

# FLUENCIA

Entendemos por fluencia la deformación plástica progresiva de un metal con el tiempo bajo condiciones de carga o tensión (bajas) constantes.

Por relajación entendemos la disminución con el tiempo de la tensión soportada por el material en condiciones de deformación constante.

En realidad, estos dos conceptos son dos aspectos de lo mismo: los materiales metálicos se deforman bajo condiciones de carga, aún inferiores al límite elástico, que se mantienen con el tiempo. Se produce tanto a alta como a baja temperatura, aunque el comportamiento en un caso y en otro, como veremos, es muy diferente.

Este es un fenómeno muy importante a tener en cuenta, pues puede desembocar en roturas bajo tensiones, como hemos dicho, muy inferiores al límite elástico del material.

Se distinguen dos regímenes de fluencia:

- Fluencia a baja temperatura, que se produce para temperaturas  $T < 0.3 T_F$ , siendo  $T_F$  la temperatura de fusión del material  $\rightarrow$  POCO IMPORTANTE
- Fluencia a alta temperatura: para  $T > 0.4 T_F$ .

Para temperaturas  $0.3T_F < T < 0.4T_F$  obtendremos un comportamiento intermedio.

### ● Fluencia a baja temperatura.

Es la menos importante de las dos, pues la velocidad de deformación disminuye rápidamente con el tiempo:

$$\boxed{\epsilon = k_1 \ln(k_2 t + 1) + \epsilon_0} \quad (\text{fluencia logarítmica})$$

$\epsilon_0$  = deformación elástica instantánea

$k_1 \ln(k_2 t + 1) \rightarrow$  componente plástica

$\rightarrow k_1, k_2$  constantes que dependen de la temperatura y la tensión; son tanto menores cuanto menores sean  $T$  y  $\sigma$ .

Se obtiene una deformación total muy pequeña, aunque estemos por debajo del límite elástico, las dislocaciones se mueven; poco a poco, pero se mueven, se van enmarañando... y poco más, pues necesitan una tensión mayor. Se obtiene, por tanto un endurecimiento progresivo por acritud, un incremento en la densidad de dislocaciones, y una maraña fina.

En la mayoría de las aplicaciones a baja temperatura, ni siquiera se tiene en cuenta, a menos que se trate de una aplicación de alta estabilidad dimensional.

## ● Fluencia a temperatura elevada

Se trata de un problema tecnológico muy importante; genera fallos por deformación excesiva o rotura. Si se mantiene la carga, al final siempre se llega hasta la rotura.

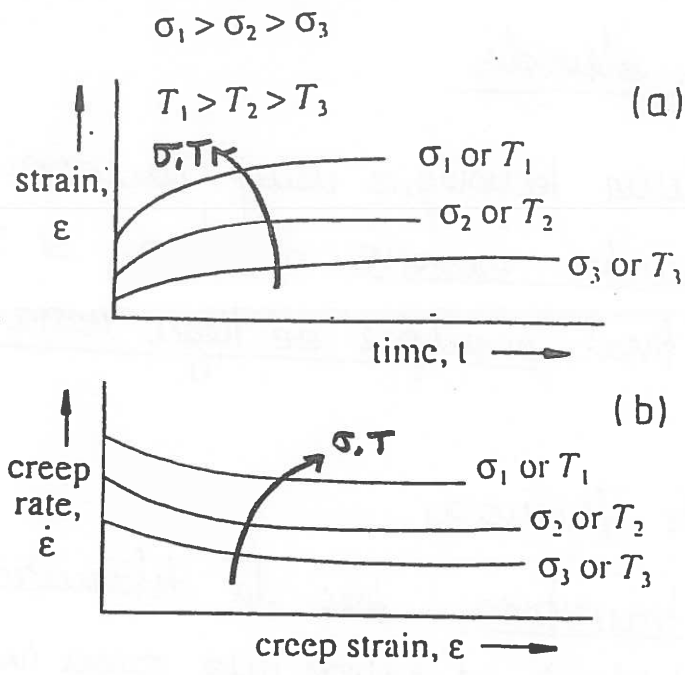
Etapas de la curva de fluencia:

- Fluencia primaria o transitoria: tras la deformación inicial instantánea (elástica) al aplicar una carga inferior al límite elástico, comienza esta etapa, caracterizada por una velocidad de deformación decreciente.
- Fluencia secundaria o estacionaria: se caracteriza por una velocidad de deformación, es, aproximadamente constante.
- Fluencia terciaria: el proceso se acelera, velocidad de deformación creciente hasta rotura final.

