

## 5

# FATIGA: TENSION UNIAXIAL MEDIA+ALTERNA

## 1. ENSAYO DE FATIGA CON COMPONENTE MEDIA NO NULA

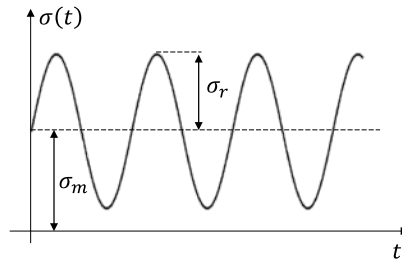
---

En el Tema anterior se ha presentado el ensayo de fatiga de la probeta rotatoria de Moore, de donde se obtiene la curva de fatiga  $\log\sigma_f - \log N$  de la probeta, que más adelante se ha adaptado a la pieza a través de los coeficientes modificativos. Finalmente se ha modificado nuevamente dicha curva para el caso en que el punto más solicitado de la pieza se halle en una zona de concentración de tensiones.

En cualquier caso, los estados tensionales tratados en el Tema anterior han sido puramente alternos, es decir tenían una componente media nula. No obstante, a menudo esta componente media no es nula: en la Figura 1 se muestra un estado de este tipo, con las definiciones matemáticas de lo que se entiende por tensión media  $\sigma_m$  y alterna  $\sigma_r$ .

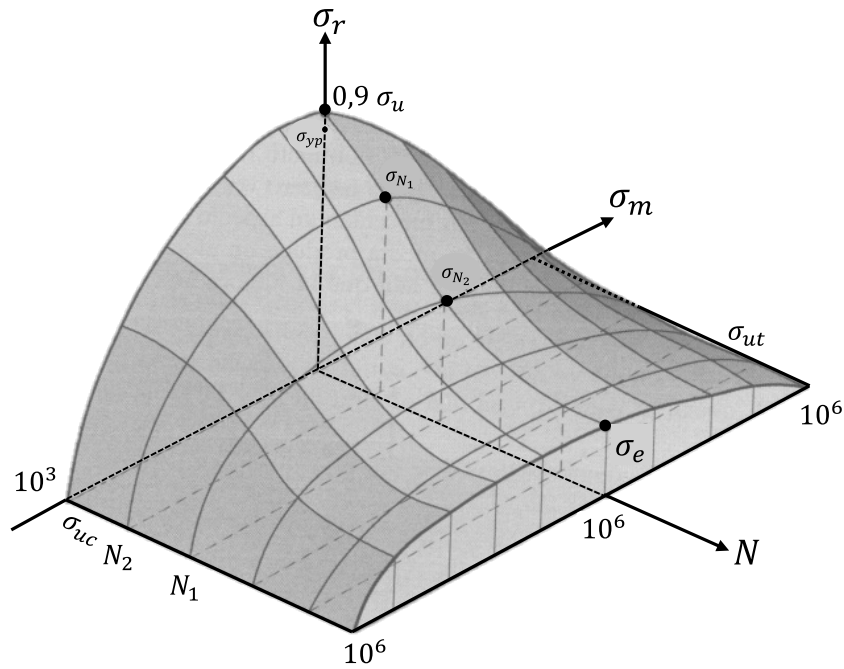
$$\sigma_m = \frac{\sigma_{max} + \sigma_{min}}{2} \quad (1a)$$

