

---

FACULTAD DE QUIMICA

U.N.A.M.

## Principios Básicos del Proceso de Laminación

73

### MONOGRAFIA

Que para obtener el título de:  
Ingeniero Químico Metalúrgico  
p r e s e n t a :  
**MARCO ANTONIO CHAMORRO DIAZ**

---

México, D. F.

1974





Universidad Nacional  
Autónoma de México



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

CLAS. Tesis  
ADQ. 1974  
FECHA  
PROC. Mt 79



QUINCA

A mis Padres:

Lic. Antonio Chamorro V. y  
Dra. Jovita Díaz C.

Como reconocimiento a sus sacrificios. Con todo  
cariño.

A mi Esposa:

Alicia Concepción.

Por su ayuda y sacrificios.

A mi Hijo:

Marco Antonio.

A mis Hermanos:

Julio César Chamorro y Ma. Elena S. Chamorro.

Por su ayuda.

A mi Tía:

Reyna.

A mis Hermanos y Tíos.



A mis Amigos:

Sra. Irene Martínez de González

Alejandro Martínez Arzani

I.Q.M. Carlos Linárez Enriquez.

I.Q.M. Enrique Martínez Martínez.

Con mi agradecimiento por sus estímulos:

Ing. Quím. Marcela Cejudo.

Srita. Hilda Avila Mendoza

Sra. Irma Estela Guerrero de Chávez.

A mis Maestros:

A mi Maestro, Amigo y Asesor:

Kurt Nalder.

Por su valiosa ayuda para realizar este trabajo.

JURADO ASIGNADO

Presidente	Prof. Manuel Felipe Guerrero Fernández
Vocal	Prof. Fernando Maldonado Mendoza
Secretario	Prof. Kurt H. Nalder Gundeisheimer
1er. Suplente	Prof. Enrique Martínez Martínez
2o. Suplente	Prof. Humberto Malagón Romero

SITIO DONDE SE DESARROLLO EL TEMA

FACULTAD DE QUIMICA - SOLDADURAS TECNICAS, S. A.  
BIBLIOTECA PARTICULAR DEL ING. KURT H. NALDER G.

SUSTENTANTE



---

Marco Antonio Chamorro Díaz

ASESOR DEL TEMA



---

Kurt Nalder Gundeisheimer

## I N D I C E

	Pág.
<u>C A P I T U L O     I</u>	
<u>BASES Y MATERIALES PARA LAMINACION</u>	
a)    Objetivos y Métodos de Laminación .....	1
b)    Materiales para Laminación .....	4
1) Generalidades	
2) Los diferentes tipos de acero	
3) La Técnica del vaciado continuo	
c)    Las Fases del Fierro .....	11
<u>C A P I T U L O     II</u>	
<u>CRISTALIZACION Y RECRISTALIZACION</u> .....	
	14
<u>C A P I T U L O     III</u>	
<u>DEFORMACION PLASTICA</u>	
a)    Deformación .....	19
b)    Determinación de Resistencia a la deformación .....	22
c)    Zona Neutra y Flujo de Material .....	26
d)    La Importancia de la Zona Neutra .....	32
<u>C A P I T U L O     IV</u>	
<u>TRATAMIENTO TERMICO EN LAMINACION</u>	
a)    Temperatura de Laminación .....	38
b)    Temperatura no uniforme .....	43
c)    Pérdidas del Carbón .....	44
d)    Tratamiento después de Laminación .....	44
<u>C A P I T U L O     V</u>	
<u>MATERIALES, MEDIDAS DE RODILLOS Y TRENES DE LAMINACION</u>	
a)    Materiales .....	46
b)    Dimensiones .....	48
c)    Técnica de Fabricación .....	50
d)    Reparación de Rodillos .....	52

	Pág.
e) Trenes de Laminación .....	55
f) Laminación de Barras y Perfiles .....	57
g) Trenes de Desbaste .....	58
h) Trenes Preparadores .....	63
i) Trenes No Continuos .....	65
j) Trenes de Zig-Zag .....	66
k) Trenes Combinados .....	66
l) Molino Continuo de Bilet .....	66
m) Laminación de Alambrón .....	67

C A P I T U L O VI  
FUERZA Y POTENCIA

a) Potencia para Laminación .....	70
b) Ensanchamiento .....	74
c) Efectos de Ensanchamiento .....	80

## CAPITULO I

BASES Y MATERIALES PARA LAMINACION

## A) OBJETIVOS Y METODOS DE LAMINACION

Laminación, tanto en frío como en caliente, es uno de los métodos de dar forma a metales sin corte, como metas principales tiene dos que son:

- 1.- Dar al material, que se recibe en forma de bloques, lingotes o planchón del departamento de fundición, una forma definida con medidas de poca tolerancia, formando así un material que después servirá de materia prima para procesos siguientes en la elaboración de productos terminados.
- 2.- Mediante el proceso de laminación en caliente o en frío se logra un notable mejoramiento en las características físicas del material que se lamina, comparando estas características con las del material fundido, que por lo general son muy pobres. Condición para lograr un mejoramiento, es que se conocen las reglas y leyes respectivas de laminación.

La herramienta principal para laminación es un par de rodillos, hechos de material de alta calidad, que giran en sentido contrario y que son ajustables en su separación. Los rodillos (esquema No. 1) son propulsados por potentes motores que al hacer pasar el material entre ambos (esquema No. 2) se logra una reducción de la

altura del material.

El sistema de trabajo ya es muy antiguo y el famoso Leonardo Da Vinci (1452-1519) diseñó una planta de laminación, que en sus conceptos generales, muestra las mismas características como las plantas modernas.

Lo que sí ha cambiado, son las medidas de los rodillos, que hoy en día alcanzan medidas hasta de 1500 mm de diámetro y 6000 mm de largo, aproximadamente.

Con estos equipos se elaboran planchas y láminas hasta de 4000 mm de ancho en grandes cantidades.

Plantas modernas producen varios millones de toneladas por año, pero no solamente la fabricación de material plano, sino también perfiles, tubos, alambres, varilla y muchos otros productos más, forman parte del programa de laminación.

Claro está que esta multitud y variedad del programa requiere una técnica determinada para cada producto, y una maquinaria que se adapte a las necesidades.

Para la fabricación de perfiles, no se usan los mismos rodillos como en la producción del material plano, sino rodillos acanalados, tal como se ven en el esquema No. 3.

Son estos canales las herramientas que poco a poco darán al material la forma requerida y la secuencia de canales, sus formas y medidas, el cálculo y diseño de ellos es un arte nombrado "Calibración". Dependiendo del material y de la producción deseada varían los métodos y los equipos en un rango muy amplio.

Según los productos que se elaboran, se habla de "laminadoras" que indica una planta completa, o de "trenes" (que son partes de una laminadora) de desbaste, de producto intermedio y de acabado.

Los trenes de desbaste tienen la finalidad de reducir las grandes dimensiones del material que se recibe de la fundición y obtener productos de tamaño menor que sirven de material de salida para los próximos pasos.

Los trenes de desbaste en plantas grandes son el equipo más pesado que hay en laminación, los rodillos de laminación se colocan en un marco llamado CASTILLO, su forma y su construcción dependen del uso, de la potencia que transmitir a los rodillos y otros factores más. Los castillos más usuales son los siguientes:

#### Castillo Duo

Equipado con dos rodillos de dimensiones pequeñas hasta rodillos de dimensiones más grandes.

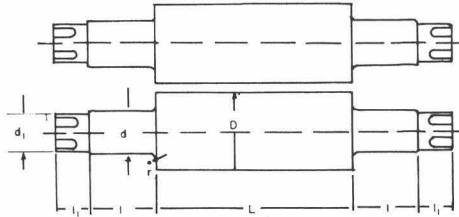
Existiendo dos formas principales: El duo sencillo que permite laminar en una sola dirección y el duo reversible, que permite invertir el sentido de la rotación, debido a su equipo de motores especiales usándose para trabajos más pesados como son por ejem.: el desbaste de lingotes y planchones hasta 45 toneladas de peso cada uno.

#### Castillo Trío

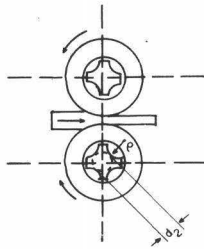
Caracterizados por tener tres rodillos que permiten laminar en ambas direcciones sin cambiar el sentido de rotación del motor. Se usa tanto en trenes de desbaste como en los pasos siguientes, siendo su capacidad menor a la capacidad de los castillos duo, los castillos trío tienen un rendimiento alto en trabajos mediano y liviano.

#### Castillo Cuarto

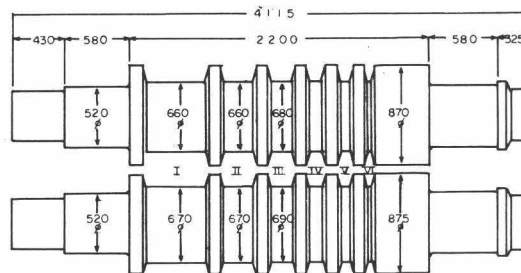
Se caracteriza por el hecho de tener cuatro



ESQUEMA No. 1 RODILLOS DE LAMINACION.



ESQUEMA No. 2 TRABAJO DE LOS RODILLOS.



ESQUEMA No. 3 RODILLOS ACANALADOS.



rodillos de los cuales, por lo general dos son rodillos de trabajo mientras los otros dos sirven de soporte para los primeros. La gran ventaja de este arreglo es que las variaciones por deflexión de los rodillos en el trabajo son menores, comparados con castillos sin rodillo de soporte. Este tipo de equipo es muy usual para la fabricación de láminas delgadas donde la medida uniforme es de gran importancia. El castillo cuarto es de mucho uso para la laminación en frío.

Aparte de los tipos básicos de castillos existe una gran variedad de arreglos y formas teniendo cada uno sus ventajas y desventajas. Una evaluación de los detalles es indispensable para cada uno de los casos específicos donde se piensa usar el equipo y como el diseño de plantas laminadoras se encuentra en constante desarrollo no existe regla general.

## B) MATERIALES PARA LAMINACION

1.- El material base, que todas las plantas laminadoras usan, es el lingote. Así se llama un bloque de fierro o acero hecho en un proceso de fundición y de una forma ligeramente cónica. Este material se elabora en el departamento de aceración dependiendo de sus formas, sus medidas y su uso, se aplican diferentes nombres para el material fundido como son: palanquilla, lingote, bloque, llantón, lupia y otros más, conforme a sus medidas y pesos. Todo material para laminación se elabora en un proceso de vaciado, dando al material líquido forma y medidas en moldes de fierro llamados lingoteras o en coquillas. El proceso moderno del "vaciado continuo" es una modificación del vaciado en lingoteras individuales que se llenan una por una y después, cuando el metal líquido se ha solidificado, se vacían una por una, en el método del vaciado continuo se usa una sola lingotera, abierta en ambos lados. Conforme a la velocidad con la cual se llenan en el extremo superior se descarga continuamente en el extremo inferior donde el material ya ha solidificado, por lo menos superficialmente.

El acero en el momento de ser vaciado tiene temperatura arriba de  $1500^{\circ}\text{C}$  y en el proceso del enfriamiento se disminuye paulatinamente su volumen, especialmente en el momento de pasar del estado líquido a sólido. El enfriamiento y por consecuencia la solidificación, progresa desde el exterior, donde el metal líquido hace contacto directo con la lingotera, hacia el centro del lingote. La contracción del volumen a causa del enfriamiento tiene como consecuencia que el nivel del hierro líquido en la parte superior de la lingotera se reduce constantemente y en un momento dado se solidifica también la superficie del hierro líquido, mientras en el núcleo abajo de la superficie solidificada se encuentra todavía en estado líquido.

En el momento de la solidificación de este líquido restante, el material una vez solidificado ocupará menos volumen y a causa de la diferencia de volúmenes se forma un hueco en el interior del lingote, ubicado cerca de la superficie. El hueco se llama "rechupe" (pipa) y para obtener un producto terminado sin fallas, es indispensable eliminar el rechupe antes de comenzar con el proceso de laminación. Para lograrlo, se corta normalmente la parte superior, llamada "cabeza", y el recorte con el hueco regresa al proceso de fundición en calidad de chatarra de recirculación.

## 2.- Los diferentes tipos de Acero

a) Aceros Efervescentes.- Todos los aceros son sometidos en su proceso de elaboración a un tratamiento de refinación que básicamente es una oxidación de impurezas no deseadas mediante oxígeno. La refinación puede lograrse con aire, con oxígeno o bien con minerales de hierro, principalmente del tipo Hematita ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), pero siempre con el aporte de una cantidad de oxígeno. Una parte del gas oxígeno se mantiene en el hierro líquido en forma de óxidos y otra parte disuelta en el mismo material. El óxido de hierro y el carbono, que siempre están presentes en el acero, se encuentran en equilibrio según:



En este equilibrio las temperaturas altas favorecen la formación de  $\text{FeO}$ , mientras que a temperaturas bajas se favorece la formación de  $\text{CO}$ . La consecuencia es que al enfriarse el material, - después de vaciado y todavía en estado líquido, comienza una reacción química que produce gas  $\text{CO}$ , mezclándose con pequeñas cantidades de  $\text{CO}_2$ , porque entre  $\text{CO}$  y  $\text{CO}_2$  también existe un equilibrio - que depende de la temperatura.

El efecto de temperaturas bajas es claro, dentro del hierro líquido se desplaza el equilibrio y comienza la formación del gas  $\text{CO}$ , que por su ligereza tiende a subir a la superficie, causando - un movimiento interno en el acero, similar a una efervescencia.

La efervescencia dura mientras el material continúe en estado líquido y en la última fase poco antes de la solidificación, - las burbujas del gas no tienen tiempo suficiente para subir a la - superficie y serán retenidas dentro del acero, formando un gran número de poros llenos de gas. Estos poros no ofrecen gran problema a la laminación, porque los gases que causaron los poros son de carácter no oxidante y la superficie de los poros es netamente metálica. Laminando a una temperatura suficientemente alta y bajo el efecto de la presión de laminación se cierran los poros bajo el - efecto de "soldadura a presión". Los poros que están cerca de la superficie que en un momento hacen contacto con el aire del ambiente se oxidan de inmediato quedando huecos que sí causan problemas, porque su superficie oxidada no permite una soldadura a presión y el resultado son incrustaciones no metálicas en el interior del - producto terminado o laminado. La formación de poros de gas en el interior del lingote compensa la contracción por diferencia de volúmenes y así los aceros efervescentes no conocen tanto el problema del rechupe y si, además la temperatura del vaciado y la velocidad del mismo están bien sincronizados, se forman en las caras exteriores del lingote una capa suficientemente gruesa de hierro sin poros para no incluir el peligro de poros cerca de la superficie - que se rompan y hagan contacto con el aire.

Bajo estos aspectos parece que el acero efervescente es --- ideal para laminación, pero aparte de los efectos favorables de la efervescencia, se presenta otro fenómeno que compensa los efectos favorables. Este fenómeno se conoce con el nombre de "segregación" y consiste en una separación de los aleantes, resultando así una - concentración mayor de los mismos en el centro del lingote, zona - que se solidifica al último.

Los elementos que tienen mayor tendencia a la segregación - son el carbono, el azufre, el fósforo, el manganeso y el nitrógeno. La diferencia de análisis entre las capas exteriores y el centro, puede ser muy notable como se aprecia en la Tabla No. 1 (según -- Wirtz).

TABLA No. 1

LUGAR	% CARBONO	% FOSFORO	% AZUFRE	% MANGAN.	% NITROGENO
Exterior	0.04	0.04	0.018	0.28	Sin datos.
Núcleo	0.12	0.19	0.11	0.41	Sin datos.
Promedio	0.08	0.07	0.05	0.32	Sin datos.

Análisis de un acero efervescente (muestras tomadas de diferentes lugares).

El fenómeno de la segregación es muy perjudicial para ciertos tipos de aceros, principalmente para aceros de calidad y se ha buscado y encontrado un proceso que mediante medidas metalúrgicas, reduce las segregaciones a un mínimo. En el Croquis No. 4 se nota la distribución del elemento fósforo en un perfil laminado, elaborado con aceros efervescentes.

b) Aceros Muertos.- La efervescencia, que es la causante de las segregaciones, tiene su origen en una reacción entre el óxido de hierro y el carbono, como se explicó anteriormente.

Para que esta reacción entre  $\text{FeO}$  y carbono tenga lugar, es necesario que el oxígeno se encuentre en el acero líquido ligado con el fierro o bien en solución. Para impedir la reacción entre carbono y  $\text{FeO}$  es necesario combinar el oxígeno con otros elementos que tengan mayor afinidad a él y cuyos óxidos no puedan ser reducidos por el carbono. De los diferentes elementos que cumplen con esta característica se usa especialmente el silicio, el aluminio y el calcio, para fines de reducción en la industria siderúrgica, el silicio se aplica en forma de Ferro-Silicio con el 45% hasta el 90% de Si, el aluminio se usa en su forma metálica sin aleante y el calcio se usa normalmente como una aleación Calcio-Silicio, al agregar uno de estos metales a un acero que contenga óxido de Fierro, se forman los compuestos correspondientes al silicio, aluminio y/o calcio, y estos óxidos no se pueden reducir, aún a temperaturas elevadas como las hay en un horno de fundición, con el carbono.

El resultado es que el acero, en el momento de ser vaciado, no desprende gases y se mantiene tranquilo en la lingotera: El acero es muerto.

El término de "acero desoxidado" que se aplica a esta forma de vaciado no es muy propio, porque precisamente el proceso de desoxidación mediante el carbono es la razón de la efervescencia. Estos aceros también podrían llamarse "aceros tranquilizados" o "calmados".

Las ferro-aleaciones y las aleaciones se agregan al acero en la olla de vaciado antes de ser vaciados o también en la lingotera misma y por falta de la efervescencia no habrá el movimiento del material que causa en los aceros efervescentes la segregación. El resultado son lingotes cuyo análisis dentro de ciertos límites de luego, es uniforme en cualquier lugar del mismo. Por el otro lado, es más notable el efecto de la concentración del volumen en aceros muertos que en los efervescentes y el resultado es la formación de un rechupe de dimensiones notables en la parte superior de

la lingotera, problema que casi no se conoce en la elaboración de aceros efervescentes.

En forma esquemática se aprecia un corte longitudinal de un lingote de acero efervescente (izquierda) y un lingote hecho con acero muerto (derecha) en la Gráfica No. 5.

Las razones por las cuales se elabora uno u otro tipo de aceros son múltiples y en la Tabla No. 2 se hace una comparación de los datos más interesantes. Aparte de los detalles que aparecen en la Tabla merece ser mencionado como un factor de importancia la calidad en datos físicos al comparar los dos tipos de aceros. Se nota una diferencia efectiva entre ambos en cuestión del envejecimiento. Los aceros efervescentes tienen en su totalidad una fuerte tendencia hacia el envejecimiento que se manifiesta en una reducción de la elasticidad, combinada con mayor fragilidad. El envejecimiento puede presentarse después de mucho tiempo en algunos casos años, y se debe principalmente a la influencia del nitrógeno. Los aceros que han sido tratados con aluminio, no presentan el peligro del envejecimiento o por lo menos los efectos del mismo son mucho más reducidos.

TABLA No. 2  
COMPARACION DE DATOS ENTRE ACEROS MUERTOS Y EFERVESCENTES

	MUERTOS	EFERVESCENTES
Costo	Más caros	Más baratos
Rechupe	Grande	Pequeño
Segregación	Poca	Muy fuerte
Laminación	Muy sencilla	Necesita mucho cuidado
Rendimiento	Más merma	Menos merma
Soldabilidad	Buena	Problemática
Problemas metalúrgicos	Problemático	Menos problema

La mejor calidad de los aceros muertos, se refleja en las especificaciones para la construcción de barcos, que permiten solamente el uso de aceros efervescentes para estructuras de menor importancia y en medidas hasta de 25 mm de espesor.