Un factor importantísimo de diseño es la pendiente de la curva, aunque influyen mucho las combinaciones de tensión y temperatura. Se intenta diseñar el material en composición para que la mayoría de su vida útil la pase en la zona secundaria.

$$\left. \begin{array}{l} \uparrow \sigma \text{ ó } \uparrow T \Rightarrow \\ \uparrow \epsilon_0 \\ \uparrow \dot{\epsilon}_s \\ \downarrow t_R \equiv \text{tiempo hasta rotura} \end{array} \right\}$$

# FLUENCIA A ATA T.



Vemos que, en cualquier caso, la curva se estabiliza con el tiempo, tiende a un valor de.

Figure 13. Schematic representation of the form of creep curves typically observed at temperatures of around  $0.3T_m$  or below presented (a) as plots of creep strain against time and (b) as plots of creep rate against creep strain (derived from (a)). After the initial strain on loading, the creep rate decreases with increasing creep strain. Also, with increasing stress at the same temperature ( $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$ ) or with increasing temperature at the same stress ( $T_1 > T_2 > T_3$ ), the initial strain on loading increases and faster creep rates are recorded at any given strain or time.

## FLUENCIA A TEMPERATURA ELEVADA Comportamiento completamente diferente!

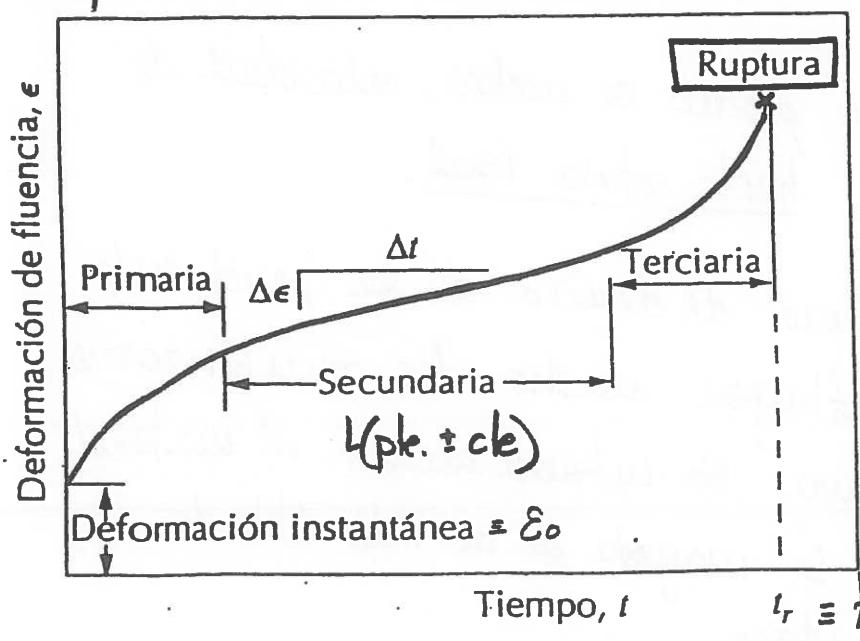


Figura 8.32 Curva típica de fluencia mostrando la deformación en función del tiempo a tensión constante y a elevada temperatura. La velocidad mínima de fluencia  $\Delta\epsilon/\Delta t$  es la pendiente del segmento lineal en la región secundaria. El tiempo a la ruptura  $t_r$  es el tiempo total a la ruptura.

$t_r \equiv$  tiempo de rotura

Otro parámetro fundamental a tener en cuenta es  $t_R$ , ¿cuánto tiempo queremos que la pieza aguante? ¿cada cuánto hemos de sustituirla por otra nueva? Evidentemente queremos que dure todo lo posible, pero es muy importante la aplicación que vaya a tener: habrá piezas que haya que cambiar en cuanto su deformación alcance un valor determinado y otras que podrán dejarse hasta su rotura.

