

CAPÍTULO 7

TRABAJO EN FRÍO DE LOS METALES

7.1 GENERALIDADES

Algunas piezas metálicas producidas por deformación plástica son llevadas a su forma final por trabajo en caliente, en general estos métodos representan procesos de formado primario. Los procesos del trabajo en frío involucran en su mayoría métodos para producir partes que posteriormente se integrarán a una pieza terminada, por lo anterior se les denomina como operaciones secundarias o de fabricación. Por el incremento de la ductibilidad, inherente a la disminución de la temperatura, estos procesos no sólo se podrán efectuar por cargas de compresión, como en las operaciones de trabajo en caliente, sino también por compresión indirecta, tracción biaxial, corte y dobléz.

Cuando el proceso demanda grandes porcentajes de deformación es necesario considerar recocidos intermedios, como por ejemplo en la fabricación de chapas delgadas o alambres de diámetros pequeños.

El trabajo de la chapa metálica merece mención aparte ya que estos procesos son comúnmente utilizados para la fabricación de una gran cantidad de los objetos, como la carrocería de un automóvil, gabinetes para aparatos electrodomésticos (estufa, refrigerador, lavadora), perfiles producidos a partir de cintas de metal, mobiliario de oficina, etc. Para dar una idea de lo anterior se tiene que un 30% del acero producido, se utiliza en forma de láminas o placas, además es conveniente recordar que no únicamente la hoja de acero se emplea para los fines antes mencionados.

Características de los procesos de trabajo en frío

Los procesos de trabajo en frío se caracterizan por:

- a) Mejor acabado superficial
- b) Tolerancias dimensionales más estrechas

- c) Cambio en las propiedades físicas (se pueden ajustar las propiedades mecánicas de acuerdo con las necesidades del producto)
- d) Mayor capacidad para ser deformados por cargas de tracción.
- e) Mayor consumo de energía para la deformación
- f) Anisotropía
- g) Necesidad de recocidos intermedios, en el caso de grandes porcentajes de deformación

Después de la etapa en caliente el material deberá decaparse, esto es, limpiar la superficie mediante la eliminación de la capa de óxido, antes de proceder a su deformación, ya que dichas escamas limitarán la vida del herramental y producirán efectos muy negativos en el acabado y tolerancias de las piezas producidas.

Clasificación de los procesos efectuados en frío

Una forma de agrupar los procesos en frío es de acuerdo con la operación realizada; esto es:

TABLA 7.1 Clasificación de los procesos en frío

Estirado	Compresión	Doblez	Corte o desprendimiento	Procesos de aplicación particular
Barras	Acuñado	Doblado	Troquelado	Formados por alta energía
Tubos	Laminado	Rolado	Punzonado	Formado superplástico
Alambre	Calibrado	Doblado de placa	Corte de cinta o hendido	
Rechazado	Forja en frío	Rebordeado	Recorte	
Rechazado de potencia	Formado de roscas	Engargolado	Perforado	
Embutido con planchado	Extrusión	Formado con rodillos	Escopleado	
	Remachado		Ranurado	
			Lancetado	
			Rasurado	
			Corte con cizalla	

7.2 ESTIRADO DE ALAMBRE Y TUBO

Los procesos de estirado están comprendidos dentro de los de compresión indirecta, ya que aunque la carga aplicada para la deformación es de tracción, ésta provoca esfuerzos de compresión, que son en sí los responsables de la deformación.

En alguna época entre los siglos VI y X, los venecianos produjeron alambre de materiales suaves al obligar a la materia prima a pasar por orificios de diámetro menor al de ella; dicha operación se efectuaba a mano, por lo que su aplicación fue limitada. Se continuó la producción de "alambre" por el método tradicional en la época, que era mediante el corte de cintas angostas a partir de hojas previamente martilladas.

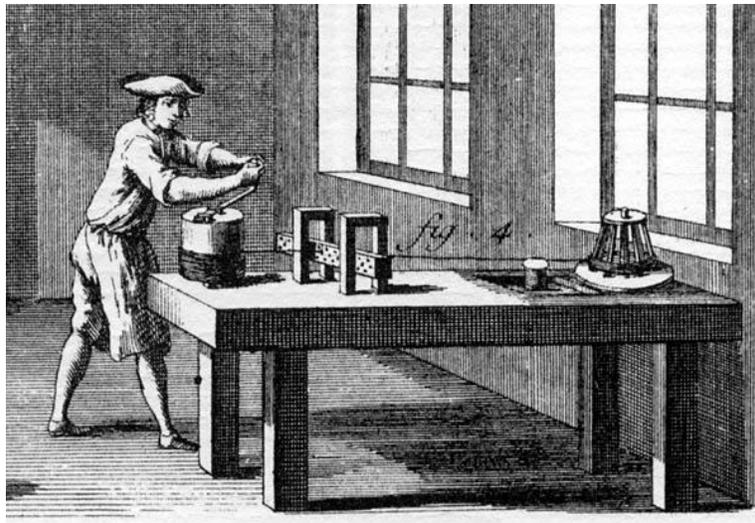


FIGURA 7.1 Banco manual para estirado de alambre a principios del siglo XIX

Estirado de alambre

La secuencia de fabricación es:

Laminado en caliente → decapado → trefilado
Alambrón (recocidos intermedios)

En este método la sección del material se reduce, jalándola a través de un dado (figura 7.2), producido generalmente de carburo de tungsteno. El material es ahusado en un extremo de tal manera que pueda pasar a través del orificio del dado, para así sujetarlo con una mordaza y proceder a la operación (figura 7.3).

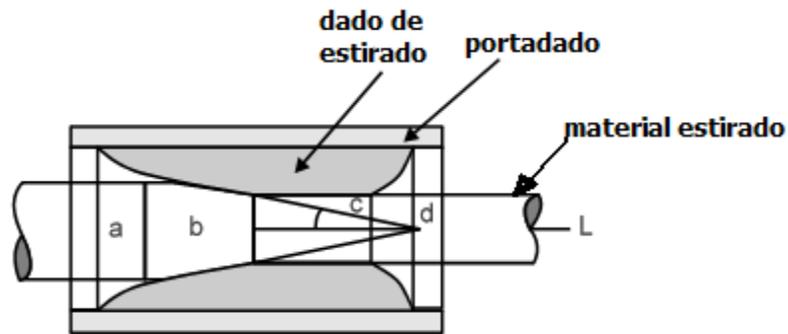


FIGURA 7.2 Dado de estirado

Al equipo utilizado se le conoce como banco de estirado. La operación puede ser intermitente, esto es, que cuando se termina la reducción de todo el rollo de material, se pasa éste a la siguiente etapa; lo más usual es trabajar en serie o cascada, que es cuando el material pasa a través de varios dados de manera secuencial (figuras 7.3 y 7.4).

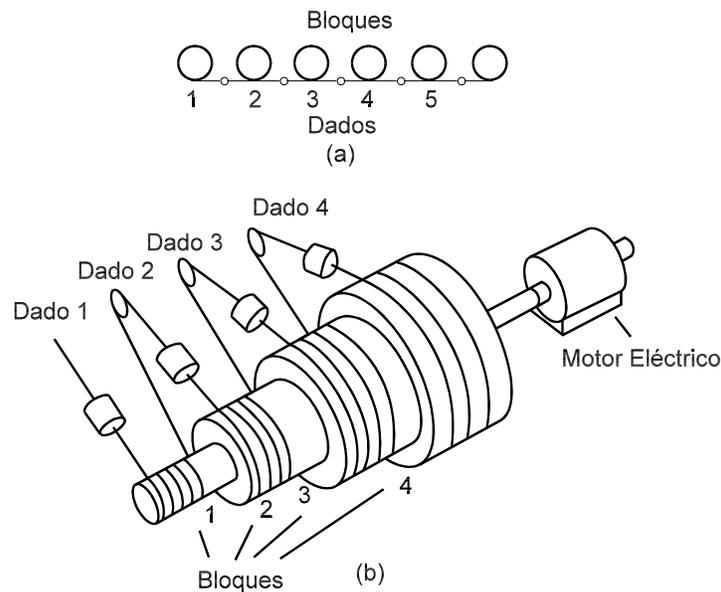


FIGURA 7.3 a) Banco de estirado accionado por varios motores, b) Banco de estirado en el cual varios de los pasos de reducción son accionados por un solo motor



FIGURA 7.4 Diferentes disposiciones para un banco de estirado (figura superior banco de estirado de 5 etapas, inferior banco de estirado de 7 etapas)

Para lograr lo anterior, la velocidad de los tambores se deberá incrementar de acuerdo con la reducción sufrida por el material, lo cual se logra de las siguientes maneras:

Cada tambor de enrollado está accionado por un motor de CD, con un control de velocidad que permitirá ajustarla de acuerdo con la sincronía que se requiera. Dicho procedimiento es costoso, tanto en el caso de que se empleen motores de CD o de CA con variador de frecuencia, por tal motivo y con la finalidad de superar esta desventaja, se emplean máquinas accionadas por un

solo motor (figura 7.3b). Se tiene una serie de escalonamientos, cuyos diámetros están determinados por la velocidad periférica necesaria, la que a su vez se determina por la reducción efectuada.

En la práctica es casi imposible lograr la relación precisa del diámetro del escalonamiento con la reducción. Esto provocará entonces deslizamiento del material sobre el tambor y por lo tanto fricción, dando como resultado el calentamiento del material. Es conveniente entonces que los conos se encuentren inmersos en un baño de aceite. Independiente de dicho fenómeno, se genera una gran cantidad de calor al fluir el material a través del dado, y al ser la carga de estirado, función del coeficiente de fricción; es conveniente entonces emplear recubrimientos para disminuir el rozamiento, y mejorar a la vez el acabado superficial del producto, en este caso se denomina al proceso como trefilado en seco. En otros casos el dado se encontrará inmerso en el lubricante, y el proceso se conoce como estirado en húmedo.

Para producir barras (diámetro mayor de 6 mm), se utilizan mesas o camas de estirado (figura 7.5) que pueden tener hasta más de 30 m de carrera; en este caso son posibles velocidades comprendidas entre los 10 y 30 m/min. Dichos equipos llegan a tener una capacidad aún mayor a las 130 toneladas de carga.



FIGURA 7.5 Mesa de estirado

Las máquinas de dados múltiples trabajan a velocidades mayores que las indicadas en el caso de estirado de barras, pueden ser de hasta 600 m/min en el caso de estirado de alambre de acero y de 2000 m/min para no ferrosos.

Dado de estirado

En el proceso de estirado el elemento fundamental es el dado (figura 7.6). Consta de dos partes: el dado o boquilla de estirado, que se produce de carburo de tungsteno para dados grandes o de diamante para pequeños diámetros; y la cubierta o soporte, que se produce de acero y en el caso de dados pequeños también se puede fabricar de bronce. La sección transversal del dado se mostró en la figura 7.2.



FIGURA 7.6 Dado con su buje de soporte (izquierda), diversos dados de carburo de tungsteno (derecha)

Las partes en que se puede dividir la sección del dado son:

CAMPANA O ENTRADA DEL DADO. Se diseña de tal forma que el material arrastre lubricante con él. Su forma propicia que la presión hidrostática se incremente, permitiendo así el flujo del lubricante.

CONO O ZONA DE APROXIMACIÓN. Su ángulo es determinante en la carga requerida para el proceso y será definido de acuerdo con las características del material. En esta zona el metal choca contra su superficie y al ser arrastrado hacia la salida reduce su sección transversal.

