

27  
92



# Universidad Nacional Autónoma de México

Facultad de Ingeniería

“Papel del Ingeniero Mecánico-Electricista  
en la Industria de la Laminación”.

T E S I S

Que para obtener el título de:  
INGENIERO MECANICO ELECTRICISTA  
p r e s e n t a :  
ARMANDO REYES PERALTA

México, D. F.

1982



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**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.

## INDICE GENERAL

	Págs.
Introducción.-	
Sección I.- Descripción general del proceso de laminación, tamaño y tipo - de productos de laminación y clasificación de laminadores.	
Capitulo I-a Principios de laminación.	1
Capitulo I-b Tipos y tamaños de productos de laminación y tipos de metales usados para ellos	11
Capitulo I-c Clasificación de trenes de laminación	16
Capitulo I-d Preparación y calentamiento del material	28
Sección II.- Clasificación y diseño de rodillos laminadores.	
Capitulo II-a Tipos y aplicaciones de los rodillos	35
Capitulo II-b Proceso de fabricación de rodillos	48
Capitulo II-c Carga de rolado (fuerza de separación entre los- rodillos.)	63
Capitulo II-d Calculo de la potencia requerida	69
Capitulo II-e Reducción de la sección transversal por paso	84
Sección III.- Hornos	
Capitulo III-a Hornos de calentamiento	95
Sección IV.- Control de calidad	
Capitulo IV-a Defectos en productos semiacabados y como - preverlos.	98



## INTRODUCCION

El presente trabajo de seminario, se dirige a confirmar el campo de acción del ingeniero mecánico-electricista, dentro de una rama tan importante de la industria siderúrgica como lo es la industria del laminado de metales.

Dentro de esta rama se podrían tratar muchísimos temas, que podrían ser tan bastos como los mas modernos libros especializados de actualidad.

Sin embargo, vale la pena hacer notar que no es este el fin que se ha tratado de conseguir; se ha tratado de dar un enfoque generalizado dentro de los temas que dan mas campo de acción al ingeniero.

En la sección I se da el panorama en el cual se desarrolla este seminario, nos crea la idea y el ambiente de la industria de la laminación .

En la sección II nos introducimos al área de diseño del equipo así como a la clasificación del mismo según los requerimientos de producción.

En la sección III se da una descripción del equipo que se usa para el previo calentamiento del material a:rolar, en el caso de laminación en caliente.

En la sección IV se da una introducción al control de la calidad del laminado.

En la sección V, se dan algunas perspectivas para la automatización completa del equipo laminador la cual puede conducir a una reducción notable de costos de producción, y a una elevación cualitativa y cuantitativa del producto.

Por último, en la sección VI se tratan los efectos en el metal, de los tratamientos mecánicos y térmicos requeridos.

Se consideró que estos temas pueden ser los mas afectados por el desempeño del ingeniero en la industria de la laminación, y por esto mismo nos tratamos de extender en una forma clara y concisa.

Esperamos que este trabajo de seminario, cumpla su finalidad de orientación, con lo cual nos consideraremos satisfechos.

## S E C C I O N I . -

Descripción general del proceso de laminación, tamaño y tipo -  
de productos de laminación y clasificación de laminadores.

## SECCION I.

DESCRIPCION GENERAL DEL PROCESO DE LAMINACION, TAMAÑO Y TIPO DE PRODUCTOS DE LAMINACION Y CLASIFICACION DE LAMINADORES.

### CAPITULO I-a

#### Principios de laminación.

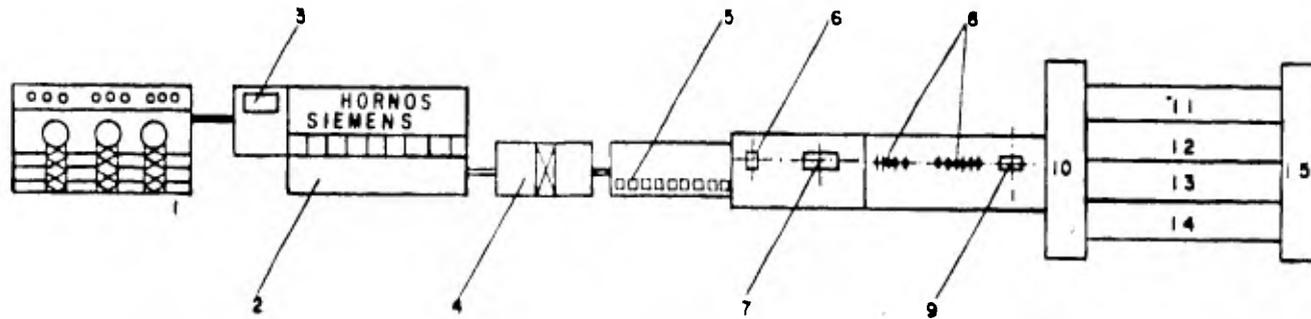
Si una planta metalúrgica opera con un ciclo completo en la producción de artículos de laminación, ésta se puede dividir en dos secciones básicas que son sección de alto horno y sección de laminación (fig. 1). Casi todo el producto del alto horno pasa a la sección de laminación; solamente una pequeña porción queda para piezas fundidas o forjadas. El proceso de laminación, en el que se obtiene el producto laminado, es la última sección del ciclo.

El producto terminado es elaborado en lotes de artículos de uso variado, como rieles, vigas, canaletas, ángulos, chapas de acero y tiras, placas, hojalata, tubos, etc.

La materia prima de los laminadores son los lingotes -- con sección cuadrada o rectangular.

En algunos casos se utilizan lingotes cilíndricos (para producir tubos o ruedas).

## DISTRIBUCION DE LOS PRINCIPALES DEPARTAMENTOS EN UNA MODERNA PLANTA METALURGICA



- 1- SECCION DE ALTO HORNO
- 2- ACERIA
- 3- REVOLVEDORAS
- 4- CUARTO DE ESTIRADO
- 5- HORNOS DE FOSAS
- 6- MOLINO DE LUPIAS
- 7- TIJERAS
- 8- MOLINO CONTINUO PARA BILLETS
- 9- TIJERAS
- 10- DEPOSITO DE BILLETS

- 11- LAMINADOS DE BARRAS PARA ALAMBRE
- 12- MOLINO DE SECCIONES LIGERAS
- 13- MOLINO DE SECCIONES MEDIAS
- 14- MOLINO PARA ROLLO
- 15- DEPOSITO PARA PRODUCTO TERMINADO

U N A M

FAC. DE INGENIERIA

FIGURA No.

1

PROCESO  
DE  
LAMINADO

La laminación moderna comprende dos pasos: 1) laminado del lingote para obtener subproductos (laminación primaria) y 2) laminación de subproductos para obtener el producto final (laminación secundaria.)

No se recomienda el uso de laminadores pesados para palanquillas (billets) o pequeñas lupias, pues el nivel de producción baja considerablemente y el consumo de energía se eleva también considerablemente.

Un laminador de lupias trabaja a máxima eficiencia laminando lingotes a lupias de sección grande de 200 x 200 a 350 x 350 mm. Las lupias se laminan en billets de tamaño variado con los laminadores para billets.

Los laminadores para billets o palanquillas por lo general se encuentran a continuación de los laminadores para lupias, lo que permite laminar pequeños billets a partir del lingote con un solo calentamiento. Desde el punto de vista económico, éste es un buen método.

El rolado de billets con dos laminadores es bastante eficiente. La producción del laminador para lupias, depende de la sección transversal de la lupia. Por otra parte, dependiendo de la sección transversal del billet y de la exactitud requerida en los productos finales del billet, será la eficiencia del tren laminador.

En plantas metalúrgicas modernas, la producción de hojalata y placa comprende dos pasos: 1) rolado de lingotes a planchones y, 2) rolado de planchones a placa u hojalata.

Las ventajas de este proceso de dos pasos, en comparación con el que se efectúa en plantas más antiguas donde las placas y hojalata se laminan directamente del lingote son:

1) La producción de hojalata y placas aumenta porque al billet a laminar se le ha reducido el espesor y porque los extremos del lingote ya van cortados.

2) La calidad de las placas y hojalata se mejora porque el laminador de planchones reduce las caras del lingote y los planchones son inspeccionados para encontrar posibles fallas de cualquier tipo.

La principal ventaja de los laminadores de planchones con relación a los de lupias, es que el bastidor tiene, además de los rodillos horizontales, un par de rodillos verticales, lo que evita tener que girar la barra 90° sobre su eje longitudinal.

El laminador de planchones es de gran importancia en plantas diseñadas para obtener grandes volúmenes de producción de hojalata y placa. Sin embargo, debido a su escaso campo de aplicación, estos laminadores raras veces tienen preferencia sobre

los de lupias. Las más de las veces es necesario que el laminador primario trabaje lupias y planchones. En este caso el de lupias cumple el cometido.

Los requerimientos necesarios en productos laminados -- son:

1) Obtener el producto final con las dimensiones y acabado deseado y que el volumen de producción sea lo más elevado posible para poder minimizar los costos.

2) Que el producto final tenga la mejor calidad posible tanto mecánica, como superficialmente.

Estas condiciones solamente se podrán obtener si se siguen estrictamente los pasos programados para la obtención del producto a elaborar.

La precisión deseada en las secciones, las propiedades físicas o mecánicas, las condiciones de acabado y la estructura micro y macroscópica del metal, son factores que definen el número de pasos que deberá comprender el proceso de rolado. Entre más estrictas sean estas especificaciones, más complicado será el proceso, así como también la cantidad de operaciones a efectuarse.

En la producción de laminados las operaciones principales son:

- a) Preparación del material a laminar.
- b) Calentamiento previo del material a laminar.
- c) Laminado.
- d) Acabado, incluyendo el corte, enfriado, estirado, revisión de defectos superficiales, etc.

La preparación del material a laminar consiste en quitar los posibles defectos de la superficie. Es una operación importante, especialmente cuando el material a laminar es acero o aleaciones al alto carbón, ya que asegura una buena calidad al fin del proceso y reduce al mínimo posibles deformaciones.

La estricta observación de los pasos anteriores, tales como calentar previamente el material a laminar a las temperaturas determinadas desde el principio hasta el fin del proceso, así como seguir la secuencia programada para el proceso, son de gran importancia e influyen directamente en la calidad del producto final.

El enfriado después del laminado puede ser de mucha importancia en determinados casos. La no observación de este punto puede ocasionar defectos tales como requebrajamientos o fisuras, o simplemente crear propiedades no deseables.

Las operaciones finales de acabado deberán también tenerse en cuenta, pues aseguran un producto terminado con la calidad de acabado especificada.

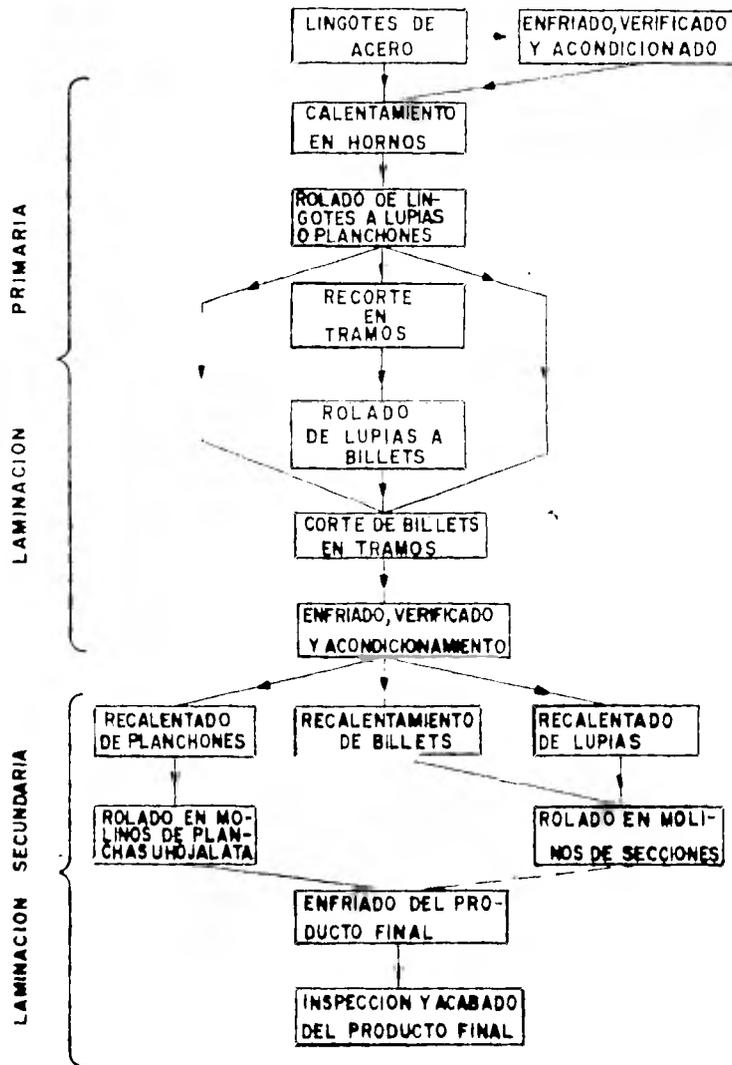
La Fig. 2 muestra un diagrama de flujo de un equipo completo de laminación, desde el lingote al producto terminado en modernos departamentos de rolado. Nos muestra además, la producción de aceros y hierros ordinarios, así como de aleaciones metálicas.

De mucha importancia es, desde luego, un estricto control de calidad del producto final, así como del proceso de laminado.

Una forma de control de calidad practicado en las secciones de laminación modernas, es la inspección de la colada, con lo que la calidad del metal puede determinarse y entonces la fundición puede asignarse al proceso de laminación.

La inspección de la colada comienza en su mismo departamento, donde se obtienen muestras para determinar la composición química del metal para cada colada. Generalmente se toman dos probetas de cada caldero. La otra prueba sirve para análisis químico. Este paso se efectúa en casos cuando es necesario comprobar la cantidad de ciertos elementos o simplemente si por regla se establece hacer esta comprobación. Algunas veces, las probetas para el análisis se toman del billet o del producto ya terminado en el departamento de laminación. En los últimos años algunos elementos se han determinado por análisis espectrográfico, que es uno de los métodos más aceptados para determinar la composición química de metales y sus aleaciones.

# DIAGRAMA DE FLUJO DE UNA PLANTA LAMINADORA MODERNA DESDE EL LINGOTE AL PRODUCTO FINAL



<b>U N A M</b>	
FAC. DE INGENIERIA	
FIGURA N. 2	PROCESO DE LAMINADO

La inspección de coladas implica:

- 1) Determinación de la calidad de la colada en cuanto a su micro y macroestructura, así como fracturas longitudinales;
- 2) Determinación del tamaño de grano del metal;
- 3) Determinación de las propiedades mecánicas y,
- 4) Otras pruebas.

Para este propósito se seleccionan uno o dos lingotes patrón.

En el último de los casos, se selecciona un lingote del primer lote y el otro del último lote. Estos lingotes patrón se laminan a billets (o a productos terminados) separadamente o junto con los lingotes de la colada. Las probetas para la inspección de la colada se seleccionan de barras laminadas de material del lingote patrón. En algunos casos, las probetas se toman de barras laminadas o de determinadas secciones del lingote.

La inspección de la macroestructura del metal evita las burbujas de aire o gases (no permisibles en metales muertos), así como porosidades, segregaciones u otros defectos. Estos defectos se calculan por escalas estandar.

Las fracturas longitudinales permiten determinar el contenido de pizarra y el tamaño del grano revela también defectos -

como contracciones, porosidad y otros defectos que pueden descubrirse por inspección visual.

En la inspección de microestructuras se determina el -- grado de inclusiones no metálicas, tamaño de grano y otros factores.

Otro tipo de control se efectúa en el proceso de rolado. Deberá darse una temperatura determinada al material a trabajar; deberá seguirse estrictamente el programa de rolado establecido - para así obtener tanto las tolerancias especificadas previamente, como también el acabado superficial del producto.

La temperatura del lingote calentado, deberá medirse an tes de meterse a las fosas de recalentamiento, con el fin de prevenir posibles fisuras de origen térmico. En las instrucciones - de proceso, por lo general se indica cuál es la temperatura mínima de la superficie del lingote y también se indica cuál es la má xima temperatura que deberá tener la fosa de recalentamiento. Estas temperaturas, incluyendo la de la flama se controlan con instrumentos apropiados de medición.

Para el laminado de metales, es necesario antes que nada, comprobar las temperaturas inicial y final y también el número de pasos que se van a seguir en el proceso.

La presión de los rodillos se comprueba continuamente, midiendo las secciones laminadas, asimismo los engranajes y los canales de los rodillos se revisan frecuentemente. Otro aspecto que deberá tenerse en cuenta es el control y revisión constante de la presión en los rodillos, así como el torque aplicado en el proceso; estas variables se pueden medir con probadores de cargas y otros instrumentos. Estos detalles son los que permiten el uso correcto y completo del laminador.

La mecanización y automatización de los laminadores permiten un incremento considerable en la velocidad de trabajo especialmente en los laminadores continuos y a la vez se obtiene un control más efectivo del proceso. Las altas velocidades en el rodado en frío se pudieron obtener gracias al desarrollo de instrumentos electrónicos de control. En estos instrumentos pueden incluirse los controles que funcionan con radiaciones gamma o beta, que son emitidas por el material. En los más modernos equipos se llega a usar equipos de computadoras y de televisión.

El control de la calidad de la superficie es otro aspecto que merece mucha atención. Muestras tomadas del material a rodar dan una idea de la calidad de la superficie. A veces las muestras son desechadas e inspeccionadas otra vez. La detección de fallas por sistemas ultrasónicos se utiliza cada vez más para revelar defectos de variado tipo. Se han hecho experimentos aplicando rayos gamma a lupias para inspección del interior de ellos.

El proceso es desde luego controlado en todas y cada una de sus etapas. Por ejemplo, las lupias son inspeccionadas después de recortadas para verificar la posible existencia de burbujas y eliminarlas y garantizar un buen acabado. El proceso de enfriamiento es también debidamente controlado para prevenir fisuras por esfuerzos.

La tercera fase de la inspección en el proceso de laminación es la final. Tiene como fin verificar la calidad del producto de acuerdo a especificaciones patrones. El alcance de la inspección final depende de la composición del metal y su propósito y requerimientos especificados previamente. En esta inspección final, se incluye análisis químico, pruebas de propiedades mecánicas, inspección de micro y macroestructura y otros.

#### CAPITULO I-b

##### TIPOS Y TAMAÑOS DE PRODUCTOS DE LAMINACION Y TIPOS DE METALES USADOS PARA ELLOS.

En la URSS son las normas soviéticas (GOST) las que rigen en la producción de los productos de laminación.

Estas normas estipulan las dimensiones, secciones transversales y el peso por unidad de longitud para cada tipo de sección y también las tolerancias permitidas en relación con los tamaños normales.

Las normas para los diferentes tipos estructurales aplicados en construcciones, se encuentran compiladas en manuales donde vienen también los módulos de elasticidad, momentos y radios de inercia, etc.

Como complemento a estas normas de tipo y tamaños, existen también normas o reglas exclusivamente para productos que incluyen reglas sobre composición química, propiedades mecánicas del metal, pruebas diversas, mercado, etc.

Atendiendo a su forma los productos de la laminación se pueden dividir en cuatro grupos principales:

- 1) Secciones estructurales
- 2) Placa y lámina
- 3) Tubos y alambre
- 4) Productos especiales de laminación.

Las secciones estructurales tienen un extenso surtido en tamaños y formas, debido a su variado uso dentro de las muchas ramas industriales y de la construcción, tales como fabricación de maquinaria, herramientas, estructuras de acero, etc. Por esto es que las secciones de este tipo las podremos clasificar de acuerdo a su uso en secciones para uso general y de uso especial, o sea para usarse en determinados campos de la ingeniería industrial.

Dentro de las secciones que se usan en forma general están las redondas, cuadradas, planas, L, "T"es, "I"s, etc (ver Fig. 3).

Las secciones de uso especial, incluyen rieles y otras formas especiales empleadas en industrias automotrices, de maquinaria agrícola, ferrocarrilera y otras. Algunos ejemplos los podemos ver en la Fig. 4.

La placa y lámina se pueden clasificar de acuerdo a su espesor.

La placa tiene un espesor mayor de 4 mm, mientras la hojalata es de un espesor menor de 4 mm.

Este grupo de laminados tiene una gran variedad de aplicaciones: la placa se puede utilizar para la construcción de calderas, tanques de almacenamiento, cascos para barcos; la hojalata o lámina se usa para automóviles, productos eléctricos, etc.

Los tubos se pueden clasificar de dos formas:

- 1) Tubería sin costura
- 2) Tubos con costura (soldados).

La producción de estos últimos y de los tubos rolados en frío, se ha venido incrementando año con año en una forma muy importante.

# SECCIONES DE ACERO CON PROPOSITO GENERAL



1



2



3



4



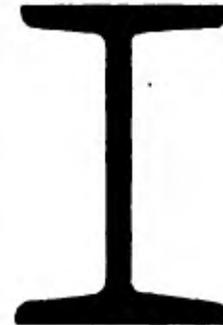
5



6



7



8



9

1-CUADRADA 2-REDONDA 3-PLANA 4-HEXAGONAL 5-ANGULO DESIGUAL

6-ANGULO IGUAL 7-CANAL 8-SECCION I 9-SECCION Z

U N A M

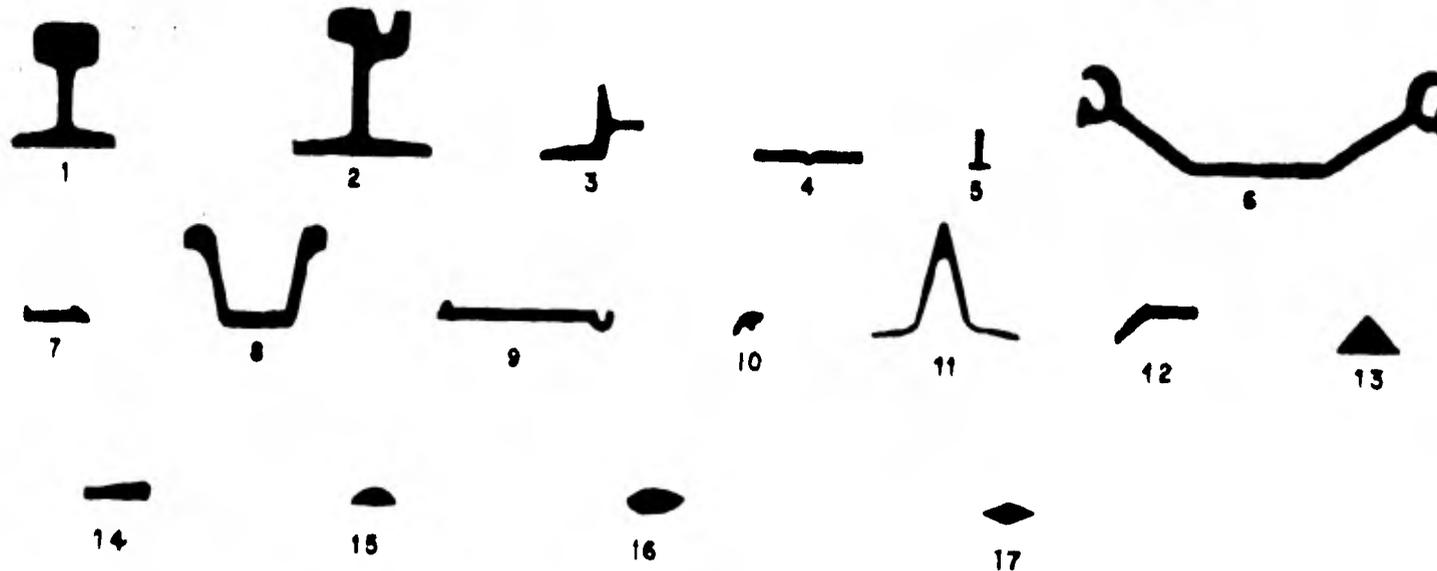
FAC. DE INGENIERIA

FIGURA No.

3

PROCESO  
DE

LAMINADO



## SECCIONES ESPECIALES DE ACERO

- |                                |                                |
|--------------------------------|--------------------------------|
| 1- RIEL PARA FECC.             | 9- PERFIL PARA RINES           |
| 2- RIEL PARA TRANVIA           | 10- PERFIL PARA RINES          |
| 3- SECCION Z                   | 11- PERFIL PARA OREJAS TRACTOR |
| 4- LAMINA DE BALLESTA          | 12- PERFIL PARA RECOLECTOR     |
| 5- SECCION PARA VENTANA        | 13- PERFIL TRIANGULAR          |
| 6- PILA ACANALADA              | 14- PERFIL DE CUÑA             |
| 7- PERFIL PARA ESTUFAS         | 15- PERFIL SEGMENTADO          |
| 8- PERFIL PARA PUNTAL DE MINAS | 16- SECCION OVAL               |
|                                | 17- SECCION DIAMANTE           |

U N A M	
FAC. DE INGENIERIA	
FIGURA No.	PROCESO
4	DE LAMINADO

Actualmente los tubos de formas especiales (Fig. 5) y de sección variable, se producen por laminación.

Se pueden producir tubos de paredes delgadas, extra delgadas, capilares y otros tipos con aceros y aleaciones.

El departamento de laminación trabaja metales que tienen una gran variedad de propiedades determinadas por sus composiciones químicas y que tienen, desde luego, diferentes usos.

En primer lugar, los metales laminables están divididos en metal ordinario, de calidad y de alta calidad.

Estos dos últimos difieren del primero en el contenido de elementos perjudiciales, tales como fósforo y azufre, los cuales se encuentran entre 0.05 y 0.055% en los metales comunes, en los de calidad varía entre 0.04 y 0.045% y en los de alta calidad varía de 0.03 a 0.035%. Desde luego, el rolado de los metales de calidad y alta calidad se efectúa con más cuidado para asegurar un producto final que tenga la calidad necesaria, así como las propiedades mecánicas y físicas y desde luego el acabado superficial requerido.

A los metales de calidad los clasificaremos como aceros al carbón y aleados. Los aceros al carbón y estructurales se usan para partes de máquinas. La mayor parte de tipo de metal se produce en hornos de hogar abierto.

## TUBOS DE SECCION ESPECIAL



1



2



3



4



5



6



7



8



9



10

- 1-CUADRADO
- 2-RECTANGULAR
- 3-TRIANGULAR
- 4-HEXAGONAL
- 5-DIAMANTE

- 6-PERFIL OVALADO PARA LINEA DE TRANSMISION
- 7-PERFIL OVALADO DE AVIACION
- 8-PERFILES ESPECIALES
- 9-PERFILES ESPECIALES
- 10-PERFILES ESPECIALES

U N A M	
FAC. DE INGENIERIA	
FIGURA No.	PROCESO DE LAMINADO
5	

Los metales ordinarios son usados para estructuras de construcción o algunas veces para la elaboración de partes de maquinaria. Una gran cantidad del acero al carbón se rola para la industria ferrocarrilera. Estos, por ejemplo, están hechos de aceros al carbón en hornos de hogar abierto o de tipo Bessemer. Los aceros del horno de hogar abierto tienen un mayor contenido de carbón y menos azufre y fósforo que el acero Bessemer.

Las aleaciones con bajo contenido de carbón, han venido laminándose últimamente y se les encuentra uso en el ramo de la construcción, principalmente por sus características de ductibilidad, esfuerzos, resistencia a la corrosión, etc.

Por regla estos metales no contienen más de 0.25% de carbón y no más de 3% de elementos de aleación..

Los aceros de bajo carbón poseen buenas propiedades de forja, lo que implica que tengan mucho uso en la industria de automóviles y tractores.

Los aceros de medio carbón se usan en la industria automotriz, de aviación e industrias en general.

Los aceros de alto contenido de carbón y que contengan manganeso se usan en la industria de aviones y automóviles.

## CAPITULO I-c

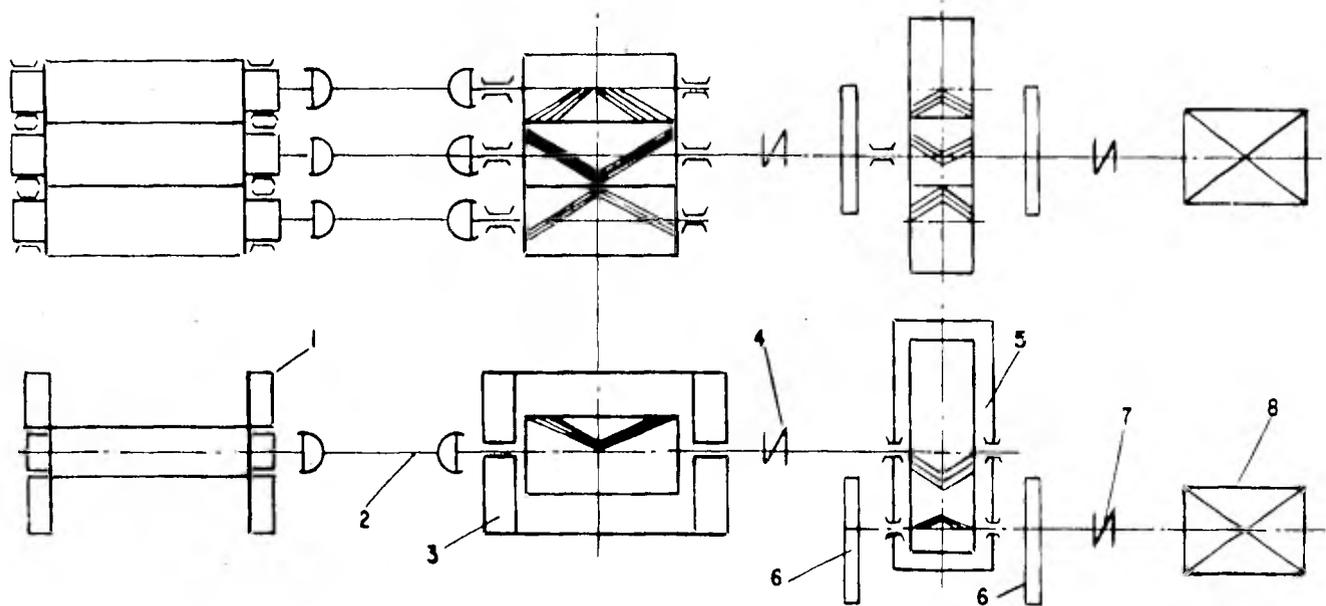
### CLASIFICACION DE TRENES DE LAMINACION.

El tren de laminación comprende un equipo completo de maquinaria de procesamiento, así como equipo auxiliar, diseñados-ambos para la deformación plástica del metal entre los rodillos, así como para su futuro tratamiento (estirado, corte, etc.) y transporte.

La operación del tren, para la salida de productos terminados con una determinada calidad, requiere que la sección de laminación esté equipada con hornos de calentamiento y fosos de recalentamiento, hornos de tratamiento térmico, así como equipo de estañado, laqueado y galvanizado, guillotinas y mesas de retorno. Todos estos aparatos y accesorios, así como el equipo de grúas, no son en sí parte del equipo laminador, pero son necesarios para crear continuidad en el proceso de laminado.