### - Fluencia primaria

Es similar a la fluencia a baja temperatura en cuanto a que la velocidad de deformación en esta etapa es decreciente con el tiempo. Se aproxima en general con la expresión:

$$\epsilon = \epsilon_0 + \beta \cdot t^{1/3}$$

La deformación se debe principalmente al movimiento de dislocaciones, que ahora lo tienen más fácil por el nivel de temperatura: se multiplican, se entredan... se produce un endurecimiento por acritud no compensado con una restauración simultánea (por eso va disminuyendo la pendiente). Aumenta por tanto la densidad de dislocaciones, llegando en muchos casos al desarrollo de "celdillas" (igual que vemos en el endurecimiento por acritud) que evolucionan hacia una estructura de límites de subgrano.

## - Fluencia secundaria

Se caracteriza por tener una velocidad de deformación aproximadamente constante que se debe a la acción simultánea de varios mecanismos. Según la tensión y temperatura aplicadas, predominarán unos y otros, que son:

• Fluencia por dislocaciones. Se produce análogamente a la fluencia primaria, pero ahora está compensada: por un lado se produce un endurecimiento por la multiplicación y entrelazamiento de dislocaciones y por otro un ablandamiento debido a la restauración: anillados de grano, destrucción mutua, ... : la densidad de dislocaciones se mantiene más o menos constante

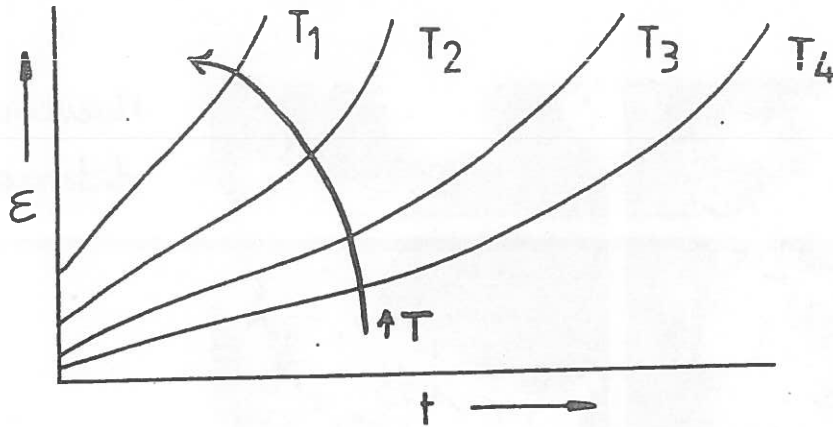
• Deslizamiento de bordes de grano <sup>intergranular</sup>: sólo es importante cuando el grano es fino, luego a altas temperaturas buscamos grano bajo o mejor monocristales.

• Fluencia difusional. Hasta ahora hemos relacionado la deformación plástica con el movimiento de dislocaciones, pero este mecanismo no tiene nada que ver con ellas. Produce deformación plástica a través de las vacantes.

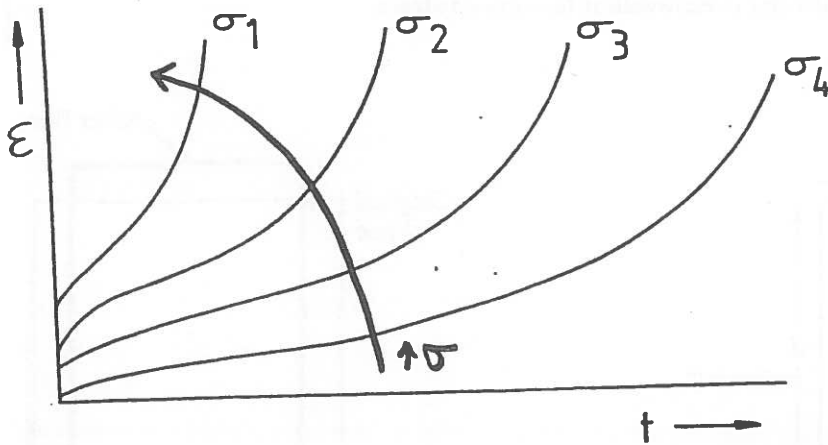
El número de vacantes en un cristal viene dado como una estadística de Boltzmann:

$$n = n_0 \cdot e^{-\Delta E/kT}$$

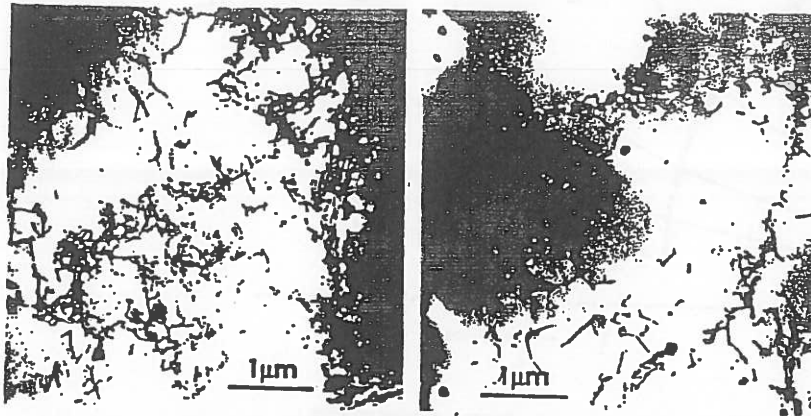
$\Delta E$  = energía necesaria para provocar una vacante.  
baja T: hay pocas, y crece exponencialmente con T.



**Figure 16.** Schematic creep curves at the same stress giving secondary creep rates of  $\dot{\epsilon}_1$ ,  $\dot{\epsilon}_2$ ,  $\dot{\epsilon}_3$  and  $\dot{\epsilon}_4$  at temperatures of  $T_1$ ,  $T_2$ ,  $T_3$  and  $T_4$  respectively ( $T_1 > T_2 > T_3 > T_4$ ), with the secondary creep rate increasing and the rupture life decreasing with increasing temperature.



**Figure 19.** Schematic creep curves at the same temperature giving secondary creep rates of  $\dot{\epsilon}_1$ ,  $\dot{\epsilon}_2$ ,  $\dot{\epsilon}_3$  and  $\dot{\epsilon}_4$  at stresses of  $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$ ,  $\sigma_3$  and  $\sigma_4$  respectively ( $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3 > \sigma_4$ ), with the secondary creep rate increasing and the rupture life decreasing with increasing stress.



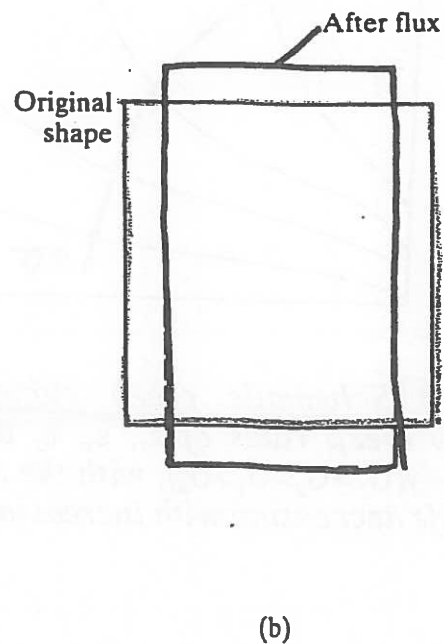
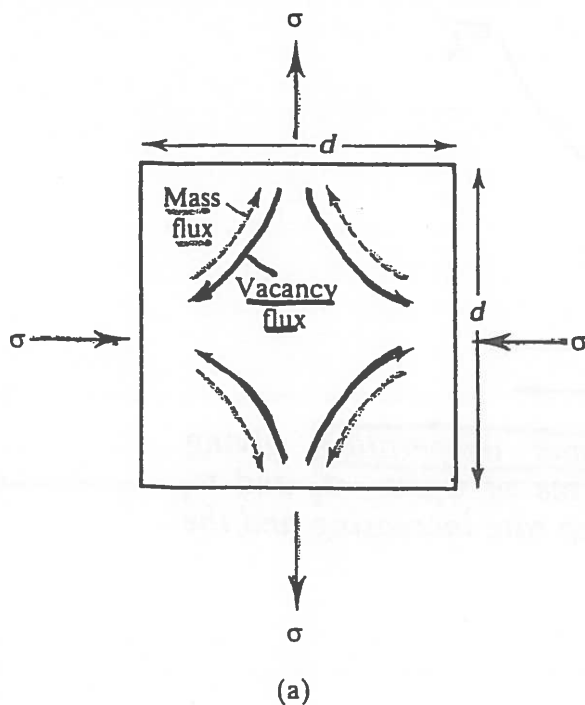
Fluencia por  
dislocaciones

(a) evolución hacia una (b) estructura de subgrano!