ZONA DE DESLIZAMIENTO O DE AJUSTE DE LAS DIMENSIONES. En esta zona el diámetro permanece constante y en realidad no hay reducción, pero sí produce una carga apreciable debida a la fricción. Su principal función es la de permitir reajustes del dado, ya que éste sufre un apreciable desgaste; si la longitud de la zona fuera cero no se podría recalibrar el dado, ya que al hacerlo se perderían las dimensiones. Por tanto, la vida útil del dado está en función de la

extensión de esta zona, por otra parte, si fuese demasiado extensa podría provocar la fractura del material por exceso de carga. En la práctica su longitud es de aproximadamente 2/3 del diámetro del dado.

SALIDA. Su conicidad permite la recuperación elástica del material, asimismo, reduce la posibilidad de desgaste cuando el dado está mal alineado.

El ángulo del dado, de acuerdo con lo que se indica en el inciso (c), es determinante en la carga requerida. El óptimo será aquel que minimice la energía necesaria para la deformación, la cual está determinada por tres componentes:

- a) Trabajo de deformación. Está definido por la deformación inherente al proceso.
- b) Carga de fricción. Depende del área de contacto y por tanto de la conicidad del dado.
Un ángulo de entrada más pequeño significa un área de contacto mayor, considerando una reducción de referencia.
- c) Trabajo redundante. Es la energía extra necesaria para doblar primero en una dirección determinada las fibras del material y después regresarlas a la dirección de flujo. Es evidente que este término será mayor cuando el ángulo del dado se incremente.

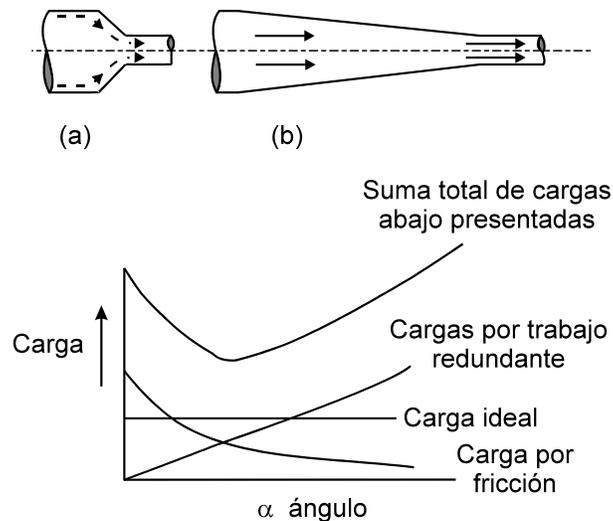


FIGURA 7.7 Efecto del ángulo del dado sobre la carga de estirado

El ángulo óptimo puede ser determinado a través de un análisis del límite superior. En general, se considera que a mayor resistencia del material, más pequeño es el ángulo óptimo.

TABLA 7.2 Ángulo óptimo de algunos materiales

Metal	Ángulo óptimo
Aluminio	24
Cobre	12
Acero	6

Defectos del material

Las fallas del producto pueden atribuirse básicamente a lo siguiente:

- a) Defectos del material de partida, como podrían ser grietas o fracturas.
- b) Limpieza inadecuada. El material está todavía recubierto con escamas de óxido que producen desgaste excesivo del dado y ralladuras sobre la pieza.
- c) Mal acabado del dado. Produce rayas longitudinales en el producto.

La fractura del material es un caso extremo, en el que la carga de estirado supera la resistencia a la tracción del material. Para una reducción y conicidad fijas, esta posibilidad se incrementa con la fricción.

Análisis del proceso de estirado

El estirado de alambre, desde el punto de vista de su análisis, es uno de los procesos de conformado mecánico más simples. El método de análisis se puede ir variando de acuerdo con la complejidad y exactitud que se pretenda.

Presión de estirado considerando únicamente el trabajo de deformación:

$$\sigma_e = \sigma_0 \text{Ln} \left(\frac{A_0}{A_f} \right) \quad (7.1)$$

Este término no toma en cuenta ni la fricción ni tampoco el trabajo redundante.

Mediante el método del planchón, esto es con base en el principio de conservación de la cantidad de movimiento, se puede determinar la carga requerida para el estirado de una barra de sección circular (figura 7.8):

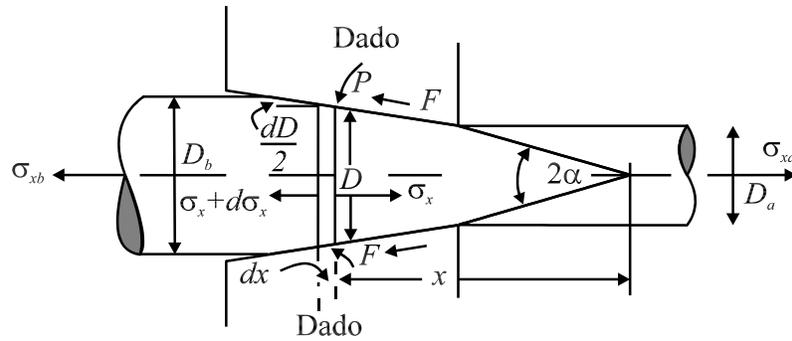


FIGURA 7.8 Esfuerzos generados durante el estirado

De dicho análisis se llega a:

$$\sigma_e = \sigma_0 \frac{1+B}{B} \left[1 - \left(\frac{A_f}{A_0} \right)^B \right] \quad (7.2)$$

Considerando un material de sección circular (alambre o barra)

$$\sigma_e = \sigma_0 \frac{1+B}{B} \left[1 - \left(\frac{D_f}{D_0} \right)^{2B} \right] \quad (7.3)$$

A partir de un análisis similar, J.G. Wistreich propuso:

$$\sigma_e = \bar{\sigma}_0 \ln \left(\frac{A_0}{A_f} \right) 1+B \quad (7.4)$$

En las ecuaciones anteriores no se tomó en cuenta para su deducción el trabajo redundante, éste puede ser considerado a través de un factor f , de acuerdo con:

$$\phi = f \quad \alpha, r = \frac{\varepsilon^*}{\varepsilon}$$

donde:

- ϕ = factor de trabajo redundante
- ε^* = deformación redundante o excedente, ésta es mayor a la que corresponde al del metal que ha sido homogéneamente deformado.

Este factor se obtiene de la gráfica esfuerzo-deformación. Para esto se sobrepone la gráfica del material que ha sido estirado a la del material recocido (figura 7.6). Sobre ésta se determina la deformación homogénea producida por el esfuerzo de cedencia que presenta el material estirado.

Un método alternativo para lo anterior consiste en un análisis a través del método del límite superior:

$$\sigma_e = \frac{\sigma_0 \left[2 f \alpha \operatorname{Ln} \frac{R_0}{R_f} + \frac{2}{\sqrt{3}} \left(\frac{\alpha}{\operatorname{sen}^2 \alpha} \right) \cot \alpha + 2\mu \left(\cot \alpha \left(1 - \operatorname{Ln} \frac{R_0}{R_f} \right) \frac{L}{R_f} \right) \right]}{1 + \frac{2\mu L}{R_f}} \quad (7.5)$$

donde:

$f(\alpha)$ = Función del ángulo de entrada

L = Longitud de contacto del dado

R_0 = Radio del material de partida

R_f = Radio del alambre

Otra expresión menos complicada pero no menos válida, que se desarrolla por el mismo método es:

$$\sigma_e = \sigma_0 \left[\left(1 + \frac{m}{\operatorname{sen} 2\alpha} \right) \operatorname{Ln} \frac{D_0}{D_f} + \frac{2}{3} \tan \alpha \right] \quad (7.6)$$

Donde:

m = factor de fricción

$\frac{2}{3} \tan \alpha$ = representa el trabajo redundante

A partir del concepto de geometría de la zona de deformación se puede también inferir acerca del trabajo redundante, ya que está íntimamente ligado con el coeficiente delta, que representa al cociente del espesor medio a la longitud de la zona de deformación.

Para el estirado de alambre se tiene:

$$\Delta = \frac{\alpha}{r} \left(1 + \sqrt{1-r} \right)^2 \quad (7.7)$$

Donde:

α = semiángulo de entrada

r = reducción en el estirado

Para la mayoría de las operaciones de estirado se emplean ángulos de 6° a 10° y reducciones dentro del rango del 20%; con estas condiciones, delta toma valores de 2 a 3. Mayores valores de dicho parámetro corresponderán a reducciones más pequeñas y ángulos mayores. Del análisis de datos experimentales se ha concluido que el factor de trabajo redundante (ϕ) está relacionado con el factor Δ en la forma

$$\phi = C_1 + C_2\Delta \Rightarrow \phi \approx 0.8 + \frac{\Delta}{4.4} \quad (7.8)$$

El ángulo óptimo (ángulo al que corresponde con la mínima energía de estirado) se puede expresar a partir del valor de delta según:

$$\Delta_{op} = 4.9 \left[\frac{\mu}{\text{Ln}\left(\frac{1}{1-r}\right)} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (7.9)$$

Estirado de tubo

Los tubos sin costura son producidos en caliente mediante extrusión o por perforado de barras sólidas y posteriormente por estirado con rodillos. Con frecuencia son acabados por estirado en frío para mejorar sus propiedades mecánicas, garantizar mejores acabados y tolerancias más estrechas, reducir el espesor de su pared o a la vez reducir su diámetro.

ETAPAS DEL PROCESO

Lingote de fundición → Formado del tubo → Decapado → Estirado de la barra hueca

(previamente formada por extrusión,
o perforado y estirado)

Dependiendo del diámetro y las características del producto, se podrá estirar (figuras 7.9 y 7.10) por cuatro métodos: tres de ellos demandan el empleo de un punzón o mandril. Dichos procesos son:

Estirado sin mandril. Se utiliza para diámetros mayores de 6 mm, cuando no se requiere calibrar con precisión el diámetro interior. En este caso, los esfuerzos cortantes a la entrada y a la salida del dado son más intensos, la deformación redundante es mayor y como consecuencia las

deformaciones por etapa necesariamente son más reducidas que en aquellos métodos que empleen un mandril.

Estirado con mandril fijo. Se utiliza en el caso de tubos de mayor diámetro, evidentemente se limita la longitud del tubo.

Estirado con mandril flotante. Permite el estirado de mayores longitudes. En este caso el mandril es cónico a diferencia del utilizado en el caso anteriormente descrito que es cilíndrico. Se puede demostrar que si la carga debida a la fricción se reduce, se podrán obtener mayores deformaciones por pasada. Un correcto diseño del mandril logrará reducciones por etapa de hasta el 45%. Los principales inconvenientes del proceso se derivan de la dificultad para lograr una adecuada lubricación interior.

Estirado con mandril móvil. Los problemas de fricción interior con el mandril se podrían solucionar en el caso de utilizar uno de gran longitud que se desplace acompañando al tubo. Este mandril es en realidad un alambre o barra, cuyo diámetro es igual al del interior que se pretenda para el tubo. Para evitar problemas por soldadura debido a la presión y temperaturas inherentes al proceso, el mandril se deberá cubrir con un lubricante. A la salida el mandril se mueve con la misma velocidad del tubo, donde ésta es evidentemente mayor que la del material que se encuentra confinado en el dado; esto provoca una carga de fricción en la interfase entre el mandril y el tubo, la cual se contrapone a la existente entre el dado y el material, reduciendo así la carga de estirado.

