

## 3.2. DEFORMACION VOLUMETRICA EN EL TRABAJO DE METALES

En general se menciona estos procesos cuando se tiene una parte inicial más voluminosa que laminar, y las deformaciones son significativas con referencia a su forma inicial.

Los procesos de deformación volumétrica que se describen en esta sección son: 1) laminado, 2) forjado, 3) extrusión, 4) estirado de alambre y barras. La sección también documenta las variantes y operaciones afines a estos cuatro procesos básicos que se han desarrollado a través de los años.

Estos procesos se pueden clasificar en: operaciones en frío o en caliente. Se realiza las operaciones en frío cuando la deformación no es tan significativa y se requiere mejorar las propiedades mecánicas de las partes con un buen acabado superficial. El trabajo en caliente se realiza cuando la deformación es significativa comparada con la parte original.

La importancia tecnológica y comercial de los procesos de deformación volumétrica deriva de lo siguiente:

- Con las operaciones de trabajo en caliente se pueden lograr cambios significativos en la forma de las partes de trabajo.
- Las operaciones de trabajo en frío se pueden usar no solamente para dar forma al trabajo, sino también para incrementar su resistencia.
- Estos procesos producen poco o ningún desperdicio como subproducto de la operación. Algunas operaciones de deformación volumétrica son procesos de forma neta o casi neta; se alcanza la forma final con poco o ningún maquinado posterior.

### 3.2.1. PRODUCTOS LAMINADOS

El *laminado* es un proceso de deformación en el cual el metal pasa entre dos rodillos y se comprime mediante fuerzas de compresión ejercidas por los rodillos. Los rodillos giran, como se ilustra en la figura 3.6, para jalar el material y simultáneamente apretarlo entre ellos. Un proceso estrechamente relacionado es el laminado de perfiles, en el cual una sección transversal cuadrada se transforma en un perfil, como por ejemplo un perfil I.

La mayoría de los procesos de laminado involucra una alta inversión de capital, ya que se requiere equipos pesados llamados molinos laminadores o de laminación, El alto costo de inversión requiere que la producción sea en grandes cantidades y por lo general artículos estándares como láminas y placas. La mayoría de los productos laminados se realizan en caliente debido a la gran cantidad de deformación requerida, y se le llama laminado en caliente. Los metales laminados en caliente están generalmente libres de esfuerzos residuales y sus propiedades son isotrópicas. Las desventajas del laminado en caliente son que el producto no puede mantenerse dentro de tolerancias adecuadas, y la superficie presenta una capa de óxido característica.

Examinemos la secuencia de pasos en un molino de laminación para ilustrar la variedad de productos que pueden hacerse. El trabajo empieza con un lingote de acero fundido y recién solidificado. Aún caliente, el lingote se coloca en un horno donde permanece por muchas horas, hasta alcanzar una

temperatura uniforme en toda su extensión, para que pueda fluir consistentemente durante el laminado. Para el acero, la temperatura de laminación es alrededor de 1200 °C. La operación de calentamiento se llama recalentada, y los hornos en los cuales se lleva a cabo se llaman fosas de recalentamiento

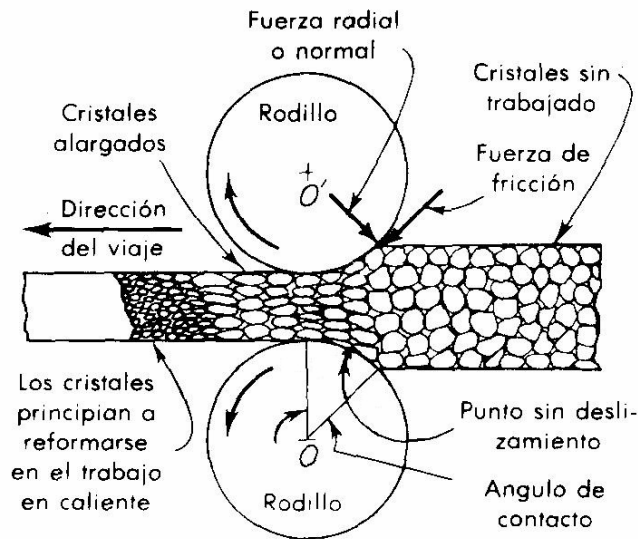


FIGURA 3.6 Proceso de laminación, específicamente laminado plano.

