

## TEMA 17

# EXTRUSIÓN

### Introducción.

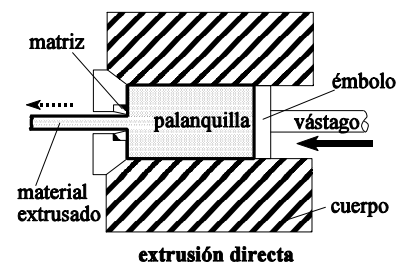
La extrusión es un proceso en el que, mediante un émbolo o punzón, se presiona al material, colocado en un cuerpo de extrusión, obligándole a salir por el orificio de una matriz, el cual da su forma a la pieza. Se necesitan presiones elevadas y, por ello, la mayoría de los metales se extruyen en caliente, a fin de disminuir su tensión de fluencia. A pesar de ello, también se puede realizar en frío, obteniendo unas buenas propiedades mecánicas.

Mediante la extrusión se obtienen barras, tubos (acoplado un mandril en el extremo) y perfiles especiales (carpintería de aluminio), empleándose materiales dúctiles (admiten grandes deformaciones sin originarse el agrietamiento). La compresión favorece la no aparición de grietas frente a la tracción, por ello en materiales frágiles se emplea la extrusión en vez del estirado (tracción).

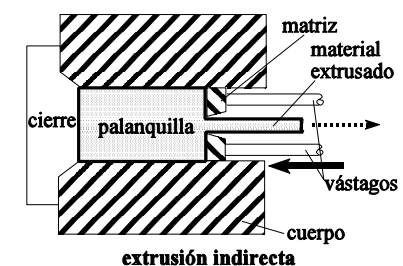
Los materiales de mayor uso son las aleaciones de aluminio, plomo, magnesio, estaño, latones y los aceros.

### Clasificación.

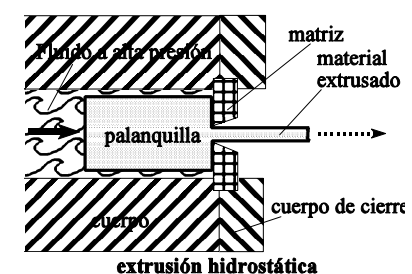
**A) Extrusión directa:** Se mueve el pistón y los otros elementos permanecen fijos. Todo el material fluye en igual dirección y sentido en que se mueve el émbolo.



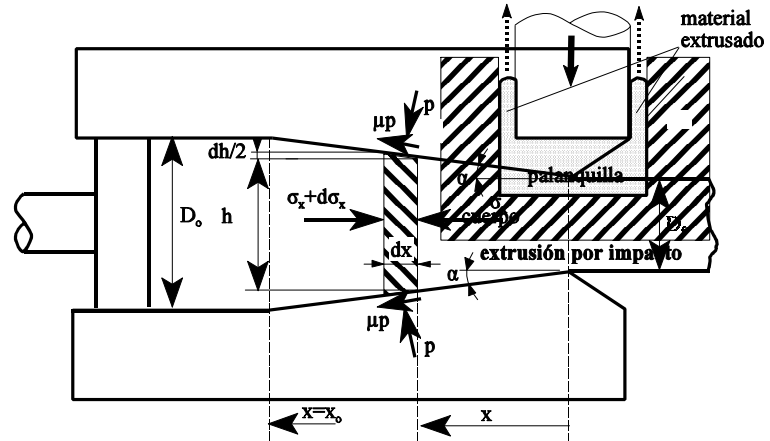
**B) Extrusión indirecta:** El cuerpo está cerrado en un extremo y el pistón está perforado y se mueve, saliendo el material por la matriz situada en el pistón. Al estar el material quieto no habrá rozamiento con las paredes; sin embargo al ser hueco el pistón es menos rígido (admite menos presiones).



**C) Extrusión hidrostática:** En lugar de un pistón se emplea un fluido sometido a muy alta presión, rodeando al material dentro del cuerpo.



