidos a la acción de cargas cíclicas considerando que los concentradores son escalones o chaveteros. Al finalizar la aplicación el programa valora el nivel de conocimientos que tiene el usuario sobre el tema tratado.

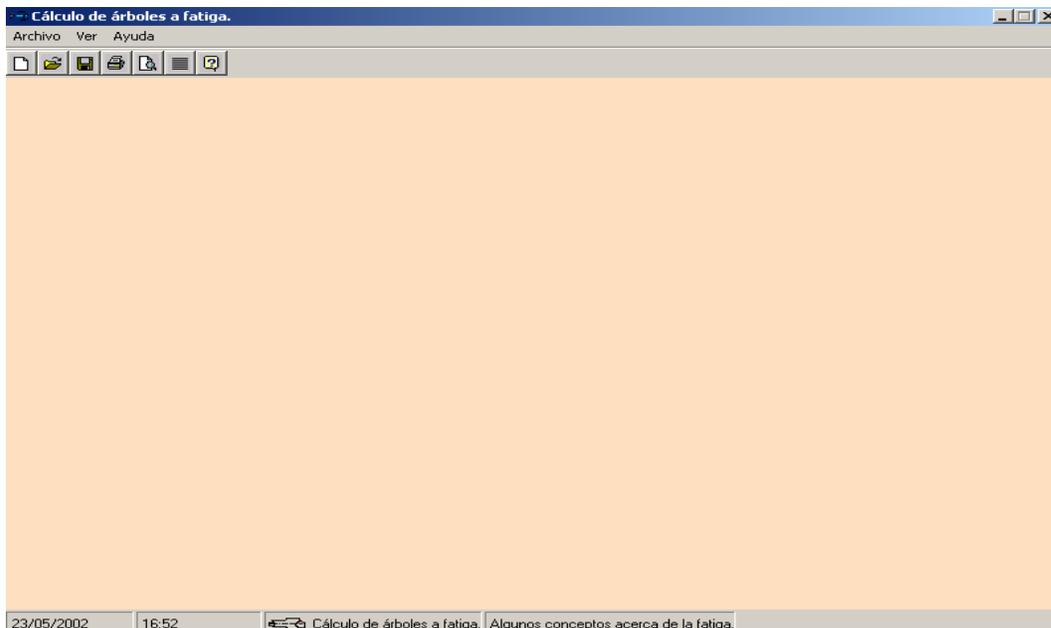


Figura 9. Ventana principal del programa.

