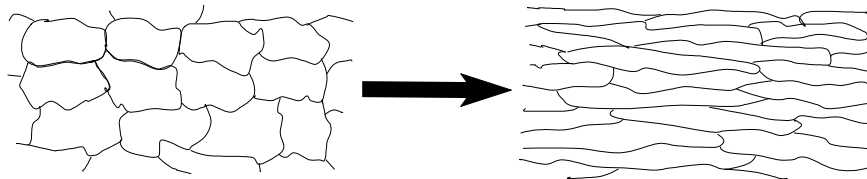


## FUNDAMENTOS GENERALES DEL CONFORMADO POR DEFORMACIÓN PLÁSTICA

### Introducción.

El proceso de fundición es el más antiguo que se conoce para obtener la forma que se desea en piezas metálicas, sin embargo los elementos fundidos suelen presentar unas propiedades mecánicas no muy buenas.

El objetivo de la deformación plástica, aparte del ya referido de darle forma, es mejorar el comportamiento mecánico de los materiales; así, se puede aumentar el límite elástico, variar la ductilidad, la dureza, etc., fomentando el carácter anelástico a base de golpes que alargan los granos metálicos, uniéndose unos con otros, y que originan una dirección preferente.



Con este procedimiento se pueden conseguir reducciones de sección de hasta el 95%, y puesto que el material se desplaza, adquiriendo una forma determinada, el desperdicio resultante es escaso o incluso nulo. Esta característica hace especialmente interesante el empleo de estos procesos para la obtención de una geometría próxima a la de la pieza diseñada, a los que seguirán operaciones posteriores de mecanizado, eliminando las creces de material hasta cumplir las especificaciones del plano, pero consiguiendo una importante reducción en el volumen de viruta arrancada.

El gran inconveniente de la deformación plástica radica en que, para hacer fluir un material en estado sólido, se han de realizar esfuerzos muy grandes, encareciendo enormemente los equipos necesarios para su realización.

La conformación se puede hacer en caliente o en frío. En caliente (por encima de la temperatura de recrystalización) el metal sufre un nuevo proceso de recrystalización o recuperación tras su deformación, pero precisa menos energía para conferirla, no originando endurecimiento por deformación.

En el presente capítulo se ofrecerán los conocimientos básicos de la teoría del conformado por deformación plástica de los metales, de modo que se puedan realizar evaluaciones razonables de las deformaciones obtenibles sin inestabilidad ni fractura, así como



de las fuerzas y trabajos necesarios, y para ejercerlos, las herramientas y equipos necesarios.

## Importancia de la técnica de conformación.

La evolución experimentada en el sector de la fabricación indica que la conformación, sobre todo en frío, se utiliza cada vez más frecuentemente. Las causas de ello son:

- **Propiedades de resistencia mecánica.** La conformación permite obtener una estructura de grano fino y adaptar las líneas de flujo o fibra del material a la forma de la pieza. Estas circunstancias producen una mejora de las propiedades de resistencia mecánica.

- **Exactitud de forma y calidad superficial.** Algunos procedimientos de conformación en frío (ej. laminación en frío de perfiles), permiten conseguir tolerancias más estrechas y una elevada calidad superficial, de tal forma que se pueden fabricar piezas listas para montaje.

- **Costes de material.** En la conformación plástica se configura la pieza por fluencia de las partículas de material, por lo que sólo es preciso emplear la cantidad necesaria para la pieza. Por ello, cuando se fabrica una pieza por conformación plástica, en una forma lista para su montaje, se consiguen unos costes de material mínimos. Cuando se precisa una elaboración de acabado con arranque de viruta, las piezas pueden ser conformadas previamente hasta un grado tal que para conseguir la forma acabada, solamente sea preciso eliminar una pequeña cantidad de material.

- **Cadencia de fabricación.** Puesto que en las piezas conformadas previamente sólo hay que eliminar pequeñas cantidades de material, se reduce el tiempo de trabajo consumido para cada pieza. Determinadas operaciones como, por ejemplo, la laminación en frío de perfiles acanalados y dentados, consiguen para grandes series de piezas, cadencias de fabricación esencialmente más rápidas que si se fabrican por fresado.

## Clasificación de los procesos de conformado por deformación plástica.

Se han desarrollado centenares de procesos para trabajar los metales destinados a aplicaciones específicas. Sin embargo, estos se pueden clasificar en un número reducido de clases, en función de las fuerzas aplicadas al material cuando se le da la forma requerida. Estas clases son:

**1. Procesos de compresión directa.** La fuerza se aplica a la superficie de la pieza que se trabaja y el metal fluye formando ángulo recto con la dirección de la compresión (forja y laminación).

**2. Procesos de compresión indirecta.** Se desarrollan fuerzas de compresión elevadas por reacción entre la pieza que se trabaja y la matriz (extrusión, embutición profunda, etc.).

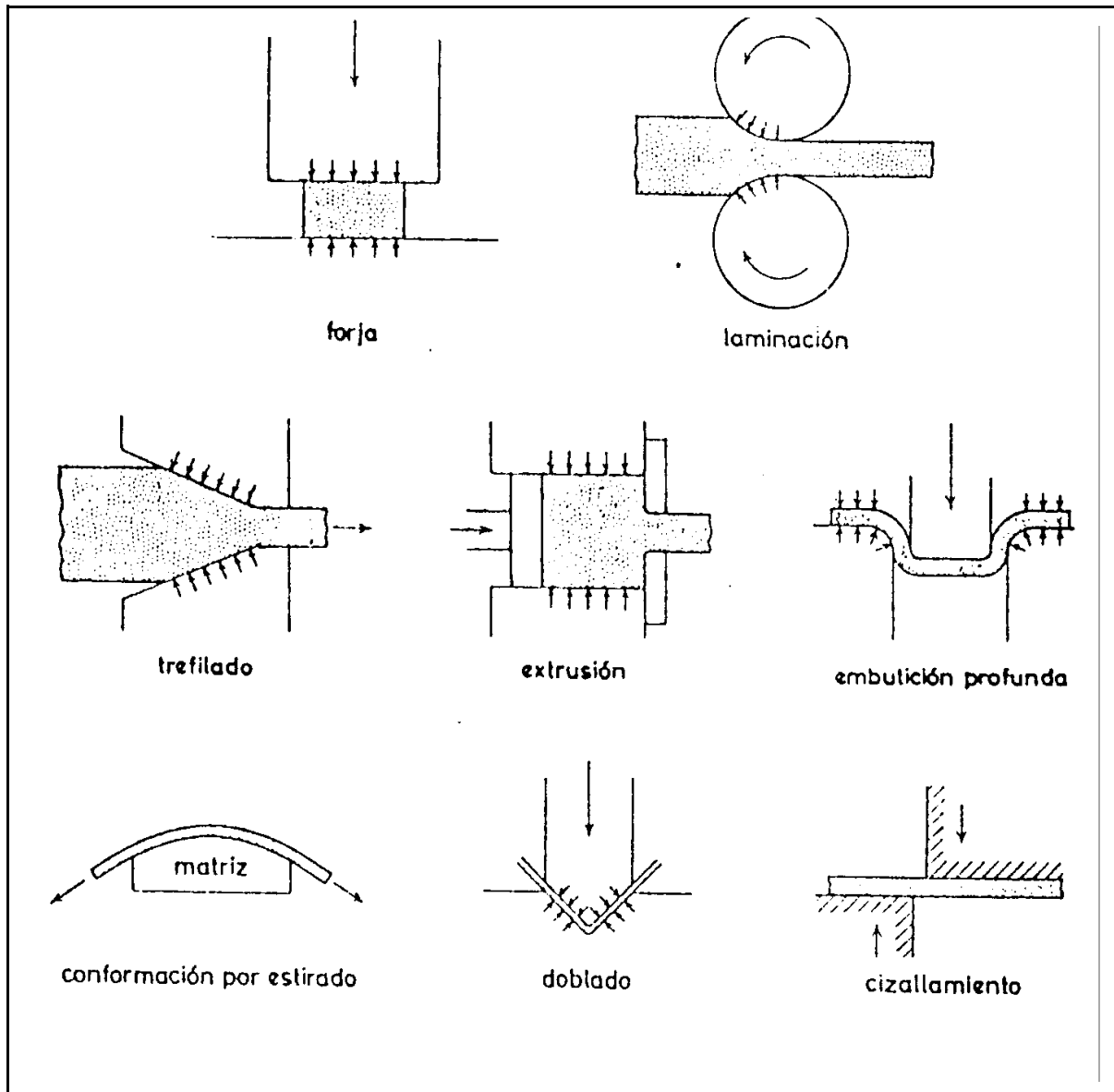
**3. Procesos de tracción.** El metal se adapta al contorno de una matriz por aplicación de fuerzas de tracción (estirado).