**Figure 31** Dislocation structures in copper crept at 688K, (a) after 1.0 ks and (b) after 268 ks, showing the change from the relatively uniform dislocation distribution to the development of a subgrain boundary structure as creep continues.

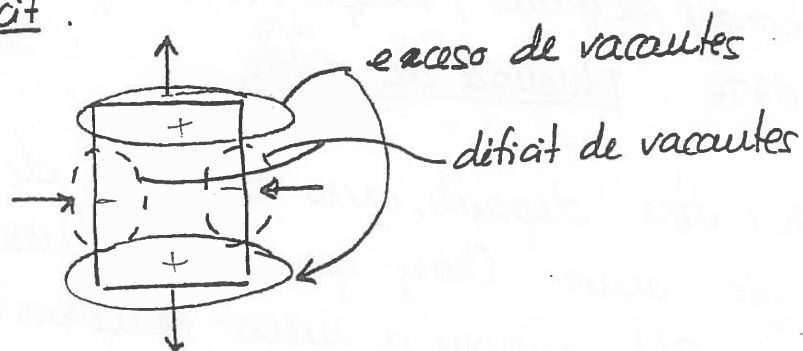
## Fluencia difusional

Nabarro-Herring creep results from a higher vacancy concentration in regions of a material experiencing a tensile stress vis-à-vis regions subject to a compressive stress. This results in a vacancy flux from the former to the latter areas, and a mass flux in the opposite direction (a). The resulting change in grain dimensions (b) is equivalent to a creep strain.

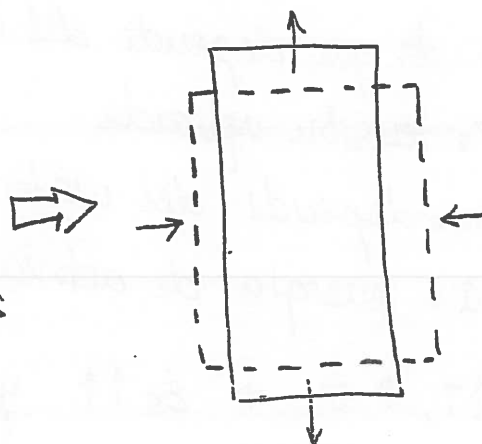
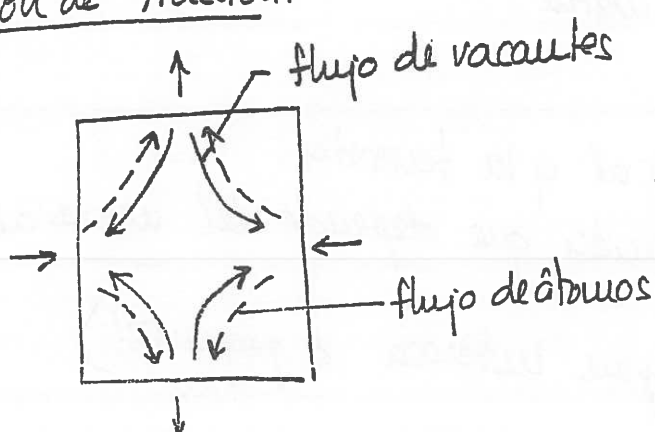




Cuando tenemos una pieza policristalina sin carga exterior,  $\Delta E$  es una constante, pero deja de serlo cuando se aplican tensiones exteriores. Al aplicarla, en los bordes de grano sometidos a tracción,  $\Delta E$  disminuye, y al ser fácil la nucleación de una vacante, aparece un exceso de las mismas. Lo contrario ocurre en los bordes de grano sometidos a compresión,  $\Delta E$  aumenta, y como es difícil nucleare una vacante, aparece un déficit.



Así, como deja de ser uniforme el número de vacantes, aparece un gradiente de vacantes que provoca un flujo de vacantes desde los bordes donde sobran hacia los bordes donde faltan (que un átomo se desplace en una dirección es equivalente a que un átomo se desplace en la contraria), luego se produce un alargamiento de los granos en la dirección de tracción.



