

3.2.4. ESTIRADO DE ALAMBRES Y BARRAS

En el contexto de los procesos de deformación volumétrica, el estirado es una operación donde la sección transversal de una barra, varilla o alambre se reduce al tirar del material a través de la abertura de un dado como se muestra en la figura 3.46. Las características generales del proceso son similares a la extrusión, la diferencia es que en el estirado el material de trabajo se jala a través del dado, mientras que en la extrusión se empuja a través del dado. Aunque la presencia de esfuerzos de tensión es obvia en el estirado, la compresión también juega un papel importante ya que el metal se comprime al pasar a través de la abertura del dado. Por esta razón, la deformación que ocurre en estirado se llama algunas veces compresión indirecta.

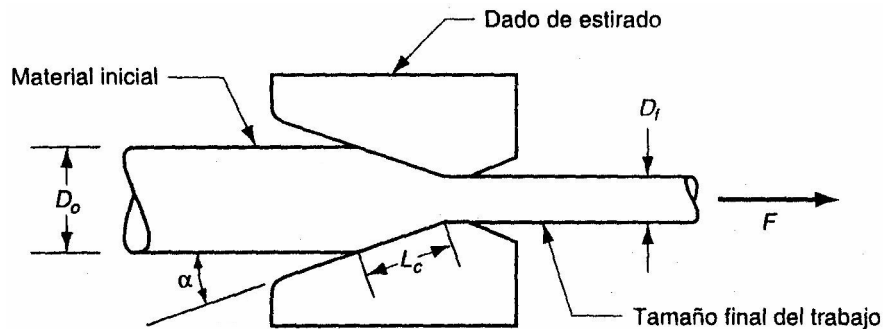


FIGURA 3.46 Estirado de barras, varillas o alambre.

La diferencia básica entre el estirado de barras y el estirado de alambre es el diámetro del material que se procesa. El *estirado de barras* se refiere al material de diámetro grande, mientras que el *estirado de alambre* se aplica al material de diámetro pequeño. En el proceso de estirado de alambres se pueden alcanzar diámetros hasta de 0.03 mm. Aunque la mecánica del proceso es la misma para los dos casos, el equipo y la terminología son de alguna manera diferentes.

El estirado de barras se realiza generalmente como una operación de estirado simple, en la cual el material se jala a través de la abertura del dado. Debido a que el material inicial tiene un diámetro grande, su forma es más bien una pieza recta que enrollada. Esto limita la longitud del trabajo que puede procesarse y es necesaria una operación tipo lote. Por el contrario, el alambre se estira a partir de rollos de alambre que miden varios cientos (o miles) de metros de longitud y pasa a través de una serie de dados de estirado. El número de dados varía entre cuatro y doce. El término estirado continuo (en inglés, continuous drawing) se usa para describir este tipo de operación, debido a las grandes corridas de producción que pueden realizarse con los rollos de alambre, ya que pueden soldarse a tope con el siguiente rollo para hacer la operación verdaderamente continua.

En una operación de estirado, la modificación en el diámetro del material de trabajo se da generalmente por la reducción de área definida como sigue:

$$r = \frac{A_o - A_f}{A_o} \quad (3.33)$$

Donde

r = reducción de área en el estirado

A_o = área original del trabajo, (mm²)

A_f = área final, (mm²).

La reducción de área se expresa frecuentemente como un porcentaje.

En el estirado de barras, estirado de varillas y en el estirado de alambre de diámetro grande para operaciones de recalado y forjado de cabezas se usa el término *draft* para denotar la diferencia de tamaños antes y después de procesar el material de trabajo, El *draft* es simplemente la diferencia entre el diámetro original y final del material:

$$d = D_o - D_f \quad (3.34)$$

Donde

d = draft, (mm)

D_o = diámetro original del trabajo. (mm)

D_f = diámetro final del trabajo, (mm).

3.2.4.1. Análisis del estirado

En esta sección revisaremos la mecánica del estirado de alambres y barras, y el cálculo de esfuerzos y fuerzas en el proceso. Consideraremos también la posibilidad de grandes reducciones en las operaciones de estirado.