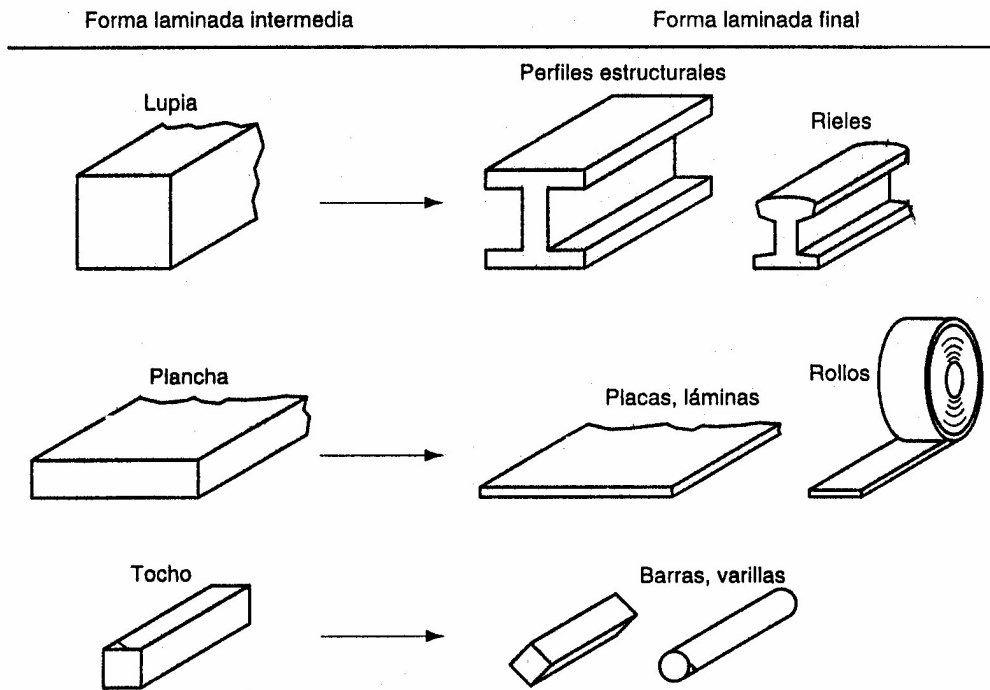


FIGURA 3.7 Algunos productos de acero hechos en molino de laminación.

El lingote recalentado pasa al molino de laminación, donde se lamina para convertirlo en una de las tres formas intermedias llamadas lupias, tochos o planchas. Una lupia tiene una sección transversal cuadrada de 150 mm de lado o mayor. Un tocho se lamina a partir de una lupia, es de sección transversal

cuadrada de 38 mm por lado o mayor. Una plancha se lamina a partir de un lingote o de una lupia y, tiene una sección rectangular de 250 mm de ancho o más, y un espesor de 38 mm o más. Estas formas intermedias se laminan posteriormente para convertirlas en productos finales.

Las lupias se laminan para generar perfiles estructurales y rieles para ferrocarril. Los tochos se laminan para producir barras y varillas. Estas formas son la materia prima para el maquinado, estirado de alambre, forjado y otros procesos de trabajo de metales. Las planchas se laminan para convertirlas en placas, láminas y tiras. Las placas laminadas en caliente se usan para la construcción de barcos, puentes, calderas, estructuras soldadas para maquinaria pesada, tubos y tuberías, y muchos otros productos. La figura 3.7 muestra algunos de estos productos laminados de acero.

### 3.2.1.1. Laminado plano y su análisis

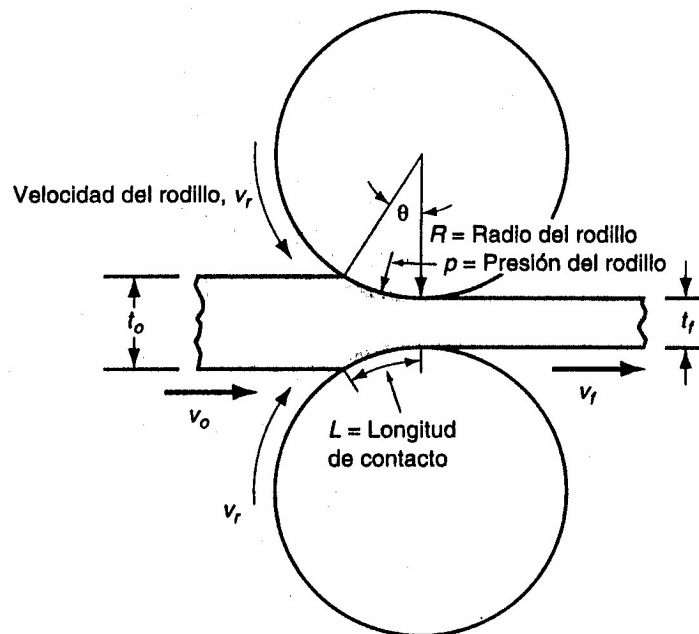


FIGURA 3.8 Vista lateral del laminado plano indicando el espesor antes y después, las velocidades de trabajo, el ángulo de contacto con los rodillos y otras características.

El laminado plano se ilustra en las figuras 3.6. y 3.8. Involucra el laminado de planchas, tiras, láminas y placas, partes de trabajo de sección transversal rectangular con un ancho mayor que el espesor. En el laminado plano, se presiona el material de trabajo entre dos rodillos de manera que su espesor se reduce

$$d = t_o - t_f \quad (3.6)$$

Donde:

$d$  = diferencia, (mm);

$t_o$  = espesor inicial, (mm);

$t_f$  = espesor final, (mm)

Algunas veces se expresa la diferencia  $d$  como una fracción del espesor inicial  $t_o$  llamada reducción  $r$

$$r = \frac{d}{t_o} \quad (3.7)$$

Cuando se usa una serie de operaciones de laminado la reducción se toma como la suma de los adelgazamientos dividida entre el espesor original.

