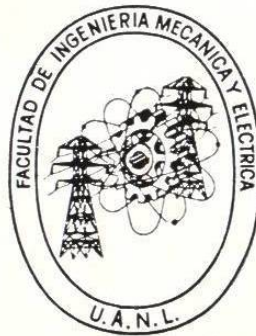


UNIVERSIDAD AUTONOMA DE NUEVO LEON

FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA Y ELECTRICA



DEFORMACION PLASTICA PLANA

TESIS

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE
MAESTRIA EN CIENCIAS EN INGENIERIA MECANICA
CON ESPECIALIDAD EN METALURGIA

PRESENTA

Tomás Salinas Rodríguez

MONTERREY, N. L.

SEPTIEMBRE DE 1987

TM

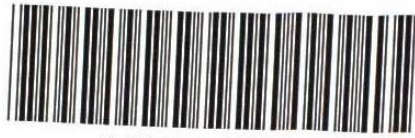
Z 58

. M 2

F I M

1 9 8

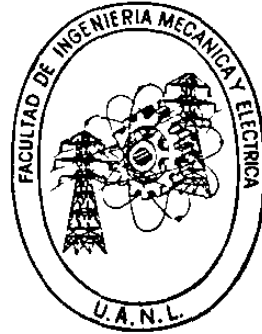
S 2 4



1020070592

UNIVERSIDAD AUTONOMA DE NUEVO LEON

FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA Y ELECTRICA



DEFORMACION PLASTICA PLANA

TESIS

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE
MAESTRIA EN CIENCIAS EN INGENIERIA MECANICA
CON ESPECIALIDAD EN METALURGIA

PRESENTA

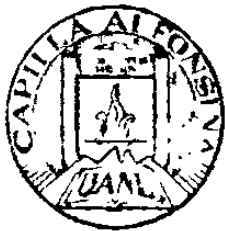
Tomás Salinas Rodríguez

MONTERREY, N. L.

SEPTIEMBRE DE 1987

TM
25 -

FW
97



FONDO TESIS

6306.

INDICE

HOJA N°

CAPITULO 1

- 1-1.- Concepto de tensión y tipo de tensiones. 1
1-2.- Concepto de deformación y tipo de deformaciones. 4

CAPITULO 11

RELACION ENTRE ESFUERZOS Y DEFORMACIONES EN LA REGION ELASTICA.

- 2-1.- Introducción. 6
2-2.- Descripción de las tensiones en un punto. 6
2-3.- Estado de tensiones en 2 dimensiones. 8
2-4.- Círculo de tensiones de MOHR. 12
2-5.- Estado de tensiones en tres dimensiones. 13
2-6.- Círculo de MOHR, tres dimensiones. 17

CAPITULO 111

EL ENSAYO DE TRACCION.

- 3-1.- Curva tensiones. Deformaciones convencional tecnológica. 20
3-2.- Curva real de tensiones. Deformaciones. 27
3-3.- Inestabilidad en tracción. 34

CAPITULO IV

ELEMENTOS DE LA TEORIA DE LA PLASTICIDAD.

- 4-1.- Introducción. 38
4-2.- Curvas de fluencia. 39
4-3.- Deformación real. 41
4-4.- Criterios de fluencia en metales dúctiles. 43
4-5.- Fluencia plástica en dos dimensiones de formación plana. 44

CAPITULO V

FORJA.

| | |
|----------------------------------------------------------------|----|
| 5-1.- Clasificación de los Procesos de Forja. | 46 |
| 5-2.- Equipos para forja. | 50 |
| 5-3.- Deformación en compresión. | 53 |
| 5-4.- Forja en deformación plana con fricción de - coulomb. | 55 |

CAPITULO VI

LAMINACION DE LOS METALES.

| | |
|---------------------------------------------------------------|----|
| 6-1.- Clasificación de los Procesos de laminación. | 58 |
| 6-2.- Equipos de laminación. | 60 |
| 6-3.- Laminación en caliente. | 62 |
| 6-4.- Laminación en frío. | 63 |
| 6-5.- Fuerzas y relaciones geométricas en la lami- nación. | 64 |
| CONCLUSIONES - - - - - | 71 |

CAPITULO 1

1-1.- CONCEPTO DE TENSION Y TIPOS DE TENSIONES.- Las tensiones se definen como la resistencia interna de un cuerpo, por unidad de área, a las fuerzas aplicadas externamente.

La figura 1-1.- representa un cuerpo en equilibrio bajo la acción de las fuerzas externas P_1, P_2, \dots, P_5 . Hay dos clases de fuerzas externas que pueden actuar sobre un cuerpo: las fuerzas de superficie y las fuerzas que actúan sobre la masa. Las fuerzas de superficie son aquellas que actúan sobre la superficie de un cuerpo, como la presión hidrostática o la ejercida por un cuerpo sobre otro. Las fuerzas que actúan sobre la masa están distribuidas sobre todo el volumen del cuerpo, como la gravedad, las fuerzas magnéticas o las fuerzas de inercia de un cuerpo en movimiento.

Los tipos de fuerzas que actúan sobre la masa más corrientes en la técnica son las centrífugas, originadas por la rotación a alta velocidad y las debidas a diferencia de temperatura existentes en el cuerpo (tensiones térmicas o de origen térmico).

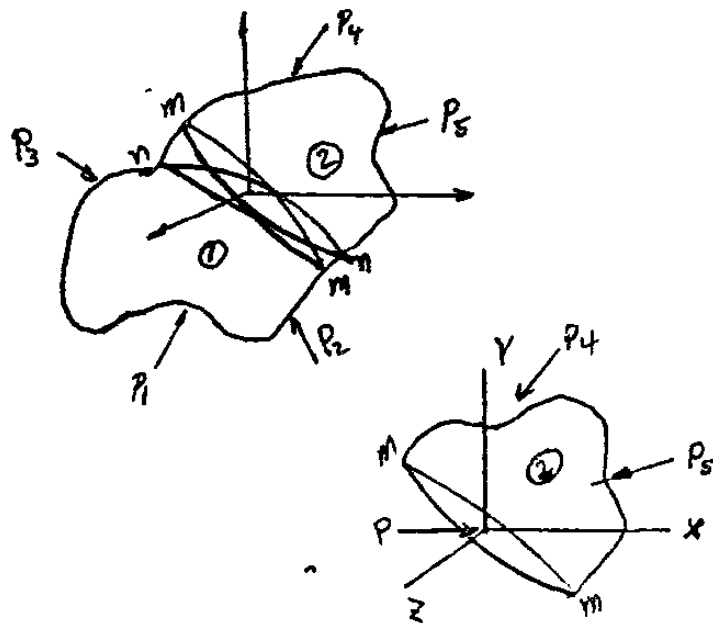


Fig. 1-1.- a) Cuerpo de equilibrio bajo acción de fuerzas externas P_1, \dots, P_5 ; b) fuerzas que actúan sobre una parte.

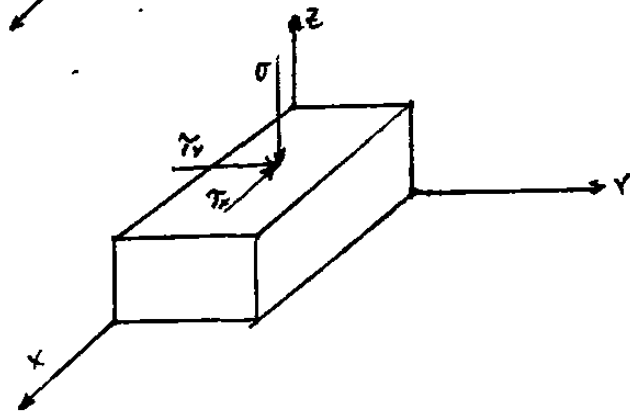
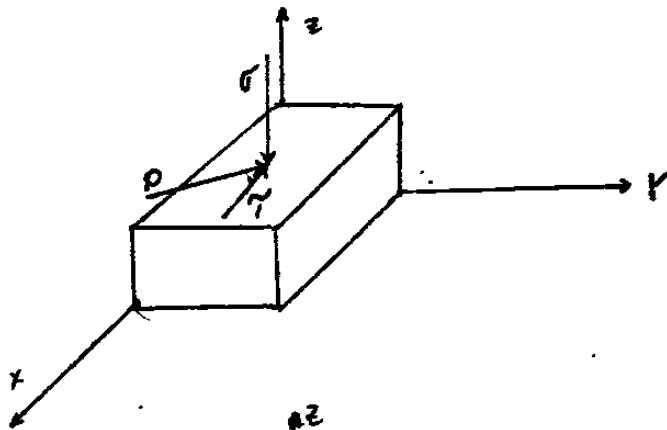
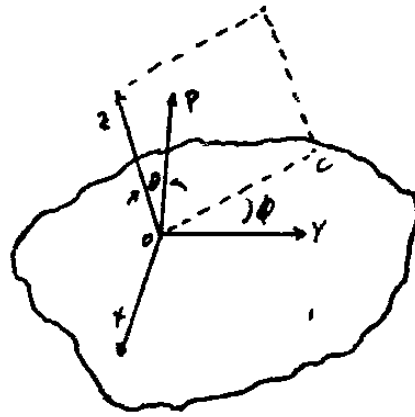


Fig. 1-2 Resolución de la tensión total en sus componentes.

Las fuerzas no se distribuyen uniformemente, en general, sobre cualquier sección transversal del cuerpo mostrando en la figura 1-1 a. Para obtener la tensión en algún punto O de un plano tal como el mn, se separa la parte 1 del cuerpo y se lo reemplaza por el sistema de fuerzas externas aplicadas al plano que mantienen a cada punto de la parte 2 del cuerpo en la misma posición que tenía antes de separar la parte 1. Esta es la situación que se muestra en la figura 1-1 b. Luego tomamos un área ΔA en torno al punto O y anotamos la fuerza ΔP que actúa sobre esa área. Si se hace -- disminuir continuamente el área ΔA hasta reducirla al valor cero, el valor límite de la relación $\Delta P / \Delta A$ es la tensión en el punto O del plano mn -- del cuerpo 2,

$$\lim_{\Delta A \rightarrow 0} \frac{\Delta P}{\Delta A} = \sigma$$

La tensión tendrá la dirección de la fuerza P y formará, en general, un cierto ángulo con el plano mn, La misma tensión en el punto O del plano mn se obtendría si el cuerpo libre se construyera separando la parte 2 del cuerpo sólido, pero la tensión sería diferente sobre cualquier otro plano distinto del mn que pase por el punto O. por ejemplo: el mn.

Es un inconveniente tener que emplear una tensión que forma un ángulo cualquiera con respecto al plano sobre el cual actúa. La tensión total puede resolverse en dos componentes: una tensión normal o perpendicular a mn y una tensión cizallante (o cortante) que está situada en el plano mn. Consideremos la figura 1-2. La fuerza P forma un ángulo θ con la normal \bar{z} al plano mn que contiene al área ΔA por lo que el plano que contiene a P y a la normal corta al plano mn a lo largo de una línea recta de trazos que forma un ángulo θ con el eje y. La tensión normal esta dada por :

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

La tensión cizallante contenida en el plano actúa a lo largo de la línea OC y tiene la magnitud.

$$\tau = \frac{P}{A} \sin \theta$$

Esta tensión cizallante puede, a su vez descomponerse en dos paralelas a los ejes X e Y contenidos en el plano por lo que, en general, - sobre un plano dado pueden actuar una tensión normal y dos cizallantes.

$$\text{dirección } X: \tau = \frac{P}{A} \operatorname{sen} \theta \operatorname{sen} \phi$$

$$\text{dirección } Y: \tau = \frac{P}{A} \operatorname{sen} \theta \operatorname{cos} \phi$$

1-2.- CONCEPTO DE DEFORMACION Y TIPOS DE DEFORMACION.- Se define la deformación lineal media como la relación de la variación de longitud a la longitud inicial de la misma dimensión,

$$e = \frac{\delta}{L_0} = \frac{\Delta L}{L_0} = \frac{L - L_0}{L_0}$$

$$e = \frac{L - L_0}{L_0}$$

donde:

e = deformación lineal media

δ = deformación absoluta.

Por analogía con la definición de tensión en un punto se entenderá por deformación en un punto al límite de la relación entre la deformación absoluta o variación de la distancia inicial entre puntos y la distancia inicial entre puntos cuando esta última tienda a cero.

En lugar de referirse a la distancia entre puntos inicial es frecuente definir la deformación como la variación en la dimensión lineal dividida por el valor instantáneo de esta dimensión:

$$\epsilon = \int_{L_0}^{L_f} \frac{dL}{L} = \ln \frac{L_f}{L_0}$$

La ecuación anterior define la deformación real, natural o verdadera. La deformación real, que es de utilidad en relación con los problemas de --- plasticidad y de conformación de los metales, será discutida más adelante. De momento haremos notar que para deformaciones muy pequeñas, cuando son válidas las ecuaciones a valores idénticos.

La deformación elástica de un cuerpo no solo consiste en variaciones de longitud de un elemento lineal del mismo, sino que también existen variaciones en el ángulo que formaban inicialmente dos líneas.

La variación angular de un ángulo recto se llama deformación de cizallamiento.

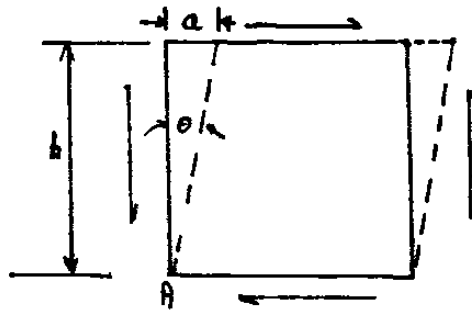


Figura 1- .

La figura 1-3.- Muestra la deformación producida por el cizallamiento puro de una cara de un cubo. El ángulo A, que inicialmente era de 90° disminuye por la aplicación de una tensión cizallante en una pequeña cantidad θ . La deformación cizallante γ es igual al desplazamiento a dividido por la distancia entre los planos h. La relación a/h es también la tangente del ángulo que ha girado el elemento. Cuando los ángulos son pequeños, son aproximadamente iguales la tangente del ángulo y el valor en radianes de ese ángulo. Por tanto, las deformaciones de cizallamiento pueden expresarse con frecuencia como ángulos de rotación.

$$\gamma = \frac{a}{h} = \tan \theta = \theta$$

CAPITULO 2

RELACION ENTRE ESFUERZOS Y DEFORMACIONES EN LA REGION ELASTICA.

2-1.- INTRODUCCION.- La finalidad de este capítulo es presentar las relaciones matemáticas que expresan la tensión y la deformación en un punto y las que existan entre tensión y deformación en un cuerpo rígido que obedece a la Ley de Hooke. Parte de las materias tratadas en este capítulo constituyen una revisión de información generalmente expuesta en resistencia de materiales. sin embargo se ha ampliado el tema más allá de este punto, incluyendo el estudio de las tensiones y deformaciones en tres dimensiones y la teoría de la elasticidad. Las materias incluidas en este capítulo son de importancia para la comprensión de la mayor parte de los aspectos fenomenológicos de la metalurgia mecánica. Por esta razón, aquellos lectores que no estén familiarizados con el tema deberán dedicarle cuidadosa atención. En el espacio disponible para tratar esta disciplina no ha sido posible desarrollarla lo suficiente para resolver el problema en toda su amplitud. Sin embargo, las materias tratadas proporcionarán una base para la lectura inteligente de la mayor parte de la literatura matemática relacionada con la metalurgia mecánica.

2-2.- DESCRIPCION DE LAS TENSIONES DE UN PUNTO.- Con frecuencia es conveniente resolver las tensiones en un punto en componentes normales y de cizallamiento. Generalmente, los componentes de cizallamiento forman ángulos arbitrarios con los ejes de coordenadas por lo que se puede resolver ulteriormente cada tensión cizallante en dos componentes. Este caso se muestra en la figura 2-1. Las tensiones que actúan normalmente a las caras de un cubo elemental se identifican por un subíndice que, a su vez, representa la dirección en la que la tensión actúa; esto es, σ_{xx} es la tensión normal que actúa en la dirección x . Puesto que es una tensión normal debe actuar sobre el plano perpendicular a la dirección x se ha establecido convencionalmente que los subíndices de las tensiones normales mayores se refieren de tracción, mientras que los subíndices menores se refieren a compresión todas las tensiones normales se representan por esta fórmula: σ_{ij} - tracción.

Para expresar las tensiones cizallantes se precisan dos subíndices. El primero indica el plano en el que la tensión actúa y el segundo la dirección.

ción. Puesto que todo plano se define más fácilmente por su normal, el primer subíndice se refiere a ello; por ejemplo, τ_{yz} es la tensión de cizallamiento sobre el plano, perpendicular al eje "y" en la dirección del eje "z" y τ_{yx} es la tensión cizallante sobre un plano normal al eje "y" en la dirección del eje "x". Las tensiones cizallantes orientadas en direcciones positivas de los ejes de coordenadas son positivas si una tensión de tracción, en la misma cara del cubo, se encuentran en la dirección positiva del eje correspondiente. Todas las tensiones cizallantes que se muestran en la figura 2-1 son positivas.

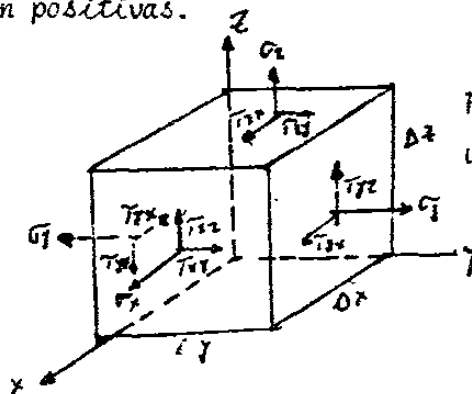


Fig. 2-1.- Tensiones que actúan en un cubo elemental unidad.

La notación dada anteriormente es la que emplea Timoshenko y la mayoría de los investigadores americanos que trabajan en el campo de la elasticidad. No obstante, el lector debe recordar que se utilizan otros sistemas de notación. Antes de intentar la lectura de trabajos en este campo, es importante familiarizarse con la notación. Según se observa en la figura 2-1, para establecer el estado de tensión en un punto se han de definir nueve cantidades. Estas son $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z, \tau_{xy}, \tau_{yx}, \tau_{xz}, \tau_{zx}, \tau_{yz}, \tau_{zy}$. Sin embargo es posible cierta simplificación. Si suponemos que las superficies de las caras del cubo unidad son lo suficientemente pequeñas para que la variación de tensiones sobre ella sea despreciable, tomando la suma de los momentos de las fuerzas alrededor del eje z se puede demostrar que: $\tau_{xy} = \tau_{yx}$

$$(\tau_{xy} \Delta y \Delta z) \Delta x = (\tau_{yx} \Delta x \Delta z) \Delta y$$

$$\therefore \tau_{xy} = \tau_{yx}$$

y de modo análogo,

$$\tau_{xz} = \tau_{zx} \qquad \tau_{yz} = \tau_{zy}$$

De este modo, el estado de tensión en un punto se describe completamente con seis componentes: tres tensiones normales y tres cizallantes, $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z,$

$$\tau_{xy}, \tau_{xz}, \tau_{yz}$$

* Tensor esfuerzo =
$$\begin{pmatrix} \sigma_x & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & \sigma_y & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & \sigma_z \end{pmatrix}$$

2-3.- ESTADO DE TENSIONES EN DOS DIMENSIONES [TENSIONES PLANAS].-

Se puede simplificar muchos problemas considerando un estado de tensiones en dos dimensiones. En la práctica, se llega frecuentemente a esta situación cuando una de las dimensiones del cuerpo es pequeña con relación a las otras; por ejemplo: en una plancha de poco espesor, cargada en su plano, no habrá tensiones que actúen perpendicularmente a ella. El sistema de tensiones consistirá en dos tensiones normales, σ_x u σ_y y en una cizallante τ_{xy} . Se llama de tensión plana el estado en que el valor de las tensiones en una de las direcciones primarias es cero.

La figura 2-2.- Muestra una plancha delgada con su espesor normal al plano del papel. Para conocer el estado de tensión en un punto "O" de la plancha, es preciso poder describir los componentes de la tensión en "O" para cualquier orientación de los ejes que pasan por dicho punto. Para conseguir esto, consideraremos un plano oblicuo, normal al plano del papel, formando un ángulo θ con el eje X la normal N al plano, se supone que el plano que se muestra en la figura 2-2.- está a una distancia infinitesimal de "O" y que el elemento es tan pequeño que se pueden despreciar las variaciones de la tensión a lo largo de sus lados. Las tensiones que actúan sobre el plano oblicuo son las tensiones normal σ y la cizallante τ . Los cosenos directores de N en el sistema de ejes X e Y son l u m respectivamente. De la figura 2-2.-

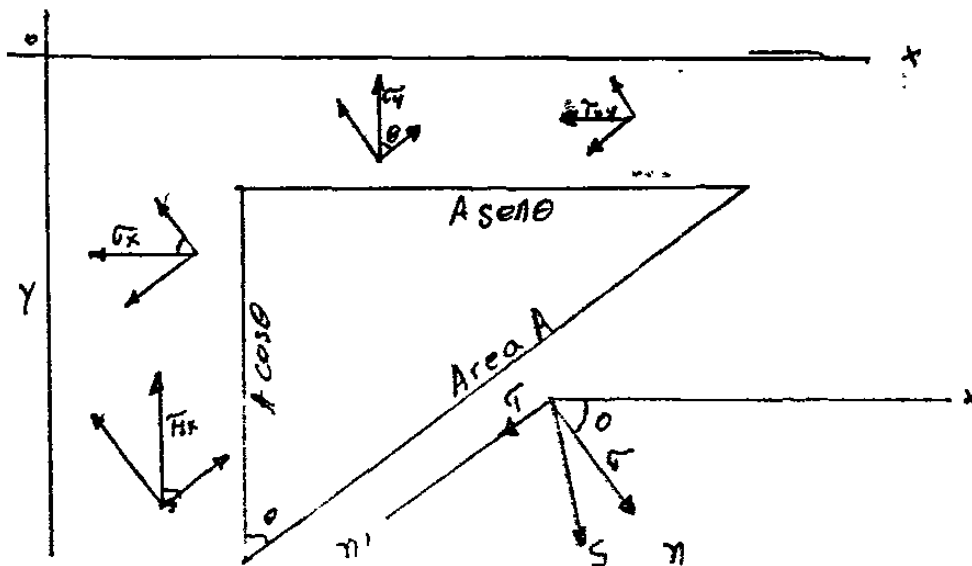


Fig. 2-2.- Tensiones normal y cizallante sobre un elemento d. r. n. 1.

tenemos que $l = \cos \theta$ u $m = \sin \theta$. Si A es el área del plano oblicuo, las áreas de las caras del elemento perpendiculares a los ejes x e y serán Al u Am respectivamente. Haciendo suma de fuerzas con respecto al eje n (multiplicando las tensiones por el área correspondiente) tenemos:

$$\sigma = \sigma_x \cos^2 \theta + \sigma_y \sin^2 \theta + 2\tau_{xy} \sin \theta \cos \theta$$

De forma similar puede obtenerse τ haciendo igual a cero la suma de las proyecciones de todas las fuerzas paralelas a la superficie de corte. por lo tanto:

$$\tau = \tau_{xy} (\cos^2 \theta - \sin^2 \theta) + (\sigma_x - \sigma_y) \sin \theta \cos \theta$$

Frecuentemente, para facilitar el cálculo es conveniente expresar las ecuaciones para σ u τ en función del ángulo doble 2θ esto puede hacer con las identidades siguientes:

$$\begin{aligned} \cos^2 \theta &= (\cos 2\theta + 1)/2 & \sin^2 \theta &= (1 - \cos 2\theta)/2 \\ 2 \sin \theta \cos \theta &= \sin 2\theta & \cos^2 \theta - \sin^2 \theta &= \cos 2\theta \end{aligned}$$

Las ecuaciones para σ y τ se convierten en:

$$\begin{aligned} \sigma &= \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} + \frac{\sigma_x - \sigma_y}{2} \cos 2\theta + \tau_{xy} \sin 2\theta \\ \tau &= \frac{\sigma_x - \sigma_y}{2} \sin 2\theta + \tau_{xy} \cos 2\theta \end{aligned}$$

Las ecuaciones anteriores describen la tensión normal y cizallante en un punto sobre un plano cualquiera de un cuerpo sometido a un estado de tensiones planas. La figura 2-3.- muestra las variaciones de la tensión normal y la cizallante con respecto a θ , en el estado de tensión plana biaxial -- que se indica en la parte superior de la figura. Con respecto a dicha figura hay que observar los siguientes puntos importantes:

1.- Los valores máximos y mínimo de la tensión normal a un plano oblicuo en el punto O , se presentan cuando la tensión de cizallamiento es cero

2.- Los valores máximo y mínimo de las tensiones normal y cizallante se presentan en ángulos que difieren 90 grados.

