

CAPÍTULO 5

LAMINACIÓN

5.1 GENERALIDADES

La laminación consiste en la reducción de la sección transversal de un material, al hacerlo pasar entre dos rodillos cilíndricos que giran en sentido opuesto (figura 5.1). Dichos cilindros producen la deformación plástica del material por medio de esfuerzos de compresión y corte. Los de compresión se deben a que según el material se introduce entre los rodillos, el espesor libre entre ellos va siendo menor; los esfuerzos cortantes son debidos a que las fibras externas del material están sujetas a la fuerza de fricción de los rodillos.

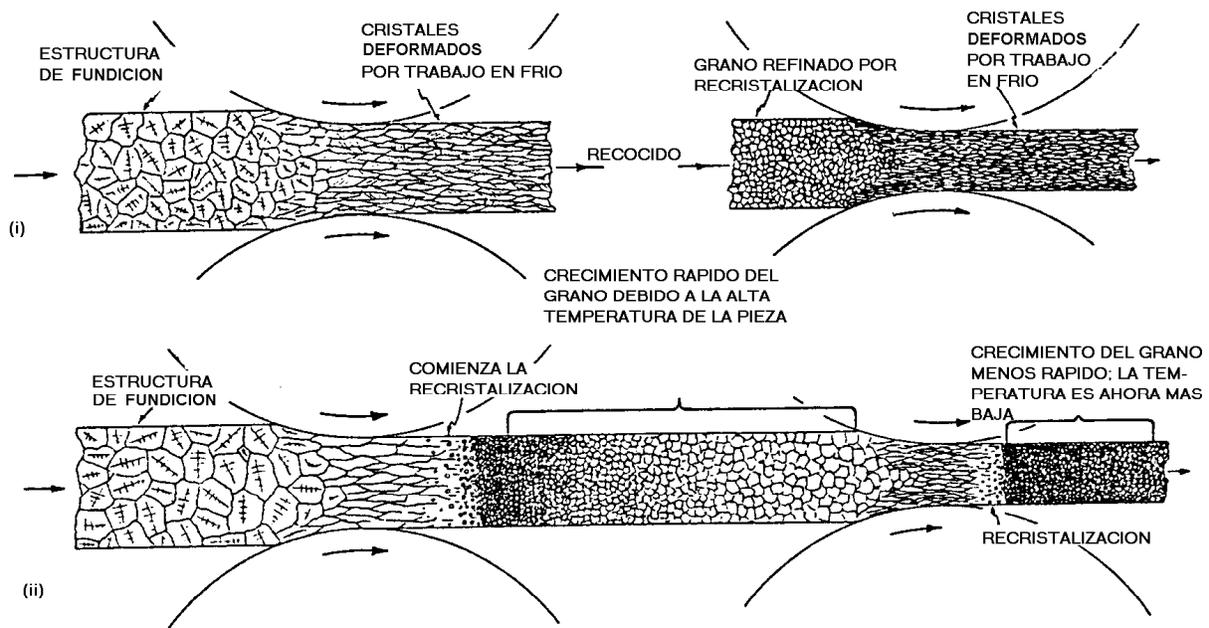


FIGURA 5.1 Efecto del proceso de laminación sobre la estructura. i) en frío ii) en caliente



FIGURA 5.2 Tren de laminación de planos

Los antecedentes más antiguos del proceso se remontan a 1550, cuando se obtienen las primeras hojas de metal laminado, las cuales se caracterizan por su espesor uniforme a diferencia de las producidas anteriormente por forja. Es fácil suponer que rápidamente el proceso se difundió, empleándose posteriormente no sólo para ajustar el espesor de las hojas, sino también para reducirlo. En un principio el proceso no fue aplicado en el hierro, tuvo que transcurrir más de un siglo para que esto ocurriera.

El verdadero nacimiento de la laminación se produce hasta 1783, cuando el inglés Henry Cort obtiene la patente británica No. 1351, la cual introduce los rodillos ranurados que se emplean en la manufactura de barras de hierro.

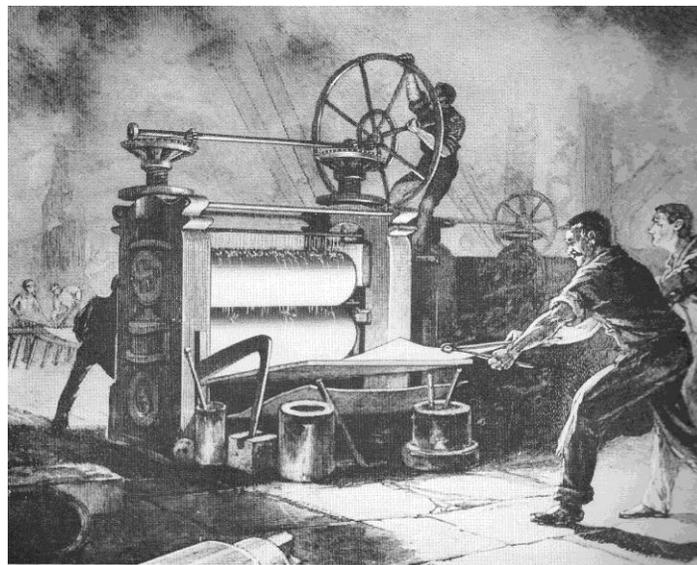


FIGURA 5.3 Molino de laminación accionado por vapor, segunda mitad del siglo XIX

5.2 PROCESO DE LAMINACIÓN

Hoy en día, la laminación es el medio más económico para reducir la sección transversal de un material, y tiene por esto un gran campo de aplicaciones tanto en frío como en caliente. Algunas de sus características y limitaciones son:

Laminación en frío:

- Buen acabado superficial
- Buen control dimensional
- Bajo porcentaje de reducción posible. Se hace necesario un recocido para aliviar tensiones por deformación plástica en frío (acritud)

Laminación en caliente:

- Posibilidad de altos porcentajes de reducción
- Deficiente acabado superficial
- Limitado control dimensional
- Menores cargas de deformación

Con base en estas propiedades se elige el proceso que se debe seguir para la obtención de un producto determinado y, en muchos casos, se utilizan combinaciones de ellos (figura 5.4).

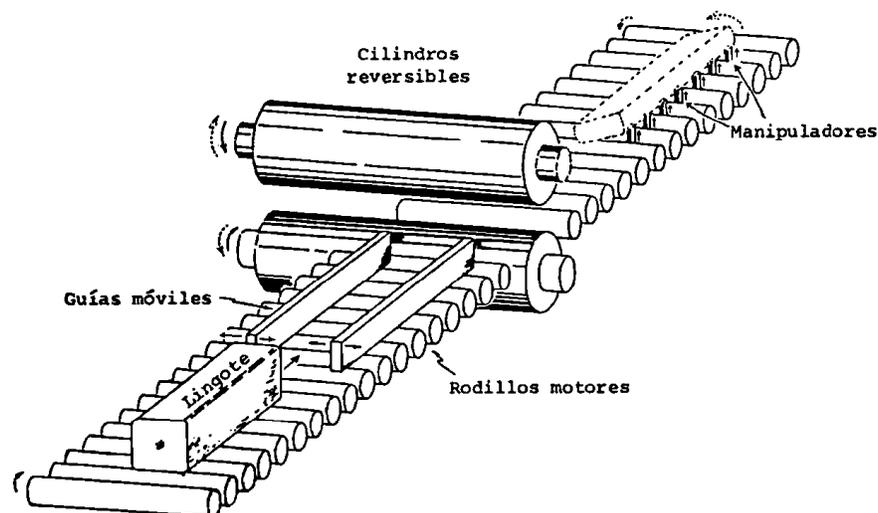


FIGURA 5.4 Proceso de laminación (laminador dúo reversible)

Generalmente, los primeros pasos de deformación, en los que se requieren grandes reducciones, se realizan en caliente; mientras que cuando es necesario un mejor acabado o dimensiones precisas, se lamina en frío.

Se puede clasificar a los laminadores en dos grandes grupos: los que laminan formas planas, constituidos por rodillos lisos y paralelos; y los que se utilizan para producir perfiles tales como: redondos, cuadrados, rieles, viguetas, canales y varilla; para lo que se utilizan rodillos con diferentes tipos de acanaladuras.

Arreglos de laminadores

La unidad básica a través de la cual se realiza el proceso se denomina caja de laminación. Está constituida por el bastidor, chumaceras, medios de accionamiento y sistemas de ajuste de la apertura de los rodillos, así como de otros elementos auxiliares tales como las guías de entrada y salida. Estos arreglos se designan o clasifican de acuerdo con el número y disposición de los rodillos, se tiene entonces:

LAMINADOR O ARREGLO DÚO: Es la disposición más antigua, sencilla y versátil, ya que se emplea tanto en desbaste como en acabado. Consiste en dos rodillos que giran en sentido opuesto, cuyo eje de rotación es horizontal, y están contenidos en un mismo plano vertical (figura 5.5). En el caso de que se cuente con una sola caja para realizar el proceso, éste será lento debido al tiempo que se pierde al llevar el material a la entrada del laminador, además de que se requieren mesas elevadoras.

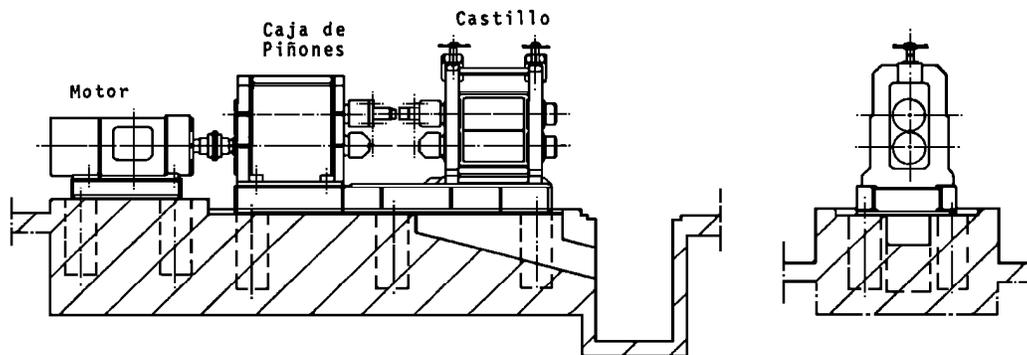


FIGURA 5.5 Laminador dúo

El desarrollo lógico a partir de lo anterior fue el laminador dúo reversible, en el que el material puede ser laminado en ambos sentidos. Este arreglo está limitado por la longitud del material y por la velocidad de laminación. Se emplea en el desbaste de barras o placas de hasta 10 m de longitud.

ARREGLO TRÍO: Consta de tres rodillos de igual diámetro, con eje de rotación horizontal; los ejes de los tres se encuentran contenidos en un mismo plano vertical (figura 5.6). Presenta las ventajas de dúo y dúo reversible, razón por la que es utilizado en desbaste así como en trenes

desplegados. En el caso de que sean empleados en el desbaste, será necesario que cuenten con mesas elevadoras en ambos lados.