**D) Extrusión por impacto:** Sólo en piezas pequeñas (longitudes cortas de formas huecas); mediante una pastilla del material, colocada en una matriz cerrada, a la que comprime un punzón a alta velocidad, obteniéndose objetos huecos de paredes finas (tubos de pomada, de dentífrico, etc).



### Tensiones en la extrusión.

El cálculo teórico de las tensiones, en los proceso de extrusión, se puede realizar únicamente en los casos más simples, por originarse grandes reducciones sección que conllevan, a su vez, grandes ángulos en las matrices, alejándose por ello de las suposiciones de *deformación homogénea*. El término del *trabajo adicional* es mucho más importante que en el resto de los procesos estudiados, no pudiéndose despreciar, en este caso. Por otra parte, la consideración de *deformación plana* es sólo aplicable en un reducido número de casos.

La teoría de los *Campos de Líneas de Deslizamiento* se aplica con más éxito, debido a que las configuraciones de fluencia se parecen a las configuraciones reales en los casos de placas planas y barras redondas, pudiéndose aproximar a éstas muchos de los perfiles extruidos. Su expresión general es de la forma:

$$\frac{p}{\sigma_e} = a + b \ln \frac{A_0}{A_1}$$

donde  $A_0$  y  $A_1$  son las áreas inicial y final respectivamente.

Se aplicará a continuación el Método de la Deformación Homogénea para el cálculo de tensiones en los casos más simples.

### A) Extrusión de una barra cilíndrica en una matriz cónica.

El estudio es similar al expuesto en el caso del estirado. Considérese la figura:

Donde una barra circular de diámetro inicial  $D_0$  se extruye hasta una diámetro final  $D_f$ , a través de una matriz cónica de semiángulo  $\alpha$ . Si se considera una sección diferencial, de longitud  $dx$ , y se establece el equilibrio en el eje axial, se tendrá:

$$\sigma_x \frac{\pi}{4} D^2 + (\sigma_x + d\sigma_x) \frac{\pi}{4} (D + dD)^2 - p \frac{dx}{\cos \alpha} \pi D \sin \alpha - \mu p \frac{dx}{\cos \alpha} \pi D \cos \alpha = 0$$

sumando y despreciando términos de orden inferior:

$$d\sigma_x \frac{D}{4} + \sigma_x \frac{dD}{2} + p \operatorname{tg} \alpha dx + \mu p dx = 0$$

y como  $dx = \frac{dh}{2\operatorname{tg}\alpha}$ , se podrá reducir a:

$$D d\sigma_x + 2\sigma_x dD + 4p (\operatorname{tg}\alpha + \mu) \frac{dD}{2\operatorname{tg}\alpha} = 0$$

$$D d\sigma_x + 2[\sigma_x + p (1 + \mu \operatorname{cotg}\alpha)] dD = 0 \quad (1)$$

Por otra parte, realizando el equilibrio en el eje radial:

$$\sigma_r (\pi D dx) + p(\pi D \frac{dx}{\operatorname{cos}\alpha}) \operatorname{cos}\alpha + \mu p(\pi D \frac{dx}{\operatorname{cos}\alpha}) \operatorname{sen}\alpha = 0$$

y simplificando:  $\sigma_r = p(1 + \mu \operatorname{tg}\alpha)$

En el estirado se indicó que  $\mu \operatorname{tg}\alpha$  podía ser despreciado, sin embargo en la extrusión esto no es de aplicación general. En efecto, si consideramos una matriz con ángulo de cono  $2\alpha=120^\circ$  y  $\operatorname{tg}\alpha = 1.732$ , por lo que si se quiere limitar el error cometido, al despreciar este producto, por debajo del 5%, habrá de ser  $\mu < 0.03$ .

En el caso de encontrarse en este supuesto, se procederá de forma análoga a la indicada en el estirado, por lo que, despreciando el término  $\mu \operatorname{tg}\alpha$ , se tendrá que  $\sigma_r = -p$ .