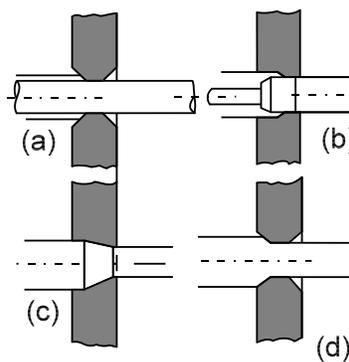


FIGURA 7.9 Estirado de tubo (a) con mandril móvil (b) con mandril fijo (c) con mandril flotante (d) sin mandril

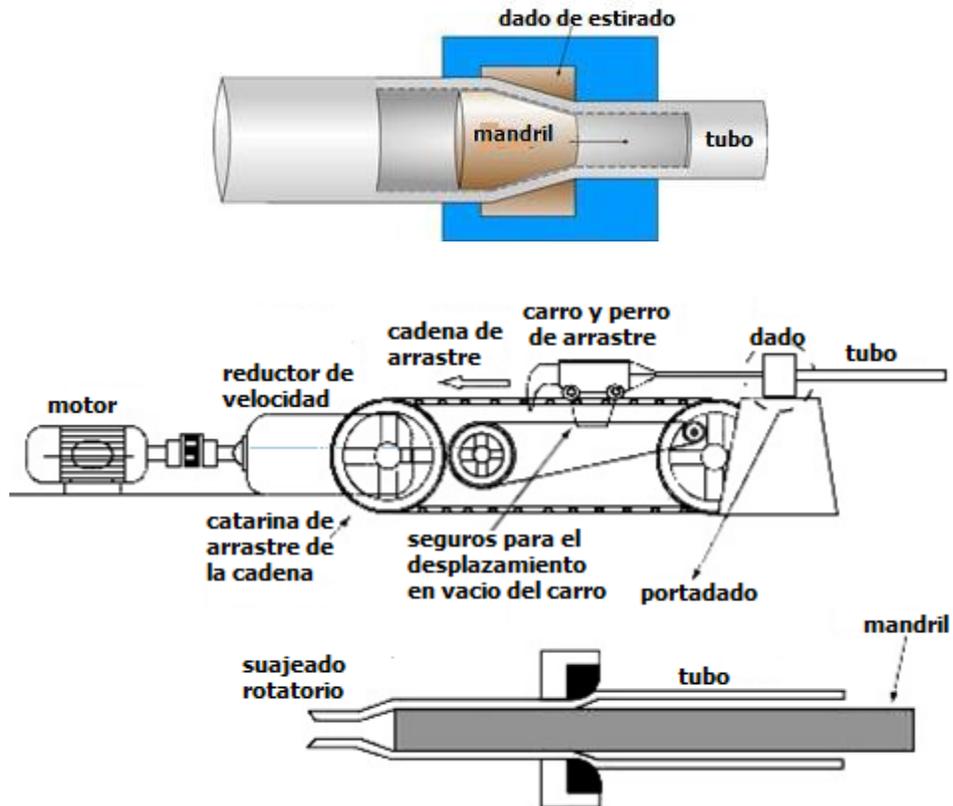


FIGURA 7.10 En la figura superior se muestra esquemáticamente el estirado con mandril flotante, imagen inferior estirado con mandril móvil y posterior suajeado

Una de las desventajas del proceso es la necesidad de retirar el mandril. Para efectuar esto, deberá aumentarse ligeramente el diámetro del tubo, lo cual se hace normalmente por rolado.



FIGURA 7.11 Mesa hidráulica de estirado para tubo

Análisis de las cargas que se presentan durante la operación de estirado

En el caso de estirado sin mandril, el análisis es similar al empleado para barra o alambre, con la diferencia que se considera deformación plana (figura 7.12), esto en virtud del espesor y condiciones de deformación.

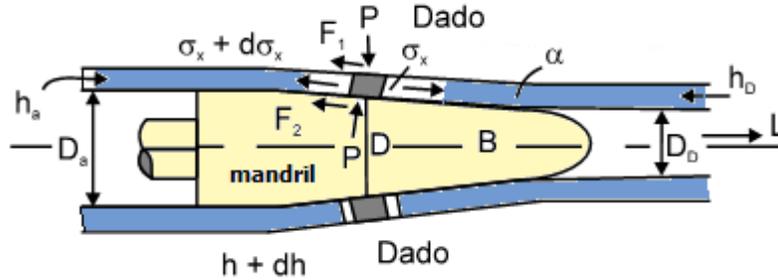


FIGURA 7.12 Esfuerzos generados en la operación de estirado de tubo

Para poder reducir el espesor del tubo, los ángulos del dado y del mandril no serán iguales, debiendo por tanto ser mayor el primero. Además no existe razón alguna para que los coeficientes de fricción entre mandril y material, y entre éste y el dado sean iguales.

Las fuerzas que se presentan sobre el elemento diferencial analizado constan de cinco componentes:

I) Debida al esfuerzo longitudinal

$$\sigma_x + d\sigma_x \quad h + dh \quad \pi D - \sigma_x \pi h D$$

II) Por la reacción del dado

$$p \tan \alpha \quad \pi D dx$$

III) Por la reacción del mandril

$$-p \tan \beta \quad \pi D dx$$

IV) Por la fricción sobre el dado

$$\mu_1 p \pi D dx$$

V) Por la fricción sobre el mandril

$$\mu_2 p \pi D dx$$

Considerando el equilibrio de fuerzas:

$$\sigma_x + d\sigma_x \quad h + dh \quad \pi D - \sigma_x \pi h D + p \tan \alpha \quad \pi D dx - p \tan \beta \quad \pi D dx + \mu_1 p \pi D dx + \mu_2 p \pi D dx = 0$$

$$dh = \tan \alpha - \tan \beta \quad dx$$

sustituyendo y reordenando

$$hd\sigma_x + \sigma_x dh + pdh + \frac{\mu_1 + \mu_2}{\tan \alpha - \tan \beta} pdh = 0$$

Haciendo un cambio de variable, tal que:

$$B^* = \frac{\mu_1 + \mu_2}{\tan \alpha - \tan \beta}$$

entonces:

$$hd\sigma_x + \sigma_x dh + pdh (1 + B^*) = 0$$

Considerando el criterio de cedencia de Tresca, se tiene:

$$\sigma_1 - \sigma_3 = \sigma_0$$

$$\sigma_1 = \sigma_x$$

$$\sigma_3 = -p$$

por lo tanto

$$\sigma_x + p = \sigma_0$$

Reordenando y sustituyendo se tiene:

$$hd\sigma_x = - (\sigma_x + p) (1 + B^*) dh$$

$$hd\sigma_x = - (\sigma_x + \sigma_0 - \sigma_x) (1 + B^*) dh$$

$$hd\sigma_x = - (\sigma_0 (1 + B^*) - \sigma_x B^*) dh$$

$$\frac{d\sigma_x}{\sigma_x B^* - \sigma_0 (1 + B^*)} = \frac{dh}{h}$$

$$\frac{d\sigma_x}{dh} - \frac{\sigma_x B^* - \sigma_0 (1 + B^*)}{h} = 0$$

la solución de la ecuación es de la forma: $\frac{1}{B^*} \int_0^{\sigma_e} \frac{B^* d\sigma_x}{\sigma_x B^* - \sigma_0 (1 + B^*)} = \int_{h_0}^{h_f} \frac{dh}{h}$

$$\sigma_e = \sigma_0 \left[\frac{1+B^*}{B^*} \right] \left[1 - \left(\frac{h_f}{h_0} \right)^{B^*} \right]$$

donde: σ_e representa el esfuerzo requerido para el estirado de tubo.

En caso de utilizar un mandril móvil, el análisis difiere del que aquí se presenta, ya que la fricción en la interfase mandril-material se opone a la que se presenta sobre el dado. Por lo tanto, para un mandril móvil está dado por:

$$B^* = \frac{\mu_1 - \mu_2}{\tan \alpha - \tan \beta}$$

En el caso de que los dos coeficientes de fricción sean iguales, la ecuación diferencial es:

$$hd\sigma_x + \sigma_x + p dh = 0$$

lo cual al integrar queda como:

$$\sigma_e = \sigma_0 \ln \frac{A_0}{A_f}$$

Expresión que representa a la carga para el caso de que no exista fricción. Si el coeficiente de fricción entre el mandril y el material excede del que se presenta entre el material y el dado, entonces el valor de B^* es negativa y por tanto el esfuerzo de estirado resulta menor que para el caso ideal sin fricción.

Otros métodos de estirado

Las operaciones de estirado no solo se relacionan con alambre y tubo, también se debe de considerar su aplicación en productos planos (lámina), para ésta existen los procesos de rechazado y de embutido y estirado. En el proceso de rechazado (figura 7.13) la lámina es obligada a deformarse sobre un mandril, el cual se encuentra rotando, esto por efecto de la presión ejercida por una o varias herramientas romas (sin filo) [figura 9.16].

Este método de conformado, de acuerdo con la presión ejercida puede presentar una reducción sensible en el espesor de la lámina, teniéndose que el flujo se produce por cortante razón por la cual es considerado como un proceso de formado por corte. Esto es si la carga ejercida por la herramienta es lo suficientemente elevada, los esfuerzos no solo serán suficientes para doblar la lámina sobre el mandril sino permitirán también reducir el espesor. En el caso en cuestión, si se trata de formar piezas cónicas la relación de espesores (inicial y final) estará en función del

semiángulo del cono de acuerdo con la expresión $t_f = t_0 \operatorname{sen} \alpha$; si α es menor de 30° se requerirán dos etapas para concluir el formado, teniendo un recocido intermedio entre éstas.

El rechazado de potencia se refiere a la aplicación de presión sobre la lámina a doblar sobre el mandril por efecto de algún ingenio mecánico, particularmente las herramientas son accionadas por pistones hidráulicos (figuras 7.13 y 7.14).



FIGURA 7.13 La operación de rechazado se realiza al empujar la lámina mediante una o varias herramientas sin filo, sobre el mandril; el cual se encuentra girando



FIGURA 7.14 Torno de CNC para rechazado



FIGURA 7.15 Ejemplos de formado mediante rechazado

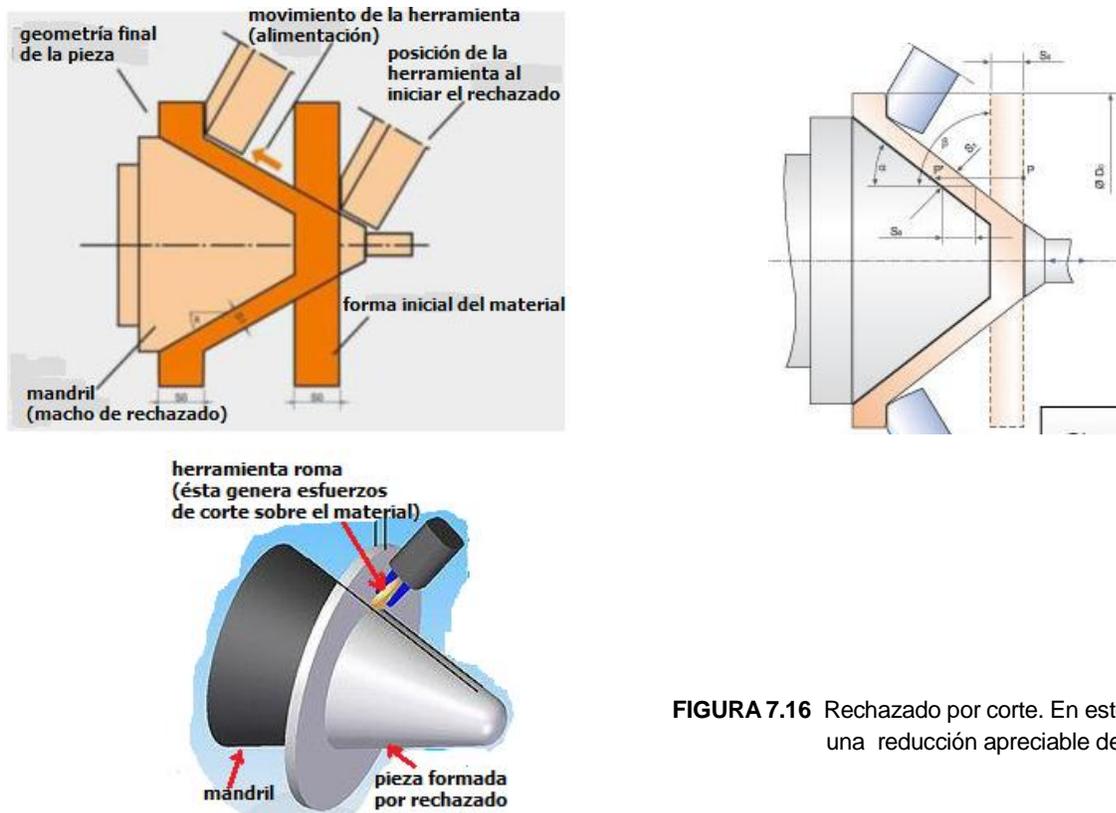


FIGURA 7.16 Rechazado por corte. En este caso existe una reducción apreciable del espesor

El rechazado permite formar superficies de revolución y, por tanto, cuerpos huecos a partir de chapa metálica, pudiéndose aplicar tanto a ferrosos como no ferrosos. Durante mucho tiempo se utilizó madera y bronce para la producción del mandril, se empleaba una especie de torno sencillo (figura 7.17) conocido como “torno de rechazado” para hacer rotar la pieza de lámina mientras esta era empujada contra el mandril por la herramienta. En la actualidad, el proceso se realiza mediante pistones hidráulicos pudiendo todo el sistema programarse para obtener cuerpos de revolución más complejos (máquinas CNC, figura 7.14).

