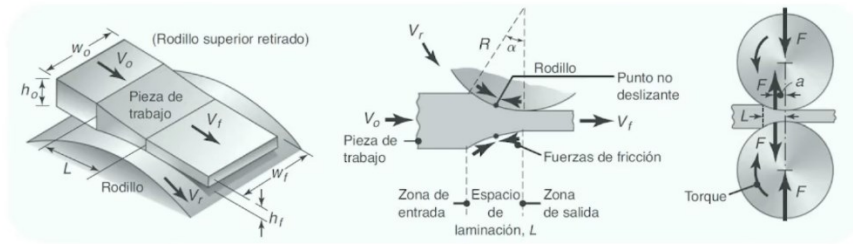


5. Problemas: Laminación



- Deformación plástica del material:

$$\epsilon = \ln \frac{h_o}{h_f}$$

donde h_o y h_f son los espesores inicial y final.

- Tensión promedio para deformar el material:

$$\bar{\sigma}_f = \frac{K \cdot \epsilon^n}{1+n}$$

K : coeficiente de resistencia (MPa)

n : exponente de endurecimiento

ϵ : deformación

- En la zona plástica, la tensión σ que produce la deformación ϵ :

$$\sigma = K \cdot \epsilon^n$$

- Fuerza de laminación:

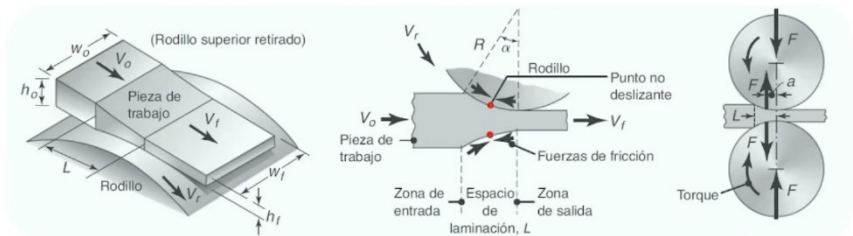
$$F = \bar{\sigma}_f \cdot L \cdot W_o$$

- Potencia requerida por un rodillo:

$$P = 2\pi \cdot N \cdot F \cdot L$$

- Ancho de la chapa: W

5. Problemas: Laminación

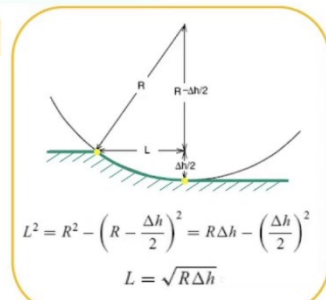


- Reducción del espesor: $d = h_o - h_f \Rightarrow d_{max} = \mu^2 \cdot R$ $\mu_{min} = \sqrt{d/R}$ $R_{min} = d/\mu^2$

- Longitud de contacto entre el material y los rodillos:

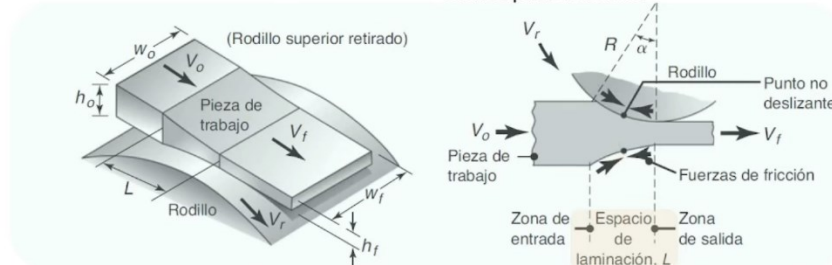
$$L = \sqrt{R(h_o - h_f)}$$

- Velocidad de giro de los rodillos: N
- Velocidad lineal tangencial de cada rodillo: V_r
- Velocidad de entrada del material a los rodillos: V_o
- Velocidad de salida del material a los rodillos: V_f



5. Problemas: Laminación

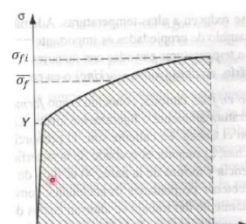
Conceptos básicos



Una vez en el espacio de laminación (cuando la chapa entra en contacto con los rodillos), el esfuerzo de deformación se aplica de forma continua sobre la chapa.

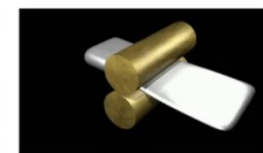
Sin embargo, es más eficiente analizar el proceso usando la 'tensión promedio' ($\bar{\sigma}_f$) durante la deformación, que usando una secuencia de valores instantáneos (σ_f).