Suponiendo que se está en ejes principales, y aplicando el criterio de Von Mises:

$$\begin{aligned} \sigma_I &= -\sigma_x \\ \sigma_{III} &= \sigma_r \\ -\sigma_x - \sigma_r &= \sigma_e \\ -\sigma_x + p &= \sigma_e \end{aligned}$$

Por lo que, sustituyendo en la ecuación (1) y llamando  $B = \mu \operatorname{cotg}\alpha$ :

$$D d\sigma_x + 2[\sigma_x + p (1 + B)] dD = 0$$

$$D d\sigma_x + 2[\sigma_x + (\sigma_e + \sigma_x) (1 + B)] dD = 0$$

$$D d\sigma_x + 2[B\sigma_x + \sigma_e (1 + B)] dD = 0$$

$$\frac{d\sigma_x}{B\sigma_x + \sigma_e (1 + B)} = \frac{2dD}{D}$$

integrando, supuesto constante  $\sigma_e$  y el perfil recto (si no es constante y el perfil es curvo se considerarían valores medios):

$$\ln[B\sigma_x + \sigma_e (1 + B)]^{1/B} = \ln D^2 + \ln C$$

$$B\sigma_x + \sigma_e (1 + B) = C D^{2B}$$

y aplicando las condiciones de contorno:

$$\text{en } x=0 \quad \sigma_x=0 \quad D=D_1 \quad Y \quad c' \quad \sigma_e \frac{1\% B}{D_1^{2B}}$$

$$B \sigma_x \% \sigma_e (1\% B) \quad \sigma_e (1\% B) \left( \frac{D}{D_1} \right)^{2B}$$

$$\frac{\sigma_x}{\sigma_e} \quad \& \quad \frac{1\% B}{B} \left( 1 \& \left( \frac{D}{D_1} \right)^{2B} \right)$$

$$\text{en } x=x_0 \quad \sigma_x=\sigma_{x0} \quad D=D_0$$

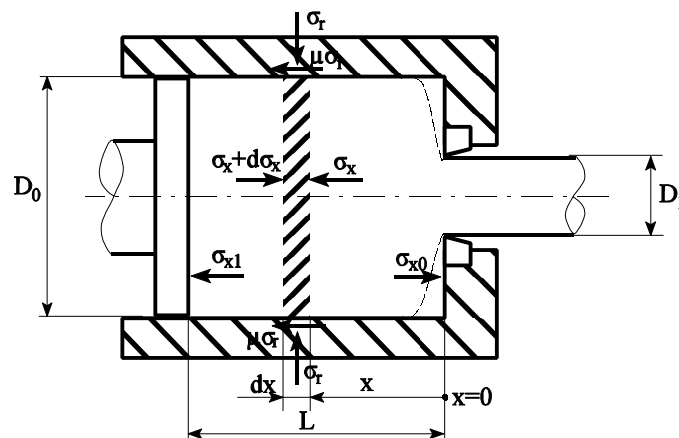
$$\frac{\sigma_{x0}}{\sigma_e} \quad \& \quad \frac{1\% B}{B} \left( 1 \& \left( \frac{D_0}{D_1} \right)^{2B} \right)$$

Ecuación similar a la obtenida para el caso del estirado de un redondo, aunque con la relación de diámetros invertida, al variar las condiciones de contorno de aplicación de cargas. El signo negativo indica que se habrá de realizar una fuerza de compresión.

### B) Extrusión de una barra cilíndrica en matriz con paredes paralelas.

Se va a estudiar la influencia del rozamiento en la matriz. Se partirá de la figura, de la que se establecerán las ecuaciones de equilibrio:

$$\sigma_x \frac{\pi}{4} D_0^2 \& (\sigma_x \% d\sigma_x) \frac{\pi}{4} D_0^2 \% \mu \sigma_r \pi D_0 dx \quad 0$$