Mecánica del estirado Si no ocurre fricción o trabajo redundante en el estirado la deformación real puede determinarse como sigue:

$$\varepsilon = \ln \frac{A_o}{A_f} = \ln \frac{1}{1-r} \quad (3.35)$$

Donde

A_o y A_f son las áreas original y final de la sección transversal del material de trabajo, como se definieron previamente; y r = reducción del estirado, definida en la ecuación 3.33.

El esfuerzo que resulta de esta deformación ideal está dado por:

$$\sigma = \bar{Y}_f \varepsilon = \bar{Y}_f \ln \frac{A_o}{A_f} \quad (3.36)$$

Donde

Y_f = esfuerzo de fluencia promedio, basado en el valor de la deformación de la ecuación 3.35

Debido a que la fricción está presente en el estirado y aunque el metal de trabajo experimenta deformación no homogénea el verdadero esfuerzo es más grande que el proporcionado por la ecuación 3.36. Además de la relación A_o/A_f , otras variables que tienen influencia en el esfuerzo del estirado son el ángulo del dado y el coeficiente de fricción en la interfase trabajo-dado. Se han propuesto numerosos métodos para predecir el esfuerzo de estirado con base en los valores de estos parámetros [1, 2, 3 y 6]. Presentamos a continuación la ecuación sugerida por Schey [3]:

$$\sigma_d = \bar{Y}_f \left(1 + \frac{\mu}{\tan \alpha} \right) \phi \ln \frac{A_o}{A_f} \quad (3.37)$$

Donde

σ_d = esfuerzo de estirado (MPa);

μ = coeficiente de fricción dado-trabajo;

α = ángulo del dado (medio ángulo) como se define en la figura 3.46,

ϕ = es un factor que se usa para deformación no homogénea el cual se determina para una sección transversal redonda como:

$$\phi = 0.88 + 0.12 \frac{D}{L_c} \quad (3.38)$$

Donde

D = diámetro promedio del material de trabajo durante el estirado, (mm)

L = longitud de contacto del material de trabajo con el dado de estirado en la figura 3.46 (mm). Los valores de D y L , se pueden determinar de las siguientes ecuaciones:

$$D = \frac{D_o + D_f}{2} \quad (3.39a)$$

$$L_c = \frac{D_o - D_f}{2 \cdot \text{sen} \alpha} \quad (3.39b)$$

La fuerza correspondiente al estirado es entonces, el área de la sección transversal del material estirado multiplicada por el esfuerzo de estirado:

$$F = A_f \sigma_d = A_f \bar{Y}_f \left(1 + \frac{\mu}{\tan \alpha} \right) \phi \ln \frac{A_o}{A_f} \quad (3.40)$$

Donde

F = fuerza de estirado, (N); los otros términos se definieron previamente.

La potencia requerida en una operación de estirado es la fuerza multiplicada por la velocidad de salida del trabajo.

EJEMPLO 3.4 Esfuerzo y fuerzas en el estirado de alambre

Un alambre se estira a través de un dado con un ángulo de entrada = 15°. El diámetro inicial es 2.5 mm y el diámetro final es 2 mm. El coeficiente de fricción en la interfase trabajo-dado es 0.07. El metal tiene un coeficiente de resistencia $K = 207 \text{ MPa}$ y un exponente de endurecimiento por deformación $n = 0.20$. Determine el esfuerzo de estirado y la fuerza de estirado en esta operación.

Solución: Los valores de D y L_c para la ecuación 3.38 se pueden determinar usando las ecuaciones 3.39

$$D = \frac{D_o + D_f}{2} = \frac{2.5 - 2}{2} = 0.25 \text{ mm}$$

$$L_c = \frac{D_o - D_f}{2 \cdot \text{sen } \alpha} = \frac{2.5 - 2}{2 \cdot \text{sen} 15^\circ} = 0.9659 \text{ mm}$$