**4. Procesos de plegado o flexión.** Supone la aplicación de momentos de flexión a la

chapa.

**5. Procesos de cizallamiento.** Implica fuerzas cizallantes lo suficientemente grandes para provocar el corte del metal en un plano de cizalla.

- Clasificación general y reducida:



## - Clasificación debida a Kienzle:

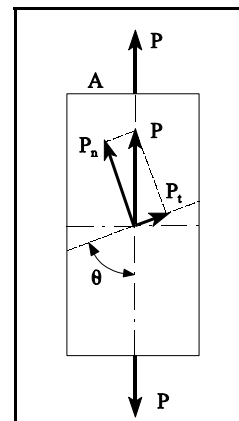
Conformación fundamental	PROCESO		Conformación fundamental	PROCESO		
DESPLAZAMIENTO DE MATERIAL POR COMPRESION	Forja libre		ESTIRADO POR TRACCION	Estirado de perfiles		
	Forja con estampa	Estampa cerrada		Estirado de alambre (Trefilado)		
		Recalcado en frío		Estirado		
	Acuñación	Estampa semicerrada		Embutición profunda		
		Compresión con fluencia Extrusión		Embutición con adelgazamiento		
	LAMINACION	Superficies lisas		DOBLADO POR FLEXION	Troquelado	
		Perfiles			Según eje rectilíneo	
		Tubos			Según eje curvo (Rebordado)	
		Repujado			Alabeado	
		Estirado por presión				
		Alisado				
	Adelgazamiento rotativo			TORSIONADO		

## Conceptos básicos de los sistemas de esfuerzos.

A continuación, y a modo de resumen, se incluirán aquellos conceptos básicos que se manejarán a lo largo de los temas siguientes, y que han sido profusamente desarrollados en otras asignaturas.

Si se considera una probeta del ensayo de tracción, de área  $A$  y sometida a una carga  $P$ , se puede realizar la siguiente división en las componentes del esfuerzo:

- Esfuerzo o tensión: fuerza por unidad de área.



$$\sigma = \frac{P}{A}$$

- Tensión normal: esfuerzo normal a la sección transversal.

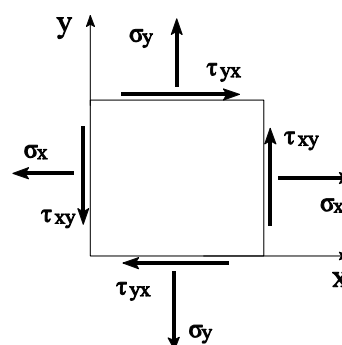
$$\sigma_n = \frac{P_n}{A_n} = \frac{P \cos \theta}{A / \sin \theta} = \frac{P}{A} \sin^2 \theta$$

- Tensión tangencial o cortante: esfuerzo cortante o paralelo a la sección transversal.

$$\tau = \sigma_t = \frac{P_t}{A_n} = \frac{P \cos \theta}{A / \sin \theta} = \frac{1}{2} \frac{P}{A} \sin 2\theta$$

Pudiéndose observar la variación del esfuerzo normal y tangencial en función del ángulo adoptado en el sistema, de donde el estado de esfuerzo dependerá del sistema de coordenadas elegido.

Es habitual adoptar como criterio de signos el que las tracciones son positivas, mientras que el de los esfuerzos cortantes se escoge arbitrariamente. De acuerdo con esto podemos establecer los siguientes sistemas:



$\sigma_x$  = tensión normal en la dirección de  $x$ ; actúa sobre un plano paralelo al eje  $y$ , en la dirección del eje  $x$ .

$\sigma_y$  = tensión normal en la dirección de  $y$ ; actúa sobre un plano paralelo al eje  $x$ , en la dirección del eje  $y$ .

$\tau_{xy}$  = tensión tangencial que actúa sobre un plano normal al eje  $x$ , en la dirección del eje  $y$ .

$\tau_{yx}$  = tensión tangencial que actúa sobre un plano normal al eje  $y$ , en la dirección del eje  $x$ .

Para identificar los esfuerzos se necesitan dos subíndices, el primero indica el plano (por su normal) sobre el que actúa, y el segundo la dirección.

Se puede demostrar que la relación existente entre los esfuerzos cortantes y normales es:

$$\operatorname{tg} 2\theta = \frac{\tau_{xy}}{\frac{1}{2}(\sigma_x - \sigma_y)}$$

De donde se deduce que existen dos planos, con ángulos  $\theta$  y  $\theta + \pi/2$ , donde el esfuerzo cortante es cero. Esto significa que en un sistema bidimensional de tensiones existen dos planos, perpendiculares entre sí, donde el esfuerzo cortante es cero, definiéndose de esta forma:

- Planos principales: En un sistema bidimensional son los planos perpendiculares en los cuales el esfuerzo cortante es nulo.

- Tensiones principales: Esfuerzos normales que actúan en los planos principales.

Igualmente se puede demostrar que las tensiones principales son las tensiones normales máxima y mínima en el sistema. A estos esfuerzos se les denomina  $\sigma_I$  (máximo) y  $\sigma_{II}$  (mínimo), por lo que  $\sigma_I > \sigma_{II}$ , y pueden calcularse resolviendo la ecuación:

$$\left. \begin{matrix} \sigma_I \\ \sigma_{II} \end{matrix} \right\} = \frac{1}{2}(\sigma_x \pm \sigma_y) \pm \sqrt{\left( \frac{1}{2}(\sigma_x - \sigma_y) \right)^2 + \tau_{xy}^2}$$

También se puede demostrar que el máximo esfuerzo cortante ocurre sobre dos planos, perpendiculares entre sí, inclinados 45° respecto a los planos principales, con valor:

$$\tau_{\text{máx}} = \frac{\sigma_I - \sigma_{II}}{2}$$

Mientras que la tensión normal sobre estos planos vale:

$$\sigma_{\text{máx}} = \frac{\sigma_I + \sigma_{II}}{2}$$

Para el caso de sistemas tridimensionales de tensiones, lo indicado hasta ahora se puede generalizar a la determinación de seis tensiones:  $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z, \tau_{xy}, \tau_{yz}, \tau_{zx}$  que, en el caso de emplearse en direcciones principales, quedarán reducidas a tres:  $\sigma_I, \sigma_{II}, \sigma_{III}$ , con  $\sigma_I > \sigma_{II} > \sigma_{III}$ .