Es por ello que en las fórmulas usamos $\bar{\sigma}_f$



σ_f : tensión instantánea requerida para continuar la deformación del material.

$\bar{\sigma}_f$: tensión promedio



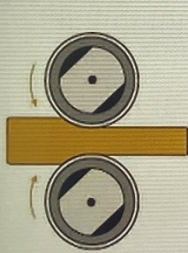
<https://es.wikipedia.org/wiki/Embutido#C358n3n>



B. Configuración de los Laminadores

Los laminadores están compuestos por uno o varios bastidores (stands) de laminación que contienen a los cilindros. Los laminadores pueden ser reversibles y continuos. Los laminadores se clasifican en función de la disposición y número en el que están dispuestos los rodillos.

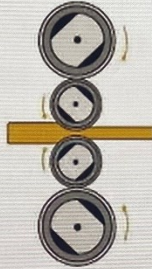
Dos en Alto



Tres en Alto



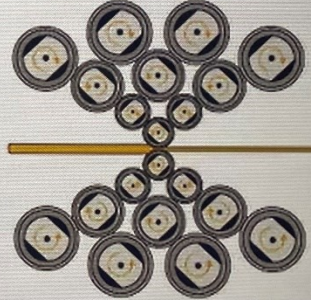
Cuatro en Alto



Seis en Alto

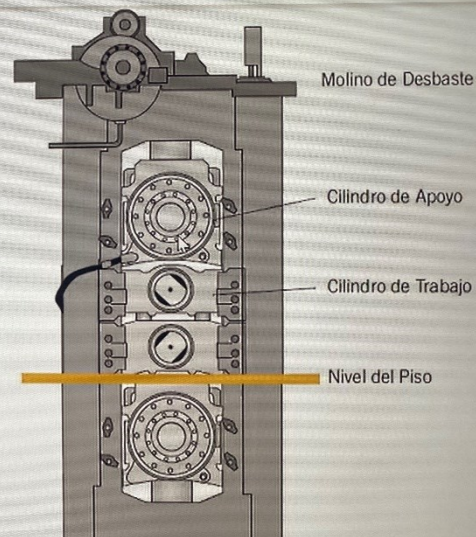


Veinte en Alto



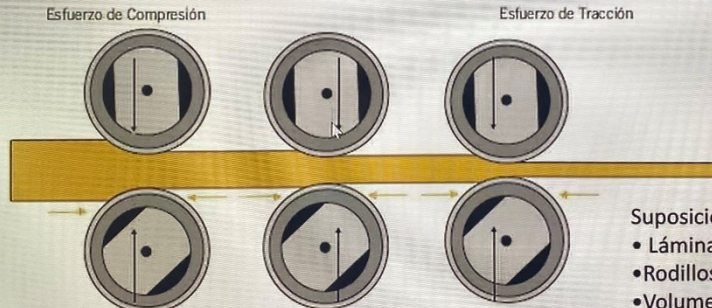
Disposición de Cilindros	Cantidad de Cilindros	Ejemplo
2 en alto	Dos cilindros laminadores por bastidor, uno arriba del otro con sentido de rotación invertido.	Trenes Desbastadores y Molinos tipo Skin Pass.
4 en alto	Dos cilindros laminadores de trabajo por bastidor y dos cilindros de apoyo abajo y arriba de los de trabajo, de mayor diámetro.	Trenes Laminadores en Frío y en Caliente.
3 en alto	Tres niveles de cilindros de laminación, los rodillos de apoyo giran en una dirección y el rodillo de enmedio en dirección opuesta.	Trenes Laminadores Reversibles.
6 en alto	Dos rodillos de trabajo en contacto con la lámina, dos rodillos intermedios y dos rodillos de apoyo.	Molinos Fríos con producción de lámina muy delgada.
20 en alto o Sendzimir	20 rodillos de los cuales dos son de trabajo y están en contacto con la lámina, cuatro rodillos tapers con movimiento axial, 6 intermedios y 8 de apoyo.	Molinos Fríos Reversibles del tipo Sendzimir para lámina fría muy delgada.

La selección de la configuración depende de factores tales como el monto de la inversión, fuerzas de separación y las características del producto a fabricar. El siguiente gráfico muestra un bastidor de laminación con disposición 4 en alto. En todos los casos la transmisión de potencia se realiza sobre los cilindros de trabajo. Los de apoyo giran por rozamiento sobre los anteriores y su función es permitir aumentar las fuerzas de laminación, limitando la deformación (flexión) de los cilindros de trabajo.