Otro factor más en favor del acero muerto es que aceros con un contenido de carbono arriba de 0.20 - 0.25% no se permiten elaborar con calidad suficientemente satisfactoria con el vaciado efervescente.

Igual regla de no elaborar con efervescencia, rige para todos los aceros aleados, tanto de baja como de mediana y desde luego de alta aleación.

También aceros de categoría (aceros finos o nobles) se elaboran exclusivamente muertos y no efervescentes por razones de calidad y sensibilidad contra el envejecimiento.

Aparte de los dos extremos mencionados, aceros efervescentes y aceros muertos, se elaboran gran variedad de aceros semi-muertos que ocupan un lugar entre ambos aceros en lo que se refiere a sus características costos y calidades. Aceros semi-muertos también están limitados en su contenido de carbono al máximo 0.25%. Para fines de laminación es importante saber en qué forma y con qué método se ha elaborado el material que laminar, porque conforme a esta elaboración es el tratamiento durante el proceso de laminación.

### 3.- La técnica del Vaciado Continuo

Los problemas de los poros de gas y de los rechupes en los lingotes de fierro originaron una multitud de investigaciones, con el fin de descubrir cuáles serían los remedios más adecuados para contrarrestar estos fenómenos poco deseables y después de varios fracasos se desarrolló el método del vaciado continuo. La idea de vaciar lingotes de metal en una forma continua no es completamente nueva, ya que en el año de 1884 fue ideado y patentado un método que se usan lingoteras abiertas en ambos extremos llenándose de un lado con el metal líquido, mientras que en el otro extremo salía,

según sus inventores, el material solidificado en forma de una barra sin fin. Por varias razones no se usó este método del vaciado continuo en mayor escala para aceros hasta 1952. Pero a partir de ese año, se notó un desarrollo considerable del método mencionado.

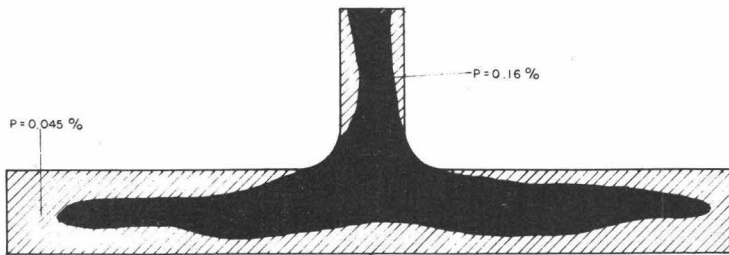
Una de las ventajas básicas del vaciado continuo es la forma de cómo se enfría el material líquido, si se compara con el enfriamiento en las lingoteras individuales.

Esquemáticamente se aprecia en la gráfica No. 6 el efecto de diferentes formas de enfriamiento. Si la radiación del calor se distribuye en todas direcciones resulta un enfriamiento que progresa de la cara exterior de la lingotera hacia el centro del material, tal como se ve en croquis A, el esquema corresponde a una lingotera común, en la cual el enfriamiento progresa de las paredes de la lingotera hacia el centro. La reducción del volumen al enfriarse causa inevitablemente un rechupe en el centro del lingote y el problema se hace más notable en lingotes delgados que en lingotes gruesos. El croquis B corresponde a una lingotera que ha sido provista de un sistema que permite absorber buena parte del calor en dirección axial, causando una solidificación que progresa desde abajo hacia arriba. El croquis C refleja, aproximadamente, las condiciones que rigen en el sistema del vaciado continuo.

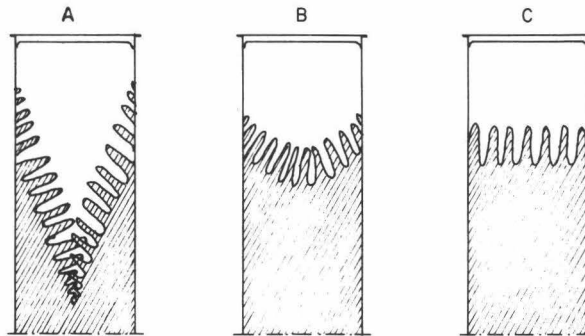
### C) LAS FASES DEL FIERRO

La física clásica conoce tres fases de la materia, como son: el estado líquido, el estado sólido y el estado gaseoso, de los cuales solamente los dos primeros, sólido y líquido, son de interés en soldadura. En cambio, de una fase a la otra se logra mediante un aumento de temperatura y el punto de temperatura donde un material se transforma de sólido a líquido se llama "punto de fusión". En el caso del hierro puro este punto de fusión corresponde a 1535°C, la temperatura mencionada se refiere a hierro netamente puro, pero cualquier impureza, sea ocasional o intencional,





CROQUIS No. 4 SEGREGACION DE FOSFORO.



GRAFICA No. 6 EFECTOS DE DIFERENTES FORMAS DE ABSORCION DE CALOR EN UN LINGOTE



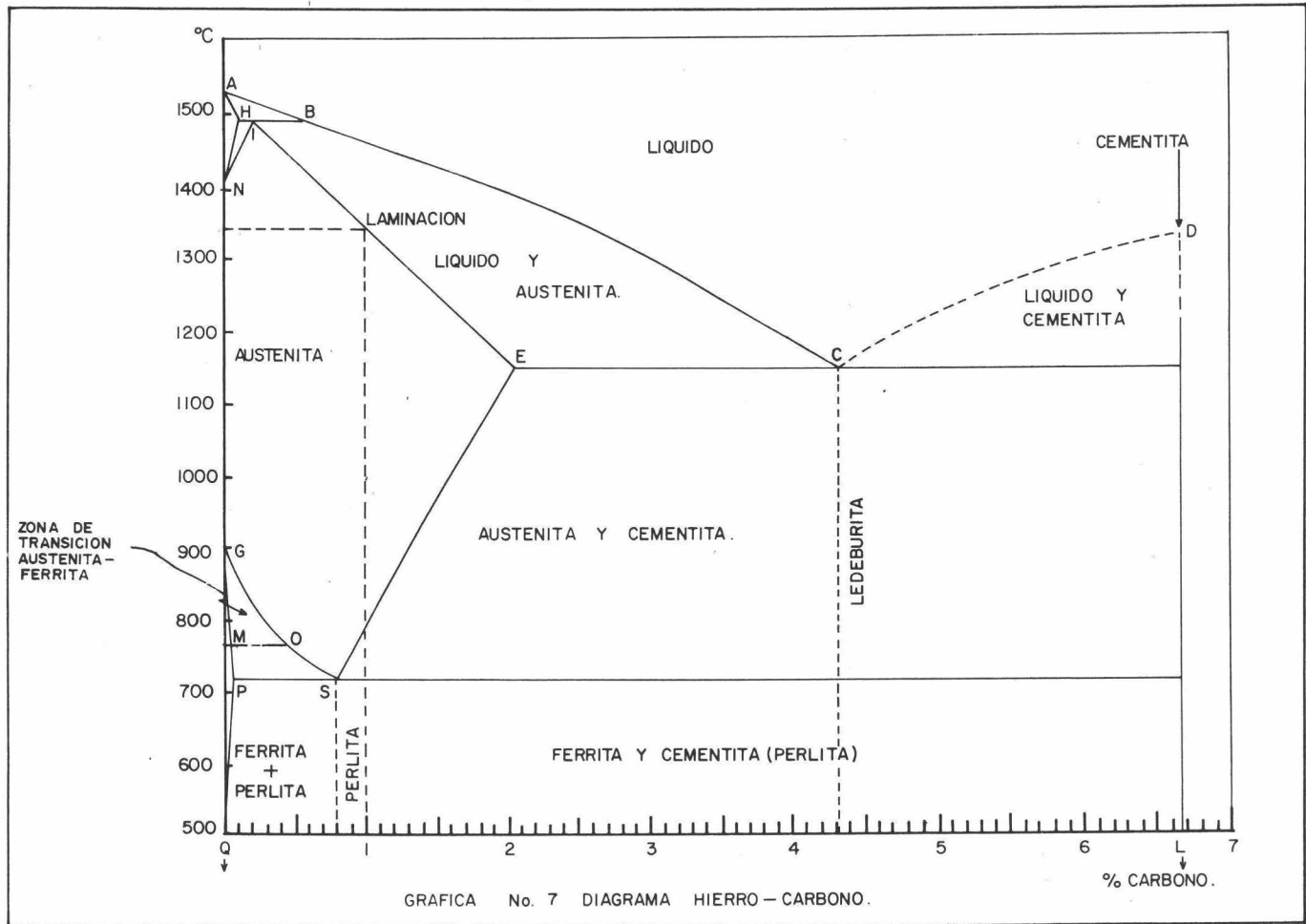
GRAFICA No. 5 CORTE LONGITUDINAL DE UN LINGOTE DE ACERO EFERVECENTE (IZQ.) Y ACERO MUERTO (DER).

hace bajar el punto de fusión y el hierro técnico, el único tipo de hierro que se usa para fines de soldadura, nunca es de una pureza absoluta, sino siempre está aleado con impurezas y aleantes. Por el proceso de elaboración del hierro en el Alto Horno mediante carbono (coque) como agente reductor, el carbono es onnipresente en los fierros.

Este elemento es considerado como el aleante número uno de los aceros y sin los efectos que ocasiona el carbono en aleación con el hierro no sería posible la industria del Hierro. Ya se mencionó que cualquier aleante y/o impureza del hierro causa una reducción del punto de fusión, pero esta reducción no prosigue ilimitadamente sino se acerca a un efecto máximo que se refleja como un punto de fusión mínimo y después, al aumentar más el porcentaje del aleante, sube otra vez hasta llegar al punto de fusión del segundo componente, en el caso presente el carbono. Con otras palabras: Si se elabora una gráfica en la cual la abscisa representa la temperatura y la ordenada el porcentaje de carbono (o en escala invertida el porcentaje de hierro), resulta una curva que comienza con una temperatura de 1535°C, punto de fusión del hierro puro, y un porcentaje de 100% hierro y 0% de carbono. La temperatura del punto de fusión se reduce al aumentar el contenido de Carbono hasta llegar a un mínimo después se sube a la temperatura de fusión del carbono si el porcentaje del último se llega a 100% y el porcentaje del hierro a cero. Por convención, el punto donde una mezcla entre dos elementos o compuestos se funde a la temperatura más baja de todas las mezclas posibles se llama "punto eutéctico".

En el caso del hierro este punto eutéctico corresponde a una temperatura de 1145°C y a un contenido de 4.3% de carbono. También por conveniencia se dio a esta mezcla eutéctica el nombre de LEDEBURITA en honor del investigador ADOLFO LEDEBUR. Observando bajo estos aspectos la gráfica No. 7 que representa el diagrama de fases hierro-carbono, podemos determinar sin mayor problema el punto de fusión de cualquier "mezcla" entre hierro y carbono: La línea entre los puntos marcados con A-B-C-D es la línea separadora,

arriba de la cual hay solamente líquido: es la línea de fusión de las diferentes mezclas hierro y carbono. Salta a la vista que el diagrama solamente cubre una gama hasta poco menos del 7% de carbono. Este detalle se debe al hecho de que todas las aleaciones entre hierro y carbono que merecen interés técnico contienen menos - del 7% de carbono. El resto del diagrama, arriba del 7% de Carbono, no es de interés para la industria.



GRAFICA No. 7 DIAGRAMA HIERRO - CARBONO.

CAPITULO II  
CRISTALIZACION Y RECRISTALIZACION

El fierro mientras se encuentra en estado sólido, demuestra una estructura cristalina, los cristales determinan una parte de sus características y de su comportamiento. El proceso de laminación afecta únicamente la estructura cristalográfica del fierro, pero no la composición química del mismo.

Por esta razón es esencial hacerse familiar con el comportamiento de los cristales y aclarar los fenómenos más importantes los cuales, sin conocer las bases teóricas de la estructura cristalina y los cambios que sufren, no se pueden entender con facilidad.

Cualquier deformación sin corte, en frío como en caliente, es un proceso causado por fuerzas externas que por su potencia obligan al material a tomar otra forma a la que originalmente ha tenido. En todos estos procesos sucede una variación de formas y medidas, pero nunca un cambio (aumento o reducción) del volumen del material que participa en el proceso. La ley de la constancia del volumen es básica para la laminación y se formula así:

$$V = h_0 l_0 \cdot l_0 \cdot b_0 = h_1 \cdot l_1 \cdot b_1 = h_n \cdot l_n \cdot b_n$$

donde  $h_0$ ,  $l_0$  y  $b_0$  significan altura (h), largo (l) y ancho (b) antes del primer paso,  $h_1$ ,  $b_1$ ,  $l_1$  las mismas medidas después del primer paso y las letras con el índice "n" las medidas después de "n" pa-

sos: El volumen real se mantiene constante en toda la operación. Con toda conciencia se usó el término del volumen real para hacer la diferencia del volumen aparente, el cual incluye los huecos interiores del lingote que en el proceso de laminación desaparecen - después de dos pasos.

Si no se toman medidas especiales, la deformación entre un - paso y otro es paralepipédico

El proceso de laminación causa una deformación de los cristales, en un principio temporal, la deformación temporal sucede cuando la fuerza aplicada solamente logra una deformación que es menor al límite elástico del acero en cuestión y al retirar la fuerza - causante, el material regresa a sus medidas originales.

Al aplicar todavía más fuerza el acero llega a un punto donde la deformación ya no es temporal sino permanente, en este momento de la deformación el cristal pierde sus dimensiones originales y se deshace en una multitud de cristales más pequeños que se deslizan sobre ciertos planos. El momento de iniciarse el rompimiento de los cristales, es el llamado límite lástico y se manifiesta porque la relación entre fuerza y alargamiento no cumple con la - ley de HOOK.

Cualquier laminación requiere forzosamente llevar el mate---rial que laminar hasta este punto, el límite elástico, porque solamente con una deformación arriba del límite elástico se logra una deformación permanente. De otra manera, al quitar la fuerza cau---sante regresaría a sus medidas originales.

La destrucción de los cristales originales da lugar a un cambio de las características físicas del material, en el sentido de aumentar resistencia máxima a la tracción, límite elástico y dureza, reduciendo elasticidad y alargamiento. Por razones de práctica, se usa para la deformación el porcentaje tomando como base de referencia las medidas originales como "deformación cero". Naturalmente esto no es válido para cualquier tipo de acero en lo que se refiere a sus valores absolutos.

Es importante mencionar que la rejilla atómica del material se mantiene inalterable aunque el tamaño de los cristales ha sido destruido.

El fenómeno se llama "Translación". Aparte de la teoría de translación existen otros intentos de cómo explicar en forma clara y sin contradicción el fenómeno de la deformación, pero por varios detalles no se exponen estas teorías, en las cuales hay ciertas - contradicciones. Los efectos de la deformación del grano al pasar el límite elástico son reversibles mediante la temperatura: Si la temperatura es suficientemente alta procede una reorientación de - los cristales y los efectos secundarios de la deformación, como - son aumento de resistencia máxima y aumento de dureza, desaparecen: el material vuelve, en términos generales, a sus características - originales. Este fenómeno, la desaparición de efectos secundarios causados por la deformación arriba del límite elástico, hace preci- samente la diferencia entre laminación (o deformación) en frío y - laminación en caliente: si perduran las alteraciones de las caract- erísticas físicas se habla de "laminación en frío", aunque no ha - sido en frío referente a la temperatura. Si las alteraciones de las características físicas desaparecen inmediatamente después de haber sido sometido al proceso de laminación, se habla de "lamina- ción en caliente". Desde luego es posible hacer desaparecer los - efectos de laminación en frío con un tratamiento térmico posterior (reconocido) pero como no tiene lugar en el momento del proceso, - no se considera como parte del mismo.

La laminación en caliente persigue con toda voluntad el he- cho de que el material regrese a sus características originales in- mediatamente después de haber sido deformado. La razón es muy ló- gica, porque de no ser así se necesitaría después de cada paso y/o proceso de laminación más y más fuerza y dentro de poco el mate- - rial llegaría -teóricamente- a una resistencia que ya no permite más deformación. Bajo condiciones de laminación en caliente el re- greso a las características originales es casi instantáneo, en el momento cuando el material ya no está expuesto a las fuerzas que -

causan la deformación en la salida entre un par de rodillos. La pregunta es ¿cómo se puede saber si ha tenido lugar una recristalización? Bajo este término se entiende la reorientación de los cristales que bajo la influencia de las fuerzas de laminación han sufrido una deformación.

Investigaciones revelaron que la recristalización depende de:

a) La temperatura de laminación, más alta es la temperatura más fácil para lograr una recristalización.

b) El grado de deformación, es necesario un grado mínimo de deformación, por ejemplo reducción de altura, para lograr la recristalización a una temperatura dada.

c) El tipo de material que se elabora. Los diferentes tipos de aceros o metales demuestran un comportamiento diferente si se mantiene invariable las condiciones a) y b).

El hecho de haber tenido lugar una recristalización se nota en un crecimiento súbito de los granos, más notable en el punto de condiciones mínimas para recristalización. El crecimiento de grano se reduce en la misma proporción como se aleja de las condiciones mínimas. El aumento súbito del tamaño del grano a una temperatura dada representa precisamente el punto donde hay por primera vez una "recristalización".

Los autores W. Tafaél, H. Henemann y A. Schneider; demostraron en el año 1929 que el tamaño original del grano no influye ni en la recristalización ni en el tamaño de los granos que se obtienen después de recristalizar, ni en las condiciones (temperaturas y deformación previa) que causan esta recristalización.

Otro detalle importante se estableció y es que el tamaño del grano después de laminación y recristalización varía considerablemente, a temperaturas altas (1200°C) resulta un grano sumamente grueso, mientras a los 900°C el grano es el más pequeño y a temperaturas más bajas aumenta de nuevo. Como el tamaño del grano es de vital importancia para las características físicas de un acero



entre más fino el grano más calidad del acero, se ofrece para controlar la calidad del producto final, usando -o tratar de usar- - la temperatura óptima en el último paso para cada tipo de acero..

Aparte de su interés teórico, la recristalización también - tiene un alto valor práctico en laminación. Con anterioridad se - mencionó el enfriamiento de los lingotes, que progresa desde el ex - terior hacia el centro.

Este enfriamiento dirigido origina lógicamente un crecimiento de los cristales del hierro igualmente dirigido, todos los cris - tales que forman el lingote tienen la misma orientación desde las oridllas hacia el centro, el enfriamiento en las lingoteras es re - lativamente lento, favoreciendo un crecimiento de los cristales - hacia tamaños mayores, el resultado son cristales grandes de orien - tación dirigida y uniforme.

La forma de cristalización en un lingote vaciado se llama - "estructura primaria" y los cristales demuestran una estructura ca - racterística, llamada "Dentrítica". Esta formación dentrítica es muy débil en todas sus características físicas, la meta principal de los primeros pasos de laminación es destruir el fenómeno de re - cristalización, una multitud de cristales finos no dirigidos con - mejores características físicas. Para lograr esta meta es neces - rio saber cuál es el mínimo de temperatura y reducción de altura - para conseguir con seguridad una destrucción de los cristales den - tríticos, pero tampoco no es muy recomendable aplicar una reduc--- ción exagerada en los primeros pasos porque fácilmente sucede que los dentríticos, por lo débiles que son, no soporten esta reduc--- ción exagerada y el resultado será fisuras y grietas causadas en - los primeros pasos, fallas que después no se pueden reparar con - ningún proceso salvo fundir de nuevo el lingote.