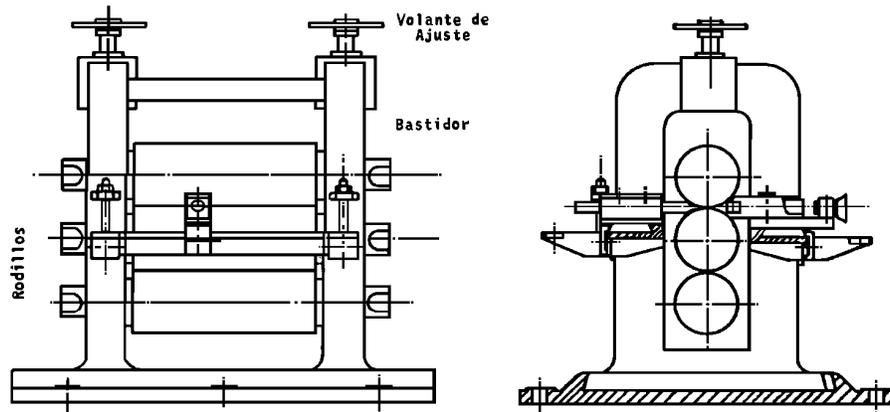


FIGURA 5.6 Laminador trío

LAMINADOR CUARTO: Está compuesto por cuatro rodillos (figura 5.7), dos de trabajo y dos de apoyo, cuyo eje de rotación está contenido en un mismo plano vertical. Los rodillos interiores (de trabajo) normalmente son forjados y su diámetro es de $1/2$ a $1/3$ de los de apoyo.

Este tipo de arreglos se emplea básicamente en los pasos de acabado de hoja; se busca que éstos reduzcan la carga y eviten variaciones sobre el eje transversal del espesor de la lámina (se evita la flexión de los rodillos); sin embargo, también encuentran aplicación en pasos intermedios de desbaste sobre todo para materiales tenaces.

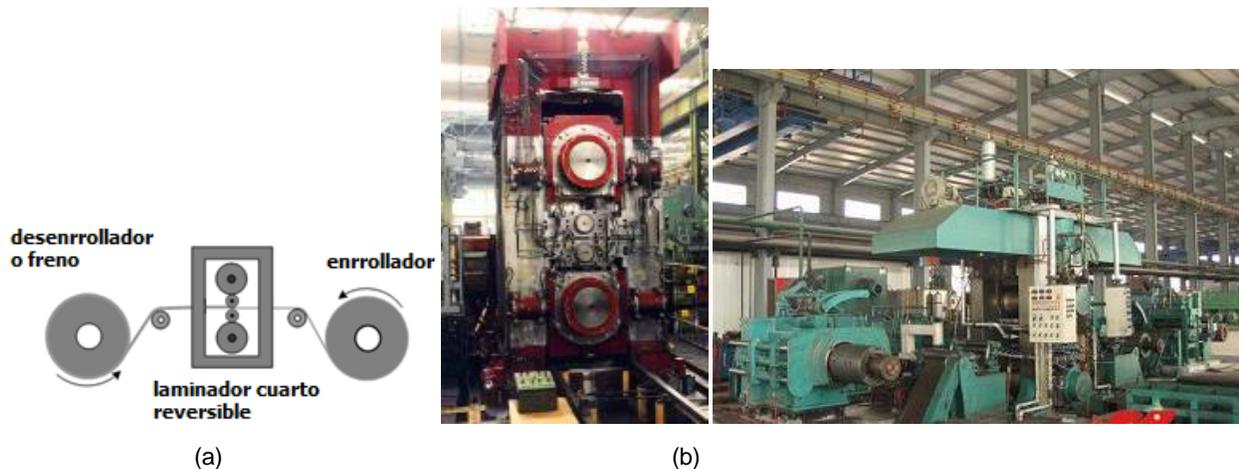


FIGURA 5.7 Laminador cuarto, (a) Descripción esquemática de un laminador cuarto con enrollador y freno (desenrollador), (b) caja de laminación, (c) Laminador cuarto reversible con enrollador y freno

LAMINADOR DE RACIMO: Consiste en dos rodillos de trabajo de pequeño diámetro y cuatro o más rodillos de apoyo (figura 5.8), contenidos en varios planos verticales. Se emplea en el acabado de hoja metálica de alta resistencia y de pequeño espesor.

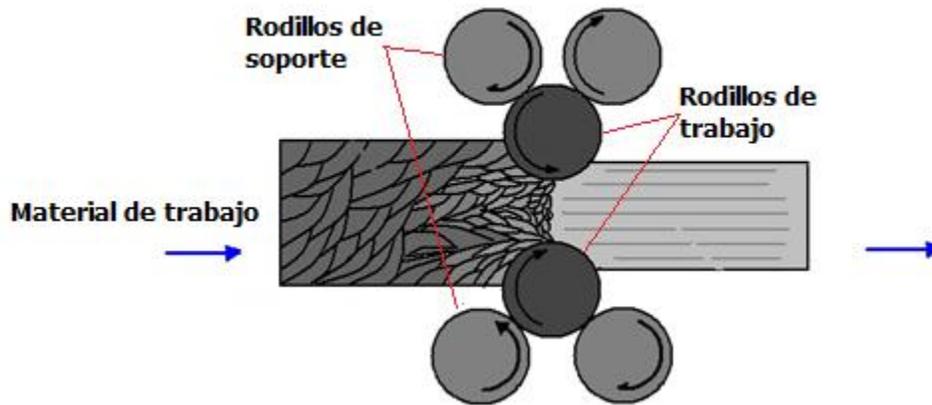


FIGURA 5.8 Laminador en racimo

LAMINADOR SENDZIMIR (figura 5.9): Es una refinación del arreglo de racimo, en el que se tienen del orden de 18 rodillos de apoyo. Se emplea cuando se van a laminar metales muy tenaces, de anchos mayores a 1 m y de espesores muy pequeños. La aplicación del rodillo de pequeño diámetro permite reducir la carga y, por lo tanto, la potencia necesaria, además de que facilita la laminación de pequeños espesores así como el preciso control del espesor. Por ejemplo, en estos laminadores se puede trabajar hoja de acero inoxidable de hasta 1.6 m de ancho con los rodillos de menos de 10 cm de diámetro.

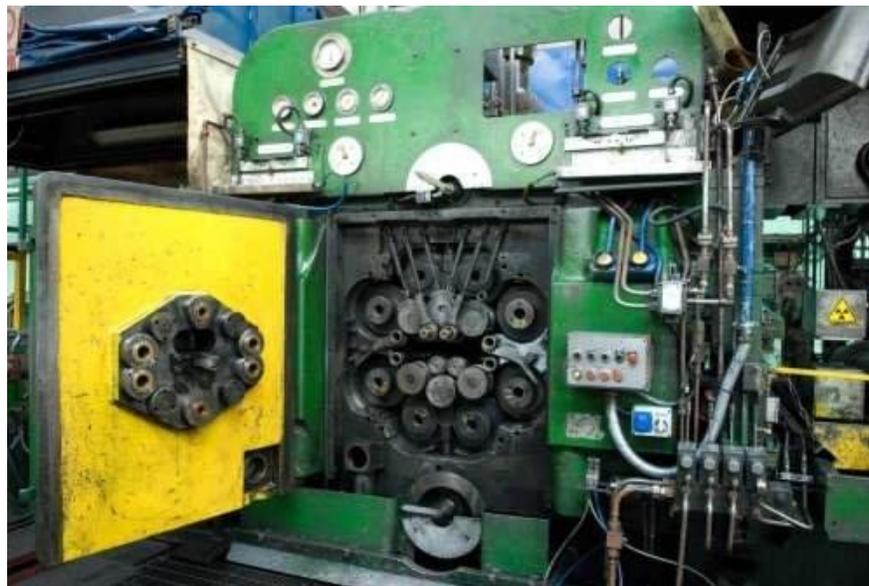


FIGURA 5.9 Laminador Sendzimir

LAMINADOR PLANETARIO: Este arreglo (figura 5.10) combina los efectos de forja y laminación, permitiendo grandes reducciones en una sola etapa. Se podrá entonces pasar de un planchón a lámina (reducción del 90% o aun mayor), con lo cual el laminador hace las veces de todo un tren.

Consiste en una serie de rodillos de pequeño diámetro, los cuales giran sobre dos rodillos de apoyo de mayor diámetro. Dadas las grandes reducciones y las obvias características del producto acabado, es necesario contar con rodillos de empuje y cuando menos un par de rodillos acabadores. Por su complejidad y alto costo son muy poco comunes.

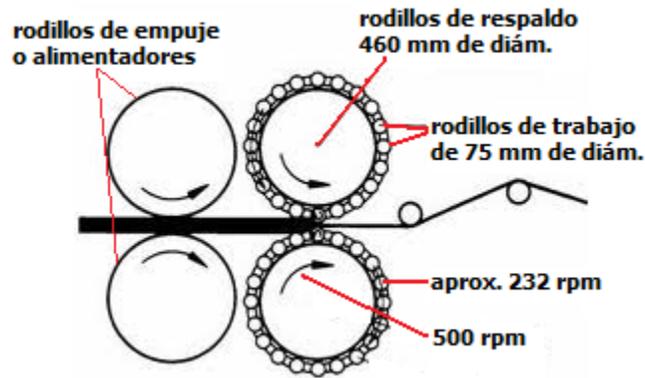


FIGURA 5.10 Laminador planetario

En ocasiones se utiliza la combinación de rodillos en una misma caja de laminación, el eje de un par de éstos se encuentra rotado 90° con respecto a los otros. A este arreglo se le conoce como caja universal, y como block "x" cuando los rodillos se encuentran en planos a 45° con respecto a la horizontal. Estos arreglos pueden ser utilizados en la fabricación de vigas o en el ajuste de los costados de placas.

Tren de laminación

Cuando se desea obtener un determinado producto, como la varilla corrugada, barra hexagonal, cuadrada, circular; o perfiles tales como vigas, etcétera, y además se requiere de un gran volumen de producción, será necesario recurrir a un tren de laminación (figuras 5.11, 5.12 y 5.13), formado por una o más cajas de laminación, las cuales trabajan de manera secuencial. Los trenes de laminación se clasifican tanto con base en el producto obtenido, como de acuerdo con la disposición de las cajas que los constituyen, teniéndose entonces:

TREN CONTINUO: Se compone de cajas que se encuentran una a continuación de otra; el material que se está laminando pasa de una a otra caja sin interrupción, y se lamina la misma barra en varias cajas al mismo tiempo (cajas acomodadas en serie).

SEMICONTINUOS: Tienen la misma disposición del continuo; sin embargo, en ellos se puede retirar el material en pasadas intermedias, si así se desea.

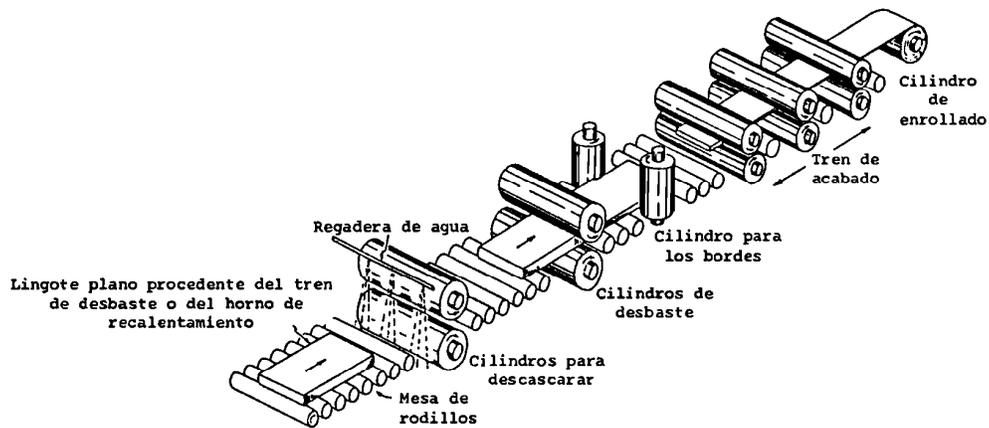


FIGURA 5.11 Tren de laminación de tipo continuo

EN LÍNEA O DESPLEGADOS: Están compuestos por cajas alineadas o dispuestas en líneas paralelas. Entre caja y caja existen dispositivos repetidores y formadores de lazo; normalmente un único motor principal acciona todas las cajas del tren. Se emplean cajas trío, donde el tercer rodillo sirve únicamente como árbol de transmisión.