C. Esfuerzos de Compresión y Tracción

- **Esfuerzo de Compresión:** Cuando el material está sometido a esfuerzo en una sola caja de laminación, actúa solamente el esfuerzo de Compresión disminuyendo el espesor.
- **Esfuerzo Combinado de Compresión y de Tracción:** Cuando el material es laminado simultáneamente en dos o más cajas de laminación actúan ambos esfuerzos. La compresión actúa sólo disminuyendo espesor, mientras que el tiro permite obtener mayores deformaciones totales y mantener el ancho.



Fuente: Ternium - Siderar

Suposiciones

- Lámina infinita
- Rodillos uniformes y rígidos
- Volumen Constante

El objetivo del Proceso de Laminación en Caliente (LAC) es reducir el espesor del planchón o desbaste proveniente de la Colada Continua transformándolo en bobinas a través de una deformación efectuada a alta temperatura. Para cumplir este objetivo se desarrollan las siguiente etapas:

1. Recalentamiento del Planchón
2. Desbastado del Planchón
3. Laminado de la Chapa
4. Enfriamiento
5. Bobinado



En este proceso la materia prima utilizada son planchones de 200 mm de espesor, ancho entre 720 y 1525 mm y largo entre 4000 y 5950 mm. Los productos son bobinas de 1.6 a 12.7 mm de espesor. El ancho del planchón se mantiene constante al laminarse, por lo que la reducción de espesor es inversamente proporcional al alargamiento de la chapa, siguiendo la Ley de Volumen Constante:

Fuente: Ternium - Siderar

$$\text{Espesor de Entrada} \times \text{Largo de Entrada} = \text{Espesor de Salida} \times \text{Largo de Salida}$$

La siguiente tabla muestra un ejemplo de la variación de dimensiones en el proceso de Laminación:

	Entrada del Laminador		Salida del Laminador
Dimensión	Desbaste (en mm)	Bobina LAC (en mm)	Variación
Espesor	200	1.6	Reducción: 99% (100 veces)
Ancho	1220	1220	Constante
Largo	5800	580000	Alargamiento: 99% (100 veces)

$$\% \text{ de Reducción} = \frac{\text{espesor inicial} - \text{espesor final}}{\text{espesor inicial}} \times 100$$

El rango de reducción de Espesores que puede obtenerse en el Proceso de Laminación en Caliente es entre 94 y 99%.

El equipamiento utilizado para obtener las Bobinas LAC consiste en un Laminador de chapas en caliente de primera generación compuesto por 5 hornos de recalentamiento de planchones, un laminador desbastador de 5 cajas, un laminador terminador continuo de 6 cajas, una mesa de enfriamiento de 98 m de longitud y dos bobinadoras. Las bobinas LAC previas a su venta a clientes finales, son templadas o temperadas (Proceso de planchado en frío conocido como Skin Pass). La capacidad instalada anual del Laminador en Caliente es de 2750 Mton.

Fuente: Ternium - Siderar

Descripción del Proceso LAC

El proceso de Laminación en caliente es un tratamiento termomecánico del acero que permite deformarlo con facilidad y en grandes volúmenes.

El acero tiene la particularidad de cambiar su estado cristalino con la temperatura. A temperatura ambiente su estructura se denomina ferrítica y es cúbica centrada en el cuerpo, mientras que a temperaturas elevadas (mayores de 850°C) se denomina austenítica* y es cúbica centrada en las caras. A fin de que no se produzcan cambios en la estructura durante el proceso de laminado, la temperatura a lo largo del mismo, en general debe estar por encima de los 850°C. Para ello, la temperatura de recalentamiento de los desbastes debe ser de aproximadamente 1250°C.

Las etapas que componen la Laminación en Caliente son: Recalentamiento, Laminación de desbastado o gruesa (roughing), Laminado de terminación (finishing), Enfriamiento, Bobinado y Temperado.

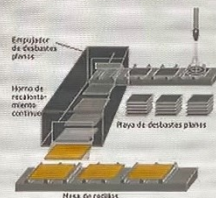
* El acero al estar en fase austenítica tiene la característica que inmediatamente al cese de cada esfuerzo deformante, comienza a reordenar parcialmente su estructura cristalina y sus granos, lo que se traduce en un ablandamiento del material.

Departamento de Ingeniería Mecánica



Recalentamiento del Planchón

Los planchones ingresan a alguno de los 5 hornos de recalentamiento continuo con espesores de 200mm. Cada horno tiene una capacidad de calentamiento de aproximadamente 100 ton/hora. El tiempo de calentamiento de un planchón varía entre 120 y 140 minutos, según el material y las dimensiones del mismo.