$$\sigma_r = \frac{\sigma_{max} - \sigma_{min}}{2} \quad (1b)$$



**Figura 1. Estado tensional con componente media no nula.**

Para caracterizar la respuesta a fatiga de estos estados tensionales se ensayan distintas combinaciones de tensión media + alterna y se registra la duración  $N$  de cada una de ellas, dando como resultado una nube de puntos  $\sigma_m - \sigma_r - N$ . El límite inferior de esta nube de puntos se aproxima mediante una superficie denominada diagrama de Haigh, mostrada en la Figura 2. Obsérvese en la figura que el límite de fatiga es  $\sigma_e$ , por lo tanto la superficie dibujada es la correspondiente a la pieza según lo explicado en el Tema anterior. Evidentemente, en el plano  $\sigma_r - N$  ( $\sigma_m = 0$ ) tenemos la curva estudiada en el Tema anterior (con la que se trabajaba en escala logarítmica,  $\log \sigma_r - \log N$ ). Por último, en la Figura 2 se constata que los estados tensionales con componente media de compresión tienen una mejor respuesta a fatiga que los de tracción; esto se debe a que la tensión media de compresión tiende a “cerrar” la grieta, dificultando el fallo a fatiga y alargando por tanto la duración  $N$  de la pieza.



**Figura 2.** Gráfica  $\sigma_m$ - $\sigma_r$ - $N$ , resultado del ensayo de la probeta rotatoria de Moore (diagrama de Haigh).

Para simplificar el diagrama de la Figura 2, se plantea una superficie aproximada tal que todas las combinaciones de tensión  $\sigma_m$ - $\sigma_r$  que producen el fallo en un determinado número  $N$  de ciclos quedan representadas sobre rectas (ver Figura 3). Existen otras muchas aproximaciones, pero las mostradas son las más empleadas por su sencillez, además de ser conservadoras. Al igual que se ha comentado en el tema anterior con la curva de  $\log \sigma_r$ - $\log N$  (curva de Basquin), las rectas de la Figura 3 son generalistas, válidas para cálculos preliminares o de poca responsabilidad; para cálculos que requieran una mayor precisión, es recomendable realizar ensayos  $\sigma_m$ - $\sigma_r$  con el acero particular que se vaya a utilizar, ya que en algunos casos los resultados pueden diferir bastante de las rectas de la Figura 3. Nuevamente, el problema es que estas campañas experimentales son muy costosas y por ello no es habitual disponer de esta información.

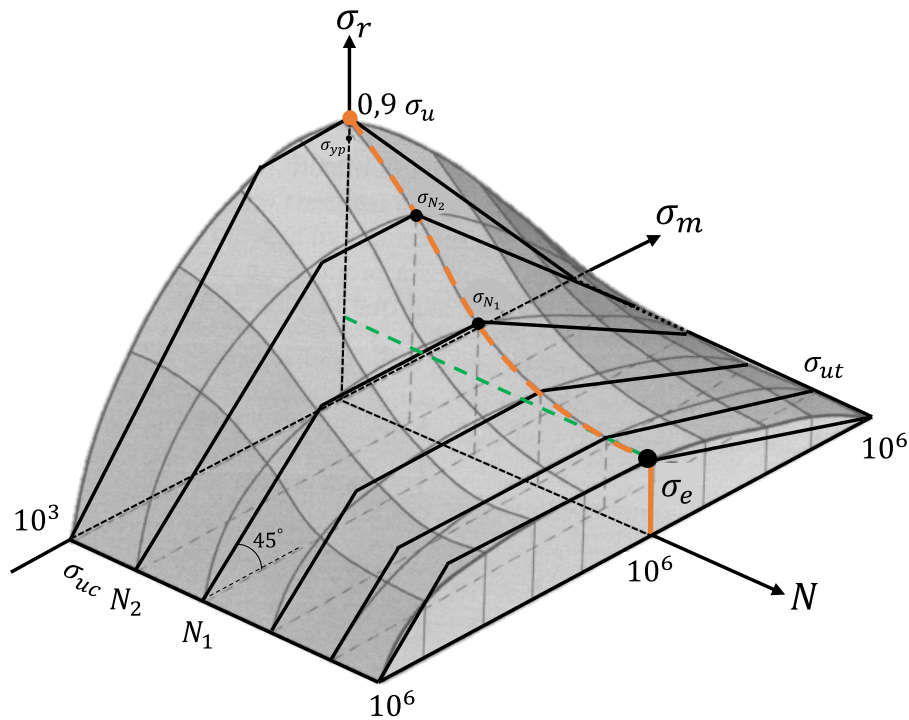


Figura 3. Aproximación del diagrama de Haigh mediante rectas.