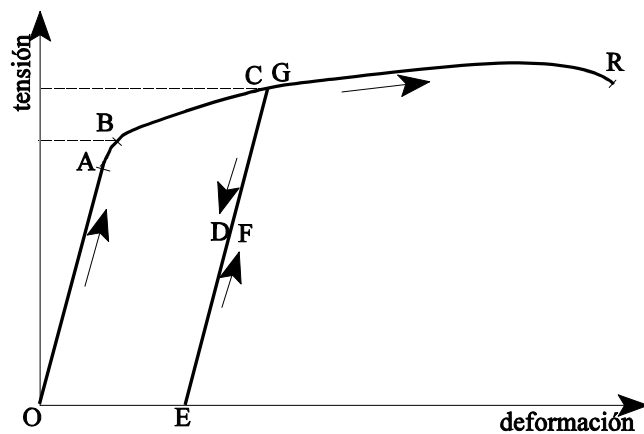
## Comportamiento plástico de los materiales.

Si bien la teoría de la plasticidad está desarrollada, los resultados que de ella se obtienen no son tan correctos como los de la teoría de la elasticidad. Su menor fiabilidad es debida a la irreversibilidad propia del proceso, por cuanto en el mismo influye la historia de carga.

Si se considera un diagrama de tensión-deformación obtenido en un ensayo de tracción simple, se puede destacar la existencia de una zona inicial de comportamiento elástico lineal

**OA**, en la que la relación entre ambos está dada por  $\sigma = E\epsilon$ , alcanzándose el denominado límite de proporcionalidad.

A continuación, sigue un pequeño intervalo **AB** en el que se conserva el comportamiento elástico aunque se pierde la proporcionalidad. Cuando se llega al punto **B** el material ha adquirido la máxima deformación posible compatible con su deformación recuperable, y se dice que ha alcanzado el límite elástico o de fluencia  $\sigma_e$  (ó  $Y$ ), a partir del cual el material seguirá deformándose de forma plástica.



Si en un punto intermedio **C** se procede a la descarga, el material irá recuperando su dimensión quedando en **E**, con carga nula, con una deformación remanente no recuperable que coincide con la propia del proceso plástico. Si se procediese a una nueva carga se comprobaría que el comportamiento elástico se mantiene hasta un límite superior al alcanzado con deformación inicial nula, punto **G**, diciéndose que se ha aumentado el límite elástico del material. El camino de carga tiene la misma pendiente que el inicial, pero difiere del de descarga como consecuencia de un proceso de histéresis en el mismo (parte de la energía de deformación ha quedado en el material).

De continuar deformándose, la tensión seguirá creciendo hasta que se llegue a un punto en que la sollicitación supera la máxima tensión soportable por el material, al que se le denomina punto de inestabilidad, a partir del cual cae el valor de la tensión y se llega a la rotura.

Entre las diferencias que se pueden destacar entre el comportamiento elástico y plástico, se resumen las siguientes:

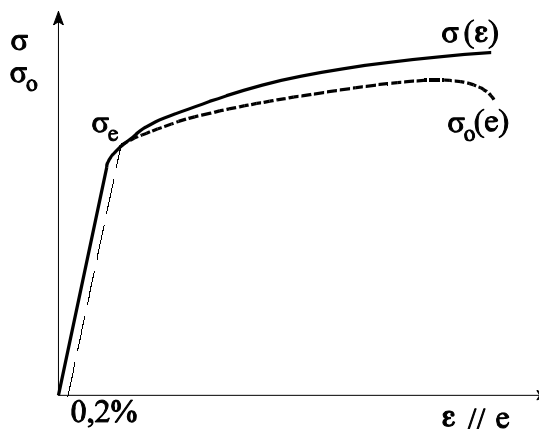
- |  |   |  |
|--|---|--|
| <p><u>Régimen elástico</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Recupera la geometría inicial</li> <li>- Proporcionalidad <math>\sigma/e</math></li> <li>- <math>\sigma/e</math> unívoco</li> <li>- <b>OB</b></li> </ul> | < | <p><u>Régimen plástico</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Deformaciones permanentes</li> <li>- No hay ley general <math>\sigma/e</math></li> <li>- A cada <math>\sigma</math> varias <math>e</math> posibles</li> <li>- <b>EG</b></li> </ul> |
|--|---|--|

### Curvas de fluencia.

El ensayo de tracción no es *real* sino *ingenieril* (la relación  $\sigma/e$  se refiere al área inicial  $A_0$ ), originándose la caída de la tensión a partir de una máxima, y encaminándose a la rotura.

Si se considera la sección instantánea **A**, la curva siempre es creciente hasta la rotura.

En régimen elástico basta conocer  $\sigma_e$  y **E**, pudiéndose trabajar con la expresión:  $\sigma = Ee$ , donde  $\sigma$  viene referida a la sección inicial.



En régimen plástico estos datos no son suficientes, pues se requeriría un atlas de curvas (curvas medias), lo cual supondría la realización de un gran número de ensayos. Se emplea por ello la representación referida a la sección instantánea (representación real), pudiéndose distinguir, de esta forma, dos zonas:

$$\begin{aligned}
 0 - \sigma_e &: \sigma = Ee && \text{elástica} \\
 \sigma_e - \sigma_R &: \sigma = c\epsilon^n && \text{plástica}
 \end{aligned}$$

donde:  $\sigma_e$ : tensión de fluencia o límite elástico,



$\sigma_R$ : tensión de rotura,  
 $c$ : tensión con  $\epsilon=1$ ,  
 $n$ : coeficiente de endurecimiento por deformación.

Así, en acero (0.15% C)  $c= 620$  MPa,  $n=0.18$  y  $\sigma_e=300$  MPa.

## Tensión real y deformación natural.

Considérense las siguientes definiciones:

- Tensión real:  $\sigma' = \frac{P}{A} \cdot \frac{\text{Solicitud}}{\text{Sección real}}$
- Tensión nominal:  $\sigma_o' = \frac{P}{A_o} \cdot \frac{\text{Solicitud}}{\text{Sección inicial}}$
- Deformación natural:  $dg' = \frac{dl}{l}$
- Deformación logarítmica:  $\epsilon' = \int \frac{dl}{l} = \ln \frac{l}{l_o}$
- Deformación lineal:  $e' = \frac{l-l_o}{l_o}$

En la zona elástica no existen diferencias apreciables entre  $\sigma_o$ ,  $\sigma$  y  $e$ ,  $g$ .

Debe notarse que si bien:  $g_{01} \cdot g_{12} = g_{02}$

pues:  $g_{01} \cdot g_{12} = \ln \frac{l_1}{l_0} \cdot \ln \frac{l_2}{l_1} = \ln \frac{l_1}{l_0} \cdot \ln \frac{l_2}{l_1} = \ln \frac{l_2}{l_0} = g_{02}$

Pero con valores naturales:  $e_{01} \cdot e_{12} \dots e_{02}$

ya que:  $e_{01} \cdot e_{12} = \frac{l_1-l_0}{l_0} \cdot \frac{l_2-l_1}{l_1} \dots \frac{l_2-l_0}{l_0} = e_{02}$

por lo que resulta más adecuado el empleo de la deformación logarítmica que la lineal, al poderse emplear de forma incremental.