Los hornos son del tipo de Empuje. Cada vez que ingresa al horno un nuevo planchón, el "empujador" (accionador mecánico) produce un desplazamiento de todos los demás planchones que están en el horno, haciendo que el último caiga a la mesa de rodillos y sea transportado al laminador.

Cada horno tiene 4 zonas:

- Precalentamiento
- Calentamiento Superior
- Calentamiento Inferior
- Compensación

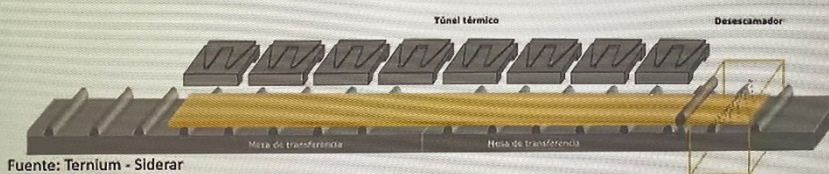
Fuente: Ternium - Siderar

Desbastado del Planchón

Antes de ingresar al Tren desbastador, los planchones pasan por una Caja Desescamadora con agua de alta presión, donde se realiza una limpieza superficial para desprender la capa de óxido que se formó durante el calentamiento sumada a la proveniente del Proceso de Colada Continua, llamada laminilla primaria. El tren desbastador consta de cinco cajas laminadoras que operan en forma independiente (de a una por vez). El esfuerzo deformante en este tren es solamente de compresión ya que no existe tiro entre stands.

El ancho de la chapa se preserva mediante la acción de rodillos verticales canteadores ubicados en la entrada de las tres últimas cajas. La temperatura del planchón ronda a la salida de este tren los 1070/1090°C. Entre las cajas se encuentran cabezales de agua que completan el desescamado.

El planchón que ingresó con 200 mm de espesor a esta etapa, sale con un rango de 30/38 mm. La velocidad del planchón al ingreso al tren desbastador es de aproximadamente 45 m/min y a la salida de 120 m/min.



Fuente: Ternium - Siderar

Laminado de Terminación de la Chapa

Previo al Laminado de Terminación, en el tramo entre los trenes desbastador y terminador, la chapa pasa por un tramo intermedio entre los laminadores. Al final de esta mesa se procede a cortar la punta de la chapa que se deformó al pasar por el Desbastador, de modo que el extremo ingrese al terminador con un frente recto y escuadrado. En una nueva etapa de desescamado, se elimina el óxido secundario generado durante el proceso de desbastado, mediante la aplicación de agua a alta presión.

El Tren Terminador de seis stands reduce paulatinamente el espesor de la chapa en caliente a un rango entre 1.6 a 12.7mm. La chapa está enhebrada en los 6 stands donde se le va laminando. El espesor final es controlado en forma continua a la salida de la última caja con rayos X y esta información, junto con la obtenida por la medición de otras variables de proceso, alimenta al sistema Control Automático de Espesores (AGC). Este último efectúa las correcciones necesarias en cada puente laminador para obtener el espesor programado.

Fuente: Ternium - Siderar

Mr. Ing. Jose Luis Polti; Ing. Damián Vior

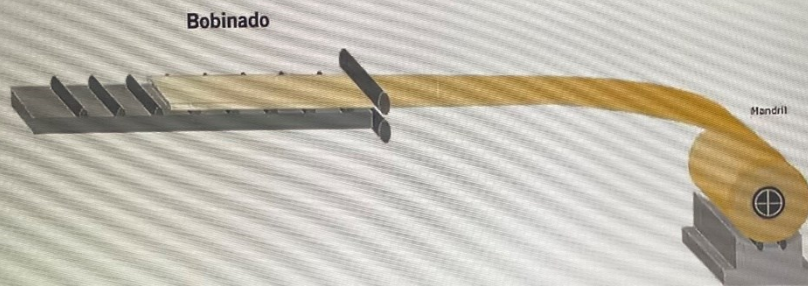
39

Enfriamiento

La temperatura de la chapa al salir del último stand, Temperatura Final de Laminado (TFL), está en general por encima de los 850°C. Se diseña el enfriamiento de manera de obtener chapas con propiedades mecánicas diversas. Si se enfría más al principio de la mesa de enfriamiento, la estructura tendrá menor tiempo para recomponerse y los granos para crecer, por lo que el material será de grano más pequeño y por lo tanto más duro. Si por el contrario el enfriamiento se demora y se bobina con una temperatura mayor, el material resultará más blando por tener granos más grandes.