Entonces:

$$\phi = 0.88 + 0.12 \frac{D}{L_c} = 0.88 + 0.12 \frac{0.25}{0.9659} = 0.9111$$

Se calculan las áreas respectivas antes y después del estirado y se obtienen:

$$A_o = \frac{\pi D_o^2}{4} = \frac{\pi \cdot (2.5)^2}{4} = 4.91 \text{ mm}^2$$

$$A_f = \frac{\pi D_f^2}{4} = \frac{\pi \cdot (2.0)^2}{4} = 3.14 \text{ mm}^2$$

La deformación real resultante ecuación 3.35

$$\varepsilon = \ln \frac{A_o}{A_f} = \ln \frac{4.91}{3.14} = 0.4470$$

El esfuerzo de fluencia promedio en la operación se calcula ecuación 3.12:

$$\bar{Y}_f = \frac{k \varepsilon^n}{1+n} = \frac{207 \times 10^6 \cdot 0.4470^{0.2}}{1+0.2} = 146842105.8 \text{ Pa}$$

El esfuerzo de estirado está dado por la ecuación 3.37:

$$\sigma_d = \bar{Y}_f \left(1 + \frac{\mu}{\tan \alpha} \right) \phi \ln \frac{A_o}{A_f} = 146842105.8 \cdot \left(1 + \frac{0.07}{\tan 15^\circ} \right) \cdot 0.9111 \cdot 0.4470 = 75426357.32 \text{ Pa}$$

Finalmente, la fuerza de estirado es el esfuerzo multiplicado por el área de la sección transversal del alambre de salida:

$$F = \sigma_d A_f = 75426357 \cdot 3.14 \times 10^{-6} = 236.83 \text{ N}$$

Reducción máxima por pase Una pregunta que se le puede ocurrir al lector es ¿por qué se necesita más de un paso para alcanzar la reducción deseada en el estirado de alambre?, ¿por qué no se hace la reducción entera en un solo paso como se hace en la extrusión? La respuesta es clara, de las ecuaciones precedentes, si la reducción se incrementa, también los esfuerzos de estirado aumentan. Si la reducción es lo suficientemente grande, los esfuerzos de estirado excederían la resistencia a la fluencia del material que sale. Cuando esto pasa, el alambre estirado simplemente se alarga, en lugar de

que el nuevo material se comprima a través de la abertura del dado. Para que el estirado de alambre sea exitoso, el esfuerzo máximo de estirado debe ser menor que el esfuerzo de fluencia del material que sale.

Es fácil determinar este esfuerzo de estirado máximo y la posible reducción máxima que puede hacerse en un paso bajo ciertas suposiciones. Supongamos un metal perfectamente plástico ($n = 0$), sin fricción y sin trabajo redundante. En este caso ideal, el esfuerzo de estirado máximo posible es igual a la resistencia a la fluencia del material de trabajo. Si expresamos esto usando la ecuación para el esfuerzo de estirado bajo condiciones de deformación ideal, ecuación 3.36, e igualamos $Y_f = Y$ (porque $n = 0$):

$$\sigma_d = \bar{Y}_f \ln \frac{A_o}{A_f} = Y \ln \frac{A_o}{A_f} = Y \ln \frac{1}{1-r} = Y$$

Esto significa que $\ln (A_o/A_f) = \ln (1/1-r) = 1$. Entonces $A_o/A_f = 1/1-r$ deben ser igual a los logaritmos naturales base e . Es decir, la deformación máxima posible es 1:

$$\varepsilon_{\max} = 1 \quad (3.41a)$$

La relación máxima posible (le área está dada por:

$$\frac{A_o}{A_f} = e = 2.7183 \quad (3.41b)$$

y la reducción máxima posible es:

$$r_{\max} = \frac{e-1}{e} = 0.632 \quad (3.41c)$$

El valor dado por la ecuación 3.41(c) se usa frecuentemente como la reducción teórica máxima posible en un solo paso, aun cuando éste ignora: 1) los efectos de fricción y del trabajo redundante que podrían reducir el valor máximo, 2) el endurecimiento por deformación que podría incrementar la reducción máxima posible, debido a que el alambre a la salida podría ser más resistente que el metal inicial. En la práctica, las reducciones por paso están muy por debajo de los límites teóricos. Los límites superiores en la práctica industrial parecen ser reducciones de 0.50 para estirado simple de barras y 0.30 para estirado múltiple de alambre

3.2.4.2. Práctica del estirado

El estirado se realiza generalmente como una operación de trabajo en frío. Se usa más frecuentemente para producir secciones redondas, pero también se pueden estirar secciones cuadradas y de otras formas. El estirado de alambre es un proceso industrial importante que provee productos comerciales como cables y alambres eléctricos; alambre para cercas, etc.; varillas para producir clavos,

tornillos, remaches resortes y otros artículos de ferretería. El estirado de barras se usa para producir barras de metal para maquinado y para otros procesos.