3.- La tensión cizallante máxima corresponde a un ángulo que equidista de direcciones de las tensiones normales máxima y mínima.

4.- La variación de las tensiones normal y cizallante se produce en forma de onda sinusoidal con un periodo de 180° ; estas relaciones son válidas para cualquier estado de tensión.

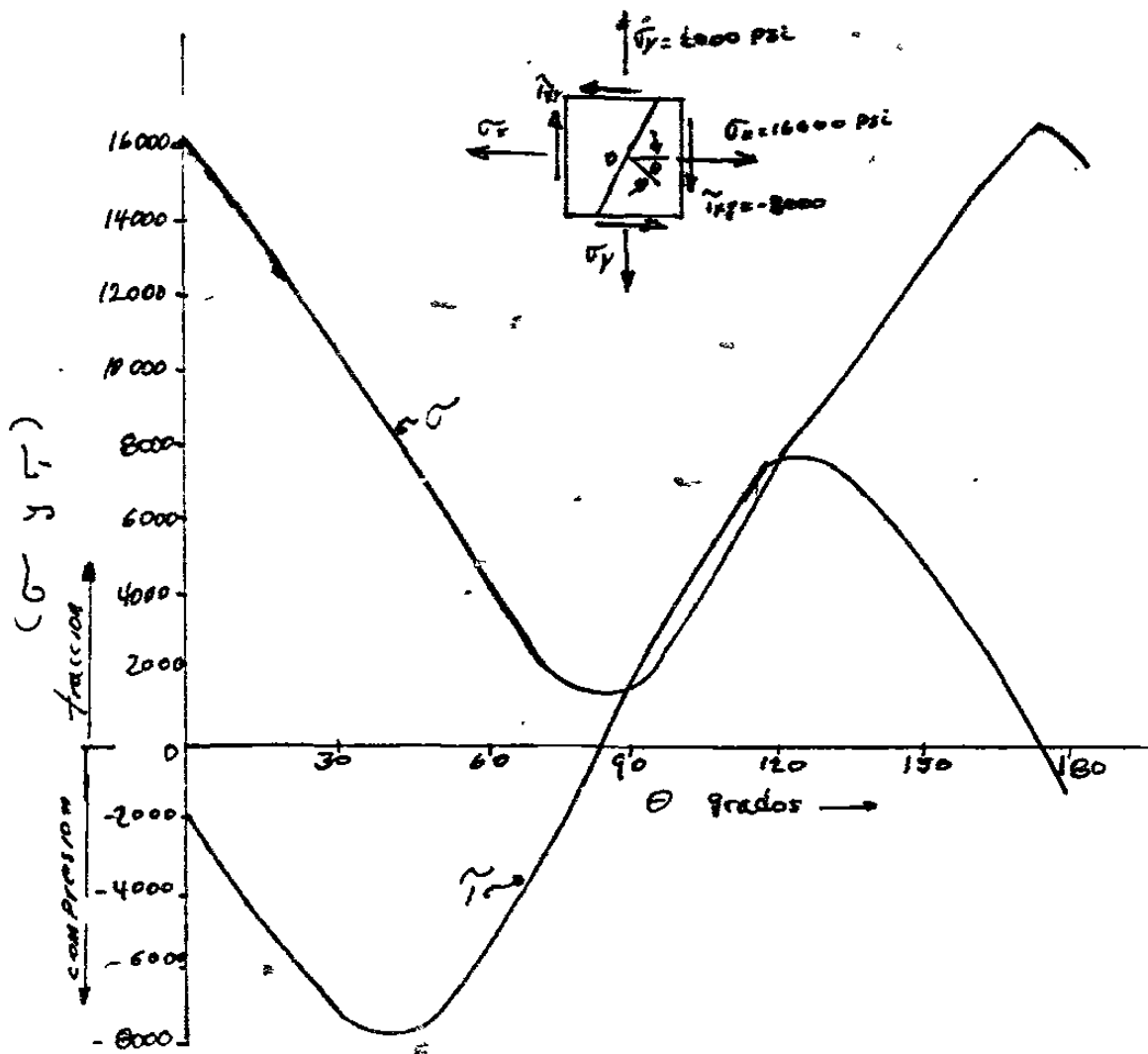


Fig. 2.-3. Variación de las tensiones normal y cizallante con el ángulo θ

En cualquier estado de tensión es siempre posible definir un nuevo sistema de coordenadas que tenga ejes perpendiculares a los planos sobre los que actúan las tensiones normales máximas y sobre los que no actúan tensiones cizallantes. Dichos planos se denominan planos principales y las tensiones normales a ellos tensiones principales. En tensiones planas en dos dimensiones habrá dos tensiones principales σ_1 y σ_2 que se presentarán en ángulos que difieren 90° (fig. 2). En casos generales de tensiones en tres dimensiones habrá tres tensiones principales σ_1 , σ_2 y σ_3 . Según se conviene, σ_1 es la tensión principal algebraicamente mayor, mientras que σ_3 es la menor. Las direcciones de las tensiones principales son los ejes principales 1, 2 y 3. Aunque en general los ejes principales 1, 2 y 3 no coinciden con los ejes de coordenadas cartesianas x , y y z en muchas de las situaciones que se presentan en la práctica los dos sistemas de ejes, coinciden por la simetría de cargas y deformación. La expresión de las tensiones principales y sus direcciones es un modo apropiado de describir el estado de tensión en un punto.

Puesto que, por definición, un plano principal no contiene tensiones cizallantes, se pueden determinar su relación angular con respecto a los ejes de coordenadas x y y hallando los valores de θ en la Ec. 910, para

$$\tau = 0$$

$$\tau_{xy}(\cos^2\theta - \sin^2\theta) + (\sigma_y - \sigma_x)\sin\theta\cos\theta = 0$$

$$\frac{\tau_{xy}}{\sigma_x - \sigma_y} = \frac{\sin\theta\cos\theta}{\cos^2\theta - \sin^2\theta} = \frac{1/2\sin 2\theta}{\cos 2\theta} = 1/2 \operatorname{tg} 2\theta \quad \therefore \operatorname{tg} 2\theta = \frac{2\tau_{xy}}{\sigma_x - \sigma_y}$$

Teniendo en cuenta que $\operatorname{tg} 2\theta = \operatorname{tg}(\pi + 2\theta)$ la Ec. anterior tiene dos soluciones θ_1 y $\theta_2 = \theta_1 + \pi/2$. Estas soluciones definen dos planos perpendiculares entre sí que están libres de cizallamiento.

Sustituyendo los valores de $\cos 2\theta$ y $\sin 2\theta$ tendremos,

$$\sin 2\theta = \pm \frac{\tau_{xy}}{\left[\frac{(\sigma_x - \sigma_y)^2}{4} + \tau_{xy}^2 \right]^{1/2}}$$

$$\cos 2\theta = \pm \frac{(\sigma_x - \sigma_y)/2}{\left[\frac{(\sigma_x - \sigma_y)^2}{4} + \tau_{xy}^2 \right]^{1/2}}$$

$$\left. \begin{array}{l} \sigma_{\max} = \sigma_1 \\ \sigma_{\min} = \sigma_2 \end{array} \right\} = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} \pm \left[\left(\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2} \right)^2 + \tau_{xy}^2 \right]^{1/2}$$

2-4.- CIRCULO DE TENSIONES DE MOHR.- Dos dimensiones.- "O". Mohr ha propuesto un método gráfico para representar el estado de tensión en un punto sobre cualquier plano oblicuo que pase por el punto. La figura 2-4 muestra un diagrama del círculo de Mohr de un estado de tensión en dos dimensiones. Las tensiones normales se representan a lo largo del eje x y las cizallantes en el eje y . Las tensiones en los planos normales a los ejes x y y se representan por los puntos A y B. La intersección de la línea AB con el eje x determina el centro del círculo. En los puntos D y E la tensión de cizallamiento es cero; por tanto, estos puntos representan los valores de las tensiones principales.

El ángulo entre el eje x y OD está determinado por el ángulo ACD de la figura 2-4 este ángulo en el círculo de Mohr es igual a dos veces del ángulo formado por OD y el eje x en el cuerpo real sometido a las tensiones.

De la figura 2-4 se deduce que:

$$\sigma_1 = OC + CD = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} + \left[\left(\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2} \right)^2 + (\tau_{xy})^2 \right]^{1/2}$$

$$\sigma_2 = OC - CE = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} - \left[\left(\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2} \right)^2 + (\tau_{xy})^2 \right]^{1/2}$$

El radio del círculo es igual a:

$$CD = \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2} = \tau_{max}$$

Por tanto, el radio del círculo de Mohr es igual a la tensión cizallante máxima.

$$\tau_{max} = \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2} = \left[\left(\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2} \right)^2 + (\tau_{xy})^2 \right]^{1/2}$$

Este valor está dado por la ordenada máxima del círculo. Observe que que actúa en un plano en el que $\theta = \pi/4$, ($2\theta = \pi/2$ en el círculo de Mohr); es decir, el plano sobre el que τ_{max} a $\pm \tau_{max}$ se cortan las dos tensiones principales.

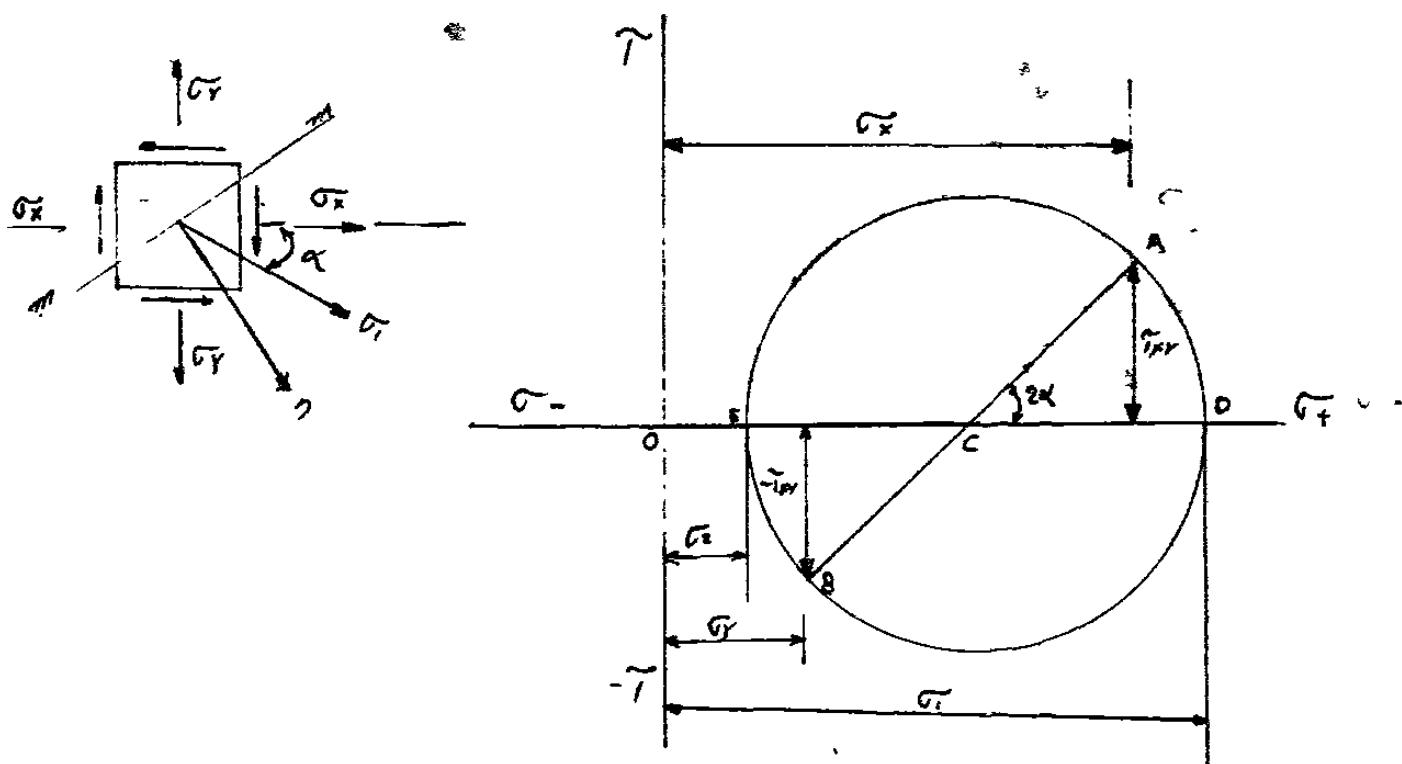


Fig. 2-4.- Círculo de Mohr para el estado bidimensional de tensiones.

2-5.- ESTADO DE TENSIONES EN TRES DIMENSIONES.-El estado general de tensión en tres dimensiones consiste en tres tensiones principales desiguales que actúan en un punto. Este se denomina estado de tensión triaxial. Si dos de las tres tensiones principales son iguales el estado de tensión se conoce con el nombre de cilindro, mientras que si son las tres iguales se llamo hidrostática o esférico. El cálculo de las tensiones principales en un estado de tensión tridimensional en función de las tensiones que actúan en un sistema arbitrario de coordenadas cartesianas, es una extensión del método descrito en la acción 2-3 para el caso de dos dimensiones. La figura 2-5 representa un cuerpo libre elemental, similar al que se muestra en la figura 2-1 con un plano diagonal JKL de área A . Se supone que JKL es una línea principal que corte al cubo unidad. σ es la tensión principal que actúa normalmente al plano JKL. Sean l , m y n los cosenos directores de σ , los cosenos de los ángulos formados entre σ y los ejes x, y, z . Puesto que el cuerpo libre de la fig. 2-5 a de estar en equilibrio, las fuerzas que actúan sobre cada una de las caras han de equilibrarse.

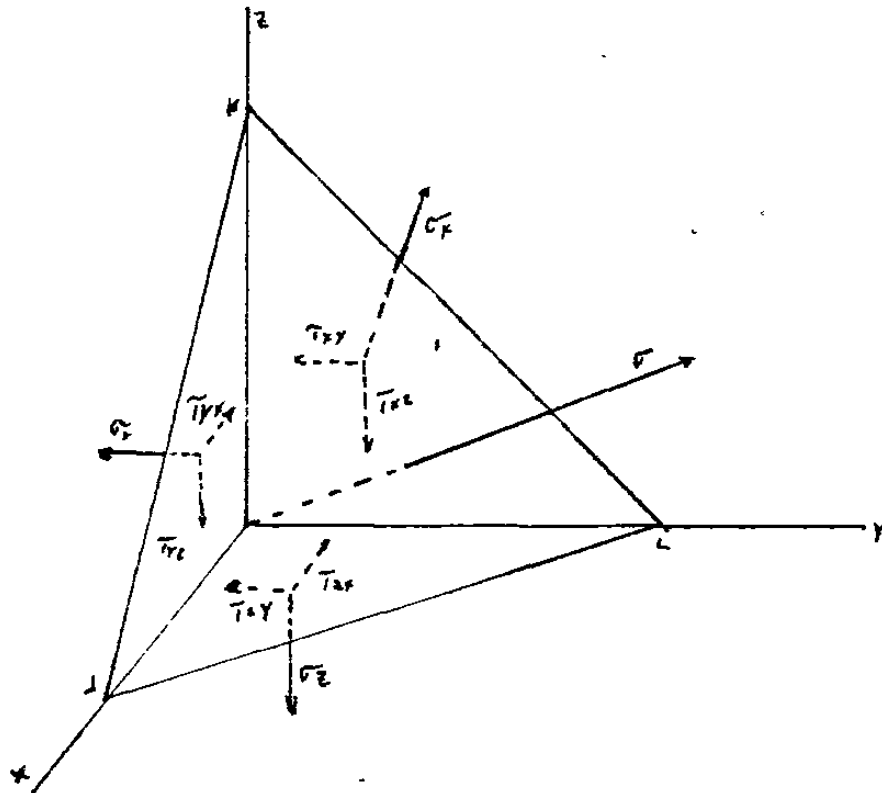


Fig. 2-5.- Tensiones que actúan sobre un cuerpo libre elemental.

Los componentes de σ a lo largo de cada uno de los ejes son: $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$

$$\sigma_x = \sigma l$$

$$\sigma_y = \sigma m$$

$$\sigma_z = \sigma n$$

$$\text{AREA } KOL = Al$$

$$\text{AREA } \perp OK = Am$$

$$\text{AREA } \perp OL = An$$

Sumando las fuerzas en la dirección x se obtiene como resultado.

$$\sigma Al - \sigma_x Al - \tau_{yx} Am - \tau_{zx} An = 0$$

que simplificado da; $(\sigma - \sigma_x) l - \tau_{yx} m - \tau_{zx} n = 0$

Sumando las fuerzas a lo largo de los otros dos ejes tenemos:

$$-\tau_{xy} l + (\sigma - \sigma_y) m - \tau_{zy} n = 0 \quad \text{y} \quad -\tau_{xz} l - \tau_{yz} m + (\sigma - \sigma_z) n = 0$$

Las tres ecuaciones son lineales y homogéneas con respecto a l, m, n , se pueden obtener una solución trivial poniendo a cero el determinante de los coeficientes de l, m, n , puesto que l, m, n no pueden ser iguales a cero.

$$\begin{vmatrix} \sigma - \sigma_x & -\tau_{xy} & -\tau_{xz} \\ -\tau_{xy} & \sigma - \sigma_y & -\tau_{yz} \\ -\tau_{xz} & -\tau_{yz} & \sigma - \sigma_z \end{vmatrix} = 0$$

El desarrollo del determinante es una ecuación de tercer grado en σ .

$$\sigma^3 - (\sigma_x + \sigma_y + \sigma_z)\sigma^2 + (\sigma_x\sigma_y + \sigma_y\sigma_z + \sigma_x\sigma_z - \tau_{xy}^2 - \tau_{yz}^2 - \tau_{xz}^2)\sigma - (\sigma_x\sigma_y\sigma_z + 2\tau_{xy}\tau_{yz}\tau_{xz} - \sigma_x\tau_{yz}^2 - \sigma_y\tau_{xz}^2 - \sigma_z\tau_{xy}^2) = 0$$

Las tres soluciones de la Ec. anterior son las tensiones principales $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$. Para determinar la dirección, con respecto a los ejes originales x, y, z en la que las tensiones principales actúan, es preciso -- sustituir por turno $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ en las tres ecuaciones del sistema. Las ecuaciones resultantes han de resolver simultáneamente para l, m y n , con la ayuda de la relación auxiliar $l^2 + m^2 + n^2 = 1$. Representemos por S la tensión total antes de su resolución en componentes normales y cizallantes, que actúan sobre un plano (no principal), y por l, m, n , los -- cosenos directores del plano con respecto a los tres ejes principales.

$$S^2 = S_x^2 + S_y^2 + S_z^2 = \sigma_1^2 l^2 + \sigma_2^2 m^2 + \sigma_3^2 n^2$$

La tensión normal que actúa en este plano está dada por :

$$\sigma_n = S_x l + S_y m + S_z n = \sigma_1 l^2 + \sigma_2 m^2 + \sigma_3 n^2$$

por tanto la tensión cizallante que actúa en el mismo plano viene dada por:

$$\tau^2 = S^2 - \sigma_n^2 = \sigma_1^2 l^2 + \sigma_2^2 m^2 + \sigma_3^2 n^2 - (\sigma_1 l^2 + \sigma_2 m^2 + \sigma_3 n^2)^2$$

que se reduce a.

$$\tau^2 = (\sigma_1 - \sigma_2)^2 l^2 n^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2 l^2 m^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 m^2 n^2$$

Los valores de τ para los tres juegos particulares de cosenos directores que se relacionan seguidamente son de interés porque bisectan el ángulo formado entre dos de los tres ejes principales. Por consiguiente -- son las tensiones cizallantes máximas o tensiones cizallantes principales.

| l | m | n | τ |
|--------------------------|--------------------------|--------------------------|------------------------------------------|
| 0 | $\pm \sqrt{\frac{1}{2}}$ | $\pm \sqrt{\frac{1}{2}}$ | $\tau_1 = \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2}$ |
| $\pm \sqrt{\frac{1}{2}}$ | 0 | $\pm \sqrt{\frac{1}{2}}$ | $\tau_2 = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2}$ |
| $\pm \sqrt{\frac{1}{2}}$ | $\pm \sqrt{\frac{1}{2}}$ | 0 | $\tau_3 = \frac{\sigma_2 - \sigma_3}{2}$ |

* este determinante de σ es idéntico al determinante de σ en la solución de un problema de elasticidad por los métodos de los ejes principales.