CAPITULO III  
DEFORMACION PLASTICA

A) DEFORMACION

La deformación de un material requiere la aplicación de una fuerza exterior, lo suficientemente alta para vencer la resistencia a la deformación que ofrece el material, más la fuerza necesaria para vencer las pérdidas por fricción del equipo y también para vencer la fricción que hay entre el material a reformar y la herramienta que se usa en este trabajo. El caso más sencillo se presenta al aplastar un cubo o un bloque rectangular de material entre dos planos paralelos. Un proceso de laminación puede interpretarse en primera aproximación como una secuencia rápida de muchísimos aplastones entre dos planos paralelos, pero de poco ancho, con esta aplicación se pretende aclarar que las relaciones que rigen en una deformación entre dos planos paralelos también pueden aplicarse en un mecanismo básico para la laminación entre dos rodillos.

Con el fin de poder fijar relaciones matemáticas en un proceso de laminación se analiza primero el problema qué fuerza será necesaria para reducir la altura de un bloque rectangular con la altura original  $h_0$  a la altura final  $h_1$ . Para poder resolver el problema, debe saberse antes que nada cuál es la resistencia específica del material. Esta resistencia específica es una característica propia e individual de cada tipo de material y varía también de acuerdo con la temperatura. Su valor numérico por el momento no es de gran importancia y se denomina con  $K_d$ . Se conside

ra constante, porque en el corto lapso de tiempo que se necesita para reducir la altura de  $h_0$  hasta  $h_1$  no habrá enfriamiento y tampoco cambiarán las características físicas del material.

La reducción de altura dentro de los límites mencionados se puede interpretar como una secuencia de muchos pasos, de una reducción pequeña como "dh".

Siendo la resistencia a la deformación  $k_D$  en  $\text{Kg}/\text{cm}^2$  y  $F_0$  el área de contacto en  $\text{cm}^2$  resulta que la presión  $P$  (en  $\text{Kg}$ ) necesaria para vencer la resistencia está dada por:

$$P = k_D \cdot F \quad (\text{Kg}) \quad (2)$$

El trabajo necesario para lograr la deformación de la magnitud  $dh$  es:

$$dA = P \cdot dh = k_D \cdot F \cdot dh \quad (3)$$

El volumen del material no varía en todo el proceso y  $F_0 \cdot h_0 =$

$$F_1 \cdot h_1 = F \cdot h = V \text{ (volumen)}. \text{ Resulta que } F = \frac{V}{h}$$

Substituyendo con esta última expresión la  $F$  en la ecuación (3) resulta:

$$dA = k_D \cdot V \cdot \frac{dh}{h} \quad (4)$$

que representa el trabajo necesario para una deformación de la magnitud  $dh$ , en total de fuerza para deformar desde  $h_0$  hasta  $h_1$  es:

$$A = \int_{h_1}^{h_0} k_D \cdot V \cdot \frac{dh}{h} = V \cdot \int_{h_1}^{h_0} k_D \cdot \frac{dh}{h} \quad (5)$$

El factor  $k_D$ , la resistencia específica a la deformación, - se mantiene invariable durante un paso de laminación en caliente y se puede eliminar del integral:

$$A = V \cdot k_D \cdot \int_{h_1}^{h_0} \frac{dh}{h} = V \cdot k_D \cdot L_n \frac{h_0}{h_1} \quad (\text{cm Kg}) \quad (6)$$

Por costumbre y conveniencia se designa  $\frac{h_1}{n}$  con la letra F. Usando F en la última ecuación resulta:

$$A = V \cdot k_D \cdot L_n \frac{1}{F}$$

Porque es:

$$\frac{h_1}{h_0} = \quad \text{y también} \quad \frac{h_0}{h_1} = \frac{1}{F} \quad (7)$$

La fórmula (7) es válida siempre y cuando la resistencia a la deformación, el factor  $k_D$ , no varía durante el proceso. Esta condición se cumple tratándose en un solo paso. Para una secuencia de pasos ya no se puede considerar como constante la resistencia específica a la deformación, porque con la temperatura descendente aumenta en proporción la resistencia.

Aparte de la constancia del factor  $k_D$  se ha considerado igualmente que la resistencia a la deformación es la única fuerza a vencer, pero en la práctica desgraciadamente no se puede considerar como fuerza única, sino es la fricción entre material y herramienta cuando fluye el material en dirección perpendicular a la dirección de la presión. Esta fricción entre herramienta y material tiene como consecuencia que las partículas del material cerca de la herramienta encuentran más resistencia al desplazarse lateralmente que las partículas centrales del mismo material. Este fenómeno se observa al aplastar un cuerpo cilíndrico entre dos placas parale-

las. Después de la deformación muestra una forma bombeada, similar a un barril, con un diámetro más pequeño en las caras que hacen contacto con herramienta y con el diámetro mayor en el centro del cuerpo. Esta fuerza adicional debe sumarse a la fuerza que se necesita para vencer la resistencia específica del material, la fricción entre material y herramientas causa también una turbulencia del flujo regular, inicialmente en las cercanías de la herramienta, con el efecto que el flujo de las partículas del material no es uniforme sino se convierten en un mecanismo sumamente complejo y complicado que a su vez causa un aumento de la resistencia específica. Este componente de la fuerza que vencer se llama "Fricción Interior" y también debe ser agregado a las fuerzas mencionadas.

Resulta que el trabajo necesario para una deformación se compone de los siguientes factores:

- 1.- El trabajo para vencer la resistencia específica a la deformación del material a una temperatura dada.
- 2.- El trabajo para compensar la fricción entre herramienta y material.
- 3.- El trabajo necesario para vencer la resistencia causada por las fricciones interiores.

Además influyen en el total del trabajo el volumen que laminar (o deformar) y el grado de deformación, por ejemplo, la reducción de altura o área.

Estos dos últimos factores se expresan en la fórmula (7) como  $V$  (volumen del material y  $\frac{dh}{h}$  para el grado de deformación, su determinación no ofrece problema ninguno porque son conocidos al iniciar cualquier trabajo.

Fijar la magnitud de los factores 1), 2) y 3) es algo difícil y hasta ahora no se ha logrado ningún método fácil y exacto para hacerlo, razón por la cual no es tan sencillo determinar estos

factores es que son múltiples las condiciones que pueden variarlos.

## B) DETERMINACION DE RESISTENCIA A LA DEFORMACION

Para determinar la resistencia a la deformación con un método práctico, se hicieron en los laboratorios pruebas de compresión con cuerpos cilíndricos largos y delgados. Esta forma se usó para reducir a un mínimo la influencia de la fricción entre material y herramienta, las investigaciones revelaron, que tanto la temperatura como también la velocidad con la cual se efectúa la deformación son de influencia en el valor numérico de la resistencia a la deformación, comparando valores obtenidos con el mismo material.

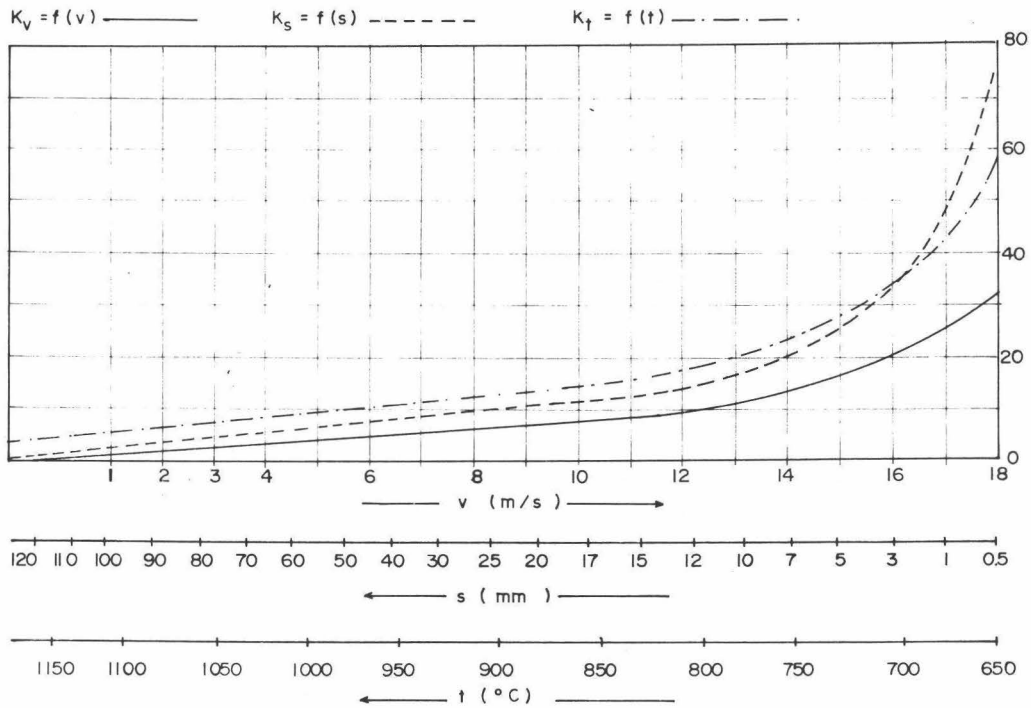
H. Hennecke publicó en la revista Stahl und Eisen en el año 1928 entre otras, una gráfica donde se ven las resistencias a la deformación de un acero con 0.2% C (similar al AISI 1020) en relación con la temperatura, y considerando diferentes grados de recalcado, el aumento entre 1200°C y 1000°C es relativamente poco, pero al bajar la temperatura abajo de 1000°C ya es más notable el aumento de la resistencia, él mismo hizo también pruebas para conocer la influencia de la composición del acero en la variación de la resistencia a la deformación, usando diferentes velocidades de deformación, con estas investigaciones salió a la luz que un aumento de la velocidad de deformación causa también un aumento en la resistencia específica que vencer.

La aplicación de los resultados de esta investigación permite mediante gráficas, fijar la magnitud de los componentes "influencia de temperatura" e "influencia de velocidad, de deformación" en laminación. Pero no solamente la temperatura y velocidad de deformación influyen en el trabajo para vencer las diferentes resistencias, sino también la fricción entre material y herramienta.

Esta fricción depende del estado de la superficie de los rodillos y del material, porque entre más ásperas son las superfi---

cies más fricción habrá, se puede considerar como estable este factor, debe tomarse en cuenta la variación de velocidad de laminación, porque con un aumento de la velocidad se aumenta también el componente de fricción que vencer. También en este caso se usan diagramas basándose en investigaciones hechas.

El último factor, la fricción interior del material puede interpretarse como una función del espesor del material. La razón es que entre más delgado es el material más alto será el porcentaje en volumen de las zonas de la orilla cerca de las herramientas de deformación, donde existen zonas con un flujo irregular que ofrece más resistencia que el material que solamente se deforma y fluye en un solo sentido. Si concentramos todos los factores en una expresión matemática se puede decir que:  $k_D = K_V + K_t$  (8) donde significa  $k_D$  la resistencia total a la deformación,  $k_t$  la resistencia específica a una temperatura dada,  $k_s$  el componente de la fricción interior en relación con el espesor y  $k_t$  el componente de la variación causada por fricción entre material y herramienta, en relación con la velocidad de laminación. La gráfica No. 8 se usa para determinar el valor numérico de cada uno de los componentes que al sumar darán la resistencia  $k_D$  aplicable en la fórmula (7) la gráfica N° 8 es válida para aceros hasta  $50 \text{ Kg/mm}^2$  resistencia máxima a la tracción (prueba en frío del material recocido). Aceros con más resistencia a la tracción requieren un ajuste, en este caso se multiplica el resultado con 1.33, aceros del tipo inoxidable se calculan con un factor de multiplicación de 3.80. Desde luego, los resultados no son exactos, pero se aproximan en una forma satisfactoria a las condiciones de la práctica. La utilidad principal de este cálculo está en la posibilidad de poder determinar anticipadamente las potencias necesarias para laminación y basándose en estos datos, hacer los cálculos necesarios con el objeto de precisar si el equipo existente sirvió o no para laminar el material previsto. Desde luego no falta investigaciones efectuadas con el fin de salir de las tablas y diagramas empíricos y se han logrado éxitos muy notables en el intento de formular matemáti



GRAFICA No. 8



camente la fuerza necesaria para laminación y la investigación más amplia fue realizada por el sueco Sven Ekkelund que realizó una fórmula para determinar la fuerza (presión) necesaria para la deformación. En la fórmula (2), de la cual se partió para obtener los datos de fuerza y trabajo en laminación se calcula la fuerza en una forma sencilla y a base del factor empírico  $k_D$ . S. Ekkelund propone una fórmula para la presión sin recurrir a factores empíricos y su fórmula es:

$$P = bm \sqrt{r \cdot \Delta h} \cdot \left[ 1 + \frac{1.6 \cdot \sqrt{r \cdot \Delta h} - 1.2 \Delta h}{h_o + h_l} \right] \cdot \left[ K_f + \frac{2 \cdot n \cdot u \cdot \sqrt{\frac{\Delta h}{r}}}{h_o + h_l} \right] \quad (9)$$

Como se ve a primera vista, esta fórmula es muy compleja y por lo tanto, poco práctica para el uso en una planta de laminación. En el año 1958 fue publicado en la revista Stahl and Eisen (Acero y Fierro). Alemania, página 1383 a la 1389, un trabajo de Mathea que facilita el uso de la fórmula de Ekkelund, utilizando Nonogramas que el mismo autor Mathea ha elaborado, igual a la fórmula también los Nonogramas son complejos y aunque el uso de ellos reduce el tiempo necesario para resolver un problema a un mínimo se necesitan todavía unas 36 operaciones, además de la aplicación de los Nonogramas.

NOTA: Sobre estas fórmulas de ensanchamiento de Ekkelund y las antes mencionadas, se hizo un estudio preliminar mediante el uso de computadoras en la Facultad de Química, dando como resultado que las operaciones matemáticas expresadas en las fórmulas son dudosas. Este estudio fue realizado por el Ing. Kurt Nalder, usando lenguaje Fortram IV.

La exactitud de los resultados obtenidos depende de que se conoce el valor numérico de cada uno de los integrantes de la fórmula de S. Ekkelund.

Los significativos en la fórmula No. 9 son:

- P : La presión en kg. necesaria para lograr la deformación prevista.
- $b_m$  : Promedio aritmético del ancho y después del paso en mm.
- r : Radio del rodillo en mm.
- $\Delta h$  : Reducción de altura en mm.
- $\mu$  : Coeficiente de fricción entre rodillo y material.
- $h_o$  : Altura inicial en mm.
- $h_1$  : Altura final en mm.
- $k_f$  : Fricción interna del material en  $\text{kg}/\text{m}^2$ .
- n : Coeficiente de tenacidad  $\text{kg}/\text{ceg}/\text{mm}^2$ .
- u : Velocidad de la circunferencia de los rodillos.

Como se ve, por lo menos tres los factores  $\mu$ ,  $k_f$  y n no son fáciles de determinar y al usar la fórmula sin tener los datos exactos de estos factores no se gana gran cosa; además, hay otro detalle de mucha importancia, todas las fórmulas y gráficas están basándose en las condiciones que encontramos al laminar entre dos rodillos planos, tal como se elaboran los aceros planos, para estos trabajos los Nonogramas de Mathea son de valor inestimable, para la aplicación en cualquier tipo de rodillo, acanalado, se pueden aplicar con muchas reservas.

### C) ZONA NEUTRA Y FLUJO DE MATERIAL

En el capítulo sobre la deformación plástica, se consideró igualmente como condición de la deformación la paralelidad de los planos de la herramienta que causa la deformación, pero en la práctica esta condición de paralelaje es solamente un caso especial de una deformación entre dos planos, y puede ser que el trabajo se efectúa entre planos paralelos o bien entre planos que tienen una inclinación uno contra el otro.

En el caso especial de una deformación entre dos planos paralelos, el flujo del material al reducir la altura  $h_o$  a la altura  $h_1$  es también paralelo a la herramienta, que es lo mismo, perpendicular

cular a la fuerza (presión) que es la causante de la deformación. Expresando gráficamente el flujo de un material mediante líneas, - resultaría en un cuerpo cilíndrico un flujo radial, donde el centro del círculo es el origen de este flujo, en un cuerpo cuadrado sucede algo similar; en el origen de estas líneas no hay flujo hacia ningún lado y se denominan "ZONA NEUTRA" por existir en este punto un estado neutralizado que no se inclina a ninguna dirección preferida en su movimiento. Por ser la deformación entre dos planos paralelos, un caso especial de la deformación en general, deben regir las reglas básicas de la deformación entre paralelos, - también para la deformación entre no paralelos y una de estas reglas, la ley de la formación de la zona neutra, debe ser aplicable para la deformación entre planos inclinados y en realidad así lo es. Únicamente bajo estas condiciones ya no es el centro del cuerpo donde se forma la zona neutra.

La importancia de la zona neutra para la laminación sale a la vista al interpretar un paso de laminación como una secuencia de múltiples compresiones entre planos inclinados de un largo  $dl$ , siendo "l" la circunferencia del rodillo. La suposición de compresiones múltiples no es errónea porque con el cálculo infinitesimal se puede comprobar que un círculo es un polígono con un número infinito de lados en el cual cada uno de los dos tiene el largo  $dl$ . En el punto de la zona neutra, que en laminación se extiende a todo el ancho del material, no hay flujo ni hacia adelante, ni hacia atrás, la zona se encuentra en equilibrio. De la zona neutra hacia el lado de más abertura sí hay flujo, cuyo sentido es en dirección opuesta al sentido de laminación, mientras de la zona neutra hacia la parte más cerrada hay un flujo en el mismo sentido como es la dirección de laminación. Si nombramos la fuerza que mueve el material hacia adelante  $H_A$  (fuerza horizontal) y la fuerza que jala en el lado de más apertura hacia atrás con  $H_R$  debe ser en la zona neutra:

$$H_A - H_R = 0 \quad \text{y} \quad \text{también} \quad H_A = H_R \quad (10)$$

Porque solamente con esta condición existe equilibrio en la zona neutra.

Antes de analizar los efectos y las condiciones del equilibrio de las fuerzas en la zona neutra que tiene una gran importancia para todo proceso de laminación, es necesario saber cómo localizar la ubicación de la zona neutra.

Para poder determinar la ubicación de la zona neutra hay que partir de la ecuación (10) que indica que el volumen antes, durante y después de un proceso de laminación es el mismo, además, se supone la condición de que la velocidad de la circunferencia de los rodillos es constante y también en la zona que hace contacto con el material a laminar correspondiente al arco del ángulo  $d_1$  en la gráfica No. 9. Por la constancia del volumen según fórmula 1 y el propósito de la laminación, que es reducir la altura  $h_0$  a  $h_1$ , resulta que el producto  $l_0 \cdot b_0$  debe ser más pequeño que el producto  $l_1 \cdot b_1$  :

$$l_0 \cdot b_0 < l_1 \cdot b_1$$

Porque solamente así se cumple con la condición de la constancia del volumen al haber al mismo tiempo un alargamiento, en la trayectoria del largo de contacto ( $l_d$  en la gráfica No. 9) habrá necesariamente un aumento de la longitud y del ancho del material que laminar. El aumento del ancho, llamado ensanchamiento, se puede dejar fuera de discusión por el momento porque por un lado es de menor magnitud y por el otro, existen medios de impedirlo por completo, aunque estos métodos, por ejemplo, canales completamente cerrados, no se usan en la práctica por razones que se conocerán más adelante.