Este fenómeno, a altas temperaturas se da muchísimo, mas las vacantes, además de ser muchas, se mueven muy fácilmente.

Tenemos dos variantes en la fluencia difusional, que vienen dadas por la forma de establecerse ese flujo:

- A través del interior de los granos, que se presenta para  $T$  muy altas ( $T > 0.7 T_F$ ): Fluencia de Nabarro-Herring

- A través de los bordes de grano, importante para temperaturas  $T < 0.7 T_F$ : Fluencia de <sup>coble</sup> ~~coble~~ no los es cómo moverse por el interior luego van por el borde

Que se produzca una u otra depende, como siempre, de cuál requiera una energía menor (hay que tener en cuenta que en la Fluencia de Coble, aunque a menor temperatura, ya hay energía local acumulada).

En general, la velocidad de deformación puede estimarse en metales puros policristalinos como:

$$\dot{\epsilon}_s = A \cdot \sigma^n \cdot e^{-Q/RT}$$

$A$  = de que depende del metal

$\sigma$  = tensión aplicada

$n$  = depende del material y la tensión

$Q$  = energía de activación que depende del material

( $\uparrow T, \uparrow \sigma \Rightarrow \dot{\epsilon}_s \uparrow \uparrow$  y me interesa  $\dot{\epsilon}$  pequeño!)

- $\sigma$  alto: predomina fluencia por dislocaciones
- $\sigma$  bajo: predomina fluencia difusional
- $\sigma$  muy elevado: no vale la expresión  $\rightarrow$  es una expresión exponencialmente con  $\sigma$

## - Fluencia terciaria

En esta etapa se acelera la deformación con el tiempo hasta alcanzar la rotura. Suele deberse a la combinación de varias causas entre las siguientes.

- Aumento de  $\sigma$  por la reducción de la sección de la pieza al ser estirada manteniendo  $F$  etc
- Inestabilidad mecánica; en la práctica, es imposible que la pieza sea perfectamente homogénea; habrá una zona más débil en la que se presentará una mayor velocidad de deformación, que hace que disminuya su sección (estricción localizada) y que se acelere el proceso.
- Inestabilidad microestructural. La forma y tamaño de los granos, precipitados, etc. van cambiando con la temperatura pues buscan su posición de equilibrio; la estructura de subgranos es muy inestable, pues tiene una gran acumulación de dislocaciones y por tanto de energía  $\rightarrow$  puede aparecer una recristalización que acelere el proceso.  
Coalescencia de precipitados: puede que los precipitados, con el tiempo y la temperatura, se disuelvan, y dejen de "sujetar", o engorden, disminuyendo su número y aumentando la distancia entre ellos: disminuye el

"incordio" a las dislocaciones y se acelera el proceso de deformación.

### Nucleación de microgrietas y cavidades intergranulares

↳ De cualquiera de las formas, la pieza acaba rompiendo!

### ● Influencia del tamaño de grano

- En cuanto a deslizamiento intergranular, como sabemos, nos interesan granos bastos, pues es un parámetro muy importante.
- En fluencia por dislocaciones, tiene una escasa influencia, pues se mueven por dentro de los subgranos y el tamaño de éstos no depende del tamaño del grano: las dislocaciones "no se enteran" del tamaño que tiene el grano original.
- En fluencia difusional, como las vacantes tienen que "viajar", cuanto más grande sea el grano, más largo es el "viaje", tanto por dentro del grano como por el borde. Por tanto, cuanto mayor sea el tamaño del grano mejor.

↳ A efectos de fluencia, cuanto más basto sea el grano, mejor.

$\dot{\epsilon} \propto d^{-n}$

} - Nabarro-Herring :  $n=2$

- Coble :  $n=3$

Se tiende, por tanto, a tamaños grandes, preferentemente orientados en la dirección de carga.

## ● Parámetros usuales para diseño

2 tipos de diseño  
estático

M195

son fundamentalmente dos, la velocidad de deformación de la etapa secundaria ( $\dot{\epsilon}_s$ ) y el tiempo hasta rotura ( $t_R$ ), variando  $t_R$  inversamente proporcional a  $\dot{\epsilon}_s$ .