La línea principal o tronca! de un tren laminador consiste generalmente de un bastidor de rodillos, eje motriz, caja de piñones, coples, sistema reductor de velocidad, ruedas volantes y motor (Fig. 6). Algunas de estas partes no se encuentran siempre en todo tren, por ejemplo, cuando cada rodillo tiene movimiento propio, no es necesario el uso de reductores de velocidad (trenes para lupias, planchones y planchas).

## LINEA PRINCIPAL DE UN MOLINO LAMINADOR



1-BASTIDOR O CASTILLO  
 2-ARBOL  
 3-CAJA DE PIÑONES  
 4-ACOPLAMIENTO PRINCIPAL

5-ENGRANE REDUCTOR  
 6-VOLANTE DE INERCIA  
 7-ACOPLAMIENTO DEL MOTOR  
 8-MOTOR

**U N A M**

FAC. DE INGENIERIA

FIGURA No.

6

PROCESO  
 DE  
 LAMINADO

El bastidor de rodillos comprende dos bases (colocados sobre asientos de placas y unidas con juntas separadoras).

Laminador dúo no reversible.

El bastidor de rodillos de un laminador dúo no reversible, tiene dos rodillos con rotación constante en la misma dirección (Fig. 7.1).

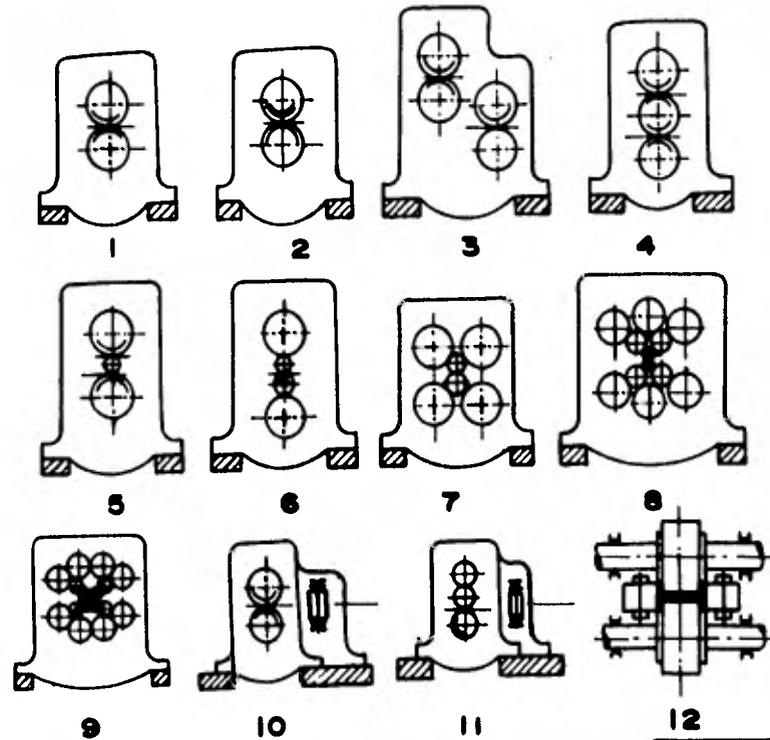
El laminador dúo no reversible en el que ambos rodillos son motrices es el comunmente usado cuando el tren es de laminado continuo, alternado o transversal. Lo común en estos laminadores es que a la barra le dé solamente una pasada entre sus rodillos.

Laminador dúo reversible.

En el laminador dúo reversible (Fig. 7.2), los rodillos giran primero en una dirección y después en otra, de tal forma -- que la barra va y viene a través de los rodillos varias veces.

Este tipo de instalaciones se usan para laminación tanto de planchas como de rieles.

## TIPOS DE ARREGLOS EXISTENTES PARA LAMINADORES



<b>U N A M</b>	
<b>FAC. DE INGENIERIA</b>	
<b>FIGURA No.</b>	<b>PROCESO DE LAMINADO</b>
<b>7</b>	<b>DE LAMINADO</b>

#### Laminador dúo doble.

El laminador dúo doble tiene cuatro rodillos arreglados en pares (Fig. 7.3). Estos laminadores tienen rodillos de 300 a 350 mm de diámetro. Estos últimos se encuentran en plantas donde la tasa de producción es relativamente baja. Debido a la complejidad en armar este tipo de laminadores y por su baja capacidad, este tipo de trenes no tardarán mucho en dejarse de producir.

#### Laminador trío.

Los laminadores tríos son muy usados en trenes de laminación seccionados. En este tipo de laminadores se tienen 3 rodillos con direcciones de rotación constante (Fig. 7.4). El rodillo intermedio es de diámetro menor al de los otros dos. Durante la laminación, el rodillo intermedio es comprimido por uno de los rodillos externos contra el material a laminar. La aplicación de un rodillo de menor tamaño, incrementa la elongación y disminuye la fuerza de levante de la barra al pasar entre los rodillos medio y externo.

Este tipo de refuerzo es muy poco empleado en los nuevos laminadores, pues se dá preferencia a los de 4 rodillos reversibles.

#### Laminador de 4 rodillos reversible

Este tipo de laminadores tienen 4 rodillos dispuestos sobre una hilera vertical. Los dos más pequeños en diámetro son los que presionan sobre la barra, mientras que los otros dos son solamente de apoyo o empuje (Fig. 7.6). Estos rodillos de empuje mantienen a los rodillos interiores en operación y reducen la posibilidad de deformaciones elásticas.

Este tipo de apoyos se utilizan bastante en laminadores reversibles de laminado en caliente para corazas y otras placas pesadas de acero. También se utilizan bastante en el laminado en frío y caliente de placas y hojalata.

#### Laminador de 6 rodillos.

El laminador de 6 rodillos tiene dos rodillos activos y 4 de apoyo. La velocidad de los rodillos y la mínima deflexión de los rodillos de apoyo permiten que estos laminadores puedan usarse en el laminado de tiras muy delgadas con espesores pequeñísimos. Estos laminadores tienen una leve ventaja sobre los de 4 rodillos, pero son mucho más complicados en su diseño, y es por eso que no se utilizan mucho.

#### Laminadores de más rodillos.

Los laminadores de 12 y 20 rodillos (Fig. 7.8 y 7.9) están siendo usados últimamente. El de 20 rodillos se le conoce como laminador "Sansimir".

El reducido diámetro de sus rodillos activos (10-30 mm) y la rapidez del laminador permiten el laminado de tiras y hojalata muy delgadas elaboradas con acero al alto carbón (grueso de 5 a 500 micras y ancho de 100 a 1,000 cm, con tolerancia mínima de 1 a 5 micras).

Los rodillos interiores carecen de movimiento propio, - se encuentran solamente apoyados por los rodillos intermedios con movimiento propio y que a su vez, están soportados por otros rodillos que sirven de contrapeso.

Este tipo de arreglos, asegura una rigidez excepcional en todo el sistema laminador y también aseguran la ausencia de de flexiones en el laminado.

#### Laminadores universales.

Los laminadores universales se aplican en la elaboración de tiras anchas de acero, hojalata, placas y planchones. En este caso, el metal se reduce por rodillos verticales y horizontales.

Los rodillos verticales se encuentran fijos y paralelos y son normales a los ejes de los rodillos horizontales.

Los laminadores universales se utilizan también para la minar vigas aperfiladas hasta con 1,000 mm de fondo.

Los rodillos verticales de los laminadores universales-estructurales, no tienen movimiento propio y están adheridos entre cuñas a la chumacera de los rodillos horizontales en un plano vertical.

Ultimamente se han aplicado los refuerzos de los rodillos verticales para trabajar junto con los refuerzos de rodillos horizontales, con el fin de eliminar cualquier deflexión de la barra.

Los refuerzos especiales son usados para laminados especiales como llantones, volantes, tubos sin costura, etc. Estos refuerzos difieren de los anteriores en el número de rodillos.

La transmisión principal se diseña para hacer girar los rodillos de apoyo y generar el par requerido para la deformación del metal. Actualmente se usan motores eléctricos para este fin.

El juego de piñones trasmite la potencia del motor al laminador y distribuye el par para los demás rodillos.

En estos casos, cuando es necesario variar la velocidad de los rodillos se efectúan simplemente cambios de engranaje.

Los volantes de inercia se montan por lo general en los ejes de alta velocidad de laminadores no reversibles (por ejemplo

laminadores de planchas), en los que el tiempo en que la plancha está en contacto con los rodillos laminadores es pequeño comparado con el tiempo en que no pasa nada a través de ellos. El volante de inercia guarda energía mientras la plancha no pasa entre los rodillos y la cede cuando la plancha pasa entre los rodillos. Este proceso permite aligerar la carga al motor y permite un ahorro considerable de energía eléctrica.

Los coples utilizados son entre el árbol o flecha que vá del motor a los rodillos del laminador.

Según su finalidad, los laminadores se pueden dividir en dos grupos:

- 1) Laminadores primarios usados para laminar subproductos y,
- 2) Laminadores para laminar productos finales o secundarios.

En el primer grupo se incluyen laminadores para lupias, planchones y billetes o palanquillas; el segundo grupo consta de laminadores de tiras, alambrón, hojalata, placa, tubos y otros.

Laminadores de lupias y planchones.

Los laminadores de lupias y planchones son los mayores, con rodillos de 800 a 1,400 mm de diámetro.

Están diseñados para laminar lingotes de 2 hasta 30 toneladas hasta convertirlos a lupias, planchones y billets de diferentes formas alargadas.

Los laminadores más usados son los simples, dúos reversibles y de planchones, que tienen rodillos de 1,100 hasta 1,150 mm de diámetro.

Los laminadores para planchones, que están especialmente diseñados para éstos, difieren de los laminadores de lupias, ya que aparte de los planchones, pueden laminar lupias. Además de los rodillos horizontales, los laminadores de palastros tienen dos rodillos verticales que reducen el lingote de los lados sin tener que girarlo, como ya habíamos mencionado anteriormente.

#### Laminadores para billets

Los laminadores de billets tienen un diámetro de rodillos de 450 a 890 mm y están diseñados para transformar las lupias a billets pequeños (de 50 x 50 a 150 x 150 mm de sección transversal). Estos billets se emplean como materia prima para secciones laminadas y alambraón. Los más recientes laminadores de billets son diseñados para laminado continuo; son instalados siempre a continuación de los laminadores de lupias en la sección de billets del departamento de laminación.

### Laminadores para rieles.

Los laminadores para rieles tienen rodillos de 750 a 900 mm de diámetro y están diseñados especialmente para rieles, vigas, canaletas y otras secciones grandes.

### Laminadores universales estructurales.

Los laminadores universales estructurales se usan para producir vigas compuestas anchas con fondos hasta de más de 1,000 mm y con caras paralelas.

### Laminadores de perfiles.

Los laminadores de secciones perfiladas tienen rodillos de 250 a 750 mm de diámetro y son usados para la producción de rondos y cuadrados de 8 a 150 mm de sección, vigas y canales de 50 a 300 mm de profundidad, ángulos de 20 x 20 a 200 x 200 mm y para otro tipo de secciones.

De acuerdo con el tamaño de la sección que producen, estos laminadores se pueden clasificar en laminadores pesados con rodillos de 500 a 750 mm de diámetro, laminadores medianos con rodillos de 350 a 500 mm de diámetro y laminadores ligeros con rodillos de 250 a 350 mm de diámetro.

El tipo más sencillo de laminadores es el de tren abierto en el cual todos los rodillos se encuentran colocados lado a lado en una sola línea.

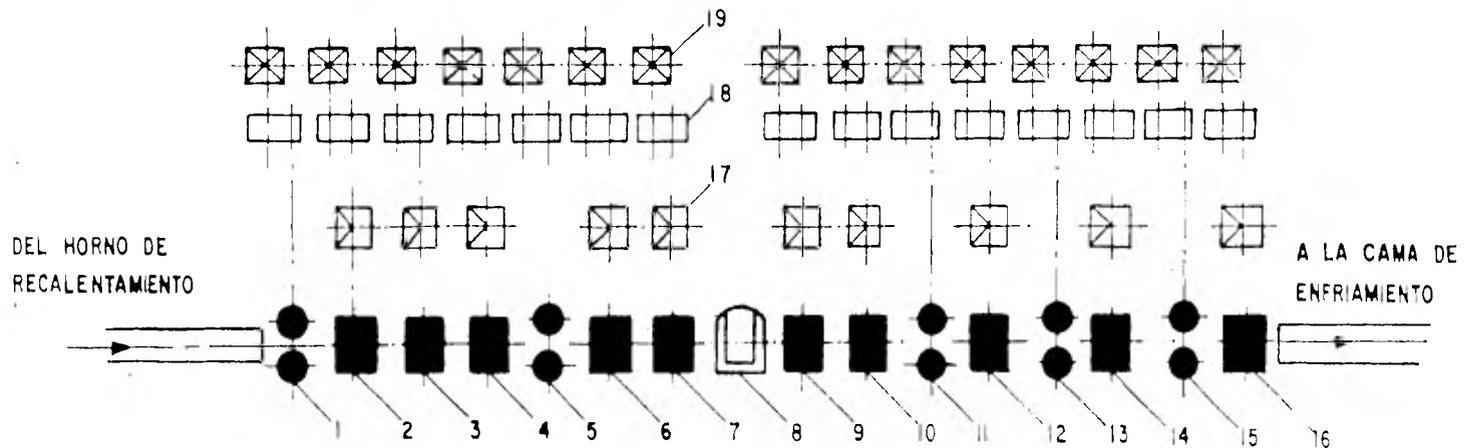
Una desventaja importante de estos laminadores es que todos los rodillos llevan la misma velocidad. Es por eso que es imposible variar en estos laminadores la velocidad que cambia de acuerdo a la sección de la barra que es reducida repetidas veces.

Esta causa y el hecho de que la producción pudiera ser incrementada diferenciando cada parte del proceso de laminación, fué la causa de que los laminadores fueran dispuestos en diferentes líneas.

El grado máximo de producción en el proceso de fabricación se consigue cuando los laminadores de secciones cuentan con un arreglo consecutivo de bastidores reforzados, a través de los cuales la barra pasa solamente una vez. En este caso, el número de bastidores será igual al número de procesos o pasos requeridos para la barra.

Los trenes más efectivos para este tipo son los trenes contínuos (Fig. 8). Los bastidores de estos trenes están colocados en forma de pares. La distancia entre bastidores, es, por lo general, menor que la longitud de la barra a laminar, de tal forma que el proceso no pierda continuidad.

# DISTRIBUCION DE UN TREN LAMINADOR DE SECCIONES MEDIANAS (350mm)



1-7-GRUPO DESVASTADOR (410 mm  $\varnothing$ ) 8-TIJERAS 9-16-GRUPO DE ACABADO

17- PINONES DE PARADA 18- REDUCTORES DE VELOCIDAD 19- MOTOR

**U N A M**

FAC. DE INGENIERIA

FIGURA N.

8

PROCESO  
DE  
LAMINADO

Las altas producciones se obtienen en los trenes contínuos; es de hacerse notar que la labor manual es eliminada casi completamente en este tipo de laminados. La automatización de estos laminadores permite el uso de altas velocidades, imposibles de usar en laminadores semi-automáticos. En laminadores automáticos se pueden usar hasta 30 o 40 m/seg.

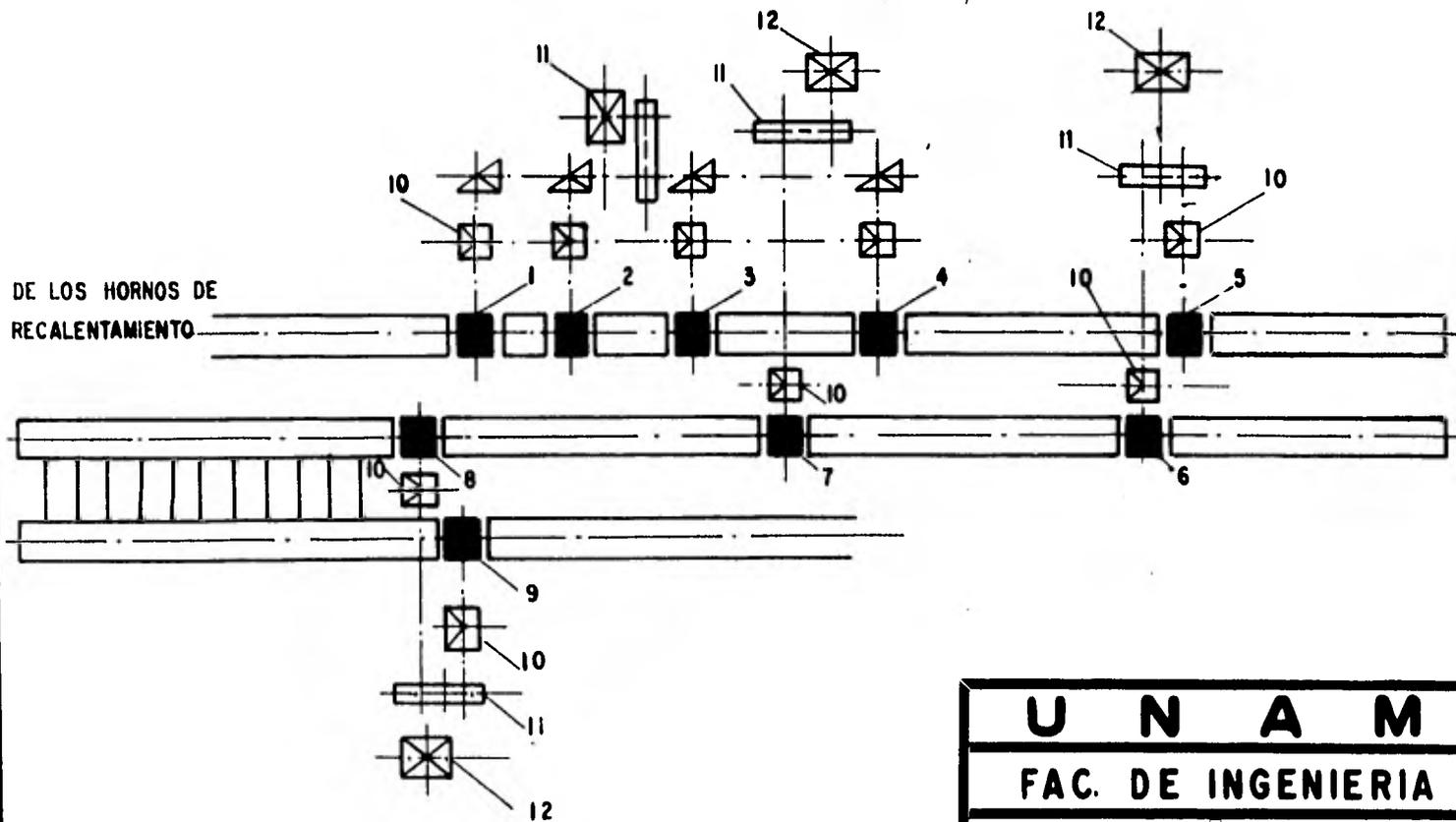
Un comentario sobre este tipo de trenes es el hecho de que debido a las altas velocidades se puede dar el caso de tensiones entre la barra y el bastidor, lo que ocasiona que la velocidad no sea constante y que motiva una gran falta de precisión en la sección de la barra.

Este defecto en trenes contínuos para trabajo pesado y medio, ha ocasionado arreglos de los bastidores en zig-zag con los llamados laminadores transversales, cuyo esquema se muestra en la Fig. 9.

Cada bastidor se emplea también para una sola pasada de la barra, previamente laminada en un bastidor anterior. Para mantener la longitud del tren, los bastidores se pueden colocar en tres líneas paralelas de rolado y la barra a laminar pasa de una línea a otra por medio de mesas rotativas o bandas de transporte.

Estos laminadores se caracterizan por la ausencia de fuerza de tensión en la barra, durante el rolado.

## DISTRIBUCION DE UN TREN LAMINADOR "CROSS COUNTRY" PARA SECCIONES GRANDES (530 mm)



1-4- LAMINADORES (630 mm  $\emptyset$ ) 5-9- LAMINADORES (530 mm  $\emptyset$ )  
10- JUEGO DE PIÑONES 11- REDUCTORES DE VELOCIDAD 12- MOTOR

U N A M	
FAC. DE INGENIERIA	
FIGURA N.	PROCESO DE LAMINADO
9	

Una modificación del laminador "cross country" es el tren de laminación por etapas en el que los bastidores de acabado se arreglan en fila (Fig. 10).

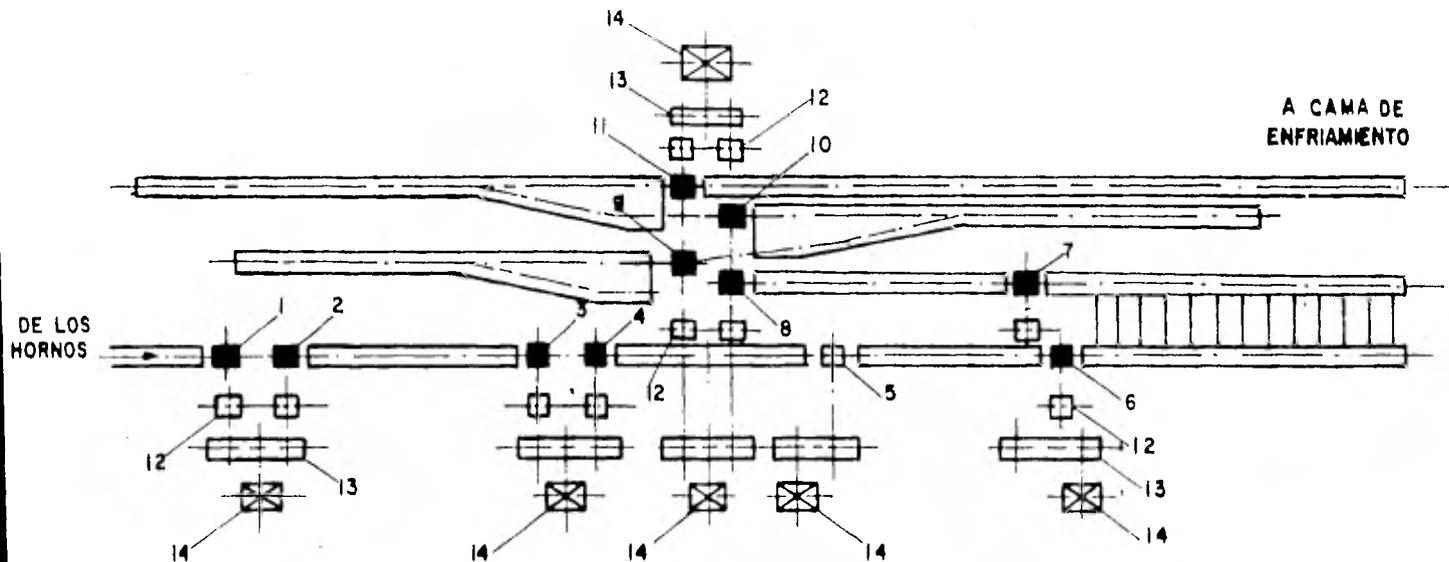
Los laminadores combinados son utilizados para secciones delgadas; estos laminadores tienen un tren continuo y otro del tipo abierto con varios bastidores. Se les suele llamar laminadores semi-continuos.

El defecto de estos últimos laminadores, que se mencionó anteriormente, se ha eliminado en los laminadores modernos por medio de un motor para cada rodillo del bastidor; este motor tiene una gran variedad de velocidades. Esto permite que la velocidad de laminación sea fijada exactamente.

Otra ventaja de los laminadores continuos es que tienen bastidores con rodillos verticales. Esto excluye la necesidad de equipo y accesorios para girar la barra.

La laminación continua ha ido desarrollándose más y más. En un futuro cercano, este método se aplicará a laminadores de barras pesadas. Las ventajas de los laminadores continuos sobre otro tipo de laminadores es su gran producción y su menor costo en cuanto a instalaciones y equipo adicional.

## DISTRIBUCION DE UN LAMINADOR ESCALONADO DE SECCIONES MEDIANAS (350 mm)



1 a 4 - Laminadores (450 mm Ø), 5 a 7 - Laminadores (400 mm Ø)  
 8 a 11 - Laminadores (350 mm Ø), 12 - Caja piñones, 13 - Reductor de velocidad, 14 - Motor

**U N A M**

FAC DE INGENIERIA

FIGURA N.º

10

PROCESO  
DE  
LAMINADO

Actualmente los laminadores de tiras, hojalata y tubos con costura utilizan el método de laminación continua. Lo último en laminadores son los continuos y los combinados.

## CAPITULO I-d

### PREPARACION Y CALENTAMIENTO DEL MATERIAL.

Preparaciones previas al laminado.

El material a laminar deberá ser preparado antes de entrar a los laminadores. La preparación consiste en quitar todo tipo de fallas superficiales, tanto en billets como en los mismos lingotes. Aunque es una operación en la que se involucran algunos costos extras, éstos pueden justificarse plenamente.

El hecho de que en el laminado de productos al alto carbón (piezas industriales fundamentalmente) se deba obtener una alta calidad muy justificada, es causa suficiente para justificar los costos de inspección.

Por regla los lingotes son llevados primero a las fosas de recalentamiento y ya después, cuando se rolan a billets, se les prepara para el siguiente paso.

Para el caso de aleaciones y aleaciones al alto carbón se observan requerimientos especiales. Los lingotes en estos --

casos deberán enfriarse primero, después se acondicionarán y se volverán a calentar para rolarse. El calentamiento previo al acondicionamiento deberá hacerse lentamente. El acondicionamiento siempre se hará tanto en lingotes como en billets.

Los principales defectos que se deberan evitar son: inclusiones no metálicas, costras, grietas capilares, fisuras, astillas y rayones, defectos que se detectan por simple inspección. Posteriormente se le dará un baño químico de limpieza para quitar los posibles defectos no visibles.

La operación de rebabeo se efectúa con martillos neumáticos con presiones entre 5 y 5.5 atmósferas. Este es un método muy usado, sin embargo es muy riesgoso y tiene baja capacidad de producción, especialmente cuando se trabajan aleaciones.

Esta operación se usa poco cuando se requieren altas tasas de producción. Es principalmente usado para acondicionar billets o para quitar algunas fallas profundas en los lingotes. Estas fallas se deberán quitar después del maquinado para quitar asperezas.

El rebabeo para quitar los defectos en los lingotes se efectúa en dirección longitudinal, pues en caso contrario los defectos se podrían acentuar demasiado.

Las esmeriladoras se pueden utilizar también para la -- operación de acondicionamiento. El esmeril se monta en un sistema que lo sujeta y que le permite girar sobre una placa giratoria colocada sobre un eje vertical ligeramente inclinado. Por las altas velocidades de giro los abrasivos son de óxido de aluminio -- con baquelita. En estos casos el acondicionamiento del billet en el sentido transversal del billet, debido a que de esta forma se pueden quitar más fácilmente posibles fallas en él.

Sin embargo sus costos de operación son altos y la tasa de producción es baja, es por eso que se usan más para atacar defectos leves, especialmente en aleaciones al alto carbón. El esmerilado en billets de acero muy duro produce desde luego altas -- temperaturas que al bajar por el enfriamiento pueden ocasionar fisuras en el billet. Un método para poder evitar esto es por me -- dio de un control muy preciso en el tamaño y calidad del grano -- del abrasivo, así como la velocidad de giro aplicada según el tipo de material a procesar. Los metales que se enfrían con aire -- deberán ser acondicionados en el recocido para evitar la forma -- ción de fisuras.

Existe un método nuevo para preparar los lingotes o -- billets, es el de rebaje o desconchado por flama y consiste en -- quemar los defectos del lingote por medio de una flama oxacetilénica. La operación puede ser manual o en máquinas especiales; -- cuando es manual, la operación consistirá por regla, en eliminar

sólo determinadas fallas en lingotes o en billetes. La flama se dirige de un extremo a otro de la falla hasta que el metal alcanza una temperatura de  $950^{\circ}$  -  $1000^{\circ}\text{C}$ , lo que toma algunos segundos. Se aumenta entonces la cantidad de oxígeno, lo que ocasiona que se pueda quitar una capa de metal.

Cuando el metal empieza a prender se inclina el soplete un ángulo de  $25^{\circ}$  a  $30^{\circ}$  y un chorro de oxígeno quita la escoria y el metal líquido.

Actualmente en la mayoría de los metales se usa este tipo de operación. Los metales de bajo contenido de carbón presentan dificultad en estas operaciones, pero los de alto contenido de carbón requieren flujos y recubrimientos especiales que facilitan el quemado y que forman escoria a bajos puntos de fusión. Para estos casos se usan sopletes especiales que difieren de los anteriores porque tienen dos inyectores: uno especial que dá una mezcla especial de oxígeno y por el otro dá oxígeno para corte.

Las fisuras formadas por la flama de desconchado son debidas a esfuerzos de origen térmico por la diferencia de temperatura a lo largo de la sección transversal del billet y también por formaciones martensíticas de la austenita.

Entre más baja sea la conductividad y temperatura inicial del billet y entre mayor sea su coeficiente térmico de con -

ductividad, mayores serán los esfuerzos de origen térmicos. Entre más alta sea la estabilidad austenítica y el contenido de carbón, más susceptible será el metal a agrietarse.

Los esfuerzos debidos al desconchado deberán evitarse - mediante un precalentado del billet y por un acondicionamiento superficial directo después del rolado cuando el billet está aún caliente.

El desconchado con soplete se efectuará en una sola dirección a lo largo del billet.

La capacidad de producción por este método es mucho mayor que por rebabeo.

Las máquinas para desconchar van por lo general después del laminador, por ejemplo en dirección de la mesa del laminador, entre el laminador y la guillotina. De esta forma las lupias y planchones se desconchan directamente después de salir del laminador. En la Fig. se vé una desconchadora en la que los cuatro lados del lingote se acondicionan simultáneamente.

Otros métodos que se usan para preparar a lingotes y billets son: cepillado, fresado o torneado.

El torneado es el más usado para el caso de superficies rugosas. Existen tornos especiales para lingotes redondos. Estos tornos están equipados con accesorios especiales, montaje y centrado; lo que reduce bastante el tiempo de montaje.

Los lingotes de aleaciones que son destinados a producir secciones, hojalata o placa, se tornean también en casos especiales. Cuando son de sección rectangular o cuadrada se usan tornos especiales, llamados tornos esquineros.

Antes de usarse estos tornos se usaban cepillos, pero el alto costo y baja producción obligó a no usarlos más.

Cuando los defectos son muy grandes, se efectúa entonces un fresado local especial.

Un método actual y que adquiere más usuarios cada vez, es el de arco eléctrico que funde el metal alrededor del defecto y tiene una producción 3 o 4 veces mayor que por rebabeo y su costo es de una tercera parte.

Calentamiento previo.

Los lingotes y billets deberán calentarse a altas temperaturas para aumentar su plasticidad, lo que reduce el consumo de energía al rolar, permite mayores reducciones por pasada y disminuye la posibilidad de deformar los rodillos del tren.