Resulta que precisamente a lo largo del tramo que hace contacto con los rodillos  $l_d$ , el material sufre un alargamiento, como la velocidad de circunferencia no varía y suponiendo que en la salida del material rodillos y material tengan la misma velocidad,

no es posible que material y circunferencia tengan también iguales velocidades en la entrada porque el alargamiento logrado entre entrada y salida impone necesariamente que la velocidad de la superficie del material en la entrada es menor que la velocidad de la circunferencia y la magnitud de la diferencia de velocidad es directamente proporcional al grado del alargamiento. Imaginándose que el efecto es invertido y que la velocidad del material y de la circunferencia son las mismas en la entrada de los rodillos resultaría que la velocidad de la superficie del materia en el momento de la salida debe ser más que la velocidad de la circunferencia de los rodillos en el mismo punto. Estos dos casos que son dos extremos, realmente no se presentan en la práctica pero sí se presenta el caso de la existencia de un punto del tramo  $l_d$  donde la velocidad de la superficie del material es igual a la velocidad de la circunferencia. Desde este punto en dirección hacia la entrada del material la velocidad de la circunferencia de los rodillos es más que la del material y del mismo punto mencionado en dirección hacia la salida la velocidad de la circunferencia es menos que la velocidad del material. El conocimiento de este fenómeno es de mucha importancia, porque la diferencia de velocidades entre rodillos y material es uno de los factores principales que causan el desgaste de los rodillos y el punto central en el ancho del material, donde hay equilibrio de velocidades es precisamente la ubicación de la zona neutra.

En un estudio básico y de alto valor publicó E. Siebel en 1925 (revista Stahl und Eisen, 45, 1925, págs. 1563-1566) por menores sobre fuerzas y flujo de material y formuló la siguiente ecuación que determina las condiciones de fuerzas en cualquier punto dentro del largo  $l_d$  :

$$dH = 2k_f \cdot dx \cdot \frac{x}{r} \pm \mu \quad (11)$$

En la fórmula "H" significa la fuerza horizontal, "x" cualquier punto en la zona de contacto, "r" radio de los rodillos y "μ" el coeficiente de fricción entre rodillo y material. El cambio del factor "μ" de negativo a positivo tiene lugar precisamente aquí donde se invierte el sentido de la fricción "k<sub>f</sub>" representa el factor de la resistencia a la deformación y se puede considerar como invariable durante un proceso de laminación. Los autores H. Hoff y Th. Dahl en su libro "Bases teóricas de la laminación" (editor: Stahleisen, Dusseldorf, Alemania) dan amplia explicación al uso de esta fórmula de E. Siebel y aclaran que para el tramo antes de la zona neutra se puede usar la fórmula de Siebel en la siguiente forma, después de haber efectuado las respectivas operaciones matemáticas.

$$\frac{1}{2k_f} \cdot \frac{dH}{dx} = \frac{x}{r} + \mu \quad (12)$$

Mientras en el tramo después de la zona neutra rige según los mismos autores:

$$\frac{1}{2k_f} \cdot \frac{dH}{dx} = \frac{x}{r} - \mu \quad (13)$$

La integración de ambas ecuaciones diferenciales da como resultado: Para el tramo antes de la neutra:

$$Y_I = \frac{x^2}{2r} + \mu x + C_I \quad (14)$$

Para el tramo después de la neutra:

$$Y_{II} = \frac{x^2}{2r} - \mu x + C_{II} \quad (15)$$

Donde los miembros "C<sub>I</sub>" y "C<sub>II</sub>" son constantes de la integración que se determinan bajo ciertas condiciones, entre ellas que no hay fuerzas participantes en el proceso que sean externas, como

sería por ejemplo una fuerza de tracción en el material, causada - adicionalmente por un equipo adecuado o una fuerza que empuja al - material, mediante sus cálculos comprobaron los autores que los - miembros " $C_I$ " y " $C_{II}$ " de las ecuaciones mencionadas son:

$$C_I = 0$$

$$C_{II} = - \frac{l_d^2}{2r} - \mu \cdot l_d \quad (16)$$

Y al substituir los miembros " $C_I$ " y " $C_{II}$ " por los valores - mencionados se obtienen las condiciones de la ubicación de la zona neutra, porque en este punto debe ser la diferencia de velocidades entre rodillo y material igual a cero, o con otras palabras, el va lor numérico de la ecuación (14) es igual al valor de la ecuación (15) porque las ecuaciones representan la suma de las diferencias de velocidad antes y después de la zona neutra. Por lo siguiente es:

$$l_d = \overline{AC} + \mu X_n = \frac{X_n^2}{2r} - \mu X_2 - \left( \frac{l_d^2}{2r} - \mu \cdot l_d \right) =$$

$$X_n = \frac{l_d}{2} \left[ 1 - \frac{l_d}{2 \cdot \mu \cdot r} \right] \quad (\text{cm}) \quad (17)$$

El resultado de las ecuaciones en la distancia de la zona - neutra desde la salida del material en centímetros.

Analizando la fórmula (17) se da uno cuenta de inmediato que los factores que influyen en esta fórmula son los siguientes:

" $l_d$ " que es la proyección horizontal del arco de contacto en tre material y rodillo. Un aumento de este factor reduce la dis- tancia de la zona neutra de la salida de los rodillos.

" $r$ " que es el radio de los rodillos cuyo aumento aleja la zo- na neutra de la salida y " $\mu$ " que es el coeficiente de fricción - que al aumentarse también causa un desplazamiento hacia la entrada

alejándose de la salida.

De los factores que toman parte en la fórmula el más fácil de determinar es sin duda el radio de los rodillos y en este caso no hay problema.

El largo del contacto  $l_d$  tampoco es muy problemático. El largo se calcula según:

$$l_d = \overline{AC}_1 \cdot (\overline{AC})^2 = (\overline{AM})^2 - (\overline{CM})^2 = r^2 - \left(r - \frac{\Delta h}{2}\right)^2$$

$$l_d = \sqrt{r \cdot \Delta h} - \frac{\Delta h^2}{4} \quad (18)$$

El segundo factor bajo la raíz " $\frac{\Delta h^2}{4}$ ", no necesariamente deben ser calculado si la reducción de  $\frac{1}{4}$  altura es menos que el 10% del radio de los rodillos. En este caso el error por suprimir este factor es menor del 1% del total y se puede usar la fórmula simplificada que es:

$$l_d = \sqrt{r \cdot \Delta h} \quad (19)$$

Como se ve, entra como factor que influye en la posición de la zona neutra la reducción de altura y por ser determinante el largo de contacto.

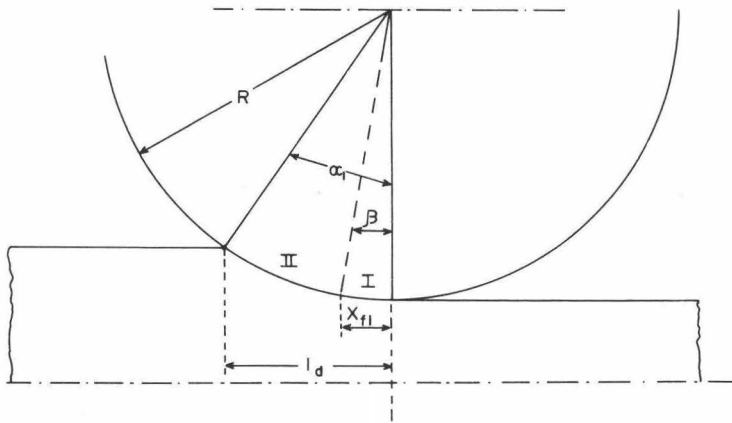
La determinación del factor " $\mu$ ", coeficiente de fricción, es mucho más problemático.

#### D) LA IMPORTANCIA DE LA ZONA NEUTRA

La ubicación de la zona neutra y los problemas relacionados con ella no solamente tiene un interés teórico sino también es de mucho valor para la práctica como se comprobará a continuación. Con la fórmula (17) se dio a conocer cómo calcular la ubicación de dicha zona neutra, conociendo los factores más sencillos.

En la gráfica No. 9 se aprecia el sistema de la zona neutra





GRAFICA No. 9 UBICACION DE LA ZONA NEUTRA

y los significativos son:

- I : La zona donde el material tiene más velocidad que la superficie de los rodillos.
- II : La zona en la cual los rodillos tienen más velocidad que el material.
- $x_{f1}$  : La distancia de la zona neutra de la salida de los rodillos.
- r : El radio de los rodillos.
- a : Angulo de entrada que es el ángulo formado por la perpendicular del centro del rodillo y el punto donde el material sin ser reducido toca al rodillo.
- b : El ángulo entre perpendicular del centro del rodillo y la zona neutra.

En este dibujo es  $\text{Sen } \beta = \frac{x_z}{r}$  pero por ser el ángulo  $\beta$  de muy pocos grados, se considera ser  $\text{Sen } \beta = \beta$  (Hoff und Dahl: Die Grundlagendes Walzverfahrens, Dusseldorf. pág. 160-180) y con esta consideración se convierte  $\beta = \frac{x_z}{r}$ . Además:

$$\beta = \frac{1d}{2r} \cdot \left( 1 - \frac{1d}{2\mu r} \right) \quad (20)$$

En primera aproximación se puede substituir  $\frac{1d}{r}$  por  $\alpha_1$  y la ecuación 17 resulta:

$$\beta = \frac{\alpha_1}{2} \left( 1 - \frac{\alpha_1}{2\mu} \right) \quad (21)$$

Debe de haber una o varias condiciones bajo las cuales el ángulo " $\alpha$ " se convierta en cero, que en el dibujo significa que la zona neutra se desplaza a la salida del material entre los rodillos.

Se convierte en cero el ángulo  $\beta$  cuando " $\alpha_1$ " es cero o bien cuando alcanza el valor de  $2\mu$ . Entre ambos límites se encuentra el máximo de una función se logra al diferenciarla y poner el coeficiente de diferenciación el valor cero:

$$\frac{1}{2} - \frac{\alpha_1^2}{2\mu} = 0 \quad \text{o también} \quad \alpha_1 = \mu \quad (22)$$

Al substituir en la ecuación (20)  $\alpha$  por  $\mu$  se obtiene el valor máximo de  $\beta$ :

$$\beta_{\text{máx.}} = \frac{\mu}{2} \cdot \left( 1 - \frac{U}{2\mu} \right) = \frac{\mu}{4} \quad (23)$$

Si analizamos bajo estos aspectos las condiciones al principio y durante un paso de laminación, nos damos cuenta que:

- 1.- En el momento de entrar la punta de un lingote entre los rodillos, ellos causan una presión radial de la magnitud (dN). (N = presión radial).
- 2.- La presión dN provoca bajo un ángulo de  $90^\circ$  una fricción de la magnitud dR (R = fuerza de fricción). Además  $dR = \mu \cdot dN$

Los componentes horizontales de dN son:

Para  $dN = \text{Sen} \alpha_1$  y para  $dR = \mu \cdot dN \cdot \alpha_1$ , de las cuales la primera es el componente que trata de alejar el lingote de los rodillos (resistencia a la deformación) mientras la segunda fuerza jala al material hacia el interior de los rodillos. Esta fuerza aparece en cada uno de los rodillos y la fuerza jala el material hacia adelante, logrando así una laminación:

$$2 \mu dN \cdot \text{Cos} \alpha_1 - 2dN \cdot \text{Sen} \alpha_1 =$$

$$2dN \cdot \text{Sen} \alpha_1 \left( \mu \cdot \frac{1}{\text{Tang} \alpha_1} - 1 \right) \quad (24)$$

En primera aproximación se puede substituir la tangente por un ángulo:

$$2dN \cdot \text{Sen } \alpha_1 \left( \frac{\mu}{\alpha_1} - 1 \right) \quad (25)$$

La última ecuación es la más importante porque indica:

- 1.- Si el ángulo  $\alpha_1$  es igual al  $\mu$  la fuerza que empuja el material hacia adelante es cero: los rodillos no agarran al material y el proceso de laminación no se puede iniciar.
- 2.- Si el ángulo  $\alpha$  es menor que  $\mu$  no hay problema. El material será transportado sin problema por los rodillos.
- 3.- Si el ángulo  $\alpha$  es más grande que  $\mu$  la fuerza horizontal se convierte en negativo: el lingote será rebotado.

Las condiciones mencionadas se refieren al momento de iniciar el proceso. Una fuerza adicional en el caso 1), digamos un empujón, causa que el proceso de laminación se inicie y siga adelante si se cumple la condición para laminar que es la formación de una zona neutra. Sin la zona neutra no hay laminación porque el flujo del material como se explicó con anterioridad, sería solamente hacia atrás. La condición mínima para poderse formar esta zona neutra es cuando  $\beta = 0$  y en este caso rige:

$$\alpha_1 = 2\mu \quad (26)$$

La teoría de los ángulos y de la zona neutra son de mucho valor por la práctica porque indican en una forma muy clara qué hacer si los rodillos no llevan al lingote o si el lingote, después de haber sido empujado y entrar en los rodillos no sea transportado hacia adelante porque los rodillos patinan. En el primer caso es posible lograr que los rodillos lleven el lingote al:

- a) Aumentar el diámetro de los rodillos
- b) Disminuir la reducción de la altura en el paso (ángulo  $\alpha_1$ )

- c) Aumentar la fricción de los rodillos, usando rodillos con una superficie áspera o con ranuras.

Estos tres puntos sirven también para contrarrestar a la falta de empuje en el caso dos. Además se puede predecir si un proceso de laminación que fue planeado en teoría se puede llevar a cabo y que efectos tiene una variación de las condiciones. Con un ejemplo se demuestra la utilidad de estas teorías:

De lo expuesto con anterioridad resulta que el coeficiente de fricción es de vital importancia para que un tren de laminación agarre al material y, una vez dentro de dos rodillos, lo transporte hacia adelante, el coeficiente de fricción está directamente relacionado con el ángulo de entrada como se ve en el dibujo No. 9 y conociendo el coeficiente de fricción se puede determinar cuál es el ángulo de entrada máximo permitible para lograr una deformación.

Lo problemático del asunto está en el coeficiente de fricción que no se puede determinar con facilidad porque depende de:

- 1.- De la temperatura del material: Con aumento de la temperatura baja el coeficiente de fricción. Material caliente será llevado más fácilmente por los rodillos.
- 2.- De la velocidad de laminación: Un aumento en velocidad reduce la fricción.
- 3.- La calidad y el material de los rodillos. (Ejem.: Rodillos lisos tienen menos fricción que rodillos ásperos. Acero fundido tiene más fricción que acero forjado).
- 4.- La forma de los canales, si es que son rodillos acanalados: En rodillos con caras en el fondo paralelo al eje de laminación la fricción es menos que en rodillos con canales inclinados al eje del rodillo.
- 5.- Del tipo de tren de laminación: Trenes continuos agarran el lingote con más facilidad porque el empuje causado por el castillo anterior aumenta la fricción.

Basándose en todos estos variables, se ha establecido para la práctica los siguientes ángulos de entrada como máximos:

Rodillos Lisos	23 grados
Rodillos con ranuras o costillas	30 "
Rodillos ásperos	25 "
Trenes continuos	35 "
Continuos con costillas	30 "

Estos datos solamente son de referencia y la única manera como poder determinar la fricción es hacer pruebas con diferentes ángulos de entrada, variando la reducción de altura paulatinamente.

## CAPITULO IV

### TRATAMIENTO TERMICO EN LAMINACION

En el proceso de laminación en caliente se logra automáticamente un tratamiento térmico por el solo hecho de que el material se trabaja en caliente, mientras se usa como producto final a temperaturas del ambiente. En este caso se enfría el acero después del laminado al aire y sin medidas especiales, caso común es fierro comercial. Aceros finos y aceros especiales requieren un tratamiento térmico, muchas veces tanto antes, como durante y después del proceso de laminación. Entre estos dos extremos se presenta una gama completa de tratamientos y se han establecido ciertas reglas que, al ser observadas, garantizan la máxima calidad del producto final.

#### A) TEMPERATURA DE LAMINACION

La temperatura a la cual se lamina un material es de gran influencia en la calidad del producto terminado, conservar el rango adecuado durante el proceso de laminación debe ser la preocupación principal del buen laminador.

Por razones de economía se pretende siempre aprovechar hasta donde sea posible, el calor propio de los lingotes que salen de la fundición, con este fin se usan hornos de fosa, en los cuales se llevan los lingotes a una temperatura uniforme. Desde luego este

procedimiento solamente es posible si se laminan los lingotes inmediatamente después de haber sido sacados de las lingoteras, o de la máquina de vaciado continuo. En este último caso, el uso intermedio de una fosa para uniformizar temperaturas puede ser innecesario, si la demanda de los molinos y entrega por parte del equipo de vaciado continuo están bien sincronizados, razón de más para dar preferencia al método moderno de vaciado continuo en la fundición.

Si por razones de organización interna de la planta no se aprovecha el calor propio de la fundición, es importante controlar la velocidad del enfriamiento, especialmente cuando se trata de aceros con tendencia a grietas, en esta fase del proceso no afecta un posible endurecimiento, causado por un enfriamiento rápido, porque el calor de laminación que posteriormente se aplica compensa completamente cualquier efecto del enfriamiento rápido. El problema que puede ofrecerse proviene solamente de la tendencia del material a agrietarse. El remedio en este caso es el enfriamiento bajo una capa aisladora de arena, cal, ceniza y otros materiales aislantes o en hornos especiales que permitan controlar la rapidez del descenso de temperatura.

Observar este paso con cuidado significa muchas veces evitar problemas posteriores, porque las grietas por esfuerzos residuales (contracción), no se pueden quitar más tarde con ningún medio de laminación. Otros problemas surgen al calentar de nuevo los lingotes fríos y los más frecuentes son:

- 1.- Grietas por contracción o expansión.
- 2.- Sobrecalentamiento local por flama directa o sobrecalentamiento general.
- 3.- Falta de uniformidad de temperatura en todo el lingote, especialmente diferencias entre superficie y núcleo.
- 4.- Exceso de oxidación superficial por permanecer en el horno durante un tiempo excesivo.



5.- Pérdida de carbón en la superficie, principalmente en aceros especiales como son los aceros de alta velocidad, por efectos de difusión del carbono a la superficie.

1.- El fenómeno de las grietas se presenta normalmente durante el enfriamiento y el peligro es más notable si la conductividad térmica del material es menor, pero no solamente al enfriarse sino también al ser recalentado sucede lo mismo, porque en el caso de metales de reducida conductividad térmica la expansión de las capas exteriores es más rápida que la expansión del núcleo, causando así una diferencia de volúmenes que provoca las grietas. Por esta razón requieren los aceros delicados no solamente un enfriamiento lento, sino también un recalentamiento cuidadosamente supervisado. Aceros al cromo son especialmente delicados en este sentido, porque la conductividad térmica de este tipo de material puede ser hasta 1/3 del acero común. El rango más crítico es desde la temperatura del ambiente hasta 800-900°C. De ahí en adelante la temperatura puede aumentar con más rapidez. Solamente si hay hornos de inducción disponibles se permite calentar a toda velocidad sin peligro, porque la inducción origina un calentamiento uniforme en todas las zonas del material, siempre y cuando el ciclaje y los datos eléctricos sean los correctos.

2.- El sobrecalentamiento local es perjudicial para el material de laminación porque causa una oxidación local que más tarde provoca agujeros o (por exceso de escama) fallas locales como son por ejemplo incrustaciones de escama, el problema se presenta principalmente por el mal manejo de los quemadores o errores en el diseño del horno. El remedio es fácil y consiste en no exponer el material a la flama directa.