Simplificando:  $D_0 d\sigma_x \quad 4\mu \sigma_r dx \quad (2)$

Aplicando el criterio de Von Mises, suponiendo que se está en ejes principales:

$$\begin{aligned} \sigma_I &= \sigma_x \\ \sigma_{III} &= \sigma_r \\ \sigma_x - \sigma_r &= \sigma_e \end{aligned}$$

$$\sigma_r = \sigma_x - \sigma_e$$

Por lo que sustituyendo en la ecuación (2), se tendrá:

$$\frac{d\sigma_x}{\sigma_x - \sigma_e} = \frac{4\mu}{D_0} dx$$

e integrando, con las condiciones de contorno:

$$\begin{aligned} \text{en } x=0 & \quad \sigma_x = \sigma_{x1} \\ \text{en } x=L & \quad \sigma_x = \sigma_{x0} \end{aligned}$$

$$\ln(\sigma_x - \sigma_e) = \frac{4\mu}{D_0} x + \ln C$$

$$\frac{\sigma_{x0} - \sigma_e}{\sigma_{x1} - \sigma_e} = \frac{4\mu}{D_0} L$$

$$\sigma_{x0} - (\sigma_{x1} - \sigma_e) e^{\frac{4\mu L}{D_0}} = \sigma_e$$

Si el rozamiento es pequeño se podrá realizar un desarrollo en serie de la función exponencial, linealizando:

$$\sigma_{x0} - (\sigma_{x1} - \sigma_e) \left(1 + \frac{4\mu L}{D_0}\right) = \sigma_e$$

### C) Extrusión de una placa plana en una matriz con ángulo cte.

Análogamente al estudio anterior, se obtiene la expresión:

$$\frac{\sigma_{x0}}{s} = \frac{1}{B} \left( 1 + \left( \frac{h_0}{h_1} \right)^B \right)$$

donde se ha considerado deformación plana.

### Materiales y formas que pueden extruirse.

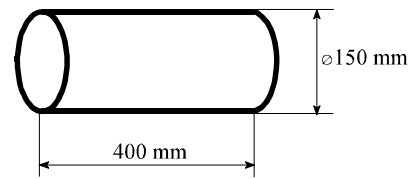
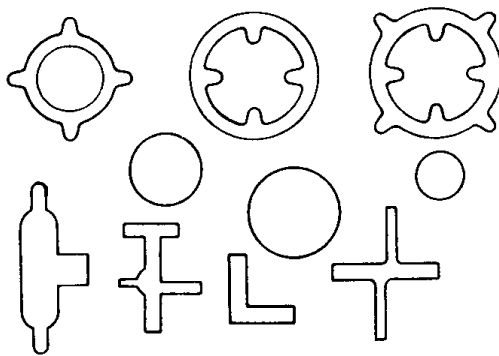
Debido al confinamiento del material y a las tensiones de compresión, se admiten materiales frágiles, frente a los empleados en el estirado, por el riesgo de agrietamiento.

Se suele emplear este procedimiento en aleaciones de Al, Cu, Sn, Fe, Pb, plásticos, latones, aceros, etc. El acero no se empleó hasta que se encontró como lubricante el vidrio fundido.

Se pueden obtener, entre otras, las siguientes secciones:



Conformado por deformación plástica



- Barras macizas ( $L_0$ : 5÷6 m  $\text{Y}$   $L_{\text{estirado}}$ : 12 m)
- Perfiles macizos o huecos ( $L_0$ : 5÷6 m  $\text{Y}$   $L_{\text{estirado}}$ : 20 m)
- Tubos redondos (D: <120 mm L: 6÷8 m)
- Tubos y perfiles tubulares o con aletas
- Tubos de pared delgada (D: <20 mm e: 0,3÷0,1 mm)
- Tubos capilares (D: <0,3 mm e: 0,03 mm)
- Elementos con aletas helicoidales

Se parte de trozos de redondo y palanquilla de 400-450 mm de longitud y 150 mm de diámetro, que previamente se calientan. La parte final del último metal se desaprovecha, procediéndose a su despunte.

## Ventajas e inconvenientes.

Entre las ventajas e inconvenientes que existen en el empleo de la extrusión, frente a otros procedimientos de fabricación, podemos destacar los siguientes:

- Se obtiene casi la forma acabada (tolerancias aceptables)
- Se aumenta la resistencia en un 60%
- Es un proceso automatizable
- La producción es rápida
- Se obtienen grandes reducciones (20/1 frente al 40% del estirado)
- La instalación es muy costosa
- Requiere un estudio muy profundo de la matriz

## Equipos de extrusión.

Se emplean dos tipos diferentes de prensas hidráulicas, las de presión vertical y las de presión horizontal (según la dirección del movimiento del vástago).