Sin embargo, un sobrecalentamiento originaría descarburizaciones, ampollas, quemaduras, etc. La capa extrema que es la más delgada, está formada por  $Fe_2O_1$ , la central de  $F_3O_4$  y la interior de  $FeO$ .

La oxidación del metal ocasiona incrustaciones, lo que se traduce en pérdidas de material que pueden alcanzar el 4 o 5% si se descuida el proceso. Sin embargo, como el metal se calienta varias veces, es probable que el porcentaje normal sea del 3 o 4%. Las incrustaciones son causantes de defectos de laminado, como asperezas, por ejemplo.

El grado de incrustaciones depende de la temperatura, el tiempo de exposición o altas temperaturas y la atmósfera del horno. La temperatura de 900-1000°C es la que mayor grado de incrustación tiene.

Es de especial importancia calentar el metal uniformemente a lo largo de la sección transversal, pues en caso contrario puede suceder que se originen discontinuidades, desgaste excesivo de los rodillos, fractura de los rodillos, consumo excesivo de energía, etc.

En muchos casos el tiempo de calentamiento, así como la temperatura necesaria para algunos aceros, se establece en forma empírica.

## SECCION II.-

**Clasificación y diseño de rodillos laminadores.**

## CAPITULO 11-a

### TIPOS Y APLICACIONES DE LOS RODILLOS.

En esta parte, se consideran los tipos de rodillos más usuales, las condiciones que deben satisfacer y sus aplicaciones correctas.

Los molinos de laminaciones existentes, están dedicados a diferentes trabajos, por lo tanto, es imposible que exista en el mercado un solo tipo de rodillo que pueda cubrir todas las necesidades. Entonces, es indispensable aplicar un buen criterio para la selección del rodillo más adecuado para cada una de las aplicaciones de los diferentes trabajos. Así que un rodillo mal seleccionado ocasiona problemas tanto técnicos como económicos; por eso, es muy importante estudiar a fondo las condiciones a que se someterá el rodillo para poder determinar el tipo, aleación, tratamiento térmico y acabado más adecuado.

Los rodillos se pueden fabricar por vaciado en moldes o por forja. Los vaciados pueden ser de hierro o de acero, siendo éstos los más económicos y rápidos de fabricar. Los forjados son los que se utilizan principalmente para laminar planos en frío, ya que poseen gran dureza y tenacidad. Este tipo de rodillos no se emplea comunmente en América, por lo tanto, no se mencionarán.

Un rodillo, debido a su trabajo, está sometido a grandes impactos, fuertes flexiones, torsiones, choques térmicos y rozamiento. Estos efectos constantemente tienden a disminuir la vida de los rodillos, por lo que deben reunir ciertas cualidades para contrarestarlos lo mejor posible. Así, por ejemplo, los rodillos desbastadores deben tener suficiente resistencia a la rotura para soportar los grandes esfuerzos de torsión y flexión que sufren. En el acabado, es de importancia la resistencia al desgaste para evitar alteraciones en las dimensiones, tanto del rodillo como en los productos que se laminan.

Lo anterior solo se puede admitir de una manera general pues existen circunstancias en cada laminadora que complican la aplicación de los rodillos; se dan casos en que el mismo tipo de rodillo dá rodamientos y resultados completamente diferentes en operaciones similares.

A pesar de esto, las bases para hacer una selección más adecuada y correcta se basa en la experiencia adquirida a través de los años en la fabricación y empleo de rodillos.

El carbono es el elemento que más influencia tiene para aumentar la resistencia al desgaste. Conforme aumenta su contenido, aumenta la dureza superficial y disminuye la resistencia a la rotura. Así, vemos en la práctica que este elemento aumenta conforme avanzan las etapas de laminado, desde el desbaste al acabado.

Para ampliar las propiedades proporcionadas por el carbono y acercarlas más a las necesidades particulares de cada operación, se añaden elementos, como Cr, Ni, Mo, V, Ti, Mg, Mn, etc. en cantidades debidamente balanceadas. Esto por supuesto, sin olvidar la selección del tratamiento térmico adecuado, que es el que desarrolla en definitiva las características latentes del material.

Rodillos de acero.

En la siguiente tabla se puede ver la clasificación general adoptada por los fabricantes americanos de rodillos de acero.

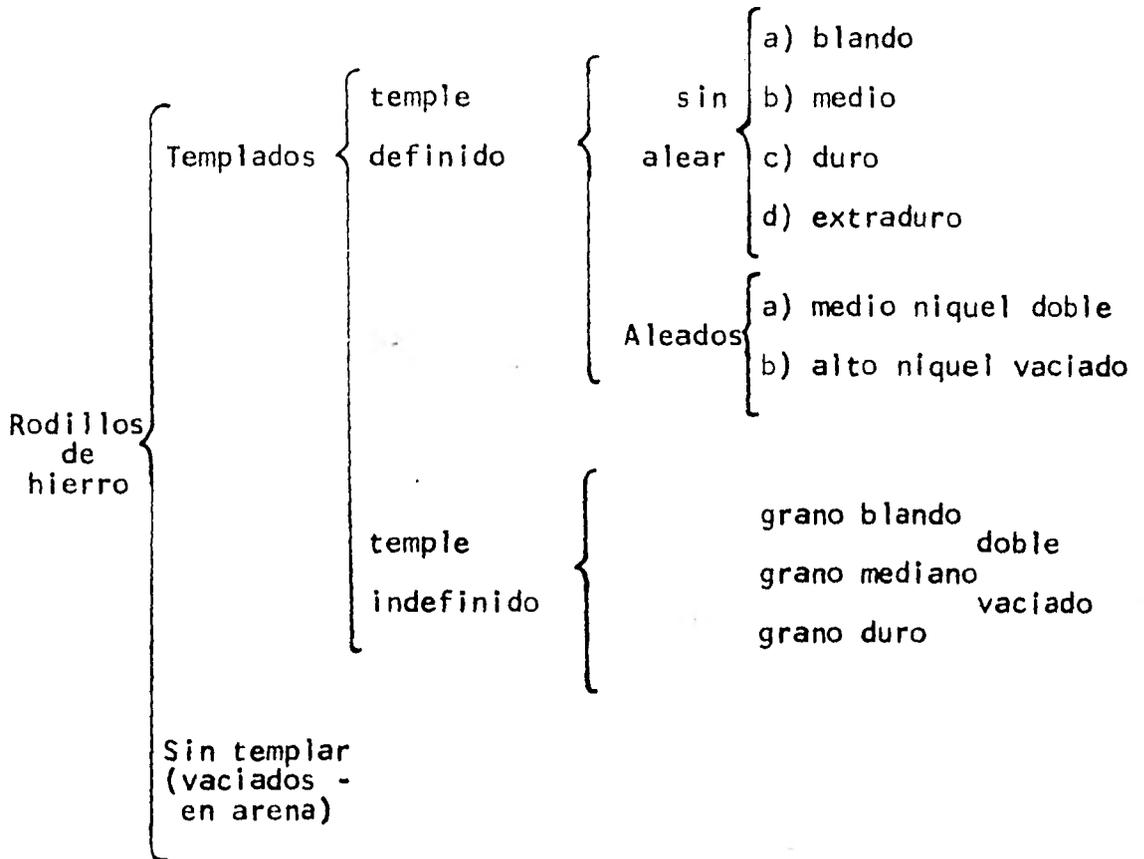
Clase	T i p o
1	Aceros sin alear hasta 1.25% C.
2	Aceros de baja aleación hasta 1.25% C.
3	Aceros de aleación media hasta 1.25% C.
4	Aceros de aleación alta hasta 1.25% C.
5	Aceros de alto carbono y baja aleación
6	Aceros de alto carbono y media aleación
7	Aceros de alto carbono grafitizado y media aleación
8	Aceros especiales aleados al Cr V Ni, etc.

En la siguiente tabla, se puede ver más concretamente la relación aproximada entre el contenido de carbono de los rodillos y sus aplicaciones, aunque se recuerda que son necesarios ajustes de aleación para condiciones individuales.

% de carbón	Aplicación
0.50 a 0.65	Donde la tenacidad es el principal requerimiento.
0.70 a 0.85	Rodillos desbastadores, chapa, desbaste, placa y hojalata, desbaste pudelaje.
0.90 a 1.05	Rodillos desbastadores, laminadores de planchones, desbastadores de barras continuas, rodillos de apoyo.
1.10 a 1.25	Rodillos desbastadores y de planchones, donde no es grande el peligro de roturas, rodillos de punzonar, desbastes de palanquillas, barras, rieles y estructurales.
1.35 a 1.55	Castillos intermedios para rieles, estructurales.
1.60 a 1.80	Castillos intermedios para barras y palanquillas, rodillos intermedios tren frío.
1.85 a 2.05	Rodillos intermedios para molinos de rieles estructurales, acabadores cuando es necesario substituir de hierro.
2.10 a 2.60	Acabadores para condiciones excepcionales.

#### Rodillos de hierro.

Estos contienen de 2.50 a 3.50% de carbono total y se clasifican tomando como base el contenido de aleación, método de fabricación y carácter del casco o tipo de temple. Sus durezas oscilan entre 40 y 90 sh, y se clasifican como sigue:



Los vaciados en arena sin templar, se utilizan para desbastes muy especiales y en la actualidad se encuentran fuera de uso, habiendo sido reemplazados por tipos más modernos como son los de "temple indefinido".

Los rodillos templados, son aquellos cuyos cuellos y --tréboles se moldean en arena, no así la tabla que se forma con coquillas de hierro. Para vaciarlos se escoge una fundición que en condiciones normales solidificaría gris, pero al vaciarse en estas coquillas se templa la parte en contacto con ellas. Estas coquillas, comúnmente llamadas templaderas, extraen el calor de la

pieza más rápidamente formando estructuras especiales que se controlan por medio de la composición química, según el uso a que se destinen los rodillos.

Estos rodillos generalmente se utilizan en los castillos de acabado y por lo tanto, casi siempre son los que están sujetos a mayores esfuerzos. Constantemente están recibiendo fuertes impactos, grandes choques térmicos y sobrecargas repentinas transversales y de torsión. A pesar de ésto, siempre deben poseer bastante dureza para resistir deformaciones debidas al roce y proporcionar un producto de dimensiones adecuadas.

Considerando lo anterior, dos importantes tipos de rodillos templados han sido desarrollados. Estos son los de "temple definido" y de "temple indefinido".

Rodillos de temple definido.

Estos son los formados por un "casco" de hierro totalmente blanco con dureza elevada, inmediatamente debajo de éste, se encuentra una zona de hierro moteado con un espesor aproximado al del casco y finalmente, el núcleo formado por hierro gris, el que dá resistencia a la rotura.

En los rodillos de temple definido existen dos clases: sin alear y aleados. En los primeros, el carbono es el elemento-

de mayor importancia con respecto a la dureza y resistencia a la rotura.

En la primera tabla se observa claramente que la dureza y el esfuerzo a la rotura en el hierro templado están en razón inversa del contenido del carbono. Por lo tanto es necesario balancear perfectamente el elemento de acuerdo con los requerimientos del material a laminar. De aquí la necesidad de la existencia de cuatro clases de rodillos: sin alear, blando, mediano y extraduro.

En la Tabla siguiente se dan las composiciones químicas con sus respectivas durezas para cada uno de estos grupos. La -- profundidad de temple se controla por medio de la composición química, ya que el efecto enfriador de las templadoras es igual.

COMPOSICIONES TÍPICAS DE RODILLOS SIN ALEAR DE HIERRO.

Tipo	% C	% Mn	% Si	% P	% S	Dureza Sh
temple blando	2.90	0.25	0.70	0.45	0.085	55-65
temple mediano	3.20	0.25	0.65	0.45	0.100	65-70
temple duro	3.50	0.25	0.60	0.45	0.130	70-75
temple ex-traduro.	3.70	0.25	0.50	0.45	0.150	75-80

Se notará que el manganeso se mantiene constante; esto se debe a que siendo un grafitizador potente es necesario no va -

riarlo para obtener resultados constantes. El azufre y silicio varían bastante; esto se hace para mantener una profundidad de temple constante, con las respectivas variaciones del carbono.

El silicio por su efecto grafitizador disminuye la profundidad del temple al aumentar su contenido. Una indicación de las necesidades de su control, es que una variación de 0.050% de Si, reduce la profundidad del temple aproximadamente 1/8".

El azufre tiende a aumentar la profundidad de temple por su relación con el manganeso formando sulfuros, contrarrestando las propiedades grafitizadoras de éste. Una adición de 0.040% de S, profundiza el temple 3/8".

El fósforo no afecta las propiedades del hierro mientras no exceda de 0.50%. Hasta este porcentaje puede ser benéfico al aumentar la formación de fosfuros duros y por dar mayor fluidez al metal.

Para aumentar la dureza y al mismo tiempo evitar en lo posible un aumento en la fragilidad, se alean con algunos elementos. Así, la condición de níquel, hasta un 2.5% aumenta la tenacidad y resistencia del casco y núcleo. De 2.5 a 4.5% aumenta la dureza del caso; de 4.5 a 5.0% el punto de transformación de la perlita se desplaza hacia abajo, obteniéndose martensita a temperatura ambiente y proporcionando rodillos con 80 a 90 shore de dureza.

En la siguiente tabla aparecen las composiciones típicas de rodillos aleados con medio y alto níquel, así como las durezas que se obtienen.

COMPOSICIONES TÍPICAS DE RODILLOS DE HIERRO AL NIQUEL.

Temple definido

Tipo	%C	%Mn	%Si	%P	%S	%Ni	%Cr	%Mo	Durezas Shore
medio níquel	3.35	0.22	0.55	0.45	0.13	1.75	0.35	0.30	70-75
alto níquel	3.15	0.18	0.45	0.45	0.13	4.50	0.75	0.30	80-85

En esta se ha adicionado cromo a estos hierros; esto se debe al hecho de que es necesario contrarrestar la acción grafitizadora del níquel, estabilizando así los carburos para evitar la baja penetración del temple. Como un exceso de cromo puede ocasionar fragilidad en el rodillo, es más común establecer un mínimo para este elemento y controlar la profundidad del temple disminuyendo el contenido de silicio proporcionalmente en cada aumento de níquel. Es posible disminuir el contenido de silicio hasta -- 0.25% y aún obtener cuellos y núcleos de hierro gris.

El molibdeno, es un elemento que modifica la forma del diagrama T, T.T, de tal manera que reduce el riesgo de que existan austenita retenida y transformaciones retardadas que pueden ocasionar fallas prematuras. Aumenta notablemente la templabili-

dad, refina el grano, así como aumenta la resistencia al calor -- evitando las grietas producidas por él.

Rodillos de temple indefinido o de grano.

El principal inconveniente de los rodillos de temple indefinido, aún cuando sean aleados, es la falta de profundidad en su dureza. Por lo tanto, cuando sean necesarios pasos profundos, o los golpes, temperatura y cargas son excesivos, éstos rodillos no son prácticos.

Para estos casos ha sido necesario desarrollar los rodillos de temple indefinido normalmente llamados de grano. Estos se diferencian de los anteriores en lo siguiente:

1.- No tienen un casco de temple definido, sino que existe una precipitación de partículas de grafito, microscópicas, a través de toda la sección del rodillo.

2.- Siempre contienen elementos aleados, siendo comúnmente el Cr, Ni y Mo, los que ayudan a aumentar las durezas.

3.- Los elementos antes mencionados, causan un refinamiento en el grano y por lo tanto, proporcionan mejor tenacidad y resistencia que los rodillos definidos.

En los rodillos de temple indefinido, como se mencionó anteriormente, no existe una zona definida de hierro blanco (templada), a pesar de que se vacían en coquillas. Debido a la composición química (balanceado adecuado), las partículas microscópicas de grafito aparecen en forma interdendrítica, además, la disminución de la dureza es gradual de la periferia al centro.

Lo anterior imparte propiedades muy especiales a los rodillos de grano, impidiendo la formación de grietas al calor por no existir una estructura continua, asimismo, el descascarillado es menor, ya que actúan el grafito como un colchón amortiguando los esfuerzos concentrados.

En la siguiente tabla se indica la composición típica de tres tipos de rodillos de grano, así como sus durezas. Estas fluctúan entre 55-85 sh, teniendo los primeros una matriz perlítica y los segundos martensítica.

COMPOSICIONES TÍPICAS DE RODILLOS DE GRANO.

Tipo	% C	% Mn	% Si	% P	% S	% Ni	% Cr	% Mo	dureza shore
Grano blando	3.00	0.45	1.15	0.15	0.065	1.00	0.75	0.30	60-65
Grano mediano	3.20	0.45	0.90	0.15	0.08	1.08	0.85	0.30	65-70
Grano duro	3.20	0.45	0.90	0.15	0.08	3.00	1.50	0.30	70-75

En esta tabla vemos que el grano es el elemento más importante para controlar la estructura de temple indefinido para la formación de carburos dendríticos que agrandan la zona moteada y refinan el grano.

Para aumentar las propiedades de los rodillos obteniendo durezas más altas en la superficie, se ha desarrollado el tipo de "doble colada". Se le llama así por el método empleado en su fabricación, que consiste en lo siguiente:

- 1.- Se vacían hasta el cuello superior con un hierro duro.
- 2.- Se dá tiempo suficiente para la formación del casco del espesor deseado.
- 3.- Se vacía otro hierro blando, que desplaza al primero que todavía se encuentra líquido, proporcionando de esta forma un rodillo con cuello y núcleo tenaz.

Los rodillos así obtenidos, tienen propiedades excepcionales. Se pueden obtener con casco de temple definido o indefinido, según se requiera. En la siguiente tabla se pueden ver composiciones típicas de ambos tipos de rodillos.

COMPOSICIONES TIPICAS DE RODILLOS DE DOBLE COLADA.

Tipo	% C	% Mn	% Si	% P	% S	% Ni	% CR	% Mo	Dureza shore
Casco al Ni templado.	3.15	0.18	0.45	0.45	0.13	4.5	0.75	0.30	80-85
Casco - Ni cromo.	3.15	1.20	0.90	0.15	0.08	4.5	1.80	0.30	80-85
Núcleo	3.25	0.60	1.00	0.25	0.08				

Actualmente se utilizan rodillos de hierro nodular siendo esta la principal ventaja de su gran tenacidad, debida al grafito se presenta en forma nodular. El empleo de estos es para -- desbaste y castillos intermedios cuando se necesitan dureza adicional.

En la tabla siguiente, se pueden ver algunos de los -- usos más comunes de los principales tipos de rodillos de hierro, según la ASM.

- 1.- Temple definido sin alear      molino para placas, planchas y redondos.
- 2.- Temple definido medio ni-quel.      Acabadores, barras y redondos, flejes, castillos intermedios, flejes.
- 3.- Temple definido alto ni -quel.      Castillo acabadores, molinos flejes.
- 4.- Grano medio aleación      Acabadores intermedios, barras, redondos, estructurales, tubos y flejes.
- 5.- Grano alta aleación dureza media      Castillos intermedios, flejes en caliente.

6.- Grano alta aleación dureza alta.	Acabadores, flejes y laminado en frío
7.- Hierro nodular	Desbastadores intermedios, redondo, estructural y barras.
8.- Doble colada temple indefinido	Fleje en caliente y frío: hojalata - en frío.
9.- Doble colada grano	Fleje en caliente y frío: plancha

## CAPITULO II - b

### PROCESO DE FABRICACION DE RODILLOS

#### Materia prima - Chatarra

La chatarra es seleccionada bajo riguroso control, para garantizar la homogeneidad y las propiedades físicas de los rodillos, los cuales después serán expuestos a minuciosos ensayos químicos y mecánicos.

Es importante que la chatarra sea de bajo contenido de P y S, MN y C, y que contenga cromo para evitar la fragilidad de los rodillos después del vaciado.

La fusión de los materiales para la obtención de rodillos de acero se hará en hornos eléctricos.

La carga del horno para el vaciado de rodillos de acero consiste en fundición de hierro viejo o chatarra dulce, rodillos-

de desecho, tiraderos y algunas veces pequeñas cantidades de arrabio.

La carga que se le pone al horno para la obtención de un rodillo, es el peso de éste ya maquinado, más un 30 a 60%. Entre más peso tenga el rodillo, menor porcentaje de tiradero llevará.

Primeramente se funde la carga, luego se continúa con el proceso de refinado y aleación, según el análisis que se necesita en el rodillo y tomando en cuenta los análisis químicos que se realizan durante la marcha.

En todo tipo de rodillo la temperatura de vaciado es un factor de gran importancia y siempre debe ser controlada minuciosamente. Estas temperaturas se van afinando por experiencia; sin embargo, se puede tener una aproximación de las mismas para cada tipo de aleación, aplicando el método de valores prácticos desarrollado por Wm. Roeser y H.T. Wensel, investigadores americanos.

La disminución que experimenta la temperatura de solidificación del acero, debido a las impurezas o a los elementos de aleación corrientes se muestra a continuación:

Elemento	Dism. punto sol. por cada % peso	Por % del elemento
N	1,300 calcul.	De 0 a
N	90% calcul.	de 0 a 0.03
O	80% calcul.	de 0 a 0.03
C	65 para 0%	de 0 a 3.8
C	70 para 1%	de 0 a 3.8
C	80 para 2.5%	de 0 a 3.8
C	85 para 3.0%	de 0 a 3.8
C	90 para 3.5%	de 0 a 3.8
C	100 para 4.0%	de 0 a 3.8
P	30	de 0 a 0.7
S	25	de 0 a 0.08
As	14	de 0 a 0.5
Sn	10	de 0 a 0.03
Si	8	de 0 a 3.0
Mn	5	de 0 a 1.5
Cu	5	de 0 a 0.3
Ni	4	de 0 a 9.0
Mo	2	de 0 a 0.3
V	2	de 0 a 1.0
Cr	1.5	de 0 a 1.8
Al	0	de 0 a 1.0
N	1	18 W con 0.66% C

Un ejemplo es el de la clasificación americana de rodillos de acero, correspondiente a la clase No. 8.

Como punto de partida se toma la temperatura de solidificación del hierro puro que es 1539°C.

Contenido	Elemento por factor	°C
2.34% C	2.34 x 80	187.20
0.55% Mn	0.55 x 5	2.75
0.49% Si	0.49 x 8	3.92
0.038% P	0.038 x 30	1.14
0.012% S	0.012 x 25	0.30
0.45% Ni	0.45 x 4	1.80
1.08% Cr	1.08 x 1.5	1.62
0.24% Mo	0.24 x 2	0.48
		<hr/> 199.21°C

La temperatura de solidificación en este acero, será -- por tanto de:  $1539 - 200 = 1339^{\circ}\text{C}$ . Siendo la temperatura más favorable para colar de 80 a  $100^{\circ}\text{C}$  elevada por pérdidas, etc.

$$1339 + 100 = 1449^{\circ}\text{C}$$

En los rodillos de acero es importante el control de la temperatura de vaciado por lo siguiente:

1o.- Las temperaturas muy altas ocasionan fallas debidas a la arena, rechupes excesivos, fracturas en la unión de la colada y en los cambios bruscos de sección, segregadores, etc.

2o.- Las temperaturas muy bajas ocasionan exceso de impurezas, llenado inadecuado del molde, impiden salida de gases, falta de homogeneidad, etc.

En el caso de los rodillos de grano, a temperaturas bajas, no permiten el refinamiento adecuado de la estructura y pueden aparecer grietas de solidificación.

Si la temperatura es muy alta, el hierro puede fundir la superficie de las templaderas. Como regla general se puede decir que, conforme aumenta el tamaño del rodillo, debe disminuir la temperatura de vaciado.

## Arenas.

Las arenas son el principal elemento para el moldeo.

Las arenas, en composición con otros materiales, se utilizan en el moldeo para rodillos de acero. Se pone arena en toda la forma del rodillo, de igual forma para los de hierro, excepto en la tabla del mismo, el cual va en contacto directo del metal - de las templaderas o coquillas.

Las arenas nuevas, una vez seleccionadas son llevadas a máquinas, donde son pulverizadas, tamizadas, mezcladas, etc., para luego usarse en el moldeo de rodillos de acero.

Las arenas deben contener sílice, para tener un punto - de fusión alto, el cual elimina por completo la adherencia de las arenas con el acero del rodillo; en caso contrario, pueden hasta ocasionar fracturas o si nó, un trabajo laborioso para hacer la - separación.

## Moldeo.

La composición de los materiales para el moldeo de rodillos de acero para 300 kg de la mezcla, es la siguiente:

327 kg de arena  
45 kg de harina sílica  
12 kg de arcilla  
6 kg de bentonita

Estos materiales deben reunir las siguientes propiedades:

1.- Ser refractarios, para soportar las altas temperaturas de fundición, sin romperse, agrietarse o fundirse.

2.- Ser porosos, poseer una permeabilidad suficiente para dejar escapar los gases que se desarrollen durante la colada.

3.- Ser plásticos, para permitir una preparación fácil y cómoda del molde.

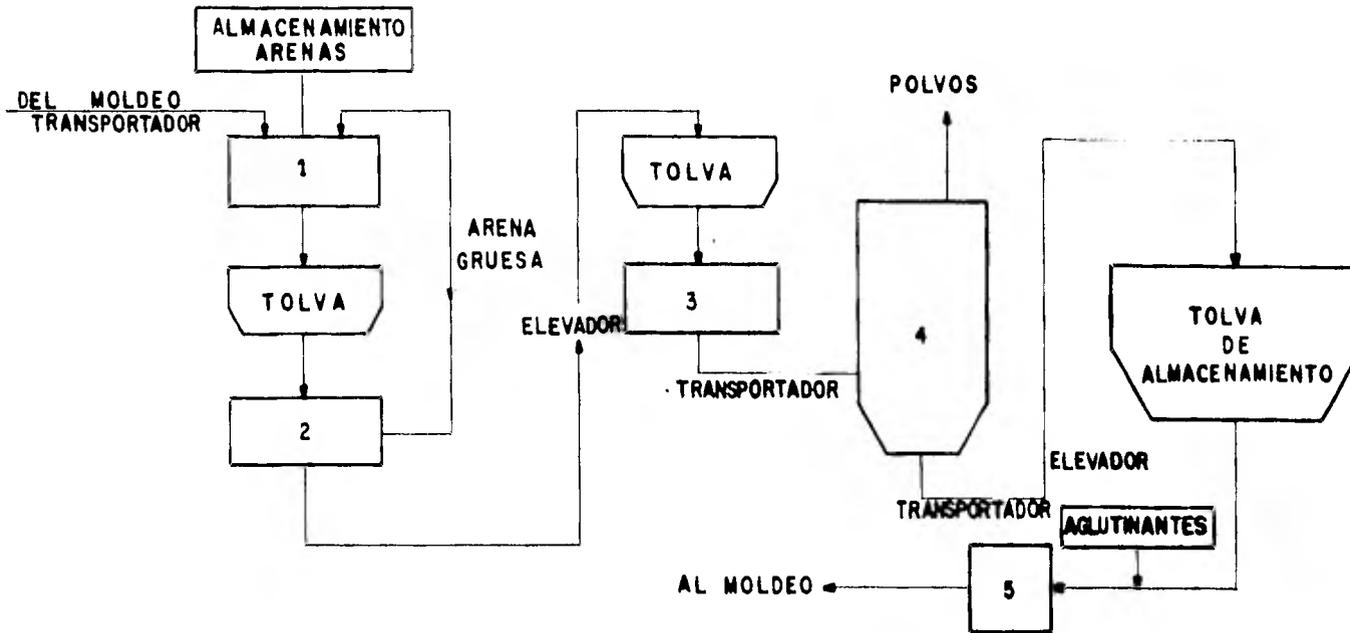
4.- Ser consistentes y resistentes, sin ser impermeables, es decir, que deben soportar los defectos de la colada sin que se produzcan desmoronamientos o roturas en el molde a causa de la presión del metal líquido.

5.- Ser permeables; el valor de la permeabilidad, depende de la temperatura de la colada y del tamaño de la pieza a colar; cuanto más elevada sea la temperatura de colada y más gruesas las secciones del metal, tanto más alta debe ser la permeabilidad.

En la hoja siguiente se indica en forma esquemática el orden de los procesos de preparación a que se somete la arena para moldeo de rodillos de acero.

La arena de desmoldeo, no se utiliza en el moldeo, ésta

## PROCESO DE PREPARACION A QUE SE SOMETE LA ARENA PARA MOLDEO DE RODILLOS



- 1- TRITURADORA DE CILINDROS
- 2- SECADOR Y CRIBA
- 3- TAMIZ
- 4- CICLON
- 5- M. SIMPSON

U N A M	
FAC. DE INGENIERIA	
	PROCESO DE LAMINADO

se puede aprovechar para el moldeo en la fabricación de cajas, - las que se utilizan en los rodillos de acero. Esta arena quemada es en cambio mejor utilizada en el moldeo de los rodillos de hierro.

Los procesos de la arena nueva son los siguientes: pasa a unos elevadores de canjilones, que la lleva a un triturador donde se obtienen arenas de grano fino, luego se almacenan en una tolva para caer paulatinamente en un secador y criba a la vez para disminuir la humedad y facilitar el tamizado, la criba es para separar la arena ya que tiene la finura requerida, después la arena pasa a un transportador que la lleva a un elevador de canjilones y éste a su vez, a una tolva, para caer a un tamiz donde se separan los cuerpos extraños; luego pasa a un transportador que la lleva a un ciclón o máquina centrifugadora en donde se efectúa una aireación con el fin de desintegrar los terrones duros; en esta máquina se obtiene una arena conveniente al moldeo, luego es transportada a un elevador de canjilones que se lleva a la tolva de almacenamiento, donde se saca la necesaria, que se lleva a la máquina Simpson, donde se hace la mezcla para la obtención de la arena para el moldeo de rodillos de acero.

Moldes y modelos.

Molde es el espacio vacío destinado a recibir el metal líquido.

Para la construcción del molde se utiliza un modelo como matriz, cuyas dimensiones serán algo mayores que las reales, - teniendo en cuenta la contracción que experimenta la fundición al solidificarse; la contracción del hierro puede estimarse en 1/100 y en el acero oscila alrededor de 1/80.

En los rodillos de acero se utilizan exclusivamente cajas, que son de fundición o de chapa de cierto espesor y en su interior se revisten de arena. En cambio, en los rodillos de hierro, llevan en la tabla o en el cuerpo del mismo, las coquillas, también llamadas templadoras, las cuales están en contacto con el metal líquido, lo cual provoca un enfriamiento brusco, en esta -- parte del rodillo, consiguiéndose con esto un endurecimiento de -- esta zona; el resto del rodillo está en contacto con arena.

El modelo empleado por el fundidor para preparar un molde para rodillos, generalmente es de madera, empleándose para esto maderas sanas perfectamente secas y de estructuras uniformes. Entre las más convenientes están: pino, caoba, nogal, etc.

La arena se apisona entre el molde y el modelo; una vez terminado esto se saca el modelo y a la arena se le agrega un -- aglutinante, para obtener una mayor resistencia a los esfuerzos -- de la colada.

En la siguiente lámina se muestra el croquis de un rodillo

llo de acero. El molde un rodillo de hierro se diferencia del molde del rodillo de acero, en que el cuerpo del rodillo de hierro está en contacto directo con una templadera o coquilla. (Fig. 11)

La colada se hace por la parte de abajo, por el muñón y entrando tangente para originar un remolino que ocasione que las materias extrañas, tales como escorias, arena, etc., se vayan al centro del rodillo y suban al tiradero.