* Regla de Cramer.

En esta ecuación de 3^{er} grado los coeficientes de sigma constituyen la invariante de esfuerzos.

Puesto que según sea convenido, σ_1 es la tensión normal principal algebraicamente mayor y σ_3 la algebraicamente menor, τ_{12} tiene el valor máximo de tensión cizallante, por lo que se denomina tensión cizallante máxima.

$$\tau_{\max} = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2}$$

La tensión cizallante máxima interviene de forma importante en las teorías de fluencia y en las operaciones de conformación de los metales. La figura 2-6 muestra los planos de las tensiones cizallantes principales en un cubo cuyas caras son los planos principales. Obsérvese que por cada par de tensiones principales hay dos planos de tensiones de cizallamiento principales que bisectan a las direcciones principales para tensiones normales.

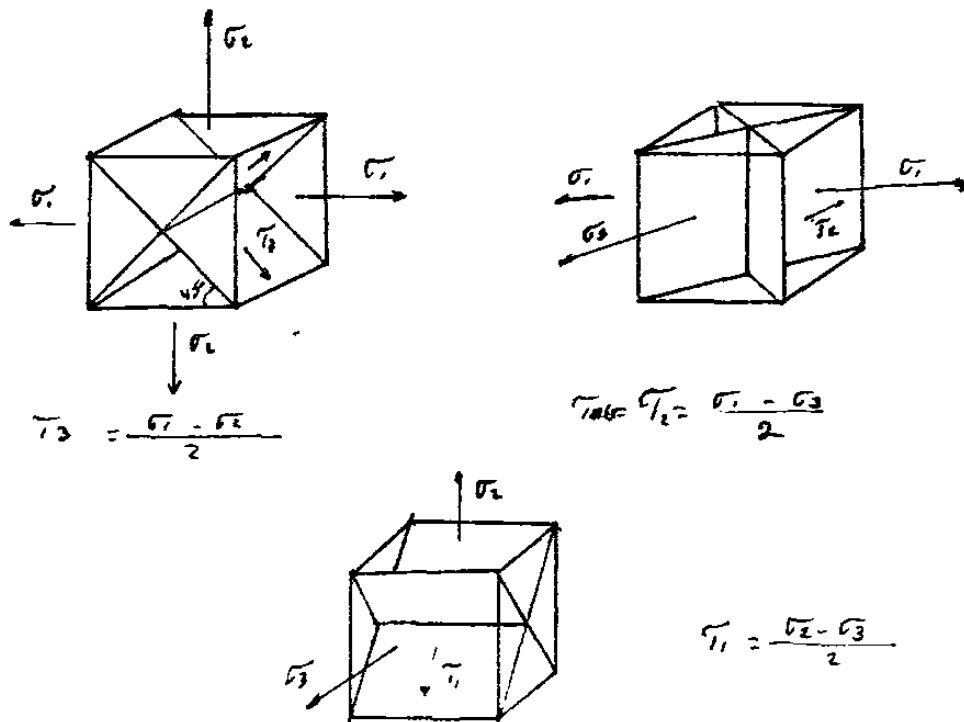


Fig. 2-6.- Planos de las tensiones cizallantes principales.

2-6.- CIRCULO DE MOHR. TRES DIMENSIONES.- La discusión dada en la sección 2-4 de la representación de un estado de tensión en dos dimensiones -- por medio del círculo de Mohr se puede ampliar al de tres dimensiones. La figura 2-7 muestra como un estado de tensión triaxial, definido por las tres tensiones principales, pueden representarse por tres círculos de Mohr. Se puede demostrar que todos los estados de tensión posible en el cuerpo -- caen dentro del área sobreada entre los círculos de la figura 2-7.

Aunque la única importancia física del círculo de Mohr es que proporciona una representación geométrica de las ecuaciones que expresan la transformación de los componentes de tensión para diferentes sistemas de ejes, - constituye un método muy apropiado para visualizar el estado de tensión.

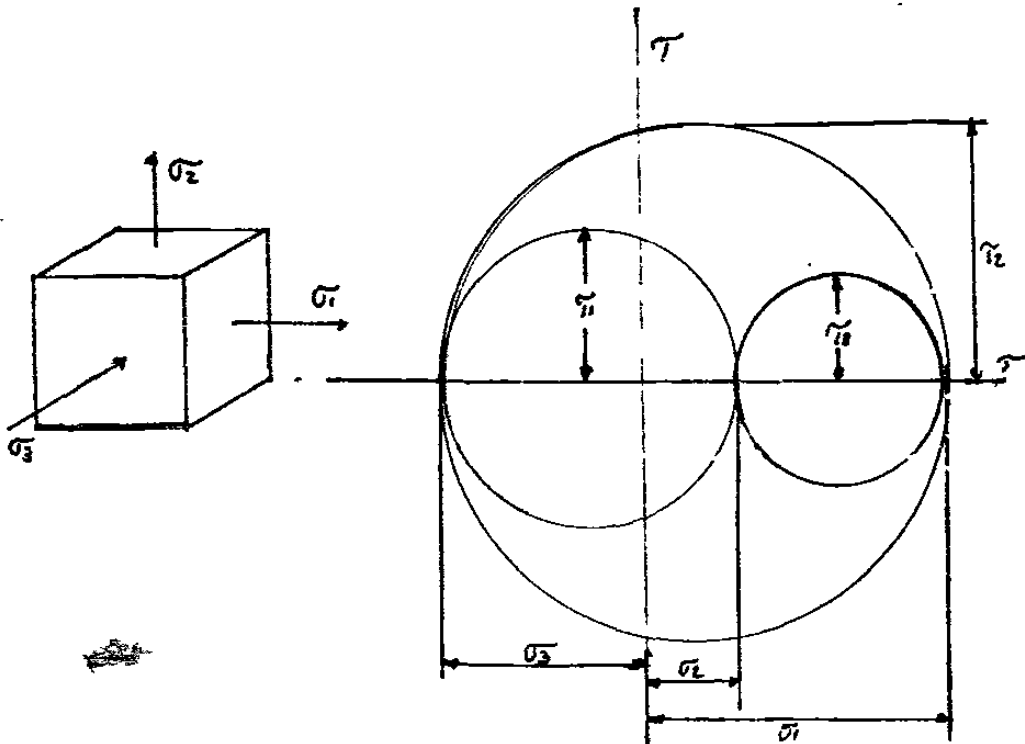


Fig. 2-7.- Representación en el círculo de Mohr de un estado tridimensional de tensiones.

La figura 2-8.- Muestra el círculo de Mohr en varios estados usuales de tensión. Obsérvese que al aplicar una tensión de tracción σ_2 a ángulo recto con otra tensión de tracción, ya existentes σ_1 (Fig. 2-8c).- el resultado de una disminución de la tensión de cizallamiento principal en dos de las tres series de planos sobre los que una tensión principal actúa. Sin embargo, la tensión cizallante máxima no es menor que la que ocurría en tensión uniaxial, pero esto no se habría observado si solo se hubiera utilizado el círculo de Mohr bidimensional. Si se aplica una tensión de tracción en la tercera dirección principal (Fig. 2-8d) la tensión de cizallamiento máxima se reduce apreciablemente. En el caso límite de tracciones triaxiales iguales (tracción hidrostática), el círculo de Mohr se reduce a un punto, no existiendo tensiones cizallantes en ningún plano del cuerpo. La eficacia de las tensiones de tracción biaxiales y triaxiales para reducir las tensiones cizallantes, da como resultado un decremento considerable de la ductilidad del material, ya que la deformación plástica se produce por tensiones cizallantes. Por consiguiente, la rotura frágil está asociada invariablemente con las tensiones triaxiales que se producen en una entalla o concentración de tensiones. Sin embargo, la figura 2-8 muestra que, si se aplican tensiones de compresión laterales con respecto a una tensión de tracción, la tensión cizallante máxima es mayor que en el caso de tracción uniaxial o compresión. A causa del elevado valor de la tensión cizallante, con relación a la tensión de tracción aplicada, el material posee una oportunidad excelente para deformarse plásticamente sin que se produzca la rotura bajo este estado de tensión. En la conformación plástica de los materiales se hace uso de este hecho importante. Así, por ejemplo, se obtiene mayor ductilidad al trefilar alambre que en simple tracción uniaxial. debido a que la reacción del metal contra la hilera produce tensiones laterales de compresión.

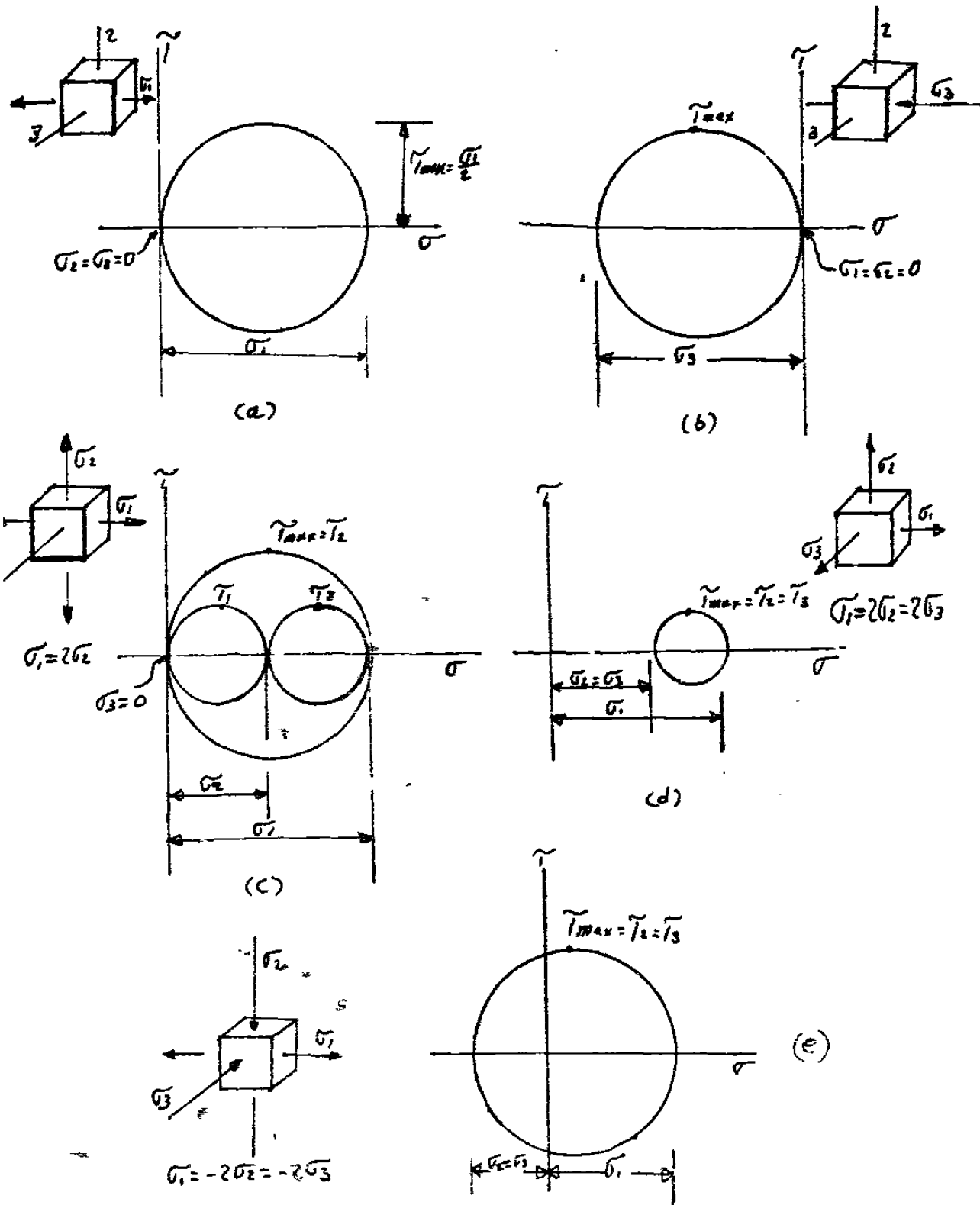


Fig. 2-8.- Círculos de tensiones y esfuerzos cortantes en un elemento de material sometido a diferentes estados de tensión: a) tracción uniaxial; b) compresión uniaxial; c) tracción biaxial; d) tracción biaxial; e) compresión biaxial.

C A P I T U L O 3

EL ENSAYO DE TRACCION

3-1.- CURVA TENSIONES DEFORMACIONES CONVENCIONAL O TECNOLOGICAS.- El ensayo de tracción convencional o tecnológico se emplea ampliamente para obtener una información básica sobre la resistencia mecánica de los materiales y como ensayo de recepción para la especificación de los mismos. En el ensayo de tracción se somete la probeta a una fuerza de tracción monoaxial, que va aumentando de forma progresiva, y se van midiendo simultáneamente los correspondientes alargamientos con los datos de carga y alargamientos obtenidos se construye una curva tensiones deformaciones convencional (Fig. 3-1). Los puntos significativos de dicha curva se han estudiado ya en cualquier tratado elemental de resistencia de materiales en el cual se considera un límite elástico. La tensión utilizada en la curva de tensiones deformaciones de la tensión media longitudinal producida en la probeta de tracción.

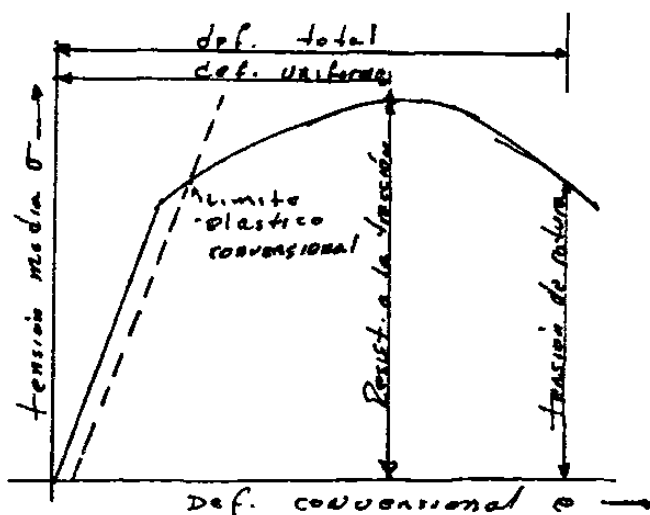


FIG. 9-1. Curva de tracción convencional o tecnológica.

La tensión media se obtiene dividiendo la carga por el área a la sección transversal inicial de la probeta:

$$\sigma = \frac{P}{A_0}$$

LA deformación utilizada en la curva de tensiones-deformaciones es la deformación lineal media obtenida al dividir el alargamiento de la distancia entre puntos de la probeta por su longitud original,

$$e = \frac{\delta L}{L_0} = \frac{\Delta L}{L_0} = \frac{L - L_0}{L_0}$$

Puesto que la tensión y la deformación se obtienen dividiendo la carga y el alargamiento por factores constantes la curva carga-alargamiento tendrá la misma forma que la curva de tensiones-deformaciones. Las dos curvas se usan con frecuencia indistintamente.

La forma y las magnitudes de las curvas de tensiones-deformaciones de un material dependerá de su composición, tratamiento térmico, historia anterior de deformación plástica y velocidad de deformación, temperatura y estado de tensión creado durante el ensayo. Los parámetros utilizados para describir la curva de tensiones-deformaciones de un metal son la resistencia a la tracción, el límite plástico convencional o el aparente, el alargamiento por ciento u la estricción. Los dos primeros son parámetros de resistencia mecánica; los dos últimos informan sobre la ductibilidad.

RESISTENCIA A LA TRACCION.- La resistencia a la tracción es el cociente -- obtenido al dividir la carga máxima por la sección transversal inicial de la probeta

$$\sigma_u = \frac{P_{max}}{A_0}$$

La resistencia a la tracción es el valor citado con más frecuencia en los resultados de un ensayo de tracción; en realidad, es un dato que carece prácticamente de significado con relación a la resistencia mecánica de un metal. LA resistencia a la tracción debe ser considerada, en los metales dúctiles, como una medida de la carga máxima que puede soportar un metal bajo las más restrictivas condiciones de carga monoaxial. Más adelante veremos que este valor tiene poca relación con la resistencia mecánica útil de metal bajo las más complejas condiciones de tracción que usualmente se encuentran. Durante muchos años la resistencia mecánica de las piezas se determinaba a partir de la resistencia mecánica a la tracción convenientemente reducida por un factor de seguridad. El índice actual se se orienta hacia un intento más racional de determinar el diseño estático de los metales dúctiles con el límite elástico.

Sin embargo y a causas de la práctica, mantenida durante tanto tiempo, de utilizar la resistencia a la tracción para determinar la resistencia mecánica de los materiales se ha convertido en una propiedad muy familiar y como tal es una forma muy útil de identificación de un material. del mismo modo que la composición química sirve para identificar un metal o aleación. Además, la resistencia mecánica a la tracción es fácil de determinar y por esto es útil para las especificaciones y para el control de calidad de un producto. También son de gran utilidad las diversas correlaciones científicas encontradas entre la resistencia a la tracción y otras propiedades, tales como la dureza y la resistencia a la fatiga. La resistencia a la tracción es un criterio válido al realizar un diseño en el caso de materiales frágiles.

LIMITE ELASTICO CONVENCIONAL.- El límite elástico convencional es la carga correspondiente a una pequeña deformación plástica especificada dividida por el área de la sección transversal inicial de la probeta.

$$\sigma_0 = \frac{P_{e=0.002}}{A_0}$$

A causa de las dificultades prácticas que existen para determinar el verdadero límite elástico o límite de proporcionalidad, el límite elástico convencional y el límite elástico a parente son los parámetros preferidos en ingeniería para expresar el comienzo de la deformación plástica. Cuando el proyecto con un metal dúctil es necesario evitar la deformación plástica. El límite elástico es el criterio apropiado con respecto a la resistencia del metal. Un importante característica del límite elástico convencional es que el valor determinado por el ensayo de tracción puede utilizarse para predecir las condiciones de influencia estática. Las otras condiciones de tracción más complejas por medio del criterio de fluencia de la energía de distorsión lo cual veremos en el capítulo 4. Un ejemplo de esto es la determinación de la presión de rotura elástica de los tubos de pared gruesa, sometidos a una presión interna, a partir de los resultados de un ensayo de tracción. El límite elástico convencional y el límite elástico aparentes son más sencibles a la diferencia en el tratamiento mecánico o método de ensayo que la resistencia a la tracción.

ALARGAMIENTO DE ROTURA (tanto por ciento).- El tanto por ciento de alargamiento de rotura es la relación entre el aumento de la longitud de la distancia entre puntos de la probeta y su longitud original, expresado en tantos por cientos:

$$\text{alargamiento } \% = 100 \frac{L_f - L_0}{L_0} = 100 e_f$$

dónde :

L_f = distancia entre puntos al producirse la fractura;

L_0 = distancia entre puntos original;

e_f = deformación convencional al producirse la fractura.

El numerador de esta Ec. es, sencillamente el alargamiento total medio de la distancia entre puntos de la probeta. Este valor está afectado por la deformación durante la estricción, por lo que el valor del alargamiento por ciento depende, en cierto modo de la distancia entre puntos. El alargamiento de la probeta es uniforme a lo largo de la distancia entre puntos, hasta el momento de carga máxima. Rebasando este punto, comienza la estricción u la deformación deja de ser uniforme. La deformación uniforme es de más importancia que la deformación total al producirse la fractura u tiene también más valor práctico en la predicción de la conformabilidad de las chapas metálicas. Sin embargo el alargamiento uniforme no se determina corrientemente en un ensayo de tracción rutinario por lo cual a menos -- que se indique específicamente por alargamiento se entiende usualmente el alargamiento de rotura. Este se determina uniendo los dos trozos de probeta de tracción rota y midiendo la variación sufrida por distancia entre puntos esta distancia es un dato que debe acompañarse siempre al expresar los valores del alargamiento por ciento. -

Estricción (de rotura). - El tanto por ciento de estricción es la relación existente entre la disminución del área de la sección transversal de la probeta de tracción despues de la fractura y la superficie original - expresada en tanto por ciento.

$$\text{disminución del área} = q = \frac{A_0 - A_f}{A_0}$$

Es difícil determinar la estricción en probetas de forma circular, cuya razón no se determina usualmente en esta forma. En probetas de tracción planas rectangulares, de más exactitud, se determina el área aproximadamente :

$$A = \frac{h}{3} (a + 2d)$$

donde:

h- ancho de la probeta:

a- espesor dentro de la probeta:

d- espesor de la sección transversal en los extremos de la probeta

El alargamiento y la estricción no son, directamente de interés para el proyectista. NO parece haber métodos cuantitativos para determinar el alargamiento o a la estricción mínimos que debe tener un material para una explicación determinada. NO obstante, estos valores pueden proporcionar -- indicaciones cualitativa sobre la conformidad de un metal una estricción muy acusada indica la capacidad del metal para soportar la grande formación sin romperse.

La estricción es el parametro mas sensible a la estructura que puede medirse en el ensayo de tracción. Por tanto su aspecto más importante es el de ser utilizada como una indicación de la calidad del material. Una disminución en el valor de la estricción, por debajo de un nivel especificado que la experiencia a señalado como indicativo de buen comportamiento en servicio, es una advertencia de que la calidad es deficiente. .

MODULO DE ELASTICIDAD .- LA pendiente de la parte lineal inicial de la -- curva de tensiones-deformaciones es el módulo de elasticidad o módulo de Young. El módulo de Young, es una medida de la rigidez del material. Cuando mayor sea el módulo más pequeña sera la deformación elástica resultante de la aplicación de una tensión dada. Puesto que para calcular la flexión de vigas y otras piezas es necesario conocer el módulo de elasticidad, es un importante valor a tener en cuenta al realizar un proyecto.

El módulo de elasticidad está determinado por las fuerzas de enlace entre los átomos. Puesto que estas fuerzas no pueden alterarse sin cambiar la naturaleza básica del material, se deduce que el módulo de elasticidad es una de las propiedades mecánicas más insensible a la estructura. Solo le afecta ligeramente las adiciones de aleantes, el tratamiento térmico o la conformación en frío. Sin embargo aumentar la temperatura se produce una disminución del módulo de elasticidad. En la siguiente tabla se indica los valores típicos a temperatura ambiente para metales comunes de ingeniería a diferentes tensiones.