Completamente diferente del sobre-calentamiento local es el sobrecalentamiento general, que por cierto no debe confundirse con material quemado, a consecuencia de un sobrecalentamiento general el lingote sale del horno con una temperatura demasiado alta, por esta causa comienza a crecer el grano y se obtiene un producto con

grano grueso y al mismo tiempo débil en sus propiedades. Para provocar un sobrecalentamiento se necesita levantar la temperatura - cerca de la línea AEC en el diagrama Fierro-Carbono, pero sin pasar arriba de dicha línea.

Para quemar (oxidar) a un material es necesario pasar esa línea que marca el límite entre sólido y el comienzo de liquidación (mezcla sólido-líquido), al llegar a esta temperatura el oxígeno - penetra por difusión a lo largo de los límites del grano y destruye el material. El peligro existente se descubre fácilmente, porque los lingotes se pegan dentro del horno uno contra el otro y la falla se remedia al reducir la temperatura, como se explicó con anterioridad no solamente la temperatura inicial sino también la temperatura final influye mucho en la calidad del producto, posiblemente más la temperatura final que la inicial. El rango más favorable en el cual se recomienda terminar un producto fluctúa entre 850°C y 1000°C, para obtener los mejores resultados hay que verificar el rango exacto para cada uno de los diferentes tipos de material. Para una orientación sirven las siguientes tablas para diferentes aceros:

TABLA No. 1.: TEMPERATURA INICIAL DE LAMINACION

Aceros comunes con Máx. 0.4% C	1100 - 1300°C
Aceros no aleados con más de 0.4% C	800 - 1000°C
Aceros aleados al Cr-Ni y al Ni	1000 - 1300°C
Aceros tipo HSS y aceros para herramienta	900 - 1200°C

Desde luego son más delicados los aceros finos que el acero comercial y al elaborarlos se recomienda observar las temperaturas finales que aparecen en la Tabla No. 2.

TABLA No. 2: TEMPERATURA FINAL DE LAMINACION PARA ACEROS  
(según Rappataz)

Acero no aleado 0.12% C	950°C
Acero no aleado 0.4% C	850°C
Acero no aleado 1.2% C	800°C
Aceros Cr-Ni	850°C
Aceros HSS y Similares, Aceros con 8-10%	900°C
Acero alto Cromo (2% C-12% Cr)	900°C
Acero 1.4% W	850°C
Acero 10-22% Cr. Ferríticos Máx.	750°C
Aceros inoxidable	900°C

Al establecer las temperaturas para un proceso de laminación y principalmente la temperatura del paso final, debe tomarse en cuenta el fenómeno del crecimiento de los granos. Este fenómeno procede a temperaturas elevadas, aproximadamente a partir de los 750°C y con temperaturas ascendentes se acelera el proceso. Consiste el fenómeno en un aumento notable de los granos individuales del acero si está expuesto durante algún tiempo a temperaturas altas, el efecto es netamente desfavorable porque los granos grandes son más débiles en todos sus aspectos y causan problemas múltiples en procesos posteriores de la elaboración. Un cuidado especial requieren los aceros que no tienen una transformación austenita-ferrita a base de un cambio de temperatura como por ejemplo aceros inoxidable, austeníticos y principalmente los aceros ferríticos a base de Cromo. Por la falta de transformación de fases no hay ninguna manera de refinar un grano crecido mediante un tratamiento térmico posterior y la única manera como influir es a través de una deformación. El detalle se refleja en la Tabla No. 2, donde los aceros ferríticos están marcados con una temperatura baja de origen a una resistencia a la deformación mayor, razón más por la cual estos aceros son más delicados en laminación que otro tipo de proceso.

## B) TEMPERATURA NO UNIFORME

Un calentamiento insuficiente es la causa de una diferencia de temperatura entre las capas exteriores y el núcleo del material que laminar, el problema se presenta frecuentemente en plantas que no trabajan con lingotes recientemente vaciados, sino con material que después de la vaciada se enfría para el almacenamiento y al usarlo se recalienta, pero muchas veces no se deja durante suficiente tiempo dentro del horno de calentamiento como para igualar la temperatura exterior e interior del lingote. La duración necesaria dentro de un horno depende del tipo de material y de las dimensiones del mismo. Un acero con 12% de cromo, por ejemplo, tiene solamente la mitad de conductividad térmica comparado con un acero no aleado y un acero con 10% de manganeso llega solamente a un tercio de la conductividad térmica del acero no aleado. Por la diferencia en conductividad térmica no se ha formulado hasta ahora una regla o una forma de cálculo matemático que sirve para todos los aceros, sino se usan tablas y diagramas, diferentes para cada tipo de material, considerando el diámetro del lingote.

3.- El exceso de oxidación se manifiesta en una capa gruesa de escama y representa naturalmente una pérdida del material. Sucede cuando no se maneja la atmósfera del horno con el cuidado que lo merece y principalmente cuando la carburación de los quemadores falla. Además sucede bajo estas condiciones (y en particular si la temperatura de calentamiento es alta) que el exceso de oxígeno penetra por difusión a lo largo de los límites del grano hacia el centro del lingote, causando material quemado con los efectos que se mencionarán más adelante. El remedio es sencillo y consiste en una carburación adecuada, de preferencia neutra o reductora con un poco de exceso de gas. Claro está que también existen aceros que por razones metalúrgicas no permiten atmósfera reductora.

### C) PERDIDA DEL CARBON

A temperaturas arriba de la temperatura  $A_{c1}$ , que en aceros - no aleados es de  $730^{\circ}\text{C}$ , comienza una difusión del carbón hacia la superficie del lingote y con la presencia del oxígeno del aire o de los gases de combustión se quema, haciendo más bajo el contenido del carbón en la superficie que en el interior del lingote. En el llamado fierro maleable se busca este efecto pero para laminación representa una deficiencia, el fenómeno se puede remediar, o por lo menos reducir, usando una atmósfera reductora. De todas maneras hay algunos tipos de aceros especialmente los que se usan para herramientas, que son muy sensibles a la pérdida del carbón y - estos aceros se les quita una capa después del proceso de laminación, usando maquinaria especializada de corte.

### D) TRATAMIENTO DESPUES DE LAMINACION

Todo lo relacionado con tratamiento térmico expuesto hasta - ahora se refiere únicamente a los puntos de tratamientos térmicos que observar antes de laminar. Para la gran mayoría de los aceros comunes (fierro comercial) basta con estas reglas, pero existen muchos tipos de material que no solamente requieren tratamiento antes, sino también después del proceso.

En fierro comercial se nota un efecto de tratamientos térmicos si el contenido de carbono sobrepasó el 0.3% aproximadamente. Los aceros de poca categoría se dejan enfriar sin medidas especiales y al aire libre.

Este procedimiento ni para aceros comunes siempre es el más propio porque el enfriamiento lento provoca un crecimiento de los granos y como consecuencia, la debilidad en propiedades físicas.

Es preferible, también para fierro comercial, aumentar la velocidad de enfriamiento con aire comprimido. En la práctica se encuentra uno con el problema del endurecimiento, enfriando con aire comprimido, debido al contenido alto de carbón de muchos artículos

de fierro comercial, especialmente varilla corrugada, o de productos, incluyendo ángulos y perfiles, que han sido elaborados por laminadoras que no llevan control de sus vaciadas. En estos casos, naturalmente, no hay otro remedio que dejar enfriar lentamente o cambiar el sistema de trabajo, llevando a cabo un control de calidad más rígido, en lo que se refiere a la calidad del acero.

Aceros de más categoría y para usos especiales se someten muchas veces a un tratamiento térmico después de laminación y las formas más usuales de tratamiento son:

- 1.- Normalización
- 2.- Temple
- 3.- Bonificación
- 4.- Recocido.

## CAPITULO V

MATERIAL, MEDIDAS DE RODILLOS Y TRENES DE LAMINACION

## A) MATERIALES

1.- ACERO FORJADO. Es sin duda el material ideal para rodillos, que no solamente por su alta resistencia, sino también por sus buenas características en lo que se refiere a la elasticidad de los mismos. Condición para fabricar buenos rodillos de este acero es que el material será forjado hasta el núcleo con el fin de destruir el grano grueso de la fundición, formándose en seguida un grano fino y elástico. El tratamiento térmico pos-forja debe ser el adecuado para compensar tensiones residuales y darles las características deseadas. El material que se usa comunmente contiene 0.35 - 1.00 % de carbono y adicionalmente cromo, níquel y molibdeno.

Los rodillos tienen una resistencia a la tracción hasta 90 kg/mm<sup>2</sup> y una dureza hasta 100° HB (aprox. 66 R<sub>c</sub>). Para evitar en el uso fisuras causadas por la dureza y el cambio de temperatura, es muy recomendable un enfriamiento rápido con agua. De todas maneras la resistencia al desgaste de estos rodillos no es de lo mejor. Trenes de laminación para aceros de alta calidad trabajan muchas veces sin enfriamiento por agua para lograr mejor acabado del material. Con todas las medidas de precaución no es posible evitar las fisuras y es indispensable retornar los rodillos si las fisuras son grandes.

2.- ACERO FUNDIDO. Sin forjar se usa ampliamente para rodillos de tamaño medio. Las características son similares al acero forjado, pero la elasticidad y la resistencia en caso de cargas súbitas son menores, comparando con rodillos de acero forjado, su ventaja está en la economía, aunque puede ser sobrecompensada por la falta de calidad. También el enfriamiento mediante agua es esencial, la resistencia llega hasta  $70 \text{ kg/mm}^2$ . Otra aplicación ventajosa es un tren preparador donde se trata de trabajo pesado y en donde los rodillos de fierro colado pueden romperse por falta de elasticidad de éste. Como el acero fundido caliente se pega fácilmente con el material a laminar, es necesario observarlo y limpiarlo frecuentemente.

3.- FUNDICION SEMI-DURA. La fabricación de los mismos se hace en moldes de arena. Los rodillos hechos de este material muestran buena resistencia al desgaste, son satisfactorios en la elasticidad y agarran en forma satisfactoria el material caliente. Amplio uso en trenes de desbaste y la biletta, trenes preparadores y perfiles de grandes dimensiones si el alargamiento (reducción de altura) es relativamente poca.

4.- FUNDICION GRIS. Material de buenas características de laminación, su uso se limita a rodillos de poco diámetro. El material es de buena resistencia al desgaste, pero se rompen más fácilmente que los de fundición semi-dura. El fierro fundido no se puede reparar mediante soldadura eléctrica con resultados satisfactorios.

5.- CHILL-IRON. Es fierro fundido, vaciado en moldes de fierro. Por el enfriamiento rápido se forma una capa dura que tiene un espesor de 10 al 15% del diámetro de los rodillos. La dureza es de 75 - 85 shore (53-59 Rc), el uso correcto es exclusivamente el último paso (acabado), por su dureza se impide usar mucha presión y por consecuencia solamente poca reducción de altura. Además es importante evitar canales profundas porque existe el pe-



ligro de llegar a la zona intermedia que es suave y no resiste al desgaste. Al llegar a esta zona sucede que el acabado del producto deja mucho que desear y sale con cicatrices y disparejo en medidas.

6.- FUNDICION NODULAR. Caracterizada por la forma globular del grafito. Rodillos con buenas características en lo que se refiere al desgaste y elasticidad. Muy apropiada para condiciones semi-duras si se requiere al mismo tiempo larga duración.

7.- INDEFINITE. Fundición de análisis variado. La dureza disminuye poco, desde la superficie hacia el núcleo y por eso se prestan para rodillos con calibres profundos. Uso preferido en rodillo de menor diámetro, como todo tipo de hierro colado no se puede reparar con soldadura.

8.- RODILLOS CHAPEADOS. Una técnica moderna permite hacer rodillos con núcleo de material barato sobre el cual se pone (en caliente) una llanta de acero especial, muchas veces de alta aleación. Esta técnica permite hacer rodillos de la más alta calidad y precisión. Uso preferido en los castillos de acabado para obtener máxima precisión, mejor acabado y larga duración.

## B) DIMENSIONES

El diámetro de los rodillos depende del tipo y las medidas del material que laminar. El ángulo de la entrada debe ser de tal magnitud que garantice la fácil entrada del material. Además influye también el tipo de castillo y sus respectivas medidas. La tendencia es usar siempre el mayor diámetro posible que permite instalar el castillo.

Como referencia sirven los siguientes datos:

## TREN DE LINGOTES Y PLANCHONES:

Duos : 800 - 1450 mm de diámetro  
 Tríos : 600 - 950 mm de diámetro

## TRENES PESADOS PARA PERFILES GRANDES Y PRODUCTOS SEMI-TERMINADOS:

Duo reversible : 600 - 950 mm de diámetro  
 Duo continuo : 350 - 750 mm de diámetro  
 Trío : 500 - 850 mm de diámetro

## TRENES UNIVERSALES:

Duo reversible : 600 - 900 mm de diámetro  
 Trío Lauth : 700 - 850 mm (rodillo arriba y abajo)  
 : 500 - 750 mm (rodillo central)

## TRENES PARA TRABAJOS MEDIO PESADOS:

Trío : 350 - 550 mm de diámetro  
 Duo doble : 350 - 420 mm de diámetro  
 Trío reparador : 550 - 650 mm de diámetro

## TRENES DE ALAMBRON:

230 - 450 mm de diámetro

## TRENES PARA PLANCHA, TRABAJO PESADO:

Duo reversible : 950 - 1250 mm de diámetro  
 Cuarto reversible: 800 - 950 mm (rodillo de trabajo)  
 1250 - 1800 mm (rodillo de apoyo)

## TRENES PARA PLANCHA, TRABAJO SEMI-PESADO:

Duo reversible : 850 mm de diámetro  
 Trío : 650 - 800 mm de diámetro

El contacto del rodillo con el material caliente causa un ca

lentamiento superficial, mientras el núcleo del rodillo se mantiene frío. La magnitud de las tensiones causadas por la diferencia de calor superficial y temperatura del núcleo cumplen con:

( $\sigma$  = Tensión por diferencia de calor, coeficiente expansión térmica, diferencia de temperatura °C exterior/interior, E = módulo de elasticidad en  $\text{kg/mm}^2$  ).

Estas tensiones por el calor pueden causar fisuras en la superficie de los rodillos y la corrosión por el agua hace progresar más la destrucción de la superficie del rodillo.

#### C) TECNICA DE FABRICACION

La técnica de fabricación de los rodillos es un factor muy importante para el rendimiento y la calidad de los rodillos que se usan para fines de laminación. Claro está que la técnica y fabricación toma un margen de variación netamente amplio, ya por el solo hecho de tratarse de materiales básicamente diferentes para los diferentes usos de los rodillos, pero todos los rodillos sin importar qué uso tengan o de qué material estén hechos, tienen un factor en común que es la vaciada en moldes.

Para todo rodillo de laminación la condición de más importancia es un material fundido limpio de huecos, grietas y desperfectos interiores que podrían debilitar la sección del rodillo causando por la misma debilidad, una rotura al ser expuesto a las fuerzas extraordinarias durante el trabajo.

Esta condición de una fundición limpia y sin fallas interiores rige tanto para material que se forja posteriormente como también para rodillos hechos de fierro colado en sus diferentes tipos como son Fierro colado gris, Chill Iron, fundición nodular y otros. Los rodillos de grandes dimensiones y de alta calidad se elaboran por empresas especializadas y tratar de imitar el trabajo de estos especialistas en fabricación casera no es muy recomendable, pero -

para rodillos de menor categoría si existen posibilidades de hacerlo, especialmente si las exigencias en calidad y duración no son muy altas.

La mayoría de los rodillos de laminación se funden en moldes de arena, para rodillos de menor tamaño en moldes de fierro, similar a las lingoteras. El éxito y la calidad de un rodillo de laminación depende no solamente de la composición química del material sino comienza ya en el diseño de los moldes para vaciar. Para obtener un producto limpio de desperfectos se recomienda siempre -- usar la técnica del vaciado ascendente.

A continuación se dan a conocer los análisis de algunos aceros y fierros vaciados, usados con éxito en la fabricación de rodillos de laminación:

ELEMENTO	A		L		E		A		C		I		O		N	
	No. 1		No. 2		No. 3		No. 4		No. 5		No. 6		No. 7		No. 8	
Carbono	3.0	-3.12	2.9	-3.1			3.35			2.1	-2.22			2.1	-2.2	
Manganeso	.23-	.28	.23-	.28			0.35			0.30				0.50		
Silicio	.58-	.62	.60-	.62			0.13			0.50				0.50		
Azufre	máx.	.07		0.07			0.06			0.09-	.15			0.05		
Fósforo		0.20		.15-	.25		0.15			0.25				1.03		
Molibdeno	0.25	máx.	0.30	máx.			0.20			0.20-	0.25			-0-	0-	
Cromo	-.-		0.25-	.35			1.1-	1.2		1.00				1.05		
Niquel	-.-		1.9	-2.1			0.8-	1.0		0.5	-1.25			1.45		

La característica de las aleaciones en términos generales son las siguientes:

Aleación No. 1: Fierro colado tipo Chill Iron, se espera una profundidad de aproximadamente 40 mm. de capa dura, muy usual en rodillos hasta 300 mm. de diámetro.

Aleación No. 2: También para Chill Iron con profundidad de la capa dura hasta 25 mm., es más duradera que la elación No. 1 y

sirve en molinos hasta 400 mm. de diámetro.

Aleación No. 3: Rodillos de buena calidad con dureza alrededor de 50 R<sub>C</sub> (70 Shore), uso principal en molinos de 250 mm para los últimos pasos.

Aleación No. 4: Aleación recomendable en molinos hasta 500 mm. de diámetro, trabajo semi-pesado.

Aleación No. 5: Aleación de gran dureza para uso en trabajos de desbaste en molinos hasta 500 mm. de diámetro y hasta 1000 de ancho.

Solamente representa una pequeñísima parte de las aleaciones usuales y se ha dado a conocer solamente con el fin de informar sobre las variaciones de aleaciones fundidas sin forja posterior.

#### D) REPARACION DE RODILLOS FUNDIDOS

Frecuentemente se presenta en la práctica el problema de la reparación de rodillos de laminación hechos de material fundido. - El problema más común es revestir rodillos que han sufrido un desgaste y con las múltiples rectificadas llegaron a un diámetro que ya no permite usarlos.

El material de estos rodillos es fundición gris, fundición blanca también llamado "chill-iron" y en algunos casos fundición nodular.

Mientras en término de "fundición gris" o "fierro colado gris" se considera como conocido, se repite en una forma corta la definición tanto de "chill iron" como de "fundición nodular".

Chill Iron es un fierro colado blanco, generalmente más rico en Manganeso y más pobre en silicio que el fierro colado gris. La diferencia se debe a la circunstancia que el manganeso favorece la formación grafitica, causando el último una tendencia hacia fierro colado gris.

Los rodillos de fundición blanca se elaboran en coquillas de fierro y por el enfriamiento rápido son de una superficie dura y - de un núcleo más suave y más elástico, esta característica los hace muy propios para ciertos usos en laminación.

Fundición nodular es un fierro colado gris pero con características físicas superiores. Su grafito no se precipita en forma de hojas, sino como esferitas, el efecto se logra mediante una desulfuración estricta aplicando el metal magnesio para este fin. El análisis químico de la fundición nodular muestra menos de 0.02% de azufre y 0.05 a 0.1% de magnesio, junto con cantidades pequeñas - (hasta 0.5%) de Niquel.

El problema de la reparación y del revestimiento de los rodillos fundidos no es nuevo y se han hecho muchos intentos de obtener un éxito en este trabajo, aplicando las más variables marcas y tipos de electrodos de soldar.