Además de reducir el espesor, el laminado incrementa usualmente el ancho del material de trabajo. Esto se llama *esparcido* y tiende a ser más pronunciado con bajas relaciones entre espesor y ancho, así como con bajos coeficientes de fricción. Existe la conservación del material, de tal manera que el volumen de metal que sale de los rodillos es igual al volumen que entra a los rodillos

$$t_o w_o l_o = t_f w_f l_f \quad (3.8)$$

Donde:

$w_o$ ,  $l_o$  son ancho y largo iniciales de trabajo (mm),

$w_f$ ,  $l_f$  son ancho y largo finales de trabajo (mm).

De igual forma, la velocidad volumétrica del material antes y después debe ser la misma, así que las velocidades pueden relacionarse antes y después de la siguiente manera:

$$t_o w_o v_o = t_f w_f v_f \quad (3.9)$$

Donde

$v_o$  y  $v_f$  son las velocidades de entrada y salida del material de trabajo.

Los rodillos entran en contacto con el material de trabajo, a lo largo de un arco de contacto definido por el ángulo  $\theta$ . Cada rodillo tiene un radio  $R$  y su velocidad de rotación, tiene una velocidad superficial  $v_r$ . Esta velocidad es mayor que la velocidad de trabajo  $v_o$  y menor que la velocidad de salida  $v_f$ . Como el flujo de metal es continuo, hay un cambio gradual en la velocidad del material de trabajo entre los rodillos, Sin embargo, existe un punto a lo largo del arco donde la velocidad de trabajo se iguala la velocidad del rodillo. Este punto se llama *punto de no deslizamiento*, también conocido como *punto neutro*. A cualquier lado de este punto, ocurren deslizamientos con fricción entre el rodillo y el material de trabajo. La cantidad de deslizamiento entre los rodillos y el material de trabajo puede medirse por medio del *deslizamiento hacia adelante*, este término se usa en laminado y se define como:

$$s = \frac{v_f - v_r}{v_r} \quad (3.10)$$

Donde

$s$  = deslizamiento hacia adelante,

$v_f$  = velocidad final del trabajo (salida), (m/seg);

$v_r$  = velocidad del rodillo (m/seg).

La deformación real, experimentada por el material de trabajo, se basa en el espesor del material antes y después del laminado. En forma de ecuación,

$$\varepsilon = \ln \frac{t_o}{t_f} \quad (3.11)$$

Se puede usar la deformación real para determinar el esfuerzo de fluencia promedio  $\bar{Y}_f$  aplicado al material de trabajo en el laminado plano. Recordando de la ecuación 3.2

$$\bar{Y}_f = \frac{K\varepsilon^n}{1+n} \quad (3.12)$$

El esfuerzo de fluencia promedio será útil para calcular las estimaciones de fuerza y potencia en laminado.

La fricción se presenta en el laminado con un cierto coeficiente de fricción, la fuerza de compresión de los rodillos, multiplicada por este coeficiente de fricción da por resultado una fuerza de fricción entre los rodillos y el material de trabajo. En el lado de la entrada, fuerza de fricción tiene una dirección; en el otro lado, tiene la dirección opuesta. Sin embargo, las dos fuerzas no son iguales. La fuerza de fricción es mayor en la entrada, de manera que la fuerza neta que jala el material de trabajo a través de los rodillos. El laminado no sería posible sin estas diferencias. Hay un límite para el máximo  $d$  posible que puede alcanzar el laminado plano con un coeficiente de fricción, dado por

$$d_{\max} = \mu^2 R \quad (3.13)$$

Donde

$d_{\max}$  = diferencia máxima, (mm);

$\mu$  = coeficiente de fricción

$R$  = radio del rodillo, (mm).

La ecuación indica que si la fricción fuera cero, el adelgazamiento podría ser cero y esto haría imposible la operación de laminado

El coeficiente de fricción en el laminado depende de varios factores como lubricación, material de trabajo y temperatura de laminado, en la tabla 3.2 se dan algunos valores típicos de coeficientes de fricción según el tipo de laminado.

TABLA 3.2 Valores típicos de coeficientes de fricción [4]

Tipo de laminado	Coefficiente de Fricción $\mu$
Laminado en frío	0.1
Laminado en tibio	0.2
Laminado en caliente	0.4

El laminado en caliente se caracteriza frecuentemente por una condición llamada *adherencia* en la cual la superficie caliente del material de trabajo se pega a los rodillos sobre el arco de contacto. Esta condición ocurre frecuentemente en el laminado de aceros y aleaciones para alta temperatura. Cuando ocurre la adherencia, el coeficiente de fricción puede ser tan alto como 0.7. La consecuencia de la adherencia es que las capas superficiales del material de trabajo no se pueden mover a la misma velocidad que la velocidad del rodillo  $v_r$  y debajo de la superficie la deformación es más severa a fin de permitir el paso de la pieza a través de la abertura entre los rodillos.