Con estas variables se puede escribir, para un ensayo de tracción:

$$e_t' = \frac{l-l_0}{l_0} = \frac{l}{l_0} - 1 \quad \text{Y} \quad \frac{l}{l_0} = 1 + e_t'$$

$$g_t' = \ln \frac{l}{l_0} \quad \text{Y} \quad g_t' = \ln(1 + e_t') \quad e_t' > 0$$

y para el ensayo de compresión:

$$e_c' = \frac{H_0 - H}{H_0} = \frac{H}{H_0} - 1 \quad \text{Y} \quad \frac{H}{H_0} = 1 - e_c'$$



$$g_c = \ln \frac{H}{H_0} \quad \text{Y} \quad g_c = \ln(1 + e_c) \quad e_c < 0$$

En el caso de conformado plástico se suele considerar positiva la compresión y negativa la tracción, de donde:

$$g_c = \ln(1 + e_c)$$

Otra ventaja del uso de la deformación logarítmica radica en que alcanza valores iguales en compresión que en tracción; por ejemplo:

Tracción: $l_0 \text{ Y } l_1 = 2l_0;$	$g_{01} = \ln \frac{2l_0}{l_0} = \ln 2$	$e_{01} = \frac{2l_0 - l_0}{l_0} = 1$
Compresión: $H_0 \text{ Y } H_1 = 1/2H_0;$	$g_{01} = \ln \frac{1/2H_0}{H_0} = -\ln 2$	$e_{01} = \frac{1/2H_0 - H_0}{H_0} = -\frac{1}{2}$

Para ver las diferencias inherentes a las definiciones de ambas deformaciones, se considerará un mismo proceso, obteniéndose los siguientes valores:

$g$	0.693	0.4	0.095	-0.105	-0.693	-1
$e$	1	0.5	0.1	-0.1	-0.5	-1

Parece que intuitivamente la representación de  $g$  sea más correcta.

### Condición de inestabilidad.

Se denomina *acritud* al incremento de la resistencia a la deformación que sufre un material debido a la propia deformación, pudiéndose expresar mediante el valor:

$$\text{Acritud} = \frac{d\sigma}{dg}$$

es decir, la pendiente de la curva de tensión-deformación.

El aumento de la resistencia de los metales, debido al endurecimiento por deformación plástica se conoce y se utiliza desde hace mucho tiempo. Va acompañado de una disminución de la ductilidad, y se observa que en el ensayo de tracción no continúa indefinidamente. Si la carga se va incrementando progresivamente, la curva de carga-alargamiento aumenta lentamente, hasta que en un punto M se hace horizontal y empieza a descender, como ya vimos anteriormente. Este descenso se corresponde con un estrechamiento local (estricción) en el centro de la probeta. De esta manera, la carga actúa sobre un área cada vez menor de la sección transversal, y esta situación inestable acaba en la rotura.

El punto M es el punto máximo de carga aplicada. En este punto el endurecimiento por deformación y la disminución del área transversal se equilibran entre sí. El punto de inicio de inestabilidad está donde la pendiente de la curva tensión-deformación llega a cero, esto es, tiene lugar un incremento de deformación sin ningún incremento de carga. Puede demostrarse que la inestabilidad, y por ello la rotura por tracción, se produce cuando la acritud iguala a la tensión aplicada. Para demostrarlo es preciso realizar una observación previa.



Por evidencia experimental se halló que el volumen de material, para los metales, es constante durante la deformación:

$$\frac{dV}{dg} = 0$$

Esto no es aplicable para deformaciones elásticas, si bien, como estas deformaciones son muy pequeñas con respecto a las plásticas, se pueden despreciar.

De acuerdo con esto, como:

$$\sigma = \frac{P}{A} \quad Y \quad P = \sigma A \quad \text{derivando}$$

$$\frac{dP}{dg} = A \frac{d\sigma}{dg} + \sigma \frac{dA}{dg} \quad (1) \quad \text{y supuesto } V = \text{cte}$$

$$V = lA = \text{cte} \quad Y \quad \frac{dV}{dg} = l \frac{dA}{dg} + A \frac{dl}{dg} = 0$$

$$\text{luego} \quad \frac{dA}{dg} = -\frac{A}{l} \frac{dl}{dg} \quad (2)$$

Por la definición de deformación real:

$$dg = \frac{dl}{l} \quad Y \quad \text{despejando en (2):}$$

$$\frac{dA}{dg} = -\frac{A}{l} \left( \frac{dl}{l} \right) = -\frac{A}{l} \frac{dl}{l} \quad ; \text{ y de (1):}$$

$$\frac{dP}{dg} = A \frac{d\sigma}{dg} + \sigma \left( -\frac{A}{l} \frac{dl}{l} \right) = A \left( \frac{d\sigma}{dg} - \sigma \frac{dl}{l} \right)$$

La rotura por tracción corresponde a un máximo de la carga (máximo de la función  $P=f(g)$ ), luego:

$$\frac{dP}{dg} \Big|_R = 0 \quad Y \quad A \left( \frac{d\sigma}{dg} \Big|_R - \sigma_R \frac{dl}{l} \Big|_R \right) = 0 \quad \text{y:}$$

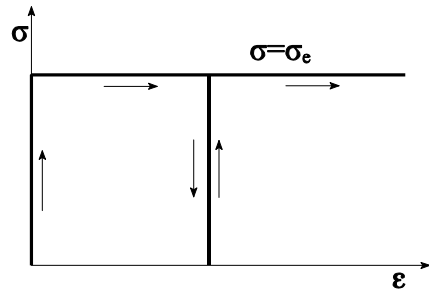
$$\frac{d\sigma}{dg} \Big|_R = \sigma_R \frac{dl}{l} \Big|_R$$

### Hipótesis a considerar.

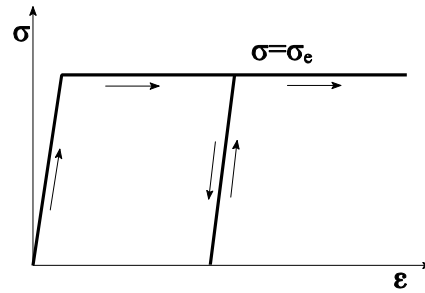


Para realizar el estudio teórico del conformado plástico se harán las siguientes hipótesis simplificadoras, a causa de la excesiva dificultad del planteamiento riguroso:

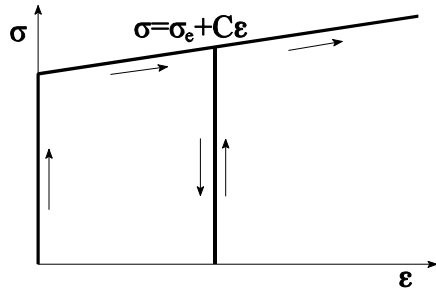
- 1.-Uniformidad e isotropía antes y después de la deformación (no durante la misma).
- 2.-Independencia del tiempo (en procesos semejantes).
- 3.-Independencia de la temperatura (no se van a tener en cuenta posibles procesos metalúrgicos).
- 4.-Simetría en las tensiones aplicadas (los metales tienen la misma tensión de fluencia en tracción que en compresión). No se considerará el efecto *Bassinger*
- 5.-Imposibilidad de producirse deformaciones plásticas con un estado de tensiones esférico.
- 6.-Volumen constante.
- 7.-Se considerarán idealizaciones en los diagramas de tensión-deformación:



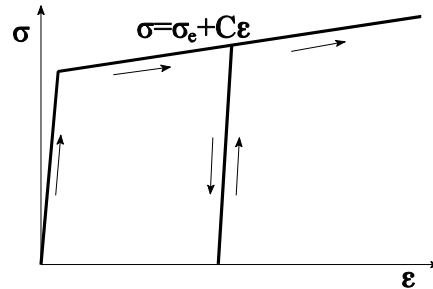
a) Rígido-plástico perfecto



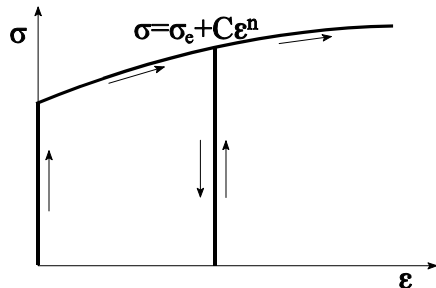
b) Elásto-plástico perfecto



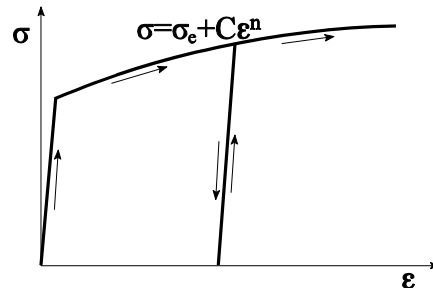
c) Rígido-plástico con endurecimiento lineal



d) Elásto-plástico con endurecimiento lineal



e) Rígido-plástico con endurecimiento



f) Elásto-plástico con endurecimiento lineal

De este conjunto se utilizarán fundamentalmente los modelos aproximados a) y e):

a) *Modelo de materiales que no endurecen por deformación.* Representan el comportamiento plástico perfecto, pudiéndose aplicar con materiales con muy poco o ningún endurecimiento por deformación ( $n=0$ ).

e) *Modelo de materiales que endurecen por deformación.* Suelen ser metales recocidos con estructura reticular cúbica. Los símbolos  $c$  y  $n$  representan las constantes del material, llamándose a  $n$  exponente de endurecimiento por deformación.

$$\sigma = c g^n$$

Para materiales que puedan ser representados por este modelo, el punto de inestabilidad se puede calcular a partir de la condición anteriormente expuesta:

$$\frac{d\sigma}{dg} \Big|_R = \sigma_R \quad \text{y} \quad nc g_R^{n-1} = c g_R^n \quad \text{y} \quad g_R = n$$

Luego, en el momento de la inestabilidad se verifica que la deformación se iguala al exponente de endurecimiento por deformación, pudiéndose considerar a  $n$  como una medida de la capacidad del material para experimentar deformación plástica sin romperse. Valores típicos de  $c$  y  $n$  son:

Metal	$c$ (N/mm <sup>2</sup> )	$n$
Acero dulce	640	0,22
Acero inoxidable	1560	0,50
Aluminio suave	156	0,25
Cobre suave	525	0,38
Latón	745	0,48

### Criterios de fluencia para metales dúctiles.

El ensayo de tracción impone un sistema muy simple de tensiones. La fuerza se aplica en una sola dirección y la probeta puede contraerse libremente en las otras, de forma que excepto en los extremos, no se aplica ninguna tensión. En el conformado de metales en general, se impone la necesidad de tener en cuenta los efectos combinados de al menos dos tensiones, que actúan en direcciones diferentes.

Los criterios de fluencia permiten determinar las condiciones de inicio de la deformación plástica ante sollicitaciones complejas, relacionándolas con estados tensionales conocidos y simples.

Como se ha admitido que un estado tensional de tensión hidrostática no produce fluencia, estas tensiones no deben venir reflejadas en los criterios (tensor esférico), en tanto que las causantes deben ser las del tensor desviador.

a) Criterio de Tresca: «La fluencia comienza cuando la tensión cortante máxima alcanza un valor determinado, característico del material».

Como la tensión máxima de cizalladura es igual a la mitad de la diferencia entre las tensiones principales máximas y mínimas, el criterio se puede escribir de la siguiente forma:

$$\tau_{\text{máx}} = \frac{\sigma_I - \sigma_{III}}{2} = \text{cte} = \tau_{\text{crítica}}$$

Esto supone que la fluencia es independiente de la magnitud de la tensión principal intermedia.

Por ser esta expresión válida para cualquier sistema de tensiones aplicado, si se considera para el caso de tensión uniaxial:

$$\sigma_I = \sigma_e; \sigma_{II} = \sigma_{III} = 0 \quad \text{Y} \quad \tau_{\text{máx}} = \frac{\sigma_I - \sigma_{III}}{2} = \frac{\sigma_e}{2} = k (\tau_{\text{crítica}})$$

Luego considerando  $k = \frac{\sigma_e}{2}$  el criterio de Tresca puede expresarse como:

$$\sigma_I - \sigma_{III} \leq \sigma_e$$

b) Criterio de Von Mises: «La fluencia se produce cuando la energía de deformación, debida a los esfuerzos cortantes, alcanza un valor determinado, característico del material en cuestión».

$$(\sigma_I - \sigma_{II})^2 + (\sigma_{II} - \sigma_{III})^2 + (\sigma_{III} - \sigma_I)^2 \leq cte$$

expresada en función de las tensiones principales. Y como la constante es la misma para todos los sistemas de tensiones, considerando también una tensión uniaxial:

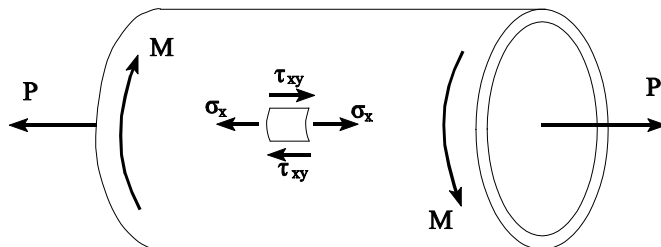
$$\sigma_I = \sigma_e; \sigma_{II} = \sigma_{III} = 0 \quad \text{Y} \quad \sigma_I^2 + \sigma_{II}^2 + \sigma_{III}^2 = 2\sigma_e^2 \leq cte$$

Luego considerando  $cte = 2\sigma_e^2$  el criterio de Von Mises puede expresarse como:

$$(\sigma_I - \sigma_{II})^2 + (\sigma_{II} - \sigma_{III})^2 + (\sigma_{III} - \sigma_I)^2 \leq 2\sigma_e^2$$

c) Comprobación experimental.

Lode realizó diversas experiencias para determinar los valores para los que se rompería un tubo sometido simultáneamente a tracción y torsión.