T A B L A 3-1

VALORES TÍPICOS DE LOS MÓDULOS DE ELASTICIDAD A DIFERENTES TEMPERATURAS.

| Materiales | -----Módulo de elasticidad-Kg/mm | | | | |
|-------------------------------|----------------------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| | Temperatura ambiente. | 400°F (204-°C) | 800°F (427-°C) | 1000°F (538°C) | 1200°F (649°C) |
| Acero al carbón. | 21,000 | 18,900 | 15,750 | 13,650 | 12,600 |
| Acero Inoxidable-Austenítico. | 19,600 | 17,850 | 16,100 | 15,750 | 14,700 |
| Aleaciones de titanio. | 11,550 | 9,800 | 7,490 | 7,070 | * |
| Aleaciones de aluminio | 7,350 | 4,830 | 5,460 | | |

RESILIENCIA ELÁSTICA.- La capacidad de un material para absorber energía cuando es deformado elásticamente y devolverla cuando se elimina la carga, se llama resiliencia. Esta se mide, usualmente, por medio del módulo de resiliencia, que es la energía de deformación, por unidad de volumen, requerida para llevar al material desde una tensión cero hasta el límite elástico la energía de deformación por unidad de volumen para tensión uniaxial es :

$$U_o = \frac{1}{2} \sigma_x \epsilon_x$$

Según esta definición, el módulo de resiliencia será :

$$U_R = \frac{1}{2} \sigma_o \epsilon_o = \frac{1}{2} \sigma_o \frac{\sigma_o}{E} = \frac{\sigma_o^2}{2E}$$

Esta ecuación indica que el material ideal para resistir cargas de energía en aplicaciones en las que no deba sufrir deformación permanente, por ejemplo : los muelles mecánicos es un material con un elevado límite y un módulo de elasticidad bajo. La table 3-2.- muestra algunos valores del módulo de resiliencia para diferentes materiales.

T A B L A 3-2

MÓDULO DE RESILIENCIA ELÁSTICA DE VARIOS MATERIALES

| Materiales | E, Kg/mm | Kg/mm | Modulo de Resiliencia U Kg/mm. |
|-------------------------------------------------|----------------------|-------|--------------------------------|
| Acero al carbono, medio | 21 000 | 31.5 | 23.6×10^{-3} |
| Acero de muelles alto - en carbono | 21 000 | 98.0 | 224.0×10^{-3} |
| Cobre | 11 200 | 2.8 | 3.7×10^{-3} |
| Caucho | 105×10^{-3} | 0.21 | 210.0×10^{-3} |

TENACIDAD. - La tenacidad de un material es su capacidad para absorber energía en el campo plástico. La capacidad para resistir tensiones ocasionales superiores al límite elástico sin que se produzca fractura, es de gran valor en piezas tales como acoplamientos de vagones en granajes, cadenas y ganchos de grúas. La Tenacidad es un concepto comúnmente utilizado pero difícil de medir y definir. Una forma de concretar el concepto de tenacidad es considerar el área total que queda bajo la curva de tensiones-deformaciones. Esta superficie es una indicación del trabajo total, por unidad de volumen, que puede realizarse sobre el material sin que se produzca la rotura. La fig. 3-2 muestra la curva de tensiones-deformaciones para materiales de alta y baja tenacidad.

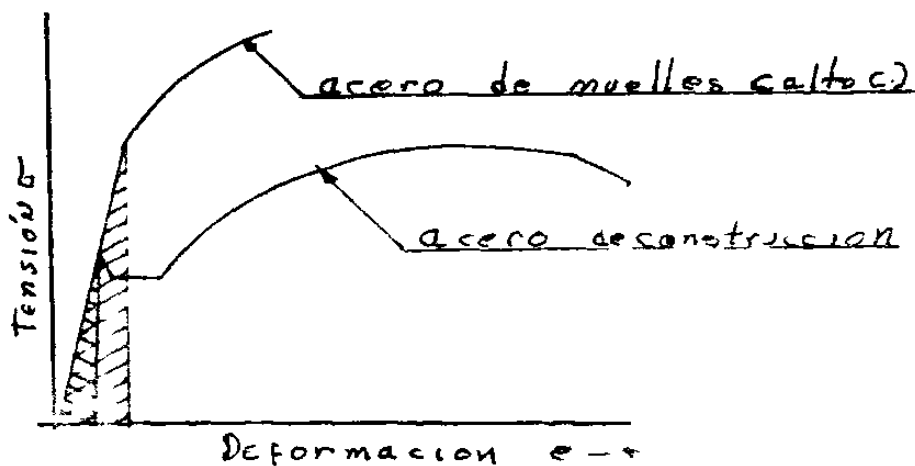


Fig. 3-2. Comparación de la tenacidad entre aceros de construcción.

El acero para muelles con alto contenido de carbon tiene un límite elástico y una resistencia a la tracción más elevados que el acero de construcción con contenidos medios de carbono. Sin embargo el acero de construcción es más dúctil y tiene un alargamiento total mayor. El área total bajo la curva de tensiones-deformaciones es mayor en el acero de construcción, por lo tanto es un material más tenaz. Esto indica que la tenacidad es un parámetro que comprende la resistencia mecánica u la ductilidad. Las zonas rayadas de la figura 3-2 corresponden al módulo de resiliencia de cada acero. A causa de su límite elástico convencional más alto el acero para muelles tiene mayor resiliencia plástica aunque la tenacidad sea menor. Se han sugerido varias aproximaciones matemáticas para calcular el área que queda bajo la curva de tensiones-deformaciones para los aceros dúctiles que tiene una curva de tensiones-deformaciones como la del acero de construcción. se puede lograr una aproximación al valor del área por medio de las siguientes ecuaciones.

$$U_T \approx \sigma_{\mu} \epsilon_f$$

$$U_T \approx \frac{\sigma_0 + \sigma_u}{2} \epsilon_f$$

Se supone algunas veces que la curva de tensión-deformación de los materiales frágiles es una parábola u el área bajo la curva viene dada por

Todas estas relaciones son solamente aproximaciones del área que queda bajo la curva de tensiones-deformaciones. Además, las curvas no representan el comportamiento real en el campo plástico puesto que todas dependen del área de la sección inicial de la probeta.

3-2.-CURVA REAL DE TENSIONES-DEFORMACIONES .-

La curva usual de tensiones-deformaciones, la convencional o tecnológica no proporciona una indicación de las características de deformación de un metal porque esta basada totalmente sobre las dimensiones iniciales de la probeta y estas dimensiones cambian constantemente durante el ensayo. Además el metal dúctil sometido a tensión sufre inestabilidad sin estricción localizada durante la última fase del ensayo. Después de la inestabilidad la deformación disminuye, es decir, la deformación real por unidad de área de la sección transversal de la probeta se vuelve menor. La tensión media basada en la sección inicial disminuye y la curva de tensión media basada en la sección real muestra un descenso de la curva de tensiones después del punto de carga máxima.

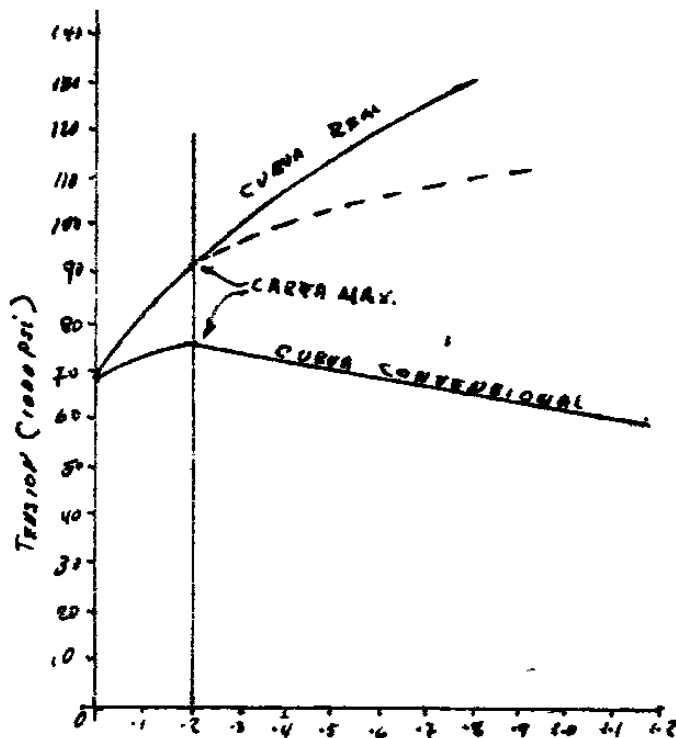


Fig. 3-3.- Comparación de las curvas tecnológicas y real de tracción del níquel.

$$\bar{\sigma} = \frac{P}{A_0}$$

$$\bar{\sigma}_r = \frac{P}{A_i}$$

$$e = \frac{L - L_0}{L_0}$$

$$\epsilon = L_n \frac{L}{L_0} = L_n \frac{A_0}{A}$$

$$\epsilon = L_n (e + 1)$$

$$\bar{\sigma}_r = \bar{\sigma} (e + 1)$$

realmente, el metal continúa endureciéndose por deformación hasta que se produce la fractura de modo que también debería aumentar la tensión requerida para producir mayor deformación. Si se usa la tensión real, basada en el área real instantánea de la sección transversal de la probeta se encuentra que la curva de tensión-deformación asciende de modo continuo hasta producirse la fractura. Si la medida de la deformación está también basada en medida instantánea la curva obtenida se conoce como curva real de tensiones-deformaciones. También se denomina curva de fluencia puesto que representa las características bases del flujo plástico del metal. Cualquier punto de la curva de fluencia puede considerarse como el límite elástico para un metal deformado en tracción en la proporción mostrada en la curva. De este modo si se retira la carga en este momento y se aplica de nuevo el metal se comportará elásticamente y a través de todo el intervalo de recarga. La tensión real es la carga en cualquier instante dividida por el área de la sección transversal de la probeta en ese mismo instante.

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

La deformación está definida de la siguiente forma.

$$\epsilon = \ln \frac{L}{L_0} = \ln \frac{A_0}{A}$$

Esta definición de la deformación fue propuesta por Ludwik a principios de siglo.

La relación entre deformación real y deformación convencional se puede encontrar de la siguiente manera.

$$e = \frac{\delta}{L_0} = \frac{\Delta L}{L_0} = \frac{L_f - L_0}{L_0} = \frac{L_f}{L_0} - 1$$

$$e + 1 = \frac{L}{L_0}$$

y como

$$e = \ln \frac{L}{L_0}$$

$$\epsilon = \ln (e + 1)$$

La tensión real se puede determinar a partir de la tensión media de la curva convencional:

$$\sigma_r = \frac{P}{A_c} = \frac{P}{A_0} \frac{A_0}{A_c}$$

Pero por la constancia de Volumen $\frac{A_0}{A_c} = \frac{L}{L_0}$

y como

$$\epsilon = \ln(e+1)$$

o bien

$$\frac{L}{L_0} = \frac{A_0}{A_c} = e+1$$

$$\sigma_r = \frac{P}{A_0} (e+1) \quad \therefore \quad \sigma_r = \sigma (e+1)$$

En la figura 3-3.- se compara la curva real de tensiones deformaciones de una probeta de níquel con la curva convencional. Adviértase que la escala pequeña del eje de deformaciones, que se utilizó para destacar la región plástica, ha confundido la región elástica con el eje de ordenadas. La curva real de tensiones-deformaciones es, esencialmente lineal desde la carga máxima hasta la fractura mientras que en los casos su pendiente disminuye continuamente. Debe darse poca importancia a esta región lineal de la curva de fluencia. Cuando se produce la estricción, el estado triaxial de tensión que se crea en esta región hace que la tensión longitudinal media necesaria para que el flujo plástico continúe. Por tanto la forma de la curva de fluencia de punto de carga máxima hasta la fractura depende de la velocidad de desarrollo de la estricción local. Este puede ser diferente para materiales con diferente capacidad de endurecimiento por deformación y por tanto no hay seguridad de que la curva de fluencia sea lineal en esta región.

A partir de la curva real de tensiones-deformaciones se pueden determinar los siguientes parámetros:

TENSIÓN REAL A CARGA MÁXIMA.- La tensión real a carga máxima corresponde a la tensión media de la curva real.- En la mayor parte de los materiales comienza la estricción coincidiendo.

con la carga máxima. Como una buena aproximación, se admite que la estricción se producirá para un valor de la deformación en el que la tensión real es igual a la pendiente de la curva de la fluencia. Los símbolos σ_m y ϵ_m designan la tensión y deformación reales para la carga máxima, mientras que A_0 representa el área de la sección transversal de la probeta sometida a la carga máxima. Por tanto:

$$\sigma_m = \frac{P_{max}}{A_m} \quad \epsilon_m = \ln \frac{A_0}{A_m} \quad \bar{\sigma} = \frac{P_{max}}{A_0}$$

$$y \quad \bar{\sigma} = \sigma_m e^{-\epsilon_m} \quad \sigma_u = \text{resist. a la tracción}$$

La ecuación anterior relaciona la resistencia a la tracción con la tensión y deformación reales para la carga máxima.

TENSION REAL DE FRACTURA. - La tensión real de fractura es igual a la carga que produce la fractura, dividida por el área de la sección transversal de la probeta en el momento de la fractura. Esta tensión debe ser corregida por el estado triaxial de tensión existente en la probeta de tracción en el momento de la fractura. Puesto que con frecuencia se carece de los datos precisos para efectuar esta corrección los valores reales de la tensión de fractura no suelen ser muy exactos.

DEFORMACION REAL DE FRACTURA. - La deformación real de fractura es la deformación real basada en el área inicial y en el área después de la fractura

$$\epsilon_f = \ln \frac{A_0}{A_f}$$

Este parámetro representa la deformación real máxima que puede resistir el material antes de la fractura y es análogo a la deformación total para producir la fractura de la curva convencional de tensiones-deformaciones.

DEFORMACION REAL UNIFORME. La deformación real uniforme es la deformación real basada sobre la deformación hasta la carga máxima; este último valor se toma como base el área de la sección transversal en el punto de carga máxima o la distancia entre puntos para la carga máxima. La deformación uniforme es útil e interesante en el estudio de la ductilidad de los materiales a partir de los resultados de la tracción:

$$\epsilon_r = \ln \frac{A_0}{A_u}$$

DEFOMACION REAL DE ESTRICCIÓN LOCALIZADA.- La deformación real de estricción localizada es la deformación requerida para deformar la probeta desde la carga máxima hasta la fractura.

$$\epsilon_n = \ln \frac{A_u}{A_f}$$

Si la sección transversal de la probeta es circular, la deformación real puede calcularse fácilmente partiendo del diámetro inicial de D y el diámetro instantáneo D .

Usualmente es deseable poder expresar la curva real de tensiones por medio de una relación matemática.

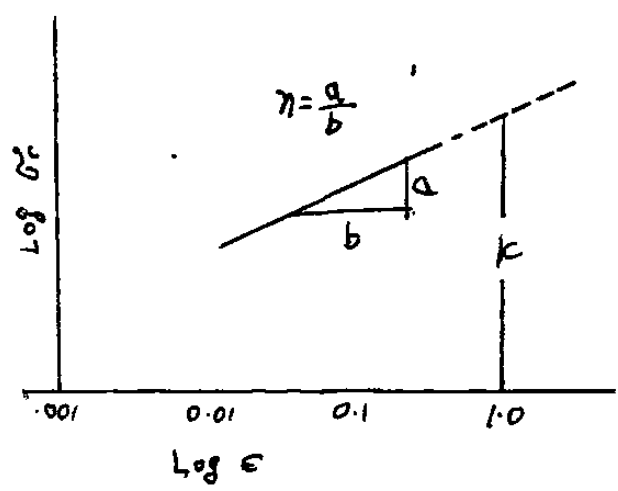
La expresión más sencilla y útil para relacionar las tensiones y deformaciones de la curva real es la siguiente :

$$\sigma = K \epsilon^n$$

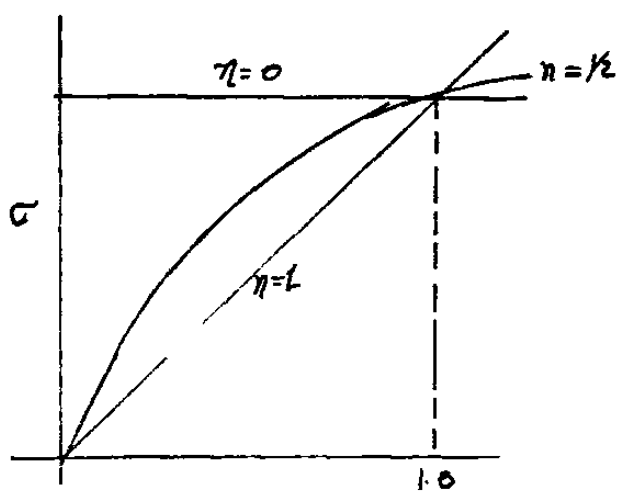
en donde n es el coeficiente de endurecimiento por deformación y K el coeficiente de resistencia. Una representación logarítmica de tensión y deformación reales hasta la carga máxima dará una línea recta como la de la fig. 3-4 La pendiente de esta línea es n , y K es la tensión real para $\epsilon=1.0$ con objeto de aproximar más los datos a una línea recta es deseable usualmente sustraer la deformación elástica de la deformación total. En la tabla 3-3 se relacionan algunos valores típicos de n y k

TABLA 3-3
Valores de n y k para metales a la temperatura ambiente.

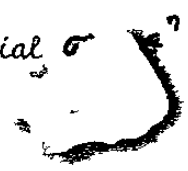
| Metal | Estado | n | $K_{\sigma-\epsilon}$ | R_{e^+} |
|--------------------------|---------------------------------|------|-----------------------|-----------|
| Acero con 0.25% de C. | Recocido | 0.26 | 53 | - |
| Acero SAE 4340 | Recocido | 0.15 | 65 | 1 |
| Acero con 0.6% de C. | Templado y revenido a 358 C. | 0.10 | 159.6 | - |
| Acero con 0.6% de C. | Templado y revenido a 704 C. | 0.19 | 115 | - |
| Cobre | Recocido | 0.54 | - | - |
| Latón 70/30 | Recocido | 0.19 | - | - |



Representación logarítmica doble de la curva tensión-deformación.



Formas típicas de la curva potencial σ



3-3.- INESTABILIDAD EN TRACCION.- La estricción se inicia generalmente con la carga máxima durante la deformación por tracción de un metal dúctil. Un material plástico ideal, en el cual no tenga lugar ningún endurecimiento por deformación, podría hacerse inestable en tracción e iniciarse la estricción tan pronto como empezase la fluencia. Sin embargo, un metal real sufre un endurecimiento por deformación que tiende a incrementar la capacidad de la probeta para soportar una carga cuando la deformación aumenta. A este efecto se opone la disminución gradual del área de la sección transversal de la probeta mientras experimenta el alargamiento.

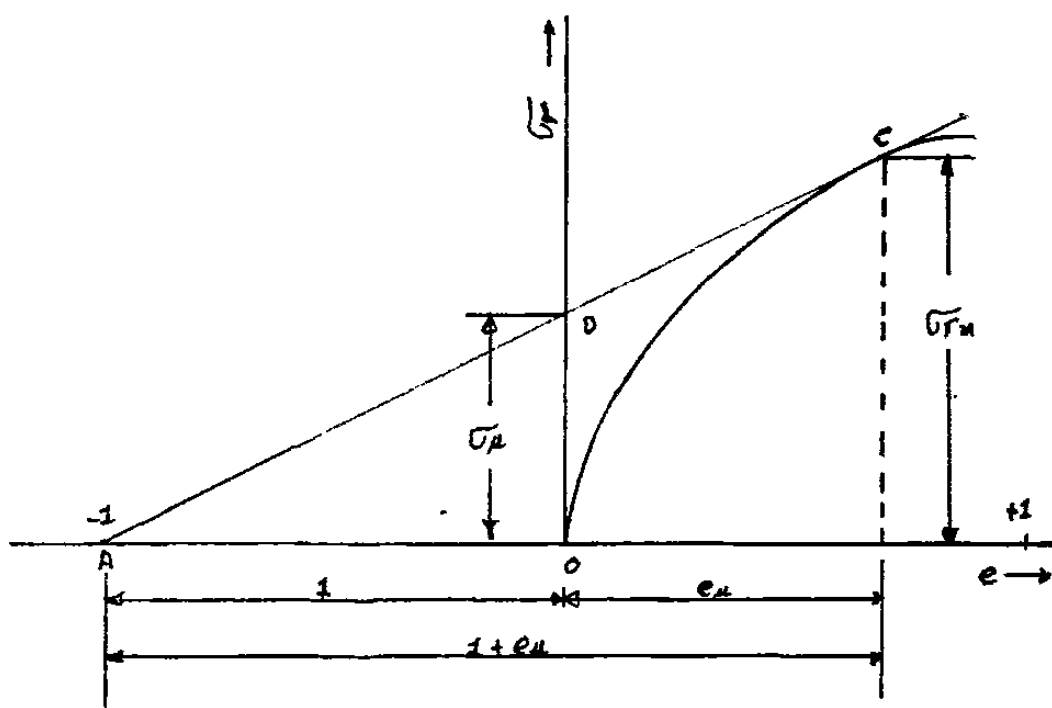


Fig. 3-5.- Construcción de considere para determinar el punto de carga máxima.

La estricción, o la deformación localizada, comienza al alcanzarse la carga máxima cuando el aumento de tensión, debido a la disminución del área de la sección transversal de la probeta, se ha convertido en menor que el aumento de la capacidad del metal para soportar la carga, debido al endurecimiento por deformación. Esta condición, de inestabilidad, que conduce a una deformación localizada, está definida por la ecuación $dt = 0$.

$$P = \sigma A$$

$$dP = \sigma dA + A d\sigma = 0$$

De la constancia de volumen se deduce :

$$\frac{dL}{L} = - \frac{dA}{A}$$

$$- \frac{dA}{A} = \frac{dL}{L} = \frac{d\sigma}{\sigma} = d\epsilon = \frac{de}{1+e}$$

Por tanto,

$$\frac{d\sigma}{d\epsilon} = \sigma$$

o bien

$$\frac{d\sigma}{d\epsilon} = \frac{\sigma}{1+e}$$

La Ec. 1era. expresa que se producirá la estricción local en tracción uniaxial por una deformación para la cual la pendiente de la curva real de tensiones-deformaciones es igual a la tensión real correspondiente a esa deformación.