EN ZIGZAG: Es una combinación de tren continuo y de línea. En los trenes continuos se emplean cajas dúo agrupadas de dos en dos. Si se tienen rodillos horizontales y verticales, de tal forma que el material pueda ser deformado en dos direcciones o si se tienen cajas universales, se habla de trenes *no twist* (sin giro).



FIGURA 5.12 Tren de laminación en zig-zag



FIGURA 5.13 Tren en línea

Elementos de un tren de laminación

Un tren de laminación, como ya se ha comentado, está constituido por una o más cajas de laminación, caja de piñones, reductor y motor.

La caja de laminación está compuesta por el castillo o bastidor, generalmente fabricado de acero vaciado, aunque en ocasiones se elabora a partir de placas soldadas o hierro nodular; estos últimos se utilizan para laminado en caliente.

Cuando las condiciones de trabajo así lo requieran, se usarán rodillos de acero forjado. Los rodillos están soportados por:

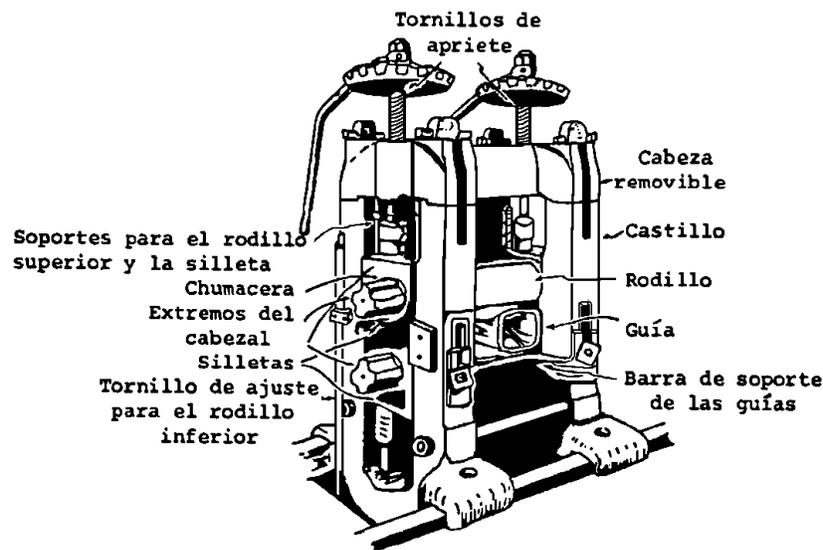
- a) Chumaceras, que pueden ser tipo buje (prácticamente ya no se utilizan en la actualidad), y son fabricadas generalmente de bronce o polímeros termofijos.
- b) Rodamientos, que son los más utilizados en la actualidad. Los tipos de rodamientos más empleados son los de rodillos cilíndricos y los axiales de rodillos cónicos.

Para los árboles de transmisión se usan aceros al carbono o cromo-molibdeno, mientras que los coples son, en muchos casos, de hierro colado para que puedan actuar como fusibles mecánicos.

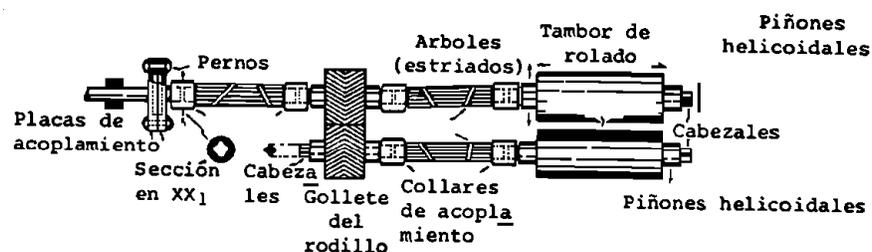
La caja de piñones es un implemento intermedio entre el reductor y los rodillos, su finalidad es dar movimiento a igual velocidad y sentidos contrarios a los rodillos de laminación. Está constituida por

piñones de igual diámetro de paso de doble helicoidal (para evitar cargas axiales). Cuando se trata del accionamiento de una caja trí, el árbol motriz será el central.

Las juntas de acoplamiento entre los piñones y los rodillos son de tipo universal para absorber el grado de desalineamiento de la transmisión que se produce al variar la separación entre los rodillos. Dado que la velocidad del motor es mayor que la de los rodillos, será necesario el empleo de un reductor de velocidad, el cual está constituido con engranes dobles helicoidales. En algunos casos esta unidad se encuentra incorporada a la caja de piñones.



a) caja de laminación



b) transmisión

FIGURA 5.14 Partes principales de un tren de laminación

En función del tipo de motor seleccionado, se requiere en ocasiones (trenes de diseño muy antiguo), un volante de inercia entre el motor y el reductor.

En el caso de trenes continuos se emplean motores de corriente directa; se tendrá un motor por cada una o dos cajas. En los trenes desplegados se emplean motores de corriente alterna de anillos rozantes, los cuales proporcionan el suficiente par y potencia para impulsar todas las cajas que componen al tren.

Para ajustar la deformación del material es necesario que el rodillo superior, en el caso de los dúo, o el superior e inferior, en el caso de los trío, sea capaz de tener movimiento vertical. Por esto es necesario contar con un sistema de ajuste y suspensión para los rodillos superiores.

En una caja trío las chumaceras centrales se encuentran fijas, mientras que, como se ha comentado anteriormente, tanto las superiores como las inferiores pueden ser reguladas verticalmente en ambos sentidos, con la finalidad de poder ajustar el claro entre los rodillos. Las chumaceras inferiores pueden tener un mecanismo de cuña para su regulación, mientras que las superiores son reguladas mediante husillos.

Como los rodillos deben permanecer siempre a su separación máxima calibrada, es necesario mantener el rodillo superior permanentemente oprimido hacia arriba, por lo que se utiliza un mecanismo de suspensión, que puede estar constituido por resortes entre las chumaceras superiores y las centrales (o entre las inferiores y las superiores en el caso de un dúo); en ocasiones se ajustan las chumaceras a la parte superior por medio de tirantes. Es usual suspender los rodillos pequeños de la parte superior del bastidor mediante resortes.

ELEMENTOS AUXILIARES DEL TREN DE LAMINACIÓN: El número y tipo de los elementos auxiliares que se presentan en un tren dependerá del tipo de éste, del producto que se va a fabricar y del grado de automatización de la planta. Son comunes, entre otros:

- a. Horno de precalentamiento
- b. Mesas fijas y basculantes
- c. Tijeras de despunte y descole
- d. Guías de entrada y salida
- e. Repetidores
- f. Arrastradores

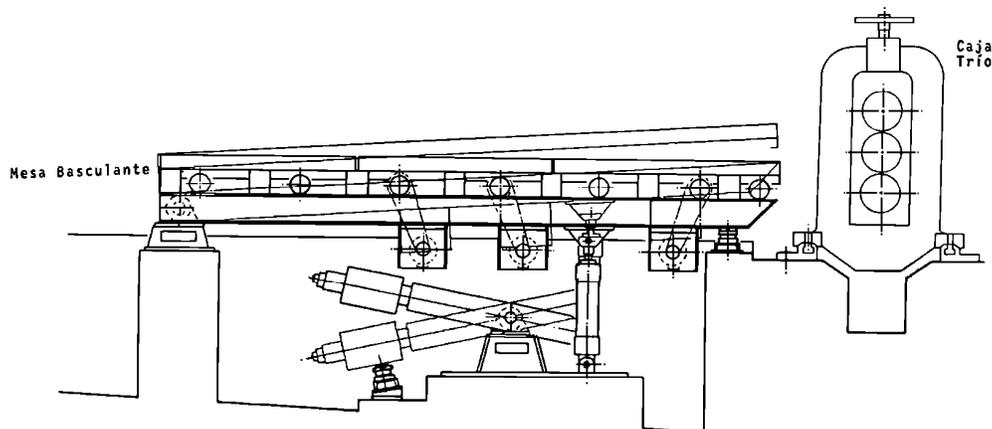


FIGURA 5.15 Mesa basculante

Además de los anteriores, se tienen tijeras de emergencia, canaletas, frena colas y mesas de enfriamiento, así como otros equipos que dependerán del caso particular.

Dadas las características cada vez más elevadas en cuanto a propiedades mecánicas, acabado y tolerancia del material laminado, es común encontrar en las modernas plantas que los trenes sean controlados por computadora, permitiendo entonces la obtención de propiedades mecánicas más elevadas y con tolerancias cerradas.

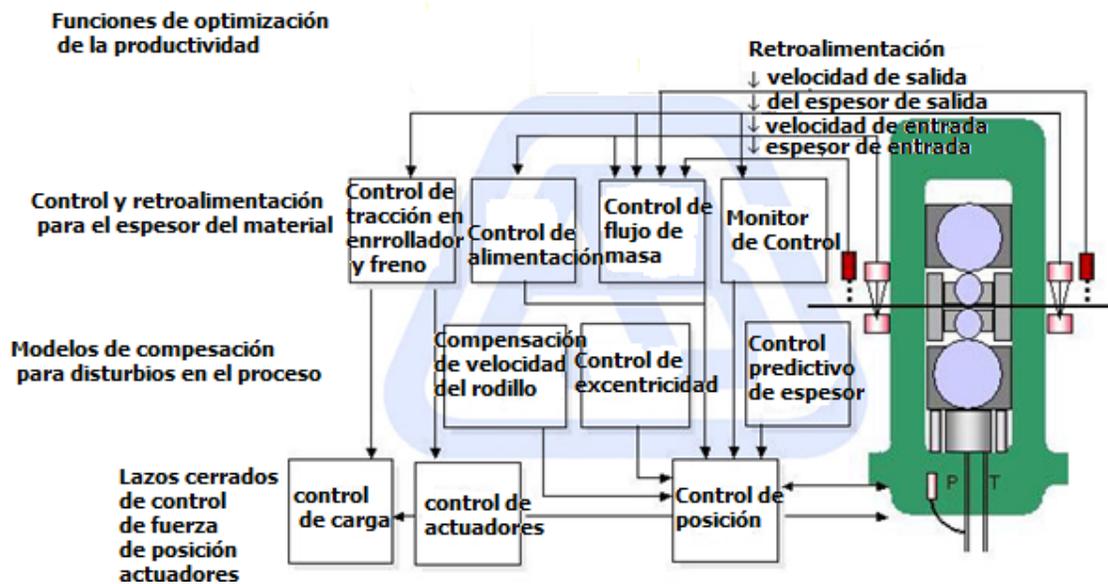


FIGURA 5.16 Proceso de laminación controlado por sistemas computacionales

5.3 ANÁLISIS DEL PROCESO DE LAMINACIÓN

Para determinar la carga y potencia demandadas por el proceso, se consideran las relaciones involucradas entre la geometría de los rodillos y las fuerzas, así como el efecto que representan la temperatura, velocidad, reducción y acabado de los rodillos.