Donde:

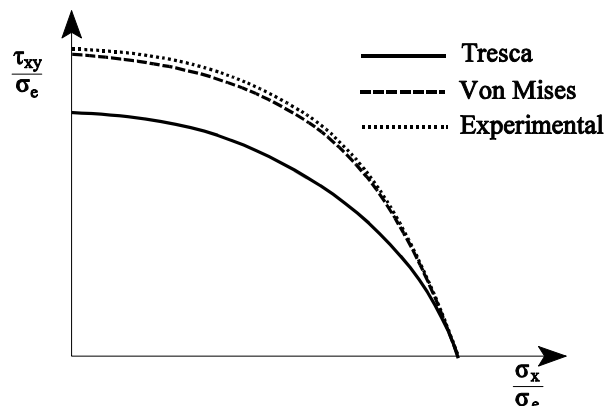
$$\begin{aligned} \sigma_I &= \frac{\sigma_x}{2} + \sqrt{\frac{\sigma_x^2}{4} + \tau_{xy}^2} \\ \sigma_{II} &= 0 \\ \sigma_{III} &= \frac{\sigma_x}{2} - \sqrt{\frac{\sigma_x^2}{4} + \tau_{xy}^2} \end{aligned}$$

Representando los valores experimentales, y los que se obtenían mediante los criterios de Von Mises y Tresca, se obtienen las siguientes curvas:

donde:

$$\left( \frac{\sigma_x}{\sigma_e} \right)^2 + 4 \left( \frac{\tau_{xy}}{\sigma_e} \right)^2 = 1 \quad \text{Tresca}$$

$$\left( \frac{\sigma_x}{\sigma_e} \right)^2 + 3 \left( \frac{\tau_{xy}}{\sigma_e} \right)^2 = 1 \quad \text{Von Mises}$$





Luego parece lógico emplear el criterio de Von Mises por ser el que mejor se ajusta a los datos experimentales, si bien en ocasiones es usual emplear el criterio de Tresca, por su mayor sencillez, para los cálculos prácticos.

## Tensiones y deformaciones efectivas.

El propósito de introducir los conceptos de tensiones y deformaciones efectivas es encontrar una forma conveniente de expresar los complejos sistemas de esfuerzos que actúan en un elemento, pudiéndolos transformar en sistemas uniaxiales equivalentes, para facilitar su manejo, lo que resulta ventajoso al poderse emplear la curva tensión-deformación del ensayo de tracción para realizar el estudio del comportamiento del material.

- Esfuerzo efectivo, equivalente o generalizado:

$$\bar{\sigma} = \frac{\sqrt{(\sigma_I - \sigma_{II})^2 + (\sigma_{II} - \sigma_{III})^2 + (\sigma_{III} - \sigma_I)^2}}{2}$$

- Deformación efectiva, equivalente o generalizada:

$$\bar{g} = \sqrt{\frac{2}{3}(g_I^2 + g_{II}^2 + g_{III}^2)}$$

## Estado de deformación plana.

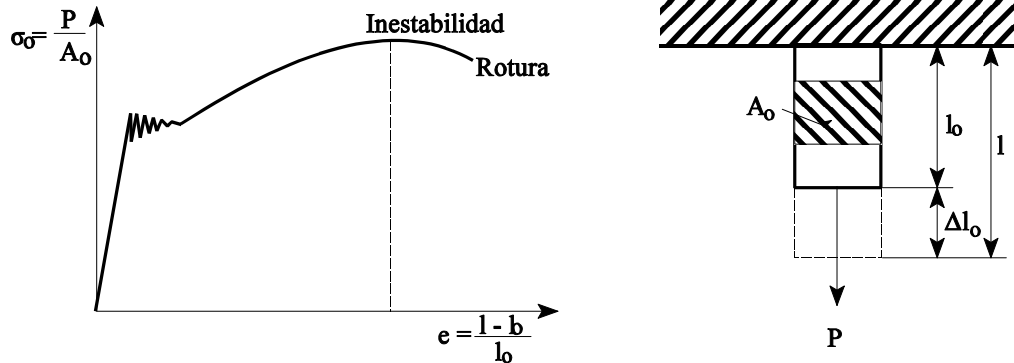
Por *deformación plana* se entiende el estado que se presenta cuando la deformación en una dirección principal es cero. Cuando un material se está deformando plásticamente muestra tendencia a fluir en todas las direcciones. La condición de deformación plana indica que el flujo en una dirección es impedido, ya sea por el mecanizado o por la geometría del componente.

La condición de deformación plana no implica que la tensión en esa dirección lo sea.

$$g_I, g_{II}, g_{III} = 0 \quad \dagger \quad \sigma_{III} = 0$$

El estado de deformación plana será ampliamente empleado en el estudio teórico del conformado plástico, ya que supone una considerable simplificación de las expresiones que se deducen. Por otra parte, muchos de los procesos de deformación plástica que se utilizan pueden asimilarse a un comportamiento de deformación plana, atendiendo a la relación geométrica existente entre las dimensiones del cuerpo que se está deformando (forja, laminación, etc.)

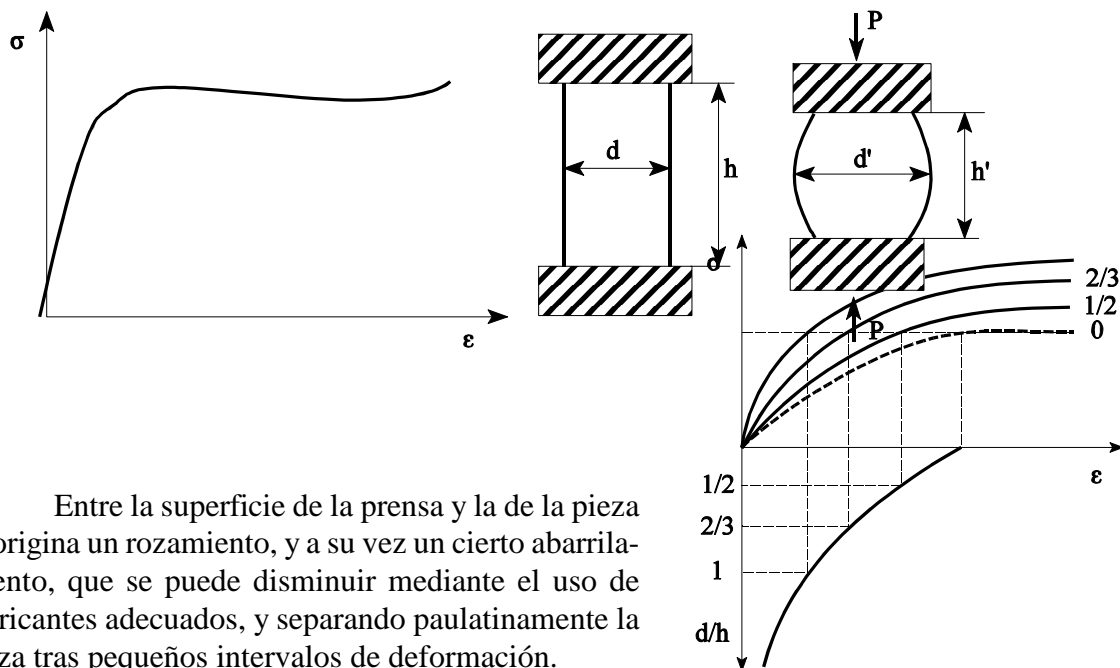
## Ensayos para determinar el comportamiento plástico.

**a) Unidimensionales:**
**a1) Tracción simple:**


Es el ensayo clásico de caracterización de un material para su comportamiento elástico y plástico. Debido a la existencia de una zona de inestabilidad, sólo se suele emplear para conocer el límite de fluencia y la carga de rotura. Sin embargo presenta el inconveniente de que la rotura se origina con una deformación moderada, por lo que no se puede emplear para determinar la tensión de fluencia después de grandes deformaciones.

**a2) Compresión:**

Evita el inconveniente anterior a través de la deformación, mediante compresión uniaxial de un cilindro entre dos plataformas lisas.



Entre la superficie de la prensa y la de la pieza se origina un rozamiento, y a su vez un cierto abarrilamiento, que se puede disminuir mediante el uso de lubricantes adecuados, y separando paulatinamente la pieza tras pequeños intervalos de deformación.