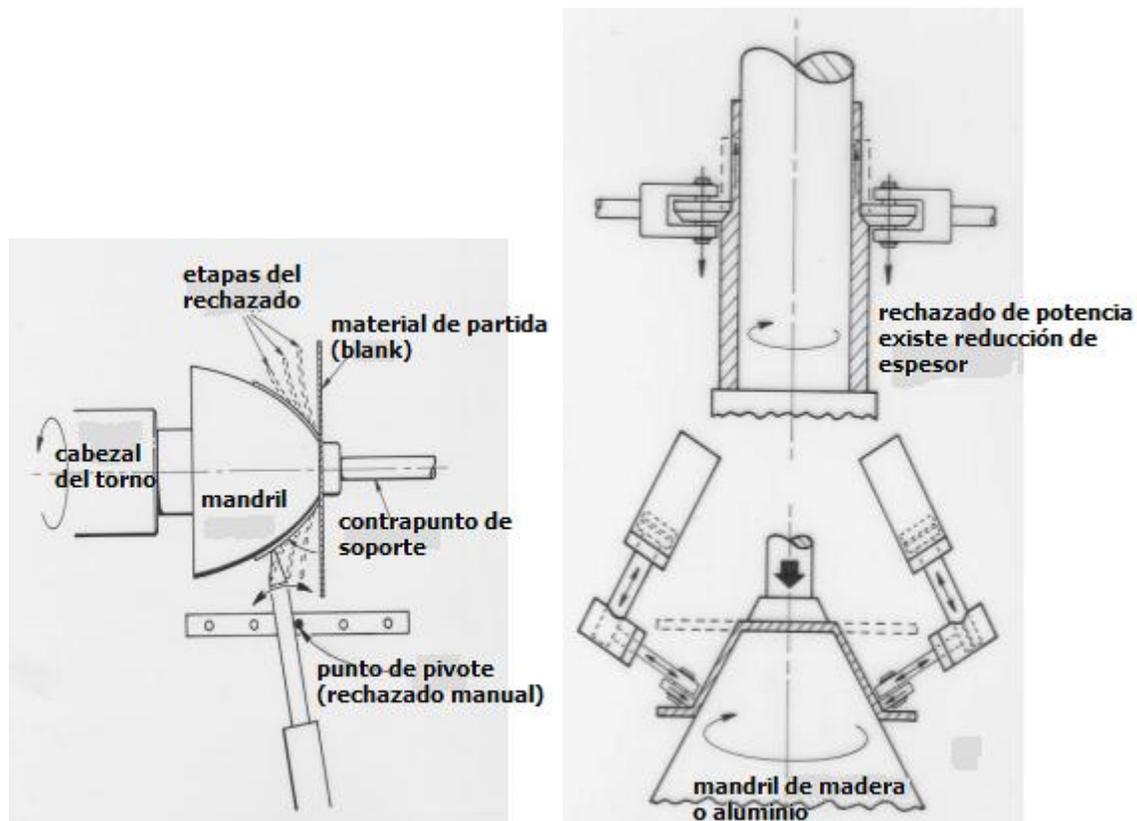


FIGURA 7.17 Descripción esquemática del proceso de rechazado; lado derecho manual, lado izquierdo de potencia, en la vista superior se aprecia una reducción sensible de espesor, mientras que en la inferior el espesor prácticamente se mantiene

7.3 FORMADO POR COMPRESIÓN

Existen diversos métodos de formado por compresión. Varios de ellos son característicos del formado en frío, mientras que otros son propiamente continuación de métodos que ya han sido vistos previamente, como forja y laminación y la extrusión (por impacto).

Operaciones de forja

CALIBRADO. Es la forma más simple de forja en frío, que consiste en una ligera operación de compresión de una pieza forjada con lo que se obtienen tolerancias cerradas y buenos acabados.

SUAJEADO. Este término se usa para denominar operaciones de forja; con frecuencia se refiere al caso de aplicar cargas de compresión (figura 7.18), y permite que el material se deforme libremente perpendicular a la fuerza aplicada.

El suajeado rotatorio (figura 7.19); esta operación consiste en reducir el diámetro sobre parte del largo de una varilla, barra o tubo. El suajeado rotatorio se hace en un par de dados cónicos. Los dados se abren y cierran con rapidez, en tanto que la pieza de trabajo se gira y es alimentada a lo largo. Las quijadas se insertan en la ranura de la flecha, al girar se provoca el desplazamiento debido a los rodillos que se encuentran alrededor, y se provoca la deformación. La pieza de trabajo puede alimentarse a las quijadas en forma mecánica o a mano. Otra forma de suajeado puede ser empujando un tubo dentro de un buje, en tanto que uno de ellos gira. Puede usarse un anillo de bolas en una jaula en lugar de un buje. Los tubos pueden suajearse en un mandril para soportar o para producir una forma interna o un árbol ranurado.



FIGURA 7.18 Diversas piezas producidas por forja en frío



FIGURA 7.19 En la imagen de la izquierda se muestra esquemáticamente la operación de una suajeadora rotatoria, en la imagen del centro se presenta un niple producido por suajeado; mientras que en la de la derecha se observa un equipo hidráulico para suajeado

CABECEADO EN FRÍO O RECALCADO. El formado de cabezas de pernos, remaches, tornillos y otras piezas similares hechas en una máquina de cabeceado en frío es otra forma de estampado. La barra del material previamente calibrado es alimentada por rodillos enderezadores hasta un tope, y entonces se corta y se transporta a uno de los cuatro tipos de dados cabeceadores. En la manufactura de clavos, la cabeza se forma antes del corte de alambre.

Se dispone de máquinas productoras de tornillos que los terminan completamente, antes de abandonar la máquina. Las operaciones consisten en cortar una barra sobredimensionada, extruir el cuerpo, cabecearlo, recortarlo, aguzarlo y laminarle la rosca. Todas las operaciones se llevan a cabo simultáneamente, con producciones mayores a 100 piezas por minuto.

ACUÑADO. Se trata de una operación de forja en frío (figura 7.20), la cual se caracteriza por su reducida deformación restringida a la producción de detalles finos en la superficie de la pieza sin que exista flujo lateral; el ejemplo más sencillo es el grabado de las monedas. Para lograr la formación de los detalles las presiones se pueden elevar en forma significativa (se alcanza hasta del orden de 1400 MPa). El material utilizado para el acuñado (cospel) primero es troquelado a partir de hojas metálicas de un espesor aproximadamente igual al de las monedas a producir, estas hojas a su vez provienen de un proceso de laminado en frío.

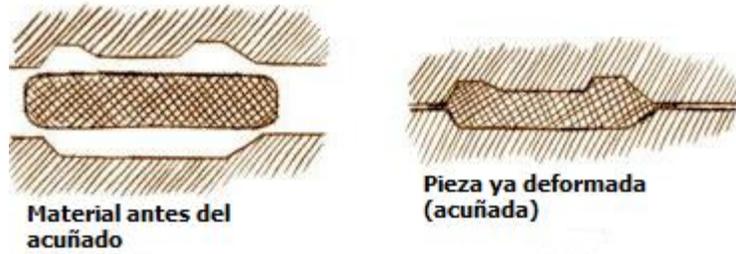


FIGURA 7.20 La aplicación más usual del acuñado es la producción de monedas

REPUJADO. Es una operación de deformación por compresión la cual no demanda las altas presiones inherentes al acuñado. El punzón es usualmente con relieve, de tal forma que sólo toca la parte de la lámina que está siendo trabajada. Este proceso se emplea en la producción de medallones y elementos decorativos y en general en grabado sobre lámina delgada. Se considera que el espesor del material no varía con la deformación. Una variante del proceso es el grabado o repujado rotatorio.

REMACHADO Y ESTACADO. En realidad ambos métodos se pueden agrupar dentro de las operaciones de ensamble. El remachado (figura 7.21) se refiere a la formación de la cabeza de un remache sólido o a la formación de un reborde para el caso de uno que fuera hueco. El estacado tiene similar finalidad de la del remachado, en este caso el elemento que se va a ensamblar se recalca en uno de sus extremos, de tal manera que la deformación produce el ensamble de los elementos.