Relaciones geométricas en el laminado

Al tener una deformación plástica, el gasto volumétrico a la entrada y salida es igual:

$$b_0 h_0 v_0 = b_f h_f v_f \quad (5.1)$$

donde:

b = ancho

h = espesor

v = velocidad

0 = condición de entrada

f = condición de salida

En el laminado de productos planos se puede considerar que el ensanchamiento es nulo, por lo tanto:

$$v_f = v_0 \left(\frac{h_0}{h_f} \right)$$

La reducción está definida como:

$$r = \frac{(h_0 - h_f)}{h_0} \quad (5.2)$$

La presión de laminado se aplica sobre el arco de contacto. Para facilitar el análisis se va a considerar la proyección de éste en la dirección de laminado; esta nueva variable se considerará como longitud proyectada del arco de contacto (L_p).

$$R^2 = L_p^2 + \left(R - \frac{\Delta h}{2} \right)^2$$

$$L_p = \left(R\Delta h - \frac{\Delta h^2}{2} \right)^2 \quad (5.3)$$

donde R es el radio del rodillo.

Como $\Delta h \ll R$ entonces se puede reducir a:

$$L_p = R\Delta h^{1/2}$$

Por lo tanto, la carga de laminación será:

$$P = \bar{p}bL_p \quad (5.4)$$

donde \bar{p} es la presión promedio de laminación.

El ángulo formado por el plano de entrada y el ángulo que contiene los ejes de rotación de los rodillos, se denomina ángulo de mordedura (α) y está dado por:

$$\alpha = \text{ang sen} \theta \frac{L_p}{R} \quad (5.5)$$

La máxima reducción teórica posible se puede obtener si se considera que la fuerza que provoca la entrada del material a los rodillos debe ser mayor y en el límite, igual a la que se opone al paso de éste. De lo anterior y con base en la figura 5.17, se tiene:

$$F \cos \alpha = f_R \text{sen} \alpha \quad (5.6)$$

donde:

F = Fuerza tangencial a la superficie del rodillo

f_R = fuerza radial

$$\frac{F}{f_R} = \tan \alpha \quad (5.7)$$

$f_R = p_R dA$

p_R = presión radial

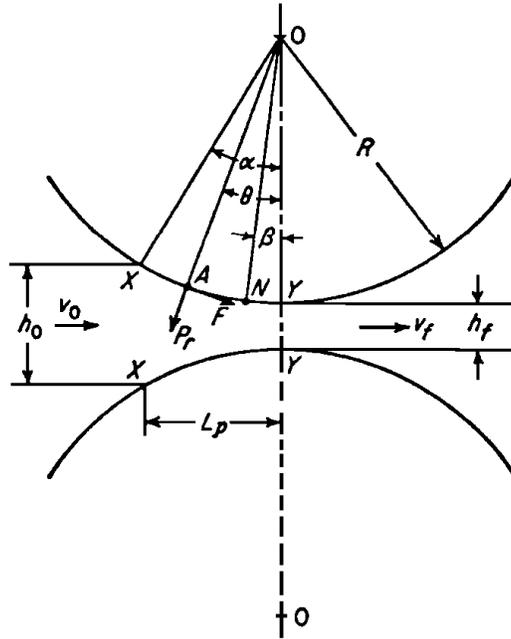


FIGURA 5.17

Por definición se sabe que:

$$F = \mu f R \quad (5.8)$$

De lo anterior y mediante trigonometría se puede llegar a:

$$\Delta h_{\text{máx}} = \mu^2 R \quad (5.9)$$

De la ecuación 5.9 se tiene que la máxima reducción está limitada por el coeficiente de fricción y el radio de los rodillos, razón que justifica los grandes diámetros de éstos en el desbaste.

Las fuerzas necesarias para deformar al material durante el laminado provocan dos tipos fundamentales de deformación elástica en los rodillos. Primero, los rodillos tienden a flexionarse (figura 5.18) debido a que el material tiende a separarlos, mientras que el movimiento axial de los piñones está restringido; esto puede provocar variaciones de espesor a lo ancho de la hoja, lo cual será compensado con coronamiento del rodillo. Segundo, los rodillos se deforman en la región de contacto; por esta razón el radio en la zona de contacto se incrementa a un valor R' que se calcula como:

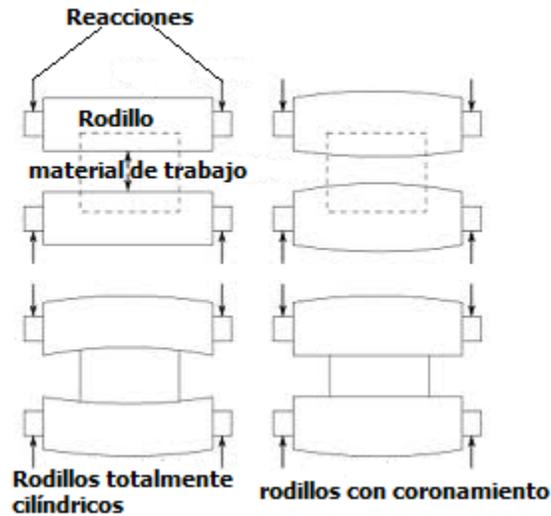


FIGURA 5.18 Deflexión de los rodillos por efecto de la carga de laminación y su efecto en el material. En el lado derecho se observa la ventaja de coronar el rodillo (su diámetro central es mayor)

$$R' = R \left(1 + \frac{cP}{b\Delta h} \right) \quad (5.10)$$

donde:

- R' = Radio de contacto
- R = Radio del rodillo
- P = Carga
- c = Constante elástica del material del rodillo

$$c = 16 \frac{1-\nu}{E\pi} \quad (5.11)$$

donde:

- ν = Coeficiente de Poisson
- E = Módulo de elasticidad del material

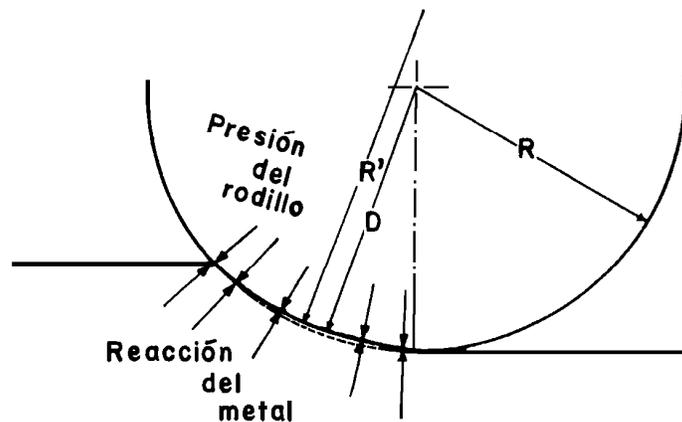


FIGURA 5.19 Reacción del metal que ocasiona aplastamiento en los rodillos

Cálculo experimental de la carga

A la fecha existen diversos métodos analíticos, empíricos y experimentales a partir de los cuales se puede evaluar de forma aproximada la carga de laminación. Su exactitud está delimitada por las características del proceso en particular que se analice.

La ecuación más sencilla se deduce considerando el aplastamiento del material y considera un 20% adicional por fricción:

$$P = 1.2\sigma_0 b L_p \quad (5.12)$$

y:

$$\sigma_0 = \frac{2}{\sqrt{3}} \sigma_y \quad (5.13)$$

donde:

σ_0 = Esfuerzo de cedencia para una condición biaxial de deformación

σ_y = Esfuerzo de cedencia a la deformación homogénea

Se habla de deformación homogénea siempre y cuando se cumpla que:

$$\frac{b}{L_p} \leq 4$$

Realizando una analogía de laminación con forja se llega a expresiones como:

$$P = \sigma_0 b L_p \left(1 + \frac{L_p}{4\bar{h}} \right) \quad \text{fricción sin deslizamiento} \quad (5.14)$$

$$P = \sigma_0 b L_p \left(1 + \mu \frac{L_p}{2\bar{h}} \right) \quad \text{fricción con deslizamiento} \quad (5.15)$$

$$\bar{h} = \frac{h_0 + h_f}{2}$$

donde:

\bar{h} = espesor promedio

μ = coeficiente de fricción (el cual será estudiado posteriormente)

σ_0 = esfuerzo de cedencia promedio

A partir del mismo análisis se llega a:

$$P = \sigma_0 b \frac{L_p}{Q} \left[e^Q - 1 \right] \quad (5.16)$$

donde:

$$Q = \mu \frac{L_p}{h}$$

Método de Ekelund

Se trata de una ecuación arbitraria, basada en un análisis simplificado de esfuerzos.

$$P_0 = \sigma_0 b L'_p \left(1 + \frac{1.6 \mu L'_p - 1.2 \Delta h}{h_0 + h_f} \right) \quad (5.17)$$

donde:

$$L'_p = \sqrt{R' \Delta h}$$

Para laminado en caliente de aceros, el coeficiente de fricción se puede evaluar aproximadamente con las siguientes expresiones:

$$\begin{aligned} \mu &= 1.05 - 0.0005T && \text{para cilindros de fundición gris} \\ \mu &= 1.05 - 0.0005T && \text{para cilindros de acero} \end{aligned}$$

donde T es la temperatura expresada en °C.

Estas ecuaciones son empleadas para la práctica industrial, cuando el coeficiente de fricción no es bien conocido.

Análisis teórico de la carga

Uno de los problemas de conformado mecánico que más se ha estudiado es la laminación. En todos estos estudios se ha pretendido expresar las presiones y fuerzas que se generan durante el proceso, en función de variables geométricas y de la resistencia del material (figura 5.20). Dada la variedad de casos que pueden presentarse esto ha resultado en soluciones complejas.

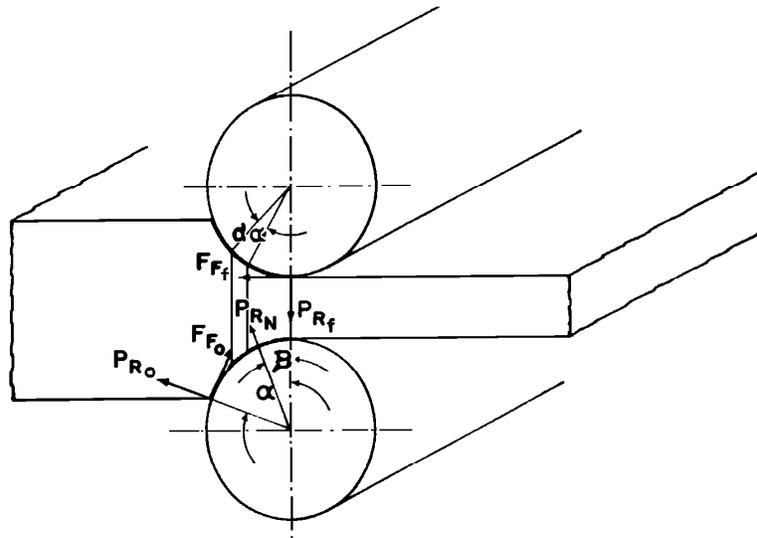


FIGURA 5.20 Distribución de presiones durante la laminación

La ecuación diferencial de equilibrio para un material que se deforma entre rodillos es común para todas las teorías. Para desarrollarla, se deberá cumplir que:

- Existan condiciones de deformación plana.
- No se considera la deformación elástica de los rodillos.
- La velocidad periférica de los rodillos sea constante.