La 2da. Ec. permite una interesante construcción geométrica para la determinación del punto de carga máxima. En la figura 3-5 la curva de tensiones-deformaciones convencional esta trazada en términos de la tensión real en función de la deformación real convencional el punto A representa una deformación negativa de valor absoluto 1.0. Una línea trazada desde el punto A y ta ocate a la curva de tensiones-deformaciones señalará el punto de carga máxima porque de acuerdo, con la Ec. anterior la pendiente en este punto es $\frac{\sigma}{1+e}$. La tensión en este punto es la tensión real con esta máxima estudiada de los triángulos semejantes de la Fig. 3-5 muestra que la Ec. se satisface en el punto de máxima resistencia a la tracción.

Si la curva de flujo

$\sigma = k \epsilon^n$ se produce la estricción

$$\sigma = k \epsilon^n \therefore \frac{d\sigma}{d\epsilon} = n k \epsilon^{n-1} = n \frac{\sigma}{\epsilon}$$

Por tanto, la deformación en la cual se produce es numéricamente igual al cociente de endurecimiento por deformación. La inestabilidad plástica es, con frecuencia, importante en las operaciones de conformación de chapa metálica, puesto que la deformación para la cual empieza a producirse la localización de la misma es el límite de conformación del metal. Lankford y Saibel han determinado el criterio de deformación localizada en el caso de una chapa sujeta a fuerza de tracción biaxiales (conformación por estirado), un tubo de pared delgada sometido a presión interna y una chapa sometida a un ensayo hidrostático de abombado.

DIMENSIONES DE LA PROBETA DE TRACCIÓN. - Esta generalmente admitido que con objeto de comparar las medidas de alargamiento obtenidas con probetas de diferentes dimensiones estas probetas deben ser geoméricamente semejantes. La relación entre la distancia entre puntos u y el diámetro debe ser constante. Las probetas de tracción normalizadas tienen en los Estados Unidos las siguientes dimensiones: diámetro 0,505 pulgadas (12,927mm); distancia entre puntos 2 pulgadas (50,8 mm); por esto L/D es ≈ 4 o $L=4.51\sqrt{A}$. Esta es la base de la probeta de tracción de la ASTM relacionada en la tabla 3-5. Las normas británicas especifican $L/D=3.54$, mientras que las normas alemanas se emplean $L/D=10$. Las probetas prescritas en la Tabla de Tipificación de Aceros finos del Instituto del Hierro y del Acero se ajustan a la relación $L=\sqrt{66.67A}$.

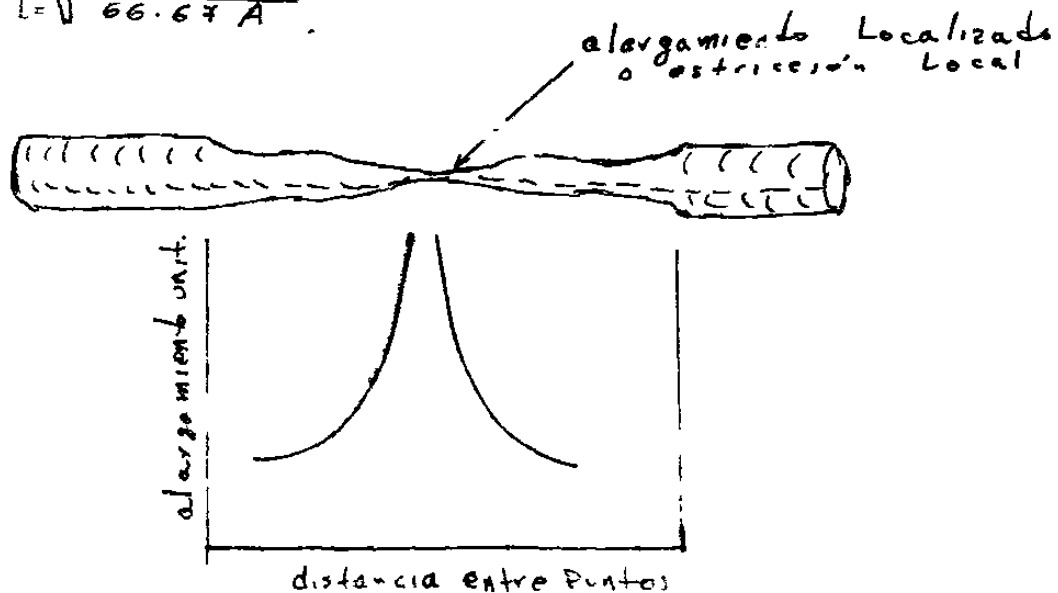


Fig. 3- El alargamiento unitario en un punto de una probeta de tracción.

En las probetas de chapa fina, la relación entre el ancho y el espesor-- puede afectar al alargamiento total. Con una distancia entre puntos constante, un aumento en el espesor de la probeta originaría un aumento en el --alargamiento. Sin embargo, si se varía la anchura o el espesor sin que se modifique el área de la sección transversal, el alargamiento no resulta afectado. Los datos técnicos disponible indican que el alargamiento al --por ciento aumenta proporcionalmente al área elevada a una potencia de exponentes fraccionarios.

El alargamiento uniforme no resulta afectado por la forma geométrica de la probeta, puesto que, hasta la carga máxima, la probeta se alarga y se contrae en diámetro uniformemente. La forma de la probeta varía de un cilindro de cierta longitud y diámetro a un cilindro de mayor longitud y menor diámetro. Por esta razón, el alargamiento uniforme da una idea más exacta sobre la ductilidad por ciento convencional (alargamiento de rotura)..

TABLA 3-5

Dimensiones de las probetas de tracción ASTM

| Dimensiones (DIÁMETRO) PULGADA | Distancia entre Puntos, pulgada | L/D |
|--------------------------------------|------------------------------------|------|
| 0.505 | 2 | 3.97 |
| 0.357 | 1.4 | 3.92 |
| 0.252 | 1 | 3.97 |
| 0.160 | 0.634 | 3.96 |

CAPITULO 4

ELEMENTOS DE LA TEORIA DE LA PLASTICIDAD

4-1.- INTRODUCCION.- La teoría de la plasticidad trata del comportamiento de los materiales en la zona de deformación y en la que la ley de Hooke ya no es válida. La descripción matemática de la deformación plástica de los materiales no está, de ningún modo, tan bien desarrollada como la descripción de la deformación elástica por medio de la teoría de la elasticidad. Por ejemplo, en la región plástica de deformación no existe ninguna relación sencilla entre tensiones y deformaciones como ocurre en la deformación elástica. Además, la deformación elástica depende solamente de los estados de tensión iniciales y finales y es independiente de los estados intermedios, pero la deformación plástica dependen no solamente de la carga final, sino también de los valores anteriores.

La teoría de la plásticidad está relacionada con diferentes tipos de problemas. Desde el punto de vista del diseño, la plasticidad está relacionada con la predicción de la carga máxima que se puede aplicar sin causar una fluencia excesiva. El criterio de fluencia ha de expresarse en función de la tensión, de tal modo que sea válido para todos los estados de tensión. El proyectista está también relacionado con la deformación plástica en problemas en los que el cuerpo está intencionalmente sometido a tensiones superiores al límite elástico dentro de la región plástica, por ejemplo la plasticidad ha de tenerse en cuenta en el diseño de diferentes procesos como en el estampado, el ajuste por contracción y en la velocidad excesiva de los discos de los rotores. La consideración de pequeñas deformaciones plásticas puede ser económica en la construcción de edificios al utilizar la teoría de diseño límite. En el tratamiento matemático de la deformación, interesa a los metalúrgos conocer el criterio de fluencia de deformaciones plásticas. Es no difícil describir de un modo seguro y seguro el comportamiento de un metal en estas condiciones, pero, para obtener una solución matemática manejable, es preciso establecer ciertas hipótesis que simplifiquen el problema.

Otra aplicación de la plasticidad consiste en una mejor comprensión del mecanismo de deformación plástica de los metales. El interés de este campo se centra en las imperfecciones de los sólidos, cristalinos. En comportamiento de los metales de gran importancia el efecto de las variables de la estructura cristalina y las imperfecciones de la red.

4-2.- CURVAS DE FLUENCIA .- La curva tensión -deformación obtenida por carga uniaxial, como en el ensayo corriente de tracción, es de interés fundamental en la plasticidad cuando se utilizan como variable la tensión real σ_r u la deformación real ϵ . La tensión real está dada por la carga dividida por el área de la sección transversal instantánea de la probeta. La deformación real se estudia en la sección siguiente.

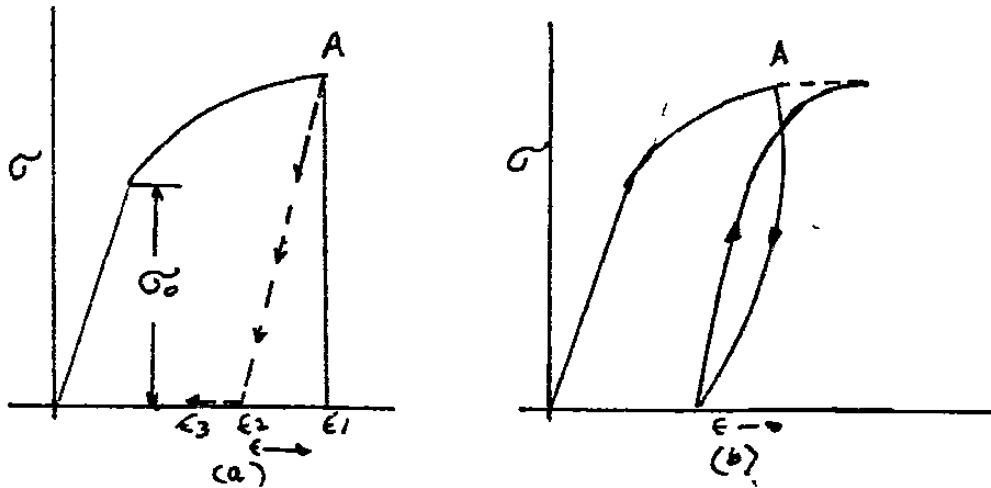


Fig. 4-1.- Curvas típicas tensión-deformación para un metal dúctil.

La finalidad de la presente sección es describir las curvas tensión deformación típicas de los metales reales y compararlas con las curvas teóricas de fluencia de materiales ideales.

En la figura 4-1 a se muestra la curva real tensión deformación para un metal dúctil típico, como el aluminio. La ley Hooke se cumple hasta un cierto límite elástico σ_0 . En vez de σ_0 usaremos σ_0 como medida de la elasticidad. Apartir de σ_0 el metal deforma plásticamente. La mayoría de los metales se endurecen por deformación en esta zona elástica. Se muestra que los aumentos de aquélla tienen valores de la tensión mayores que el límite elástico inicial σ_0 . Sin embargo, al disminuir de lo que sucede con el límite elástico inicial σ_0 y deformación ϵ_0 a ϵ_2 la tensión σ disminuye hasta σ_0 y la deformación ϵ aumenta hasta ϵ_2 . La carga disminuye inmediatamente después de la deformación total desde ϵ_1 a ϵ_2 en una cantidad σ/ϵ .

n de deformación $\epsilon_1 - \epsilon_2$ es la deformación elástica recuperable. Sin embargo, no toda la deformación residual es deformación plástica. Dependiendo del metal y de la temperatura, desaparecerá con una pequeña cantidad de deformación plástica $\epsilon_2 - \epsilon_3$. Este comportamiento anelástico en las teorías matemáticas de la plasticidad se denomina histéresis.

En la curva tensiones-deformaciones, al cesar la carga después de una deformación plástica, no será exactamente lineal y paralela a su porción elástica (Fig. 4-1 b). Además, al volver a aplicar la carga, la línea se desviará de la tensión al valor inicial desde el que se retiró la carga. Si se aplica una pequeña deformación plástica adicional, la curva tensiones-deformaciones se transforma en una continuación de lo que habría sido si no se hubiera interrumpido la carga. Este comportamiento, "histéresis", resulta en que al retirar la carga después de la deformación plástica, se disminuye la tensión. Este comportamiento se denomina histéresis en las teorías de la plasticidad.

La curva tensiones-deformaciones se denomina, frecuentemente, curva de fluencia que proporciona la tensión necesaria para que el metal fluya hacia una determinada deformación dada. Se han realizado muchos intentos de encontrar ecuaciones matemáticas a esta curva. La expresión más comúnmente utilizada es:

$$\sigma = K \epsilon^n$$

donde σ es la tensión para $\epsilon = 1$ y n el coeficiente de endurecimiento por deformación. La pendiente de la representación logarítmica doble de la ecuación solo es válida desde el comienzo de la fluencia plástica hasta la carga máxima a partir de la que se inicia la estricción local. Una expresión más sencilla, como esta ecuación puede resultar de una aproximación matemática considerable cuando se utiliza con las ecuaciones de la plasticidad. Por consiguiente, la práctica común es en este caso utilizar curvas de fluencia, en lugar de la ecuación $\sigma = K \epsilon^n$, para describir el comportamiento de un material rígido y plástico. Este material ideal es el que se muestra en la Fig. 4-1 b, que la tensión crítica es σ_c y la deformación crítica es ϵ_c , y que la tensión de fluencia es σ_f y la deformación de fluencia es ϵ_f . Este comportamiento de fluencia se denomina histéresis y se mide en fricc.

La Fig. 4-2- b muestra la curva de fluencia de un material perfectamente -- plástico con una región elástica. A este comportamiento se aproxima un ma- terial, como el acero ordinario al carbono, que posee un alargamiento gran- de en el límite elástico aparente. Un plantamiento más real es el llegar- a la curva de fluencia por medio de dos líneas rectas que correspondan a -- las regiones elásticas y plásticas Fig. 4-2 C. Este tipo de curvas exige- cálculos matemáticos más complicados.

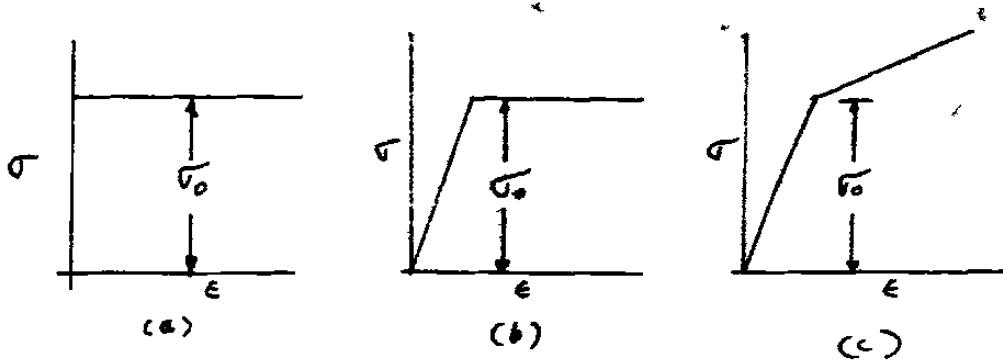


Fig. 4-2.- Curvas de fluencia plástica idealizadas, a) Material plástico --- ideal rígido b) material plástico ideal con región elástica c) material que endurece por deformación.

4-3.-DEFORMACION REAL.- La siguiente ecuación describe el concepto conven- cional de la deformación lineal unitaria esta es la variación de longitud- unitaria inicial.

$$\epsilon = \frac{\Delta L}{L_0} = \frac{1}{L_0} \int_{L_0}^L dL$$

Esta definición es satisfactoria para deformaciones elásticas en las que -- es muy pequeña. Si en cambio en la deformación plástica las deformaciones -- son grandes y durante el proceso de deformación, la distancia entre puntos varía con- siderablemente. Luego, la definición de deformación real es más apropiada. En esta definición de defor- mación la variación de longitud se refiere a la distancia entre puntos -- instantánea y no a la distancia entre puntos iniciales.

$$\epsilon = \sum \frac{\Delta L_i}{L_i} = \frac{L_1 - L_0}{L_0} + \frac{L_2 - L_1}{L_1} + \dots$$

o bien

$$\epsilon = \int_{L_0}^L \frac{dL}{L} = \ln \frac{L}{L_0}$$

la relación entre la deformación real u la deformación lineal convencional es la siguiente :

$$e = \frac{\Delta L}{L_0} = \frac{L - L_0}{L_0} = \frac{L}{L_0} - 1$$

$$e + 1 = \frac{L}{L_0}$$

$$\epsilon = \ln \frac{L}{L_0} = \ln (e + 1)$$

Las dos medidas de la deformación proporcionan casi idénticos resultados hasta deformaciones de aproximadamente 0.1. Debido a que el volumen permanece esencialmente constante durante la deformación plástica la ecuación anterior se puede expresar en función de la longitud o de la sección transversal :

$$\epsilon = \ln \frac{L}{L_0} = \ln \frac{A_0}{A}$$

Así mismo debido a la constancia de volumen, la suma de las tres deformaciones principales es igual a cero.

$$\epsilon_1 + \epsilon_2 + \epsilon_3 = 0$$

Esta relación es válida para las deformaciones principales convencional.

La ventaja de utilizar la deformación real se hace evidente con el siguiente ejemplo. Consideremos un cilindro uniforme que se alarga duplica su longitud. La deformación convencional es, entonces, $e = (2L_0 - L_0)/L_0 = 1$ ó una deformación del 100%. Para conseguir la misma deformación lineal mediante el estiramiento, la que contiene el cilindro hasta un espesor $\frac{1}{2}$ de su espesor original, intuitivamente, se cree que la deformación por estiramiento es $e = (L_0/2 - L_0)/L_0 = -1/2$ ó una deformación del 50% en longitud inicial. Sin embargo, a la hora de calcular la deformación real producida al alargar el cilindro hasta el doble de su longitud, la deformación real se calcula en función de la longitud inicial. Al alargar dos veces la longitud inicial $\epsilon = \ln (2L_0/L_0) = \ln 2$. Al estirar un cilindro a la mitad de su longitud inicial $\epsilon = \ln [(L_0/2)/L_0] = \ln \frac{1}{2} = -\ln 2$.

4-4.- CRITERIO DE FLUENCIA EN METALES DUCTILES.- El problema que se presenta al reducir las relaciones matemáticas, para la predicción de las condiciones en las que comienza la deformación plástica cuando un material está sometido a un estado complejo de tensión, es un aspecto importante en el campo de la plasticidad. En cargas uniaxial, la fluencia plástica comienza en el límite elástico y es de esperar que, en una situación de esfuerzos combinados, la fluencia esté relacionada con cierta combinación de las tensiones principales. Se puede expresar un criterio de fluencia en la forma general $F(\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3, \dots)$ pero, en la actualidad, no existe ningún método teórico para calcular la relación entre las componentes de las tensiones que correlacionan la fluencia en un estado de tensión en tres dimensiones y la fluencia en un ensayo de tracción uniaxial. Los criterios de fluencia son, por consiguiente, relaciones esencialmente empíricas. Actualmente, existen dos teorías generalmente aceptadas para predecir el comienzo de la fluencia en los metales dúctiles.

TEORIA DE LA TENSION CIZALLANTE MAXIMA (CRITERIO DE TENSION).- La teoría de la máxima tensión cizallante, llamada a veces criterio de fluencia de tresca, Coulomb o Cuest, establece que la fluencia aparecerá cuando la máxima tensión cizallante alcanza un valor crítico igual a la tensión cizallante de fluencia en un ensayo de tracción uniaxial. La siguiente ecuación expresa la tensión de cizallamiento máxima.

$$\tau_{max} = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2}$$

En esta ecuación σ_1 es la tensión principal algebraicamente mayor y σ_3 la algebraicamente menor.

En tracción uniaxial ($\sigma_1 = \sigma_0$, $\sigma_2 = \sigma_3 = 0$) donde σ_0 es el límite elástico en tracción; por consiguiente, el límite elástico cizallante en tracción simple es τ_0 y se relaciona con el límite elástico en tracción.

$$\tau_0 = \frac{\sigma_0}{2}$$

Sustituyendo en la ecuación anterior el valor de τ_0 en la ecuación anterior se obtiene el valor máximo τ .

$$\tau_{max} = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} = \tau_0 = \frac{\sigma_0}{2} \quad \text{si } \sigma_1 - \sigma_3 = \sigma_0$$

La teoría de la tensión de cizallamiento máxima está en concordancia con los resultados experimentales; sus precisiones están ligeramente desplazadas -- hacia la seguridad y los diseñadores la utilizan ampliamente para los metales dúctiles. Ha sustituido a la teoría de Rankine, más antigua y menos exacta.

TEORIA DE VON MOISES (CRITERIO DE ENERGIA) .- El criterio que se expone en la siguiente ecuación a proporcionado resultados experimentales más -- precisos.

$$\sigma_0 = \frac{1}{\sqrt{2}} \left[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2 \right]^{1/2}$$

De acuerdo con este criterio, se producirá la fluencia cuando las diferencia entre las tensiones principales, expresadas por el segundo término de la -- ecuación, rebasen el límite elástico en tracción uniaxial σ_0 . Los trabajos realizados en este campo están asociados con los nombres de Von Moises, Hencky, Maxwell y Humber.

4-5.- FLUENCIA PLASTICA EN DOS DIMENSIONES, DEFORMACION PLANA.- En muchos problemas prácticos, como la laminación y la embutición se puede considerar -- que todos los desplazamientos están limitados al plano x y de forma que -- en el análisis, se pueden despreciar las deformaciones en la dirección z . -- Esto se conoce como un estado de deformación plana. Cuando en un problema es difícil obtener una solución tridimensional exacta, se puede conseguir una buena indicación de la deformación y de las fuerzas requeridas, considerando el problema análogo de deformación plana.

Puesto que en un material plástico tiende a deformarse en todas las direcciones, para crear un estado de deformación plana es preciso impedir el flujo -- en una dirección. Esto se puede conseguir por medio de una barrera lubricada -- externamente, i. e., la pared de la matriz (Fig. 4-3-a). También puede -- seguirse a partir de situaciones como las que se muestran en la Fig. 4-3-b -- donde el material rígido se encuentra en la zona plástica y la restricción de la deformación (Fig. 4-3-c).