Las ventajas del estirado en estas aplicaciones incluyen: 1) estrecho control dimensional, 2) buen acabado de la superficie, 3) propiedades mecánicas mejoradas, como resistencia y dureza, 4) adaptabilidad para producción económica en masa o en lotes. Las velocidades de estirado son tan altas como 50 m/s para alambre muy fino. En el caso del estirado de barras se produce material para maquinado, la operación mejora la maquinabilidad de las barras.

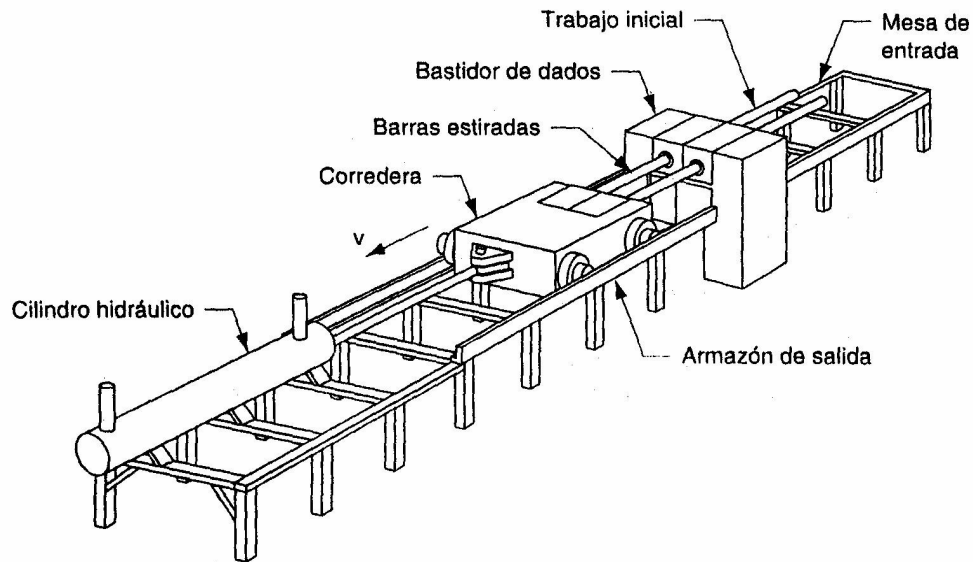


FIGURA 3.47 Banco de estirado operado hidráulicamente para estirado de barras metálicas.

Equipo de estirado El estirado de barras se realiza en una máquina llamada banco de estirado que consiste en una mesa de entrada, un bastidor para dado (que contiene el dado de estirado), la corredera y el armazón de salida, El arreglo se muestra en la figura 3.47. La corredera se usa para jalar el material a través del dado de estirado. Está accionado por cilindros hidráulicos o cadenas movidas por un motor. El bastidor del dado se diseña frecuentemente para contener más de un dado, de manera que se puedan estirar varias barras simultáneamente a través de los respectivos dados.