El método que en la mayoría de los intentos se ha aplicado es el siguiente:

Los rodillos se limpian superficialmente y grietas o fisuras se eliminan en un torno, sobre la superficie limpia y libre de fisuras se deposita una capa de soldadura, usando uno o varios pasos, de un depósito a base de niquel.

Los tres tipos más usuales de soldadura tienen en su depósito el siguiente análisis: Niquel puro de más de 95%, siendo el resto carbono, manganeso y otras impurezas.

Ferro-Niquel con 40% de fierro y 60% de Niquel e impurezas de menor importancia, depósitos a base de monel con 33% de Cobre y 67% de Niquel, también con impurezas ocasionales. Sobre el material base de los rodillos se deposita una capa de uno de los materiales mencionados con un grueso de 6-8 mm. dando al material antes de comenzar con la soldadura un precalentamiento de 100-300°C. Algunos problemas causa usar "soldadura muy especial" sin el precalentamiento. El uso de soldadura a base de niquel en sí es justi-

ficado debido al hecho que aleaciones de níquel no se endurecen al mezclarse con el carbono del material de los rodillos, además níquel y las aleaciones mencionadas ligan prácticamente con la mayoría de los fierros vaciados.

Como la soldadura de Níquel y de las aleaciones a base de níquel no son muy resistentes al desgaste, se deposita encima del "colchón" otra soldadura que dé una dureza de 28-35 Rockwell C. Durante el tiempo se ha efectuado prácticamente todas las posibles combinaciones de marcas y tipos de soldadura en la búsqueda de un éxito pero hasta ahora siempre ha sido un fracaso, aunque en algunos casos se ha logrado laminar durante algún tiempo. En algunos de los casos se rompió la soldadura o todo el rodillo en el primer intento de trabajo de laminación.

Los fracasos en los intentos de la reparación de rodillos de fierro fundido se debe principalmente a la creencia que cualquier problema se soluciona con soldadura adecuada y el problema según esta creencia está únicamente en tener disponible precisamente esta "soldadura muy especial". En el caso de los rodillos como en muchos otros casos similares, no se trata en realidad de un problema de la soldadura sino de un problema que tiene su origen en el comportamiento metalúrgico del propio material de los rodillos, y la soldadura es realmente de una importancia secundaria. Los dos factores más importantes que entre otros hacen tan problemático la soldadura de rodillos de fierro fundido son:

- 1.- El fierro fundido en todas sus formas tiene, comparándolo con el acero, una elasticidad reducida y un coeficiente de expansión térmica muy diferente, en el momento de soldar se levanta la temperatura local en el lugar donde el arco eléctrico toca al material a temperaturas muy altas (cerca de 1600°C) e inmediatamente, al avanzar la soldadura, se enfría el material, por su poca elasticidad el material de los rodillos no está en condiciones de recibir y aguantar los esfuerzos de la contracción y la falta de elasticidad originando una serie de micro-fisuras que en el momen-

to de soldar no se notan pero con el primer esfuerzo en los rodillos causan la rotura.

2.- El efecto de las fisuras se refuerza por la estructura metalográfica del material. En el diagrama de equilibrio Fierro--Carbono se ve claramente que en todos los fierros colados existe una estructura cementítica a la temperatura del ambiente (o estructura grafitica si se aplica el sistema estable ferrio-grafito). La estructura cementítica se forma a temperaturas abajo de  $721^{\circ}\text{C}$  y conforme a la velocidad del enfriamiento esta zona dura y quebradiza puede ser más ancha o más delgada, pero siempre está presente.

Bajo estas condiciones se puede considerar que la reparación de rodillos de fierro colado en los casos de un desgaste que requiere una reconstrucción es poco posible en la práctica. Hay que reconocer que sí existe una posibilidad teórica que también se puede aplicar en la práctica, pero sería tan costosa y además muy delicada en su ejecución que se pierde por completo el objetivo de la reparación que es economizar. El método consiste en soldar a temperaturas muy elevadas, precalentando toda la pieza a temperaturas alrededor de  $750^{\circ}\text{C}$ , mantener durante todo el proceso de soldar esta temperatura. Una vez terminado el trabajo de soldar se debe dar un tratamiento térmico de normalizado que puede tardar hasta una semana a temperaturas igualmente altas y un enfriamiento lento y controlado.

Con este proceso de reparación tan complicado se pierde toda ventaja y como los rodillos fundidos son relativamente económicos, es mucho más conveniente usar rodillos nuevos que además no incluyen tanto riesgo de un posible fracaso. Bajo estos aspectos se consideran los rodillos fundidos en la actualidad como no soldables.

#### E) TRENES DE LAMINACION

Con el nombre de "Tren de Laminación" se designa al conjunto



de maquinaria que sirve para producir artículos laminados, incluyendo no solamente los molinos, sino también equipos adicionales - auxiliares, como son por ejemplo los hornos de calentamiento, las mesas basculantes, tijeras de corte, camas de enfriamiento, transportadoras y todo equipo necesario para el buen funcionamiento.

De esta definición de que es un tren de laminación se deduce que un tren de laminación puede ser de un solo castillo o bien de una secuencia de varios castillos. Depende de su uso, sus productos, su arreglo y otras características. Se clasifican los trenes de laminación y se habla de tren continuo, tren abierto, tren de desbaste, tren de acabado y de otros tipos.

Aunque en este capítulo se mencionan detalles sobre uso de trenes de laminación se debe aclarar un punto muy importante: todas las reglas y recomendaciones no son rígidas de ninguna manera y el campo está completamente abierto para nuevas ideas. Lo único que vale es el éxito que se logra y un ejemplo es la introducción del vaciado continuo en las plantas laminadoras.

Teóricamente es posible fabricar cualquier producto con cualquier tipo de tren de laminación o molino, si la potencia disponible es lo suficientemente alta y el diámetro de los rodillos es lo suficiente para agarrar el lingote. En la práctica no se aprovecha siempre esta posibilidad teórica y el equipo en su diseño se diferencia básicamente, comparando por un lado equipos para acero plano (lámina, plancha, etc.) por otro lado equipo para material perfilado incluyendo este último varilla redonda, alambrón, material hexagonal y todo tipo que no sea plano. Esa diferenciación se hace porque la técnica de laminación para material plano (cuando la relación entre altura y anchura pasa encima de cierto límite), no se considera un ensanchamiento al ser laminado.

Siguiendo a la práctica de diferenciar entre material plano y material perfilado, se tratarán a los dos tipos básicos de equipos por separado.

## F) LAMINACION DE BARRAS Y PERFILES

1.- GENERALIDADES

La laminación de barras y perfiles incluye una gran variedad de productos terminados de las más diversas formas y medidas. Los productos de más importancia en el mercado son los siguientes:

Perfiles de ángulo, canal, T, I y Zeta.

Varilla corrugada y alambrón.

Barras cuadradas, hexagonales, redondas y rectangulares.

Rieles para ferrocarril y tranvías.

Soleras y perfiles especiales.

Por conveniencia y práctica se ha establecido en el transcurso del tiempo efectuar la laminación de barras y perfiles en tres fases sin que necesariamente estas tres fases estén siempre completamente separadas físicamente.

Además, la técnica del vaciado continuo y la tendencia hacia automatización de plantas la necesidad de olvidarse de reglas rígidas y adaptarse a las posibilidades y circunstancias que en cada uno de los casos de laminación son diferentes. De todas maneras el clásico plan de trabajo no ha perdido nada de su valor si se toma este plan no como una forma rígida de la instalación de una planta sino más bien como una guía que indica las intermedias en el trabajo de laminación.

Las tres fases más clásicas de laminación de barras y perfiles son:

- 1.- El desbaste
- 2.- La preparación
- 3.- El acabado.

Y conforme al trabajo que se ejecuta en cada uno de los trenes se habla del "Tren de desbaste", "Tren preparador" y "Tren acabador".

Anteriormente los tres tipos de trenes han sido separados no

solamente en su denominación sino hasta en su colocación, pero por razones expuestas, hoy en día no siempre es posible decidir con exactitud donde termina un tren y donde comienza el otro tren.

#### G) TRENES DE DESBASTE

Los trenes de desbaste se usan para reducir las grandes dimensiones de los lingotes fundidos a medidas de 300 x 300 mm o más pequeño y al mismo tiempo romper el grano primario con el fin de obtener una estructura del material que en los pasos posteriores permite reducciones máximas.

#### TREN PESADO DE DESBASTE

Es la forma más antigua de laminación y se compone de un solo molino Duo, muchas veces Duo reversible.

Material de salida: lingote de 5000 Kg. o más.

Producto semiterminado que fabricar: bilet hasta 200 x 200 mm que sirve de material de salida para tren reparador.

Rodillos: 1000 hasta 1500 mm diámetro normalmente hecho de acero forjado.

Los motores tienen un momento de par hasta 450 ton. Un tren reversible puede producir hasta 1.000,000 toneladas de productos semi-terminados por año.

Para este tipo de trabajo se usan dos diferentes arreglos para la unidad motriz, o se usa un solo motor acoplado a una caja re-  
partidora con engranes helicoidales para dar el movimiento en sentido contrario a los rodillos, o usan dos motores independientes, uno para cada rodillo (Twin Drive).

El segundo arreglo ofrece muchas ventajas por la facilidad de sincronización de velocidad de circunferencia entre el rodillo de arriba y el de abajo. Los Duos reversibles se manejan en tal -

forma que mediante un transportador se pone el lingote enfrente del canal que corresponde al paso y se empuja hacia él, hasta que los rodillos lo agarren, después de haber pasado se invierte el sentido de los motores y en el siguiente paso el lingote regresa al lado donde comenzó la operación. Después de cada segundo o cuarto paso se voltea el material a 90° para trabajar todos los lados en forma adecuada.

Un ejemplo de una secuencia de calibración para desbaste de lingotes fundidos de 600 x 600 mm, usando el método americano es el siguiente, efectuado en Duo Reversible.

PASO	CANAL #	ALTURA mm	ANCHURA mm	OBSERVACIONES
0	t	600	600	
1	0	530	626	
2	0	460	652	Voltear 90°
3	0	528	486	
4	0	512	512	
5	0	442	538	
6	0	372	564	Voltear 90°
7	0	494	398	
8	0	424	424	
9	0	354	450	
10	0	284	476	Voltear 90°
11	A	406	310	
12	A	336	310	
13	A	266	310	
14	A	196	310	Voltear 90°
15	B	230	210	
16	B	150	210	Voltear 90°
17	C	150	150	

## NOTA:

- O : Significa tablilla plana.
- A : Canal de 310 mm ancho.
- B : Canal de 210 mm ancho.
- C : Canal de 150 mm ancho.

La altura se ajusta mediante una variación. Es el rodillo superior que conforme con la altura se mueve hacia arriba o hacia abajo.

Una de las ventajas del método americano está en que se usan menos canales en un rodillo y así se hace el equipo más versátil. El problema del método está en la metalurgia porque por la libertad de ensanchamiento libre en los pasos del 1 al 10 existe el peligro de fisurar en las caras laterales. Precisamente aquí es donde se hace más notable la influencia del método de la elaboración del acero, material elaborado en un proceso SIEMENS-MARTIN (la gran mayoría del acero americano se fabrica con este método), no es tan delicado en cuestión de fisuras que los aceros THOMAS, muy usual en Europa. Igual o similar al acero Siemens-Martin se consideran los aceros elaborados en el horno eléctrico de arco y los elaborados con Lanza de Oxígeno (LD), mientras el ACERO BEESEMER - hoy de poco uso - es similar al acero Tomas o posiblemente más delicado. Ultimamente renació el acero Besemer con una variación, que se usa en lugar del aire el oxígeno para refinación y este material probablemente tiene futuro y según opiniones es muy similar al acero Siemens Martin.

TREN DESBASTE, TRABAJO MEDIANO

Se usan para lingotes de 2-5 tons. produciendo biletts que sirven como materia prima en trenes preparados y de acabado. Su producción es hasta de 200 tons.-hora, depende del número de pasos necesarios para lograr la medida con la cual se puede entrar en el tren preparador. Casi exclusivamente se usan duos o tríos reversibles con momento de par en los rodillos hasta 300 ton.

El diámetro de los rodillos fluctúa entre 800 hasta 1000 mm. También en trenes para trabajo mediano requiere que el material se voltee después de máximo cuatro pasos por razones de calidad. En este tipo de tren el motor independiente para cada rodillo es poco usual y lo común es el uso de la caja repartidora con engranes helicoidales.

#### TREN DE DESBASTE, TIPO LIGERO

En este trabajo se usa tanto el duo como el trío laminando lingotes de un peso hasta 2500 Kg. Su rendimiento es de 20 hasta 100 ton/hora y la potencia motriz alcanza hasta 850 mm. de diámetro. El tren de desbaste para trabajo liviano, equipado con tríos, es muy usual para laminadoras de capacidad mediana. El molino trío tiene la ventaja que no se necesita motor reversible para cambiar el sentido de revolución, y el precio del equipo eléctrico se reduce considerablemente. Por otro lado, existe la desventaja que los rodillos muchas veces son fijos y no se pueden adaptar en una forma tan fácil a las diferentes medidas de lingote. Además, debe tomarse en cuenta que en un molino trío el rodillo del centro está expuesto al doble desgaste que los rodillos exteriores.

#### TRENES CONTINUOS DE DESBASTE

Los trenes de desbaste mencionados hasta ahora son todos del tipo no continuo porque los pasos necesarios se efectúan en el mismo castillo, regresando el lingote después de cada paso. Sin duda esta es la forma más común y versátil de trenes de desbaste, pero no es la única forma de trabajar los lingotes. Especialmente en los EE.UU. se desarrolló la técnica de trenes continuos de desbaste.

Una de las plantas más famosas, no solamente por su arreglo sino también por la calibración, es la de GARY (Indiana), fábrica que elabora productos semi-terminados y rieles de FF.CC.

El tren usa lingotes fundidos de 603 x 603 mm. y en cuatro -

pasos, equivalente a cuatro molinos, se obtiene ya el bilet que después será convertido en riel.

En este arreglo también es notable que después de cada paso se voltea la pieza en  $90^\circ$  y de esa manera se logra muy buena calidad del producto y además se permite una reducción rápida de altura. La velocidad de avance es relativamente lenta porque el primero y el segundo molino giran con  $6 \frac{1}{3}$  RPM, mientras los dos últimos molinos (pasos 3 y 4) giran con  $10 \frac{1}{2}$  RPM. La velocidad de avance de la circunferencia, al fondo del calibre, es de 12.3 m/min en el molino 1 y de 26.3 metros/min en el molino 4 y corresponde a un rendimiento de 3000 Kg. por minuto de trabajo efectivo de la máquina.

El ejemplo de desbaste de la planta de Gary se mencionó para demostrar que también en los trenes de desbaste no hay reglas rígidas sino la meta debe ser siempre adaptarse a las necesidades y a la producción que se pretende sacar.

Bajo el mismo arreglo hay que ver los trenes no continuos y su programa de laminación que no solamente incluye material para barras y sus derivados, sino también una parte de material plano.

#### RODILLOS DE CALIBRACION DE TRENES DE DESBASTE

Por el tamaño y el paso del lingote usado como materia prima en un tren de desbaste para perfiles el trabajo en esta fase de laminación es uno de los más pesados como ya se ha mencionado. Correspondiente al trabajo pesado se usa el mejor material para los rodillos, siendo casi siempre acero fundido, muchas veces forjado y bonificado. El rodillo de acero de dos capas no es recomendable para perfiles porque por la profundidad de los canales que siempre hay que hacer debilitaría mucho el espesor de la capa exterior que es la que resiste el desgaste. Este tipo de material se usa principalmente en la elaboración de aceros planos.

En algunos casos se usan también rodillos de fierro colado y de fundición nodular, pero se debe tomar en consideración que el -

material es más delicado y por su elasticidad reducida puede romperse fácilmente al ser expuesto a esfuerzos exagerados.

Para la calibración, que es la secuencia de pasos con sus respectivas medidas, se usan en los trenes de desbaste para elaboración de perfiles dos secuencias que se conocen bajo el nombre de "Calibración Americana" y "Calibración Alemana". La diferencia entre una y otra forma de trabajar está en que la calibración Americana efectúa la mayoría de los pasos para el desbaste en una tabla sin canales (tablilla plana) y solamente los últimos pasos, más o menos los últimos 5 ó 6, se efectúan en canales. La calibración Alemana efectúa los primeros pasos, aproximadamente 5 ó 6, en tablilla plana, mientras el resto hasta llegar a la medida deseada, se efectúa en canales.

La existencia de las dos calibraciones se debe por un lado al detalle que en los EE.UU. la gran parte del acero se elabora con el método Siemens-Martin mientras en Europa se usa principalmente el proceso Thomas. El segundo punto de importancia es que en las laminadoras americanas que no se dedican exclusivamente a un solo tipo de perfiles, sino que muchas veces surten a varios trenes preparados, la demanda en material de forma rectangular es más elevada; ambos métodos dan el mismo resultado, si se tomó en consideración la característica propia del material.

#### H) TRENES PREPARADORES

La elaboración de productos semi-terminados desempeña un papel importante dentro del ramo de la industria de la laminación. El objetivo de esta fase de laminación es darle al material, que se recibe del desbaste, forma y medidas que permiten elaborar el producto final en un mínimo de tiempo pero con exactitud de medidas. Además, otra finalidad de los trenes preparadores, nombre común para equipo que elabora material semi-terminado es tener en su línea de calibraciones un gran número de diferentes medidas que



permiten ser usados sin ningún cambio en la calibración para los diferentes productos terminados.

En esta parte de la laminación se distinguen diferentes formas del arreglo de las plantas de laminación y antes de entrar en detalles es necesario hacer un corto resumen de los arreglos más usuales para trenes preparadores. Básicamente se conocen dos grandes grupos de laminadoras: los trenes continuos y los trenes no continuos. Los primeros son de mucha ventaja si el programa es limitado en la variedad de tipos y medidas, pero con una producción alta en toneladas.

En este tipo de planta colocan todos los molinos en serie, la velocidad entre un molino y el siguiente se controla mediante motores de velocidad variable o variadores de velocidad. En plantas modernas se hace la sincronización de los molinos entre sí con controles electrónicos, como no solamente en el desbaste sino en todo proceso de laminación es necesario voltear el material se usan en trenes continuos, molinos verticales (con los rodillos en posición vertical) o guías que dan al material entre un molino y el que sigue un volteo a 90°. El último método con guías requiere más experiencia y cuidado en el manejo del tren porque el volteo a 90° puede lastimar la superficie del material, debido a que las piezas en proceso se están laminando entre dos o más pares de rodillos al mismo tiempo y la distancia entre dos molinos es realmente reducido por no ocupar demasiado espacio.

En el proceso de laminación, se larga el material conforme su reducción de altura y para evitar una acumulación de material entre dos molinos se usa muchas veces una velocidad poco más alta que en el siguiente molino para evitar la acumulación. La sobrevelocidad origina una fuerza de tracción en el molino anterior y por desplazamiento de la zona neutra se permite una reducción de altura arriba de lo que se logra con trenes no continuos en molinos del mismo tamaño. La sobrevelocidad entre los molinos varía del 1 al 3% de la velocidad teórica que se necesitaría para laminar en -

el mismo tiempo la cantidad de material despachado del molino anterior.

#### I) LOS TRENES NO CONTINUOS

En trenes no continuos se usan varios arreglos en la colocación de los molinos y la característica común de todos estos trenes, es que los molinos se colocan uno junto a otro en dirección axial.