Dado un coeficiente de fricción suficiente para realizar el laminado, la fuerza  $F$  requerida para mantener la separación entre los dos rodillos se puede calcular integrando la presión unitaria de laminado (mostrada como  $p$  en la figura 3.8) sobre el área de contacto rodillo-material de trabajo. Esto se puede expresar como sigue:

$$F = w \int_0^L p dL \quad (3.14)$$

Donde

$F$  = fuerza de laminado (N)

$w$  = ancho del material de trabajo que se está laminando, (mm)

$p$  = presión de laminado, (MPa);

$L$  = longitud de contacto entre el rodillo y el material de trabajo, (mm).

La integración requiere dos términos separados, uno a cada lado del punto neutro. Las variaciones, en la presión del rodillo a lo largo de la longitud de contacto son significativas. La figura 3.9 da una idea de esta variación. La presión alcanza un máximo en el punto neutro y se desvanece a cada lado de los puntos de entrada y salida. Al aumentar la fricción, la presión se incrementa al máximo relativo entre los valores de entrada y salida. Al disminuir la fricción el punto neutro se corre hacia la salida a fin de mantener una fuerza neta que jale el material en la dirección del laminado. De otra forma, con una baja fricción, el material de trabajo podría deslizarse en lugar de pasar entre los rodillos.

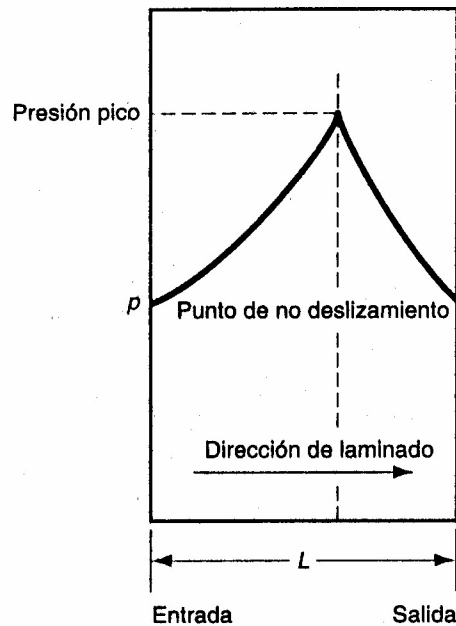


FIGURA 3.9 Variaciones típicas de presión a lo largo de la longitud de contacto en el laminado plano. La presión pico se localiza en el punto neutro. El área bajo la curva, representada por la integración de la ecuación 3.14, es la fuerza de laminación  $F$ .

Se puede calcular una aproximación de los resultados obtenidos por la ecuación 3.14, con base en el esfuerzo de fluencia promedio que experimenta el material durante el proceso de laminado. Esto es

$$F = \bar{Y}_f wL \quad (3.15)$$

Donde

$\bar{Y}_f$  = esfuerzo de fluencia promedio de la ecuación 3.12, (MPa);

$wL$  = es el área de contacto rodillo-material de trabajo, ( $m^2$ )

La longitud de contacto se puede aproximar mediante:

$$L = \sqrt{R(t_o - t_f)} \quad (3.16)$$

El momento de torsión en laminado se puede estimar suponiendo que la fuerza ejercida por los rodillos se centra en el material de trabajo, conforme pasa entre ellos y actúa con un brazo de palanca de la mitad de la longitud de contacto  $L$ . Entonces, el momento de torsión para cada rodillo es:

$$T = 0.5FL \quad (3.17)$$

La potencia requerida para mover cada rodillo es el producto del momento de torsión y la velocidad angular. La velocidad angular es  $\pi N / 30$ , donde  $N$  = velocidad de rotación del rodillo en (rev/min).

Así, la potencia para cada rodillo es

$$P' = \frac{\pi NT}{30}.$$

Al sustituir la ecuación 3.17 en la expresión anterior para la potencia de un rodillo, y al duplicar el valor, ya que un molino de laminado posee dos rodillos, obtenemos la siguiente expresión.

$$P = \frac{\pi NFL}{30} \quad (3.18)$$

Donde

$P$  = potencia (W);

$N$  = velocidad de rotación (rev/min);

$F$  = fuerza de laminado, (N);

$L$  = longitud de contacto, (m).

### EJEMPLO 3.1, laminado plano

Una tira con un ancho de 300 mm y 25 mm de espesor se alimenta a través de un molino laminador de dos rodillos de 250 mm de radio cada uno. El espesor de material de trabajo se reduce a 22 mm en un paso, a una velocidad de 5 rad/seg. El material de trabajo tiene una curva de fluencia definida por  $K = 276$  MPa y  $n = 0.15$ , se asume que el coeficiente de fricción entre los rodillos y el trabajo es 0.12. Determine si la fricción es suficiente para realizar la operación de laminado. Si es así, calcule la fuerza de laminado, el momento de torsión y la potencia en caballos de fuerza.