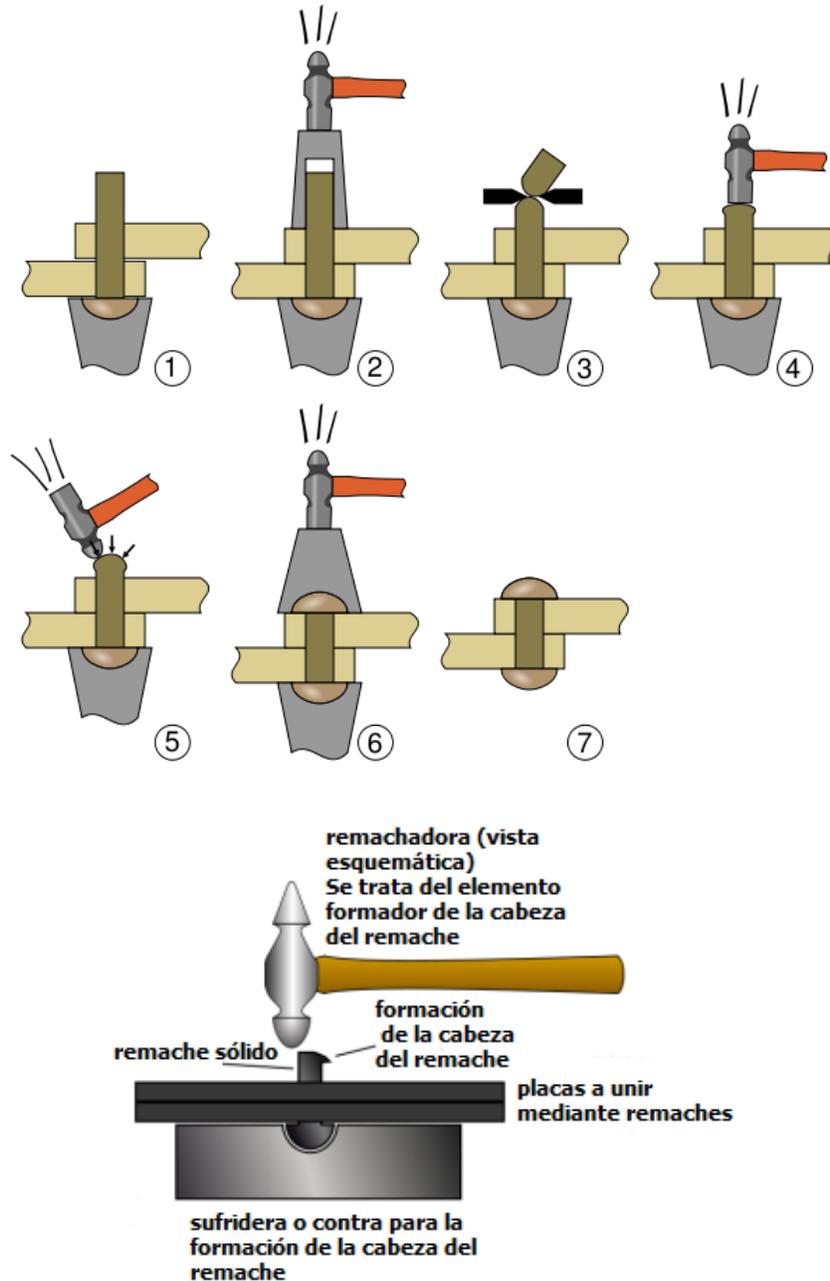


FIGURA 7.21 Operaciones de remachado

Formado por rodillos

En este proceso, el formado de la cinta se obtiene al hacerla pasar a través de una serie de parejas de rodillos que la forman progresivamente (figura 7.22), para al final ser soldada por resistencia. El proceso es continuo, con velocidades de hasta 100 m/min. El número de estaciones de rodillos depende de la geometría del perfil que se va a formar.

El equipo está constituido tanto por rodillos que trabajan en eje horizontal como vertical. También cuenta con rodillos guía y enderezadores al final del proceso. Este es un proceso de alta producción, ya que solamente así se justifica el alto costo del herramental.



FIGURA 7.22 Formado por rodillos de perfiles tubulares

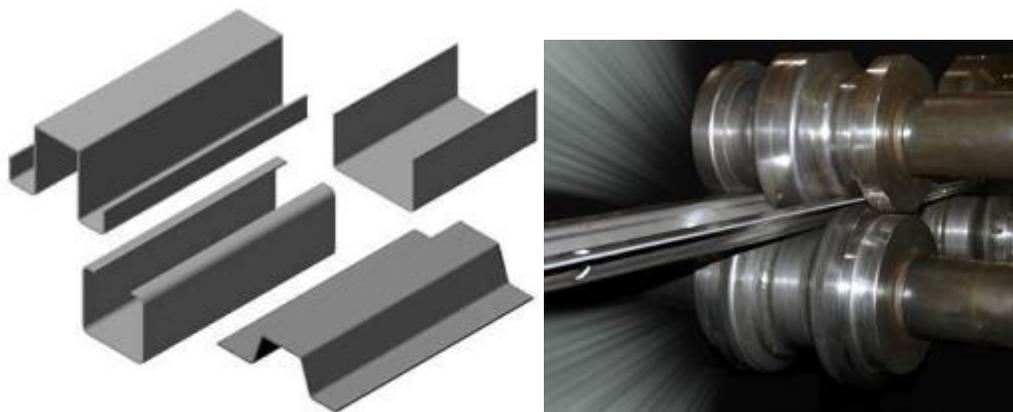


FIGURA 7.23 En la imagen de la izquierda se muestran diferentes perfiles producidos por rodillos, a la derecha se muestra un perfil al salir de una pareja de rodillos

ROLADO. Se trata de otro método de formado de hojas o cinta de metal. En esta operación el metal se curva para obtener piezas cilíndricas. La máquina está formada por tres rodillos del mismo diámetro, dos se mantienen en posición fija y el otro se puede desplazar axialmente para ajustar el radio de curvatura de la hoja. Es evidente que a mayor distancia entre los planos que contienen los ejes de rotación de los rodillos, se incrementa el diámetro del elemento. Aunque no es usual la operación también se puede efectuar con sólo dos rodillos, de los cuales el inferior está revestido de una gruesa capa de hule; después se determina el radio de curvatura por la presión ejercida por el rodillo superior.

Existen roladoras de muy diversos tipos: las accionadas manualmente, que se pueden emplear para hojas desde calibre 16, hasta máquinas accionadas mecánicamente que pueden rolar placas de más de 25 mm de espesor (figura 7.24).



FIGURA 7.24 En la imagen de la izquierda se muestra esquemáticamente el proceso de relado de chapa metálica; a la derecha se presenta una roladora mecánica para placa de 10 a 35 mm de espesor y hasta 4 m de ancho

Existen otros métodos de formado por flexión, como puede ser mediante dobladoras manuales (figura 7.25a), las cuales se pueden utilizar para láminas de acero de hasta 4.9 mm de espesor (calibre 6). Las dobladoras de cortina operan de acuerdo con lo indicado en la figura 7.25b, éstas permiten (de acuerdo con los herramientales a disposición) generar perfiles más complejos. En la actualidad existen prensas de CNC.

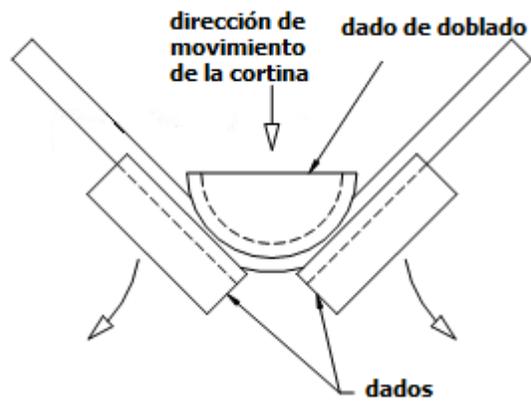
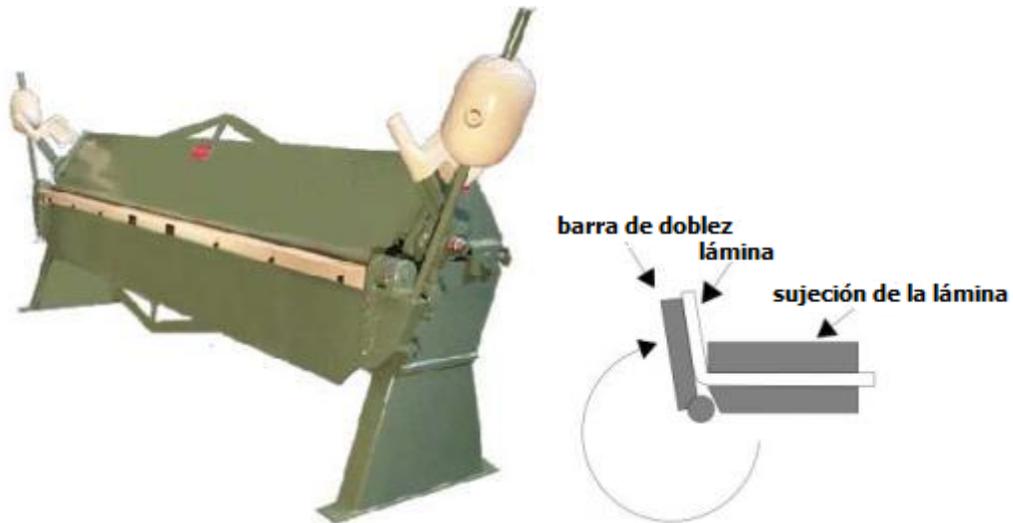


FIGURA 7.24 a) Dobladora de lámina. **b)** Dobladora de cortina. La máquina es CNC electro-hidráulica, puede tener hasta 12 m de longitud de la mesa y 30000 KN de capacidad de carga



FIGURA 7.25 Ejemplos de perfiles obtenidos en la prensa de cortina

ENGARGOLADO. Este método de formado se utiliza en la fabricación de latas de chapa metálica. Consiste en la generación de dobleces en las pestañas de los botes. El engargolado se realiza (figura 7.26) mediante series de pequeños rodillos los cuales doblan y planchan las orillas de tapa y bote logrando con esto una unión sólida y hermética. En general este método de unión se aplica a láminas de pequeño espesor (generalmente menores de un milímetro). Se trata de un proceso rápido y de bajo costo, las cargas aplicadas son función del material y espesor (para acero inoxidable de 1 mm de espesor, dependiendo del tipo de engargolado se demandan menos de 40 ton). Si bien el mejor ejemplo de aplicación del proceso es el ensamble de latas, éste puede ser aplicado simplemente como método de unión entre hojas metálicas.

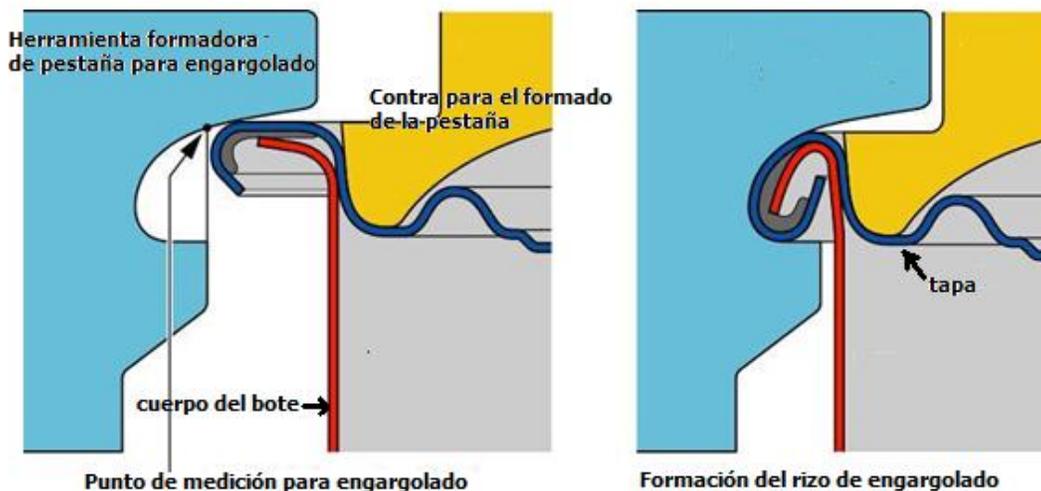


FIGURA 7.26 Etapas en la formación del engargolado para la fabricación de latas

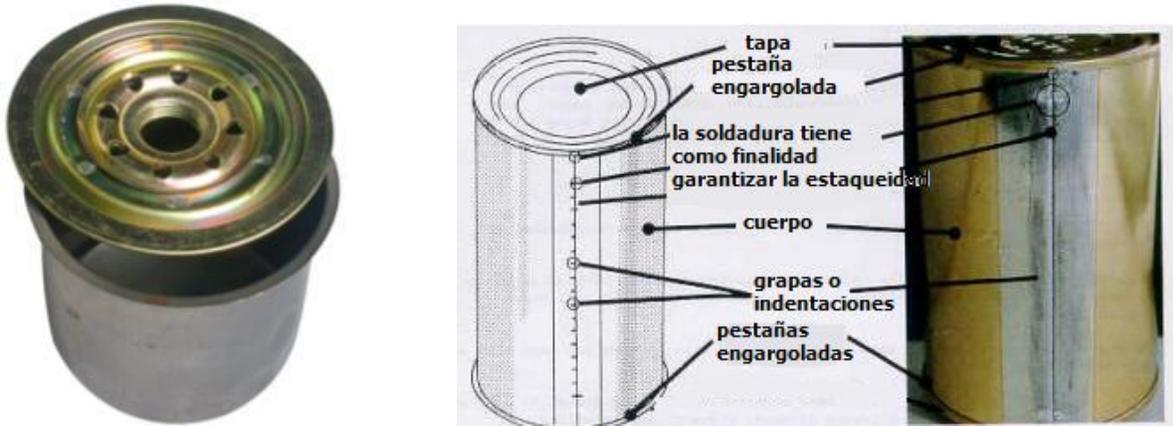


FIGURA 7.27 Ensamble de un filtro de aceite y de una lata de 3 piezas por engargolado