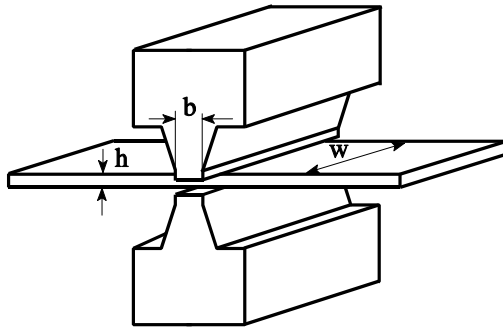
Se realizan ensayos para distintos valores de  $d/h$ , extrapolándose para el valor de  $d/h=0$ .



## b) Bidimensionales:

### b1) Compresión con deformación plana (Ensayo de Ford):

Una chapa de espesor  $h$  se comprime entre plataformas de anchura  $b$ , que sobrepasan la anchura de la chapa.

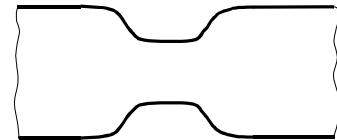


$$\frac{1}{4} < \frac{h}{b} < \frac{1}{2} \quad w \geq 5b$$

Si  $h/b > 1/2$  predominará la acción de clavarse uno sobre otro (indentación) más que la de estirarlo.

Se origina una mordida: que, entre los límites fijados, origina un error no superior al 2%, frente a los resultados obtenidos con procedimientos más sofisticados.

Se lubrica muy bien la chapa, separándola a pequeños intervalos de deformación, y se estudia la tensión que produce una deformación de un 2-5% (reducción de  $h$ ).



Se debe puntualizar que la tensión de fluencia medida no es la tensión de fluencia en tracción uniaxial  $\sigma_e$ , sino la tensión de fluencia en deformación plana  $s$ , que están relacionadas a través de:

$$s = \frac{2}{\sqrt{3}} \sigma_e$$

En efecto, como en deformación plana:

$$\begin{aligned} \sigma_I &= \sigma_{II} \sqrt{\left(\frac{\sigma_x + \sigma_y}{2}\right)^2 + \tau_{xy}^2} \\ \sigma_{II} &= \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} \\ \sigma_{III} &= \sigma_{II} \sqrt{\left(\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2}\right)^2 + \tau_{xy}^2} \end{aligned}$$

Aplicando el criterio de Von Mises:

$$(\sigma_I - \sigma_{II})^2 + (\sigma_{II} - \sigma_{III})^2 + (\sigma_{III} - \sigma_I)^2 = 2\sigma_e^2$$

y sustituyendo estas expresiones, se llega a:

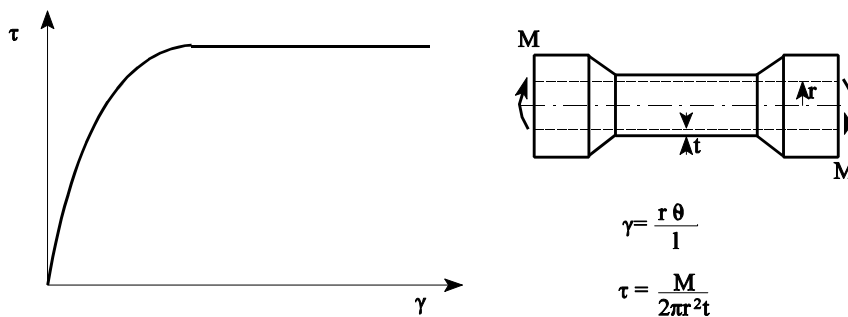
$$\sqrt{(\sigma_x^2 + \sigma_y^2) + 4\tau_{xy}^2} = \frac{2}{\sqrt{3}} \sigma_e$$

Tras la estimación inicial, se procede a la realización del ensayo. Con un micrómetro se mide el espesor, determinándose varios ensayos para obtener distintos puntos de la curva.

Es adecuado para procesos de deformación en frío, con reducciones máximas del 95%.

### b2) Ensayo de torsión:

Para los procesos de conformado en caliente, con los que se consiguen reducciones de  $20 \div 1$ , este ensayo no es útil, por lo que se emplea el de torsión, en el que no se producen ya grandes deformaciones ni cambios dimensionales.



La tensión de fluencia que se mide es la tensión de fluencia por esfuerzo cortante puro  $k$ , relacionada con la tensión de fluencia en tracción uniaxial  $\sigma_e$  a través de:

$$k = \frac{\sigma_e}{\sqrt{3}}$$

pues al aplicar el criterio de Von Mises con  $\sigma_I = \sigma_{III} = \tau$ ;  $\sigma_{II} = 0$ , resulta:

$$\tau^2 + \tau^2 + (2\tau)^2 = 2\sigma_e^2$$

$$3\tau^2 = \sigma_e^2$$

### b3) Ensayo de dureza:

Permite determinar de forma aproximada, por conversión de los valores de dureza, las cargas de rotura por tracción:

$$HB = c \sigma_e$$

donde: HB dureza Brinell,  
 $\sigma_e$  tensión de fluencia.

Así, si HB y  $\sigma_e$  se expresan en  $\text{Kg/mm}^2$ , la constante  $c$  es aproximadamente igual a 3.

## Aspectos prácticos generales.



## 1.- Efecto de la temperatura.

Las deformaciones plásticas provocan una gran alteración en la estructura del metal, afectando de esta forma a sus propiedades, con una influencia que depende de que se haga a baja o alta temperatura, entendiendo como tal no la referida al ambiente sino al nivel en que se produzcan modificaciones estructurales que caractericen un estado específico de cada metal. Se adopta como referencia la *temperatura de recristalización*, considerando un conformado en frío cuando se realice por debajo de ésta, y en caliente cuando tiene lugar por encima.

Se pueden considerar las siguientes de diferencias:

<u>Conformado en caliente</u>	<u>Conformado en frío</u>
<b>Características</b>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Temperatura de recristalización muy variable según los metales (plomo y estaño trabajan en caliente a temperatura ambiente, acero a 1100EC)</li> <li>- No se produce aumento de la resistencia por deformación.</li> <li>- Disminución del límite elástico con la temperatura.</li> <li>- Curva tensión real-deformación real casi plana.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Especialmente indicado para grandes producciones.</li> <li>- Se puede elevar algo la temperatura para favorecer la ductilidad.</li> <li>- Creciente desarrollo de las aplicaciones en frío</li> </ul>
<b>Ventajas</b>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Se rompe la estructura cristalina en bruto (dendrítica) de la fundición, para formar una estructura refinada, de granos pequeños y equiaxiales.</li> <li>- Las impurezas se deshacen y distribuyen con más uniformidad.</li> <li>- Los poros o huecos desaparecen.</li> <li>- Mejoran las propiedades mecánicas debido a la estructura refinada.</li> <li>- Menor fuerza y energía para llevar a cabo los procesos, debido a la menor resistencia a la deformación del material a elevadas temperaturas.</li> <li>- Posibilidad de grandes cambios de forma.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- No se precisa aportar calor.</li> <li>- Mejores acabados superficiales.</li> <li>- Mayor intercambiabilidad de piezas.</li> <li>- Mejores características mecánicas (aumento del límite elástico).</li> <li>- Menores problemas de contaminación.</li> <li>- Favorece la anisotropía, pudiendo conferir propiedades direccionales a la pieza si se desean.</li> </ul>
<b>Inconvenientes</b>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Rápida oxidación.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Requiere fuerzas mayores.</li> <li>- Hacen falta máquinas más pesadas y poten-</li> </ul>



- Tolerancias relativamente amplias, debido a las superficies rugosas.
- Maquinaria de trabajo en caliente costosa y con considerable mantenimiento

- tes.
- Las superficies del metal han de estar limpias y sin cascarilla.
- Aumento de la resistencia por deformación.
- Se comunican propiedades direccionales que pueden ser perjudiciales.
- Generación de tensiones residuales.