Solución:

La reducción del espesor  $d$  que se intenta en esta operación de laminado es:

$$d = 25 - 22 = 3\text{mm}$$

De la ecuación 3.13 el  $d_{\max}$  posible para el coeficiente de fricción dado es:

$$d_{\max} = \mu^2 R = 0.12^2 \cdot 250 = 3.6\text{mm}$$

Como el adelgazamiento permisible máximo excede la reducción que se pretende, es posible la operación de laminado. Para calcular la fuerza de laminado necesitamos la longitud de contacto  $L$  y el esfuerzo de fluencia promedio  $\bar{Y}_f$ . La longitud de contacto está dada por la ecuación 3.16.

$$L = \sqrt{R(t_o - t_f)} = \sqrt{250 \cdot (25 - 22)} = 27.37 \times 10^{-3} \text{ m}$$

$\bar{Y}_f$  se determina previo cálculo de la deformación real:

$$\varepsilon = \ln \frac{t_o}{t_f} = \ln \frac{25}{22} = 0.128$$

$$\bar{Y}_f = \frac{K\varepsilon^n}{1+n} = \frac{276 \times 10^6 \cdot 0.128^{0.15}}{1+0.15} = 176316411 \text{ Pa}$$



La fuerza de laminado se determina por la ecuación 3.15

$$F = \bar{Y}_f wL = 176316411 \cdot 0.3 \cdot 27.37 \times 10^{-3} = 1447734N$$

El momento de torsión requerido para mover cada rodillo está dado por la ecuación 3.17:

$$T = 0.5FL = 0.5 \cdot 1447734 \cdot 27.37 \times 10^{-3} = 19812Nm$$

Y la potencia se obtiene de la ecuación 3.18:

$$P = \frac{\pi NFL}{30} = \frac{\pi \cdot 50 \cdot 1447734 \cdot 27.37 \times 10^{-3}}{30} = 207473W$$

Convirtiendo esto a caballos de fuerza (un caballo de fuerza = 746 W)

$$P = \frac{207473}{746} = 278hp$$

En este ejemplo se puede observar que se requieren grandes fuerzas y potencias para el laminado. La inspección de las ecuaciones 3.15 y 3.18 indica que pueden reducirse la fuerza y la potencia para laminar una tira de ancho y material dados, por cualquiera de los siguientes medios 1) uso de laminado en caliente en lugar de laminado en frío para reducir la resistencia y el endurecimiento por deformación (K y n) del material de trabajo, 2) reducir  $d$  en cada paso, 3) utilización de un menor radio en el rodillo  $R$ ; y 4) utilizando menor velocidad de laminación  $N$  para reducir la potencia.

### 3.2.1.2. Laminado de perfiles

En el laminado de perfiles, el material de trabajo se deforma y se genera un contorno en la sección transversal. Los productos hechos por este procedimiento incluyen perfiles de construcción como perfiles en I, en L y canales en U; rieles para vías de ferrocarril y barras redondas y cuadradas, así como varillas (véase la figura 3.7). El proceso se realiza pasando el material de trabajo a través de rodillos que tienen impreso el reverso de la forma deseada.

La mayoría de los principios que se aplican al laminado plano son aplicables al laminado de perfiles. Los rodillos formadores son más complicados; y el material inicial, de forma generalmente cuadrada, requiere una transformación gradual a través de varios rodillos para alcanzar la sección final. El diseño de la secuencia de las formas intermedias y los correspondientes rodillos se llama *diseño de pases de laminación*. Su meta es lograr una deformación uniforme a través de las secciones transversales de cada reducción. De otra forma ciertas porciones de trabajo se reducen más que otras, causando una mayor elongación en estas secciones. Las consecuencias de una reducción no uniforme pueden ser torceduras y agrietamiento del producto laminado. Se utilizan rodillos horizontales y verticales para lograr una reducción consistente del material de trabajo.

### 3.2.1.3. Molinos laminadores

Se dispone de varias configuraciones para los molinos laminadores que manejan una variedad de aplicaciones y problemas técnicos en los procesos de laminación. El molino de laminación básico consiste en dos rodillos opuestos y se denomina molino de laminación de dos rodillos, el cual se muestra

en las figuras 3.10 y 3.11(a). Los rodillos en estos molinos tienen diámetros que van de 0.6 a 1.4 m. La configuración dos rodillos puede ser reversible o no reversible. En el molino no reversible los rodillos giran siempre en la misma dirección y el trabajo siempre pasa a través del mismo lado. El molino reversible permite la rotación de los rodillos en ambas direcciones, de manera que el trabajo puede pasar a través de cualquier dirección. Esto permite una serie de reducciones que se hacen a través del mismo juego de rodillos, pasando simplemente el trabajo varias veces desde direcciones opuestas. La desventaja de la configuración reversible es el momento angular significativo debido a la rotación de grandes rodillos, y los problemas técnicos asociados a la reversibilidad de la dirección.