Así, la superficie aproximada de fallo a fatiga que se va a emplear en adelante tiene la forma de la Figura 4 para materiales dúctiles y de la Figura 5 para frágiles, respectivamente. Nótese que la única diferencia entre un material dúctil y otro frágil es que el eje  $\sigma_m$  llega a  $\sigma_{yp}$  para material dúctil y a  $\sigma_u$  para material frágil, tal y como corresponde al fallo estático en cada caso (y es que esos puntos corresponden a  $\sigma_r=0$ , es decir al fallo estático).

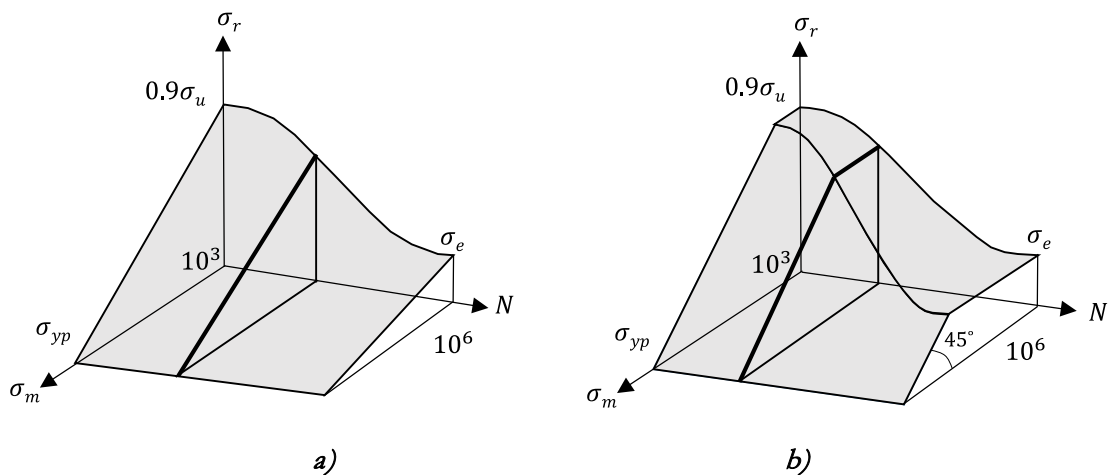


Figura 4. Superficie de fatiga para materiales dúctiles: a) tensión media de tracción b) tensión media de compresión.