### 1) Prensas verticales

Tienen capacidad de 300 a 1000 t y presentan la ventaja de una mayor facilidad de alineación del vástago, mayor velocidad y menor espacio que las prensas horizontales. En cambio

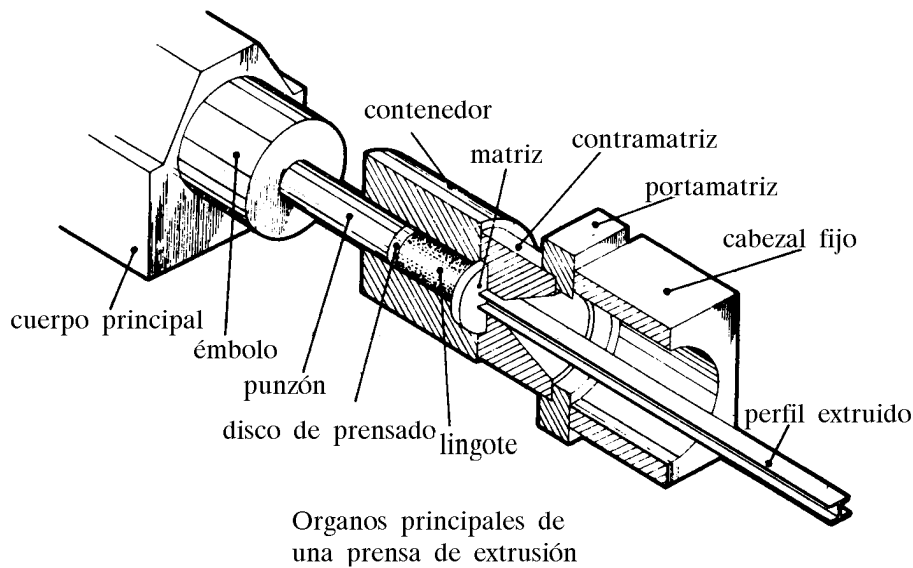
obligan a emplear naves de gran altura. Debido al autoalineado se mejora la calidad de acabado, empleándose para la fabricación de piezas de calidad pero poca longitud (4-5).

## 2) Prensas horizontales

Cuando se desea obtener piezas más largas se eligen las prensas horizontales. En ellas la palanquilla reposa directamente contra el cuerpo, por lo que la parte inferior, en contacto directo con dicho cuerpo, se enfriará más rápidamente, por lo que el enfriamiento no será uniforme. Además, puede producirse alabeo de las barras, así como espesores no uniformes de las paredes de los tubos; para solventarlo, se utilizan posteriormente máquinas enderezadoras. Las prensas de 1500 a 5000 t son de empleo normal, llegando en algunos casos hasta 12000 t de capacidad.

## 3) Matrices

Las matrices suelen ser simétricas, para homogeneizar las tensiones, fabricadas para resistir tensiones elevadas, choque térmico y oxidación. Para su fabricación se emplean aceros de alta calidad, generalmente de 12% Cr y con dureza de 56 HRc. Para la fabricación de grandes series se utilizan frecuentemente matrices de carburo de wolframio (widia).



## 4) Equipos auxiliares: Entre ellos destacaremos:

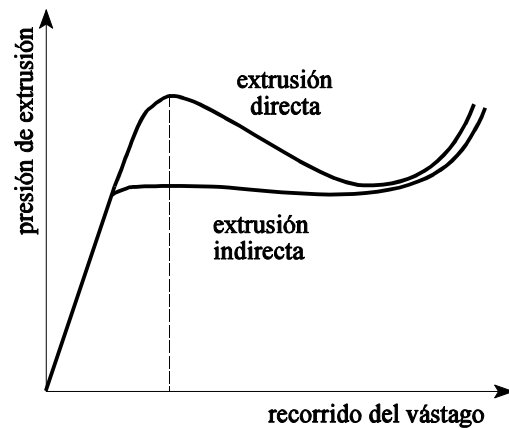
- **Hornos**, para mantener el material a una  $T^a$  o someterlo a un reglaje de tensiones.
- **Equipos de transporte**, (mesas transportadoras y enderezadoras).
- **Acumuladores de fluido**
- **Bombas**
- **Sierras de corte**