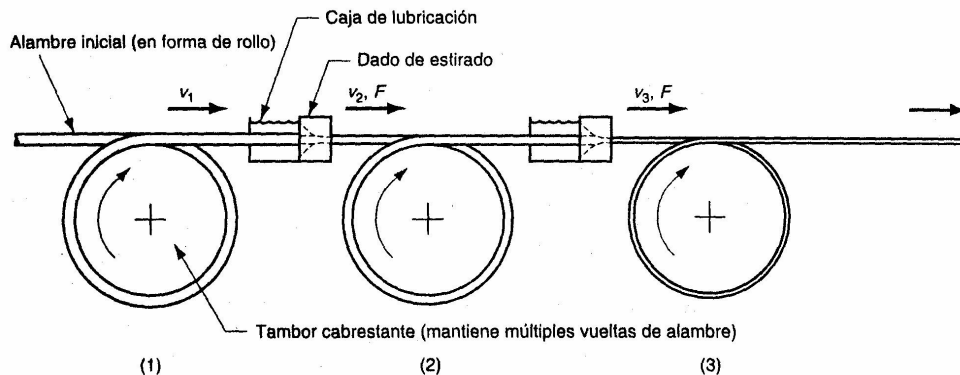


FIGURA 3.48 Estirado continuo de alambre,

El estirado del alambre se hace con máquinas estiradoras continuas que contienen múltiples dados de estirado separados por tambores de acumulación, como se ilustra en la figura 3.48. Cada tambor, llamado *cabestrante o molinete*, es movido por un motor que provee la fuerza apropiada para estirar el alambre a través del dado correspondiente. También mantiene una tensión regular en el alambre que pasa al siguiente dado de estirado. Cada dado realiza una cierta reducción en el alambre, y así se alcanza la reducción total deseada. Algunas veces se requiere recocido del alambre entre los grupos de dados, dependiendo del metal que se procesa y de la reducción total que se realiza.

Dados de estirado La figura 3.49 identifica las características de un dado típico de estirado. Las cuatro regiones del dado que se pueden distinguir son las siguientes: 1) entrada, 2) ángulo de aproximación, 3) superficie del cojinete (campo), 4) relevo de salida. La región de *entrada* es generalmente una abertura en forma de campana que no entra en contacto con el material de trabajo. Su propósito es hacer un embudo lubricante en el dado y prevenir el rayado en la superficie del material de trabajo. La *aproximación* es donde ocurre el proceso de estirado. Es una abertura en forma de cono con un ángulo (medio ángulo) que fluctúa normalmente de 6° a 20° . El ángulo correcto varía de acuerdo al material de trabajo. La *superficie del cojinete o campo* determina el tamaño final del material estirado. Finalmente el *relevo de salida* es la última zona. Se provee con un relevo hacia atrás con un ángulo de 30° . Los dados de estirado se hacen de acero de herramienta o carburo cementado. Los dados para alta velocidad en las operaciones de estirado de alambre usan frecuentemente insertos hechos de diamante (sintético o natural) para las superficies de desgaste.

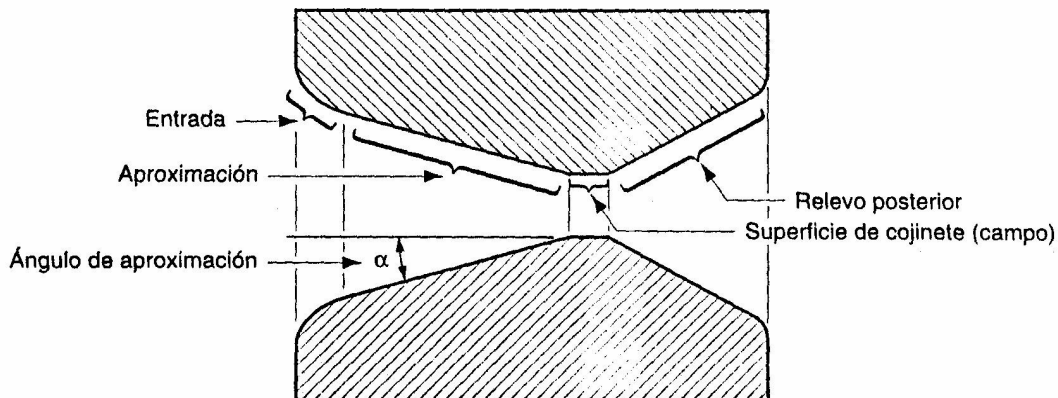


FIGURA 3.49 Dado de estirado para barras redondas o alambre.

Preparación del material de trabajo Antes del estirado, el material inicial debe prepararse adecuadamente. Esto involucra tres pasos: 1) recocido, 2) limpieza y 3) afilado. El propósito del *recocido* es incrementar la ductilidad del material para aceptar la deformación durante el estirado. Algunas veces se necesitan pasos de recocido en el estirado continuo. La *limpieza* del material se requiere para prevenir daños en la superficie del material de trabajo y en el dado de estirado. Esto involucra la remoción de los contaminantes de la superficie (por ejemplo, capas de óxido y corrosión) por medio de baños químicos o limpieza con chorro de municiones. En algunos casos se prelubrica la superficie de trabajo después de la limpieza. El *afilado* implica la reducción del diámetro del extremo inicial del material de manera que pueda

insertarse a través del dado de estirado para iniciar el proceso, esto se logra generalmente mediante estampado, laminado o torneado. El extremo afilado del material se sujeta a las mordazas de la corredera o a otros dispositivos para iniciar el proceso de estirado.