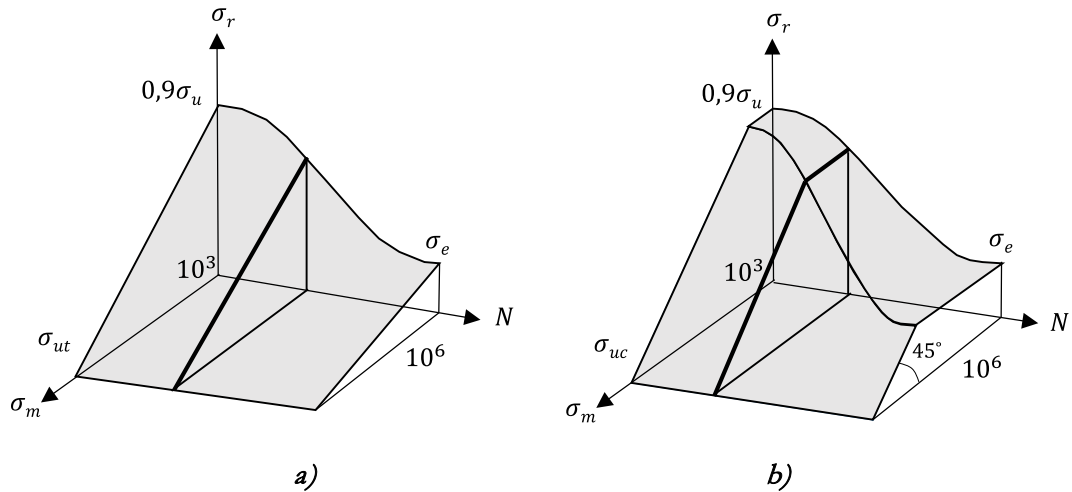


Figura 5. Superficie de fatiga para materiales frágiles: a) tensión media de tracción b) tensión media de compresión.

## 2. INTERPRETACIÓN DE LA SUPERFICIE DE FATIGA

Tal y como se ha explicado, en la superficie aproximada de fatiga de la Figura 4 y la Figura 5, los distintos planos  $\sigma_m-\sigma_r$  están compuestos por rectas sobre las cuales están todas las combinaciones de tensión  $\sigma_m-\sigma_r$  que dan lugar a una misma duración  $N$  de la pieza. En la Figura 6 se muestran las rectas correspondientes a tensiones medias de tracción, mientras que la Figura 7 muestra lo propio para tensiones medias de compresión; según lo indicado en el apartado anterior, el límite del eje  $\sigma_m$  es  $\sigma_{yp}$  o  $\sigma_u$  en función de si el material es dúctil o frágil, respectivamente. En la Figura 8 se ilustran los diagramas de la Figura 6 y Figura 7 (tensión media a tracción y a compresión) simultáneamente.

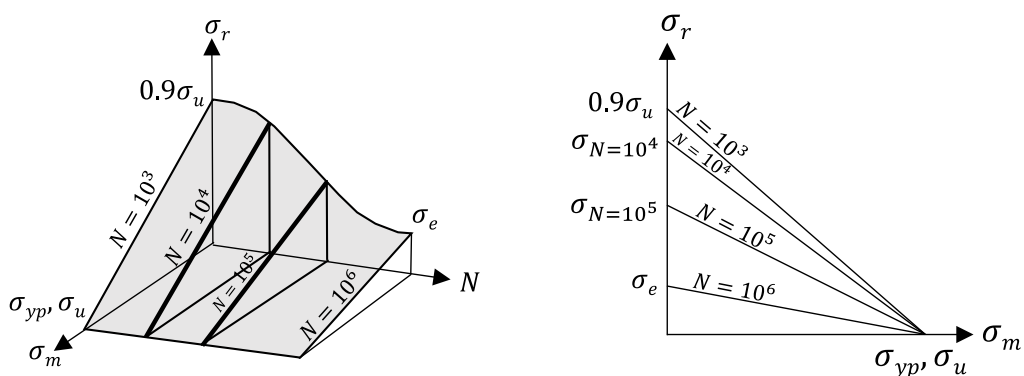


Figura 6. Combinaciones  $\sigma_m-\sigma_r$  que dan lugar a una duración  $N$  de la pieza (rectas de Soderberg o Goodman) con tensión media a tracción.