Los arreglos pueden ser en un solo eje o en varios ejes y depende de la forma de colocación se denominan los diferentes trenes:

Trenes abiertos se caracterizan por el hecho que todos los castillos, duos o tríos en combinación de los mismos, se encuentran en un eje, propulsado por un solo motor. Este es el arreglo más antiguo de un tren de laminación, llamado también "Tren Belga". La revolución es la misma en cada uno de los molinos y una diferencia en velocidad se logra únicamente mediante el uso de rodillos de diferentes diámetros.

En trenes abiertos se usan tanto duos como tríos y hasta nueve castillos en serie.

Una variación del tren abierto es el tren tipo Alemán, que consiste en un tren abierto pero con los castillos divididos en dos grupos independientes con su motor por separado, también en estos trenes se usan castillos duo y trío.

Una evolución son los trenes con más de dos grupos de castillos y con sus respectivos motores. El diseño de los arreglos diferentes se ha desarrollado a través del tiempo conforme a las necesidades de la industria y varios de estos diseños han sido patentados por sus respectivos diseñadores.

## J) TRENES DE ZIG-ZAG

Mientras los trenes abiertos han sido desarrollados en Europa se buscaba en EE.UU. una solución con los trenes de Zig-Zag. - Depende de los castillos que se usan se habla de molinos "Cross---Country" al usar castillos trío y de molinos Staggered (Staggered mill) si los castillos que se usan son de duos.

El uso de ambos laminadores es de gran ventaja en la producción de material de perfiles y barras porque en estos molinos sale el material completamente de un molino antes de entrar en el si---guiente y lógicamente la deformación del material al voltearlo en 90° es menos.

## K) TRENES COMBINADOS

Ya en 1900 aproximadamente se hicieron arreglos de combinación de un tren continuo para el desbaste o para tren preparador - acoplado después un tren abierto, no continuo. Los llamados trenes "semi-continuos" son de mucho uso, especialmente en casos de - producción variable o en plantas de tamaño mediano y hasta grande, donde se pretende obtener una buena producción con un costo de inversión más reducido.

## L) MOLINO CONTINUO DE BILETS

Para alta producción se usan laminadoras de biletts del tipo continuo.

El arreglo compacto y por consecuencia la poca distancia entre los castillos no permite un volteo de los biletts y este detalle hace necesario agregar molinos verticales después de cada segundo paso. Como el arreglo fue diseñado para alta producción, se han previsto canales de reserva en los diferentes rodillos y con un equipo hidráulico se permite desplazar lateralmente las guías, cambiando de esta manera los canales desgastados inmediatamente -

sin tener tiempo muerto.

La variedad de medidas que se pueden elaborar con un molino continuo es grande y depende de la calibración de los diferentes castillos.

Muchas veces no se usa solamente un tipo de secuencias, sino varias en el mismo tren con el fin de tener amplias posibilidades de elaborar el producto final deseado. Partiendo de un lingote de 190 mm x 190 mm por ejemplo, se elaboran hasta 130 diferentes tamaños de biletts en Gary, Indiana (EE.UU.). El tren en cuestión se compone de dos grupos con 6 castillos cada uno. Los biletts de sección cuadrada están marcados con sus respectivas medidas.

#### M) LAMINACION DE ALAMBRON

El alambroón es un material redondo de 5.5 hasta 15 mm y en algunos casos hasta 25 mm de diámetro, en rollos. El alambroón se usa para la elaboración de alambre, estirándolo en frío, y muchos productos se fabrican a base de alambre como son tornillos, soldadura, clavos, grapas y una infinidad de productos más. Además, se usa el alambroón laminado en caliente en la construcción del concreto para amarrar los castillos hechos de varilla corrugada.

La laminación de alambroón es uno de los procesos más problemáticos por las siguientes razones:

1.- Por tratarse de un producto semi-terminado, destinado a la fabricación de artículos de gran consumo y poco valor comercial, su precio en el mercado es reducido.

2.- Por el bajo peso por metro se necesitan altas velocidades en la elaboración, con el fin de no tener que recargar gastos elevados en amortización y mano de obra.

3.- El costo para la instalación de equipo es alto, porque por lo delgado del alambroón se necesitan muchos pasos para reducirlo a la medida. Partiendo de un bilet por ejemplo de 80 x 80 mm.

se necesitan 24-25 pasos para obtener alambrión de 5.5 mm.

4.- Por lo delgado el alambre se enfría rápidamente y sólo - con alta velocidad de trabajo se logra una temperatura aceptable - en el último paso, pero el material liviano requiere por falta de peso y falta de rigidez un cuidado extra al ser conducido de un molino a otro.

Las características propias del alambrión causaron un desarrollo muy especial en el diseño de las plantas laminadoras. Ante---riormente se usaron trenes continuos para el preparador y el tren abierto en los últimos 8 a 11 pasos.

Por razones técnicas fue necesario hacer el cambio de un molino al otro manualmente (tenacero) y así se limitó la velocidad a 9-10 m/seg.

El aumento del costo de mano de obra causó que en lugar de - usar un solo hilo se laminaron hasta 8 hilos de alambre al mismo - tiempo y en el mismo molino. Lo más usual fueron y son todavía, 4 hilos paralelos.

Con este método se alcanzan hasta 300 tons/turno, pero esta productividad no da a basto a las necesidades. El avance de la -- técnica permite hoy en día construir plantas para alambrión con una velocidad hasta 40 m/seg en el último paso. Desde luego estas -- plantas son completamente continuas y automáticas.

La particularidad de la elaboración del alambrión incluye el problema causado por la calibración, dar al material un volteo a - 90° entre un paso y el siguiente con un equipo de guías de torsión. Este volteo es necesario porque las secuencias en calibración son Rombo-Cuadrado-Rombo y Ovalo-Cuadrado-Ovalo o bien Ovalo-Rombo-Ovalo y al entrar un material ovalado en el cuadro siguiente se le debe dar un volteo por 90°. En Europa se logró el volteo a 90° no - mediante guías que causan una torsión al material, sino se usan de preferencia trenes con molinos verticales y horizontales.

Otro problema que dominar es que en el proceso de laminación

se alarga el material y los últimos molinos deben de tener una velocidad más elevada que los molinos al principio del tren. Con motores y variadores individuales y la técnica moderna de sincronización ya no es tan problemático, pero hay que ver un punto importante, una sincronización perfecta entre dos molinos es todavía difícil en la práctica por variaciones del material. Se usan dos métodos de trabajo en EE.UU., se da al molino siguiente un poco más de velocidad de lo que realmente se necesita (máx. 1-2%), causando una ligera tracción, mientras los trenes europeos trabajan con un lazo entre un molino y el otro. El método europeo no permite, por lo menos en los últimos pasos, trabajar con varios kilos en el mismo molino, sino se necesita para cada hilo un tren acabador por separado. Con el método americano no se permite el uso de lazos por que el volteo por 90° sería más problemático todavía, pero se permiten varios hilos en el mismo castillo. Para obtener buenas características del alambón es necesario observar que la temperatura en el último paso esté arriba del punto  $Ac_3$  y también controlar la rapidez del enfriamiento. Este control del enfriamiento es necesario para reducir la cantidad de escama, que sin control alcanza hasta 2% mientras con control baja hasta 0.3% y para obtener -- una micro-estructura del material uniforme. El problema del enfriamiento es más notable en rollos de pesos elevados, porque en el equipo de embobinado se forma un rollo que en el núcleo se enfría más lentamente que en las caras exteriores y con esta diferencia del enfriamiento varían los datos físicos considerablemente. -- Ultimamente se diseñaron camas de enfriamiento controlado, no solamente para aceros de calidad, sino también para alambón común.

Un enfriamiento no adecuado puede hacer imposible la elaboración posterior de alambre, causando reventones en la trefilada en frío.

CAPITULO VI  
FUERZA Y POTENCIA

A) POTENCIA PARA LAMINACION

El cálculo de la potencia necesaria en un proceso de laminación, no solamente es de interés para el diseño de un equipo sino también para la práctica y para plantas en uso, porque antes de poner en marcha un nuevo plan de trabajo, es necesario saber si el equipo existente puede cumplir con las fuerzas y potencias que se requieren para realizar el plan de trabajo.

Anteriormente se comprobó que el trabajo de deformación plástica es:

$$A = k_D \cdot V \cdot \int_{h_1}^{h_0} \frac{dh}{h} = k_D \cdot V \cdot \ln \frac{h_0}{h_1} \quad (26)$$

Esta fórmula cubre solamente el trabajo necesario para la deformación, sin tomar en cuenta pérdidas de potencia por fricción en el equipo y tampoco incluye la energía que consumen los motores sin llevar carga. La determinación de esta potencia adicional se puede efectuar en el caso de rodillos no acanalados en tal forma que se acerquen los rodillos hasta hacer contacto y se toma la característica de consumo del motor en relación con la presión de los rodillos. Por parte del proveedor del equipo se notifica mu--

chas veces inclusive esta característica, que es básica para obtener el total de la potencia necesaria y también para poder fijar el máximo de potencia disponible para fines de trabajo. Si no hay estos datos y tampoco la posibilidad de una comparación, calculando dos diferentes trabajos de diferente magnitud, efectuar el trabajo en el equipo disponible y tomar los datos correspondiente. Del resultado total se resta el total calculado para la deformación plástica según fórmula mencionada y se obtiene la parte de pérdidas correspondientes. Desde luego este método no es muy exacto, pero por lo menos dará un índice sobre las pérdidas de energía en el propio equipo.

La fórmula mencionada es el trabajo necesario solamente para efectuar la deformación, trabajo neto de laminación. De las leyes básicas de la física se sabe que:

Potencia = trabajo por unidad de tiempo.

Y si sustituimos en la fórmula arriba mencionada la V por el volumen de material que se lamina en la unidad de tiempo, por ejemplo en un segundo, obtenemos la potencia y se designa el volumen laminado por segundo como  $V_t$  resulta:

$$\text{Potencia} = k_D \cdot V_t \cdot \ln \frac{h_0}{h_1} \quad (27)$$

también la potencia representa únicamente lo necesario para el trabajo de laminación, sin incluir pérdidas en el equipo.

Para poder usar esta fórmula en la práctica es indispensable transformar la potencia necesaria en unidades de energía eléctrica (kwh) o bien en caballos de fuerza. Además, en la fórmula mencionada no se considera la influencia que tiene el diámetro de los rodillos.

Con el fin de poder transformar la potencia obtenida en el cálculo es preciso hacer ver que la fórmula mencionada es de carácter general, sin precisar en qué forma se aplica fuerza y trabajo.



En un proceso de laminación se trata de fuerzas giratorias que producen automáticamente un momento de par.

Observando bajo estos aspectos el esquema No. 10, se puede considerar que en un rodillo de laminación la resultante de las fuerzas de laminación de la magnitud  $P$  causa en la distancia " $a$ " en cada uno de los rodillos un momento de par de:

$$M = P \cdot a \quad (28)$$

y el total en ambos rodillos es:

$$M_{\text{tot.}} = 2 \cdot P \cdot a \quad (29)$$

Para vencer este momento de par es necesaria cierta fuerza que usa el diámetro del rodillo como palanca y la fuerza necesaria en la circunferencia del rodillo es:

$$F_c = \frac{P \cdot a}{r} \quad (30)$$

Para ambos rodillos resulta:

$$F_{c \text{ tot.}} = 2 \frac{P \cdot a}{r} \quad (31)$$

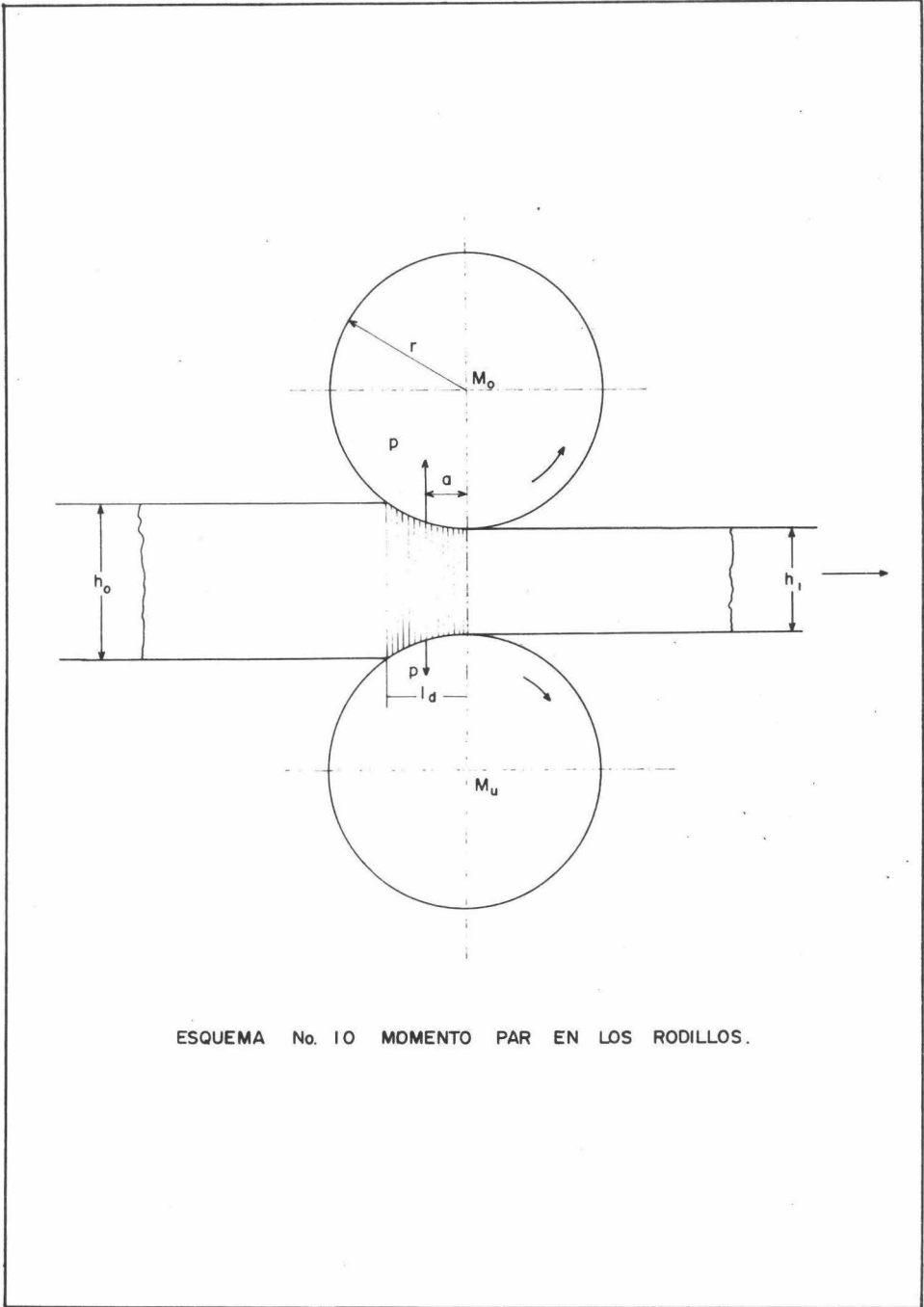
Según la definición de trabajo que es:

Trabajo = momento por Angulo de volteo.

Resulta si se designa el ángulo de volteo como:

$$A = 2 \cdot P \cdot s \cdot a \cdot \alpha = K_d \cdot V \cdot \ln \frac{h_0}{h_1} \quad (\text{cmKg}) \quad (32)$$

Y la potencia necesaria para efectuar este trabajo en la unidad de tiempo resulta ser:



ESQUEMA No. 10 MOMENTO PAR EN LOS RODILLOS.

Potencia = Momento par . Velocidad de ángulo ( W )

$$\text{Potencia} = 2 \text{ P.a.w} = k_d \cdot V_t \cdot l_n \cdot \frac{h_o}{h_1} \quad (33)$$

Esta fórmula es poco práctica para el uso general y con sustitución de sus componentes se logra una fórmula en la cual se necesitan saber:

La resistencia total a la deformación	= $K_d$
El ancho promedio antes y después del paso	= $b_m$
El radio del rodillo	= $r$
La reducción de altura	= $\Delta h$
Las revoluciones por minuto de los rodillos	= $n$

Con estos datos se puede usar la fórmula para la potencia en los rodillos, como sigue:

$$\text{Potencia} = k_D \cdot b_m \cdot r \cdot n \cdot \frac{h}{30} \quad (\text{cmKg/seg}) \quad (34)$$

Es la potencia necesaria para hacer únicamente el trabajo de deformación y debe agregarse las pérdidas correspondientes al equipo como se ha mencionado.

Para determinar en forma rápida los kilowatios necesarios en el motor para vencer el momento de par en un castillo de laminación se puede usar también la fórmula:

$$M = \frac{973 \cdot N}{n} \quad (35)$$

en la cual significa "M" el momento de par en kgm/seg. fórmula -- (35), "N" la capacidad nominal de motor en kW y "n" las revoluciones del rodillo por minuto.

En la práctica se recomienda calcular el motor de tal potencia que los kW según fórmula (35), presente el 75-80% de la potencia nominal del motor.

## B) EL ENSANCHAMIENTO

Como se explicó el paso del material entre dos rodillos no sólo produce una reducción de altura, (h) sino también un alargamiento proporcional a la reducción de altura, porque el volumen del material trabajado es igual antes y después de cada paso. Hasta este momento se ha considerado que la reducción de altura se refleja únicamente en un aumento del largo pero tal suposición no es correcta, por lo menos en todos los casos.

Se hizo esta suposición con el fin de simplificar ciertos detalles de los sucesos en laminación y en los casos específicos donde sin cometer grandes errores se puede considerar el alargamiento como único efecto de la reducción de medidas.

Al hacer pasar un material por ejemplo, un lingote, entre dos rodillos y tomando las medidas antes y después del proceso se notará que aparte de la reducción de altura, que a su vez es muy fácil de controlar, no saldrá la longitud prevista, sino una longitud un poco menor pero el ancho de la placa aumentó y el material sufrió un ensanchamiento. Este ensanchamiento puede ser útil si el ancho del producto final es mayor que el ancho del material de salida, pero en la gran mayoría de los casos el ensanchamiento es un fenómeno poco deseado. Las preguntas que deben hacerse son: - ¿De qué magnitud será el ensanchamiento? ¿cuál es la razón del ensanchamiento? ¿cómo se calcula la magnitud del ensanchamiento? - ¿cuáles son los medios para controlar y dominar el fenómeno?

La razón por la cual un material, al ser laminado, se hace más ancho es que la resistencia del material en la dirección de la laminación, hacia donde una expansión causa únicamente alargamiento es relativamente alto, especialmente en las partes centrales del -

lingote.

Esto se debe al detalle que el material en el desplazamiento hacia adelante tiene que vencer la resistencia de todo el material que hay enfrente, mientras lateralmente no hay tanto material que pueda impedir el flujo. Además se comprobó en la parte sobre "Flujo de Material y Zona Neutra" que el material antes de la zona neutra tiene menos velocidad que los rodillos y lógicamente los rodillos causan en esta zona una presión que no se puede compensar de inmediato, cediendo el material hacia la dirección de laminación. Parte de esta energía se consume en el desplazamiento lateral del material, originando así su ensanchamiento. Con lo revelado sobre las razones más importantes que causan el ensanchamiento se puede sacar la conclusión que son varios factores que influyen en la magnitud del ensanchamiento y los más importantes son los siguientes:

1.- La temperatura del material. Una reducción de la temperatura trae consigo un aumento de la resistencia a la deformación y lógicamente más resistencia al flujo del material. Como hacia adelante siempre hay un volumen más grande de material que hacia los lados, donde en las orillas el volumen enfrente es cero, es de esperar que se produzca más ensanchamiento al laminar a temperaturas más bajas, manteniendo todos los factores invariables y en realidad así lo es.