La función del tiradero es que éste absorbe los rechupes.

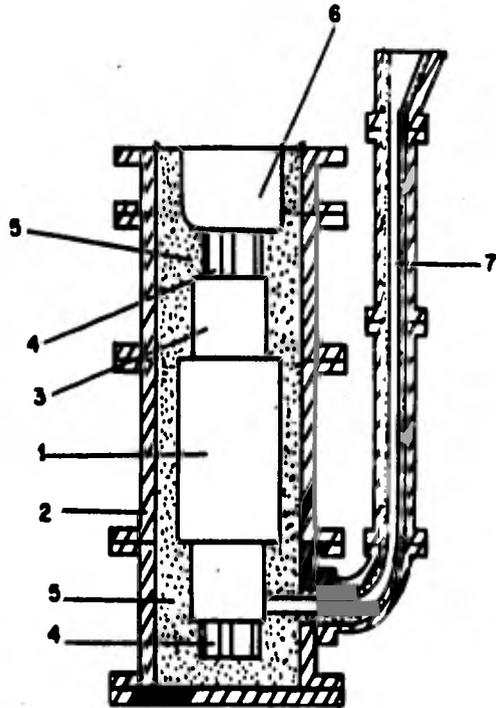
La entrada de la colada se hace con tubos refractarios comunes.

La unión de la caja de moldeo se hace con tornillos.

A los moldes, una vez que se les ha quitado el modelo, se pintan como medida de protección con pintura a base de zirconio y alcohol, el cual se evapora cuando están en la estufa, quedando solo la pintura seca.

La temperatura a la que se someten depende de la composición del material, del tamaño del molde y en particular, del aglutinante empleado; por lo general esta temperatura es de 200 a 500°C. El control de temperaturas se realiza por un termómetro registrador. Deben evitarse calentamientos bruscos durante el secado del molde, los cuales provocan una contracción superficial -

# COLADA RODILLO ACERO



- 1- CUERPO DEL RODILLO DE ACERO
- 2- CAJA
- 3- MUÑON
- 4- TREBOL
- 5- ARENA
- 6- TIRADERO
- 7- CANAL DE ENTRADA DE LA COLADA

U N A M

FAC. DE INGENIERIA

FIGURA No.

11

PROCESO  
DE  
LAMINADO

de la arena, lo correcto es que la elevación del calor sea uniforme.

Los moldes de arena, de gran espesor, se dejan entre 18 y 48 horas en la estufa. Para los moldes de dimensiones medias se admiten unas 36 horas.

Antes de efectuarse la colada se recubren los moldes con materias conocidas como "polvo para moldes". El objeto de esto es de rellenar las pequeñas grietas que siempre se producen por la desecación, eliminando al mismo tiempo la superficie de los moldes a las piezas fundidas.

#### Desmoldeo.

En la operación de desmoldeo, se utiliza un equipo que consiste en un empujador hidráulico, que acciona la caja de moldeo que se traslada mediante un transportador de rodillos sobre una rejilla, en la cual se efectúa el desmoldeo y su funcionamiento es por golpete o, efectuándolo esto con una leva que es accionada por un motor; cuando se manejan cajas grandes se desprende gran cantidad de polvo, entonces son necesarios los extractores que están conectados a una red central de separadores de polvos.

En la parte inferior de la rejilla de desmoldeo se usa una tolva, la cual deberá alimentar a un transportador y éste a

su vez, se comunica a la máquina de preparación de arenas.

Una vez quitada la arena y retiradas las cajas del desmoldeador, se colocan los rodillos a otros carritos que están sobre una vía y que también son accionados por un empujador hidráulico y éstos pasan por una zona en donde a los rodillos se les recortan los alimentadores con soplete de oxiacetileno, dejando listos los rodillos para pasar al tratamiento térmico.

Tratamiento térmico.

Tiene por objeto mejorar las propiedades y características de los aceros y fundiciones y consiste en calentar y mantener las piezas a temperatura adecuada durante cierto tiempo y enfriándolas luego en condiciones convenientes. De esta forma se modifica la estructura microscópica, se verifican transformaciones físicas y a veces también cambios en la composición del metal.

El tiempo y la temperatura son también los factores principales de acuerdo con la composición de la aleación, la forma y el tamaño de las piezas y las características que se desean obtener.

En todo tratamiento térmico se pueden distinguir tres fases:

1).- DE CALENTAMIENTO.- A la que en muchas ocasiones no se le suele dar importancia, tiene, sin embargo, suficiente para que haya que dedicarle mucha atención, como en el caso de rodillos que son piezas de gran sección. El calentamiento debe ser lo más uniforme posible y debe llegar hasta el corazón de la pieza. Debe hacerse lentamente para que haya la menor diferencia de temperatura entre el interior y la periferia, pues en caso contrario se pueden crear fuertes tensiones internas que dan lugar a grietas y roturas. Estas tensiones se crean, primero, por la desigual dilatación de las zonas calientes y frías (la periferia y el centro) y luego por las contracciones que ocurren al atravesar el acero de las zonas críticas.

El paso de la zona crítica no es peligroso cuando todo rodillo tiene la misma temperatura o las diferencias entre el centro y la periferia son pequeñas, como ocurre en los calentamientos lentos. En cambio, cuando la periferia alcanza la temperatura bastante antes que el centro, la zona periférica sufre una contracción, mientras que el centro que no ha llegado a esa temperatura se está dilatando todavía y el peligro de grietas es mayor. Algunas veces estos defectos aparecen después en el temple y revenido, atribuyéndose indebidamente a causas distintas de las que la originaron.

2).- DURACION DEL CALENTAMIENTO.- Para conseguir que toda la masa del acero esté formada por cristales de austenita,-

hace falta que el acero permanezca a la temperatura del tratamiento un cierto tiempo.

La duración depende de la masa de los rodillos, de la temperatura, de la velocidad del calentamiento, de la clase de acero y del estado inicial y final del material. El tiempo de calentamiento comienza cuando toda pieza, incluyendo las zonas del interior, ha alcanzado esa temperatura.

El tiempo de calentamiento ha sido bastante rápido, el tiempo de permanencia deberá ser grande; en cambio si la primera fase del calentamiento hasta alcanzar la temperatura conveniente ha sido larga, el tiempo de permanencia puede ser menor, ya que la penetración del calor habrá sido mejor y la última fase del calentamiento puede considerarse casi como parte de la permanencia a temperatura.

La duración del calentamiento depende también de la clase de tratamiento. En los normalizados se recomienda usar permanencias más cortas; en los recocidos, en cambio, suelen ser más prolongados pues muchas veces hay que conseguir no solo la formación del estado austenítico, sino también la difusión y homogeneización de todos los constituyentes, que a veces, sobre todo en los aceros de estructura gruesa o fuerte aleación, exige mucho tiempo.

Cuando es necesario el revenido, la temperatura se ajusta de acuerdo con la dureza deseada.

En general, el tiempo de permanencia oscila entre media hora y una hora.

3).- VELOCIDAD DE ENFRIAMIENTO.- Las velocidades de enfriamiento empleadas dependen, como es natural, del tipo de material y del diámetro del rodillo, aunque lo más importante es éste último.

Limpieza.

El rodillo, una vez salido del departamento de tratamiento térmico, pasa a limpieza, donde son limpiados correctamente quitándoles las arenas que todavía llevan adheridas; para esto se utilizan herramientas neumáticas.

En este departamento se pintan los rodillos con números según el que le corresponda, haciendo la aclaración que los rodillos desde el momento de vaciar el molde ya llevan su número correspondiente.

Taller mecánico.

En este departamento el rodillo es maquinado según el plano correspondiente al mismo.

El rodillo pasa por las siguientes máquinas:

1o.- Mandriladora, donde al rodillo se le hace un centro, para luego poder agarrarlo con el contrapunto.

2o.- Torno horizontal, donde se efectúa el desbaste, - cortando el tiredero y cuando el rodillo es pequeño, el tiredero mazarota se corta con segueta mecánica.

3o.- Mandriladora, se le hacen dos centros al rodillo.

4o.- Torno, se efectúa el semidesbaste

5o.- Torno, acabado final.

6o.- Mandriladora, maquinado de los tréboles.

Después, el rodillo pasa a productos terminados, los -- que se encargan de proteger las partes rectificadas del rodillo y además del envío del mismo, al caliente.

CAPITULO 11-c

CARGA DE ROLADO (FUERZA DE SEPARACION ENTRE LOS RODILLOS).

La carga de rolado está dada por la fórmula

$$P = p_m F \quad (4)$$

donde  $p_m$  - presión unitaria media del metal en el rodillo

$F$  - área de contacto (área de la barra que está en contacto con el rodillo).

En el rolado de perfiles simples (planos, placas, billets rectangulares), el área de contacto es:

$$F = \frac{h_0 + h_1}{2} L \quad (5)$$

donde  $h_0$  - ancho de la barra antes de ser pasada

$h_1$  - ancho de la barra después de pasada

$L$  - longitud de la zona de deformación

$$L = \sqrt{R \Delta h} \approx R \alpha \quad (5a)$$

Si los planos o placas se rolan en molinos tríos, teniendo los rodillos diámetros diferentes, la longitud de la zona deformada queda determinada por la siguiente fórmula:

$$L = \sqrt{\frac{2 R_1 R_2}{R_1 + R_2} \Delta h}$$

donde  $R_1$  y  $R_2$  - radio de los rodillos de diferente diámetro.

Es bastante más difícil de determinar el área de contacto con los rodillos para secciones estructurales (ángulos, viga, rieles, canales, etc.).

En este caso es necesario aplicar fórmulas para cada sección en especial, o determinar el área de contacto gráficamente, usando las leyes de geometría analítica (Fig. 12).

La fórmula 5a. no puede aplicarse para el rolado en frío de láminas, pues se obtienen valores inferiores que los valores reales (de 20 a 40% y más).

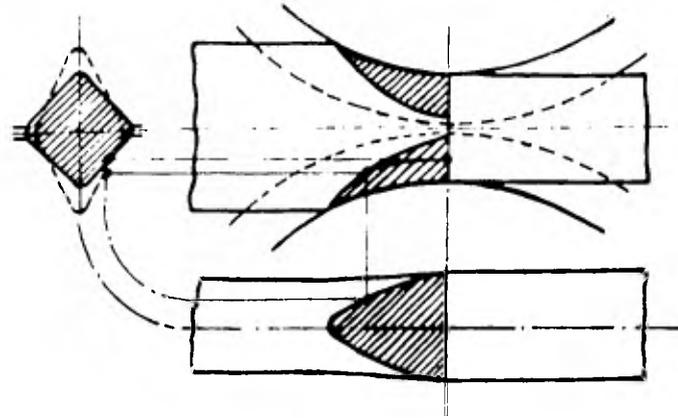
El aplastamiento elástico de los rodillos, que ocurre en el rolado en frío, ocasiona un aumento en la longitud de contacto y, consecuentemente, en la carga y rolado.

La longitud del arco de contacto, deformado (o sea su proyección), tal como se vé en la Fig. 13, será:

$$L_c = X_1 + X_0 = \sqrt{R \Delta h + X_0^2} + X_0 \quad (7)$$

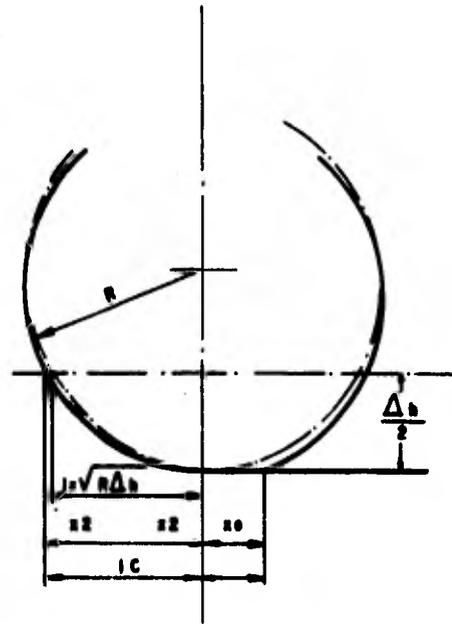
El incremento de la longitud de contacto será igual a:

$$X_0 = \frac{R}{9,500} \text{ pm} \quad (8)$$



PROYECCION DE LA SUPERFICIE DE CONTACTO DE UNA BARRA CON SECCION DE DIAMANTE Y QUE SE LAMINARA EN UN PASO CUADRADO

U N A M	
FAC. DE INGENIERIA	
FIGURA No. 12	PROCESO DE LAMINADO



EFFECTO DE APLASTAMIENTO DEL RODILLO  
 LARGO DE LA ZONA DE DEFORMACION EN  
 LA BARRA

**U N A M**

FAC. DE INGENIERIA

FIGURA No.

13

PROCESO  
 DE  
 LAMINADO

En realidad se han sugerido varias fórmulas para determinar la presión unitaria media. Las dos fórmulas a continuación toman en consideración la tasa de deformación, el coeficiente de fricción y otros factores que se involucran en el proceso de rolado.

1.- Fórmula de Ekelund que dice:

$$P_m = (K + \eta u) (1 + m) \quad \text{kg/mm}^2 \quad (9)$$

donde:

K - resistencia unitaria a la compresión estática (límite de fluencia a compresión a la temperatura de rolado) Kg/mm<sup>2</sup>.

$\eta$  - viscosidad del metal a rolar, kg-seg/mm<sup>2</sup>

u - tasa media de deformación seg<sup>-1</sup>

m - coeficiente de relación entre el incremento en la resistencia y la deformación del metal debida a la fricción entre la barra y los rodillos.

Después de una gran cantidad de experimentos en rolado de secciones roladas, Ekelund propuso las siguientes fórmulas para determinar los valores de estos coeficientes.

$$K = (14 - 0.01 t)(1.4 + C + Mn + 0.3 Cr) \quad (10)$$

$$\eta = 0.01 (14 - 0.01 t) C_v \quad (11)$$

$$m = \frac{1.6 f \sqrt{R \Delta h} - 1.2 \Delta h}{h_o + h_i} \quad (12)$$

Ekelund recomienda las siguientes fórmulas y funciones para poder encontrar el coeficiente de fricción  $f$ , el coeficiente  $C_v$  y la tasa de deformación  $u$ , de la siguiente forma:

$$f = (1.05 - 0.0005 t) \quad \text{para aceros} \quad (13)$$

$$f = 0.8 (1.05 - 0.0005 t) \quad \text{para fundición negra} \quad (14)$$

donde  $t$  - temperatura de rolado °C

Los valores de  $C_v$  dependen de la velocidad periférica y de los rodillos y son los siguientes:

$v$ (m/s)	$v > 6$	$6 \leq v < 10$	$10 \leq v < 15$	$15 \leq v < 20$
$C_v$	1	0.8	0.65	0.6

$$u \approx 2v \frac{\sqrt{\Delta h/R}}{h_o + h_i} \quad \frac{1}{\text{seg}} \quad (15)$$

La fórmula de Ekelund dá resultados satisfactorios para determinadas cargas y solo para rolado en caliente de acero al carbón y acero al cromo, de los cuales se determinaron los anteriores coeficientes empíricos.

2.- Las fórmulas analíticas de A. Tselikov, que se caracteriza porque toma en cuenta una distribución heterogénea de la carga específica en todo el arco de contacto, sirvieron de base-

para que A. Kosolyov propusiera la siguiente fórmula para calcular la carga media específica tanto para rolado en frío como en caliente de tira ancha.

$$p_m = \frac{K}{E} \frac{\alpha}{f} \left[ \left( \frac{1}{1-\epsilon} \right)^{\frac{f}{\alpha} - 0.5} - \left( 1 - \frac{\epsilon}{2} \right) \right] \left[ 1 - \frac{\sigma_0 + \sigma_1}{2K} \right] \quad (16)$$

$$K = 1.15 \frac{\sigma_{so} + \sigma_{s1}}{2} \quad (17)$$

donde:

$\sigma_{so}$  - el punto de fluencia del metal antes de rolar, teniendo en cuenta la temperatura, coeficiente de elasticidad y dureza (kg/mm<sup>2</sup>).

$\sigma_{s1}$  - el punto de fluencia del metal después de rolar teniendo en cuenta la temperatura, coeficiente de elasticidad y dureza (kg/mm<sup>2</sup>).

Para el caso de rolado en caliente, sugerimos

$\sigma_{so} = \sigma_{s1} = \sigma_B$  (Fig. 14 y 15), mientras que para rolado en frío debido a la dureza por trabajo,  $\sigma_{s1} > \sigma_{so}$  (Fig. 16)

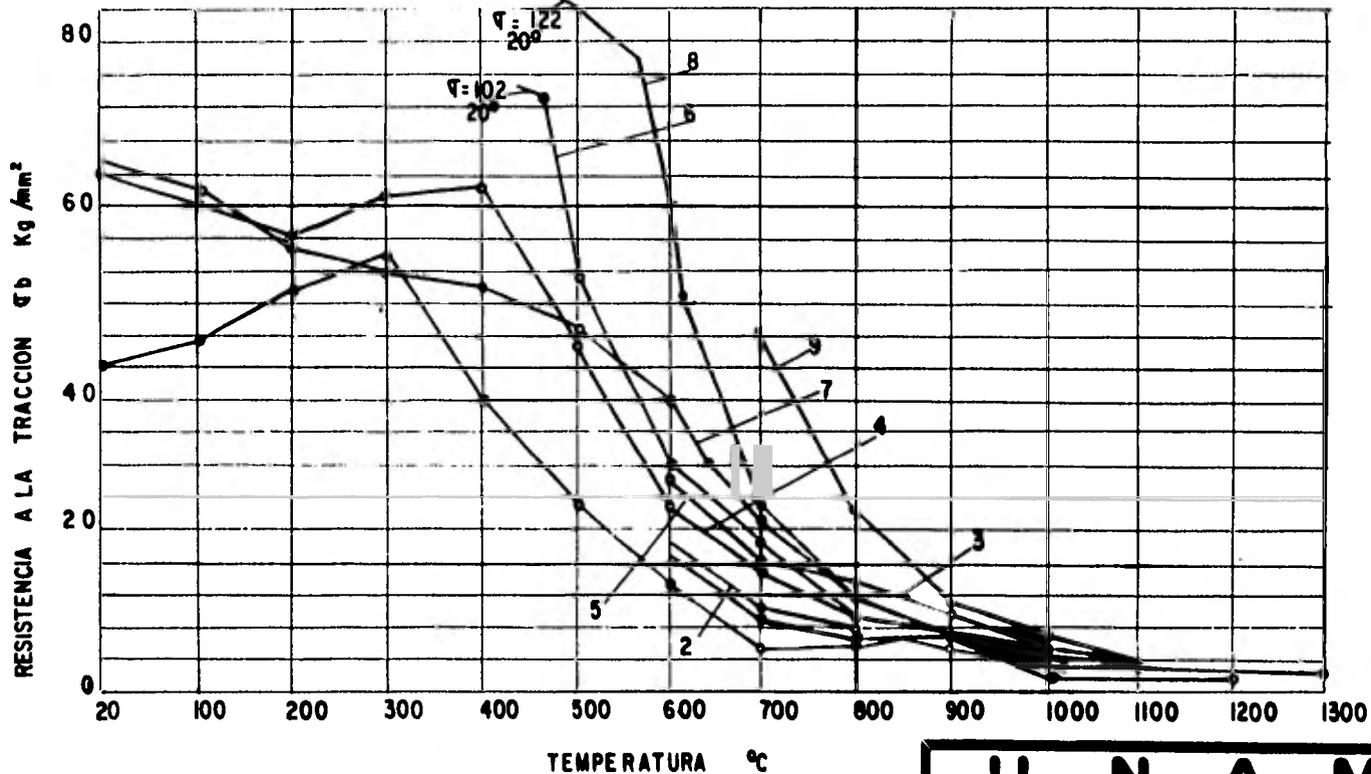
$\epsilon$  - estirado relativo igual a  $\frac{h_0 - h_1}{h_0}$

$\alpha$  - ángulo de contacto en radiales

$\sigma_0$  - tensión posterior específica de la barra en kg/mm<sup>2</sup>.

$\sigma_1$  - tensión frontal específica kg/mm<sup>2</sup>

## VARIACION DE RESISTENCIA A LA TRACCION DE VARIOS TIPOS DE ACERO VARIANDO TEMPERATURA EN LAS PROBETAS



- 1- Acero
- 2- Acero Y 7
- 3- Acero 30 X ΓCA
- 4- Acero 12 X H3A
- 5- Acero X12M

- 6- Acero 60C2
- 7- Acero 18 H9T
- 8- Acero 18 XHBA
- 9- Acero X20H80

**U N A M**

**FAC. DE INGENIERIA**

FIGURA No.

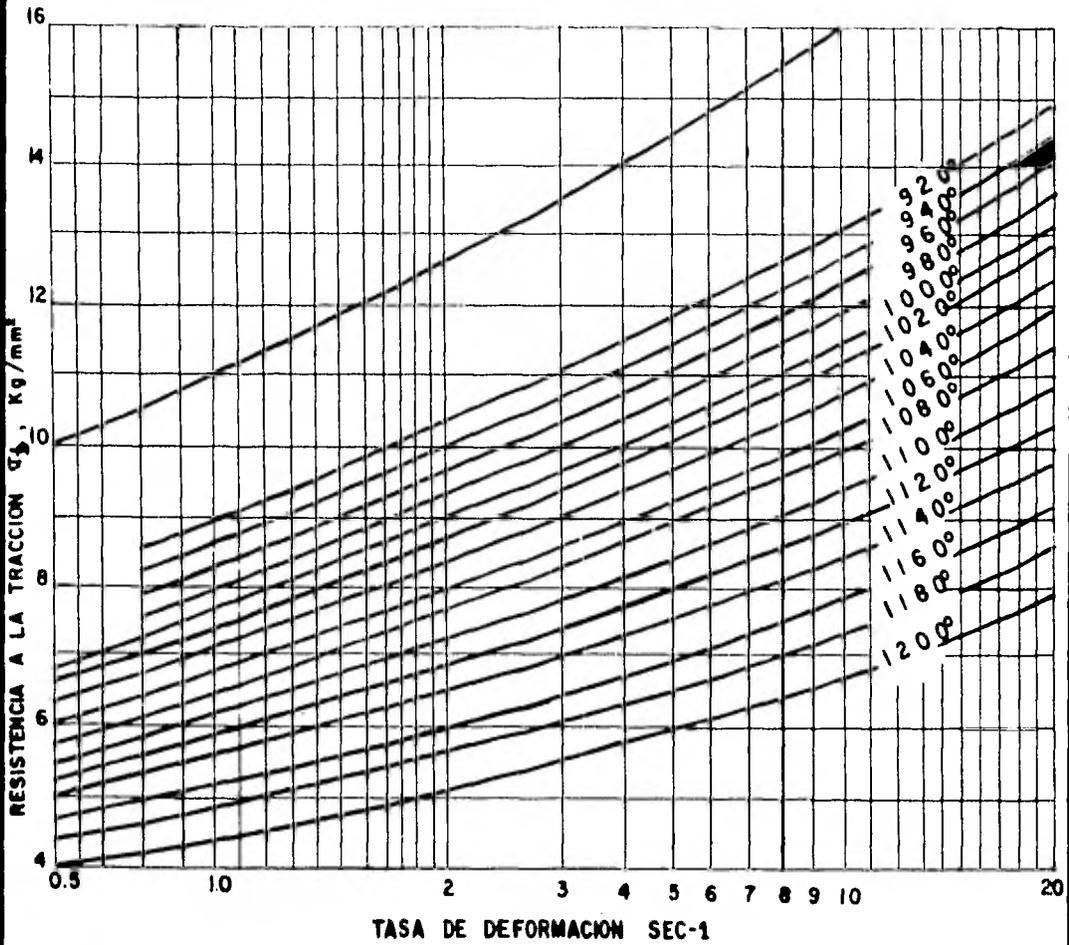
14

**PROCESO**

**DE**

**LAMINADO**

RELACION DE LA RESISTENCIA A LA TRACCION DE ACERO  
DE BAJO CARBON A VARIAS TEMPERATURAS CON SU  
TASA DE DEFORMACION



U N A M

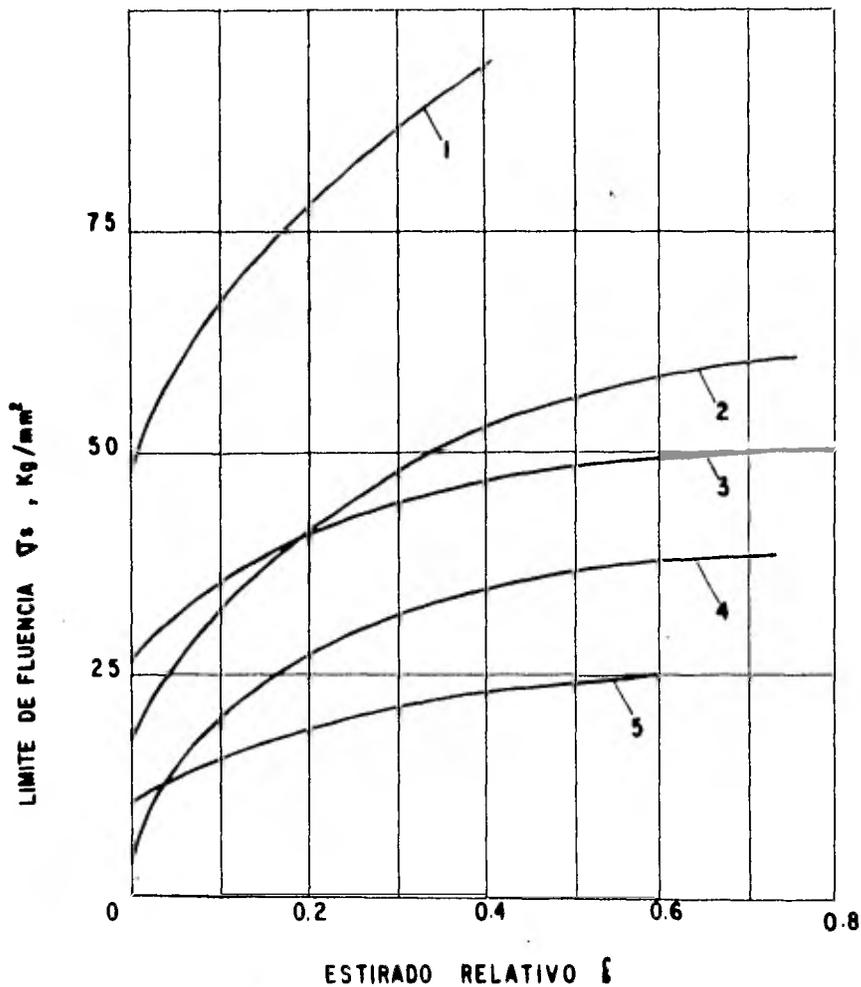
FAC. DE INGENIERIA

FIGURA No.