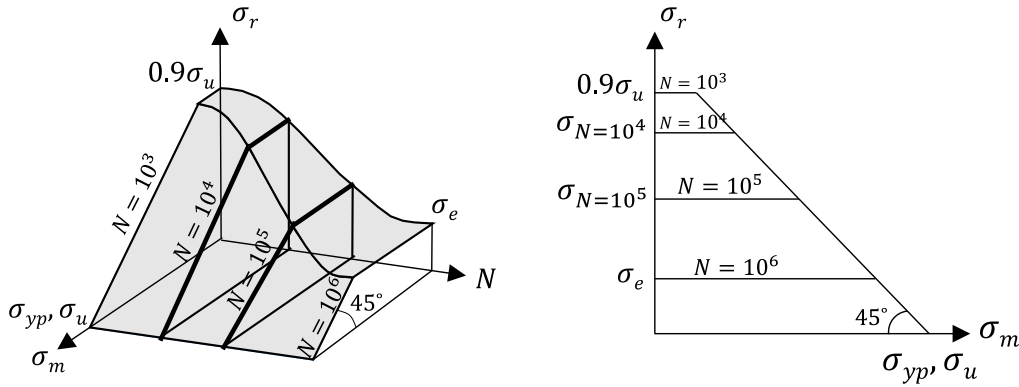


Figura 7. Combinaciones  $\sigma_m$ - $\sigma_r$  que dan lugar a una duración  $N$  de la pieza con tensión media a compresión.

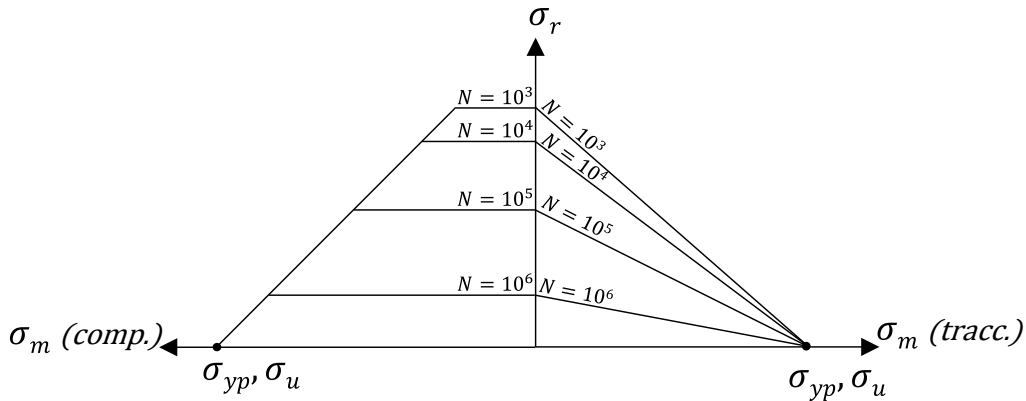


Figura 8. Combinaciones  $\sigma_m$ - $\sigma_r$  que dan lugar a una duración  $N$  de la pieza (con tensión media a compresión y a tracción).

En la Figura 6, con tensión media a tracción, cuando las rectas llegan a  $\sigma_{yp}$  (material dúctil) se las denomina rectas de Soderberg y cuando llegan a  $\sigma_u$  (material frágil) se las conoce como rectas de Goodman. Las ecuaciones de estas rectas de la Figura 6 son, aplicando semejanza de triángulos:

$$\frac{\sigma_r}{\sigma_N} + \frac{\sigma_m}{\sigma_{yp}} = 1 \text{ (Recta de Soderberg, para material dúctil)} \tag{2a}$$

$$\frac{\sigma_r}{\sigma_N} + \frac{\sigma_m}{\sigma_{ut}} = 1 \text{ (Recta de Goodman, para material frágil)} \tag{2b}$$

Donde se observa en la Figura 6,  $\sigma_N$  es la tensión alterna pura cuya duración  $N$  es la misma que la de la combinación  $\sigma_m$ - $\sigma_r$  que se está estudiando. Es decir, a efectos de fatiga el estado tensional  $\sigma_m$ - $\sigma_r$  y el estado tensional  $\sigma_r = \sigma_N$  ( $\sigma_m = 0$ ) son totalmente equivalentes, ya que ambos producen el fallo de la pieza al cabo de  $N$  ciclos.