3.2.4.3. Estirado de tubos

El proceso de estirado se puede usar para reducir el diámetro o el espesor de la pared de tubos sin costura y caños, después que se ha producido el tubo inicial por medio de alguna otra operación como extrusión. El estirado del tubo se puede llevar a cabo con o sin un mandril. El método más simple no usa mandril y se aplica para la reducción del diámetro como se muestra en la figura 3.50. Algunas veces se usa el término entallado de tubo para esta operación.

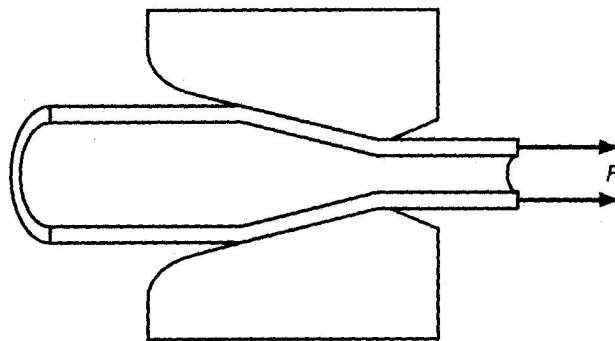


FIGURA 3.50 Estirado de tubos sin mandril (entallado de tubos).

El problema que surge cuando el tubo se estira sin utilizar un mandril, como se muestra en la figura 3.50, es que carece de control sobre el diámetro interno y sobre el espesor de la pared del tubo. Por esto se usan mandriles de varios tipos, dos de los cuales se ilustran en la figura 3.51. En la parte (a) de la figura se usa un mandril fijo ajustado a un barra de soporte largo para fijar el diámetro interior y el espesor de la pared del tubo durante la operación. Las limitaciones prácticas sobre la longitud de la barra de soporte en este método restringen la longitud de los tubos que pueden estirarse. El segundo tipo que se muestra en la parte (b) usa un tapón flotante cuya forma se diseña de manera que encuentre su posición natural en la zona de reducción del dado. Este método evita las limitaciones sobre la longitud de trabajo que presenta el método del mandril fijo.

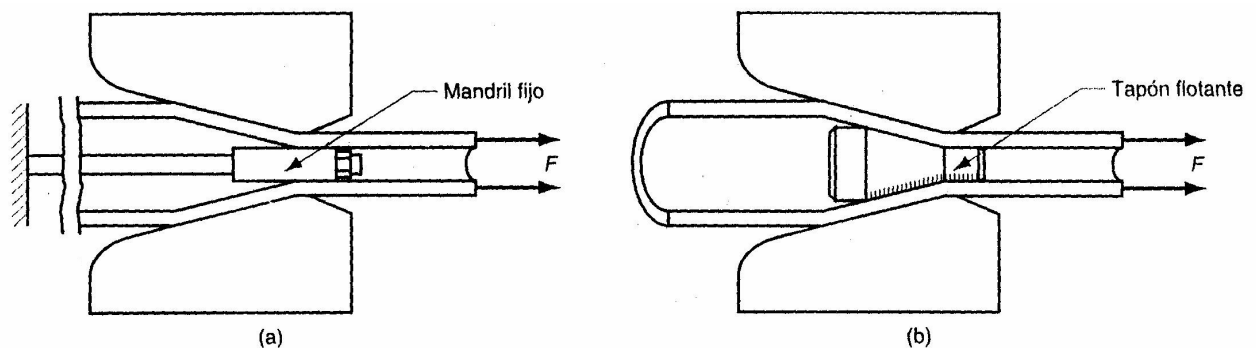


FIGURA 3.51 Estirado de tubos con mandriles (a) mandril fijo y (b) tapón flotante.