15

PROCESO  
DE  
LAMINADO

## RELACION ENTRE EL LIMITE DE FLUENCIA Y EL ALARGAMIENTO RELATIVO PARA VARIOS METALES DURANTE EL ROLADO EN FRIO



- 1- Acero 381T, Ho=1.5mm
- 2- Latón
- 3- Acero 10, Ho=2mm
- 4- Cobre, Ho=3mm
- 5- Al 16 duraluminio, Ho=10mm
- 6- Aluminio

U N A M

FAC. DE INGENIERIA

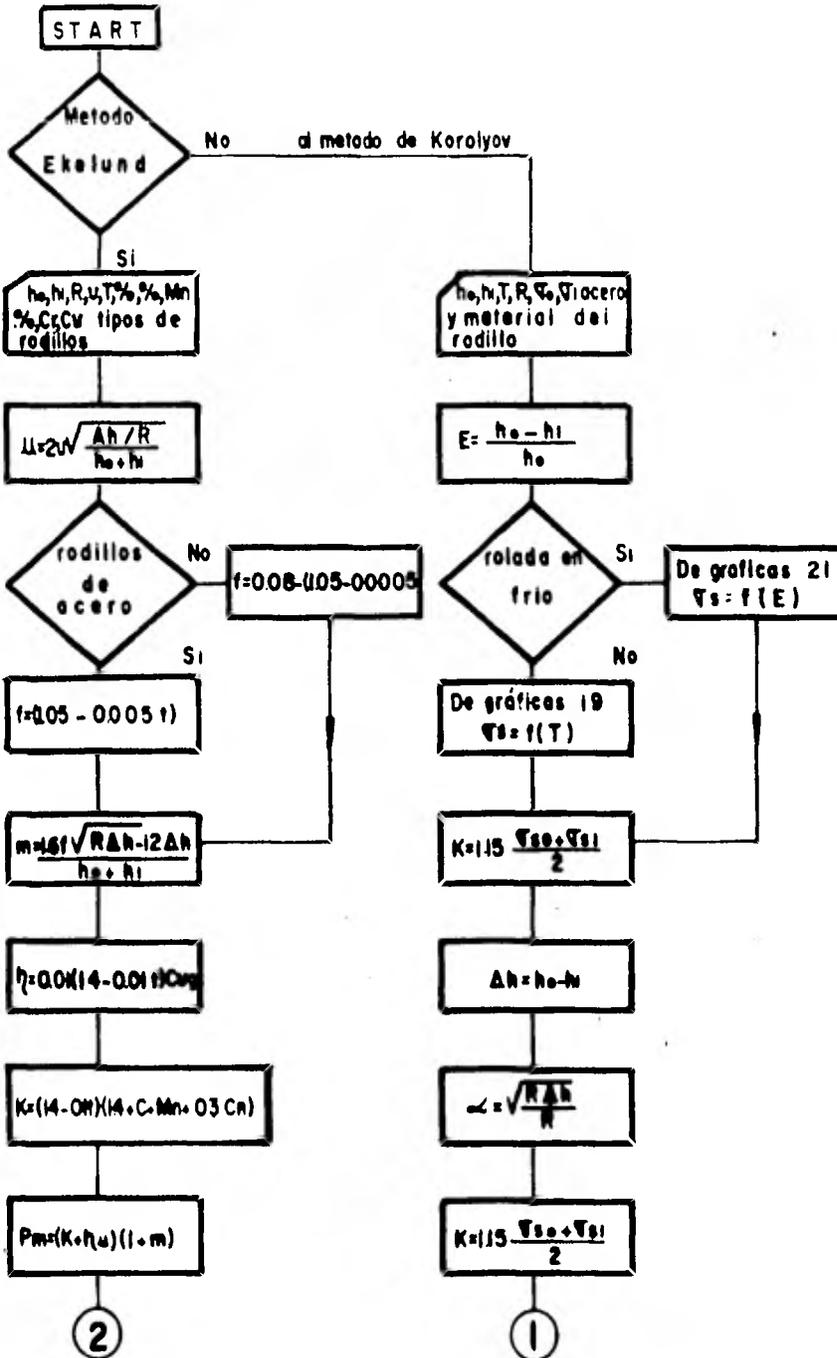
FIGURA N.º  
16

PROCESO  
DE  
LAMINADO

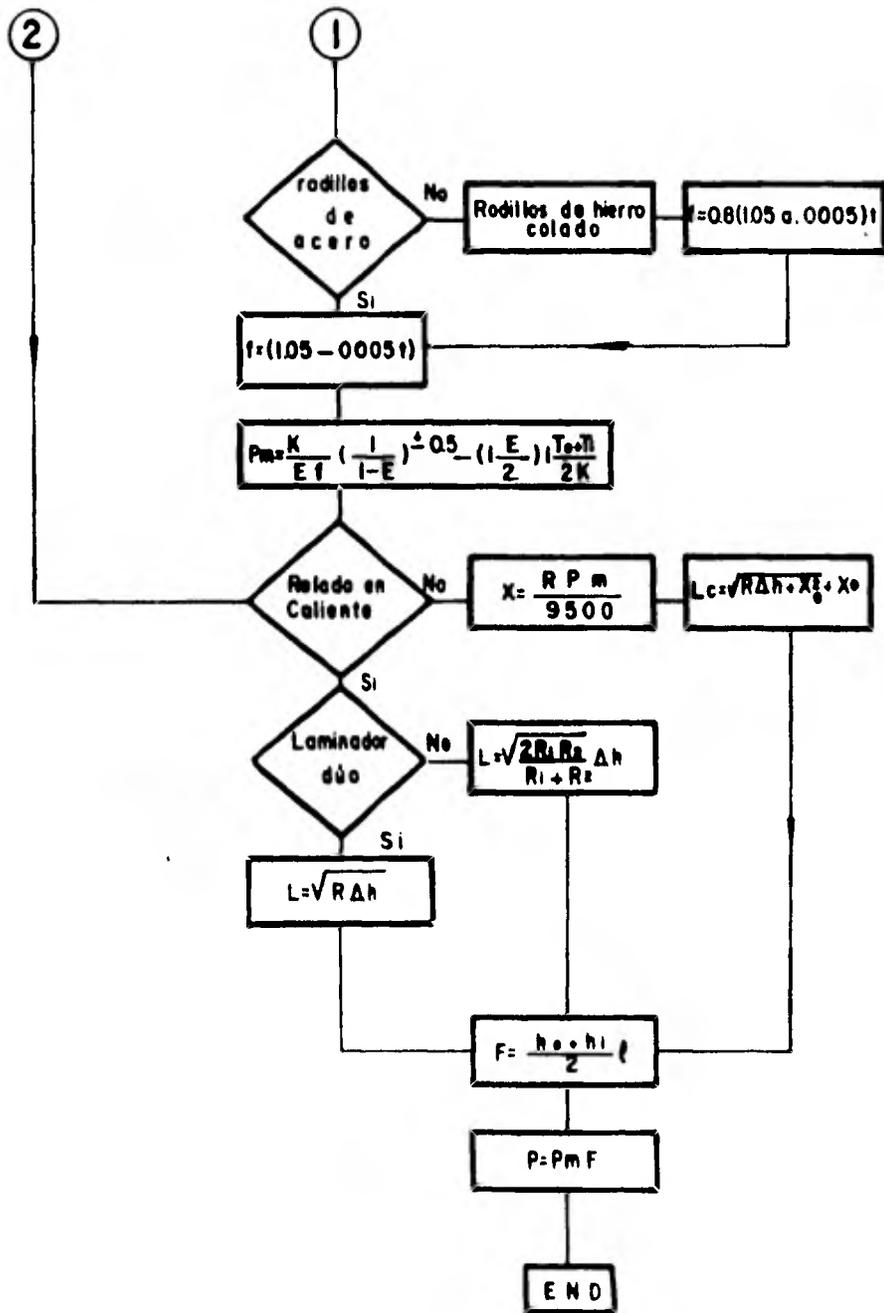
Los efectos de la tasa de deformación (en rolado en caliente) y el grado de deformación (en rolado en frío), en la dureza del material no han sido calculados especialmente como para ser expresados en alguna fórmula analítica. Sin embargo, de datos experimentales es bastante seguro fiarse, según la tasa y el grado de deformación. La Fig. 15 muestra curvas graficadas por los investigadores soviéticos A. Pliekmasov y Z. Ridner. Estas curvas muestran el incremento del esfuerzo de acción cuando aumenta la tasa de deformación para aceros al bajo carbón a varias temperaturas. Las curvas de la Fig. 16 muestran la variación en el punto de fluencia con una variación en el estirado de metales rodados en frío.

La validez de estos datos nos permitier más valores específicos más consistentes en la fórmula 16. Para este propósito los valores  $\sigma_{so}$  y  $\sigma_{sl}$  se obtienen de las correspondientes curvas similares a las fig. 15 y 16.

# DIAGRAMA DE FLUJO PARA CALCULAR LA CARGA DE ROLADO



# DIAGRAMA DE FLUJO PARA CALCULAR LA CARGA DE ROLADO



CAPITULO II-d

MOLINOS CON VELOCIDAD CONSTANTE

Cálculo de la potencia requerida.

La potencia de un motor para un molino no reversible está determinada de la siguiente fórmula

$$N_w = \frac{N_r + N_f}{\eta_d} \quad (18)$$

donde:

$N_r$  - potencia requerida para el proceso de rolado (potencia efectiva requerida para deformar el metal con los rodillos).

$N_f$  - Potencia de fricción, o sea pérdida de potencia en los baleros de los rodillos.

$\eta_d$  - eficiencia del sistema (árbol, caja de cambio de velocidad, piñones, acoplamientos, etc). Estos valores se relacionan con las pérdidas por fricción en todos los baleros existentes.

La potencia requerida para el laminado ( $N_r$ ) se encuentra en función del par requerido para rolar  $M_r$ , por la siguiente fórmula:

$$N_r = \frac{M_r \cdot n_r}{0.716} \quad p \text{ (métrico)} \quad (19)$$

donde:

$M_r$  - par requerido para mover los rodillos (sin tener en --

cuenta pérdidas en las chumaceras), ton/m;

$n_r$  - rpm de los rodillos para una velocidad de rolado. El torque o par se determina de diferente forma para diferentes casos de rolado como veremos a continuación.

1.- Para un proceso de rolado simple, cuando ambos rodillos tienen el mismo diámetro y la misma velocidad (Fig. 17)  $M_1 = M_2$ :

$$M_r = M_1 + M_2 = 2 Pa \quad (20)$$

donde:

P - carga total en los rodillos

a - el brazo de palanca de la resultante total de carga aplicada al arco de contacto ( $a = a_1 = a_2$ ).

En base a datos experimentales la distancia del punto de aplicación de la resultante de carga deberá determinarse de las siguientes expresiones:

a) Para el rolado en caliente

$$\alpha = (0.45 \text{ a } 0.5) L$$

$$\beta = (0.45 \text{ a } 0.5) \alpha$$

b) Para trabajo en frío

$$\alpha = (0.35 \text{ a } 0.45) L$$

$$\beta = (0.35 \text{ a } 0.45) \alpha$$



donde:

$\alpha$  = ángulo de contacto entre rodillos y barra

$\theta$  = ángulo al punto de aplicación de la resultante de carga

$L$  = longitud de la zona de deformación.

2.- Cuando el rolado se lleva a cabo en un molino que cuenta con rodillos con movimiento propio o sin él, (Fig. 18), el par del rodillo superior es igual a cero ( $M_1 = 0$ ) y el par completo transmitido por el rodillo inferior queda

$$M_r = M_2 = Pa_2 \quad (21)$$

El brazo de palanca de la carga total resultante aplicada al rodillo inferior debe ser igual a:

$$a_2 = (0.35 \text{ a } 0.45)L \quad (22)$$

3.- Si el proceso se lleva a cabo en rodillos de diámetros diferentes, el par de rolado es diferente para cada rodillo puesto - que el brazo de palanca que resulta al aplicar la carga, será menor que para el rodillo de diámetro mayor (Fig. 19).

$$M_1 = Pa_1; \quad M_2 = Pa_2$$

Prácticamente los diámetros de los rodillos difieren ligeramente (5 ó 6% es la diferencia máxima), de lo que asumimos que

$a_1 \approx a_2$ ; entonces:

DIAGRAMA DE FUERZAS PARA ROLADO  
CON EL RODILLO SUPERIOR OCIOSO

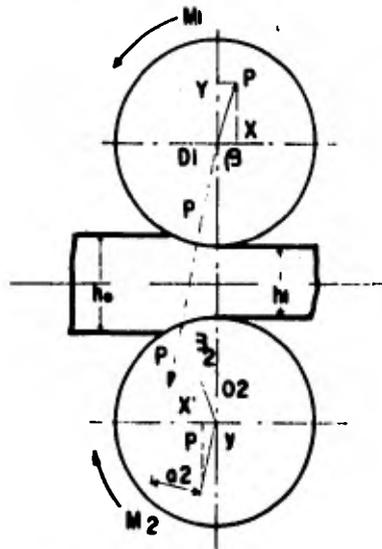
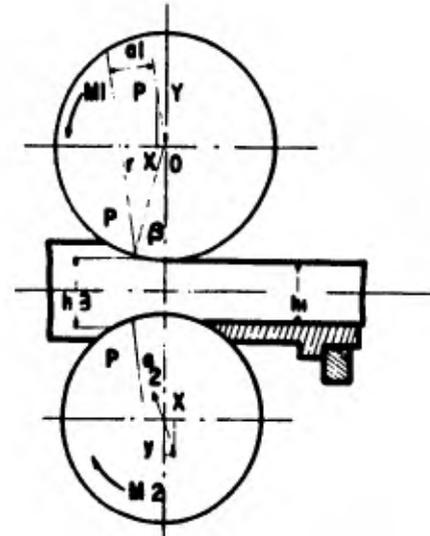


DIAGRAMA DE FUERZAS PARA ROLADO  
 $D1 \neq D2$



**U N A M**

**FAC. DE INGENIERIA**

**FIGURAS Nos.**

**18 Y 19**

**PROCESO  
DE  
LAMINADO**

$$M_r = M_1 + M_2 = 2 Pa \quad (23)$$

Es el mismo caso que para rolado simple.

4.- En el caso de rolado en frío de lámina enrollada (rollo), la tensión frontal y la posterior se aplican al producto por medio de enrolladores. Este proceso reduce la carga de laminación y ayuda a un proceso más perfecto. Cuando el enrollado se efectúa en molinos continuos la tensión la produce por medio de los rodillos de los molinos anterior y posterior, por medio de un ajuste de las velocidades de los rodillos.

En el rolado con tensión, la resultante de la carga se inclinará más sobre el eje vertical (Fig. 20).

Si la tensión posterior  $T_0$  es mayor que la anterior  $T_1$ , la carga resultante se inclinará hacia la posterior  $T_0$ . Si, por otro lado,  $T_1 > T_0$ , la carga resultante se inclinará a la tensión anterior o frontal. En el caso primero, el brazo de palanca se incrementará y en el segundo decrecerá. La fórmula general del par de laminado será, para ambos rodillos:

$$M_r = \left( Y \sin \beta + \frac{T_0 - T_1}{2} \cos \beta \right) D \quad (24)$$

donde:

$Y$  - componente vertical de la resultante de la carga

$\beta$  - ángulo al punto de aplicación de la carga resultante y que es igual a  $\beta = (0.3 \text{ a } 0.4) \alpha$

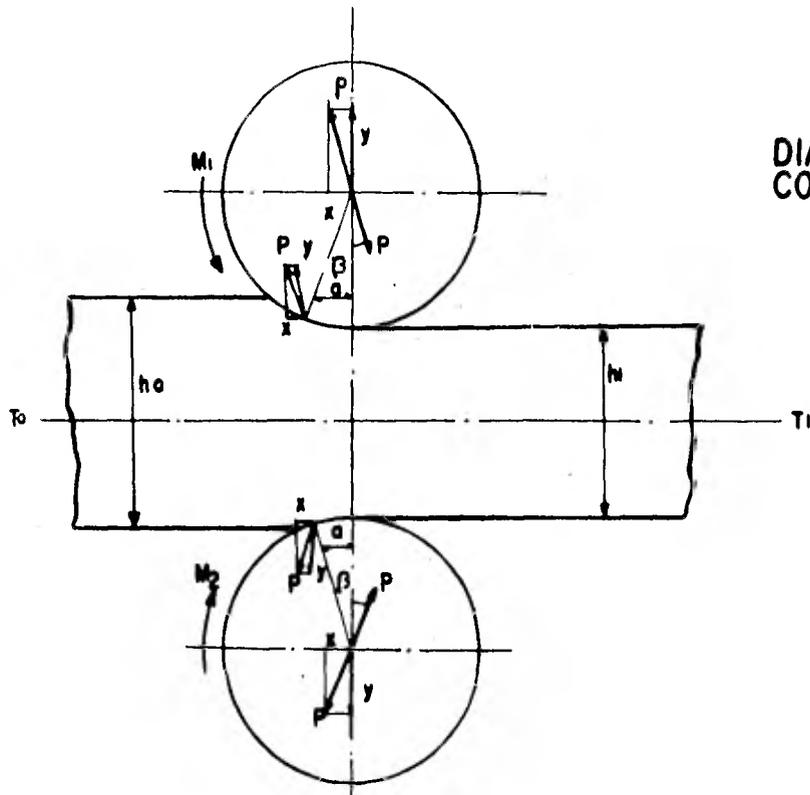


DIAGRAMA DE FUERZAS PARA ROLADO  
CON TENSION EN LA BARRA ( $T_o > T_i$ )

U N A M

FAC. DE INGENIERIA

FIGURA No.

20

PROCESO  
DE  
LAMINADO

Como resultante de la carga está solamente un poco inclinada en relación con la vertical cuando se aplica la carga; podemos suponer que para propósitos prácticos  $Y \approx P$  para el cálculo del par. Además, el ángulo de contacto normalmente es menor - para el caso de rolado en frío ( $\alpha_{\max} \approx 5^\circ$  a  $8^\circ$ ) y entonces podemos suponer  $\cos(\beta) \approx 1$ . Entonces la fórmula (24) se convierte a

$$M_r = (P \sin(\beta) + \frac{T_0 - T_1}{2}) D \quad (25)$$

Se deberá tener en cuenta que las fuerzas de fricción - que aparecen en los baleros de los rodillos, se oponen a la rotación de éstos. Estas fuerzas producirán pares friccionantes que deberán anularse aplicando pares adicionales a los rodillos.

Obviamente, los coeficientes por fricción en los baleros dependen del tipo de baleros (bolas, rodillos, etc.), así como de las condiciones de operación, lubricación, velocidad del rodillo, presiones de carga, etc. Los siguientes coeficientes de fricción se basan en investigaciones hechas en este campo:

- a)  $f = 0.003$  a  $0.005$  - para baleros de bolas
- b)  $f = 0.005$  a  $0.01$  - para baleros de textolita y en general para baleros de materiales plásticos.
- c)  $f = 0.07$  a  $0.01$  - para baleros de bronce para molinos de trabajo en caliente
- d)  $f = 0.04$  a  $0.08$  - para baleros de bronce para trabajo en frío
- e)  $f = 0.003$  a  $0.005$  - para baleros de rodillos que operen bajo presión de algún fluido.

f)  $f = 0.006$  a  $0.01$  - para baleros de rodillos que operen con delgadas capas fluidicas.

El par debido a la fricción para los dos rodillos de un laminador dúo, será igual a

$$M_f = 2f Pr = Pfd \quad (26)$$

donde:

$r$  y  $d$  - son radio y diámetro en las chumaceras del rodillo - en las que ocurre la fricción.

En molinos de 4 rodillos, el trabajo de los baleros no está sujeto a la carga de laminación, ya que ésta se transmite al rodillo que no está trabajando o sea, el que sirve de apoyo. Estas fuerzas, aparecen solamente en la parte de afuera de los baleros y el par de fricción se puede determinar por la fórmula (26). Para referir este par a los ejes del rodillo motriz, deberá multiplicarse por la relación de los diámetros de trabajo y de apoyo.

Entonces el par debido a la fricción en los baleros de los dos rodillos de apoyo en relación a los ejes de rotación de los rodillos de trabajo será igual a

$$M_f = Pfd \left( \frac{D_w}{D_{b-u}} \right) \quad (27)$$

donde:

d - diámetro sobre el que existe la fricción en los baleros de los rodillos de apoyo;

D<sub>w</sub> y D<sub>b-u</sub> - diámetro de trabajo y rodillos de apoyo.

Cuando el par friccionante en los baleros puede conocerse, no hay problema para determinar la potencia de fricción (o pérdidas de potencia debidas a la fricción) de la siguiente fórmula

$$N_f = \frac{M_f \eta_r}{0.716} \quad \text{hp (métricos)} \quad (28)$$

La velocidad del rodillo se determina de la velocidad conocida del proceso V<sub>r</sub> (de acuerdo al programa de laminación):

$$N_r = \frac{60 v_r}{\pi D} \quad (29)$$

La eficiencia del tren laminador depende del diseño de los árboles o ejes de transmisión ( $\eta_1$ ), caja de engranes ( $\eta_2$ ) y engranes reductores ( $\eta_3$ ).

La eficiencia de los árboles depende del tipo y de las condiciones de operación (ángulo de inclinación). Como promedio, podemos suponer que la eficiencia del eje de transmisión tiene una  $\eta = 0.97$  ó  $0.98$  considerando ángulos de inclinación  $\alpha \leq 3^\circ$ , mientras para  $\alpha > 3^\circ$   $\eta_1 = 0.95$  a  $0.97$ .

La eficiencia de la caja de piñones con dentado helicoidal doble en los piñones y baleros de material acero babitt, con un sistema de lubricación continua, se puede tomar de

$\eta_2 = 0.93$  a  $0.95$ . Si los piñones se mueven con baleros antifricción, la eficiencia  $\eta_2 = 0.94$  a  $0.96$ .

La eficiencia de los engranes de reducción (de un paso) es ligeramente mayor que en el caso de los piñones, pero como las pérdidas por fricción en el eje principal y en el acoplamiento -- del motor no se toman en cuenta, supondremos que la eficiencia de los convertidores es igual a la de los piñones, o sea

$\eta_3 = 0.93$  a  $0.96$ . Entonces, la eficiencia total será:

$$\eta_d = \eta_1 \times \eta_2 \times \eta_3$$

Molinos de velocidad variable.

En el diseño de molinos en los que la velocidad de rolado varía (molinos reversibles, para placas y lupias) y molinos en los que existe volante de inercia en el eje motriz, es necesario incluir un par dinámico para calcular el par motor. Este par dinámico se requiere para vencer fuerzas de inercia cuando las velocidades de las componentes rotacionales de la transmisión varían.

El par motor, en este caso, varía durante el paso

$$M_m = M_s \pm M_d \quad (30)$$

donde:

$M_d$  - el par dinámico en el motor y que es necesario para acelerar (+) o desacelerar (-) las componentes estacionales de la transmisión principal del tren de engranes durante las paradas;

$M_s$  - el par motor necesario para vencer la carga estática (constante en el proceso de rolado) y que se determina así:

$$M_s = 0.716 \frac{Nv + Nf}{\eta_d n_m} \quad (31)$$

$n_m$  - velocidad del motor correspondiente a la velocidad constante de rolado y que es igual a:

$$n_m = n_r i$$

donde:

$i$  - relación de engranaje de los engranes de cambio en el laminador.

El par dinámico requerido para acelerar (o frenar) un cuerpo en rotación, es igual al producto del momento de inercia del cuerpo  $I$  y la aceleración angular  $\left( \frac{1}{\text{seg}^2} \right)$ .

$$M_d = I \frac{dw}{dt} = I \epsilon_o$$

la aceleración angular deberá expresarse en rpm

$$\epsilon_o = \frac{dw}{dt} = \frac{\pi dn}{30 dt} = \frac{\pi}{30} \epsilon_o \quad (32)$$

donde E - aceleración angular (o desaceleración), expresada en rpm/seg. Si sustituimos el momento de inercia por su valor expresado por el momento del volante de inercia (ver fórmula 36) obtenemos una fórmula para determinar el par dinámico.

$$M_d = \frac{GD_d^2}{375} \epsilon \quad (33)$$

donde: D - diámetro de giro, m;

$GD_d^2$  - momento volante de las componentes en rotación de la transmisión, referida al eje motor, ton/m<sup>2</sup>;

$\epsilon = \frac{dn}{dt}$  - aceleración angular (o desaceleración) del motor en el rolado;

De acuerdo con el tipo de molino y las características del motor podrá variar de 40 a 80 rpm/seg.

El momento volante es igual a la suma de todos los momentos volantes de las componentes giratorias en la transmisión (ver Fig. 6).

$$GD_d^2 = GD_a^2 + GD_{mc}^2 + GD_{dr-g}^2 + \frac{GD_{dv-g}^2}{i^2} + \frac{GD_{mn-c}^2}{i^2} + 2 \frac{GD_p^2}{i^2} + 2 \frac{GD_{sp}^2}{i^2} + \frac{GD_r^2}{i^2} + GD_{fw}^2$$

donde:

- $GD_a^2$  - momento volante de la armadura de motor (se indica en el -  
catálogo del motor);
- $GD_{mc}^2$  momento volante del acoplamiento del motor (se indica en -  
el catálogo o se calcula);
- $GD_{fw}^2$  momento volante de los volantes de inercia montados en el-  
árbol reductor;
- $GD_{dr-g}^2$  momento volante de los engranes de transmisión;
- $GD_{dv-g}^2$  momento volante de los engranes de transmisión motrices;
- $GD_{mn-c}^2$  momento volante del cople principal que se encuentra entre  
los engranes reductores y la caja de piñones;
- $GD_p^2$  momento volante del piñón;
- $GD_{sp}^2$  momento volante del árbol entre el piñón y los castillos -  
laminadores;
- $GD_r^2$  momento volante de los rodillos;
- $i$  relación de engranaje del motor a los rodillos ( $i \geq 1$ )

En algunos molinos no reversibles, las ruedas volantes-  
son montadas en árboles de alta velocidad. Cuando en estos equipos  
se rolan tramos más cortos, el tiempo de pasada requerido es menor  
al normal.

Durante estos intervalos el motor acelera y la rueda al-  
macena energía cinética que se determina por la siguiente fórmula

$$E = I \frac{w^2}{2} \text{ kg-m} \quad (34)$$

ó

$$E I = I \frac{w^2}{2 \times 75} \text{ hp-sec} \quad (35)$$

donde I - es el momento de inercia de la rueda en referencia a su eje de rotación;

$w = \frac{\pi n}{30}$  es velocidad angular de la rueda; n la velocidad de la rueda.

Durante el intervalo relativamente corto en que la pieza pasa entre los rodillos, cuando la velocidad decrece (debido al esfuerzo en el motor por la carga alta), el volante de inercia cede la energía cinética que almacenó, proporcionando entonces -- energía extra a la transmisión que sirve para aligerar las cargas pico que ocurren al entrar el lingote o la pieza a los rodillos. Las dimensiones del volante se eligen al mismo tiempo que se calcula la potencia del motor.

En el cálculo de las dimensiones del volante de inercia, no es el momento de inercia I el que se determina, sino el momento volante  $GD^2$  que es el producto del peso del volante y el cuadrado de su diámetro de giro.

Existe una relación definida entre el momento de inercia y el momento volante:

$$GD^2 = gM (2R)^2 = 4 gI \quad \text{kg/m}^2 \quad (36)$$

donde g - aceleración de la gravedad ( $g = 9.81 \text{ m/seg}^2$ ).

Combinando las fórmulas (35) y (36) obtendremos la siguiente fórmula para determinar el momento volante  $GD^2$  del volante, de acuerdo con la energía cinética que se requiere almacenar:

$$GD^2 = 540 \frac{E l}{n^2} \quad \text{ton-m}^2 \quad (37)$$

Es evidente que en esta fórmula, el momento volante es inversamente proporcional al cuadrado de la velocidad de giro. Entonces, al decrecer el tamaño del volante, para una cantidad de energía almacenada, resulta más conveniente montar el volante en el eje de transmisión directa (no al que se transmite la energía), pues así se puede contar con velocidades mayores.

Para determinar las dimensiones de un volante ( $GD^2$ ) de la fórmula (37), la cantidad que el volante deberá ceder, en base a datos prácticos, deberá ser

$$E l = (15 \text{ a } 20) N_{\text{promedio}} \text{ hp -seg} \quad (38)$$

donde:  $N$  - promedio es la potencia nominal del motor.

En este caso  $GD^2$  es el momento volante de todas las componentes del molino de rotación, incluyendo el volante. Como durante el intervalo en que el molino está ocioso, la aceleración será positiva y después negativa cuando el molino se retarda; - las fórmulas anteriores indican que en el intervalo ocioso entre las pasadas, el volante incrementa la carga de la transmi -

sión. Por otro lado, durante la pasada, cuando el motor se retar da bajo carga, el volante reducirá el par motor al momento de ce- der la energía acumulada.

En la mayoría de los casos, los molinos con volantes se mueven por medio de motores de inducción que cumplen los requeri- mientos anteriores, pues tienen caídas de velocidad que varían en- tre 5 y 10%.

Antes de determinar la carga nominal (anotada en catálo- gos) de los motores que se requieren para molinos reversibles o - para molinos con volante en su transmisión, es necesario graficar diagramas de cargas para cada pasada, por ejemplo, para determi- nar el par motor para cada pasada de acuerdo a la fórmula (30). Después de ésto, la potencia del motor puede ser entonces calcula- da y comprobada por dos métodos: 1) par de sobrecarga permisible y 2) sobre calentamiento.

1) Comprobación del par de sobrecarga permisible: el par motor no minal deberá satisfacer la condición

$$M_{nom} \geq \frac{M_{max}}{K} \quad (39)$$

donde:  $M_{max}$  - par máximo requerido para rolar el material según - fórmula (30)

K - coeficiente de sobrecarga en el par permisible; pa- ra motores reversibles  $K = 2.5$  a  $3$ .

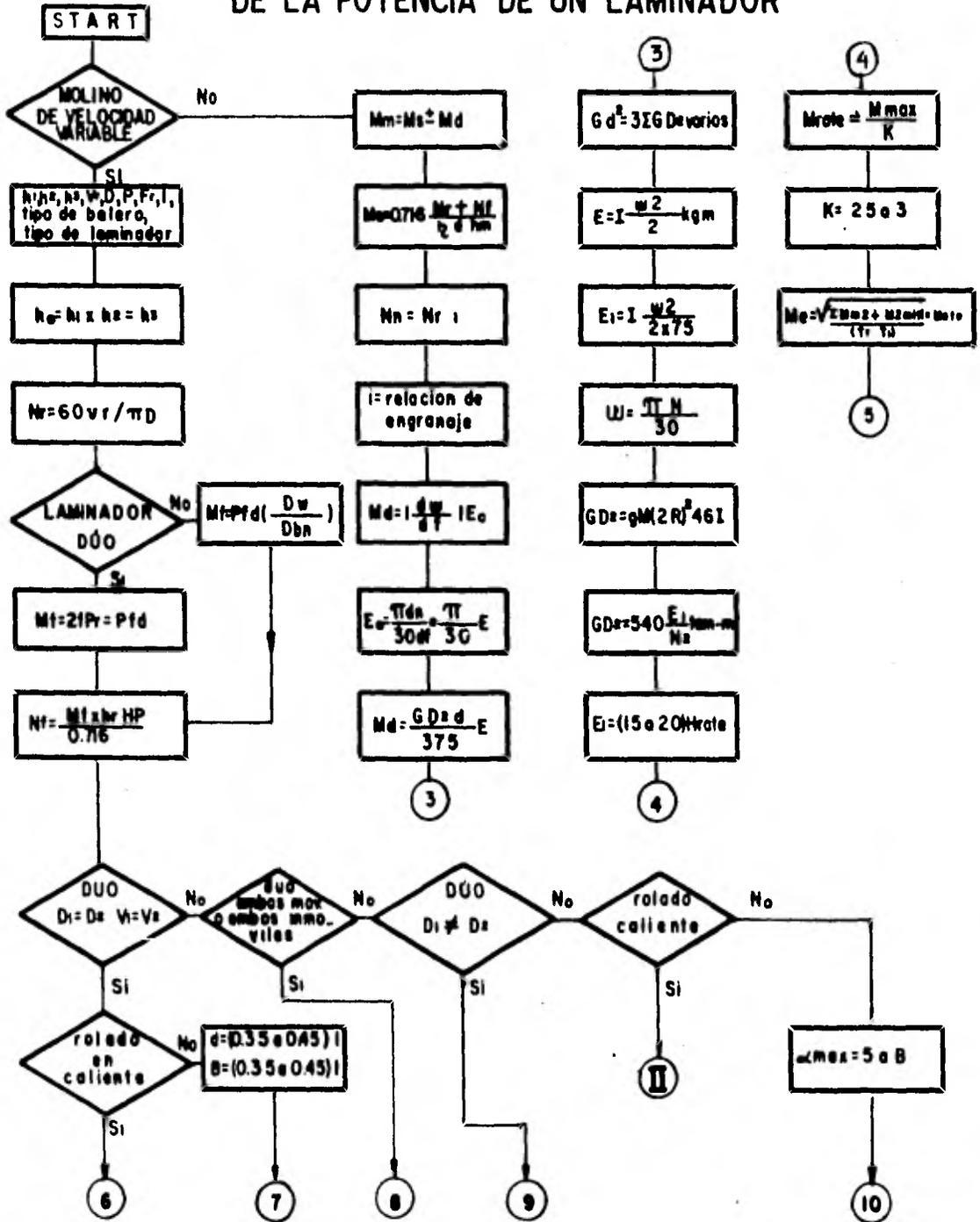
2) Comprobación por recalentamiento.- Para evitar recalentamiento el par nominal del motor no deberá ser menor que el par equivalente:

$$M_e = \sqrt{\frac{\sum (M_{mr}^2 t_r + M_{mi}^2 t_i)}{t_r + t_i}} \leq M_{\text{nominal}} \quad (40)$$

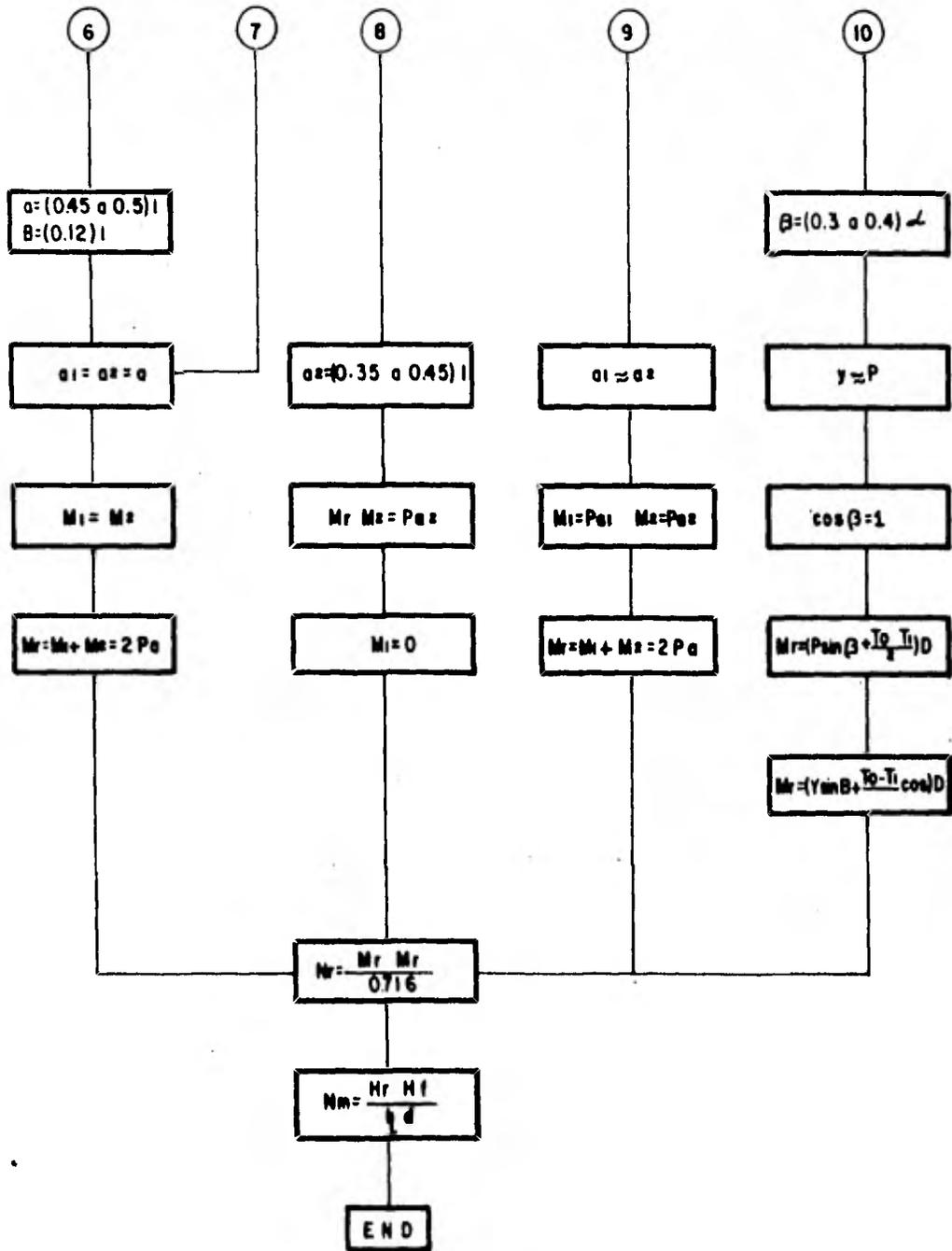
donde:  $M_{mr}$  y  $t_r$  - par motor y tiempo de pasada

$M_{mi}$  y  $t_i$  - par motor y tiempo de intervalo ocioso entre pasada y pasada.