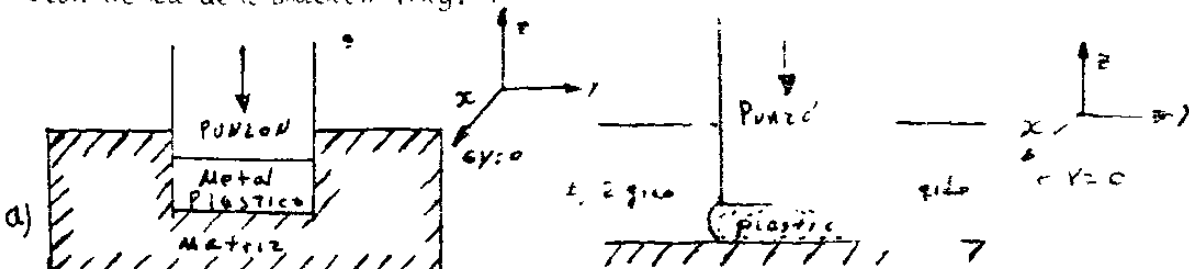


Fig. 4-3.- Método para producir impedimento plástico.

Aun cuando la deformación en una de las direcciones principales es igual a cero para la deformación plana, de esto no se desprende que exista una tensión cero en esta dirección. Se puede demostrar que para la deformación plana $\sigma_1 = (\sigma_x + \sigma_y)/2$ o $\sigma_2 = (\sigma_x + \sigma_y)/2$. Si se sustituye este valor en la expresión para el criterio de fluencia de Von Mises, el criterio de fluencia para la deformación plana se transforma en :

$$\sigma_1 - \sigma_2 = \frac{2}{\sqrt{3}} \sigma_0 = 1.15 \sigma_0$$

El criterio de fluencia de la tensión cizallante máxima se puede expresar por $\sigma_1 - \sigma_2 = \sigma_0 = 2k$. Sin embargo, con el estado de deformación plana que define el valor de σ_0 , la tensión principal mínima será $-\sigma_2$ y el criterio de tensión cizallante se debería escribir.

$$\sigma_1 - \sigma_2 = \sigma_0 = 2k$$

Lo cual indica que para estados de deformación plana dos criterios de fluencia son equivalentes, puesto que k es el límite elástico en cizallamiento puro y $\sigma_0 = \sqrt{3} k$

Por tanto :

$$\sigma_1 - \sigma_2 = \frac{2}{\sqrt{3}} \sigma_0$$

o bien

$$\sigma_1 - \sigma_2 = \frac{2}{\sqrt{3}} \sqrt{3} k = 2k$$

Finalmente

$$\sigma_1 - \sigma_2 = 2k$$

FORJA

5.- CLASIFICACION DE LOS PROCESOS DE FORJA.- Se puede definir la forja como el procedimiento de trabajar los metales, para darles forma útiles, mediante el martillado o prensado. Es la forma más antigua de trabajar los metales, encontrándose sus antecedentes en la labor de los herreros y en las fraguas de los tiempos bíblicos y mitológicos. La revolución industrial significó la sustitución del brazo del herrero por las máquinas, y en la actualidad hay una extraordinaria variedad de maquinaria de forja que permite obtener piezas con tamaños que van desde un remache, a un rotor de turbina o una ala entera de aeroplano.

La mayoría de las operaciones de forja se realizan en caliente, aunque algunos metales se pueden forjar en frío. Existen dos clases fundamentales de equipos para forja. Una incluye los diversos tipos de martillos ó martinetes de forja, que atacan la superficie del metal con golpes rápidos, y la otra, las prensas de forja, que someten el metal a una fuerza de compresión de poca velocidad. En la forja por martillado alcanza la presión su intensidad máxima en el momento en que el martillo toca al metal y disminuye rápidamente cuando la energía del golpe se consume en la deformación del metal. En consecuencia, la forja por martillado produce, en primer lugar, la deformación de las capas superficiales del metal. Al forjar en la prensa, la presión aumenta cuando el metal se está deformando y alcanza su valor máximo precisamente cuando deja de aplicarse el esfuerzo. Por tanto, la forja en la prensa produce una zona deformada más profunda.

En la forja libre se emplean herramientas de forma muy sencilla. Por este procedimiento se fabrican piezas muy grandes o piezas de las que han de elaborarse pocos ejemplares. La operación más sencilla es el recalado de un cilindro entre dos herramientas planas (fig. 5-1). Las fuerzas de compresión hacen fluir el metal en todas direcciones, por lo que, inicialmente, el producto final será un cilindro de menor diámetro y menor altura (fig. 5-1b). La existencia de fricción entre las herramientas y el metal, no puede evitarse, da lugar a que el flujo sea menor en las direcciones que en el centro, por lo que el producto final es un cilindro de menor diámetro y mayor altura hacia la mitad de su altura (fig. 5-1c). En este caso, el flujo de metal influye en la forma del producto final, que es el lugar de mayor deformación. En la forja en prensa (fig. 5-1d) el flujo máximo se produce paralelamente a las herramientas.

Los efectos de la fricción, que frena el flujo del metal, son de utilidad para conseguir diversas formas con herramientas sencillas. El rebordeado se hace con estampas, para dar forma a los extremos de las barras y acumular metal. Como muestra la figura 5-2.- a y b, las estampas solo permiten el flujo libre necesario para llenarlas.

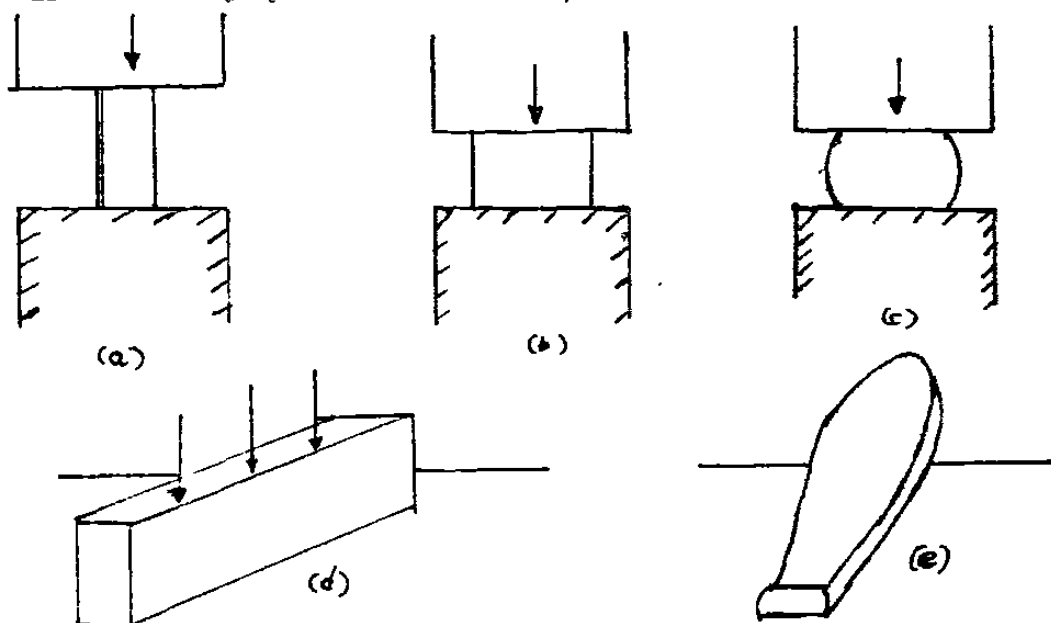


Fig. 5-1 Ejemplos del flujo del metal en la forja por recalca a) Cilindro preparado para la forja: b) flujo ideal en la forja: c) abastilamiento debido a la fricción entre las estampas y el material: d) perfil rectangular delgado antes del recalca: e) perfil rectangular después del recalca.

Por estrangulación de cuello se reduce el espesor de una región material. El metal fluye desde el centro de la herramienta (Fig. 5-2c) Un ejemplo de este tipo de trabajo puede ser el de la forja de una biela de un motor de explosión. La disminución de la sección transversal con aumento de la longitud es lo que sucede por el proceso de estirado (Fig. 5-2 d) u, por hacerse con la herramienta, como se muestra en Fig. 5-2 e) Otros trabajos que pueden hacerse en forja con el uso de la herramienta, reforsado, redondeado (Fig. 5-2 f), traqueado (Fig. 5-2 g), traqueado (Fig. 5-2 h), etc.

La forja con estampas se hace en matrices o estampas que pueden ser de diferentes formas y tamaños, y que pueden ser de diferentes tipos de materiales, como el acero, el hierro, etc. Estas, así

La estampación se justifica solamente cuando han de producirse series grandes. En este tipo de forja suele empezarse por rebordear y estrangular las palanquillas para poder colocar convenientemente el metal para la forja subsiguiente. La palanquilla así preconformada se coloca en el hueco de las estampas de desbaste que le dan una forja para aproximarlo-

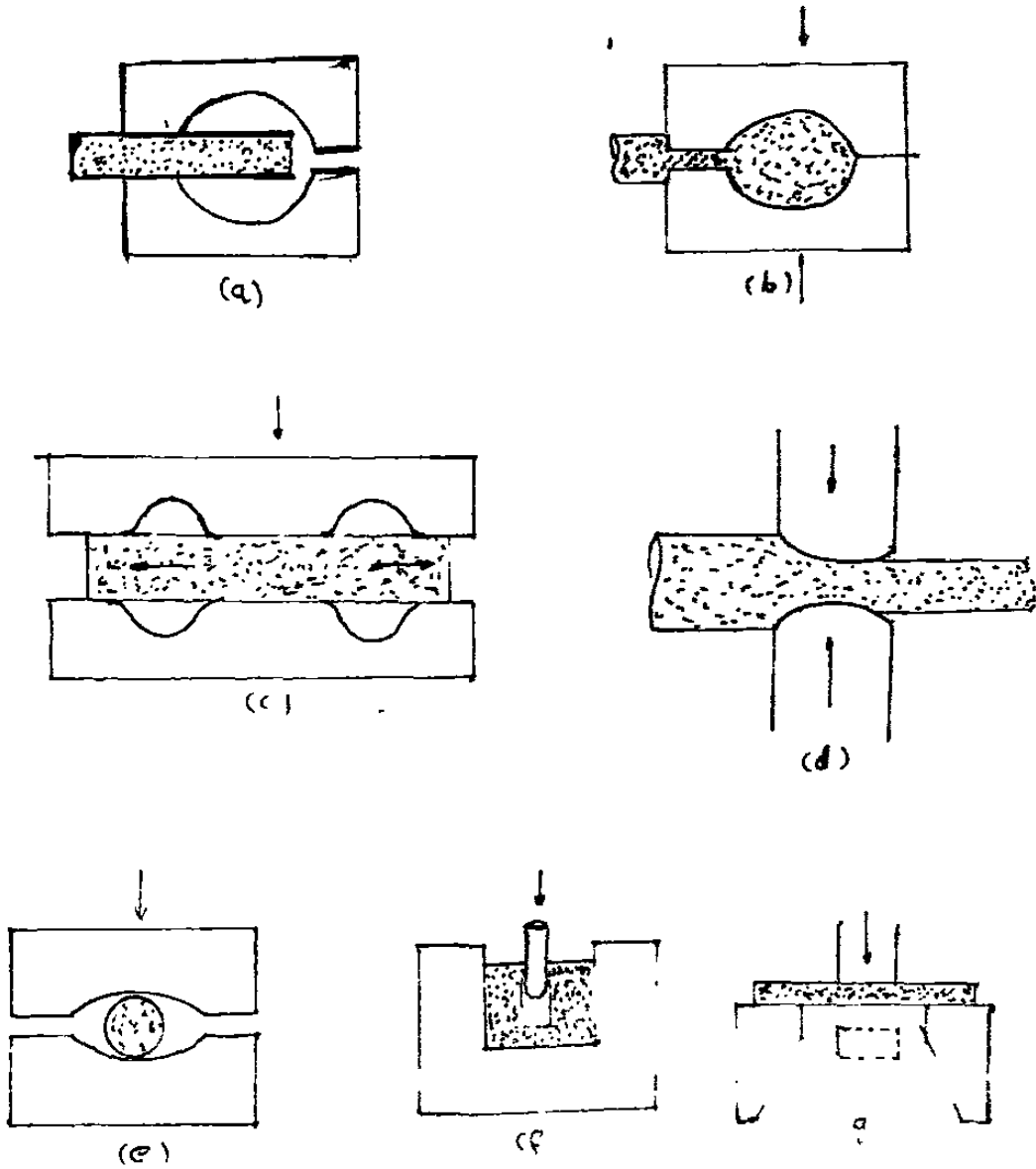


Fig. 5-2.

forma final. En esta fase suele producirse el cambio casi completo de forma de metal. Se acaban las estampas de acabado, en el que se forja a la forma y dimensiones finales. Las estampas de desbaste y las de acabado se mecanizan en el mismo bloque se practican las impresiones para la estrangulación y el rebordado.

ES muy importante que la pieza en bruto tenga metal suficiente para poder llenar completamente la cavidad de las estampas. Como resulta difícil tomar exactamente esta cantidad, se suele emplear un ligero exceso de metal. Cuando las estampas se juntan, en la fase de acabado, este exceso de metal es expulsado de la cavidad en forma de una cinta delgada de metal -- que forma la rebaba "alas" de forja. Para evitar que las alas sean muy anchas se dispone un canal de rebaba (Fig. 5-3). La fase final de la estampación es, por tanto, la eliminación de las alas cortándolas con una estampa adecuada (trimming die). La forja por estampación puede hacerse con martinete o en la prensa. Cuando se trabaja en la prensa cada fase de la operación se hace con estampas independientes y en prensas independientes, -- mientras que en la forja con martillo o forja por calda se emplea un solo bloque de estampas, es el que están mecanizadas las necesarias, y un solo bloque de estampas, es el que están mecanizadas las necesarias, u un solo martillo. En la forja en las prensas cada fase se realiza en una sola operación de prensado, mientras que en la forja por calda se dan múltiples golpes para realizar cada fase.

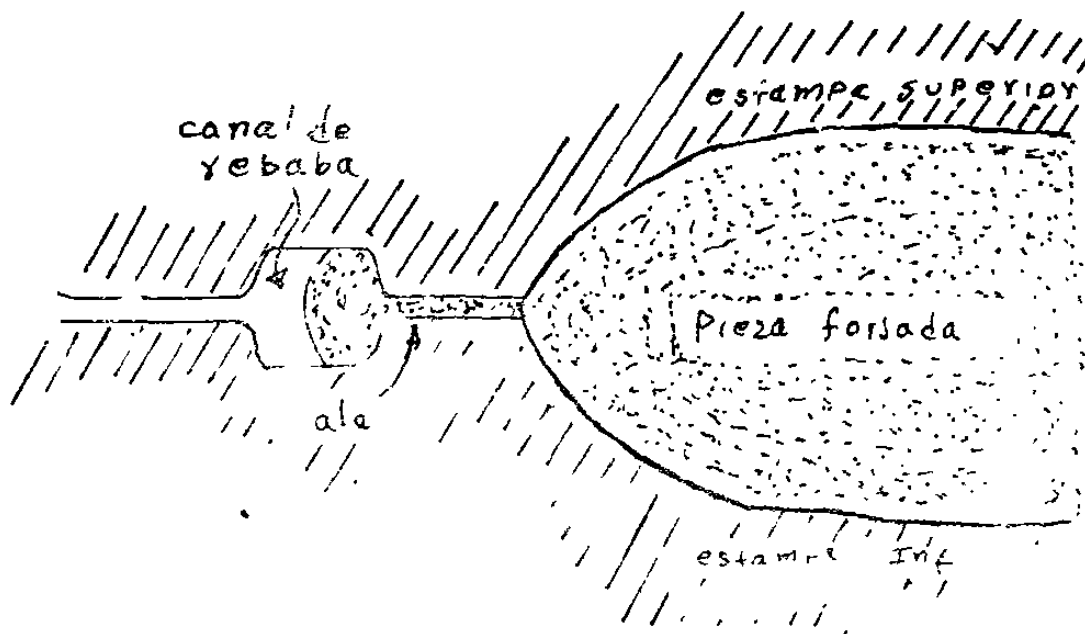


Fig. 2-3 - Sección transversal de las estampas de forja.

5-2.- EQUIPOS PARA FORJA. En los martinets de forja de calda del martillo suministra la fuerza. Hay dos tipos básicos; los mecánicos, de tabla, y los de vapor (Fig. 5-4). En los primeros la maza y la estampa se eleva cuando la tabla es agarrada por dos cilindros: al soltarla, la maza cae por gravedad. La energía suministrada por golpe es la potencia perdida en la calda, y, por tanto, es igual al peso de la maza multiplicado por la altura de caída. Los martillos se distinguen por el peso de la maza, que puede oscilar entre, p. ej., 200 kg y una altura de calda de 80 cm y 3500 Kg y 200-cm de calda. Con esta clase de equipos pueden forjarse piezas de hasta 50 Kg de peso aproximadamente.

Para forjar piezas más grandes, de 500 a 25000 Kg. se emplean los martillos de vapor. En ellos se admite vapor por la parte inferior del cilindro para elevar la maza, y por la parte superior para acelerar la caída. La velocidad de caída de la maza depende, por tanto, de la presión del vapor; la energía cinética de la maza, que es la que se aplica en cada golpe, es

$$W = \frac{Mv^2}{2g}$$

siendo:

- M.- maza de la maza en Kilogramos
- V.- velocidad de la masa en metros por segundos
- g.- aceleración de la gravedad, 9.81 m-seg.

SE pueden obtener velocidades de choques superiores a los 10 m/seg. Una característica importante de los martillos de vapor es que puede controlarse fácilmente la fuerza del impacto, lo que no es posible en los de tabla que está determinada por su altura de caída. Sin embargo, la versión moderna de los martillos de tabl, es decir, los martillos de aire comprimido, no tiene este inconveniente. El tipo poco corriente de martillo neumático que tiene dos mazas horizontales opuestas. Las dos mazas golpean la pieza a velocidad elevada y prácticamente toda la energía es absorbida por el material. Las prensas hidráulicas pueden ser mecánicas o hidráulicas. Las primeras se catalogan según la fuerza que ejercitan al tipo de deformación. La mayoría de las prensas mecánicas se emplean para el laminado de planchales (Fig. 5-4). Se distinguen en dos clases de prensas: las horizontales y las hidráulicas verticales. Las primeras tienen la cámara de presión en la parte superior de la prensa (Fig. 5-4). En ella se crean elevadas presiones en el cilindro acumulador, empleando aceite o agua como medio hidráulico.

Las prensas de esta clase se construye con capacidad de 500 a 18 000 ton, - aunque para ciertos procesos se han llegado a construir de 50 000 ton. Las máquinas forjadoras o máquinas de recalcar son prensas horizontales de mucha utilidad para fabricar grandes series de piezas simétricas a partir de barras. La máquina es, esencialmente, una prensa de doble efecto con matrices que agarran con firmeza el material alrededor de su circunferencia y herramientas de conformación que lo recalcan. Pernos, remaches y enarriales, son ejemplos de piezas típicas fabricadas con estas máquinas. Las cuales se designan según el diámetro máximo de barra que pueden trabajar.

Los cilindros de forjar se emplean para la conformación inicial, previa a la forja por estampación, y para producir secciones cónicas o formas largas y delgadas. Los cilindros solo emplean una parte de su circunferencia para reducir la sección del metal; el resto es de menor diámetro, para que la pieza forjada se pueda mover libremente entre ellos. El operador se coloca detrás de los cilindros, y al presentarse la holgura inserta el material. Cuando la parte de la superficie de los cilindros encargada de la reducción se pone en contacto con el metal, se efectúa esta y luego la pieza es expulsada hacia el operador. Este puede alimentar sucesivamente los cilindros con diferentes porciones del material o utilizar diferentes porciones de la matriz o utilizar diferentes canales hasta conseguir las reducciones de sección deseadas. Mediante cilindros de forja se suelen fabricar pernos largos y hojas de muelles.

La forja rotativa es un procedimiento en el que una barra o tubo se somete a una serie de golpes, entre dos estampas que giran alrededor del material, por lo que este es golpeado en todas direcciones. La figura 5-5 muestra el funcionamiento de una máquina para forja rotativa.

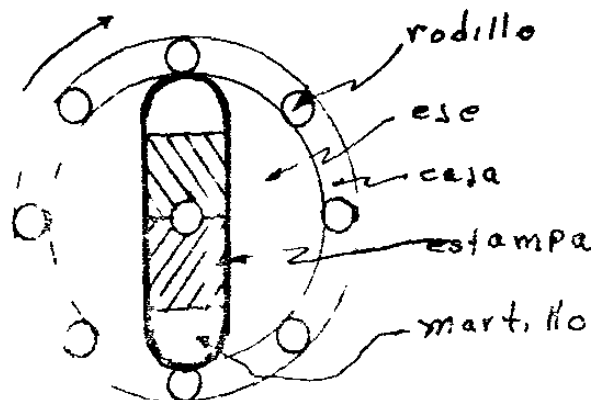


Fig 5-5. - 15,

Dos estampas, respaldadas por dos martillos, giran solidariamente -- con el eje y pueden deslizarse sin impedimento en la dirección radial. El eje gira dentro de una caja que contiene cierto número de rodillos de acero duro. Cuando los martillos entran en contacto con los rodillos las estampas son empujadas una contra otra, pero al girar a una posición entre rodillos se separan las estampas por la acción de la fuerza centrífuga. El material está sometido a un gran número de golpes por minuto. Las tensiones aplicadas son casi exclusivamente de compresión, por lo que estas máquinas se emplean como medio de laboratorio para reducir el diámetro de materiales relativamente frágiles. En la industria se utilizan para reducir el diámetro de tubos o varillas. para apuntar las varillas antes del trofilado y para suietar manguitos de los extremos de los cables.

5-3.- DEFORMACIÓN EN COMPRESIÓN.- La compresión de una placa plana o de un cilindro entre dos estampas planas es el tipo más sencillo de operaciones de forja. Aunque a primera vista parece un sencillo experimento de fácil análisis, en la realidad el caso es más complicado por la aparición de fuerzas de fricción entre las herramientas y la probeta.

Si no hubiese fricción, es decir, con herramientas muy muy bien lubricadas, la fuerza compresiva uniaxial necesaria para producir flujo plástico es:

$$P_x = \sigma_0 A$$

La presión p producida por una fuerza uniaxial P está dada por:

$$p = \frac{4 P_x h}{\pi D_0^2 h_0}$$

en la que:

h = altura de la muestra cilíndrica en cualquier instante de la compresión.

h_0 = altura inicial del cilindro.

D_0 = diámetro inicial del cilindro.