En la Figura 7 las rectas son horizontales, lo cual significa que a un determinado valor de tensión alterna  $\sigma_r$  le corresponde una duración  $N$  independientemente del valor que tenga

la tensión media  $\sigma_m$ . La ecuación de la recta horizontal es por tanto:

$$\sigma_r = \sigma_N \quad (3)$$

Es decir, la magnitud de la tensión media de compresión no influye para nada en la vida a fatiga de la pieza; esto es cierto hasta un límite donde la recta horizontal se corta con otra recta inclinada a  $45^\circ$  que parte de  $\sigma_{yp}$  para material dúctil o  $\sigma_u$  para material frágil (ver Figura 7); sobre esta recta inclinada están las combinaciones  $\sigma_m - \sigma_r$  que cumplen la ecuación  $\sigma_m + \sigma_r = \sigma_{yp}$  en materiales dúctiles o  $\sigma_m + \sigma_r = \sigma_u$  en materiales frágiles, o sea las combinaciones  $\sigma_m - \sigma_r$  para las cuales la tensión máxima  $\sigma_m + \sigma_r$  alcanza el valor de  $\sigma_{yp}$  o  $\sigma_u$  provocando el fallo estático de la pieza. Por tanto, los estados tensionales  $\sigma_m - \sigma_r$  que caen sobre la recta de  $45^\circ$  corresponden al fallo estático.

Utilizando las gráficas de la Figura 6 o Figura 7, el problema a resolver puede ser de dos tipos:

- Dado el estado tensional  $\sigma_m - \sigma_r$  del punto más crítico de una pieza, calcular su duración  $N$  a fatiga. La solución al problema es única, ya que a un determinado estado  $\sigma_m - \sigma_r$  le corresponde una duración  $N$ .
- Dada una duración  $N$  a fatiga, calcular el estado tensional  $\sigma_m - \sigma_r$  que ha de tener el punto más crítico de una pieza para que el fallo se produzca al cabo de ese número de ciclos. En este caso el problema tiene infinitas posibles soluciones, ya que existen infinitas combinaciones  $\sigma_m - \sigma_r$  a las cuales les corresponde la misma duración  $N$ .

La Figura 9 muestra la resolución gráfica del primero de los problemas, tanto para el caso de tensión media de tracción (Figura 9a) como de compresión (Figura 9b). En lugar de trabajar directamente en la superficie tridimensional de fatiga, por simplicidad se trabaja primero en el plano  $\sigma_m - \sigma_r$  y después en el plano  $\sigma_r - N$ . En el plano  $\sigma_m - \sigma_r$  se obtiene la tensión alterna pura  $\sigma_N$  equivalente mediante la ecuación (2). Con este valor de  $\sigma_N$  se entra en el plano  $\sigma_r - N$  para despejar la duración  $N$  de la pieza; para ser más precisos, y según lo explicado en el Tema anterior, con el valor de  $\sigma_N$  se entra en el plano  $\log \sigma_r - \log N$  para despejar la duración  $N$  de la pieza usando las fórmulas del Tema anterior.

La Figura 10 muestra la resolución gráfica del segundo de los problemas, tanto para el caso de tensión media de tracción (Figura 10a) como de compresión (Figura 10b). En este caso el camino a seguir es el inverso: se trabaja primero en el plano  $\sigma_r - N$  (o mejor dicho,  $\log \sigma_r - \log N$ ) para calcular  $\sigma_N$  y después en el plano  $\sigma_m - \sigma_r$  de donde se obtienen las combinaciones

$\sigma_m$ - $\sigma_r$  que dan lugar a una duración  $N$  de la pieza. Se observa que en este caso existen infinitas soluciones  $\sigma_m$ - $\sigma_r$  ya que cualquier punto  $\sigma_m$ - $\sigma_r$  sobre la recta de Soderberg (material dúctil) o Goodman (material frágil) tiene la misma duración  $N$ .