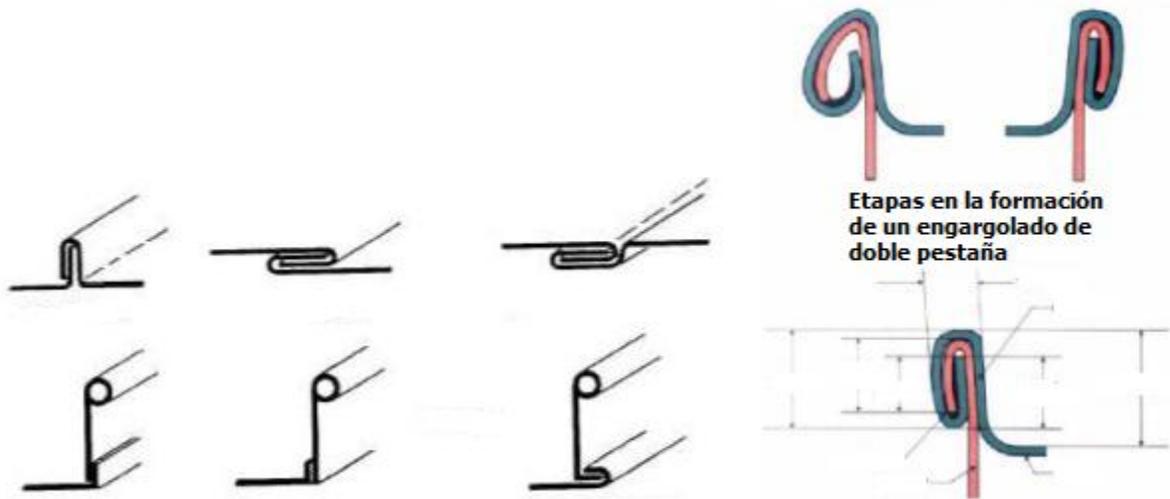


FIGURA 7.28 Diferentes tipos de engargolados



FIGURA 7.29 Diferentes equipos engargoladores para botes

Operaciones de formado mediante corte

TROQUELADO. Esta operación es una de las más comunes en el procesamiento de lámina metálica, permite en general la formación de piezas a partir de chapa o cinta metálica. Desde un punto de vista estricto, el troquelado se refiere al corte del material a partir de una cinta o sección de partida. Sin embargo, en México el término se extiende a diversas actividades que pueden acompañar al corte, esto es doblado, embutido, grabado, marcado, corte parcial; entre otras. En particular, se distingue como troquelado al desprendimiento de un elemento útil a partir de la cinta, mientras que en el punzonado lo que se desprende es desperdicio. En una gran mayoría de las ocasiones no se lleva a efecto una sola operación, sino que para producir una pieza útil se requerirá de la combinación de troquelado, punzonado, embutido, doblado, grabado, los cuales pueden llevarse en diferentes herramientas (a las cuales se denomina como troqueles) teniéndose entonces troqueles simple (figura 7.30) o en su defecto efectuarse en forma secuencial describiendo a éstos como troqueles progresivos (7.31).

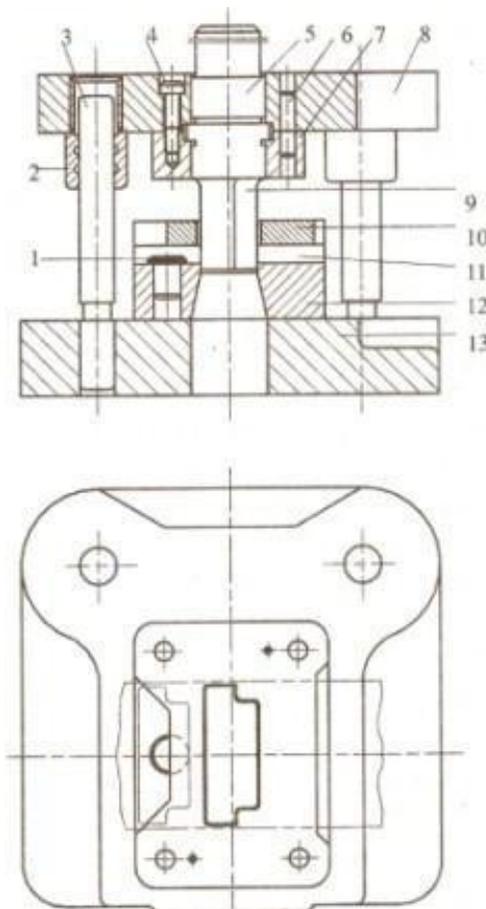


FIGURA 7.30 Troquel simple: 1.Perno de freno o límite, 2. Buje guía, 3. Perno guía, 4. Tornillos de sujeción, 5. Espiga guía, 6. Perno, 7. Placa de fijación, 8 y 13. Porta troquel, 9. Punzón,10. Placa guía, 11. Cinta, 12.matriz

En ocasiones, un troquel puede realizar más de una operación durante la carrera de la prensa; por ejemplo, troquelado y punzonado o troquelado y embutido, a este tipo de troqueles se les denomina como compuestos (7.32). Su gran productividad y reducido costo la vuelven una importante alternativa en la producción de elementos terminados o semiterminados para producción en masa. En el troquelado se logra el corte del metal sin la producción de rebabas, teniéndose que el desperdicio se presentará en la cinta.

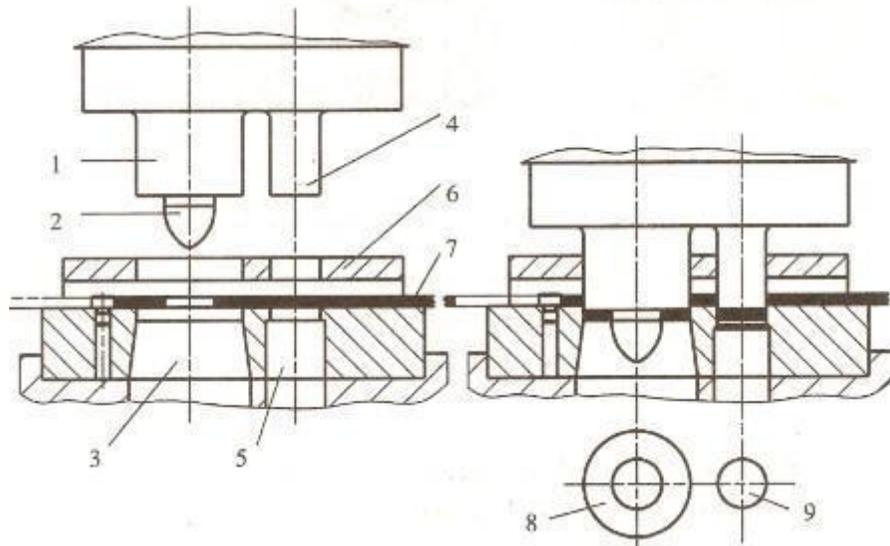


FIGURA 7.31 Troquel progresivo. En este se lleva a efecto una operación calización, 3. matriz de troquelado, 4. herramienta de punzonado, 5. matriz de punzonado, 6. guía, 7. cde punzonado para después proceder al troquelado. 1. punzón de troquelado, 2. perno guía o de lointa, 8. pieza terminada, 9. Desperdicio

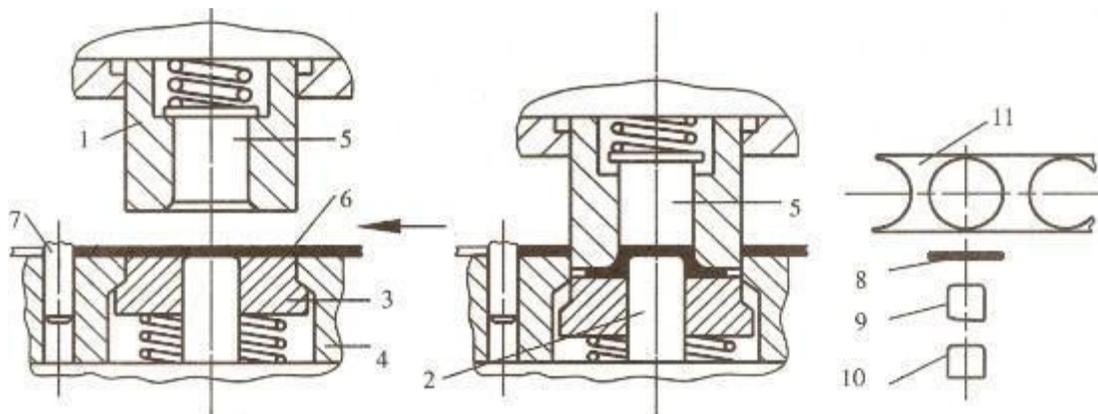


FIGURA 7.32 Operación de un troquel compuesto que corta y embute. 1. Punzón de corte, 2. Punzón de embutido, 3. Placa de soporte, 4. Matriz de corte, 5. Expulsor, 6. Cinta metálica a troquelar, 7. Perno de limitación o freno, 8. Pieza cortada, 9. Pieza ya embutida, 10. Pieza final, 11. Desperdicio o calavera

El diseño de un troquel siempre es una operación compleja cuya solución no es única, tiene como funciones objetivo, desde luego, formar la pieza, optimar el aprovechamiento del material, reducir el costo de la herramienta, facilitar su mantenimiento y su fabricación. La primera etapa del diseño del troquel es la determinación de la secuencia de operaciones, para que, a partir de ésta definir los punzones y sus características, y con ellos, la matriz, para así conceptualizar elementos de soporte y sujeción. Resulta evidente que el uso de las modernas herramientas de CAD es un auxiliar invaluable en el momento de diseñar el troquel; sin embargo, un punto total del proceso sigue siendo la creatividad del diseñador para conceptualizar la forma en que se puede generar la pieza requerida.