El enfriamiento se realiza con agua en flujo laminar (agua fluyendo en forma uniforme y a baja presión) siendo su caudal controlado automáticamente en función de la temperatura de fin de laminado, velocidad, espesor y temperatura de bobinado deseada.

Fuente: Ternium - Siderar

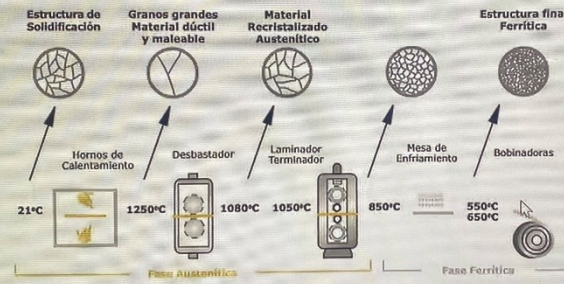


Existen dos bobinadoras que trabajan alternativamente. Para cada tipo de acero y espesor de la chapa se requiere una temperatura y una tensión de bobinado: A mayor dureza y mayor espesor, mayor será la potencia a utilizar para enrollar la chapa. Las velocidades del último Laminador, de la mesa de enfriamiento y de la bobinadora deben estar sincronizadas. Posteriormente, las bobinas se transfieren de la bobinadora a las Playas de Enfriamiento mediante vigas caminantes, cadenas y autoelevadores.

Fuente: Ternium - Siderar

La Estructura en el Proceso LAC

Durante las sucesivas etapas del Proceso LAC la estructura del material sufre transformaciones debido a las Variaciones de Temperatura y al Esfuerzo Deformante al que es sometido. Las diferentes estructuras le otorgan a la chapa diversas propiedades. A continuación se muestran las estructuras de la mayoría de los materiales LAC durante el Proceso:



Productos LAC

Las bobinas producidas por laminación en caliente, usualmente se las llama "negras". Esto es debido a la inevitable oxidación sufrida durante el proceso. Las bobinas son identificadas (sistema), zunchadas y almacenadas sin que nada las proteja de la oxidación, tomando una coloración oscura.

Fuente: Ternium - Siderar

José L

Laminado en frío, materiales utilizados :

Los materiales de las chapas utilizadas en la conformación en frío deben ser materiales con las siguientes características:

- La plasticidad que es la capacidad que debe tener el material para deformarse de forma permanente sin romperse. Es importante que el material sea dúctil y maleable es decir que sea plástico al traccionarse y al comprimirse respectivamente.
- Un límite elástico bajo, es decir, que debe poderse deformarse con facilidad, ya que un material sólo consigue deformarse permanentemente si se ejercen esfuerzos superiores a dicho límite.

Fuente: Ternium - Siderar

Laminado en frío

Existe por encima del límite elástico un punto, denominado de ruptura, donde el material se rompe.

Al deformarse el material se va endureciendo progresivamente hasta llegar a este punto. Si cesamos el esfuerzo en un punto de la zona no elástica próximo al punto de rotura por unos instantes y seguimos con el mismo esfuerzo, reemprenderemos la deformación con la dureza que teníamos antes de parar y por lo tanto al aumentar el esfuerzo se romperá la chapa. Si después de parar recociéramos la chapa, eliminando las tensiones internas y por lo tanto reblandeciendo el material, nos alejariamos del punto de ruptura aun conservando la deformación conseguida. Esto nos permitiría conseguir mayores deformaciones ya que restauraríamos su plasticidad.

Fuente: Ternium - Siderar

Laminado en frío

Teniendo en cuenta todas estas consideraciones, los materiales más idóneos en el trabajo de chapa son:

- Aceros dulces y extradulces (bajo contenido en carbono.)
- Aceros austeníticos inoxidables.
- Latón y cobre.
- Aleaciones ligeras y de aluminio-cobre.

Fuente: Ternium - Siderar

Laminación en Frío

A. Definición de Laminación en Frío

Las operaciones que se realizan en el área de Laminación en Frío tienen como finalidad obtener, a partir del Laminado en Caliente, materiales de espesores menores con propiedades mecánicas específicas y acabados superficiales finales.



Fuente: Ternium - Siderar

Laminador en Frío

Introducción

El objetivo del Laminador en Frío es disminuir los espesores de la chapa LAC entre un 40% y un 90% obteniendo también mayor uniformidad de espesor y mejor planitud que en el proceso LAC. El proceso se efectúa a temperatura ambiente, por lo tanto la estructura luego del Laminado queda deformada y el material es duro y frágil. Las propiedades finales de la chapa LAF se obtienen en procesos posteriores por Recocido y Templado.



Fuente: Ternium - Siderar