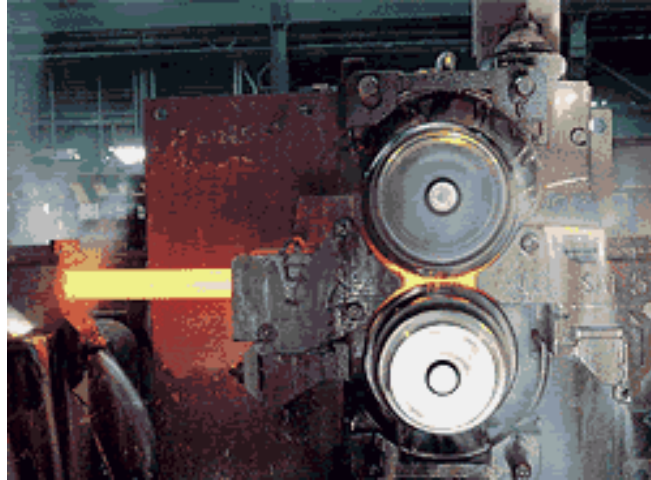


FIGURA 3.10 Un molino para laminado plano en caliente, la placa de acero se ve como una tira brillante que se extiende diagonalmente desde la esquina inferior izquierda (cortesía de Bethlehem Steel Company).

En la figura 3.11 se ilustran algunos arreglos alternativos. En la configuración de tres rodillos, figura 3.11 (b), hay tres rodillos en una columna vertical y la dirección de rotación de cada rodillo permanece sin cambio. Para lograr una serie de reducciones se puede pasar el material de trabajo en cualquier dirección, ya sea elevando bajando la tira después de cada paso. El equipo en un molino de tres rodillos se vuelve más complicado debido al mecanismo elevador que se necesita para elevar o bajar el material de trabajo.

Como indican las ecuaciones anteriores, se ganan algunas ventajas al reducir el diámetro de los rodillos. La longitud de contacto entre los rodillos y el trabajo se reduce con un menor radio de los rodillos y esto conduce a fuerzas más bajas, menor momento de torsión, y menor potencia. En los molinos de cuatro rodillos se usan dos rodillos de diámetro menor para hacer contacto con el trabajo y dos rodillos detrás como respaldo, como se muestra en la figura 3.11 (c). Debido a las altas fuerzas de laminado, los rodillos menores podrían desviarse elásticamente con el paso de la laminación, sí no fuera por los rodillos más grandes de respaldo que los soportan. Otra configuración que permite el uso de rodillos menores contra el trabajo es el molino en conjunto o racimo, figura 3.11 (d).

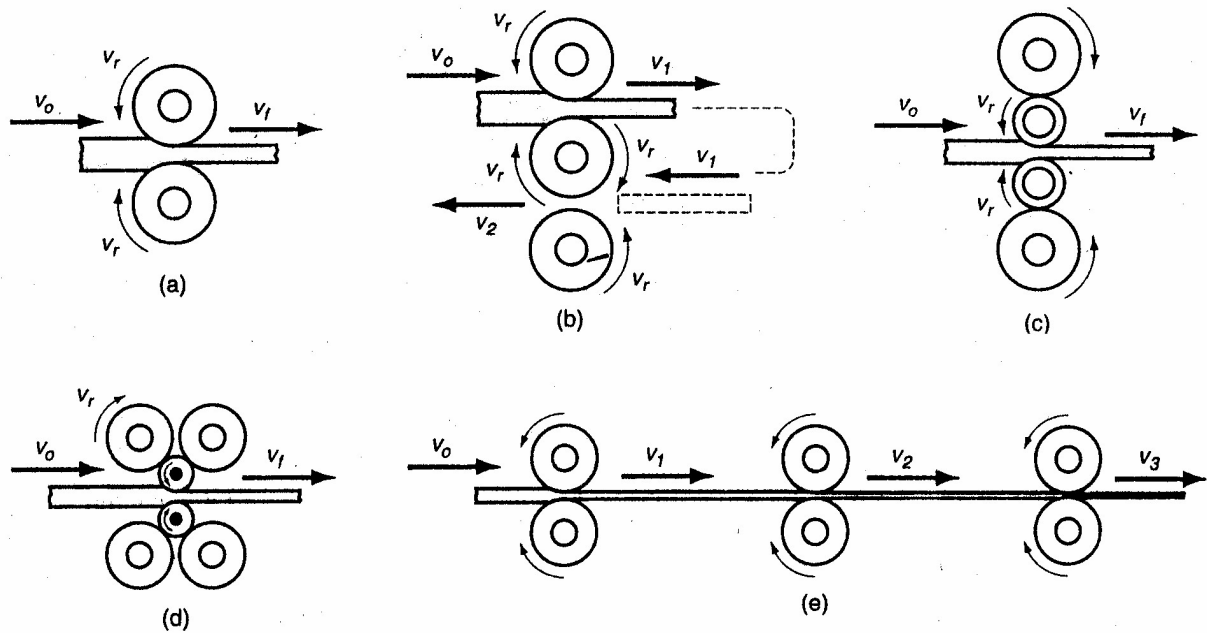


FIGURA 3.11 Varias configuraciones de molinos de laminación: (a) dos rodillos, (b) tres rodillos, (c) cuatro rodillos, (d) molino en conjunto y (e) molino de rodillos en tándem.