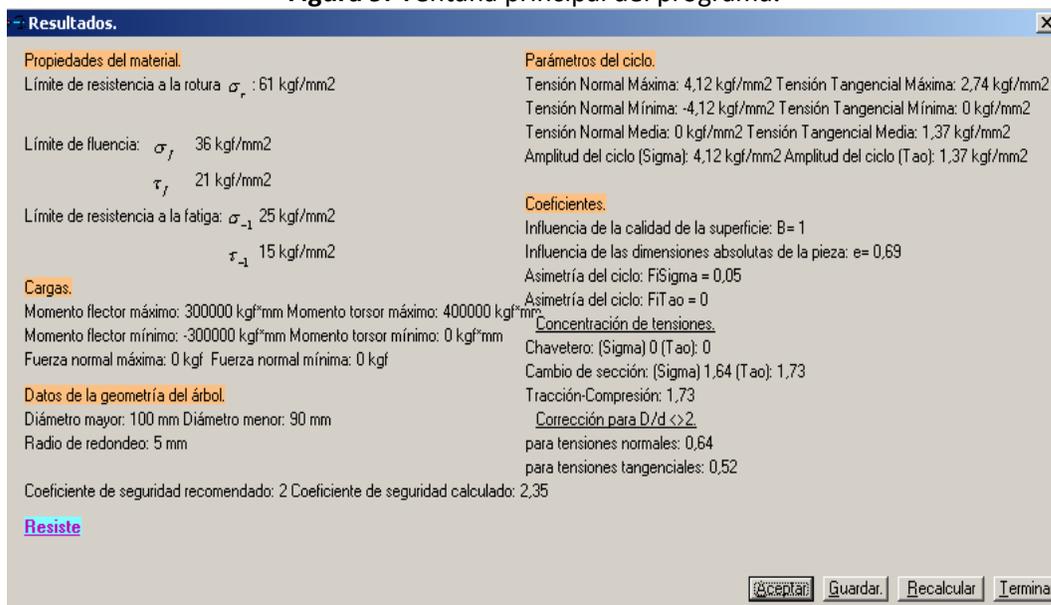


Figura 10. Ventana Resultados de los cálculos.

### 3. Conclusiones.

- En base a los resultados y a las observaciones realizadas se puede concluir que:
- La información que brindan las gráficas  $\sigma$ -N y  $\sigma_{media}$ - $\sigma_s$  se pueden considerar propiedades mecánicas de los materiales, ya que pueden ser utilizadas para realizar el diseño y comprobación de elementos de máquinas y estructurales.
- Se muestran dichas gráficas para un acero para estructuras CT4.
- Algunos de los coeficientes que influyen sobre el límite de resistencia a la fatiga se pueden determinar de forma gráfica y analítica.
- Basado en lo antes expuesto se diseña el software Fatiga .exe 1.0 para la comprobación a la fatiga de árboles y ejes.

### 4. Referencias.

1. **BEER, F. y JHONSTON, R.** *Mechanics of Materials*. Nueva York: Editorial Mc Graw Hill, 1992. 479 p.
2. **FEODOSIÉV, V.** *Resistencia de Materiales*. vols. 2 La Habana: Editorial Pueblo y Educación, 1979.
3. **HEARN, E. J.** *Mechanics of Materials. An Introduction to the Mechanics of Elastic and Plastic Deformation of Solids and Structural Materials*. vols. 2. 3ra ed. Oxford: Editorial Butterworth-Heinemann, 2000.
4. *Mechanical Engineering Handbook*. 2da ed. Nueva York: 1997. Editorial John Wiley & Sons, Inc.
5. **MEGSON, T. H. G.** *Strength of materials for civil engineers*. Londres: Editorial Edward Arnold, 1983. 245 p.
6. **PILKEY, W. D.** *Peterson's stress concentration factor*. 2da ed. Nueva York: Editorial John Wiley & Sons, Inc, 1997.
7. **PUSKAR, A. y GOLOVIN, A. S.** *Fatigue in material: cumulative damage processes*. Holanda: Editorial Elsevier, 1970. 316 p.
8. **SHIGLEY, J. E. y MISCHKE, C. R.** *Diseño en Ingeniería Mecánica*. México: Editorial Mc Graw Hill, 1990.
9. **STIOPIN, P. A.** *Resistencia de Materiales*. 6ta ed. Moscú: Editorial Mir, 1976. 371 p.
10. **YOUNG, W. C. y BUDINES, R. G.** *Roark's Formulas for stress and strain*. 7ma ed. Editorial Mc Graw Hill, 1992.
11. **ALMAGUER, P.** *Informatización de la asignatura Resistencia de materiales en la Universidad de Holguín*. Trabajo de Diploma, Universidad de Holguín, Holguín. Cuba. 2002.

**P. Almaguer Zaldivar<sup>1</sup>, H. Santiago Cuenca<sup>1</sup>, L. Pérez Vallejo<sup>2</sup>**

1. Departamento de Mecánica Aplicada. Facultad de Ingeniería  
Universidad de Holguín. Holguín. Cuba.

E-mail: [pavel@facing.uho.edu.cu](mailto:pavel@facing.uho.edu.cu) , [hsantiago@facing.uho.edu.cu](mailto:hsantiago@facing.uho.edu.cu)

2. Departamento de Ingeniería Industrial. Facultad de Ingeniería Industrial  
Universidad de Holguín. Holguín. Cuba.

E-mail: [lidia@facii.uho.edu.cu](mailto:lidia@facii.uho.edu.cu)