FIGURA 7.33 Troquel progresivo de 10 etapas para alta producción. Nótese que las guías ya no emplean bujes sino sistemas antifricción

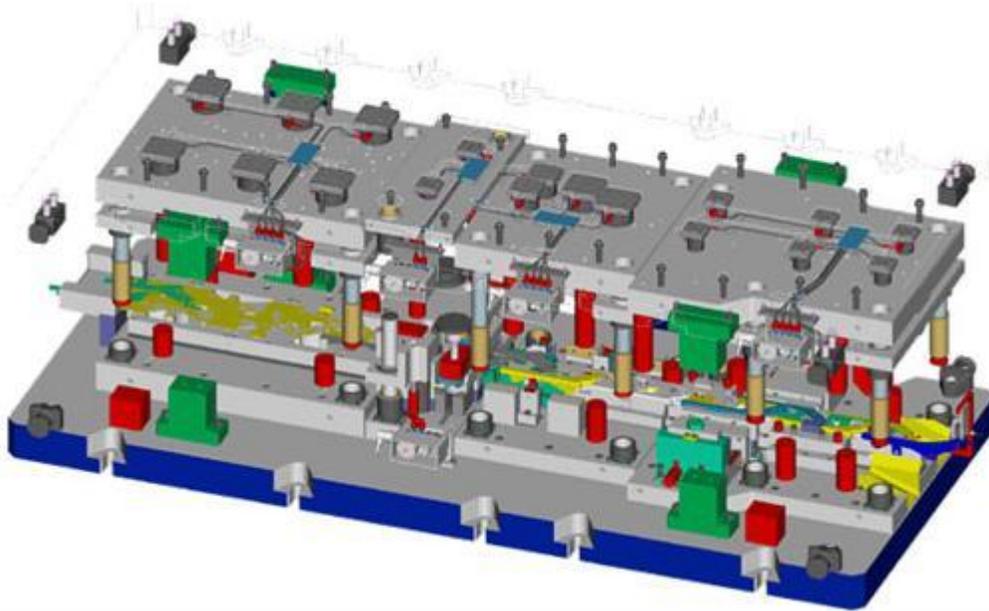


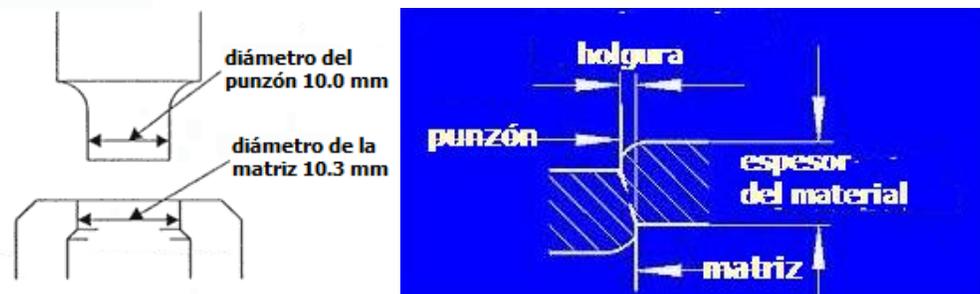
FIGURA 7.34 Dibujo de ensamble de un troquel progresivo

Existen diferencias sensibles entre los diferentes tipos de punzón, un piloto será más largo (se distinguen también por ser redondeados en su extremo) que los punzones de corte, ya que su finalidad es localizar puntos de referencia en la pieza y garantizar alineamiento y posicionamiento de la cinta. Un punzón de embutido tendrá filos redondeados para evitar el desagarramiento o corte de la cinta durante el embutido. Un punzón de troquelado o punzonado presentará filos vivos que en combinación con el filo de la matriz y una holgura h adecuada permitirá realizar el desprendimiento del material sin desgarre ni doblez:

$$h = \frac{D_m - D_p}{2}$$

Para la figura 7.35 la holgura es de 0.15 mm, que dependerá del material y de su espesor y propiedades; si es adecuada se logrará un corte sin desgarres o rebabas. Ésta será $h = 0.045t - 0.05t$ para metales suaves, $h = 0.06t$ para aluminio duro y acero suave, y de $h = 0.08t - 0.1t$ para metales duros, donde t es el espesor del material.

La carga de corte $f_t = \tau_m t l = 0.7 l t \sigma_m$, donde l es el perímetro de la pieza y τ_m es el cortante máximo del material y σ_m es la resistencia máxima a tracción. Considerando la fricción y las heterogeneidades, la carga de la prensa $f_p = 1.3 f_t$.



holguras recomendadas						
calibre	aluminio (25 KSI)		acero al carbono (50 KSI)		acero inoxidable (100 KSI)	
	espesor	holgura	espesor	holgura	espesor	holgura
20	0.032	0.006	0.036	0.008	0.038	0.008
18	0.040	0.006	0.048	0.010	0.050	0.010
16	0.051	0.008	0.060	0.012	0.063	0.016
14	0.064	0.010	0.075	0.016	0.078	0.020
12	0.081	0.012	0.105	0.022	0.109	0.028
10	0.102	0.020	0.135	0.034	0.141	0.042

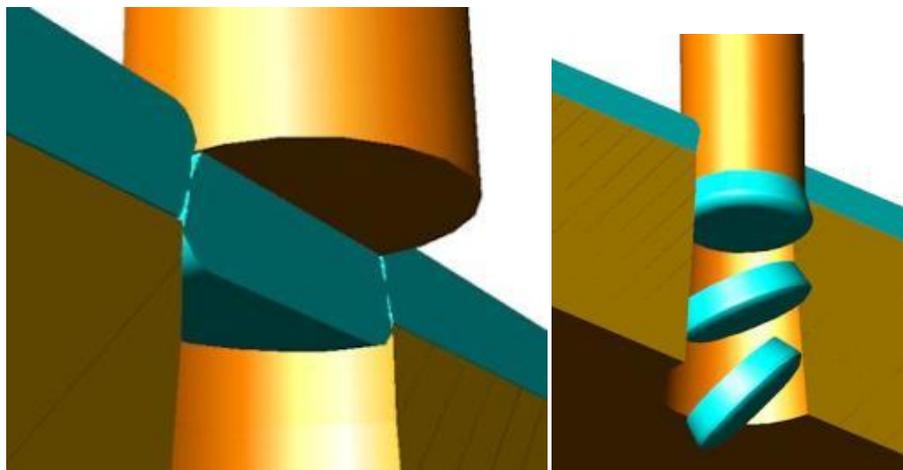


FIGURA 7.35 Holgura entre matriz y punzón

Si la operación es de troquelado la medida se da a la matriz y la holgura se aplica al punzón mientras que si se trata de un punzonado la holgura se aplica al definir las dimensiones de la matriz.

El diseño de un troquel es una operación que demanda creatividad y experiencia. Un buen diseño permitirá máximo aprovechamiento de la cinta y de la máquina, mínimas cargas, menores demandas de mantenimiento y mayor duración de la herramienta. Partiendo de lo antes expuesto Vukota Boljanovic [V. Boljanovic , J.R. Paquin, 2006] proponen 14 etapas para el diseño:

- Definición del aspecto de la cinta. El primer paso en el diseño es desarrollar las etapas de proceso de la pieza vistas sobre la cinta (figura 7.33).
- Desarrollo de la matriz. Se dibujan las tres vistas de la matriz en conjunto con la cinta.
- Desarrollo de los punzones. Los punzones de troquelado son dibujados por encima de la matriz.
- Desarrollo de los punzones de punzonado. Se procede ahora a su dibujo en su posición de operación.
- Se procede a dibujar la placa de sujeción de los punzones.
- Diseño de los pilotos. Se dibujan los pernos piloto.
- Se dibujan espaciadores y guías.
- Se dibujan los pernos de límite.
- Se dibujan los pernos de freno o parada.
- Se dibujan los separadores.
- Se dibujan los elementos de sujeción (tornillos, pernos, etc.) de ensamble del troquel.
- Se selecciona el portatroquel y se dibuja el ensamble de los diferentes elementos en éste.
- Se procede a elaborar el dibujo de fabricación ya con sus dimensiones.
- Se listan los materiales requeridos (con sus especificaciones) para la construcción del troquel.

Operaciones de doblado

Una de las operaciones más comúnmente realizadas sobre lámina metálica es su doblado (figura 7.36), para lo cual es necesario aplicar un momento flector que supere la resistencia a la deformación plástica del metal.

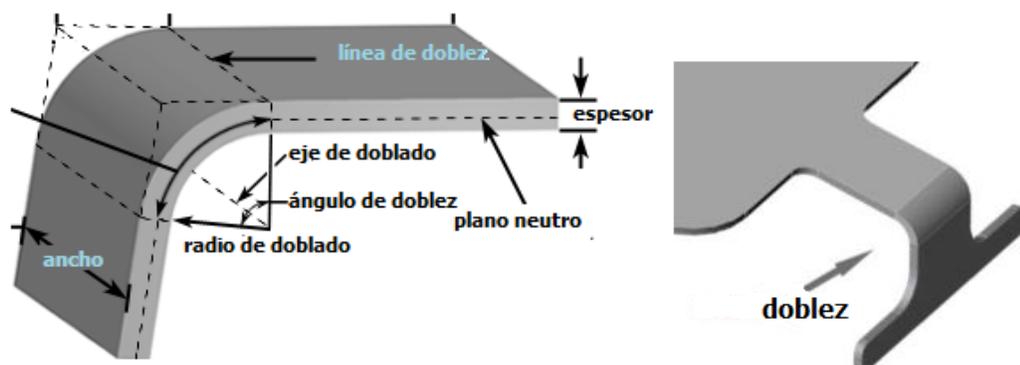


FIGURA 7.36 Descripción esquemática del proceso de doblado de cinta

El momento flector requerido para una cinta de espesor t y ancho b de un material con límite de cedencia σ_0 y radio al eje neutro r_n , está dado por:

$$M = \frac{\sigma_0 b}{12} \left(3t^2 - \left(\frac{2\sigma_0 r_n}{E} \right)^2 \right)$$

mientras que la fuerza requerida para formar una pieza como en la figura 7.36 es

$$f_d = \frac{M}{L} L + \text{sen } \phi$$

donde

ϕ es el ángulo de doblez

L es aproximadamente $L = t + \frac{d}{2} + r_d$

r_d es el radio interior de doblado

E es el módulo de elasticidad

En el rolado (figura 7.37) la carga está dada por

$$f = \sigma_0 \frac{b}{D-t} \left[t^2 - \frac{\sigma_0 D-t^2}{3E} \right] \text{ctg } \frac{\varphi}{2}$$

D es el diámetro exterior de rolado y $\varphi = 2 \text{sen}^{-1} \frac{l_r}{D+d}$, l_r es la distancia entre los rodillos inferiores y d es el diámetro de dichos rodillos.

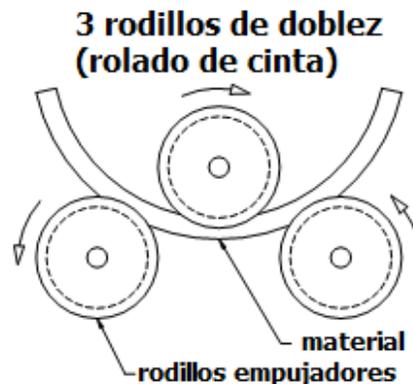


FIGURA 7.37 Rolado de lámina o placa

Operaciones de embutido

Como ya ha sido mencionado el embutido es una de las operaciones con lámina más comunes, en ésta se producen cuerpos huecos a partir de la cinta metálica. Para esto se dispone de una matriz y de un punzón que empuja el material al interior de la matriz. Para evitar la formación de arrugas se tiene un pisador que permite el deslizamiento del material hacia la cavidad sin generar estirado en éste (figura 7.38).