Lo primero que hemos de tener en cuenta es el tiempo hasta rotura: hemos de fijar el tiempo que queremos que dure la pieza y su criterio de sustitución: si diseñamos p.e. un alabe de turbina, habrá de ser a deformación (sustituir la pieza cuando ésta alcanza una deformación determinada), pero para otro tipo de piezas esto no será muy importante y se diseñará a rotura.

Los datos necesarios se obtendrán a partir de ensayos, pero los ensayos de fluencia son muy caros, pues influye mucho la tensión aplicada, la temperatura, y sobre todo el tiempo que se mantienen. Por tanto, se realizan una serie de ensayos concretos y se obtienen más datos estimándolos en primera aproximación mediante interpolaciones y extrapolaciones.

Es muy frecuente la utilización de parámetros, que tratan de explicar la influencia relativa de las variables del problema. Uno de ellos es el parámetro de Larson-Miller:

$$LM = T(C + \log t_R)$$

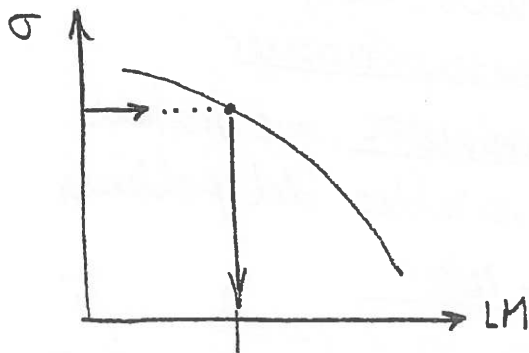
→ no se puede utilizar en aviones (por el  $t_R$ ).

$T$  = temperatura de trabajo en  $^{\circ}K$   
 $C$  = constante que depende del material que suele ser del orden de 20  
 $t_R$  = tiempo hasta rotura en horas.

↳ Temperatura y tiempo se comportan más o menos de la misma forma, pero como la temperatura es mucho más "agresiva", se pone  $t_r$  en escala logarítmica.

↳ Si dos materiales tienen el mismo parámetro de Larson-Miller, se comportan igual a fluencia, aunque tengan una diferente combinación de  $T$  y  $t_r$

El valor del parámetro LM varía con la tensión aplicada, luego hacemos ensayos para diferentes valores de tensión. Como para un nivel de tensión,  $\sigma$ , LM es una constante, obtenemos para un material todas las combinaciones de  $T$  y  $t_r$  para las que el material se comporta de la misma forma (que nos permite buscar las condiciones de  $T$  y  $t_r$  para el nivel de  $\sigma$  que precisamos)



mayor tensión  $\Rightarrow$  menor LM

$LM = T(C + \log t_r) \rightarrow$  quiero que trabaje a una  $T$  determinada, obtengo  $t_r$ , lo que me va a durar  
 $\rightarrow$  quiero que dure un tiempo  $t_r$ , obtengo la  $T$  máxima a la que puedo trabajar para conseguirlo

OTO!  $\rightarrow$  para diseñar a rotura; no me sirve para diseño a una deformación dada!

También podríamos obtener la tensión máxima a la que puede soportar la pieza para que trabajando a una temperatura  $T$  no dure un tiempo  $t_r$ ...

gran utilidad, en general, de este tipo de parámetros.

### ● Alaciones para fluencia

Vistos los mecanismos que provocan la fluencia, cualquier cosa que nos sirva para retrasarlos o entorpecerlos será buena:

- Redes compactas: se retrasa la fluencia difusional al tener menor movilidad atómica. (con una bcc, p.e. no hacemos nada)
- Alto punto de fusión, pues los problemas de fluencia aparecen a una determinada proporción de  $T_f$ ; cuanto más alta sea, mejor.
- Buen comportamiento a oxidación y corrosión, que a temperaturas elevadas serán importantes.
- Tamaño de grano en general basto y alargado según la dirección de la carga, como hemos visto
- Refuerzo por solución sólida para:
  - Disminuir la autodifusión
  - Interaccionar con las dislocaciones
- Estructura de precipitados que interaccionan con las dislocaciones
- Refuerzo de los límites de grano para:
  - Dificultar el deslizamiento
  - Entorpecer la generación de vacantes.