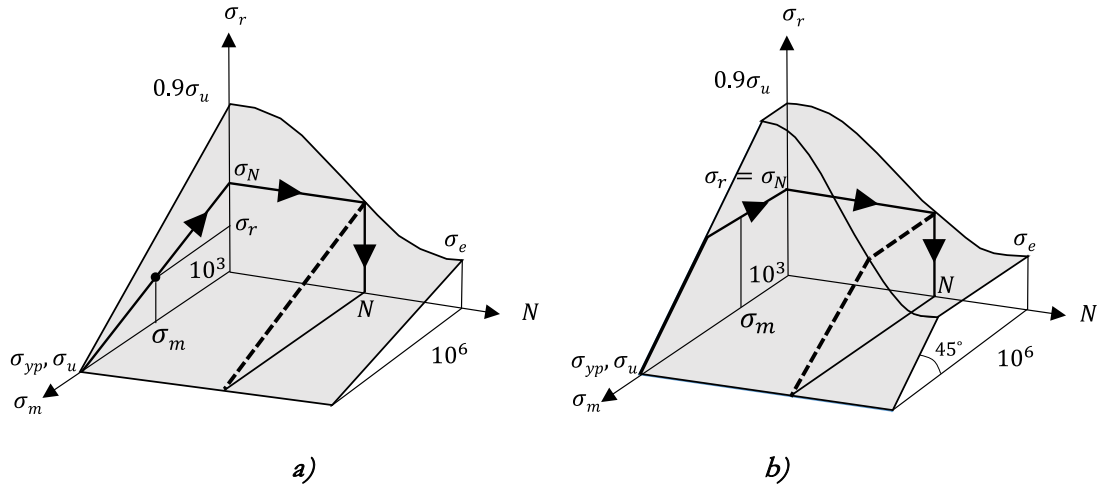


Figura 9. Cálculo de la duración  $N$  de la pieza para un determinado estado tensional  $\sigma_m$ - $\sigma_r$ :  
 a) tensión media de tracción b) tensión media de compresión.

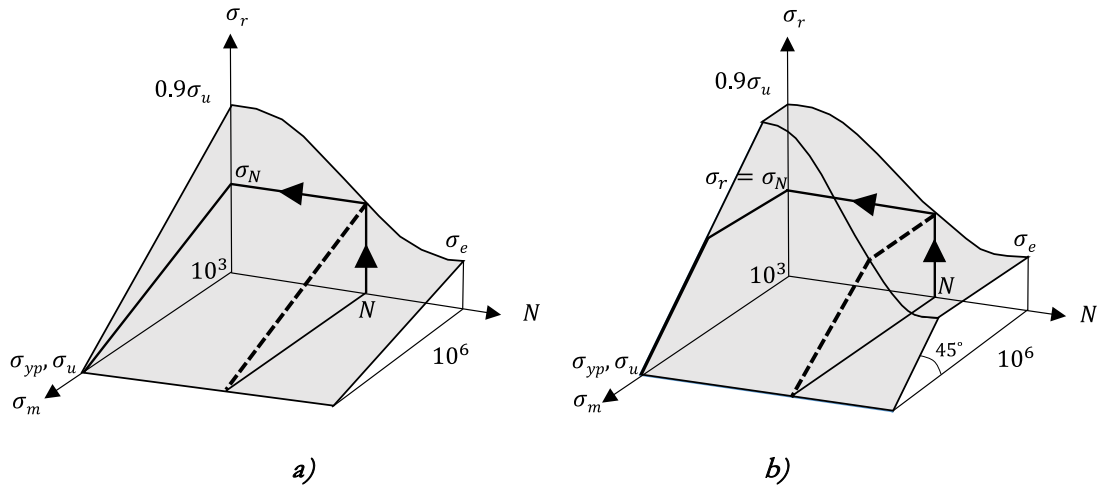


Figura 10. Cálculo de los estados tensionales  $\sigma_m$ - $\sigma_r$  para una determinada duración  $N$  de la pieza: a) tensión media de tracción b) tensión media de compresión.