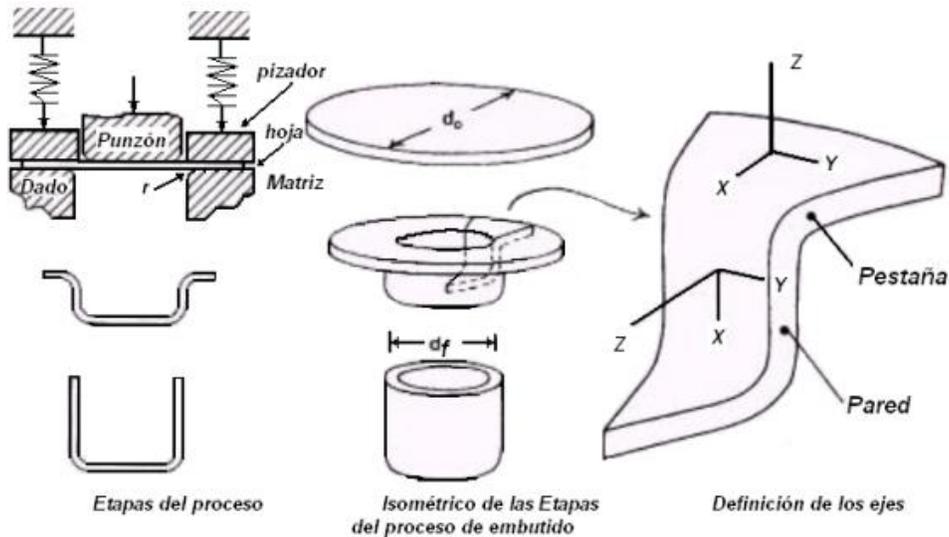


FIGURA 7.38 Etapas en la operación de embutido

Para la determinación de la carga y sollicitaciones a las que se encuentra el material, observa el modelo de la figura 7.38. Este modelo considera un material rígido plástico sin endurecimiento y que no existe fricción del material con las herramientas.

Para evaluar el proceso (intensidad de la deformación), se define el cociente de límite de estirado $LDR = \frac{d_0}{d_f}$, el cual para un material en particular puede referir a la máxima relación de diámetro inicial a final.

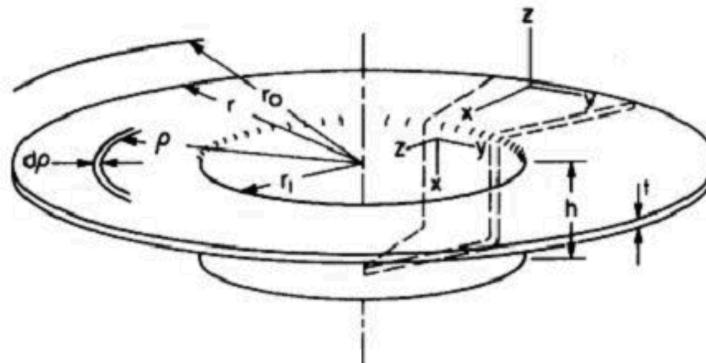


FIGURA 7.39 Análisis de la carga de embutido

Para el análisis se considera que la superficie total del material permanece inalterada, esto es el espesor antes y después del proceso será constante.

$$\begin{aligned}\sum A_f &= A_0 \\ \pi\rho^2 + 2\pi r_f h &= \pi\rho_0^2 \\ 2\pi\rho d\rho + 2\pi r_f dh &= 0 \\ d\rho &= -\frac{2\pi r_f dh}{2\pi\rho} \\ d\rho &= -\frac{r_f dh}{\rho}\end{aligned}$$

Por su parte $\varepsilon_{xx}, \varepsilon_{yy} \neq 0, \varepsilon_{zz} = 0$ para una deformación plástica $\varepsilon_{xx} + \varepsilon_{yy} + \varepsilon_{zz} = 0$

$$d\varepsilon_{yy} = \frac{d\rho}{\rho}$$

Como el eje z corresponde con el espesor y se considera que sobre éste no hay cambio.

$$\begin{aligned}d\varepsilon_{zz} &= 0 \\ d\varepsilon_{xx} + d\varepsilon_{yy} &= 0 \\ d\varepsilon_{xx} &= -d\varepsilon_{yy}\end{aligned}$$

La circunferencia es $2\pi\rho$, por lo tanto

$$d\varepsilon_y = \frac{d\rho}{\rho}$$

y como $d\varepsilon_x = -d\varepsilon_y = \frac{r_f dh}{\rho^2}$

donde r_f es el radio del punzón, por otra parte,

$$\int dW = \int \sigma_{ij} d\varepsilon_{ij}$$

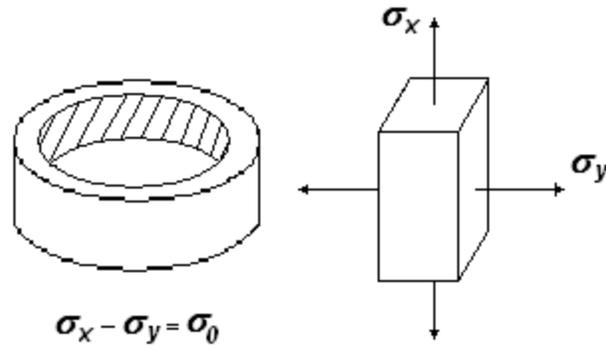
considerando que $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$ representan valores principales

$$W = \sigma_x r_f \frac{dh}{\rho^2} dV - \sigma_y r_f \frac{dh}{\rho^2} + \sigma_z \varepsilon_z$$

ya que $\varepsilon_z = 0$

$$dW = ((\sigma_x - \sigma_y) r_f \frac{dh}{\rho^2}) dV$$

Considerando criterio de fluencia

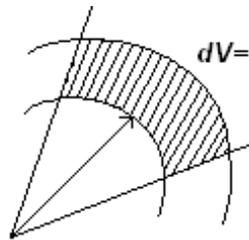


$$dW = \sigma'_0 dV r_f \frac{dh}{\rho^2}$$

Lo cual se puede presentar como:

$$\frac{\partial W}{\partial h} = \sigma'_0 dV \frac{r_f}{\rho^2} \Rightarrow \int_V \sigma'_0 \frac{r_f}{\rho^2} dV = \int_0^{2\pi} \int_{r_f}^{r_0} \frac{\sigma'_0 r_f t \rho d\alpha d\rho}{\rho^2}$$

$$dV = t \rho d\rho d\alpha$$



$$dW = f dh$$

$$\Rightarrow \frac{\partial W}{\partial h} = f$$

$$\therefore \frac{\partial W}{\partial h} = 2\pi \sigma'_0 r_f t \ln \frac{r_0}{r_f}$$

de todo lo expuesto se tiene que la carga de embutido está dada por:

$$f_{emb} = \sigma'_0 2\pi r_f t \ln \frac{r_0}{r_f}$$

$$A_{emb} = 2\pi r_f t$$

a partir de lo anterior se puede definir el esfuerzo de embutido por:

$$\sigma_{emb} = \frac{f_{emb}}{A_{emb}} = \sigma'_0 \text{Ln} \frac{r_0}{r_f}$$

Para que no se presente adelgazamiento $\sigma_{emb} \leq \sigma_0$

La deformabilidad se define como el límite de embutido (*LDR*), el cual representa al cociente máximo de deformación

$$LDR = \frac{\phi_0}{\phi_f}$$

$$\sigma_{emb} = \sigma'_0 \text{Ln} \frac{\phi_0}{\phi_f} = \frac{2}{\sqrt{3}} \sigma_0 \text{Ln} \frac{\phi_0}{\phi_f} \Rightarrow \sigma_0 \geq \frac{2}{\sqrt{3}} \sigma_0 \text{Ln} \frac{\phi_0}{\phi_f}$$

Considerando la condición de igualdad

$$\sigma_0 = \frac{2}{\sqrt{3}} \sigma_0 \text{Ln} \frac{\phi_0}{\phi_f}$$

$$\frac{\sqrt{3}}{2} = \text{Ln} \left(\frac{\phi_0}{\phi_f} \right)$$

$$\frac{\phi_0}{\phi_f} = \exp \left[\frac{\sqrt{3}}{2} \right]$$

$$\frac{\phi_0}{\phi_f} = 2.38$$

Aunque en la práctica el valor de la deformabilidad límite se restringe a:

$$LDR \approx 2.1 \text{ a } 2.2$$

Esto debido a la fricción y flexión que se presentan durante el proceso, otros autores [Vukota Boljanovic, 2004] indican que la fuerza de embutido se puede determinar como

$$f_{emb} = \sigma_1 2\pi r_f t$$

$$\sigma_1 = e^{\frac{\mu\pi}{2}} \left[1.1\sigma_0 \ln \frac{r_0}{r_f} + \frac{2\mu f_p}{\pi r_f t} \right] + \sigma_0 \frac{t}{t + 2r_e}$$

donde

μ es la fricción entre material y herramienta

\bar{r}_f es el radio medio de la pieza embutida

f_p es la fuerza aplicada por el pisador

r_e es el radio de la esquina (borde) del punzón

En términos generales el coeficiente de fricción cuando se lubrican las herramientas está entre 0.06 y 0.16 (acero, aluminio); mientras que en superficies sin lubricación, éste puede alcanzar de 0.18 a 0.35 (acero, aluminio).

DEFECTOS Y PROBLEMAS EN EL EMBUTIDO. Durante el embutido interactúan una serie de factores tales como la fricción, la carga del pisador, propiedades del material (resistencia, formabilidad, anisotropía, etc) que pueden dar como resultado la obtención de una pieza sana o defectuosa.

HOLGURA. Si la pieza se fractura durante la operación, esto se puede deber a un radio de herramientas (dado y matriz) demasiado pequeño o a que la holgura está por debajo de lo recomendado; todo esto se traduce en un estirado del material y su posterior desagarramiento.

PRESIÓN DEL PISADOR. Si la presión aplicada es muy elevada o el coeficiente de fricción se incrementa sensiblemente se puede dar lugar a la fractura de la lámina durante su embutido. La presión del pisador se puede calcular como

$$p_p = 0.25 \left[\left(\frac{r_0}{r_f} - 1 \right)^3 + \frac{r_{fi}}{200t} \right] \sigma_m$$

donde

r_{fi} es el radio interior de la pieza embutida.

La carga del pisador es

$$f_p = \frac{\pi}{4} \left[2r_0^2 - 2r_{fi}^2 + 2r_e^2 \right] p_p$$

RADIOS DE LAS HERRAMIENTAS. El radio del borde del punzón al igual que el de la matriz son muy importantes, ya que si son muy pequeños se puede producir fracturas al deslizar el material sobre éstos. Asimismo se pueden producir marcas o rallones durante la operación. Si

la presión del pisador es muy pequeña o si el radio del borde de las herramientas es muy grande, se puede dar lugar a la aparición de arrugas y por consecuencia marcas en la pieza embutida.

LUBRICACIÓN. Como ya ha sido mencionado, ésta afecta tanto la capacidad de obtener una pieza bien embutida, como también puede ser causa de incrementos en la carga, presencia de marcas longitudinales y fractura del material; en cada caso se debe de revisar el lubricante más adecuado para el material [acero-aceites minerales, aluminio-aceites grasos sulfurados, parafinas, aceites minerales, aceros inoxidables-aceites de maíz, grafito, entre otros].

OPERACIÓN DE GRABADO. Es muy común que las piezas requieran de algún grabado. Para esto es necesario garantizar la deformación superficial del material y la carga necesaria se puede aproximar si se considera un proceso de indentación. Analizando como tal el proceso se llega a determinar (considerando material rígido-plástico sin endurecimiento y deformación plana), que para el caso de que no exista fricción

$$\frac{\bar{P}_{ind}}{2k} = 2.886$$

Mientras que para el caso de fricción sin deslizamiento

$$\frac{\bar{P}_{ind}}{2k} = 3.175$$

donde k representa al cortante crítico.

Lo antes expuesto indica que la presión necesaria para el grabado superficial de la lámina es del orden de tres veces el esfuerzo de cedencia del material.

En páginas anteriores se mencionó al acuñado, éste es un proceso de grabado por efecto de la deformación plástica que sufre el metal al ser sometido a una carga de compresión que genera esfuerzos superiores al de cedencia, lo que se traduce en un endurecimiento superficial, conservando el resto del material su tenacidad y propiedades, si bien se le relaciona con el grabado de las monedas y medallas, en general, este proceso permite producir piezas con tolerancias muy precisas y excelentes acabados. Donde la presión requerida para la deformación es del orden de $3\sigma_0$.