## DIAGRAMA DE FLUJO PARA EL CALCULO DE LA POTENCIA DE UN LAMINADOR



## DIAGRAMA DE FLUJO PARA EL CALCULO DE LA POTENCIA DE UN LAMINADOR



MAGNITUD DE ALARGAMIENTO PARA DIFERENTES REDUCCIONES EN FUNCION DEL NUMERO DE PASADAS (SEG. TRINKS).

NUMERO DE PASADAS	REDUCCION RELATIVA POR PASADA							
	5%	10%	15%	20%	25%	30%	35%	40%
1	1,053	1,111	1,177	1,250	1,333	1,429	1,538	1,667
2	1,108	1,235	1,384	1,563	1,777	2,091	2,367	2,779
3	1,167	1,372	1,628	1,953	2,369	2,916	3,642	4,563
4	1,228	1,584	1,915	2,441	3,160	4,165	5,410	7,172
5	1,293	1,699	2,254	3,052	4,215	5,95	8,625	12,587
6	1,361	1,882	2,65	3,815	5,620	8,60	13,27	21,4
7	1,432	2,090	3,12	4,77	7,17	12,15	20,40	35,1
8	1,508	2,323	3,67	6,96	9,38	17,35	31,0	53,6
9	1,587	2,581	4,32	8,48	13,22	24,8	48,3	83,2
10	1,670	2,868	5,08	9,21	13,75	35,9	75,2	166,0
11	1,758	3,188	5,98	11,64	22,65	50,5	114,0	276,0
12	1,851	3,540	7,03	14,55	31,5	72,2	176,0	460,0
13	1,948	3,93	8,27	18,20	42,0	103,0	271,0	765,0
14	2,051	4,37	9,72	22,75	56,4	147,0	403,0	1,280
15	2,159	4,86	11,43	28,40	74,8	211,0	619,0	2,120
16	2,273	5,40	13,47	35,50	98,6	301,0	885,0	3,620
17	2,392	6,00	15,82	44,40	133,0	439,0	1,515	6,900
18	2,518	6,66	18,62	55,60	177,0	615,0	2,320	3,800
19	2,651	7,40	21,9	69,20	236,0	889,0	3,580	
20	2,791	8,23	25,8	86,70	315,0	1,260	3,600	
21	2,938	9,14	30,4	108,0	420,0	1,790	8,500	
22	3,092	10,15	35,7	135,5	560,0	2,560		
23	3,253	11,29	42,0	169,0	745,0	3,650		
24	3,427	12,53	49,4	214,0	990,0	5,210		
25	3,607	13,89	58,1	269,0	1,325	7,420		

Es aconsejable que en las primeras pasadas del material se tengan grandes alargamientos, ya que la temperatura es elevada, al igual que tiene una elevada ductibilidad y pequeños alargamientos en los últimos pasos, debido a que decrece la temperatura y ductibilidad.

Por otra parte, la magnitud del ensanchamiento tiene gran importancia en el trazado de los pasos de los rodillos, la cual depende de los siguientes factores:

- 1.-  $h_0 - h_1 = \Delta h$
- 2.-  $r =$  radio de los rodillos
- 3.- temperatura de la pieza y de los rodillos
- 4.- composición de la pieza y de los rodillos
- 5.- condición superficial de la pieza y de los rodillos
- 6.- velocidad de laminación
- 7.- coeficiente de fricción.

En la laminación en caliente de aceros, se tienen las fórmulas de Tafel y Sedlaczek, así como la de Siebel, las cuales son muy útiles en la determinación del ensanchamiento.

Fórmula de Tafel y Sedlaczek:

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

Fórmula de Siebel:

$$b = c \sqrt{r \times \Delta h} \times \frac{\Delta h}{h_0}$$

donde c = constante

A continuación presentamos un ejemplo:

Supongamos que se desea obtener una barra de 60 x 60 mm. partiendo de un lingote de sección transversal media por lado de 200 mm.

Puesto que el grado total de alargamiento es igual a -

$$\frac{Q_0}{Q_n} = \frac{200 \times 200}{60 \times 60} = 11.5$$

de la tabla de Trinks se deduce que con una reducción del 20% se obtiene un alargamiento de 9.31 en 10 pasadas y de 11.64 en 11 pasadas, por lo que se necesitarían 10 pasadas y la reducción media de sección será algo mayor del 20%.

Ahora bien, sabiendo que el número total de pasos será de 10, se seguirá la secuencia tabla, canto, cuadrado, para el cálculo de éstos.

Ahora procederemos a calcular la  $h_1$  del primer paso -- por la fórmula:

$$\frac{h_0 - h_1}{h_0} \times 100 = 20\%$$

sustituyendo tenemos:

$$\left(1 - \frac{h_1}{h_0}\right) 100 = 20$$

$$-\frac{h_1}{h_0} = \frac{20}{100} - 1; \quad h_1 = \left(1 - \frac{20}{100}\right) h_0$$

$$h_1 = (1 - 0.20) 200 = 200 - 40$$

$$\underline{\underline{h_1 = 160 \text{ mm.}}}$$

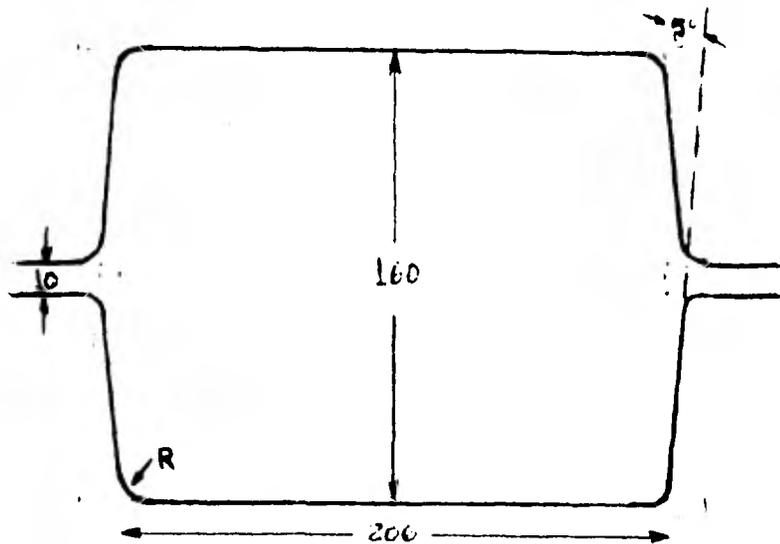
Para obtener el ancho  $b_1$  de la tabla y considerando -- por experiencia que el material aumenta en el ancho de 1.5 a 6% dependiendo de la temperatura del mismo y el porcentaje de reducción en altura, consideremos en este caso un aumento en anchura del 3%.

$$\frac{b_1 - b_0}{b_0} \times 100 = 3\%$$

$$b_1 = (0.03 + 1) b_0 = 1.03 (200)$$

$$b_1 = 206 \text{ mm.}$$

Para evitar que el material desgaste las paredes de los anillos en los rodillos, se le dá al paso, lo que se llama salida del material, ésto es, en lugar de que la pared lateral del paso sea perpendicular a la línea de paso o línea de laminación, tenga un ángulo de inclinación que puede variar entre 5 y 12°. Presentamos en la siguiente figura el paso número 1 a escala con sus detalles y considerando que el juego entre rodillos varía de 1 a 2% del diámetro de los mismos y los cuales miden 500 mm de diámetro.



Para el diseño del paso anterior, se siguen las siguientes reglas:

1.- Se traza una línea central (línea de laminación) y se forma un rectángulo con el ancho  $b_1$  y la altura  $h_1$ .

2.- Se traza la luz o juego de los rodillos, la cual - se supone del 1 al 2% del diámetro de los mismos.

3.- Se fija la salida del paso ampliando el ancho "b" hacia ambos lados según el ángulo escogido.

4.- Se trazan las medias cañas, por medio de arcos circulares con radio R.

5.- Se trazan los redondeos en las aberturas del paso por medio de arcos circulares con radio r.

La magnitud de los radios R y r van en proporción a la magnitud del paso.

Existe una manera práctica para poder comprobar si los pasos calculados están correctos, la cual consiste en hacer el trazo en papel (albanene), con el fin de determinar el área y -- así poder sacar el porcentaje de reducción de un paso a otro.

Como el área del lingote es conocida (de la sección -- transversal media) o sea igual a  $200 \times 200 = 40\ 000\ \text{mm}^2$ . y la -- del primer paso es igual a  $160 \times 206 = 32\ 960\ \text{mm}^2$ , o sea que el porcentaje de deducción será igual a:

$$\frac{Q_0 - Q_1}{Q_0} \times 100 = \frac{40000 - 32960}{40000} \times 100 = 17.6\%$$

El segundo paso será una tabla que tendrá el mismo ancho que el del paso 1, pero diferente altura. Puesto que  $b_2 = b_1 = 206 \text{ mm}$ , considerando una reducción de altura del 23%, tenemos:

$$\frac{h_1 - h_2}{h_1} \times 100 = 23\%$$

$$\frac{h_1 - h_2}{h_1} = 0.23$$

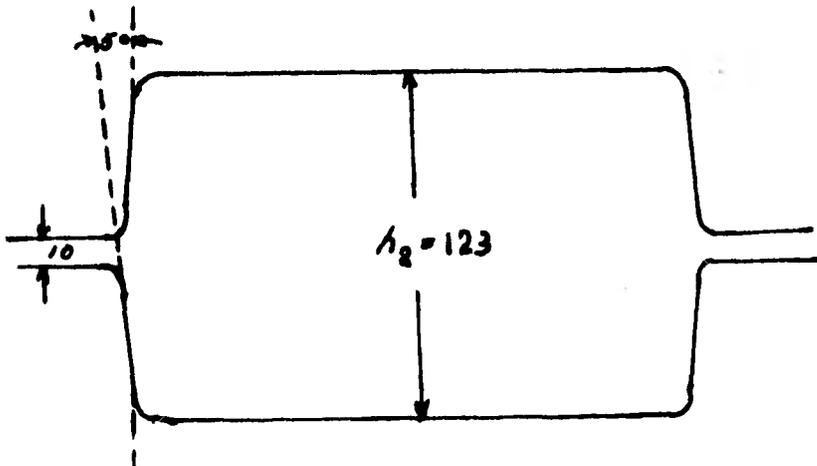
$$1 - \frac{h_2}{h_1} = 0.23; \frac{h_2}{h_1} = (1 + [-0.23])$$

$$h_2 = h_1 (1 - 0.23)$$

$$h_2 = 160 (0.77)$$

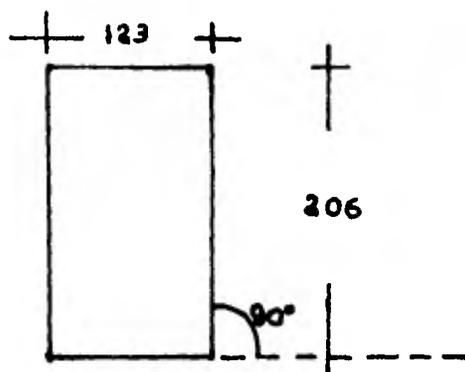
$$\underline{\underline{h_2 = 123 \text{ mm.}}}$$

La cual dibujada a escala, tenemos:



Los pasos 3 y 4 serán de canto, con el fin de que el material sea girado 90°, una vez que haya pasado por 1 y 2, con lo que se logrará que desaparezcan las zonas porosas y la conicidad del lingote.

Puesto que el material será girado 90°, en el paso 3 se debe considerar que el ancho pasa a ser la altura, como se ilustra en la siguiente figura:



Si consideramos una reducción del 22%, tenemos:

$$\frac{206 - h_3}{206} \times 100 = 22\%$$

$$1 - \frac{h_3}{206} = 0.22$$

$$\frac{h_3}{206} = 1 - 0.22$$

$$h_3 = (1 - 0.22) 206 = 0.78 (206)$$

$$h_3 = 161$$

Ahora para calcular  $b_3$  supondremos un incremento en el ancho del 2%.

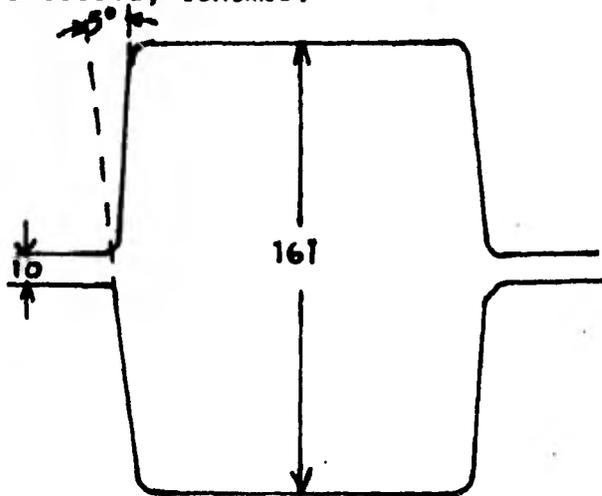
$$\frac{b_3 - 123}{123} = 0.02$$

$$\frac{b_3}{123} = 0.02 + 1$$

$$b_3 = 1.02 \times 123 = 125.46 \text{ mm.}$$

$$\underline{\underline{b_3 = 125.46 \text{ mm.}}}$$

El cual dibujado a escala, tenemos:



Si siguiendo con el paso 4 considerando una disminución de altura del 22% y considerando el mismo ancho, tenemos:

$$b_4 = 125.46$$

$$\frac{h_3 - h_4}{h_3} = 0.22$$

$$\frac{h_4}{h_3} = 1 - 0.22$$



Con los datos anteriores se procede a efectuar la cali  
bración de los rodillos, que consiste en el trazado de los pla -  
nos, los cuales tendrán la disposición correcta de cada uno de -  
los pasos, para que en el taller de tornos se proceda a su maqui  
nado.

SECCION III.-

Hornos.

## CAPITULO III-a

### HORNOS DE CALENTAMIENTO.

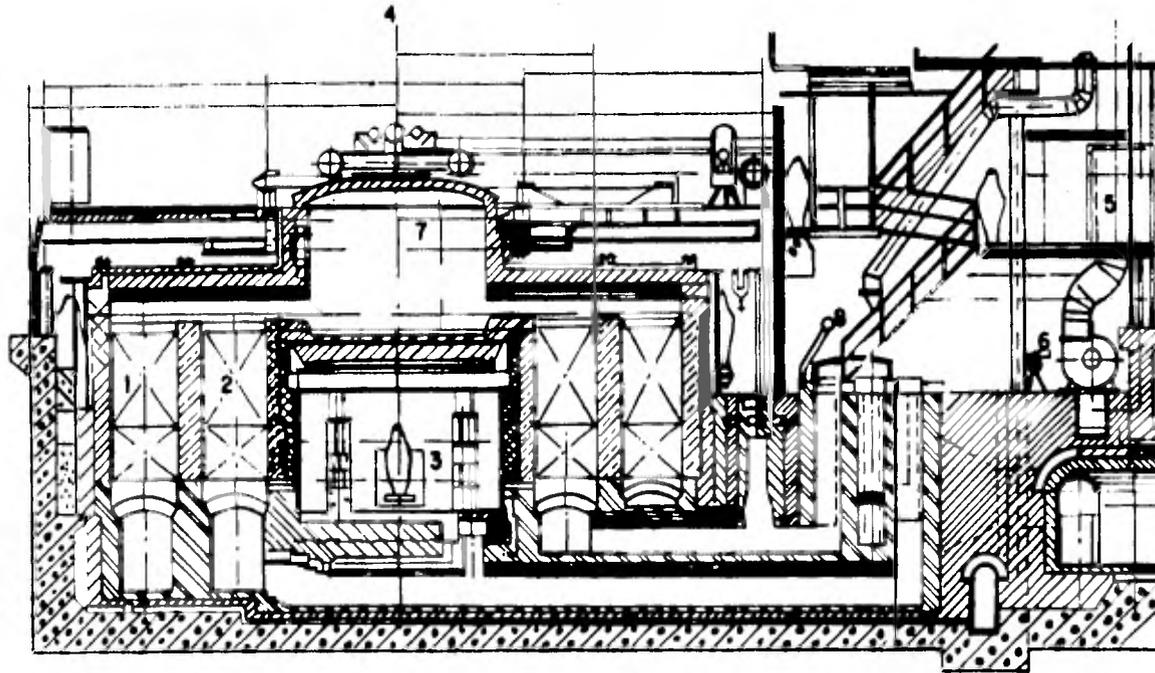
Los lingotes generalmente se calientan en fosas de recalentamiento antes de rolarse a planchones o lupias.

Actualmente se usan dos tipos de hornos: fosas de recalentamiento regenerativo y recuperativo.

La Fig. 23 muestra la sección transversal de una cámara de una fosa regenerativa múltiple. Por regla, cada grupo de estas fosas consiste de cuatro cámaras que acomodan de 6 a 8 lingotes cada una. Estas cámaras de la fosa son hornos individuales de calentamiento con regeneradores para precalentar el gas y el aire. Estas fosas utilizan gas especial para alto horno, o una mezcla de éste último y gas para horno de coquización. Las cenizas se retiran por medio de los agujeros que dan a la caja de cenizas.

Las fosas de calentamiento de este tipo se han mecanizado bastante y tienen un gran rendimiento. Sin embargo, una de sus principales desventajas es que la posición en que se encuentran los lingotes no es la más adecuada para el flujo de calor y ésto implica un calentamiento no uniforme. Por esta razón, la capacidad de estos hornos no pasa de 8 o 10 lingotes de 6 ú 8 tone-

# HORNO REGENERATIVO



- 1- REGENERADOR DE AIRE
- 2- REGENERADOR DE GAS
- 3- RECOGEDOR ELECTRICO DE ESCOVA
- 4- CUATO DE INSTRUMENTOS

- 5- CUARTO PARA ARRANCAORES
- 6- VALVULA DE FLUJO
- 7- LOCALIZACION DE TERMOPARES
- 8- VALVULAS REVERSIBLES DE AIRE Y GAS

**U N A M**

**FAC. DE INGENIERIA**

**FIGURA N.**

**23**

**PROCESO**

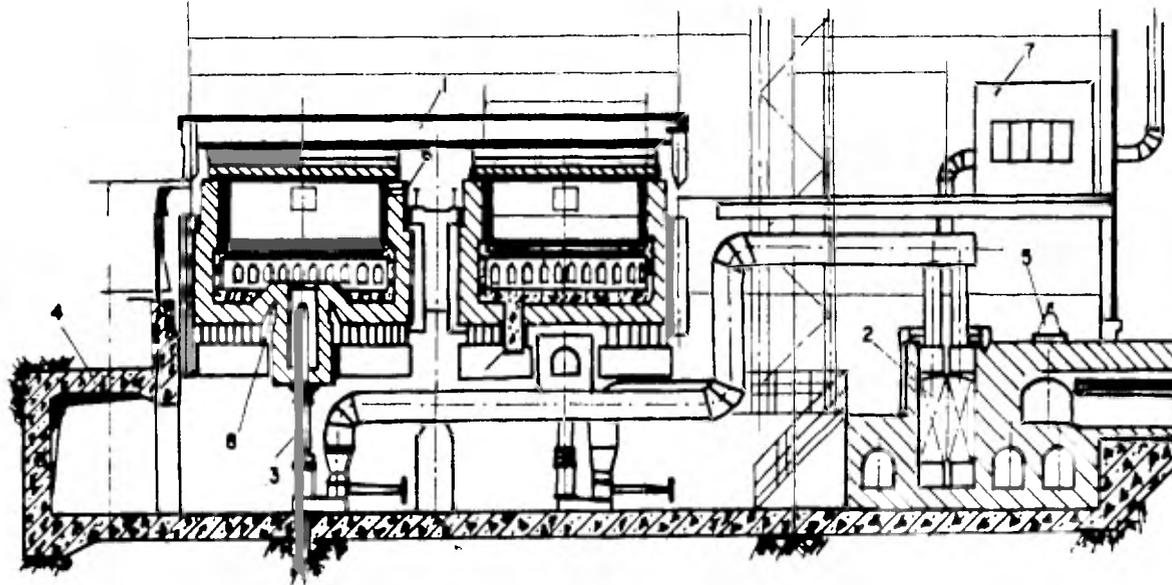
**DE  
LAMINADO**

ladas por cada fosa. Un aumento en su capacidad implica un correspondiente aumento en la longitud de la cámara, lo que ocasiona un calentamiento menos uniforme en los lingotes. Aparte existe la posibilidad de fundir las superficies de los lingotes en los extremos o de quemarlos en algunos casos. Este problema se encuentra más frecuentemente cuando se utiliza combustible líquido. Otra desventaja es que se requiere de bastante equipo pesado para su operación.

Hoy día, cuando se construye una planta metalúrgica, se les dá preferencia a las fosas recuperativas (Fig. 23a) que tienen ventajas tales como un calentamiento uniforme y servicio fácil. En estos hornos la flama del quemador (localizada en el centro -- del fondo del foso) sube a la parte superior y crea un flujo tanto en esta parte como en las paredes. Los gases de la combustión pasan a través de los canales en la parte más baja de las paredes laterales y a través de recuperadores de cerámica localizados a ambos lados de cada cámara. El conjunto de fosas cuentan con dos cámaras que contienen de 10 a 20 lingotes cada una.

Estas fosas recuperativas se construyen teniendo en cuenta un precalentado de aire o de gas combustible. El aire es precalentado con el recuperador de cerámica, mientras el gas, en un recuperador de tubos de acero soldados y que se encuentran atrás del recuperador de cerámica. La temperatura de precalentamiento del aire alcanza de 800 a 850°C, mientras que la del gas -

## HORNO RECUPERATIVO



1- GUÍA  
2- RECUPERACION DE GAS  
3- QUEMADOR  
4- DUCTO DE ESCORIAS

5- VALVULA DE FLUJO  
6- LOCALIZACION DE TERMOCOPLES  
7- CUARTO DE INSTRUMENTOS  
8- ENFRIADO DE AIRE PARA PROTEGER LOS  
RECUPERADORES Y GENERADORES DE ESCORIAS  
9- DUCTO ESCORIAS

**U N A M**

**FAC. DE INGENIERIA**

**FIGURA N.**

**23A**

**PROCESO  
DE  
LAMINADO**

alcanza de 300 a 350°C. A estas temperaturas de precalentamiento el horno puede operar con gas de alto horno puro, sin necesidad de gases mezclados.

En comparación con la fosa de tipo regenerativo, las recuperativas son más simples en diseño y ocupan menos espacio. Pueden calentar lingotes más uniformemente y el caso de que llegaran a fundirse o quemarse es muy raro. Funcionan también eficientemente no solo con gas, sino que con combustible líquido. Estos procesos de calentamiento se pueden automatizar, lo que facilita muchísimo el proceso.

Por regla, las fosas de recalentamiento se localizan en una construcción especial próxima a la sección de laminado de lupias y planchones.

En la Fig. 24 se puede apreciar un arreglo en línea de una fosa de recalentado y un molino dúo reversible.

Este diseño de la fosa es típico para altas producciones, pues asegura un transporte continuo desde el alto horno por medio de vagones en vías dentro de la sección de laminado.

El transportar lingotes aún calientes a los hornos, es cosa común en las laminadoras modernas, pues ahorra considerablemente combustible y aumenta la producción del horno.

**S E C C I O N I V . -**

**Control de Calidad**

## CAPITULO IV-a

### DEFECTOS EN PRODUCTOS SEMIACABADOS Y COMO PREVERLOS.

Los defectos más usuales en las lupias, planchones y billetes son los siguientes:

Lupias con secciones inclinadas o en forma de diamante (Fig. 25 a) cuyos motivos son por ejemplo, el desalineamiento en las ranuras de los rodillos, o un calentamiento irregular en el lingote o el rolado en un paso más ancho que la lupia a laminar, o cuando la relación entre los lados de la sección es mayor de 1.5 (especialmente para secciones pequeñas).

La aparición de aletas es debida a ranuras desalineadas generalmente (Fig. 25 b).

Cuando se obtienen aletas en lados opuestos (Fig. 25 c) son resultado de no seguirse el programa de estirado, o puede deberse a una inclinación deficiente en los lados de las ranuras, cuando se hacen varias pasadas en el mismo paso del rodillo.

Las lupias torcidas (Fig. 25 d) se debe a que los rodillos no están alineados en forma paralela y también a fallas en el calentamiento previo.



(a)



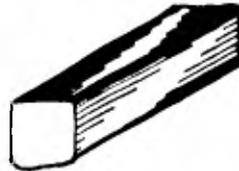
(b)



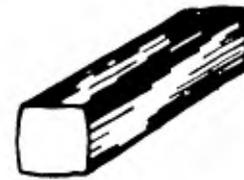
(c)



(d)



(e)



(f)

DEFECTOS EN LOS PERFILES DE LUPIAS

U N A M

FAC. DE INGENIERIA

FIGURA No.  
25

PROCESO  
DE  
LAMINADO

Este defecto se evita teniendo un giro perfecto en los rodillos y un alineamiento preciso en las ranuras, tanto inferiores como superiores, también dando una entrada adecuada de la barra al paso, además, se requiere un acoplamiento perfecto de los rodillos uno con otro y un calentamiento uniforme. Además la barra no debe rolarse en rodillos excesivamente gastados y la velocidad de rolado habrá de reducirse, especialmente cuando el frente de la barra entra en contacto con los rodillos.

Dos últimos defectos en los perfiles de las lupias son el pandeo y aristas no paralelas (Fig. 25 f y 25 c). La razón de que existan caras no paralelas, es debida a espacios en los extremos de los rodillos.

Algunos ejemplos de defectos en los perfiles de billets originados en molinos contínuos para billets, se muestran en la Fig.26.

El defecto de aleta (bigote) fig. 26 a, es un vértice, se debe a que las guías de entrada no se encuentran simétricas al eje vertical de paso.

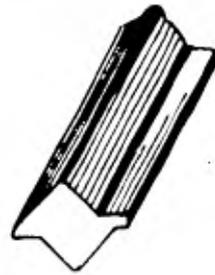
El caso de dos aletas (Fig. 26 b) es debido a la entrada de excesiva cantidad de metal.



(a)



(b)



(c)



(d)



(e)



(f)

DEFECTOS EN LOS PERFILES DE BILLETS

U N A M

FAC. DE INGENIERIA

FIGURA No  
26

PROCESO  
DE  
LAMINADO

El caso mostrado en la (Fig. 26 c) es debido a un desalineamiento en las ranuras de paso y también a una mala posición de entrada de la barra en proceso.

Los defectos en las esquinas de los billets se deben a una cantidad menor de metal entrando entre los rodillos.

El caso de una sección rectangular en lugar de una cuadrada (Fig 26 e) sucede cuando existe desalineamiento entre las ranuras de los rodillos.

Los lados en forma convexa se deben a paredes muy gastadas en los pasos. Se corrige con un paso cuadrado nuevo.

Otro tipo de defecto en los productos de laminación son los defectos en la superficie. Estos defectos incluyen varios tipos, tales como grietas, grietas capilares, fisuras y discontinuidades.

Se conoce que los defectos en el metal se deben a defectos en los lingotes como grietas, fisuras, burbujas de aire, costuras, incrustaciones de materia extraña, defecto de cristalizado y otros. Sin embargo, hay la posibilidad de que las causas se produzcan en el proceso mismo de laminación. El formado de grietas, fisuras y otros defectos, depende del estado de la pasada, de la secuencia de paso empleada, temperatura y velocidad de rodado, etc.

La Fig. 27 muestra grietas en los lados y esquinas de las lupias.

A diferencia de las grietas comunes que son discontinuidades largas en el metal, las grietas capilares son grietas muy finas alargadas longitudinalmente a lo largo de la línea de rolado y pueden ser muy numerosas. Estas grietas capilares pueden tener su origen en burbujas de aire interior muy próximas a la superficie y que el calentamiento y rolado hacen salir estos defectos a la superficie del metal. Otras causas pueden ser inclusiones de metal extraño.

Las fisuras son discontinuidades y gotas de varias formas. Las fisuras en las lupias se transforman en huecos o discontinuidades largas de la superficie al fondo del metal. Se sabe que estos defectos son debidos a un enfriado muy rápido y no uniforme, causando grietas transversales que se propagan a cada rolado.

Otros defectos en lupias, planchones o billets son:

1.- Astillas, que tienen la apariencia de grietas longitudinales muy finas y esto se debe al rolado de alguna aleta.