Para lograr altas velocidades de rendimiento en los productos estándar se usa frecuentemente un molino de rodillos tándem. Esta configuración consiste en una serie de bastidores de rodillos como se aprecia en la figura 3.11 (e). Aunque sólo se muestran tres bastidores en nuestro diagrama un molino laminador en tándem puede tener ocho o diez pares de rodillos, y cada uno realiza una reducción en el espesor o un refinamiento en la forma del material de trabajo que pasa entre ellos. A cada paso de laminación se incrementa la velocidad haciendo significativo el problema de sincronizar las velocidades de los rodillos en cada etapa.

#### 3.2.1.4. Otras operaciones de laminado

Algunos otros procesos, de deformación volumétrica usan rodillos para formar las partes de trabajo, estas operaciones incluyen laminado de anillos, laminado de cuerdas, laminado de engranes y perforado de rodillos.

**Laminado de anillos** El laminado de anillos es un proceso de deformación que lamina las paredes gruesas de un anillo para obtener anillos de paredes más delgadas, pero de un diámetro mayor. La figura 3.12 ilustra el proceso antes y después. Conforme el anillo de paredes gruesas se comprime, el material se alarga, ocasionando que el diámetro del anillo se agrande. El laminado de anillos se aplica usualmente en procesos de trabajo en caliente para anillos grandes y en procesos de trabajo en frío para anillos pequeños.

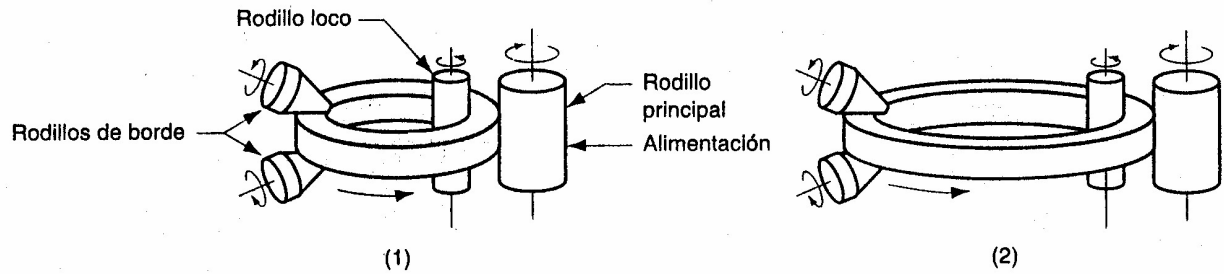


FIGURA 3.12 laminación de anillos que se usa para reducir el espesor e incrementar su diámetro: (1) inicio y (2) proceso terminado.

Las aplicaciones de laminado de anillos incluyen collares para rodamientos de bolas y rodillos, llantas de acero para ruedas de ferrocarril y cinchos para tubos, recipientes a presión y máquinas rotatorias. Las paredes de los anillos no se limitan a secciones rectangulares, el proceso permite la laminación de formas más complejas. Las ventajas del laminado de anillos sobre otros métodos para fabricar las mismas partes son: el ahorro de materias primas, la orientación ideal de los granos para la aplicación y el endurecimiento a través del trabajo en frío.

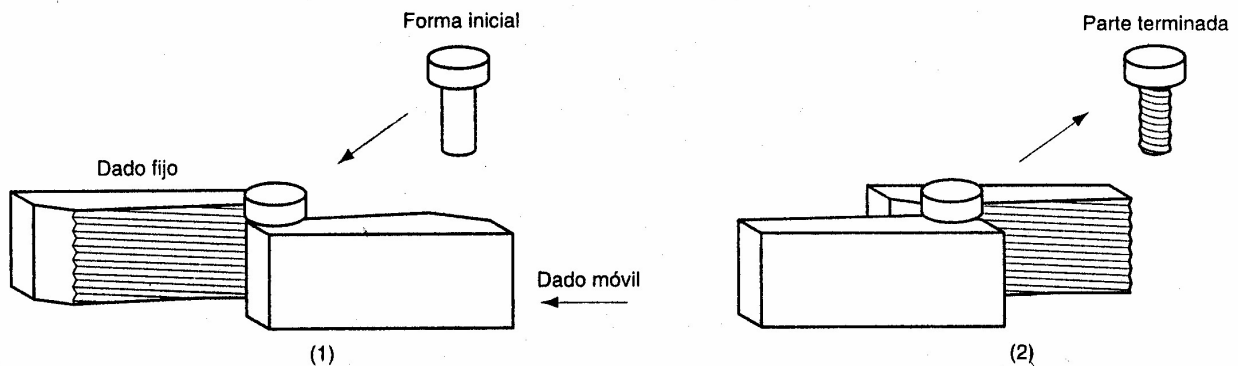


FIGURA 3.13 laminado de cuerdas con dados planos: (1) inicio del ciclo y (2) fin del ciclo.