## VARIABLES QUE INTERVIENEN EN EL PROCESO DE EXTRUSIÓN.

• **Tipo de extrusión:**

- directa
- indirecta

Podemos considerar las diferencias existentes en el comportamiento de la presión, frente al recorrido del vástago, en la extrusión directa e indirecta, tal como se muestra en la siguiente figura.



La presión de extrusión es la fuerza de extrusión dividida por la sección transversal de la palanquilla. Al principio la presión aumenta hasta llenar el cuerpo de extrusión. En la extrusión directa, debido al rozamiento, la presión sigue aumentando hasta alcanzar un valor máximo, a partir del cual el material fluye por el orificio de la matriz y luego, a medida que la extrusión progresa, decrece la presión, porque la fuerza de fricción disminuye al ser menor la longitud de la palanquilla que va quedando dentro del cuerpo de extrusión. En el caso de la extrusión indirecta la presión aumenta poco más y se mantiene sensiblemente constante hasta casi finalizado el recorrido total, ya que no existe movimiento relativo entre la palanquilla y el cuerpo de extrusión. En ambos casos la presión final crece muy rápidamente cuando la longitud de la palanquilla se aproxima a cero. Como no es económico desarrollar las elevadas presiones que se necesitan para la extrusión total de la palanquilla, se desecha este pequeño despunte.

• **Temperatura de trabajo y velocidad de deformación:**

La mayoría de los metales se extrusan en caliente. Esto supone la aparición de oxidación tanto en la palanquilla como en las herramientas de extrusar, así como el ablandamiento de la matriz, por lo que es conveniente trabajar a la temperatura más baja que proporcione al metal suficiente plasticidad. Como la deformación producida por la extrusión es muy intensa, se produce un considerable calentamiento interno; por ello la temperatura límite superior debe ser bastante más baja que el punto de fusión, a fin de tener seguridad en los resultados.

Tal como se ha dicho anteriormente, para una deformación determinada, se puede trabajar por extrusión a temperaturas más elevadas que las empleadas en la forja o la laminación, porque las elevadas tensiones de compresión aminoran la posibilidad de agrietamiento.

• **Velocidad de deformación:**

Tiene poco efecto; así, aumentar su valor en diez veces sólo supone un 50% de presión suplementaria.

El aumento de la temperatura, producido por la deformación, es mayor a velocidades de extrusión elevadas, pudiéndose acentuar las dificultades relacionadas con la fragilidad en caliente. La selección de las velocidades de extrusión y temperaturas adecuadas ha de hacerse por tanteos para cada aleación y dimensiones de la palanquilla.



### • Relación de extrusión.

Se define como la relación existente entre la sección transversal inicial y la que queda después de la extrusión.

Para una presión de extrusión determinada, se puede obtener una relación de extrusión más elevada empleando temperaturas más altas. Para una temperatura determinada, es posible conseguir una mayor relación de extrusión trabajando a presión más alta