2.- Costras, que son costuras o vetas debidas a salpicaduras duras durante el vaciado de los lingotes, o por burbujas subcutáneas o por un desoxidamiento pobre del metal. Las costras pequeñas se queman generalmente, pero las grandes tienen que ser removidas.

3.- La escoria, arena y otras inclusiones no metálicas, son pruebas para suponer que el acero fué mal elaborado o vaciado. Sin embargo, las causas de estas inclusiones no metálicas se deben a la contaminación del metal, no solo en el departamento de alto horno, sino también en el de laminación, al efectuarse el calentamiento del lingote. En estos casos, la escoria líquida o semilíquida del fondo del horno de calentamiento puede pegarse a la superficie del lingote.

4.- Rayones y escoria en la superficie del billet, puede deberse a guías que en estos casos deben cambiarse; también se deben a irregularidades en la superficie de los rodillos.

Algunos defectos en lupias, planchones y billets son debidos al corte de éstos. Por ejemplo, cuando la pieza a cortarse se coloca en mala posición con relación a las cuchillas, o por doblez de la barra debido a un mal equipo de corte (espaciado entre las hojas, falta de filo, etc.), esquinas irregulares al final de la barra por las mismas razones anteriores y la formación de irregularidades en el extremo de la barra por las razones también expuestas.

Las grietas externas en billets se forman durante el enfriado pero, muy frecuentemente, se forman después del enfriado (algunas horas después o incluso días). Por eso se les llama --grietas "frías" y tienen un aumento notable en su dureza.

A veces estas grietas son poco profundas y parecen grietas capilares. Por regla, se alargan intermitentemente en dirección del laminado. Estas grietas penetran hasta el centro del billet.

Las causas que originan estas grietas son esfuerzos internos residuales que aparecen en el proceso de rolado o en el enfriado posterior del rolado. Entre mayor velocidad haya en el enfriado después de rolar, más esfuerzos aparecen y mayor es la probabilidad de que aparezcan grietas.

No todos los metales están expuestos a estos defectos; por ejemplo, lupias, planchones y billetes de bajo carbón, pueden enfriarse a cualquier velocidad sin peligro de defecto de deterioro o calidad del metal.

La velocidad de enfriado se controla por regla, después del rolado. Algunas aleaciones de metales son más afectas al agrietamiento de enfriado que otras. Se usan algunos métodos preventivos para evitar estas fallas, dependiendo del material a rolar.

Esta tendencia a agrietarse es mayor en los aceros de alta velocidad, aceros aleados para herramientas, aceros al alto-cromo, al níquel-cromo, al cromo-níquel-tungsteno y otros aceros.

Las escamas son grietas internas que se ven en micro y macrosecciones en la fractura. Los aceros cromo-niquel molibdeno, cromo, manganeso y otros, son los más susceptibles a estas fallas.

El enfriado retardado y tratamiento en caliente del producto semiacabado, son los medios usados para prevenir la formación de grietas por enfriamiento.

El enfriado retardado se efectúa con aisladores de calor u hornos. Los materiales aislantes pueden ser diatomita, barro para alto horno, algodón, mineral, arena y otros.

Recientemente, el enfriado en hornos de calentamiento ha ido aplicándose más y más.

Una medida para prevenir escamas en el rolado es un calentamiento previo y apropiado de los lingotes.

Los problemas acerca de la formación de grietas por enfriamiento, así como escamas, se tratan en detalle en textos referentes a metalurgia física y tratamiento en caliente.

**S E C C I O N V.-**

**Automatización**

## CAPITULO V-a

### AUTOMATIZACION

Automatización de molinos para el rolado de productos semiacabados.

La automatización de operaciones mecánicas es una de -- las principales tendencias para desarrollar completamente cual -- quier rama industrial.

La automatización modifica la producción mejorándola, -- dando un incremento sustancial a la labor productiva; a la vez, -- la calidad de acabado se mejora en forma notable y las condicio -- nes de trabajo se mejoran.

El paso más importante que se dá en la automatización, -- es la automatización completa en un 100%, de todas las operacio -- nes de producción, tales como operaciones de proceso (como laminado) y operaciones de manufactura y auxiliares, por ejemplo, mane -- jo de material, volteo o giro de las barras, corte a determinadas longitudes, deshacerse de chatarra y cortes de material, estira -- do, reparto y manejo en bodegas, etc., son operaciones mecánicas -- que se pueden automatizar. En este caso, el proceso de automati -- zación permite el uso mínimo de personal calificado.

La automatización completa requiere una mejora fundamental en el proceso de manufacturas y, en algunos casos, requiere --

del desarrollo y aplicación de operaciones técnicas nuevas. La automatización completa puede lograrse más fácilmente en casos en que el proceso sea continuo, por ejemplo, en el rolado de billets, tiras de acero o alambre.

En varios tipos de molinos, sin embargo, el laminado es de naturaleza periódica o intermitente. Por ejemplo, la rotación de reversa de los rodillos se emplea en molinos para lupias o planchones y el metal se reduce en ambos pasos por los rodillos, siendo periódicamente volteado y pasado de un paso a otro. Un proceso de naturaleza similar se utiliza en el rolado de secciones pesadas y ligeras. Las operaciones repetitivas (giro de la barra, traslado de un paso a otro, etc.), así como otras que involucran control de calidad del producto rolado y acondicionamiento de la superficie, son muy difíciles de automatizar, debido a que algunos de estos procesos ni siquiera se han mecanizado completamente. En la actualidad para automatizar molinos en un 100% se requieren desembolsos considerables, por lo que muchas veces, el proceso se prefiere semiautomático. Cuando el proceso de producción haya sido mejorado o cambiado, se podrá hablar de una automatización completa 100%.

Las siguientes operaciones y mecanismos en molinos para lupias y planchones, se encuentran actualmente automatizadas:

- 1.- Abasto de lingotes desde los hornos hasta la mesa receptora del laminador.
- 2.- La mesa misma de recepción
- 3.- La mesa receptora del principio y del final del proceso
- 4.- La trasmisión de los rodillos
- 5.- Ajuste de accesorios de rodillos
- 6.- Los empujadores para enviar las lupias y los planchones a la cama de enfriado.

#### Automatización de los hornos de calentamiento.

El propósito de la automatización de los hornos, es lograr un calentamiento lo más uniforme posible de los lingotes hasta la temperatura especificada en el proceso, junto con una eficiencia alta en los hornos. Dicha automatización se lleva a cabo controlando los siguientes pasos:

- a) Temperaturas en hornos, recuperadores y regeneradores;
- b) Relación gas-aire;
- c) Presión del gas en las fosas;
- d) Interrupción automática del flujo del gas al abrirse las cubiertas de los fosos;
- e) Posición de las válvulas reversibles.

La temperatura en el horno se controla por medio de termopares (pirómetros de radiación) y potenciómetros electrónicos. La relación gas-aire se controla por medio de aparatos para con -

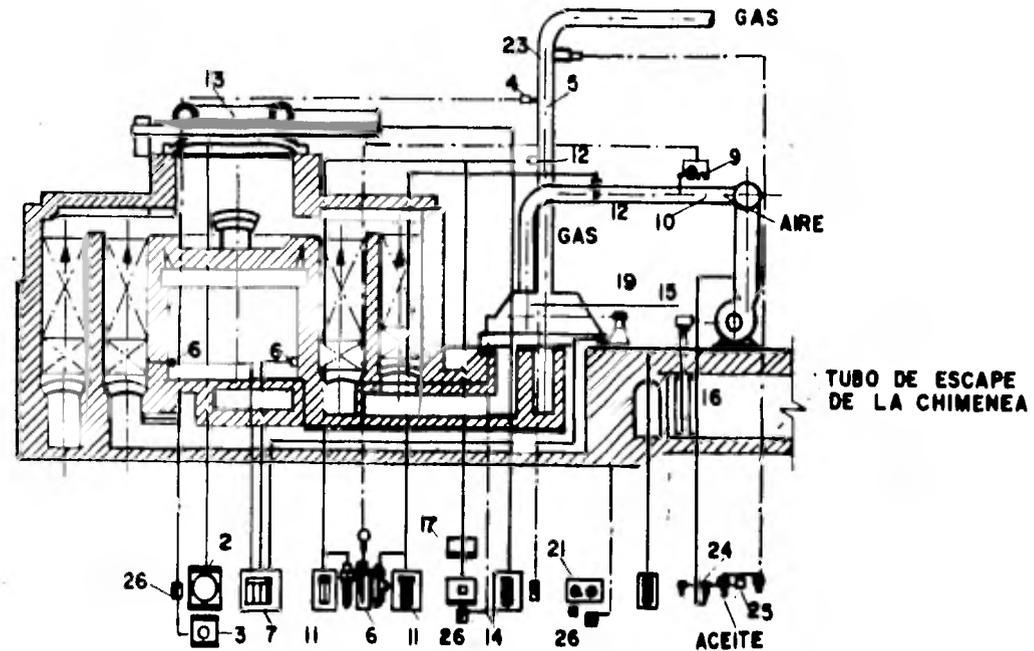
trol de flujos operados hidráulicamente. La presión en el horno, se controla con dispositivos hidráulicos o eléctricos.

El diagrama de un sistema automático de control para un horno regenerativo, se muestra en la Fig. 31. En este sistema el control de la temperatura se complementa por medio de los siguientes instrumentos: termopar de platino y platino-sodio (1) dentro de un empaque de carborundo, que va montado en el centro de la cubierta del horno; potenciómetro piloto electrónico (2) con un transductor resistivo y controlador (3); unidad de potencia (4) - accionada por un motor y usada para controlar la posición de la válvula de gas (5), indicación de temperaturas en los regeneradores, acompañada por un termocople (6) y un potenciómetro (7).

La combustión apropiada del gas en el horno se obtiene regulando la relación gas-aire. Esto se hace por medio de un control hidráulico (8) con un mecanismo (9) que controla la válvula de estrangulamiento (10) en la línea de gas; el consumo de gas y aire se registra con medidores de gasto (11) conectados a orificios (12).

En algunos casos, para hornos que se calientan con escoria líquida, cada par de fosas se unen por una abertura, de tal forma, que la escoria fluye por un solo ducto. Esto también permite al gas fluir de un foso al otro libremente, puesto que la presión será la misma en ambos fosos. La elevación de la presión

# DIAGRAMA ILUSTRATIVO DE CONTROL AUTOMATICO DE FOSAS REGENERATIVAS



<b>U N A M</b>	
<b>FAC. DE INGENIERIA</b>	
<b>FIGURA N.º</b>	<b>PROCESO</b>
<b>31</b>	<b>DE</b>
	<b>LAMINADO</b>

del gas en el foso se efectúa a través del tubo (13) bajo la cubeta de la fosa. Este tubo sostiene un aparato de control de presión (14). Este último controla al accionador (15) de la válvula (16) en la tubería. Este arreglo opera bien solo si ambas fosas se cargan al mismo tiempo. Si cada fosa funciona individualmente será necesaria una corrección adicional en las posiciones de las válvulas del foso de acuerdo al consumo del gas (orificio 12). El paso se complementa con la válvula de presión (17) y el reostato (18) para controlar el regulador (19) de las válvulas de gas.

Las válvulas de aire y gas (20) se cierran por un regulador controlado por un relé de retardo (21). Este último es el que distribuye el gas para uno u otro foso. La presión del gas requerido se mide con la válvula (22).

Al abrirse la cubierta del foso o girar las válvulas, se interrumpe el flujo de gas con la válvula (23) y el flujo de aire por la válvula (24), ambas accionadas automáticamente o por controles (25). Estaciones similares (26) están provistas de controles de temperatura, mezcla aire-gas y presión.

El tablero de control se monta separadamente en la parte superior de la plataforma de los fosos. El cuarto de control se construye en columnas independientes para proteger a los instrumentos contra la vibración (producida por el traslado de las grúas viajeras).

El sistema de control para un horno recuperativo, con quemador de gas, está mostrado en la Fig. 32.

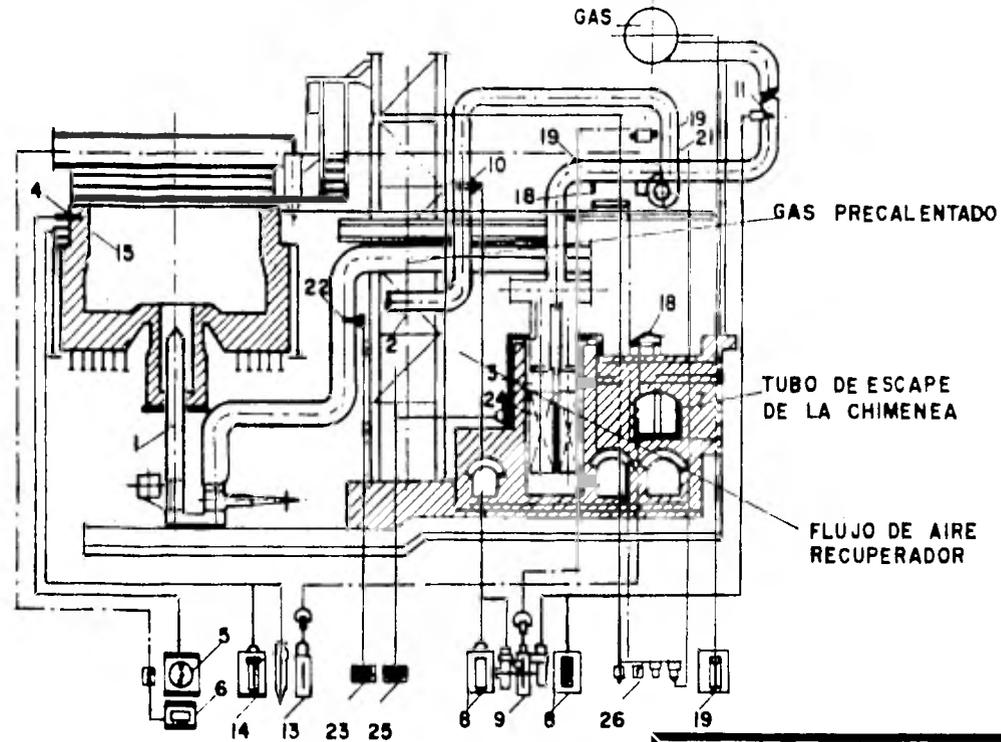
La cámara de los hornos recuperativos generalmente tiene un quemador de gas (1) en el centro de la fosa. El aire es precalentado en un recuperador de cerámica (2) y el gas en un recuperador metálico (3). La válvula del gas se controla por medio de una unidad de control de temperatura, consistente en termopares (4), montados a un lado de la pared del horno; potenciómetros electrónicos (5) y controles (6) que actúan en la válvula (7).

El aire se abastece de acuerdo al consumo de gas. La relación aire-gas se controla con medidores de flujo (8) y controles hidráulicos (9). Estos últimos reciben señales de la presión de los orificios (10) y (11) en las líneas de aire y gas. El control acciona la válvula de aire (12).

La presión de los gases se mantiene constante en el horno por medio del control (13) que depende del indicador de presión (14). Este último se encuentra en la pared (15) del horno y activa el mecanismo (16) para activar la válvula (17) que controla el flujo de gas.

Quando se abre la tapa del horno, se interrumpe inmediatamente el flujo del gas por medio de una señal que dá el mecanismo elevador. Esta señal se envía a un activador (18) de la válvula

# DIAGRAMA ILUSTRATIVO DE CONTROL AUTOMATICO DE FOSA DE RECUPERACION



**U N A M**

**FAC. DE INGENIERIA**

**FIGURA N.º**

**32**

**PROCESO**

**DE**

**LAMINADO**

la (19). El indicador de la señal registra caídas de presión del aire y está conectado al ventilador (21). La temperatura del gas precalentado se mide con un termopar. (22) con un milivolmetro(23) mientras que para el recuperador de gas se usa un termopar (24) - con milivolmetro (25). El cambio de control automático a control manual se efectúa con el interruptor de botón (26).

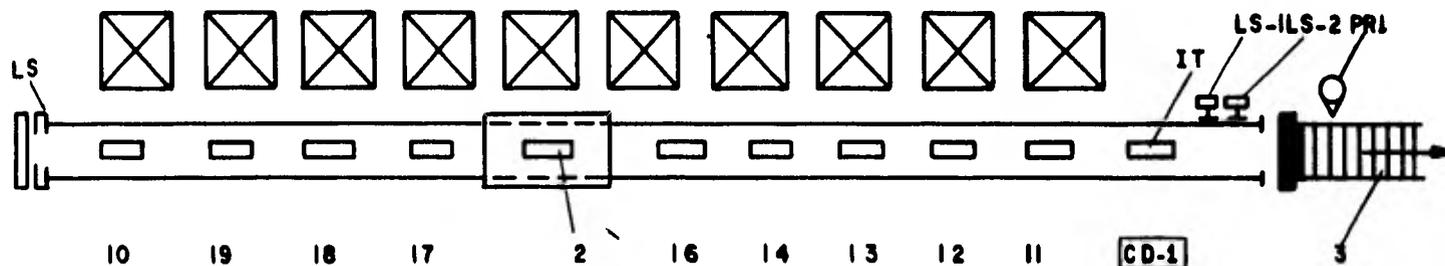
#### Automatización del traslado de los lingotes.

El vagón de lingotes debe detenerse exactamente en la fosa de la cual la grúa de fosa sacará el lingote caliente. Al colocarse el lingote en el vagón, se arranca su motor. Estas dos operaciones se efectúan por medio de un operador desde su estación de control. Todas las otras operaciones del vagón (aceleración, frenado y descarga en la tabla receptora) se llevan a cabo automáticamente.

El principio de funcionamiento del vagón es parecido al de los elevadores automáticos. Los botones de control de la mesa de control CD-1 (Fig. 33) pueden ser 10 o 12, dependiendo del número de grupos de fosas y tienen funciones diferentes, tales como arranque del motor del vagón y su traslado de la mesa de recepción al grupo requerido de fosas (1).

Existe un botón de control para arrancar el motor del vagón (2) y trasladarse con el lingote a la mesa receptora (3).

DIAGRAMA QUE PRESENTA LOS CONTROLES SEMIAUTOMATICOS  
DEL EMPUJADOR DE LINGOTES



<b>U N A M</b>	
<b>FAC. DE INGENIERIA</b>	
<b>FIGURA No.</b>	<b>PROCESO DE LAMINADO</b>
<b>33</b>	

La orden que indica de qué fosa va a salir el próximo lingote, es dada por un obrero por medio de un radioteléfono. Entonces, el operador presionará el botón "al foso" y arrancará el motor. El vagón acelerará y después empezará a frenar al irse acercando a la fosa requerida. El frenado se efectúa con switches de tipo inductivo I1, I2, ..., I10). Durante el traslado del vagón, un resorte de acero pasa sobre los switches de inducción (con una pequeña abertura) y completa el circuito magnético. Se cierra entonces el relé de los switches magnéticos y el motor comienza a frenarse hasta llegar al foso deseado. Cuando la grúa de los fosos mete el lingote al vagón, presiona el botón "a la mesa receptora". Entonces el vagón acelera a máxima velocidad y antes de llegar a la mesa se empieza a frenar, a unos 15 o 10 metros de la mesa, debido al switch de inducción IT. El motor finalmente pasa por la acción de las palancas LS-1 y LS-2, las que accionan el motor para descargar el lingote en los primeros rodillos de la mesa receptora. Entonces el relé PRI enciende el motor de la mesa receptora para transportar el lingote al molino. Para asegurar el funcionamiento correcto de switches, se requiere una base de concreto para los rieles del vagón. Esto es necesario para asegurar una distancia constante entre la armadura y los inductores electromagnéticos de los switches de inducción localizados en la línea de movimiento del vagón.

Automatización de las mesas y mesas giratorias.

Después de descargar el lingote del vagón (1), una señal del relé fotoeléctrico PR1 pone en marcha la mesa de transporte (2) y el lingote pasa a la mesa de giro (3) Fig. 34. Entonces el relé PR2 detiene el motor de la mesa de transporte y el relé fotoeléctrico PR3 arranca el motor de la mesa giratoria, la cual es apagada por medio de un switch de palanca después de girar -- 180° L.S. Al mismo tiempo los rodillos de la mesa de giro.

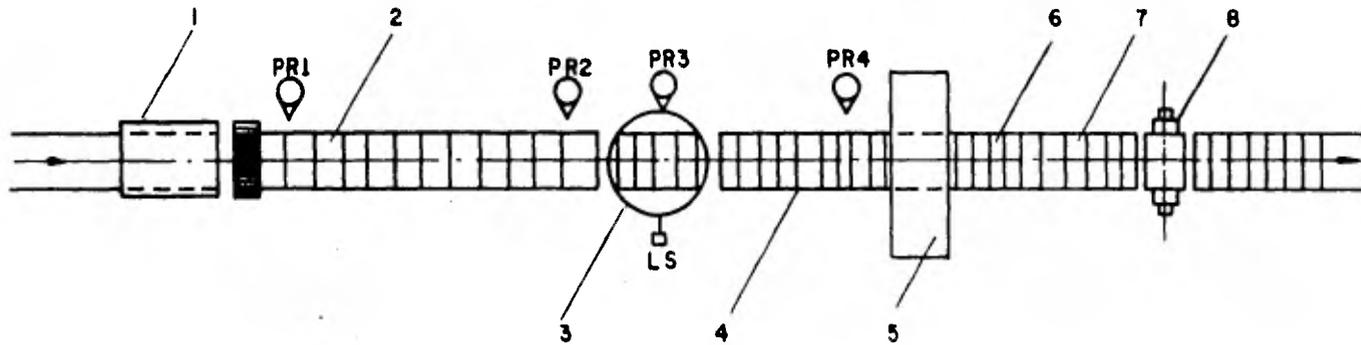
El lingote sale de la mesa de giro y pasa a la mesa de recepción al molino que tiene ya sus rodillos en acción; pasa a la mesa (4) gracias al pulso del relé PR4. Entonces el lingote pasa al molino (8) que está controlado por un operador desde la caseta (5) por medio del sistema MP2.

Automatización de los controles de la transmisión principal.

Se efectúa por medio de:

- 1) Automatización del giro de reversa de los rodillos laminadores;
- 2) Aumento automático de la velocidad del motor al morder al lingote los rodillos;
- 3) Reducción automática de la velocidad del motor al no aceptar el molino al lingote;
- 4) Reducción automática de la velocidad de salida del lingote, si es que tiene que regresar al mismo molino de donde salió;
- 5) Switcheo automático del motor a la máxima carga admisible.

# DIAGRAMA PARA EL CONTROL DE LA MESA GIRATORIA



**U N A M**

**FAC. DE INGENIERIA**

**FIGURA No.**

**34**

**PROCESO**

**DE**

**LAMINADO**

De acuerdo con el peso y forma del lingote a rolar y también de acuerdo con el programa, los controles de transmisión principal puede cambiarlos el operador desde su caseta con un simple giro de los botones programados.

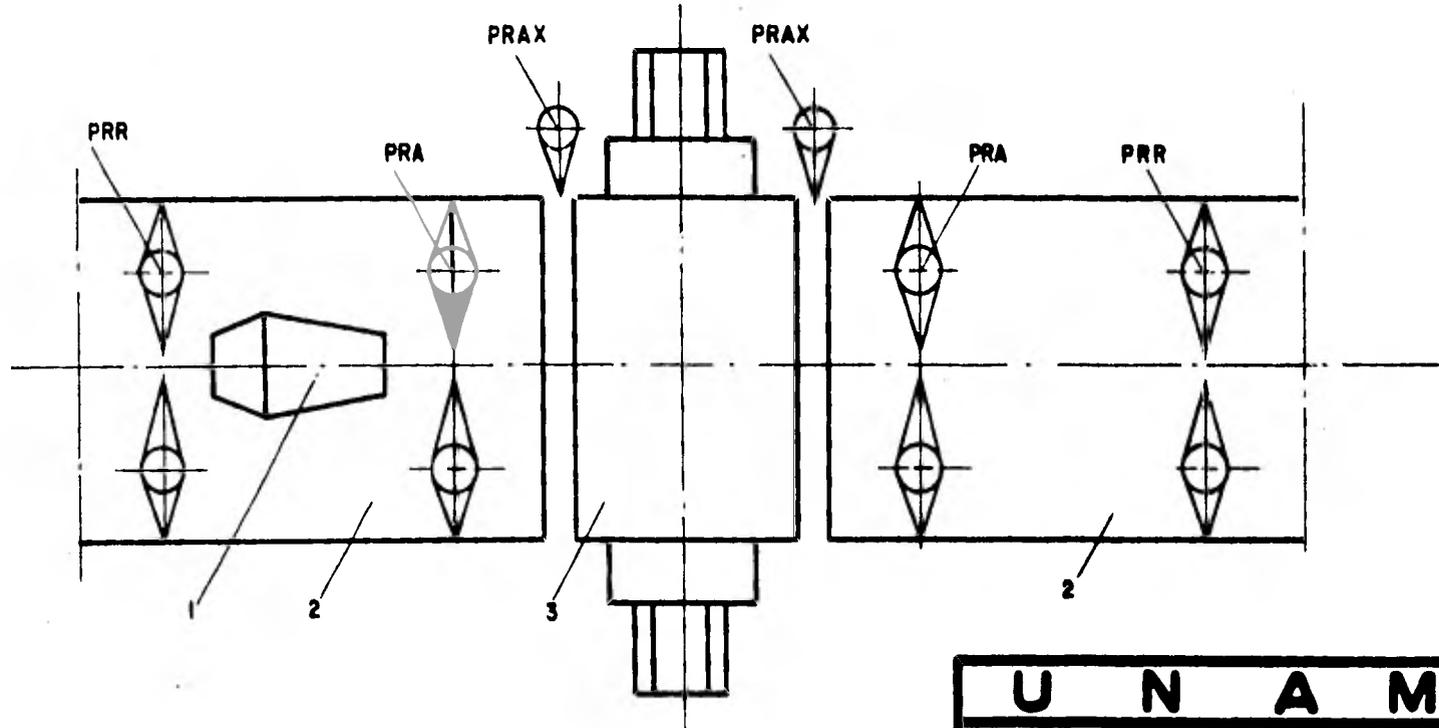
Los siguientes relés se conectan próximos al tren laminador (Fig. 35), relés adyacentes (PRA) y remoto (PRR) a cada lado del tren y relés axiales (PRAX) al final de la transmisión.

Los relés adyacentes (PRA) se encuentran a 0.7 m de los ejes de los rodillos y se hacen girar al pasar el metal junto a ellos; los relés remotos se excitan por lingotes a 2.5 m de los ejes de los rodillos. Los relés axiales se encuentran a los lados del tren y son paralelos a los rodillos. Se accionan por el metal a una distancia de 0.3 ó 0.4 m de los ejes de los rodillos. Aparte de estos relés, el molino se equipa también con relés eléctricos que indican la presencia de metal en los rodillos, relés para el voltaje del generador principal, contador y otros; estos relés no se muestran en la fig.36.

Los controles automáticos de la transmisión principal se accionan por medio de un operador en la caseta del molino.

Antes de que el lingote (1) se acerque a los rodillos (3) por medio de la mesa (2), la velocidad del motor se regula --

# DIAGRAMA PARA LA AUTOMATIZACION DE UN MOLINO DE LUPIAS



<b>U N A M</b>	
<b>FAC. DE INGENIERIA</b>	
<b>FIGURA No.</b>	<b>PROCESO DE LAMINADO</b>
<b>35</b>	

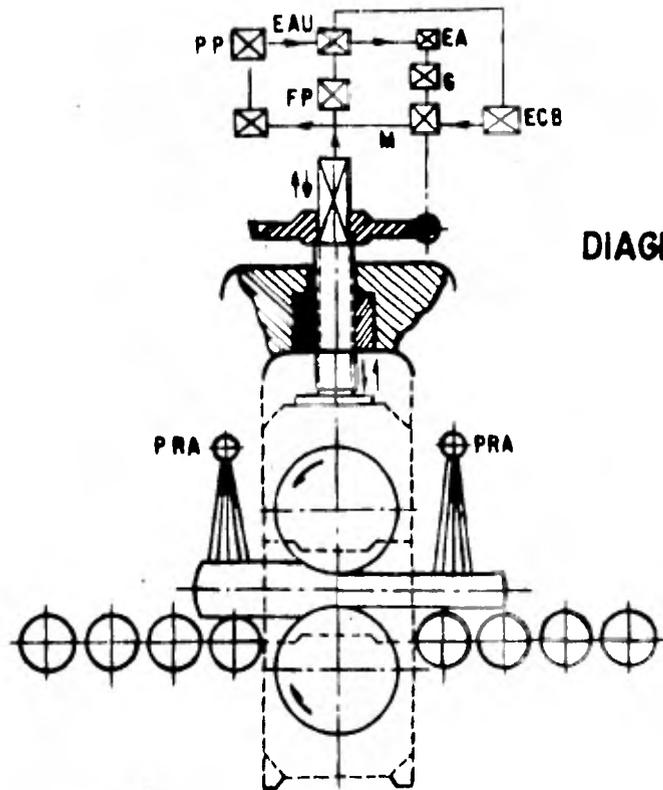


DIAGRAMA PARA LA AUTOMATIZACION DEL AJUSTE DE LOS RODILLOS

<b>U N A M</b>	
<b>FAC. DE INGENIERIA</b>	
<b>FIGURA No.</b>	<b>PROCESO</b>
<b>36</b>	<b>DE LAMINADO</b>

con el relé de voltaje del generador. Cuando el lingote alcanza los rodillos, los relés PRAX cambian su sentido y el motor sube su velocidad hasta 50 rpm. Si el lingote no es aceptado, el relé reduce su velocidad de 12-15 rpm en 0.3 segundos. El motor es accionado automáticamente por el botón de "Regreso" al morder el lingote el relé PRA. Se conecta el motor a enfrenar por medio de una computadora electrónica cuya señal de entrada es un pulso transmitido por el relé PRR.

Esta calculadora determina la longitud de la sección sin rolar del lingote desde el momento en que pasa el motor.

Cuando el lingote corre fuera del control de los relés, la longitud de la parte rolada se determina en base a la velocidad de rolado. Después de un intervalo ya calculado, la computadora envía una orden para detener el motor.

Automatización para el ajuste o regulación de los rodillos.

Para lograr este paso, es necesario un servomecanismo y una computadora electrónica. La computadora cuenta el número de pasadas entre los rodillos y es activada por una señal del relé de la dirección de rotación. Algunos de estos relés se encuentran incorporados a un circuito cuantificador. Después de la última pasada el relé regresa a su posición original.

La computadora controla el servosistema de los rodillos de acuerdo a las necesidades requeridas. El servosistema comprende los siguientes elementos:

- 1) Transmisión para la posición del rodillo superior (potenciómetro FP)
- 2) Contador de tiempo P.P.
- 3) Unidad electrónica de amplificación EAU, que amplifique la diferencia de voltaje alimentado por el - contador de tiempo y el sincrotransmisor.
- 4) Componente ejecutivo
- 5) Computadora electrónica ECB.