Al deformar y calentar simultáneamente se afina el grano y se vuelve más homogéneo. Si el espesor es grande, el interior tendrá mayor tamaño de grano que el exterior, pues se enfriará más lentamente.

Al calentar se originarán problemas de oxidación y descarburación superficial que, durante el proceso de laminado, tal vez se eliminen (cascarilla), afectando negativamente al acabado final y a las tolerancias, que habrán de ser menores. Otras veces se incrustarán en la superficie (puntos duros). La norma establece el exceso de material para evitarlo.

Como temperaturas adicionales a tener en cuenta, se mencionarán los siguientes límites:

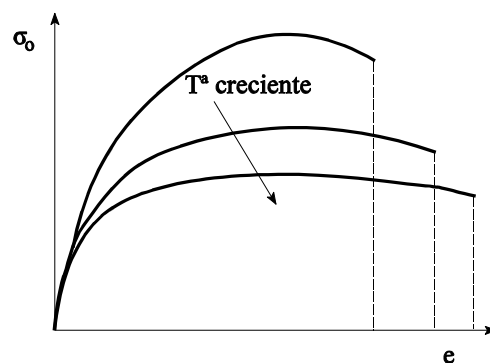
- Temperatura inferior de trabajo en caliente: que es la más baja a la que todavía se produce la recristalización suficientemente rápida, sin que se origine endurecimiento por deformación. Su valor depende del material y de las características de la deformación, disminuyendo al aumentar el grado de deformación y la velocidad con que ésta se origina.

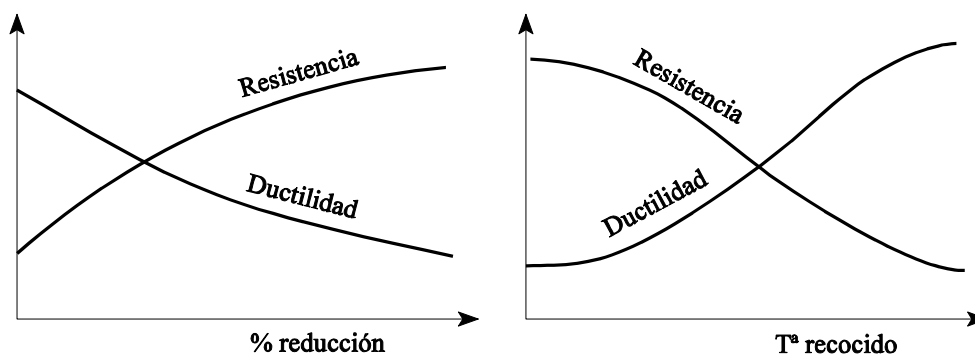
- Temperatura superior de trabajo en caliente: también denominada temperatura de fusión incipiente. Suele adoptarse como regla:  $T_{sup} = T_{fusión} - 100 \text{ EC}$ . Al aumentarla se dice que el material se ha quemado. Se suele trabajar en este intervalo de  $T_{inf} - T_{sup}$ .

- Temperatura de acabado: es la que se da en último lugar para conferirle las características mecánicas pertinentes, y suele estar próxima a la  $T_{inf}$ .

El trabajo en frío tiene la ventaja de que aumenta el límite elástico, pero en cambio disminuye la ductilidad. Si se deformase excesivamente originaría la rotura de la pieza, de ahí que se emplee el trabajo en etapas de deformación y posterior recocido, el cual libera las tensiones residuales que se producen (endurecimiento por deformación).

La evolución de la resistencia y de la ductilidad en cada uno de estos procesos se muestra en las siguientes gráficas:





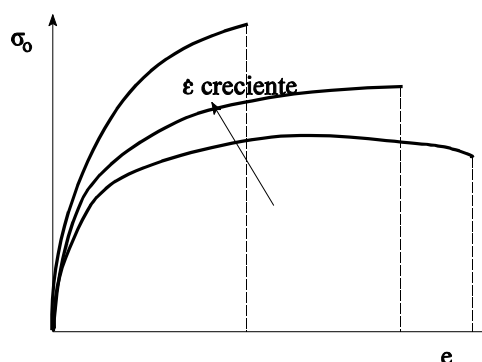
### 2.- Efecto de la velocidad de deformación.

Si bien la relación tensión-deformación varía al aumentar la velocidad con que se realiza la deformación, el incremento que puede sufrir la tensión es de un 20% como máximo.

La velocidad de deformación se representa por  $\dot{\epsilon}$

$$\dot{\epsilon} = \frac{d\epsilon}{dt} = \frac{\Delta l/l_0}{dt} = \frac{1}{l_0} \frac{\Delta l}{dt} = \frac{v}{l_0}$$

donde  $v$  es la velocidad de prueba y  $l_0$  es la longitud original de la probeta.



La velocidad de deformación presenta como valores los que a continuación se muestran a modo de ejemplo:

Ensayo de tracción	$5 \cdot 10^{-5} \div 5 \cdot 10^{-1}$ m/s
Extrusión (prensa hidráulica)	$3 \cdot 10^{-3} \div 3$
Estirado de tubos	$5 \cdot 10^{-2} \div 5 \cdot 10^{-1}$
Extrusión	$0.15 \div 1.5$
Laminación	$0.5 \div 25$
Ensayo Charpy	$3 \div 6$
Martillo forja	$3 \div 10$
Forja a alta velocidad	$20 \div 50$
Conformado por explosivos	$30 \div 120$

### 3. Efecto de la fricción y la lubricación.

El rozamiento que se produce en las superficies de contacto entre la herramienta y el material, influye de forma sustancial en el resultado del procesos de deformación. De hecho algunos materiales, como el acero, no se pudieron emplear hasta que se encontró un lubricante adecuado (para el acero se emplea vidrio fundido en la extrusión en caliente, y fósforo en frío).



Durante el desplazamiento de partículas surgen fuerzas de tres tipos: las que provocan el cambio de forma, las de rozamiento interno y las de rozamiento externo. Al fluir el material en la matriz, se produce en la superficie de contacto un cizallamiento tangencial  $\tau$  que ha de equilibrar a la tensión de rozamiento. Se admite que se cumple la ley de Coulomb, de modo que si la tensión normal es  $\sigma$  y  $\mu$  el coeficiente de rozamiento, la tensión de rozamiento valdrá  $\mu\sigma$ , y por tanto:

$$\mu = \frac{\tau}{\sigma} .$$

En caliente la fricción es mayor debido a que aumenta la oxidación superficial, originándose una cascarilla descarburada que se adhiere más.

Como muestra se presentan algunos valores del coeficiente de rozamiento en distintos procesos de laminación:

$\mu = 0.05$	en frío y buen lubricante (acero suave)
$\mu = 0.50$	en caliente: 400 - 900 EC
$\mu = 0.20$	en caliente: 1100 EC
$\mu = 0.10$	en frío sin lubricación (cilindros pulidos)
$\mu = 0.15$	en frío sin lubricación (cilindros rectificadas)