2.- El diámetro de los rodillos debe influir, porque rodillos de diámetros más gruesos causan una zona de contacto más larga y automáticamente, manteniendo todas las demás condiciones invariables, la zona de más velocidad de los mismos rodillos se hace más larga. Es de esperarse un aumento en el grado del ensanchamiento al aumentar el diámetro de los rodillos y en realidad así es, rodillos de más diámetro ensanchan más.

3.- La reducción de altura (h) debe influir porque con el aumento de (h) aumenta también el largo de contacto. Los efectos deben ser un aumento del ensanchamiento y en verdad así lo es.

4.- La relación entre altura original y ancho original debe influir, porque más ancha es la pieza menos influye una zona en las orillas (donde menos resistencia al ensanchamiento encuentra el flujo de material) y es probable que al aumentar la relación ancho-altura, se reduce el ensanchamiento porcentual. Realmente la práctica comprobó esta hipótesis, el ensanchamiento en material ancho es menos (en porcentos) que bajo condiciones iguales al ensanchamiento en material de menos anchura.

5.- La velocidad de la circunferencia de los rodillos debe influir en el sentido que a menos velocidad hay más ensanchamiento porque el material, en condiciones iguales, tiene más tiempo para desplazarse lateralmente. La práctica comprobó la teoría, aunque la influencia de la velocidad de laminación es de importancia secundaria.

6.- La composición química del material debe influir, porque con la composición química varían ampliamente todas las características del material. La práctica comprobó también en este caso la teoría, este factor de influencia es posiblemente el que más dificultades ofrece a la determinación sin ensayos prácticos.

Como se ve en el resumen de los factores que pueden influir en la magnitud del ensanchamiento, resumen que solamente hace mención de lo más importante no es una tarea fácil de precisar el ensanchamiento del material en laminación y sí anticipamos la conclusión final se puede decir sin exageración que hasta ahora no existe ningún método con excepción de hacer pruebas físicamente para predecir con exactitud cuál será el ensanchamiento.

Existen métodos y formas de cálculo que permiten un acercamiento bastante bueno a la realidad, suficientemente exacto para fines de la práctica. Por la importancia que cobra el ensanchamiento en la laminación se investiga el fenómeno desde hace mucho tiempo. La primera fórmula para el cálculo del ensanchamiento que sí dio resultados aceptables, fue publicado, junto con una explicación de las razones, en el año 1900 por el francés L. GEUZE y la

fórmula es:

$$\Delta b = C \cdot \Delta h \quad (36)$$

Donde  $\Delta b$  es el aumento del ancho, ensanchamiento y  $C$  una constante que depende del material. La fórmula hoy en día todavía se usa especialmente en la laminación de bloques y lingotes de grandes dimensiones, donde la medida exacta es de menor importancia y también si se trata de un cálculo rápido y aproximado. El factor  $C$ , para hierro común, según el autor es 0.35 pero varía, por lo que se ha explicado sobre los factores que influyen en el ensanchamiento y que no han sido considerados en esta fórmula. Dependiendo de las condiciones se encontraron valores numéricos desde 0.25 hasta 0.60 para el factor  $C$ , pero el valor 0.35 representa un promedio aceptable en trabajos pesados.

En orden cronológico fue el autor E. Siebel quien publicó la próxima fórmula para el cálculo del ensanchamiento en el año 1923. Su fórmula es:

$$\Delta b = C \cdot l_d \cdot \frac{\Delta h}{h_0} \quad (37)$$

La fórmula es en su estructura una variación de la fórmula de Geuze, aunque las conclusiones que condujeron al autor a la fórmula fueron completamente diferentes a las del primero. También en este caso el factor  $C$  es una constante que debe dar la práctica, el valor numérico de 0.35 para condiciones medianas, como son una reducción de altura entre 15 y 25%, velocidad de laminación hasta 2 m/seg y temperatura entre 1000° y 1200°C da buenos resultados. Por tomar en cuenta el largo de contacto y con éste el diámetro del rodillo y también la altura inicial aparte de la reducción de altura, la fórmula de Siebel puede considerarse como más exacta, que la fórmula de Geuze.

La fórmula más completa que incluye la mayoría de los factores que pueden influir que se ha publicado hasta hoy, fue elaborada

da por el sueco SVEN EKKELUND en el año 1927 y la fórmula es:

$$\frac{1}{2} (b_1^2 - b_0^2) = 4m \sqrt{r \cdot \Delta h} - 2m(h_0 + h_1) \sqrt{r \cdot \Delta h} \cdot \ln \frac{b_1}{b_0} \quad (38)$$

Esta fórmula se considera hoy todavía como la más exacta y la más universal, porque incluye los siguientes factores:

$b_0$  : ancho antes del paso.

$b_1$  : ancho después del paso, medida requerida.

$r \cdot h$  : largo de contacto.

$h_0$  : altura inicial.

$h_1$  : altura después del paso.

Además el factor "m" es una función aparte y su fórmula es:

$$m = 1.6 \mu \frac{\sqrt{r \cdot \Delta h} - 1.2 \Delta h}{h_0 + h_1} \quad (39)$$

En esta función parcial aparece el factor que considera la diferencia de fricción por variación de temperatura y por variación del material de los rodillos porque es:

$$\mu = 1.05 - 0.0005 t \quad (40)$$

Si los rodillos que se usan son de acero fundido. Si se usan rodillos hechos de fundición dura (Chill Iron) se aplica el 80% valor para rodillos de acero fundido.

No cabe duda que la fórmula es sumamente complicada para el uso en circunstancias normales, salvo que se disponga de una computadora. La utilidad de la fórmula por un lado y su difícil aplicación por otro lado, originaron la construcción de una regla de



cálculo (autor MOGILYANSKI, 1943) que permite usar esta fórmula - con facilidad y rapidez. De todas las fórmulas para el cálculo de ensanchamiento se considera como la mejor fórmula la de Ekkelund y hasta hoy es la de más uso en casos críticos.

Poco antes, 1925, los autores W. TAFEL y H. SEDLACZEX, revelaron una fórmula distinta, más sencilla, que el segundo autor también aprovecha (1954) en la laminación de aceros inoxidables. Después de algunas variaciones y estudios se publicó la siguiente fórmula:

$$\Delta b = b_0 \cdot \frac{\sqrt{b_0 \cdot r \cdot \Delta h}}{3(b_0^2 + h_0 \cdot h_1)} = C \cdot b_0 \frac{\sqrt{b_0 \cdot r \cdot \Delta h}}{b_0^2 + h_0 \cdot h_1} \quad (41)$$

En la cual encontramos aparte de los componentes ya conocidos, el famoso factor "C" de nuevo. Esta fórmula por su relativa sencillez, hoy en día es todavía de mucho uso y con muy buenos resultados.

La última fórmula del ensanchamiento que fue publicada en 1941 y es una modificación de la fórmula de Siebel, fue ideada por W. TRINKS y dice:

$$\Delta b = C \cdot l_d \cdot \frac{\Delta h}{h_0} \cdot C_1 \quad (42)$$

En esta fórmula se considera qué material a partir de cierta relación ancho-altura se comporta diferente en lo que se refiere - al ensanchamiento, conforme con las observaciones en el inciso (4) al principio del capítulo. El segundo factor constante,  $C_1$ , toma en cuenta esta característica y el autor propone usar los siguientes valores numéricos para  $C_1$  :

$C \cdot l_d$	7	8	10	12	14	16	18	20
$C_1$	1	0.92	0.75	0.60	0.45	0.30	0.10	0



UNIA

Lo más notable en esta fórmula es que el autor propone no considerar ensanchamiento si el material es 20 veces más ancho que alto. Este caso extremo puede ser correcto en primera aproximación, pero también puede suceder que no siempre da resultados muy confiables.

NOTA: La fórmula N° 41 y 38 fueron sometidas a un análisis parcial con computadoras y se ha visto que son dudosas (sin haberse terminado el análisis), los resultados obtenidos de su aplicación.

### C) EFECTOS DEL ENSANCHAMIENTO

El ensanchamiento es un fenómeno que se presenta obligatoriamente en todo proceso de laminación como se ha explicado con anterioridad y es preciso darse cuenta de los efectos que causa o puede causar este fenómeno. Para poder evaluar la influencia del ensanchamiento, se necesita distinguir entre dos casos extremos. Al laminar un lingote de hierro de forma rectangular entre dos rodillos planos no hay ningún medio que estorbe el desplazamiento lateral del material y lo único que puede influir en el grado del ensanchamiento son las características y factores que se han mencionado en los incisos 1 al 6 de este capítulo. El otro extremo que se encuentra muchas veces en laminación, es cuando un lingote o cualquier otra forma de material será laminado en canales que son igualmente del mismo ancho, pero desde luego de menos altura, y en este caso no hay posibilidad ninguna de ensanchamiento, entre ambos extremos existe una gama muy variable de ensanchamiento parcial.

Observando lo que pasa en el primero de los casos, cuando no hay fuerza alguna que impida el flujo lateral de material.

Son dos aspectos básicos que se deben tomar en consideración bajo estas circunstancias: la posible variación de las medidas y la pieza laminada se hace más ancha después del paso. El segundo

aspecto que debe tomarse en cuenta son las consecuencias metalográficas del propio ensanchamiento, por ser el segundo aspecto el más importante cuya no observación causa con toda seguridad graves problemas, trataremos primeramente este punto.

Como se sabe se entrega el material que laminar de parte del departamento de aceración en estado fundido y con la micro-estructura conocida de la fundición que es principalmente "Dendríticas".

Las características débiles de esta estructura son la meta - primaria de laminación que es destruir esta formación dendrítica, logrando un grano más fino y más tenaz. Imaginándose los sucesos en el centro de la superficie de la barra y desde luego también en capas más profundas hasta donde llega el efecto de la deformación, encuentra la misma resistencia de flujo lateral en ambas direcciones a causa del material que tiene que empujar hacia los lados, en las orillas de la barra cambia el aspecto por completo, aquí no hay material que empujar hacia un lado y lógicamente la resistencia en este punto es menor en dirección perpendicular a la dirección de laminación y también es menor en estas zonas la presión que ejecutan los rodillos de laminación sobre el material. La consecuencia de esta falta de contra-presión como podemos llamarlo, es que la destrucción de los dendríticos no se produce en el grano deseado y la refinación de grano causado por esta destrucción de dendríticos no llega al grado que se necesita. Al aplicar en los siguientes pasos más y más reducción de altura y automáticamente más ensanchamiento, pronto llegará el material en estas zonas débiles a un punto donde ya no se pueda absorber las fuerzas y los cristales se separan, apareciendo en las zonas laterales una grieta. Desde luego influye también la fricción y otros factores, pero no suprimen el efecto sino al contrario, lo fomentan.

Debe ser la meta de laminación evitar estas grietas, que por supuesto no se pueden reparar posteriormente con ningún proceso de laminación salvo fundirlos de nuevo. No es problema evitar estas grietas si se voltea en  $90^\circ$  el lingote muy enseguida, dando así un

tratamiento con efectos de refinación de grano y todos lados en una forma pareja. Sobre la frecuencia de la necesidad de voltear el lingote o cualquier producto laminable se efectuaron muchas investigaciones y lo recomendable es esto. Si se trata de aceros comunes es recomendable voltear después de cada segundo paso o por lo menos después de cada cuarto paso. Estas son reglas recomendables que desde luego pueden variarse dependiendo del acero y el criterio que aplicar es el éxito, pero hay que tomar en cuenta que un volteo de más del material nunca es dañino, pero un volteo de menos puede causar muchísimos problemas. Claro está que esta regla del volteo solamente se refiere al laminar entre rodillos planos.

Existen, además, métodos de laminación aprovechando de otras formas de rodillos (rodillos acanalados) que permiten bajo ciertas circunstancias usar menos volteo. Los rodillos con caja se consideran y se comportan en lo que se refiere a la necesidad de voltear casi igualmente como lo hacen los rodillos planos.

Al no existir ningún tope lateral que impida el ensanchamiento libre, el segundo problema que se presenta es el aumento del ancho sin mayor control.

El resultado es que la pieza después del paso como ya se mencionó, tendrá más ancho y si se volteo en  $90^\circ$  con el fin de mejorar la estructura automáticamente la altura de entrada en este siguiente paso no será igual al ancho original, sino el ancho más el ensanchamiento y esta medida es la que se debe tomar en cuenta al determinar el segundo paso. El problema será como se explicará más adelante, en fijar anticipadamente el grado de ensanchamiento que debe de esperarse y para este cálculo se usan las fórmulas ya mencionadas, analizando muy friamente el problema del ensanchamiento entre rodillos planos y basándose en las prácticas ejecutadas en todo el mundo, se puede decir que el problema de las medidas del ensanchamiento en los casos de laminar entre rodillos planos es de menor importancia porque la laminación entre rodillos de canal se usa casi exclusivamente en trenes de desbaste donde la medi

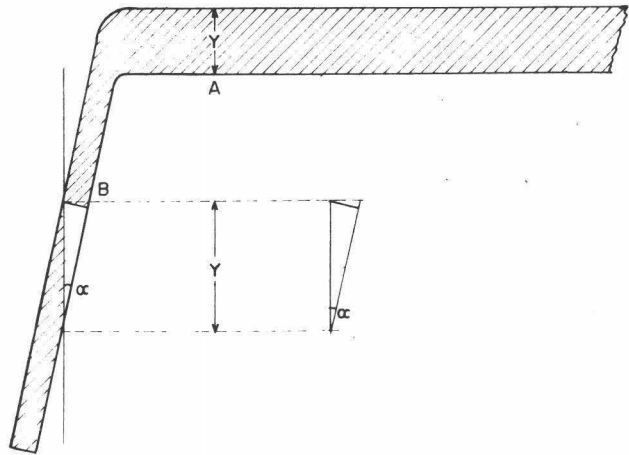
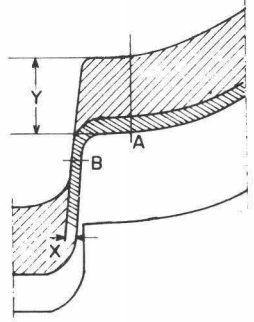
da exacta es de menor importancia y donde el equipo es lo suficientemente fuerte para aguantar una reducción un poco más de lo previsto. El cálculo más usual es con la fórmula de GEUZE usando un factor C de 0.35

Los efectos del ensanchamiento se ven completamente diferentes tratándose de laminar en canales (calibres) cerrados. En este caso no se presenta el problema de la destrucción de la estructura dendrítica porque como hay limitación de ensanchamiento automáticamente habrá también en las orillas una presión que destruye el grano y el peligro de fisuras por separación del material es mucho menor. Pero se presenta otro problema muy importante, se puede suponer que el desgaste en los rodillos es directamente proporcional a la presión ejecutada sobre las diferentes partes de los rodillos y como el ensanchamiento es un fenómeno omnipresente en la laminación habrá también en cajas o calibres completamente cerradas un ensanchamiento que, al ser impedido, causa una cierta presión sobre las caras laterales, que impiden precisamente este ensanchamiento.

Observamos bajo este aspecto la gráfica No. 11, en la cual aparece parte de un calibre desgastado donde las caras marcadas con rayo sencillo indican el desgaste después de cierto tiempo de trabajo. Para lograr el mismo ancho en el punto B se necesita rebajar con torno, muchísimo material más en las partes de las caras planas que en la cara vertical. El desgaste en el ancho del calibre está marcado con X, mientras el material que se debe rebajar inmediatamente se marcó con Y. Para compensar más o menos (un ajuste completo no es posible), debe ser el desgaste en B equivalente al desgaste A en relación con el seno del ángulo:

$$x = y \cdot \text{seno } \alpha \quad (43)$$

Como el desgaste en la primera aproximación es igual a la presión y también igual al ensanchamiento impedido, se obtiene con esta regla el máximo recomendable del ensanchamiento impedido.



GRAFICA No II DESGASTE DE RODILLOS.

Usando por ejemplo, una inclinación de  $5^\circ$  en las caras verticales, se recomienda usar un ensanchamiento impedido 0.1.

Para aclarar más este detalle, hacemos un ejemplo, en una caja con inclinación de las caras se hace en un paso una reducción de altura de 30 mm, ¿cuál deberá ser el ensanchamiento impedido para obtener condiciones óptimas en desgaste?

Un ensanchamiento impedido de 2.70 mm es la solución. Si se ha calculado el ensanchamiento que se espera en este paso con 10 - mm, se recomienda hacer la caja (calibre) por lo menos  $10 - 2.7 = 7.3$  mm más ancha que el material que entra en este calibre para ser laminado. Desde luego esta regla no se puede cumplir siempre, pero el cálculo del ensanchamiento puede resolver muchos problemas relacionados con desgaste exagerado de los rodillos.

## B I B L I O G R A F I A

Las letras entre ( ) indican el idioma y en particular significa: e Español, i Inglés, a Alemán, f Francés. En libros y publicaciones se menciona primero el nombre del autor, después el título del libro o de la publicación y finalmente el editor.

### a) Revistas

- 1.- Stahal und Eisen (a) Editor: Verlag Stahleisen, Dusseldorf, Alemania.
- 2.- Revista Demag (e) Editor: Demag AG, Duisburg, Alemania.
- 3.- The Iron Age (i) Chlton Company, New York.
- 4.- Iron and Steel Engineer (i) Asociation of Iron and Stelle - Ing. Pittsburg.
- 5.- Steel (i) Steel, Cleveland/Ohio.
- 6.- Archiv fur Eisenhüttenwesen (a) VDEh, Dusseldorf, Alemania.
- 7.- Blast Furnance and Steelplant Pittsburg/USA.
- 8.- Control Engineering (i) McGraw Hill, New York.
- 9.- Iron and Steel, (i) London, Inglaterra.
- 10.- Jerkontor Ann. (Sueco) Uppsala, Suecia.
- 11.- Giesserei (a) Giessereiverlang, Dusseldorf, Alemania.

### b) Libros

Hutte. Editor: Wilhelm Ernst und Sohn, Berlin.

Beynon: Roll desing and Mill Layout (i) Ass. of Iron dan - Steel Ing. Pittsburg/Pen. USA.

Hoff und Dahl: Grundlagen des Walzverfahrens (a) Verlag -- Stahleisen, Dusseldorf/Alemania.

Larke: The rolling of Strip, Sheet and plate (i). Chapmann - and Hall, London.



Trinks: Roll pass design (i) Cleveland, Ohio, USA.

Geuze: Traité Theorique et pratique du laminage de fer et de l'acier (f). Liege, Paris/France.

Cotel: Die Grundlagen des Walzens (a) Knapp, Halle/Alemania.

Trinks: Industrial Furnaces, Chapman and Hall, London, Inglaterra.

c) Publicaciones importantes de consulta

Goedecke y Blecher: La fabricación de tubos sin costura por el procedimiento Ehrhardt (Edición en español de la revista (1) de 1967, pág. 1143-1152.

Dietl und Geitz: Vergleich einiger neuzeitlicher Drahtstrassen Revist (1) 1967, pág. 938-951.

Reth: Nuevo Tren continuo de laminación. Revista (2) No. 182, 1967.

Steinhauer y Jauch: Untersuchung Uber die Verarbeitung von - Stranggusshalbzeug (revista) (1) 1967, pág. 374-383.

Engelmann-Voss-Kolb: Experience with the workability of continuos cast semi-products. Edición en Inglés de revista - (1) 1967, pág. 1020-1030.

Von Euw: Matalurgia Física de los Productos Siderúrgicos. - Reporte Especial del 3° Congreso Nal. de la Ind. Siderúrgica, México.

L. Meyer y O. Schauwinhold: Eiufluss von