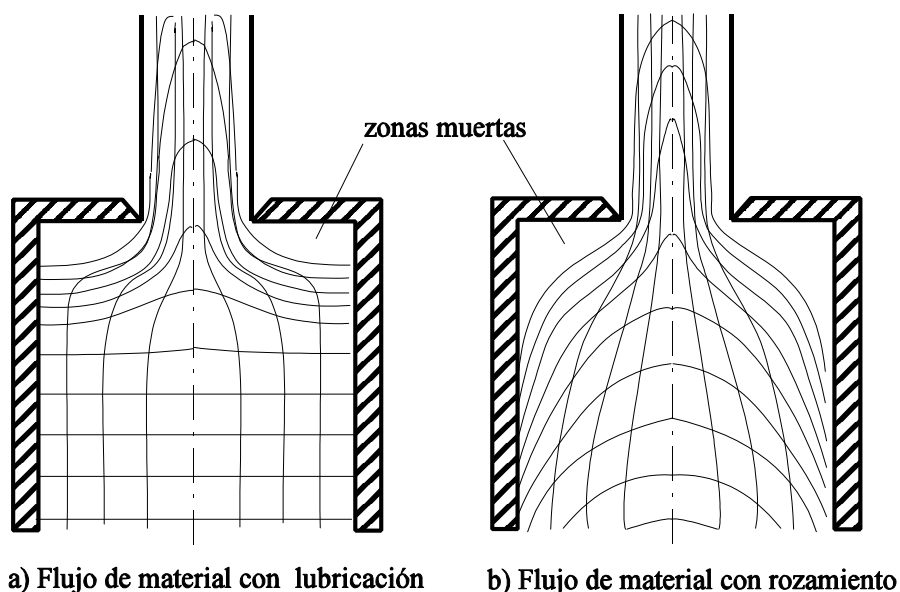
### • Condiciones de fricción:

Si se consigue una lubricación eficaz, se asegura el logro de mayores relaciones de extrusión en una prensa de capacidad determinada. Además, se pueden emplear velocidades de extrusión mayores, porque con buena lubricación, es menor el calor engendrado.

## Deformación en la extrusión.

La presión necesaria para producir extrusión depende de la forma en que el metal fluya en el cuerpo de extrusión y en la matriz.

Las siguientes figuras muestra el flujo de material, en la extrusión directa, con matriz plana. La figura *a*) corresponde a una palanquilla bien lubricada, que se desliza a lo largo de las paredes del cuerpo. La deformación es relativamente uniforme hasta las inmediaciones de la entrada a la matriz, donde el material fluye más fácilmente a través de esta última que a lo largo de las paredes del cuerpo. En las esquinas de la matriz hay una *zona muerta* de metal estancado, que sufre poca deformación. Los elementos del centro de la palanquilla soportan casi exclusivamente un alargamiento puro hacia la varilla extrusada. Los elementos próximos a los lados de la palanquilla sufren un intenso cizallamiento. Por ello se produce un trabajo superfluo que es la causa principal de la discrepancia entre las presiones de extrusión reales y las calculadas sobre la base de una deformación ideal.





La figura *b)* corresponde a una fricción elevada entre palanquilla y cuerpo de extrusión; se produce un intenso cizallamiento tanto en la palanquilla como en el flujo de metal a través de la matriz. Como la velocidad del metal del centro es mayor que la del próximo a las paredes del cuerpo, hay tendencia a la acumulación de metal sobre estas paredes. Si el metal tiene una resistencia al cizallamiento menor que las tensiones de fricción, se producirá una separación a lo largo de esas paredes y quedará una delgada película de metal en el cuerpo de extrusión.

### **Defecto de extrusión.**

Después que se han extrusado los dos tercios de la palanquilla, el metal externo se desplaza hacia el centro, fluyendo a través de la matriz, en las proximidades del eje de la barra. Como la superficie de la palanquilla suele estar cubierta de una película de óxido, este tipo de flujo origina inclusiones internas de óxidos. Este defecto se denomina *defecto de extrusión*. En la sección transversal del producto extrusado aparecerá como un anillo de óxido.

Una forma de evitar el defecto de extrusión es realizar ésta solamente hasta el momento en que el óxido entra en la matriz, desechando el resto de la palanquilla. Esto ocasiona inconvenientes económicos (a veces hay que desechar un 30%). Otro procedimiento consiste en emplear un émbolo de diámetro algo menor al del cuerpo, de forma que cuando el vástago empuje al pistón hacia adelante, este corte circularmente a la palanquilla y deje la superficie oxidada dentro del cuerpo de extrusión.

En la extrusión indirecta, por la forma del flujo, la superficie oxidada de la palanquilla se acumula en la superficie del producto extrusado.