### 3. EFECTO DE LA CONCENTRACIÓN DE TENSIONES Y DEL COEFICIENTE DE SEGURIDAD

Siguiendo con la forma de proceder del Tema anterior, el efecto de la concentración de tensiones y del coeficiente de seguridad se tiene en cuenta minorando la superficie de fatiga de la forma que se indica en la Figura 11 y Figura 12. Nuevamente, al haber minorado la



curva, en la misma se entra siempre con las tensiones  $\sigma_m$  y  $\sigma_r$  nominales.

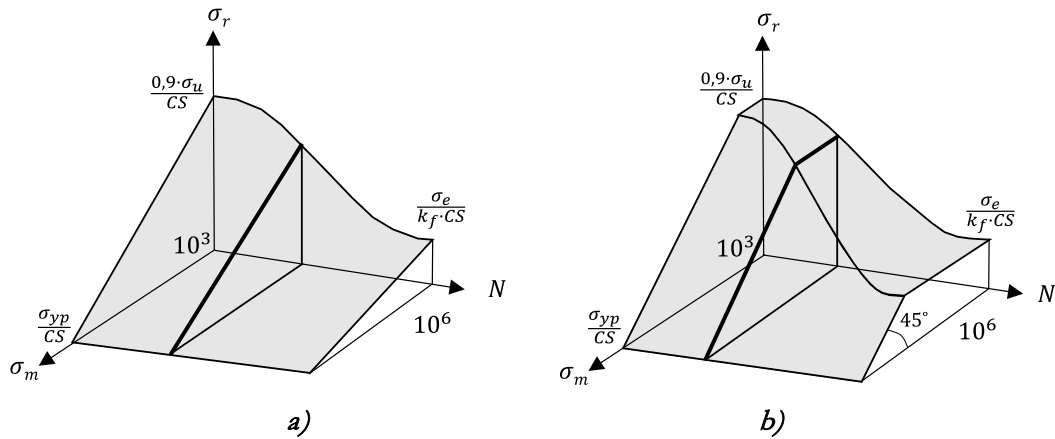


Figura 11. Superficie de fatiga de la pieza con concentración de tensiones y coeficiente de seguridad (material dúctil): a) tensión media de tracción; b) tensión media de compresión.

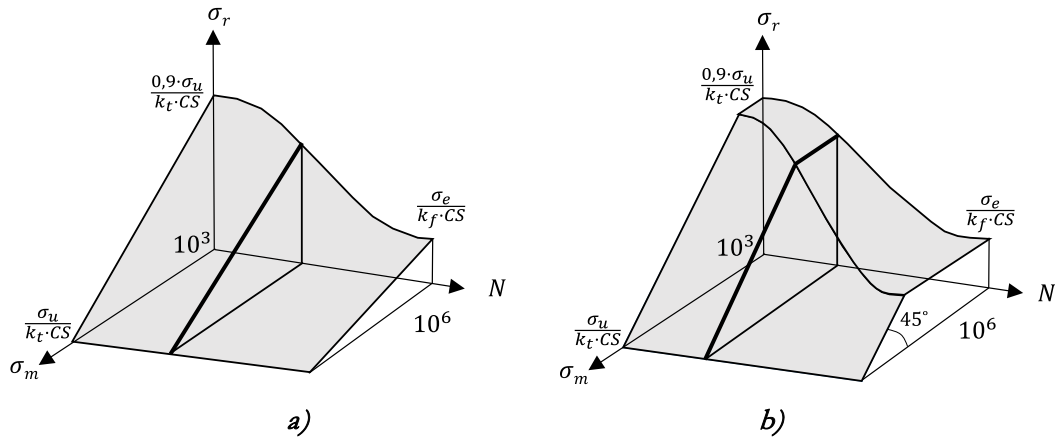


Figura 12. Superficie de fatiga de la pieza con concentración de tensiones y coeficiente de seguridad (material frágil): a) tensión media de tracción; b) tensión media de compresión.