La deformación tecnológica en compresión es:

$$e = \frac{\Delta h}{h_0} = \frac{h - h_0}{h_0} = -\left(1 - \frac{h}{h_0}\right)$$

y la deformación real o natural está dada por

$$\epsilon = \int_{h_0}^h \frac{dh}{h} = \ln \frac{h}{h_0} = - \ln \frac{h_0}{h}$$

$$\epsilon = - \int_{h_0}^h \frac{dh}{h} =$$

Puede verse fácilmente que $\epsilon = \ln(\epsilon + 1)$

Cuando hay fricción en el material y la herramientas elementales adyacentes se forma poca o no se deforma. La probeta no se deforma homogéneamente tal como muestra la figura 5-6, y se produce una forma abarrilada. Las áreas rayadas de la figura 5-6, representan regiones de poca deformación debido a la acción de la torsión de fricción en las intercaras. En estas condiciones la fuerza de compresión necesaria para producir el flujo plástico no puede ser calculada mediante una fórmula tan simple como la (5-2). Esta fuerza depende de las dimensiones de la muestra (Sec. 5-6) y de las características de fricción de las superficies. En el caso de los dos cilindros mostrados en la figura 5-6, con el mismo diámetro y superficie de fricción características pero diferente altura, el cilindro inferior requiere mayor fuerza axial para producir el mismo tanto por ciento de reducción, aunque la región no deformada es realmente más grande. Análogamente ocurre entre dos cilindros de igual altura pero distinto diámetro: el cilindro de mayor diámetro requerirá una presión axial media mayor para producir la misma reducción en altura, porque las superficies de rozamiento son mayores. La tensión de fluencia verdadera o límite elástico o compresión se puede determinar extrapolando los valores de presión media, hallados convenientemente de diferente forma, a una relación nula diámetro/altura. En las próximas secciones se expondrán procedimientos de bastante confianza para determinar con el límite elástico en compresión cuando existe fricción. Se ha determinado un factor de corrección por el abarrilamiento por comparación a la presión uniaxial medida, que es análogo a la corrección por fricción en el caso de torsión.

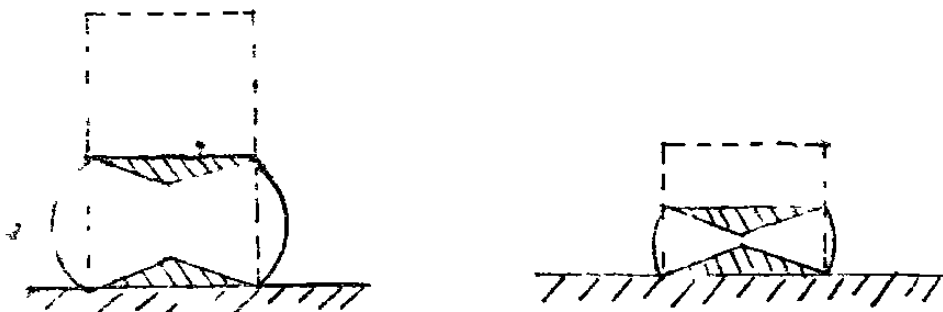


Fig. 5-6
Probetas

no deformadas (rayadas) debidas a la fricción en los extremos de compresión.

La compresión en deformación plana de una placa entre placas fue uno de los primeros problemas que se abordan por el método de los campos de líneas de deslizamiento, Prandtl hizo el primer análisis, que fue posteriormente ampliado por Hill, Green, Alexander y Bishop.

5-4.- FORJA EN DEFORMACION PLANA CON FRICCIÓN DE COULOMB.- La ecuación diferencial para la forja de una placa de espesor uniforme bajo condiciones de deformación plana, se puede establecer con la ayuda de la figura 5-7.- Esta figura muestra las tensiones que actúan sobre.

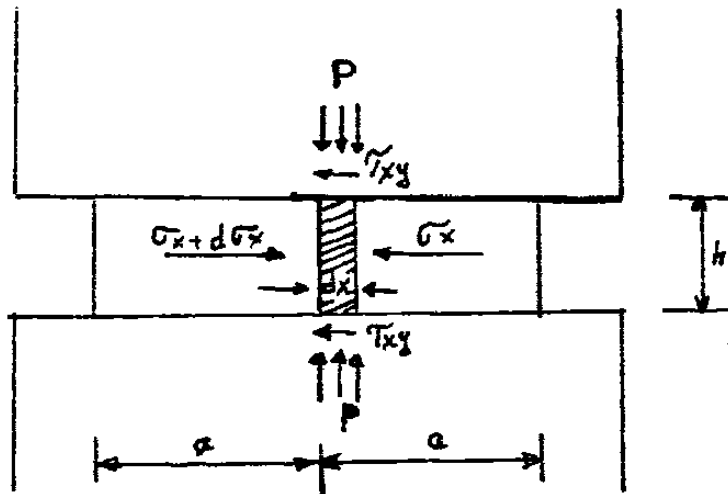


Fig. 5-7.- Tensiones que actúan en una plancha forjada en deformación plana.

un elemento de una placa plana cuando se comprime entre herramientas abiertas. Las dos tensiones principales son la tensión longitudinal de compresión $\sigma_y = -p$ que actúa sobre la herramienta, u la tensión longitudinal compresiva σ_x que es la que se requiere para que el metal fluya paralelamente a las herramientas. Si se supone que la placa tiene una longitud a la izquierda permitiendo a la herramienta comprimir la placa, y que esta herramienta mantiene constante, el análisis de equilibrio para un elemento diferencial de deformación plana se puede establecer. Las tensiones principales τ_{xy} actúan en las interfaces de fricción entre el metal y las herramientas.

De equilibrio en el elemento diferencial se obtiene:

$$\begin{aligned} (\sigma_x + a d\sigma_x - \sigma_x)h - 2\tau_{xy} a x &= 0 \\ h d\sigma_x - 2\tau_{xy} dx &= 0 \end{aligned}$$

El criterio de la energía de distorsión para la fluencia en una condición de deformación plana fue dado en el capítulo 4.

$$\sigma_x - \sigma_y = \frac{2}{\sqrt{3}} \sigma_0 = \sigma_0' = \sigma_x + p$$

De la ecuación anterior es fácil deducir.

$$d\sigma_x = -dp$$

y sustituyendo en la Ec. (5-6), u reordenándola, se obtiene la ecuación diferencial general de equilibrio.

$$dp + \frac{2\tau_{xy}}{h} dx = 0$$

Ei se supone que la tensión cizallante está relacionada con la presión normal a través de la ley de Coulomb para el frontamiento por deslizamiento, $\tau_{xy} = fp$ la Ec. anterior se transforma en :

$$dp + \frac{2fp}{h} dx = 0$$

Separando las variables :

$$\frac{dp}{p} = -\frac{2f}{h} dx$$

o integrando ambos miembros, se obtiene :

$$\ln p = -\frac{2fx}{h} + \ln c$$

o bien

$$p = c e^{-\frac{2fx}{h}}$$

La constante de integración c se determina por la condición en los límites de que en el surtido se libre. Es nula la tensión longitudinal $\sigma_x = 0$ de la Ec. (5-7) se deduce que $p = \sigma_0'$ y $\ln c = \ln \sigma_0' + 2fa/h$; por tanto.

$$p = \sigma_0' e^{\frac{2f(a-x)}{h}}$$

$$\sigma_x = \sigma_0' \left[1 - e^{\frac{2f(a-x)}{h}} \right]$$

Como f suele ser un número pequeño, se puede desarrollar en serie la exponencial ($\exp y = 1 + y + \frac{y^2}{2!} + \frac{y^3}{3!} + \dots$) y simplificar las expresiones anteriores.

$$p = \sigma_0' \left[1 + \frac{2f}{h} (a-x) \right]$$

$$\sigma_x = \sigma_0' \left[-\frac{2f}{h} (a-x) \right]$$

$$p_{av} = \frac{\int_0^a p dx}{a} = \sigma_0' \frac{\left(e^{\frac{2fa}{h}} - 1 \right)}{\frac{2fa}{h}}$$

La carga total de forja P puede calcularse, puesto que P donde w es el ancho en la dirección normal al plano del papel.

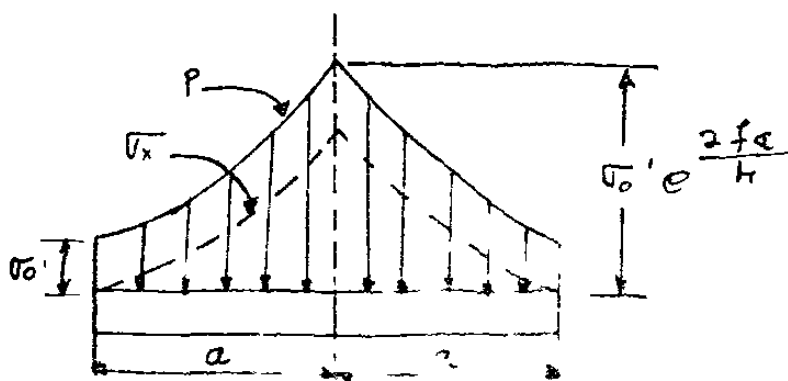


Fig. 5-7.- Distribución de tensiones y cargas en un elemento de forja.

CAPITULO 6

LAMINACION DE LOS METALES

6-1.- CLASIFICACION DE LOS PROCESOS DE LAMINACION.- Llamamos laminación al proceso consistente en deformar plásticamente los metales haciéndolos pasar entre cilindros. Es el procedimiento más extendido para el trabajo de los metales, porque es el que mejor se presta a las producciones elevadas y permite obtener un buen control de los productos finales. Al deformar los metales pasándolos entre los cilindros se somete al material a intensas tensiones de compresión y superficiales de cizallamiento originadas por la fricción entre los cilindros y el metal. Las fuerzas de fricción son las encargadas de producir el estirado del metal.

El lingote inicial se transforma en debastes pesados (blooms) y planquilla, generalmente por laminación en caliente. Los debastes se continúan laminando en caliente hasta obtener planchas o chapas gruesas, barras, varillas, tubos carriles o perfiles estructurales. La laminación en frío ha adquirido gran importancia industrial. En frío se laminan la chapa fina y extrafina, el fleje, etc., obteniéndose productos, con muy buen acabado superficial y mejor resistencia mecánica, a la vez que se consigue una gran precisión en las dimensiones del producto.

La terminología empleada para describir los productos laminados es muy ambigua y no se pueden dar límites respecto a dimensiones en relación con la denominación empleada por los aceristas. Un debaste pesado o bloom es el primer producto de la laminación del lingote; suele ser de sección cuadrada o rectangular, pero el ancho suele ser inferior al doble del espesor y el área no suele pasar de 230 cm. En una mayor reducción en la laminación en caliente se obtiene la planquilla, cuya sección recta mínima suele ser de 15 cm. En la metalurgia de los metales, el término planquilla a cualquier lingote que ha sufrido trabajo en caliente, laminación, forja o extrusión, o bien a cualquier producto que se obtiene en condiciones adecuadas para el trabajo posterior en caliente (por ejemplo, extrusión). Los lingotes pesados, los debastes, los blooms, los blooms de extrusión, los lingotes con un ancho inferior al doble del espesor, los blooms, los blooms y slabs, se conciben como productos, porque se refieren a los productos de laminación.

Los trenes de laminación o laminadores se clasifican con arreglo al número y disposición de los cilindros (Fig. 6-1).

El tipo más sencillo y corriente es el tren dúo o laminador dúo (fig. 6-1 a), en el cual dos cilindros de igual diámetro giran en una sola dirección. El material debe volverse a la entrada de los cilindros, bien a mano o mediante una mesa elevadora para que pase el material por encima de los cilindros. Una mejora en cuanto a rapidez de los resultados es el laminador o tren dúo reversible, en el que el material puede pasar hacia adelante y hacia atrás a través de los cilindros invirtiendo el sentido de la rotación (fig. 6-1 b). Otra solución es el tren o laminador trío (fig. 6-1 c) que tiene dos cilindros, uno superior y otro inferior, accionados mecánicamente, y otro intermedio que gira por fricción.

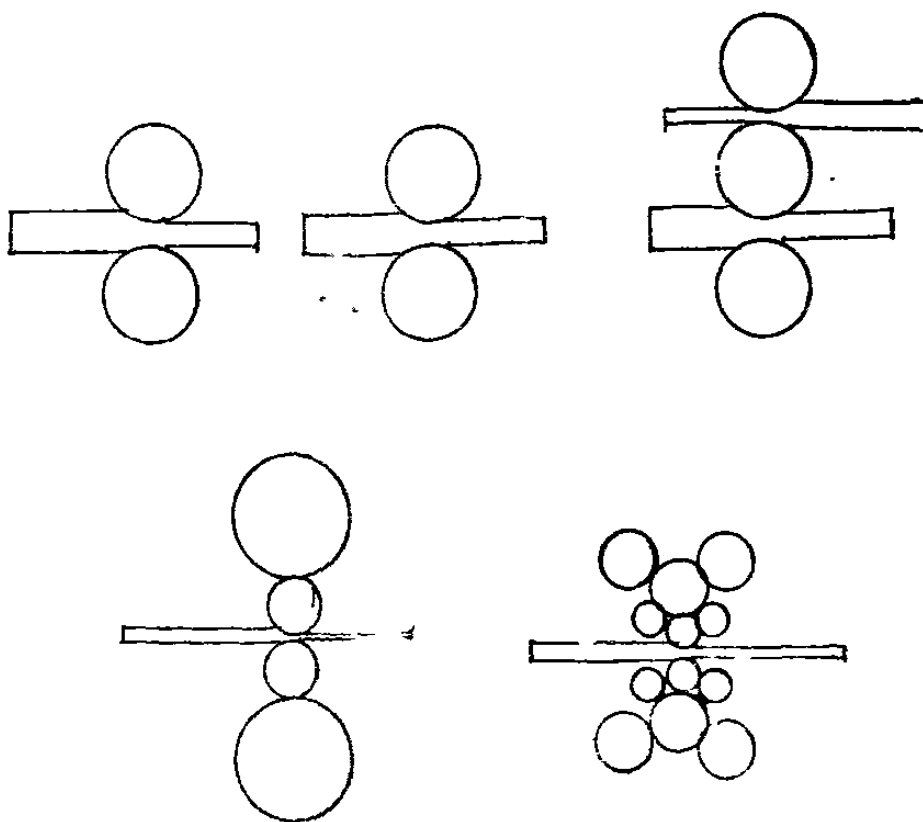


Fig. 6-1.- Disposiciones de trenes de los cilindros de los laminadores: a) dúo; b) dúo reversible; c) trío; d) y e) configuraciones más complejas.

a diferenciación entre chapa gruesa, chapa mediana y chapa fina se hace por el espesor: suele considerarse chapa fina (sheet) a la que tiene menos de 3 mm de espesor. El nombre de *fle-e* suele referirse a chapa fina de menos de 30 cm de ancho.

La laminación suele iniciarse con el lingota colocado, pero no es condición necesaria. Modernamente se ha desarrollado la laminación de polvos, en la que se introducen entre los cilindros polvos metálicos se comprimen entre ellos para formar un "flejo verde", que luego se sinteriza para darle más densidad. La ventaja que se asigna a este procedimiento es la eliminación del trabajo en caliente, con lo cual se consigue una menor contaminación más fino el tamaño de grano y de ausencia de texturas en la chapa obtenida. La laminación de polvos está todavía en su fase inicial, pero parece que tiene ventaja definitiva para el caso de metales muy reactivos.

En la laminación convencional, en caliente o en frío, se pretende, fundamentalmente, disminuir el espesor del metal. Por lo general, aumenta poco la anchura, por lo que la disminución del espesor se traduce en un aumento de longitud. El perfilado de la chapa con rodillos, que a veces se llama perfilado por laminación, es una operación especial de trabajo en frío en la que la chapa o *fleje* se pliega progresivamente, para obtener perfiles estructurales de formas complejas, pasándolas a través de series de cilindros o rodillos accionados mecánicamente. El perfilado con rodillos es muy adecuado para obtener perfiles de gran longitud y secciones complicadas, p. ej. para la carpintería metálica. Otro tipo especial de laminación de roscas, en las que se pasan piezas en bruto entre canales para roscas.

6.2.- EQUIPOS DE LAMINACION.- un laminador se compone esencialmente de los cilindros, cojinetes adecuados, las columnas que los soportan y un sistema de accionamiento para aplicar a los cilindros la fuerza motriz y controlar su velocidad. La fuerza que interviene en la laminación llega fácilmente a los millones de kilogramos, por ello se requieren construcciones muy robustas y motores muy grandes para conseguir la potencia necesaria. Cuando se trata de un largo tren de laminación continúa se multiplican estas exigencias para cada uno de los laminadores, con lo que es fácil comprender que un taller moderno de laminación exige unos millones de pesetas de inversión inicial de capital, y unos meses de trabajo experto para el diseño y la construcción.

Se suele llamar *tramo* a cada uno de los laminadores de una instalación, aunque el nombre conviene mejor al conjunto de laminadores que conducen a un producto determinado a través del peso sucesivos por ellos del material.

Se puede conseguir una notable disminución en la potencia necesaria para laminación empleando cilindros de pequeño diámetro, pero los cilindros delgado tiene menos resistencia y rigidez que los gruesos y han de ser soportados -- por cilindros de apoyo de mayor diámetro. El tren más sencillo de este tipo es tren cuarto (fig. 6-1 d).

La chapa muy delgada se puede laminar, con tolerancia de espesor muy estrechas, empleando cilindros de muy poco diámetro. El tren cluster (fig. 6-1e) es un ejemplo típico de este tipo de laminador, en el que el cilindro de trabajo está respaldado por todo un juego de cilindros. El tren Sendzimir es una modificación cluster muy bien, adaptado para la laminación de chapa fina y finísima de aleaciones de elevada resistencia mecánica.

Para conseguir producciones más elevadas, es conveniente acoplarlos laminadores en serie de forma que el material pase sucesivamente a través de ellos - (fig. 6-2). Este conjunto es lo que propiamente puede llamarse un tren de laminación, y a cada laminador de los que lo componen se suelen llamar una caja. Como en cada caja es diferente la reducción sufrida por el material, el fleje se debe mover a diferente velocidad en cada uno de los que componen el tren. La velocidad de los rodillos deben de estar convenientes sincronizadas para que los de cada caja tomen el fleje a la misma velocidad con que sale de la caja anterior. Las bobinadoras de desenrollar y enrollar no solo tienen la misión de alimentar el tren con el material y recoger el producto acabado, si no de mantener, en caso necesario, una tensión hacia atrás o hacia adelante. Estas fuerzas horizontales procuran cierta ventajas de que nos ocuparemos más adelante. En un tipo especial de laminador reversible, - el laminador o tren Steckel, la fuerza se aplica por medio de las bobinadoras y los cilindros no son accionados directamente. Aunque la reducción por pasada que se consigue en el Steckel no es muy grande. Se puede reducir metales duros a expresar muy delgadas con estrechas tolerancias, ya que se emplean cilindros de trabajo de pequeño diámetro.

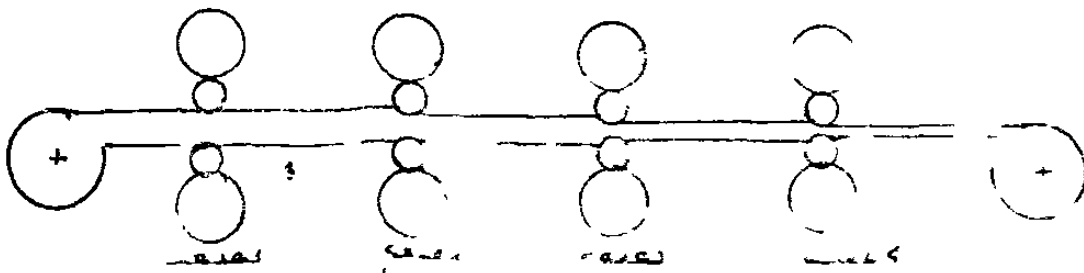


Fig. 6-2. Esquema de un tren de laminación de cuatro cajas.

6-3.- LAMINACIÓN EN CALIENTE.- La primera operación de trabajo en caliente - del caero, la mayoría de las veces, se realiza en el tren de desbaste. Los trenes de desbaste son generalmente laminadores dúo reversibles, con cilindros de 50 a 150 cm de diámetro. Como el desbaste representa la primera destrucción de la estructura de rolada del lingote, se realiza en varias pasadas cuidadosas y cortas, con recalentamientos repetidos. Hay veces que se requieren 25 pasadas para desbastar un lingote grande de acero aleado. Para obtener palanquilla de las dimensiones adecuadas para los trenes de acabado, suele ser necesario relaminar los desbastes en trenes de palanquilla, tríos o continuos. Las palanquillas pueden laminarse en los trenes de acabados a redondos, hexagonales, perfiles especiales o productos planos de diversos tipos. La chapa gruesa recortada se produce por laminación cruzada de palanquillas en tres dúo, trío y cuarto y luego se recortan todos los bordes a las dimensiones adecuadas. Otra forma de laminar la chapa gruesa se realiza en los trenes universales. Estos trenes constan de dos laminadores, uno con dos cilindros horizontales y otro con cuatro verticales, dispuestos de tal modo que se laminan también los bordes. En un tren universal puede trabajarse un lingote directamente a chapa gruesa de bordes rectos que no necesitan cortarse; basta hacerlo con los extremos (despunte de tijera). El lingote meramente se alarga en su dirección longitudinal y no recibe laminación transversal, por lo que la chapa gruesa obtenida tendrá peores propiedades transversales que la chapa de laminación cruzada.

Desde 1930, aproximadamente, se fabrica la chapa en trenes continuos. Se parte de un desbaste para chapa (slab) calentando inicialmente a unos 1200°C. El tren continuo se compone de un tren desbastador, con cuatro a siete cajas, y un tren de acabado, con cuatro a ocho cajas. El tren desbastador contiene cilindros de desbaste para romper la cascarrilla y un laminador-ensanchador para que el slab alcance la anchura deseada. Las cajas productoras de laminadores cuádruplos suelen estar equipadas con cilindros de desbaste y de ensanchamiento para controlar el ancho.

Para romper la cascarrilla se suele utilizar un chorro de agua sobre los cilindros de desbaste. En el tren de acabado se emplea el laminador-ensanchador para controlar el ancho y el espesor, el tren de laminación para controlar el espesor y el tren de laminación para controlar el ancho.

El hecho de que se pueda controlar el ancho y el espesor de la chapa en una gran variedad de productos laminados en caliente del acero, gracias a la laminación en caliente, ha permitido el desarrollo de los procesos de laminación en caliente y mecanizados en la laminación en caliente del acero.

Además, al ser menos el tamaño de los lingotes y la tensión de fluencia, en el caso de los metales no férreos, hace que se puedan emplear trenes laminadores más pequeños. Suelen emplearse trenes frío y frío para la mayor parte de la laminación en caliente, aunque se han instalado tres continuos cuarto para la laminación en caliente de las aleaciones de aluminio.