Las condiciones mencionadas básicamente se cumplen para laminación en frío. Para el caso de laminación en caliente no se podrá resolver, de forma analítica, la ecuación diferencial resultante, debido a la compleja dependencia que existe del esfuerzo de cedencia con respecto a la velocidad de deformación y temperatura; asimismo, se complica la solución analítica al no poder justificar la simplificación de dicha ecuación, ya que los ángulos de mordedura son mucho mayores.

En la figura 5.21 se puede observar que al realizar un balance de fuerzas antes y después del punto neutro la única diferencia será el sentido y, por tanto, el signo de la fuerza de fricción.

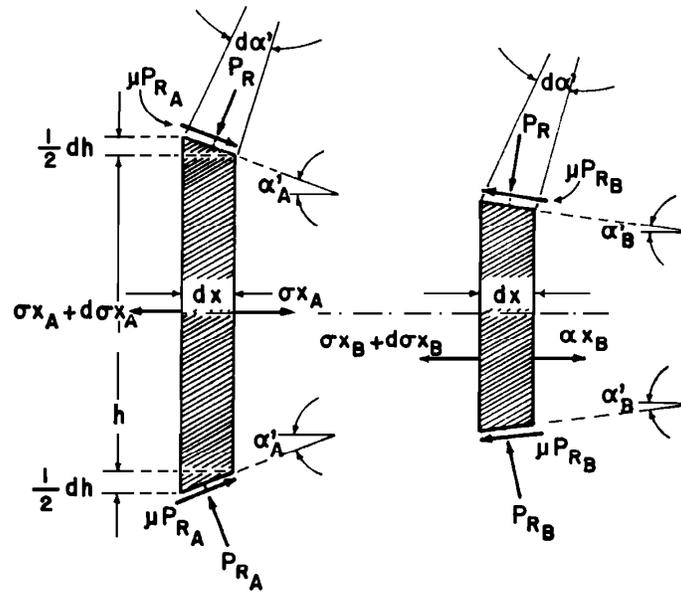


FIGURA 5.21 Antes y después del punto neutro

Como $\sum f_x = 0$, por su movimiento uniforme.

Variables empleadas:

p_R = presión radial

σ_x = esfuerzo longitudinal debido a la presencia del devanador o freno

α' = ángulo definido con respecto al plano de salida

x = coordenada paralela al eje de laminación

a) Carga debida a esfuerzos longitudinales (considerar unidad de ancho)

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

b) Carga debida a la fuerza de fricción

μp_R = esfuerzo cortante debido a la fricción, su área de aplicación es (deformación plana):

$$A = \frac{dx}{\cos \alpha}$$

Considerando que se aplica en los dos rodillos:

$$\pm 2p_R \mu \frac{dx}{\cos \alpha} \cos \alpha \quad \text{carga de fricción}$$

signo de las figuras:

(+) neutro a la salida

(-) entrada a neutro

Por último, se tiene la carga debida a la presión radial:

$$p_R A \qquad \text{fuerza radial}$$

donde:

$$A = \frac{dx}{\cos \alpha}$$

$p_R \sin \alpha =$ proyección sobre el eje x

Fuerza con respecto al eje x debida a p_R : (considerando el efecto de los 2 rodillos)

$$2 p_R \frac{dx}{\cos \alpha} \sin \alpha$$

De lo anterior se tiene que:

$$\Sigma f_x = 0$$

$$\sigma_x + d\sigma_x \quad h + dh \quad - \sigma_x h \pm 2\mu p_R \frac{dx}{\cos \alpha} \cos \alpha + 2 p_R \frac{dx}{\cos \alpha} \sin \alpha = 0$$

Desarrollando la ecuación anterior se llega a:

$$\sigma_x dh + hd\sigma_x + d\sigma_x dh \pm 2\mu p_R d\alpha + 2 p_R \operatorname{tg} \alpha dx = 0$$

despreciando el producto de dos diferenciales:

$$d\sigma_x dh = 0$$

$$\sigma_x dh + hd\sigma_x \pm 2\mu p_R d\alpha + 2 p_R \operatorname{tg} \alpha dx = 0$$

Por otra parte:

$$\sigma_x dh + hd\sigma_x = d \sigma_x h$$

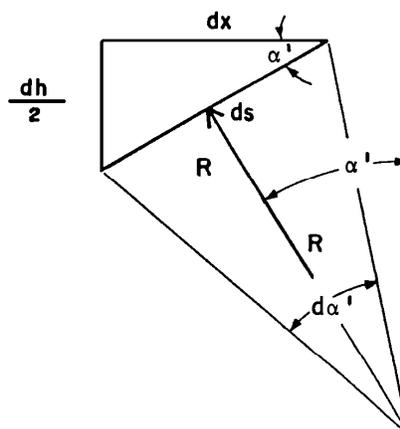


FIGURA 5.22

Colocando todos los términos en función de $Rd\alpha$ (coordenadas cilíndricas)

$$ds = Rd\alpha$$

$$dx = Rd\alpha \cos \alpha$$

$$\frac{dh}{2} = Rd\alpha \sin \alpha$$

Como:

$$\operatorname{tg} \alpha \cos \alpha = \frac{\operatorname{sen} \alpha}{\cos \alpha} \cos \alpha = \operatorname{sen} \alpha$$

Se tiene entonces que:

$$d \sigma_x h \pm 2\mu p_R R \cos \alpha d\alpha + 2p_R R \operatorname{sen} \alpha d\alpha = 0$$

Despejando $d \sigma_x h$

$$d \sigma_x h = -2p_R R \operatorname{sen} \alpha \pm \mu \cos \alpha d\alpha$$

Reordenando

$$\frac{\partial \sigma_x h}{\partial \alpha} = 2\sigma_x R \operatorname{sen} \alpha \pm \mu \cos \alpha \quad (5.18)$$

A la expresión anterior se le conoce como ecuación de Von Karman, por haber sido el primero en desarrollarla (1925).

CÁLCULO DE LA CARGA PARA LAMINADO EN FRÍO

En este caso los ángulos de contacto son muy pequeños, usualmente menores a 6° por lo que se pueden considerar las siguientes simplificaciones:

$$\operatorname{sen} \alpha = \alpha$$

$$\cos \alpha = 1$$

entonces:

$$\frac{d \sigma_x h}{d\alpha} = 2p_R \alpha \pm \mu$$

ecuación diferencial que se puede resolver considerando que el criterio de fluencia según Von Mises se puede expresar como:

$$\sigma_1 - \sigma_3 = \sigma'_0$$

donde:

σ'_0 = esfuerzo de cedencia considerando deformación biaxial

σ_1, σ_3 = esfuerzos principales

Analizando el diagrama de la figura 5.22, se tiene que los esfuerzos principales se puede aproximar a través de σ_x, p :

p = presión de laminación

$\sigma_1 = \sigma_x$

$\sigma_3 = p$

Por lo tanto:

$$\sigma_x - (-p) = \sigma_0$$

Realizando $\sum f_x = 0$ para determinar la relación entre la presión radial y la presión de laminación.

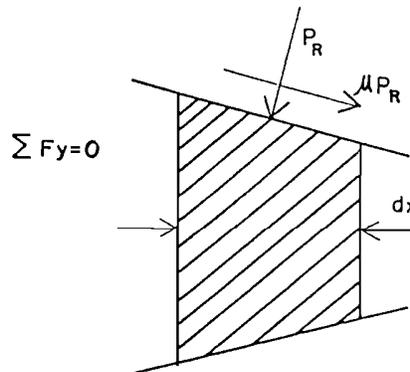


FIGURA 5.23

$$p_R \frac{dx}{\cos \alpha} \cos \alpha \pm \mu p_R \frac{dx}{\cos \alpha} \sin \alpha - p dx = 0$$

$$p = p_R (1 \pm \mu \tan \alpha)$$

De lo anterior y la condición de fluencia:

$$d(h(\sigma_0 - p)) = 2 p_R R (\alpha \pm \mu) dx$$

de la ecuación anterior se obtiene:

$$d \left(h \sigma_0 \left(1 - \frac{p}{\sigma_0} \right) \right) = 2 p_R R (\alpha \pm \mu) dx$$

la diferencial de un producto se puede escribir:

$$h\sigma_0 d\left(1 - \frac{p}{\sigma_0}\right) + \left(1 - \frac{p}{\sigma_0}\right) d(h\sigma_0) = 2p_R R(\alpha \pm \mu) d\alpha$$

Debido a que cuando el espesor se reduce, el límite de fluencia se incrementa, entonces el producto:

$$h\sigma_0 = \text{constante} \quad \therefore \quad d(h\sigma_0) = 0$$

Además,

$$h\sigma_0 d\left(1 - \frac{p}{\sigma_0}\right) = -h\sigma_0 d\left(\frac{p}{\sigma_0}\right)$$

Sustituyendo todo lo anterior

$$-h\sigma_0 d\left(\frac{p}{\sigma_0}\right) = 2p_R R(\alpha \pm \mu) d\alpha$$

y reordenando:

$$\frac{d\left(\frac{p}{\sigma_0}\right)}{\frac{p}{\sigma_0}} = \frac{2R(\alpha \pm \mu) d\alpha}{h}$$

Para integrar lo anterior se requiere que el espesor h se determine en función de la posición

$$h = h_f + dh$$

de la figura:

$$\frac{dh}{2} = R - R \cos \alpha$$

$$dh = 2R(1 - \cos \alpha)$$

cuando α es pequeño ($\alpha \leq 6^\circ$)

$$\cos \alpha = 1 - \frac{(\alpha)^2}{2}$$

por lo tanto:

$$dh = 2R \left[1 - \left(1 - \frac{(\alpha)^2}{2} \right) \right]$$

$$dh = R(\alpha)^2$$

$$h = h_f + R(\alpha)^2$$

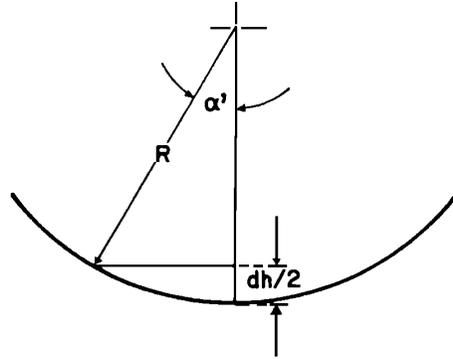


FIGURA 5.24

Adicional a lo anterior se tiene:

$$p = p_R(1 \pm \mu \tan \alpha)$$

De nuevo, considerando ángulos muy pequeños $\alpha \leq 6^\circ$

$$\mu \tan \alpha \ll 1$$

por lo que:

$$p \approx p_R$$

Sustituyendo

$$\frac{d\left(\frac{p_R}{\sigma_0}\right)}{\frac{p_R}{\sigma_0}} = \frac{2R(\alpha \pm \mu)d\alpha}{h_f + R(\alpha)^2}$$

$$\frac{d\left(\frac{p_R}{\sigma_0}\right)}{\frac{p_R}{\sigma_0}} = \frac{2R\alpha d\alpha}{h_f + R(\alpha)^2} \pm \frac{2R\mu d\alpha}{h_f + R(\alpha)^2}$$

reordenando se obtiene:

$$\frac{d\left(\frac{p_R}{\sigma_0}\right)}{\frac{p_R}{\sigma_0}} = \frac{2\alpha d\alpha}{\frac{h_f}{R} + (\alpha)^2} \pm \frac{2\mu d\alpha}{\frac{h_f}{R} + (\alpha)^2}$$

La ecuación se integra de acuerdo:

$$\int \frac{2\alpha d\alpha}{\frac{h_f}{R} + (\alpha)^2} = \int \frac{du}{u} = \ln u + C$$

donde:

$$u = \frac{h_f}{R} + (\alpha)^2$$

$$du = 2\alpha d\alpha$$

$$\int \frac{2\mu d\alpha}{h_f / R + (\alpha)^2} = 2\mu \int \frac{du}{a + bu^2}$$

donde:

$$a = h_f / R$$

$$b = 1$$

$$u = \alpha$$

$$2\mu \int \frac{du}{a + bu^2} = 2 \frac{\mu}{\sqrt{ab}} \left(\operatorname{tg}^{-1} \sqrt{\frac{a}{b}} \right) u + C$$

de lo anterior se tiene:

$$\operatorname{Ln} \left(\frac{p_R}{\sigma_0} \right) = \operatorname{Ln} \left[\left(\frac{h_f}{R} \right) + (\alpha)^2 \right] \pm 2\mu \left(\frac{R}{h_f} \right)^{\frac{1}{2}} \operatorname{tg}^{-1} \left[\left(\frac{h_f}{R} \right)^{\frac{1}{2}} \right] \alpha + C$$

Se puede hacer un cambio de variable para facilitar el manejo de la ecuación.