**Laminado de cuerdas** El laminado de cuerdas se usa para formar cuerdas en partes cilíndricas, mediante su laminación entre dos dados. Es el proceso comercial más importante para producción masiva de componentes con cuerdas externas (pernos y tornillos, por ejemplo). El proceso competidor es el maquinado de cuerdas. La mayoría de las operaciones de laminación de cuerdas se realizan por trabajo en frío utilizando máquinas laminadoras de cuerdas. Estas máquinas están equipadas con dados especiales que determinan el tamaño y forma de la cuerda, los dados son de dos tipos: 1) dados planos que se mueven alternativamente entre sí, como se ilustra en la figura 3.13, 2) dados redondos, que giran relativamente entre sí para lograr la acción de laminado

Las velocidades de producción en el laminado de cuerdas pueden ser muy altas, su capacidad alcanza hasta 8 partes por segundo para pernos y tornillos pequeños. Pero la velocidad no es la única ventaja con respecto al maquinado, existen otras como son: 1) mejor utilización del material, 2) cuerdas

más fuertes debido al endurecimiento por trabajo, 3) superficies más lisas, 4) mejor resistencia a la fatiga debido a los esfuerzos por compresión que se introducen durante el laminado.

**Laminado de engranes** Éste es un proceso de formado en frío que produce ciertos engranes. La industria automotriz es un importante usuario de estos productos. La instalación para el laminado de engranes es similar al laminado de cuerdas, excepto que las características de deformación de los cilindros o discos se orientan paralelamente a su eje (o a un ángulo en el caso de engranes helicoidales) en lugar de la espiral del laminado de cuerdas. Las ventajas del laminado de engranes - comparadas con el maquinado - son similares a las ventajas en el laminado de cuerdas: altas velocidades de producción, mejor resistencia a la fatiga y menos desperdicio de material

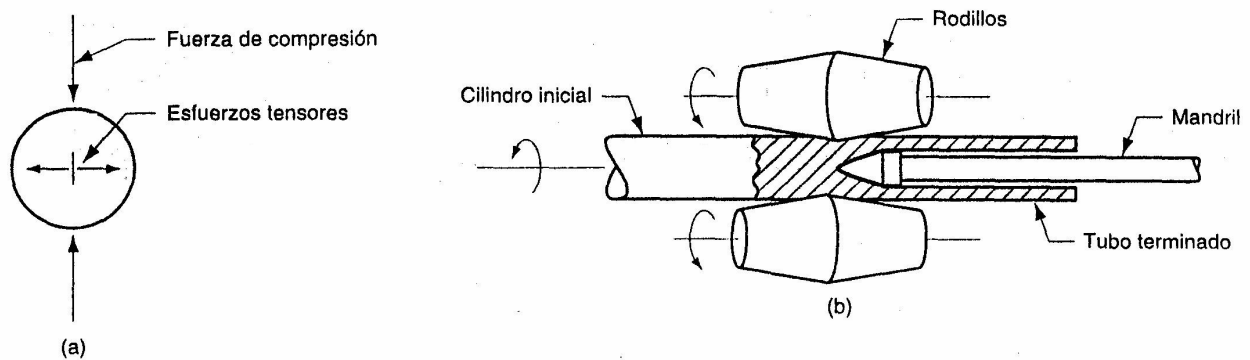


FIGURA 3.14 Perforación de rodillos: (a) formación de esfuerzos internos y de la cavidad por compresión de la parte cilíndrica y (b) disposición del molino de laminación Mannesmann para producir tubo sin costura.

**Perforado de rodillos** Es un proceso especializado de trabajo en caliente para hacer tubos sin costura de paredes gruesas. Utiliza dos rodillos opuestos y por tanto se agrupa entre los procesos de laminado. El proceso se basa en el principio que al comprimir un sólido cilíndrico sobre su circunferencia, como en la figura 3.14 (a), se desarrollan altos esfuerzos de tensión en su centro. Si la compresión es lo suficientemente alta se forma una grieta interna. Este principio se aprovecha en el perforado de rodillos mediante la disposición que se muestra en la figura 3.14 (b). Los esfuerzos de compresión se aplican sobre el tocho cilíndrico por dos rodillos, cuyos ejes se orientan en pequeños ángulos (alrededor de  $30^\circ$  con respecto al eje del tocho, de esta manera la rotación tiende a jalar el tocho a través de los rodillos. Un mandril se encarga de controlar el tamaño y acabado de la perforación creada por la acción. Se usan los términos perforado rotatorio de tubos y proceso Mannesmann para esta operación en la fabricación de tubos.