6-4.- LAMINACIÓN EN FRÍO.- La laminación en frío se realiza para obtener chapa y fleje de acabado superficial superior y con tolerancias dimensionales más estrechas que las del producto laminado en caliente. Además, se puede sacar partido del endurecimiento por deformación resultante de la deformación en frío para incrementar la resistencia mecánica. En comparación con el acero, es mayor el tanto por ciento de productos acabados por laminación en frío en la industria no férrea. La materia prima para obtener la chapa de acero laminado en frío son las bobinas laminadas en caliente, y decapadas, procedentes de los trenes continuos de laminación en caliente. La chapa laminada en frío de los metales no férreos puede fabricarse a partir de fleje laminado en caliente y, en el caso de algunas aleaciones de cobre, se lamina en frío directamente a partir del estado bruto de colada.

Los trenes cuarto de alta velocidad, con tres o cuatro cajas, se emplean para laminar en frío la chapa de acero, aluminio y aleaciones de cobre. Este tipo de trenes se diseña generalmente para trabajar con tensiones hacia atrás y adelante. Los trenes continuos tienen una gran capacidad y necesitan muy poca mano de obra. Así, por ejemplo un tren continuo de cinco cajas pueden suministrar 2800 m-min. Sin embargo, estos equipos exigen una inversión inicial de capital muy grande y no tienen versatilidad. Los trenes de una sola caja cuarta reversible, con tensión hacia adelante y hacia atrás representan una instalación más versátil. Este tipo de trenes se emplean frecuentemente para fabricaciones especiales de gran variedad de dimensiones pero no pueden competir con los trenes continuos que elaboran muchas toneladas de material.

La eliminación del límite elástico aparente en la chapa de acero recocida es un problema de gran importancia práctica, porque su existencia en la chapa es causa de deformación no uniforme en las operaciones de conformación originándose zonas de deformación durante la embutición profunda. El procedimiento usual empleado para eliminarlo es dar a la chapa recocida una pasada final de laminación en frío con muy pequeña reducción (laminación a pasada superficial, skin passing o temper rolling). Otros procedimientos empleados para enderezar la chapa y mejorar su llanura son el enderezado con cilindros (roller levelling) o el enderezado por estirado (stretcher levelling). El primero consiste en pasar la chapa entre dos

conjuntos de cilindros de pequeño diámetro, dispuesto de forma que no coincidan las filas superior e inferior, con lo que la chapa ha de flexionarse arriba u abajo al pasar entre ellos y se endereza al salir de la máquina.

El segundo procedimiento consiste en anarrar la chapa por los extremos con dos mordazas u enderezarla por estirado bajo simples esfuerzos de tracción.

La eliminación del alargamiento en el límite elástico aparente, el "skin pass", suele durar unos dos meses antes de que vuelva a presentarse por envejecimiento. El enderezado con cilindros también puede eliminar el límite elástico, empleando máquinas especiales, pero el efecto solo dura se tenta u dos horas. La desaparición casi permanente solo se logra en cu ali dades de acero no envejecible estabilizado con aluminio.

6-5.- FUERZAS Y RELACIONES GEOMETRICAS EN LA LAMINACION.- La figura-6-3 sirva para explicar cierto número de relaciones importantes entre las dimensiones de los cilindros y las fuerzas que intervienen en la deformación de un material por laminación. Una chapa de metal de espesor en tre en contacto con los cilindros en el plano XX con una velocidad . Pasa a través de la separación entre cilindros u pierde el contacto con ellos en el plano de salida YY, con un espesor reducido h . En primera aproximación se admite que no hay aumento de anchura, por lo que la compre sión vertical del metal se traduce en alargamiento en la dirección de lami nación. Como, por unidad de tiempo, deben pasar iguales volúmenes de me tal a través de cualquier plano normal a la chapa, se puede escribir.

$$b h_0 v_0 = b h v = b h_f v_f$$

en donde :

b = anchura de la chapa,

v = velocidad para cualquier espesor h intermedio entre

h₀ y h_f

De la Ecuación anterior se deduce que la velocidad de salida v_f debe ser mayor que la de entrada, v_o creciendo progresivamente desde la entrada a la salida. Solo en un punto de la superficie de contacto entre material y cilindros pueden ser iguales las velocidades de ambos. Este punto se llama punto de no deslizamiento o punto neutro. En la figura 6-3 este punto es el N.

En cualquier punto de la superficie de contacto, por ejemplo: el A. - de la figura 6-3 actúan dos fuerzas sobre el metal, una en dirección del radio, P_r , y otra tangencial de fricción, F .

Entre el plano de entrada y el punto neutro, la chapa se mueve más lentamente que la superficie del cilindro y la fuerza.

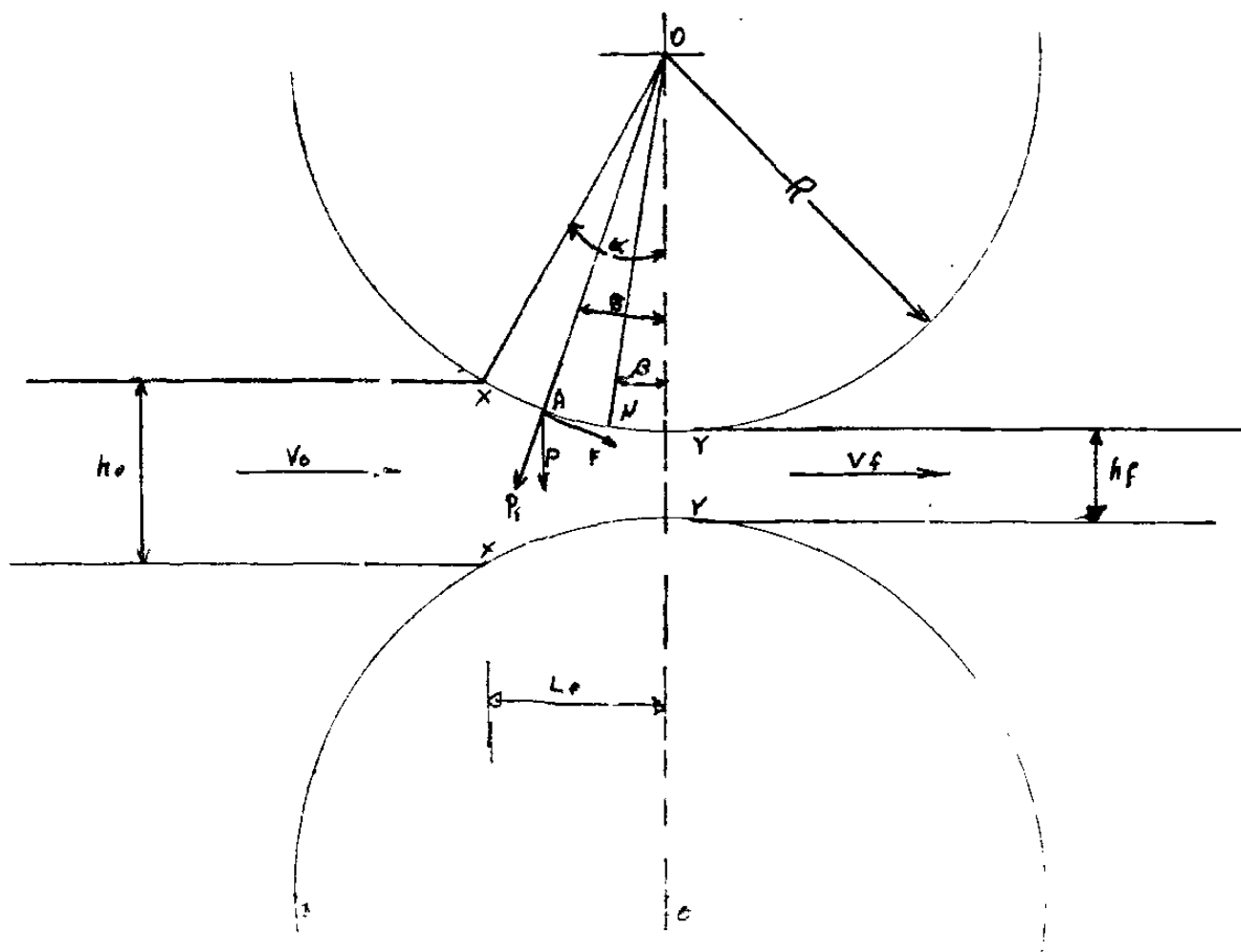


Fig. 6-3.- (a) Actúa el cilindro superior.

za de fricción actúa en la dirección indicada en la figura 6.-3 arrastrando el metal entre los cilindros. Una vez pasado el punto neutro, la chapa se mueve más aprisa que la superficie de los cilindros. Se invierte la dirección de la fuerza de fricción., que ahora se opone a que la chapa sea ministrada por los cilindros. La componente vertical de se denomina "carga de laminación" P. Es la fuerza con que los cilindros comprimen entre sí al metal; es igual a la fuerza con la que el metal actúa sobre los cilindros intentando separarlos, por lo que a veces se llama también fuerza de separación. La presión específica de los cilindros p es igual a la carga de laminación dividida por la superficie de contacto. Esta superficie es igual al producto del ancho de la chapa por la proyección de la longitud del arco de contacto, L_p

$$L_p = \left[R(h_0 - h_f) - \frac{(h_0 - h_f)^2}{4} \right]^{1/2} \approx \\ \approx [R(h_0 - h_f)]^{1/2}$$

Por, ello la presión específica del cilindro está dada por

$$p = \frac{P}{b L_p}$$

La distribución de la presión del cilindro a lo largo del arco de contacto se indica en la figura 6.4.- la presión alcanza un máximo en el punto neutro, y a partir de este va disminuyendo hasta anularse. El hecho de que la de presión en el punto neutro presente un máximo anguloso, como exigen los tratamientos térmicos de la laminación, es una indicación de que el punto neutro no corresponde exactamente, en la superficie del cilindro, a una línea paralela al eje, si no más bien a una línea más o menos estrecha. El área que queda abajo la curva es proporcional a carga de la laminación que para fines de cálculo se admite que actúa en el centro de gravedad de la distribución de la presión. La forma de la curva de distribución tiene, por ello, mucha importancia, ya que la localización de la carga de laminación resultante, respecto al cilindro determina el p y la potencia necesaria para producir la reducción de sección. El área debajo de la figura 6.4 tiene sentido la fuerza necesaria para vencer a las fuerzas de fricción mientras que la fuerza no rayada bajo la línea AB, corresponde a la fuerza necesaria

para deformar el metal en compresión plana homogénea. Obsérvese que hay una analogía entre la distribución de presión en la alminación tal como se presenta en la figura 6.4 y la distribución de la deformación plana por compresión entre placas de la figura correspondiente a la forja. Haciendo uso de esta analogía se puede simplificar mucho el análisis de las fuerzas de laminación y así obtener un formla para calcular la carga de laminación simplemente sustituyendo el factor $2a$ de la fórmula de forja por la proyección plana del arco de contacto en laminación " L_p "

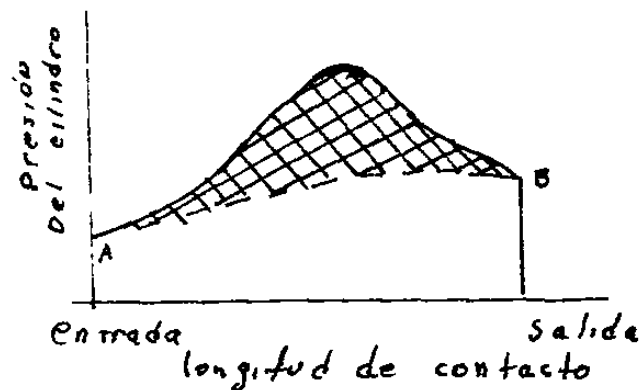


Fig. 6.4.- Distribución de la presión de laminación a lo largo del arco de contacto.

De esta forma la carga de laminación puede obtenerse mediante:

$$P = \sigma_0' \left(\frac{f L_p}{h} \right)$$

$$\sigma_0' = 1.15 \sigma_0$$

$$L_p = 2a$$

$$h = \frac{h_0}{\epsilon}$$

RELACIONES GEOMETRICAS .- El ángulo alfa de la figura 6.3.- (α) formado por la línea determinada por el punto de contacto (X) y el centro (O) de el cilindro y la línea de centros de los cilindros O O, se llama "ángulo de contacto" o "ángulo de mordido", El metal no puede entrar en el laminador cuando $\tan \alpha$ es mayor que el coeficiente de fricción entre los cilindros y el metal. De esto se deduce que el coeficiente de fricción es el que determina la mordedura máxima que pueden tomar los cilindros. Por esta causa se emplean frecuentemente cilindros con la superficie rugosa, para que aumente el coeficiente de fricción. Los cilindros de los trenes desbastadores (trenes bloemina) son con frecuencia punteado, es decir, llevan acanaladuras grabadas para que el agarre sea mejor.

El ángulo B es el formado por la línea de centros de los cilindros y la determinada por el punto neutro N y el centro O. Suele llamarse ángulo de no deslizamiento. Puesto que la fuerza de fricción cambia de sentido en el punto neutro se puede determinar el ángulo B a partir del equilibrio de fuerzas en dirección horizontal.

$$\sin \beta = \frac{\sin \alpha}{2} - \frac{\sin^2(\alpha/2)}{F}$$

que se puede escribir en la forma aproximada.

$$\beta = \frac{\alpha}{2} - \frac{1}{F} \left(\frac{\alpha}{2}\right)^2 (\text{rad})$$

El seno del ángulo α es igual a la proyección horizontal del arco de contacto dividido por el radio del cilindro.

$$\sin \alpha = \frac{[R(h_0 - h_f)]^{1/2}}{R} = \frac{[2(h_0 - h_f)]^{1/2}}{D}$$

Siendo D el diámetro del cilindro. Entonces el ángulo de no deslizamiento puede expresarse por:

$$\beta \approx \left[\frac{h_0 - h_f}{2D}\right]^{1/2} - \frac{1}{F} \frac{h_0 - h_f}{2D}$$

En las ecuaciones anteriores se ha supuesto que el radio de los cilindros no se modifica por la acción de las elevadas presiones desarrolladas en las laminación, mientras que, en realidad, los cilindros se aplastan elásticamente en estas condiciones. Generalmente se acepta la teoría de Hitchcock, que supone que la distribución de presión en los cilindros producirá la misma distorsión que una distribución de presiones elíptica. Si se supone que el arco de contacto se mantiene circular u que el radio de curvatura del cilindro aumente de R a R' la teoría de Hertz para compresión elástica de dos cilindros da el resultado.

$$R' = R \left[1 + \frac{C P}{b(h_0 - h_f)} \right]$$

En la que $C = 16(1 - \nu^2) / \pi E$ se calcula para el material de los cilindros $(C C)$ es para el acero aproximadamente igual a $2.2 \times 10^{-4} \text{ mm}^2 / (\text{kg})$ y P es la carga de laminación deducida del radio del cilindro de formado. Puesto que P es función de R' es necesario encontrar la solución exacta de la Ec. anterior por aproximaciones sucesivas.

LAMINACION CON TENSIONES LONGITUDINALES.- Nadai ha desarrollado una teoría que permite calcular el efecto de la tracción de la chapa en la distribución de la presión de los rodillos.

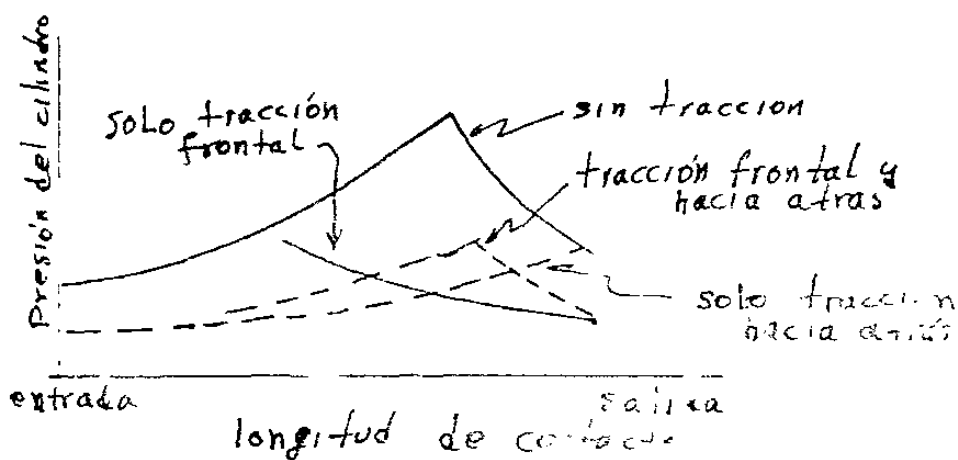


Fig. 6.5.- Efecto de la tensión de la chapa en la distribución de la presión de los rodillos.

Como se muestra esquemáticamente en la fig. 6.5.- La adición de tensiones de tracción hacia adelante y hacia atrás hace disminuir mucho el área que queda bajo la curva manteniendo casi inalterado el punto neutro. - Si sólo se aplica tracción hacia atrás, el punto neutro se desplaza hacia la salida y si la tracción es suficiente, puede alcanzar el punto de salida. Cuando esto ocurre los cilindros se mueven más rápidamente que el metal y resbalan sobre la superficie, cuando al contrario sólo se aplica -- tracción hacia adelante, el punto neutro se desplaza hacia la entrada.

Si consideramos el efecto de las tensiones de ayuda la fórmula para determinar la carga de laminación queda como sigue :

$$P = (S_0 - S) \frac{\frac{\mu L}{t} - 1}{\frac{\mu L}{t}}$$

Donde : $S_0 = \sigma_0' = 1.15\sigma_0$, $S = \frac{S_1 + S_2}{2}$, $t = \frac{t_1 + t_2}{2}$

S_0 - Resistencia del metal a ser deformado

$$S = \frac{S_1 + S_2}{2}$$

S_1 - Tensión longitudinal hacia adelante.

S_2 - Tensión longitudinal hacia atrás .

e - Base logarítmica

μ - Coeficiencia de fricción.

L - Arco de contacto.

$$t = \frac{t_1 + t_2}{2}$$

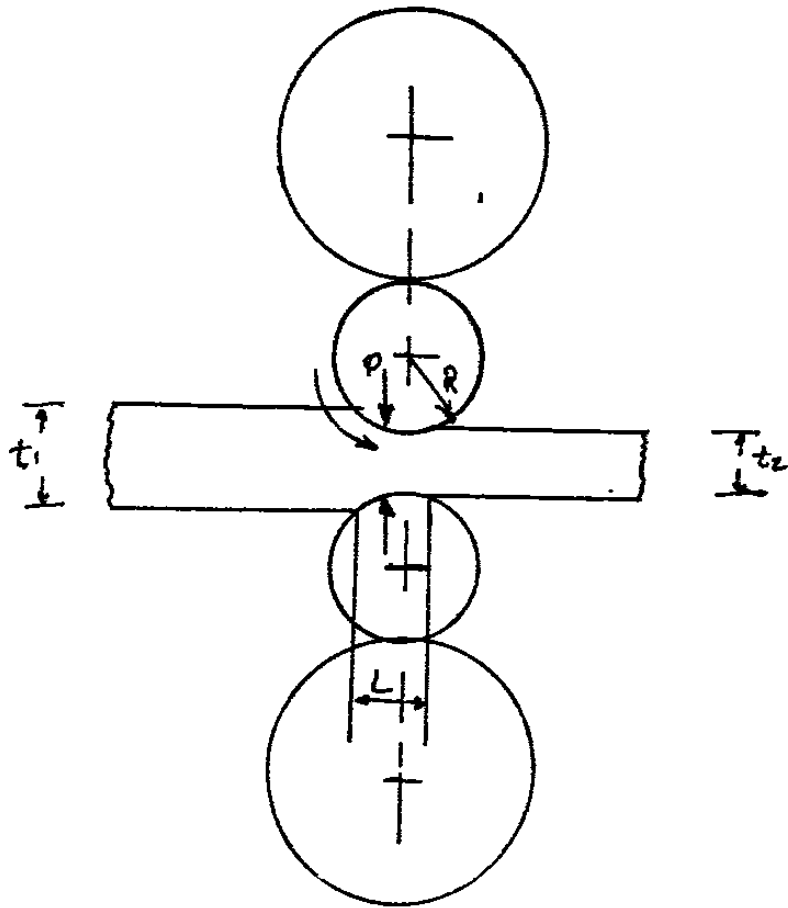
t_1 - Espesor de entrada.

t_2 - Espesor a salida.

C o n c l u s i o n e s

La fórmula para determinar la carga de laminación en este capítulo a-sido expresada intensionalmente con la misma nomenclatura que Stone utiliza para su " Formula de laminación para calibre delgado " y de este modo podemos observar que se puede llegar a la misma formula por ambos métodos el de la analogía a partir de la deformación plana de una plancha (Recalcado) u el de la complicada integración de Stone.

A continuación se expone dicha formula de Stone a propósito de comparar ambos metodos " .



$$P = P_0 \exp\left[\frac{2\mu}{t}\left(\frac{L}{2} - x\right)\right]$$

$$P_0 = S_0 - S$$

$$P = (S_0 - S) \exp\left[\frac{2\mu}{t}\left(\frac{L}{2} - x\right)\right]$$

$$F = \omega \int_{x=0}^{x=L/2} p \, dx = \frac{\omega(S_0 - S)}{\mu} t \left[e^{\mu x/t} \right]_{x=0}^{x=L/2}$$

$$\bar{P} = \frac{P}{WL}$$

$$\tau = (t_1 + t_2)/2$$

$$\bar{P} = (S_0 - S) \frac{[\exp(\mu L/\tau) - 1]}{\mu L/\tau}$$

$$P = (S_0 - S) \frac{(e^{\frac{\mu L}{\tau}} - 1)}{\frac{\mu L}{\tau}}$$

$$l = \sqrt{R(\tau_1 - \tau_2)}$$

$$L = \sqrt{L^2 + \left(\frac{BR(1-\nu^2)}{\pi E} \bar{P}\right)^2} + \frac{BR(1-\nu^2)}{\pi E} \bar{P}$$

$$\lambda = \frac{\mu L}{\tau}$$

$$\frac{\mu L}{\tau} = \sqrt{\left(\frac{\mu L}{\tau}\right)^2 + \left(\frac{\mu a}{\tau}\right)^2} + \left(\frac{\mu a}{\tau}\right) \bar{P}$$

$$a = \frac{BR(1-\nu^2)}{\pi E}$$