Se define H :

$$H = 2 \left(\frac{R}{h_f} \right)^{\frac{1}{2}} \operatorname{tg}^{-1} \left[\left(\frac{h_f}{R} \right)^{\frac{1}{2}} \alpha \right]$$

Por lo tanto:

$$\operatorname{Ln} \left(\frac{p_R}{\sigma_0} \right) = \operatorname{Ln} \left[\frac{h_f}{R} + (\alpha)^2 \right] \pm \mu H + C$$

donde se obtiene:

$$\frac{p_R}{\sigma_0} = C \left[\frac{h_f}{R} + (\alpha)^2 \right] \exp(\pm \mu H)$$

Para evaluar la constante de integración:

a) Condiciones de salida:

$$\alpha = 0 \rightarrow H = 0$$

considerando el esfuerzo de cedencia a la salida $\sigma_0 = \sigma_{0f}$

considerando un esfuerzo longitudinal al eje de laminación σ_{xf}

De la solución se obtiene:

$$C = \frac{p_R}{\sigma_{0f}} \frac{R}{h_f} \quad \text{a la salida}$$

Sustituyendo, se tiene la ecuación para la determinación de la presión radial de punto neutro a la salida, además del balance de fuerzas con respecto al eje y , se tiene:

$$p_{R0} = p_0$$

y la condición de fluencia de Von Mises

$$\sigma_1 - \sigma_3 = \sigma_0 \quad \sigma_1 = p \quad \sigma_3 = \sigma_{xf}$$

$$p_{R0} = \sigma_{0f} - \sigma_{xf}$$

Por lo tanto:

$$p_R = (\sigma_{0f} - \sigma_{xf}) \frac{R}{h_f} \left[\frac{h_f}{R} + (\alpha)^2 \right] \exp(\mu H)$$

$$\text{sen } \alpha = \frac{L_p}{R} + \frac{R \Delta h}{R} \frac{1}{2} = \left(\frac{\Delta h}{R} \right)^{\frac{1}{2}}$$

para ángulos muy pequeños

$$\text{sen } \alpha \approx \alpha \quad \therefore \quad (\alpha)^2 = \frac{\Delta h}{R}$$

Sustituyendo para simplificar

$$p_R = (\sigma_{0f} - \sigma_{xf}) \frac{R}{h_f} \left(\frac{h_f}{R} + \frac{\Delta h}{R} \right) \exp(\mu H)$$

por lo tanto:

$$p_R = (\sigma_{0f} - \sigma_{xf}) \frac{\bar{h}}{h_f} \exp(\mu H) \quad (5.19)$$

Evaluación de la constante de la entrada al punto neutro:

para la condición de entrada se tiene

$$H = H_0$$

β ángulo de mordedura

$$H_0 = 2 \left(\frac{R}{h_f} \right)^{1/2} \operatorname{tg}^{-1} \left[\left(\frac{h_f}{R} \right)^{1/2} \theta \right]$$

para cualquier punto entre θ (ángulo de mordedura) y β (ángulo al neutro):

$$\frac{p_R}{\sigma_0} = C \left[\frac{h_f}{R} + (\alpha)^2 \right] \exp(-\mu H) \hat{a} * a$$

para la entrada:

$$C = \frac{p_R}{\sigma_0} \left[\frac{h_f}{R} + (\alpha)^2 \right] \exp(\mu H_0)$$

cuando $\alpha = \theta$ (entrada):

$$\left[\frac{h_f}{R} + (\alpha)^2 \right]^{-1} = \left(\frac{h_f + \Delta h}{R} \right)^{-1} = \left(\frac{h_f}{R} \right)^{-1} = \frac{R}{H_0}$$

sustituyendo:

$$\frac{p_R}{\sigma_0} = \frac{\sigma_{0f} - \sigma_{xf}}{\sigma_0} \frac{R}{H_0} \frac{\bar{h}}{R} \exp[\mu(H_0 - H)]$$

Presión radial de la entrada al neutro:

$$p_R = (\sigma_{00} - \sigma_{x0}) \frac{\bar{h}}{h_0} \exp[\mu(H_0 - H)] \quad (5.20)$$

Las ecuaciones (5.19) y (5.20), desarrolladas anteriormente, permiten calcular la presión radial para cualquier posición, de esto la carga puede ser evaluada como:

$$P = R'b \int_0^\theta p d\alpha \quad (5.21)$$

Cálculo de la carga para laminado en caliente

Las teorías desarrolladas para laminado en caliente no han alcanzado el grado de avance que se tiene para laminado en frío, debido principalmente a que las condiciones de fricción (varía punto a punto en función de materiales, lubricación y temperatura) y el esfuerzo de cedencia es una función compleja de la temperatura y de la velocidad de deformación, para un material dado.

$$\dot{\epsilon} = \frac{V_f}{h} = \frac{2wR \operatorname{sen} \alpha'}{h_f + D(1 - \cos \alpha')} \quad (5.22)$$

De (5.22) se comprueba que la máxima velocidad de deformación se presenta cerca de la entrada del material a los rodillos, debiendo tener en cuenta que la rapidez de deformación varía además con la distancia del elemento diferencial al rodillo. Con la finalidad de realizar una aproximación se tiene que la velocidad de deformación promedio está dada por:

$$\bar{\varepsilon} = \frac{1}{\theta} \int_0^\theta \varepsilon d\alpha$$

$$\bar{\varepsilon} = \frac{1}{\theta} \int_0^\theta \frac{(2\omega R \operatorname{sen} \alpha) d\alpha}{h_f + 2R(1 - \cos \alpha)}$$

si

$$h = h_f + 2R(1 - \cos \alpha)$$

$$dh = 2R \operatorname{sen} \alpha d\alpha$$

Donde:

$$\bar{\varepsilon} = \frac{\omega}{\theta} [\operatorname{Ln}(hf + 2R(1 - \cos \alpha)) - \operatorname{Ln}(hf)]$$

$$\bar{\varepsilon} = \frac{\omega}{\theta} \operatorname{Ln} \frac{h_0}{hf}$$
(5.21)

v_R = velocidad radial o periférica de los rodillos
 r = reducción
 ω = velocidad de giro del rodillo

A partir de la ecuación diferencial básica de laminación (ecuación de Von Karman 5.18):

$$\frac{d(\sigma_x h)}{d\alpha} = 2p_R(\operatorname{sen} \alpha \pm \mu \cos \alpha)$$
(5.22)

y sustituyendo una solución obtenida por Orowan con las aproximaciones propuestas por Bland y Ford, Sims desarrolló una ecuación para la carga de laminación, que en su forma simplificada queda:

$$P = \sigma_0 b L_p Q$$
(5.23)

Donde Q es función compleja de la reducción, del espesor y del coeficiente R/h

$$Q = \frac{\sqrt{hf}}{4\Delta h} \left[\pi \tan^{-1} \sqrt{\frac{\Delta h}{h_0}} - \sqrt{\frac{R}{h_0}} \left[\operatorname{Ln} \left(\frac{h_n^2}{h_0 h_f} \right) \right] \right] - \frac{\pi}{4}$$

h_n = espesor al punto neutro

Dicho valor puede ser obtenido de la figura 5.25.

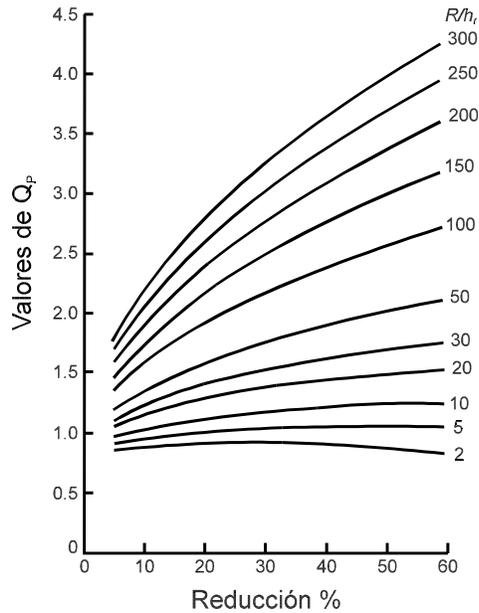


FIGURA 5.25

Existen otras ecuaciones aplicables a laminado en caliente, entre otras se encuentran las que desarrollaron Bland y Ford empleando análisis de campo de líneas de deslizamiento:

$$P = \frac{\sigma_y}{\sqrt{3}} b L_p \left[\frac{\pi}{2} + \frac{L_p}{(h_0 + h_f)} \right] \quad (5.24)$$

El par podrá ser calculado mediante:

$$T = \frac{\sigma_y}{\sqrt{3}} b L_p^2 \left[1.6 + 0.91 \frac{L_p}{(h_0 + h_f)} \right] \quad (5.25)$$

Danton y Crane han propuesto para la carga:

$$P = \frac{\sigma_y}{\sqrt{3}} b L_p \left[1.31 + 0.53 \frac{L_p}{(h_0 + h_f)^{1/2}} \right] \quad (5.26)$$

El esfuerzo de cedencia a la deformación homogénea se puede obtener gráficamente a partir de la reducción, temperatura y velocidad de deformación.

Cálculo de la carga cuando se tienen enrolladores o frenos

El efecto de proporcionar tracción tanto anterior como posterior, cuando se lamina el material, puede comprenderse fácilmente empleando el criterio de Von Mises para deformación plana:

$$\sigma_1 - \sigma_3 = \bar{\sigma}_0$$

Sustituyendo valores:

$$p - \sigma_h = \bar{\sigma}_0$$

Donde σ_h representa un esfuerzo de tracción a lo largo del eje de laminación. Esto significa que la carga aplicada por el enrollador o freno reduce en igual proporción la aplicada por los rodillos para llevar a efecto el proceso de laminación. Dicha práctica da como resultado un menor desgaste de los rodillos, mejor acabado y uniformidad en el espesor del material. De lo anterior se tiene que la carga aplicada por los rodillos será:

$$P_t = P \left[1 - \frac{\sigma_a + \sigma_b}{\sigma_0} \frac{\beta}{\alpha} \right]$$

donde:

P_t = carga requerida cuando son aplicados esfuerzos de tensión a lo largo del eje de laminación

σ_a = esfuerzo longitudinal debido al freno

σ_b = esfuerzo longitudinal debido al enrollador

P = carga necesaria para producir la misma deformación sin la presencia de la carga longitudinal

α = ángulo de mordedura

β = ángulo neutro

Cálculo del par y la potencia

La potencia necesaria para laminar un material se consume principalmente en cuatro puntos; (a) Deformación del material, (b) Pérdidas debidas a fricción en los rodamientos, (c) Pérdidas en reductores de velocidad y en la transmisión en general, (d) Pérdidas de tipo eléctrico en motores y generadores.

Las pérdidas producidas por enrolladores y frenos también deberán ser consideradas en este punto.

Obviamente, el valor más representativo es el necesario para deformar el material. Para calcular entonces este punto será necesario conocer la carga de laminación, la cual se distribuye de acuerdo con lo indicado en la figura 5.26:

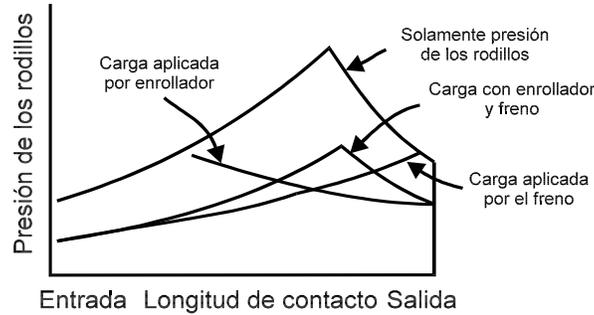


FIGURA 5.26 Distribución de la carga de laminación

Sin embargo, se puede considerar que la carga concentrada P de efecto equivalente se encuentra aplicada a una distancia a del plano que contiene a los ejes de rotación de los rodillos. Para calcular el brazo de palanca a , se procede de la siguiente manera:

Se define una nueva variable λ

$$\lambda = \frac{a}{L_p} \tag{5.27}$$

para laminado en caliente se puede considerar que:

$$\lambda = 0.5$$

En el laminado en frío se debe considerar una corrección por el aplastamiento elástico sufrido por los rodillos, de acuerdo con Ford:

$$\therefore \begin{aligned} \lambda &< 0.5 \\ 0.43 &\leq \lambda \leq 0.48 \end{aligned}$$

El par de laminación efectivo:

$$T = 2Pa \tag{5.28}$$

La potencia será entonces:

$$\dot{W} = T\omega \tag{5.29}$$

Coefficiente de fricción

La fricción existente entre los rodillos y el material durante el proceso es de gran importancia para un adecuado desarrollo de éste. Por un lado es una función compleja de la velocidad, temperatura, material, acabado de los rodillos, lubricante (refrigerante) empleado y el material que se va a laminar; además, varía punto a punto con respecto al arco de contacto. Todo esto hace sumamente complicada su correcta medición, por lo que en todas las teorías de laminación se toma el coeficiente de rozamiento como un valor constante.

Para laminado en frío con empleo de lubricante se recomienda que el valor de éste varíe entre 0.05 y 0.10, mientras que para el laminado en caliente es común considerar valores superiores a 0.20. Para condiciones sin deslizamiento, como ejemplo se tiene que para laminado de acero, con rodillos de este mismo material, a una temperatura de 1100 °C y aplicando grafito coloidal disuelto en agua como lubricante, el coeficiente de fricción varía de 0.20 a 0.40. Es de suma trascendencia el valor de dicho coeficiente, ya que limitará el ángulo de contacto máximo según:

$$\mu = \tan \alpha$$

Además, el mínimo espesor de la hoja metálica que va a ser producida será proporcional al coeficiente de fricción.

$$h_{\min} \approx c\mu\sigma_0 R \quad (5.30)$$

Por último, se tiene que un incremento en el coeficiente de fricción redundará en un desplazamiento del punto neutro hacia la entrada y, por tanto, en un aumento de la carga y potencia demandada para el proceso. Aun cuando la ecuación antes expuesta podría ser aplicada para obtener el coeficiente de fricción, el resultado obtenido no será preciso, por lo que este procedimiento se descarta.

Otros métodos han sido empleados basándose en la carga y el par:

$$\mu = \frac{T_1}{PR} \quad (5.31)$$

T_1 = Par de accionamiento de un rodillo

Es posible calcularlo también mediante mediciones del avance S donde:

$$S = \frac{1}{4} \left[\frac{r}{1-r} \right] \left[1 - \frac{\alpha}{2\mu} \right]^2 \quad (5.32)$$

El avance se define como la diferencia relativa entre la velocidad de salida del material y la de los rodillos:

$$S = \frac{v_f - v_R}{v_R} \quad (5.33)$$

donde:

v_f = Velocidad de salida del material

v_R = Velocidad periférica de los rodillos

MÍNIMO ESPESOR. La deformación elástica de los rodillos se incrementa con la presión de laminación, lo cual da como resultado que en ocasiones los rodillos se deformen elásticamente con mayor facilidad a que el material lo haga plásticamente. Por lo tanto para un material con condiciones de deformación especificadas se llega al caso en el que no pueda ser reducido adicionalmente el espesor de la hoja metálica.

Se ha comprobado que se pueden alcanzar espesores más pequeños cuando se emplean rodillos de menor diámetro. Un análisis más completo del problema demuestra que el espesor límite es proporcional al coeficiente de fricción, al radio del rodillo y al esfuerzo de cedencia del material deformado e inversamente proporcional al módulo de elasticidad de los rodillos.

$$h_{\min} \propto \sigma_0 \mu R$$

Defectos en los procesos de laminado

Los defectos que presentan los productos laminados tienen dos orígenes principales:

- a) Los provenientes del material tales como heterogeneidad, rechupes y porosidad. Para evitar estos problemas se descarta la cabeza del lingote, eliminando así la zona de rechupes. Dado que el proceso tiene un efecto mezclador y de afine de grano, es posible entonces eliminar la estructura de fundición, así como la porosidad interna y la segregación, con lo que se limitan sus efectos y se da como resultado notables mejoras en las características mecánicas de los productos obtenidos. Para garantizar los efectos benéficos anteriormente mencionados será necesario una reducción total de cuando menos un 75%, además de que la temperatura final no sea elevada.
- b) Los generados por prácticas inadecuados durante la laminación o simplemente inherentes al proceso. Como ejemplo se tiene que el espesor del material después de pasar entre los rodillos no será igual a la separación original de éstos (sin carga), sino que resultará un poco mayor.

Esta diferencia se puede explicar con base en la deformación elástica que sufre la estructura del laminador al paso del material a través de los rodillos.

Los rodillos deben estar perfectamente paralelos, ya que de lo contrario el espesor de la hoja no será uniforme. Exceso de deformación durante el paso, flexión de los rodillos o su coronamiento excesivo, provocarán que la deformación a lo ancho de la hoja no sea uniforme lo que redundará en ondulaciones, pandeo en la hoja y rompimientos en la punta (dando lugar a ramificaciones), como se puede ver en la figuras 5.27 y 5.28.

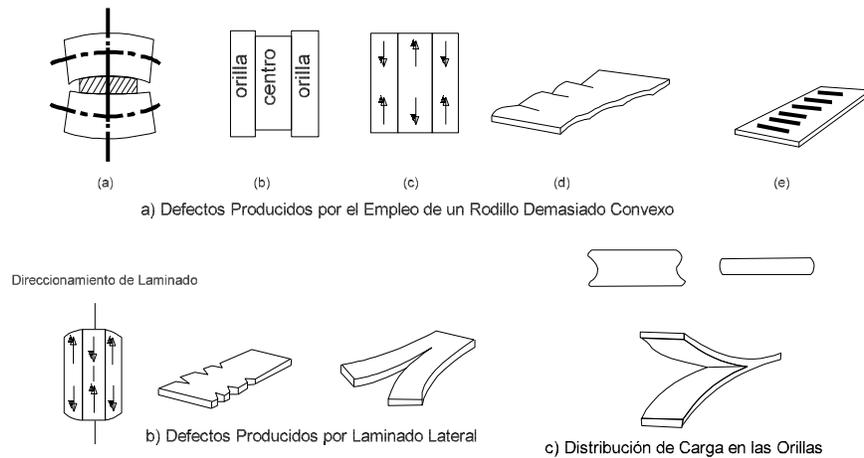


FIGURA 5.27 Defectos de laminación

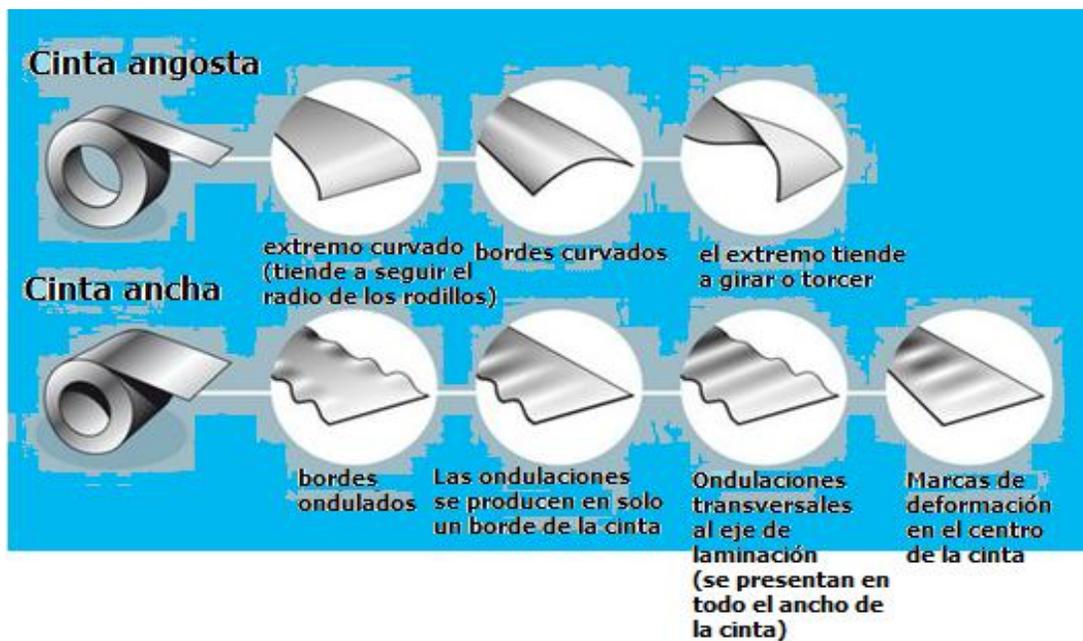


FIGURA 5.28 Defectos en chapa laminada

Cuando la reducción es muy elevada, de tal forma que la parte central se expande lateralmente más que la superficie, se da lugar a un abarrilamiento de las superficies laterales, teniéndose el efecto inverso para pequeñas reducciones:

$$\frac{\bar{h}}{L_p} > 2$$

Cuando el material presenta una discontinuidad o zona débil en su parte media, se puede dar lugar a una falla o al rompimiento de la punta de la cinta. A este tipo de fallas por su aspecto se le conoce como hocico de cocodrilo. Los defectos en las superficies laterales de la placa (agrietamiento, concavidad o convexidad) pueden ser minimizados o anulados a partir del empleo de cajas universales.

Control de proceso

Las grandes producciones comunes de los modernos trenes de laminación, vuelven imperativa la necesidad de que estas instalaciones estén bajo un control automático. El espesor del material laminado puede variar tanto a lo ancho como a lo largo.

Se han desarrollado métodos diversos, la mayoría revisa el espesor del material ya laminado, y se ajustan, de ser necesario, la separación de los rodillos del arreglo anterior. Las altas velocidades, características de las actuales instalaciones, han hecho forzoso el desarrollo de sistemas con elevada velocidad de respuesta, los cuales miden continuamente el espesor del material, ya sea a partir de rayos X o bien mediante el empleo de radioisótopos. En laminado en caliente la medición podrá ser efectuada de manera indirecta a partir de la carga requerida y de la curva característica. La señal de realimentación permitirá hacer los ajustes convenientes para minimizar el error.

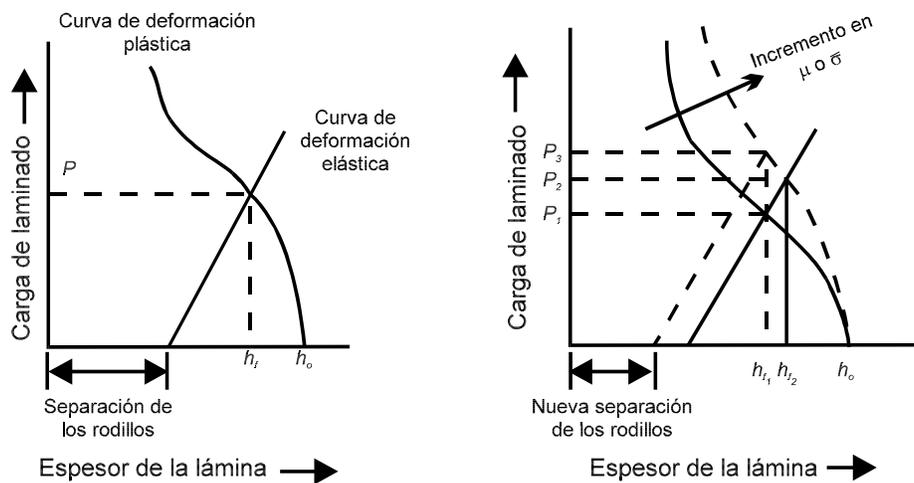


FIGURA 5.28 Uso de las curvas características para el cambio de las condiciones de laminación

Los sistemas correctivos implementados a la fecha han dado mejor resultado que aquéllos basados en la colocación de sensores a la entrada del material. Esto ha sido aplicado a nivel industrial, debido a la gran cantidad de variables a sensar e interpretar (esfuerzo de cedencia, espesor de entrada, temperatura, condición superficial), lo cual se suma a las altas velocidades de laminación, de hasta 50 m/s.

Independientemente de los controladores de espesor, es común el empleo de fotoceldas para controlar la tensión entre castillos, cuando se trabaja con trenes continuos o semicontinuos.

Geometría de las secciones del perfil laminado

Al laminar productos no planos, como varilla (figura 5.30), barras de diversas secciones, rieles, viguetas, etc., el proceso se complica aún más, ya que será necesario considerar el ensanchamiento y desarrollar una secuencia tal, que permita máximas reducciones así como uniformidad en la deformación. Por ejemplo, en la producción de barras redondas sigue la siguiente secuencia: cuadrado-óvalo-redondo; mientras que para barra cuadrada, se sigue: cuadrado-óvalo-redondo-óvalo-cuadrado (figura 5.29)

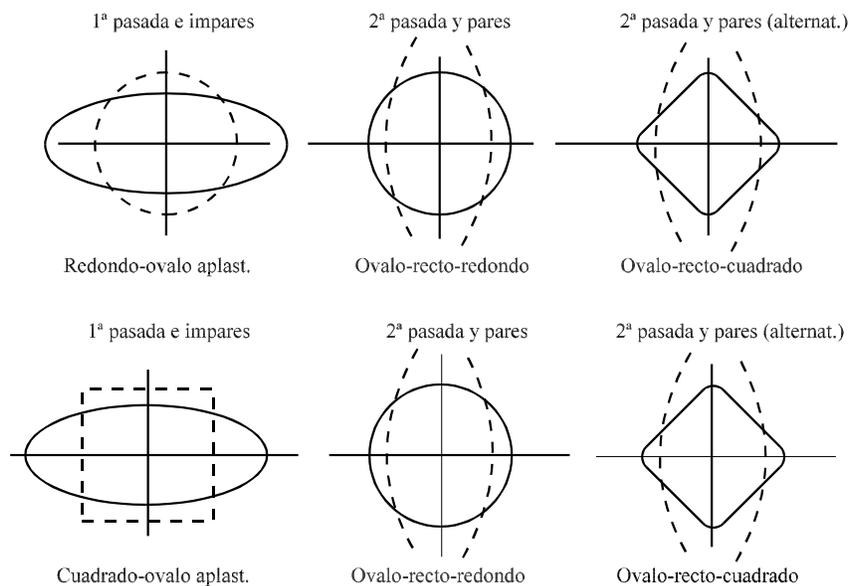


FIGURA 5.29 Secuencias de laminación



FIGURA 5.30 Barras de refuerzo para construcción

Es evidente que la realización de otros perfiles requiere de pasos más complicados, en función de la geometría de la sección transversal del perfil que se va a obtener (figura 5.31)

	B L O O M S									
Pasada										
1ª										
2ª										
3ª										
4ª										
5ª										
6ª										
7ª										
8ª										
9ª										
11ª										
12ª										
13ª										

FIGURA 5.31 Distintos métodos para laminar palanquilla

Durante la laminación se debe evitar la deformación del lingote o el pandeo del material. Como ejemplo de las reducciones obtenidas, se tiene la calibración que se aplica en la fabricación de varilla a partir de palanquilla de 0.1 m.



FIGURA 5.32 Laminación en caliente de perfiles estructurales



FIGURA 5.33 Perfiles estructurales obtenidos por laminación

Cálculo del ensanchamiento

En todos los desarrollos teóricos presentados anteriormente se desecha el ensanchamiento sufrido por el material. En la laminación de planchas o tiras de ancho considerable dicha aseveración es correcta, ya que la fricción en la dirección de laminación es mucho menor que con sentido transversal. Durante la laminación de barras angostas, el ensanchamiento del material es mayor, además de que en muchos casos, es deseable. Esto se debe a que la fricción lateral es de menor magnitud que en el caso anterior y, por lo tanto, la resistencia limita el flujo del material en sentido longitudinal.

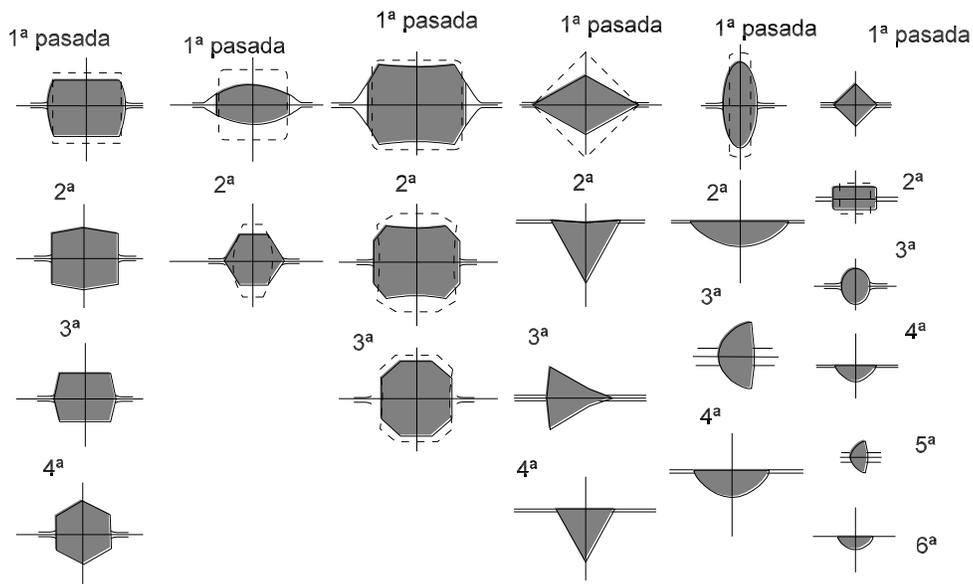


FIGURA 5.34 Laminación de perfiles hexagonales, octogonales, triangulares y media caña

Los factores que determinan la magnitud del ensanchamiento son:

- a) Reducción de altura
- b) Diámetro de los rodillos
- c) Tipo del material de los rodillos
- d) Tipo de material a laminar
- e) Temperatura del material
- f) Coeficiente de fricción entre el material y los rodillos
- g) Velocidad del proceso

Se ha comprobado que este último factor no tiene efectos para velocidades de 10 m/s. Arriba de esta velocidad, el ensanchamiento tiende a disminuir ligeramente, de ahí que la mayoría de las ecuaciones desarrolladas omitan dicho factor. Existe una gran cantidad de expresiones de complejidad y precisión muy variada, una de ellas es la implementada por Sven Ekelund, que aunque es compleja y necesita resolverse a partir de un proceso iterativo, garantiza resultados excepcionalmente buenos.

$$\frac{b_0^2 - b_f^2}{2} = 4m\sqrt{\rho\Delta h}\Delta h - 2m(h_0 + h_f)\sqrt{\rho\Delta h}Ln \frac{b_f}{b_0} \quad (5.35)$$

$$m = 1.6\mu \frac{\sqrt{r\Delta h} - 1.2\Delta h}{h_0 + h_f}$$

donde:

b_0 = Ancho inicial del material

b_f = Ancho final del material

ρ = Radio de trabajo de los rodillos

$$\rho = \frac{D_c + S_c - h_f}{2}$$

D_c = Diámetro del cuerpo de dos rodillos

S_c = Separación entre rodillos

El coeficiente de fricción está dado por

$$\mu = 1.05 - 0.0005 T$$

para rodillos de acero, y

$$\mu = 0.8 \cdot 1.05 - 0.0005 T$$

para rodillos de fundición vaciados en coquilla.

Donde

T = Temperatura de laminación en °C

Considerando el método de Newton-Raphson, la ecuación 5.35 se puede resolver como:

$$b_{fn} = b_{fn-1} - \frac{A - B - D}{b_{fn-1} + \frac{C}{b_{fn-1}}}$$

$$A = \frac{b_f^2 - b_0^2}{2}$$

$$B = 4m\sqrt{e\Delta h} \Delta h$$

Para dar solución a la expresión propuesta por Ekelund (5.35) se pueden utilizar métodos como el de Newton-Raphson, que se agiliza fácilmente mediante un programa de cómputo apropiado. El método de Ekelund fue desarrollado para productos planos, por lo que en el caso de no planos, será necesario simplificar la memoria de pasos a sus equivalentes de planos, procediendo entonces al cálculo. Para lograr, lo anterior A. Fennd propuso un método basado en el cálculo del rectángulo equivalente, en función de los puntos donde la sección de entrada intersecta al paso en cuestión.

Para definir el rectángulo equivalente de la sección de entrada, se toma como ancho la distancia entre los puntos de intersección. A continuación se calcula el área comprendida por el perímetro de la sección, hasta los puntos de intersección. La altura del rectángulo se calcula utilizando dos parámetros antes definidos. Este tipo de procedimientos es aplicable a las secuencias:

- Redondo-Óvalo-Redondo
- Cuadrado-Óvalo-Cuadrado
- Diamante-Diamante