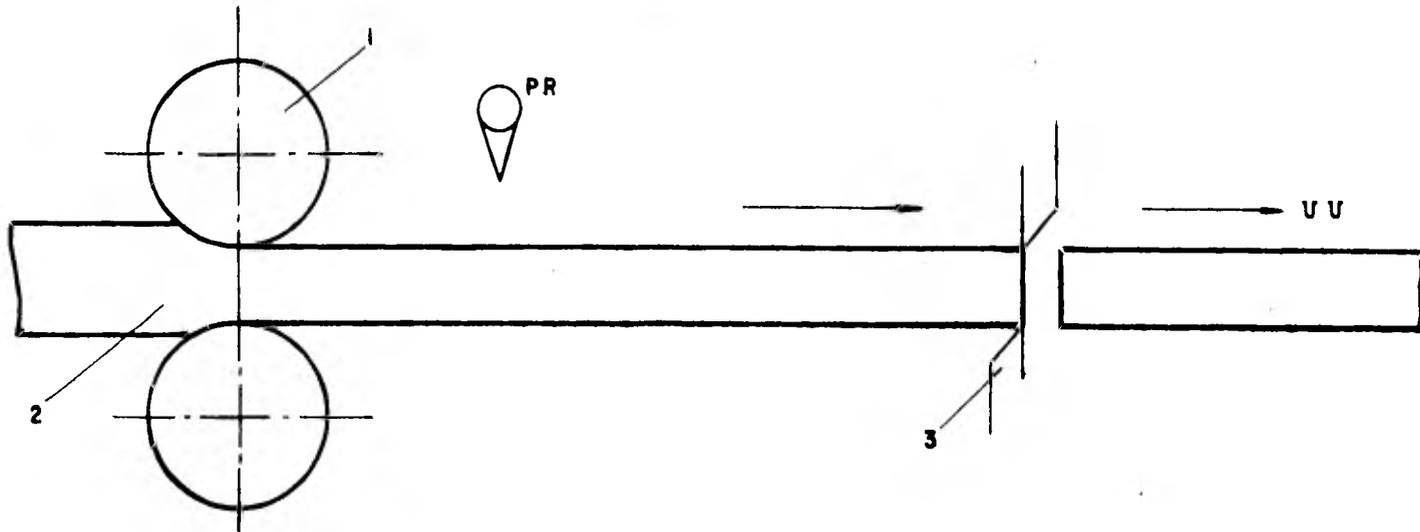
Automatización de molinos para billets.

Actualmente existen molinos contínuos para billets completamente automatizados. En el rolado de billets largos, utilizando varios molinos, no se permite que el billet siga una trayectoria cerrada. Es por eso que la transmisión eléctrica debamantener un determinado volumen de metal pasando a través de cada molino, por unidad de tiempo.

Esta condición solamente se podrá alcanzar por medio - de un control muy preciso en las velocidades de cada molino, o - sea, en la velocidad periférica de los rodillos. Esta es la razón por la que se usan motores de corriente directa.

Cuando el billet (2) sale del molino (1) se corta a -  
determinada longitud por las tijeras de volante (3) Fig. 37. Es  
tas tijeras son accionadas por un pulso del relé fotoeléctrico  
PR, esto es, al salir el billet del molino 1, se acciona el re-  
lé fotoeléctrico PR, el cual manda un pulso para activar la --  
transmisión de las tijeras y entonces las tijeras son accionadas.

# DIAGRAMA PARA LA AUTOMATIZACION DE TIJERAS DE CORTE



<b>U N A M</b>	
<b>FAC. DE INGENIERIA</b>	
<b>FIGURA No.</b>	<b>PROCESO</b>
<b>37</b>	<b>DE</b>
	<b>LAMINADO</b>

Tratamientos mecánicos del acero.

Importancia del tratamiento mecánico.- En el año de 1925 del total de 45 millones de toneladas de fundición que se produjeron en los Estados Unidos, más de 44 millones se transformaron en lingotes. Esto significa que el 97% de la producción fué destinada a algún proceso mecánico y más en concreto, a una serie de procesos mecánicos.

Trabajo en frío y en caliente.- Todo trabajo mecánico se divide en dos clases de trabajo, que son trabajo en frío y trabajo en caliente.

Trabajo en caliente.

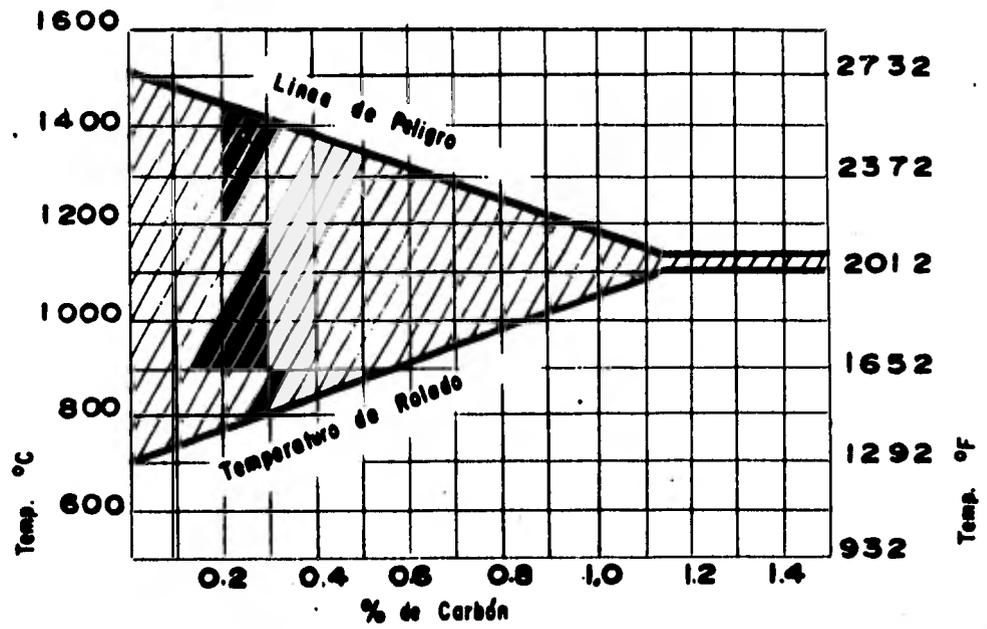
El trabajo en caliente consiste de procesos mecánicos, tales como laminado, forjado o prensado, a temperaturas superiores a las del llamado rango térmico crítico (aproximadamente 1292°F o 700°C).

El trabajo en caliente se aplica a lingotes de hierro ó acero poco después de su solidificación y de un período de recalentamiento en hornos para este fin, ú, ocasionalmente, después de que el lingote se ha enfriado a la temperatura atmosférica y se ha recalentado en hornos de recalentamiento hasta alcanzar la temperatura de trabajo aproximada de 2150°F (1180°C).

Temperaturas para laminado y forjado.

Harry Brearley ha hecho notar que la resistencia a la tracción o a la tensión del metal frío varía entre 44,000 y 220,000 lbs/pulg<sup>2</sup>, pero para el metal a la temperatura de laminado en caliente, este valor varía entre 2,200 y 6,600 lbs/pulg<sup>2</sup>.

Aunque el esfuerzo necesario para laminar o forjar se reduce cuando la temperatura sube en el metal, existe una temperatura límite de trabajo para aceros de cualesquier composición, -- por el hecho de que el acero comienza a fundirse a una temperatura inferior a la necesaria para fundirse completamente. Entre más carbón tenga el acero, mayor deberá ser su temperatura para trabajarse a un esfuerzo dado; pero por otro lado, deberá tenerse en cuenta que los aceros al alto carbón comienzan a fundirse a temperaturas menores que aquellas para aceros con bajo contenido de carbón y como es entonces cuando se requieren altas temperaturas de trabajo, resulta que es cuando menos permisibles de alcanzar son. Brearley ha publicado una curva reproducida en la Fig. 38, mostrando las temperaturas máximas y mínimas para la laminación de aceros con diferentes cantidades de carbón. La curva superior se obtuvo por observación mientras que la inferior es hipotética. Esta curva explica por qué algunos aceros al alto carbón se estropean más veces "quemados" que por otro tipo de daños.



RANGO DE TEMPERATURAS DE ROLADO PARA ACEROS AL CARBON  
SEGUN BREARLEY

<b>U N A M</b>	
<b>FAC. DE INGENIERIA</b>	
<b>FIGURA No.</b>	<b>PROCESO</b>
<b>38</b>	<b>DE</b>
	<b>LAMINADO</b>

## S E C C I O N VI.-

Tratamientos mecánicos y térmicos del acero.

## CAPITULO VI-a

### TRABAJO EN FRIO.

#### Introducción.

El trabajo en frío consiste en trabajar el metal cuando su temperatura se encuentra abajo del rango térmico crítico. En general la mayor parte de las veces, el trabajo se efectúa a la temperatura ambiente.

El trabajo en frío incluye laminado, prensado y estampado.

#### Laminación en frío de hojalata.

Una vez que las láminas han sido roladas en caliente, se han destemplado y se les han dado baño químico, el siguiente paso son los rodillos para acabado. Los procesos de doblado, curvado y enderezado se efectúan por un proceso de rolado en frío que aliza y pule la superficie e incrementa la resistencia y rigidez de la hoja. En estos rodillos la disminución del calibre de la hoja es mínimo, ésta disminución es mayor en rodillos de trabajo en caliente.

Dependiendo del tipo de lámina que se desea, tanto en acabado superficial, resistencia, rigidez, etc., serán las dife-

rentes combinaciones para laminado, tratamiento químico, taladrado, pulido, etc.

Laminado en frío de tiras de acero.

Esta sección es muy importante dentro de la industria del acero. En 1916 había en Estados Unidos solo 20 trenes de laminación para tiras, pero ya en 1925 había 42 de éstos trenes con capacidad de casi 1'400,000 toneladas. La mayor parte del acero para tiras proviene del proceso Siemens-Martin, aunque también se usan aceros al alto carbón, aleaciones como cromo-vanadio, cromo al bajo carbón, etc.

El material que va a laminarse en frío, no deberá tener segregaciones irregulares de carbón, ya que si éstas segregaciones alcanzaran un 0.19 o 0.20% en el centro de la tira, ésta fallaría durante el proceso.

Los billets y planchones que se laminaron a temperaturas hasta de 1,800°F se cortan a la longitud apropiada para obtener la longitud de tira que se desea.

La tira va saliendo, se enrolla en carretes con pesos que varían desde 50 a 1,000 lbs. Lo más usual son pesos de 150-200 lbs. Estos rollos se reenrollan para que se les quite la cascarrilla que se les formó al enfriar. Posteriormente el rollo

se baña por inmersión de ácido sulfúrico diluído calentado a 190° F y luego se le dá un baño de agua caliente y jabón. Pasa entonces a los laminadores en frío, que generalmente se forman en tándem y que consiste de dos trenes o cuatro juegos de rodillos formados en fila, uno delante de otro, separados unos metros.

Salida la tira reducida en un 30 a 50% en su sección y se -- vuelve a enrollar. El metal se ha endurecido debido a esta última operación y se hace necesario un recocido. Este paso se efectúa de la siguiente forma: se coloca el rollo sobre una base y se cubre con una cubierta de acero hermética y que se sella a la base con un colchón de arena. Se coloca entonces el paquete en un horno y se efectúa el recocido durante 12 horas aproximadamente, a una temperatura de 1,450-1500°F. Se enfría entonces el paquete afuera del horno y se introduce gas libre de oxígeno y humedad para prevenir la decoloración de la cinta. Entonces ya se -- puede templar la cinta en rodillos sencillos muy bien pulidos para dar buen acabado al material.

Efectos del trabajo en frío en la estructura y en las propiedades físicas del metal.- El trabajo en frío aumenta mucho el esfuerzo a la tensión, pero especialmente el límite de elasticidad; asimismo, la fragilidad del material aumenta bastante. El alambre de acero, por ejemplo, que en condiciones de recocido tiene un esfuerzo a la tracción de, digamos 57,000 lbs/pulg<sup>2</sup> y un límite de elasticidad de 28,000 lbs/pulg<sup>2</sup>, verá incrementadas sus propieda-

des en 80,000 a 100,000 lbs/pulg<sup>2</sup> en su esfuerzo a la tracción y en 60,000 lbs/pulg<sup>2</sup> su límite de elasticidad. El alambre de bajo carbón verá incrementado su esfuerzo a la tracción de 57,000 a 92,000 lbs/pulg<sup>2</sup>, mientras que su módulo de elasticidad crecerá de 32 a 74 mil lbs/pulg<sup>2</sup>.

Los aceros al alto carbón son los que más incrementan su esfuerzo a la tracción. Una prueba hecha a un alambre de acero para piano, de 0.0284 pulgadas de diámetro, mostró tener un esfuerzo a la tracción superior a 460,000 lbs/pulg<sup>2</sup>. Estos alambres contienen generalmente entre 0.05 y 0.90% de carbón. La microestructura del acero se distorsiona por cualquier trabajo en frío; pero el volumen del grano solamente cambia debido a un excesivo mecanizado en frío, que origina la formación de pequeños granos de un solo grano. Este tipo de mecanizado se le conoce generalmente como refinado mecánico. Aitelsisan muestra en la siguiente tabla el efecto del trabajo en frío.

Al recalentar el acero trabajado en frío a una temperatura de 752°F (400°), el módulo de elasticidad casi se duplica, pero las demás propiedades cambian muy poco. Arriba de esta temperatura el esfuerzo de tracción se reduce y aumenta la elongación.

En la Fig. 43 se ilustra un diagrama que muestra gráficamente los efectos del mecanizado en la estructura de acero.

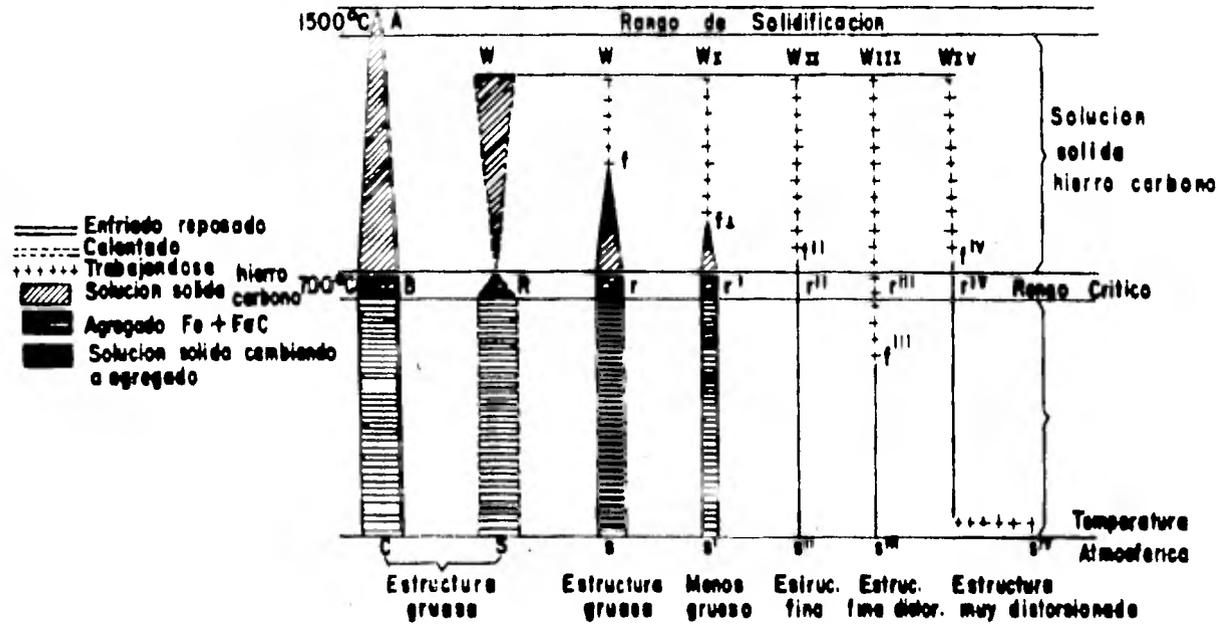


DIAGRAMA QUE MUESTRA LA INFLUENCIA DEL TRABAJO MECANICO EN LA ESTRUCTURA DEL ACERO SAUVEUR

U N A M

FAC. DE INGENIERIA

FIGURA No.

43

PROCESO

DE  
LAMINADO

Trabajo en caliente.

Como se explicó, el trabajo en caliente se aplica en laminado, forjado y prensado.

La mayoría de los lingotes se laminan primero, antes de pasar a otros procesos, aunque a veces pasan directamente a prensas pesadas. Las operaciones de forja se efectúan después de un proceso exhaustivo de laminación.

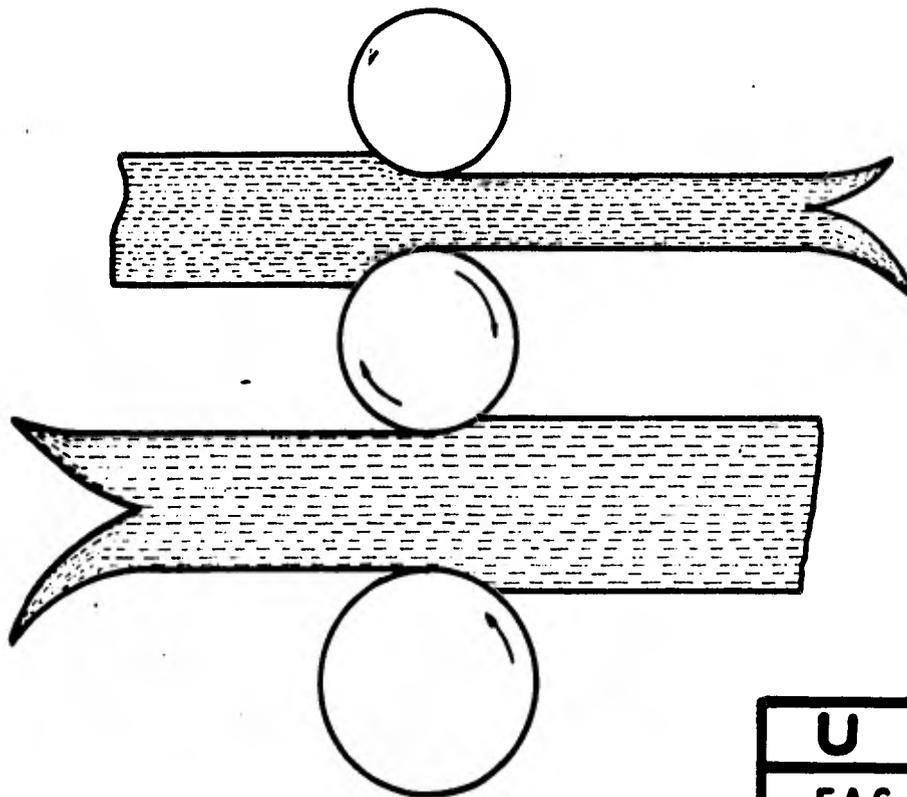
A continuación se explica el proceso de laminación, que es el que nos interesa.

Laminación.

La laminación se efectúa en trenes de laminación que se diseñan con el propósito de reducir la sección del lingote a una sección de mucho menor tamaño. Esto se cumple al efectuarse pasadas del lingote a través de los rodillos. En el caso de ser laminadores dúos grandes, el rodillo superior puede ser motriz y con facultad de descender o ascender según las necesidades.

El hecho de hacer descender el rodillo motriz después de cada pasada proporciona una reducción constante de área. En el caso de laminadores tríos, los rodillos son de diámetro diferente para cada rodillo. (Fig 44)

DIAGRAMA QUE MUESTRA EL PRINCIPIO DE LOS LAMINADORES TRÍOS



**U N A M**

**FAC. DE INGENIERIA**

**FIGURA No.**

**44**

**PROCESO**

**DE  
LAMINADO**

En los trenes continuos cada laminador tiene determinada abertura que se va reduciendo, dando por resultado una reducción constante de la sección.

Efectos del trabajo en caliente en la estructura interna del metal y propiedades físicas del acero.

El proceso de laminación, prensado y forjado, reduce el tamaño del grano del acero y cuando el proceso se efectúa continuamente, se reduce el grano del lingote inclusive aquellos granos que quedaron gruesos después de estar expuestos a altas temperaturas previas a ser trabajados. Estos procesos previenen también que el grano vuelva a engrosar, lo que puede suceder si el lingote se deja enfriar lentamente sin trabajarlo. Es práctica común laminar de lingotes a lupias, partiendo de lingotes que tienen hasta 4 veces la sección la lupia obtenida; posteriormente, son prensadas o forjadas reduciéndoles su sección de un 25 a 50%. Al comparar placas de diferente calibre, se da una idea de los efectos del laminado a las propiedades físicas del material, pues se puede apreciar mejor la estructura del material. Si tomamos una placa de 1/2 pulgada de grueso y la comparamos con placas más gruesas, notaremos que al efectuar una reducción del grosor a 1/4 de pulgada, se presentan los siguientes fenómenos:

- 1) Una reducción en la resistencia a la tracción de 1,000 lbs/pulg<sup>2</sup>;

- 2) Una reducción en la elongación de un 1% en una sección de 8 pulgadas;
- 3) Un incremento negativo en la reducción del área transversal de un 2%.

Si la cantidad de carbón es muy baja, el laminado dá como resultado la eliminación de burbujas, lo que produce una resistencia mejor al material.

Este fenómeno previene también la fragilidad del metal debida al desigual enfriamiento de la sección.

Podemos entonces concluir que el trabajo en caliente, modifica la resistencia a la tensión, la ductibilidad y especialmente la resistencia al choque y a esfuerzos por vibraciones.

Importancia de la temperatura de acabado.

La temperatura de acabado es a la cual el trabajo en caliente concluye, pero ésta temperatura siempre se encuentra por encima del rango térmico crítico. La temperatura exacta de acabado depende del contenido de carbón. Esta temperatura es muy importante cuando existen secciones grandes, debido a la diferencia de temperaturas que existe en el interior y en el exterior de la sección. Esta temperatura deberá controlarse en forma tal, que la parte interior de la sección no se vea afectada por las altas-

temperaturas exteriores de acabado y al mismo tiempo que las partes exteriores de la sección no se afecten por ser trabajadas -- frías.

Esto es importante cuando se producen rieles u otro tipo de secciones de grosor irregular, debido a que al centro de las secciones gruesas y el de las secciones delgadas se tienen -- gradientes de temperatura.

Laminación primaria.

En la laminación primaria, se parte normalmente del lingote, procedente de la fundición, el cual tiene una sección de -- 18" x 20" hasta 27" x 78", para obtener un producto semielaborado tocho o planchón.

Al pasar un lingote entre dos rodillos lisos disminuye su sección de  $A_1$  a  $A_2$  y aumenta su longitud de  $L_1$  a  $L_2$  trayendo -- como consecuencia una reducción del espesor de  $H_1$  a  $H_2$  y aumentando a la vez el ancho de  $B_1$  a  $B_2$  (Fig. 1 y Fig. 2).

FIG. ( 1 )

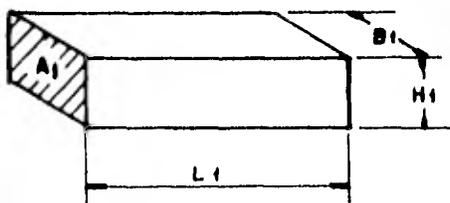
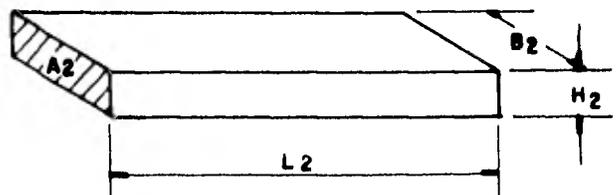
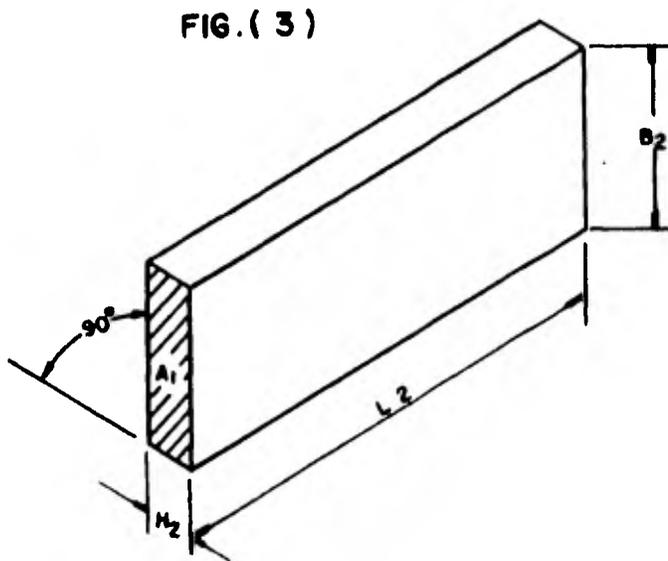


FIG. ( 2 )



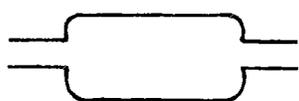
y si continuamos pasando dicho lingote por los rodillos en la misma posición, vuelven a variar sus dimensiones en el mismo sentido, esto es, de  $A_2$  a  $A_3$ , de  $L_2$  a  $L_3$ , de  $H_2$  a  $H_3$  y de  $B_2$  a  $B_3$ , -- siendo dicho proceso conocido con el nombre de pasada de tabla o pasada plana y si se desea que la sección final de dicho lingote -- sea cuadrada, esto es  $H_n$  sea igual a  $B_n$ , después de  $n$  pasadas, de -- berá entonces girarse a  $90^\circ$  dicho lingote introduciendo de nuevo -- de canto entre los rodillos como se ilustra en la Fig. 3.



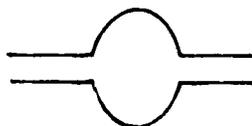
y así sucesivamente se deberá introducir el lingote en una pasada plana y una de canto, hasta obtener la sección deseada. Dicho -- procedimiento no es recomendable en la práctica, ya que trae como consecuencia fatiga del material, por lo que se recomienda introducir el lingote en pasadas de tabla sin límite de anchura.

Tanto en las pasadas planas como en las de canto, se -- pueden llevar a cabo con rodillos acanalados, consistiendo dicho

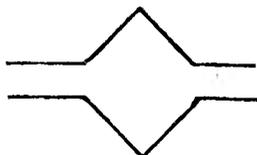
canal en ranuras concéntricas torneadas en los rodillos, las cuales pueden tener diferentes formas, siendo las más comunes las siguientes:



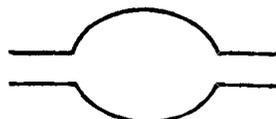
T A B L A



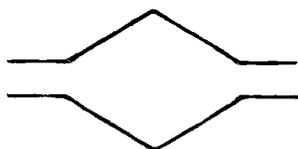
C A N T O



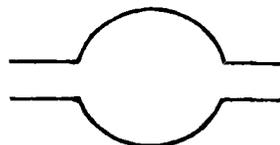
C U A D R A D O



O V A L O



R O M B O

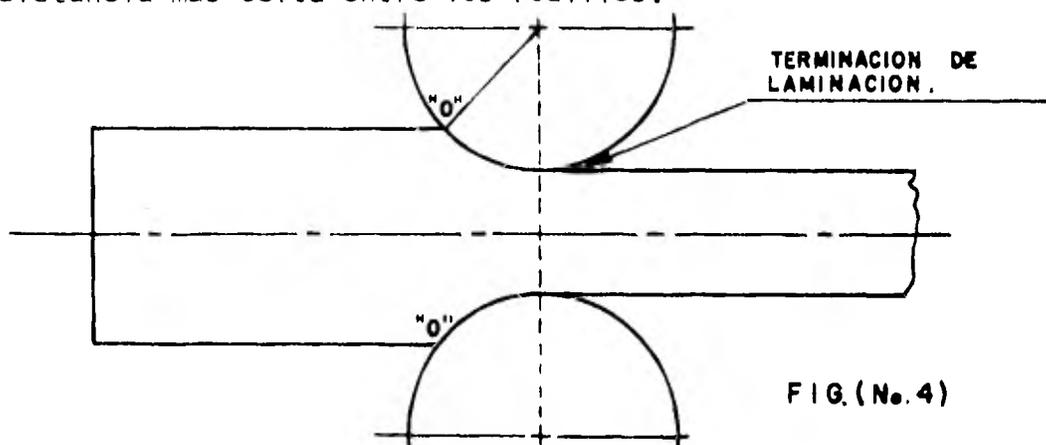


R E D O N D O

teniendo como característica las canales de canto y cuadradas que permiten poca reducción de pasada en pasada, conociéndoseles dichas canales como preparadas, ya que la reducción de la sección es lenta; no siendo así en las canales como el rombo, el óvalo, - la tabla, en las cuales la reducción de la sección es grande, por lo que reciben el nombre de canales alargadores.

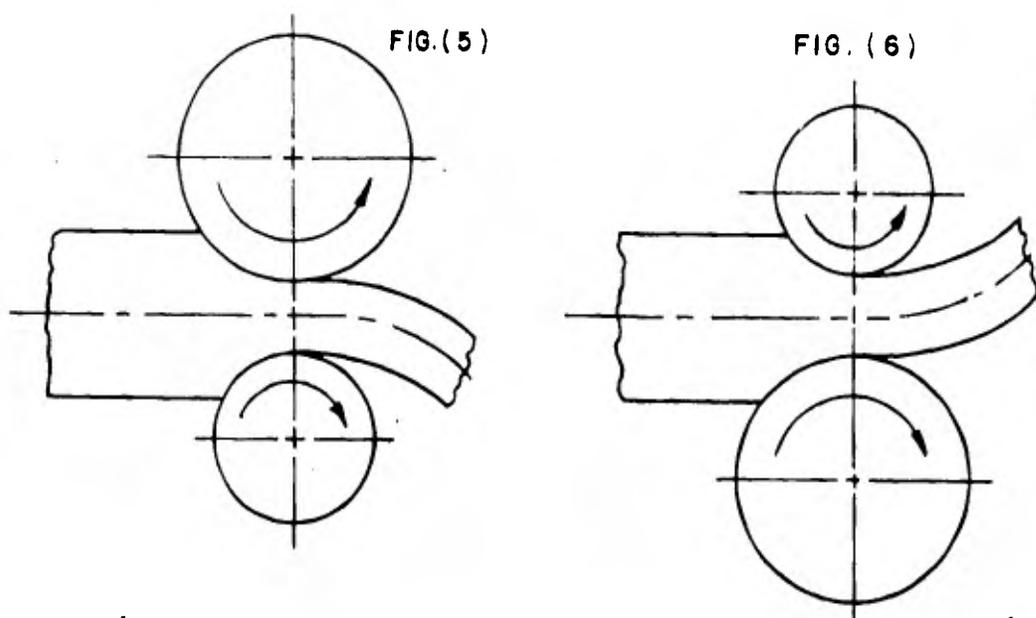
La disminución de la sección de una barra que se está laminando comienza a la entrada en el intersticio de laminación,

o sea en las puntas en las cuales hacen contacto los rodillos y - barra, puntas "o" de la Fig. 4 y termina en la línea que pasa por la distancia más corta entre los rodillos.



conociéndose dicho plano con el nombre de "plano de laminación". En el caso de que se desee trabajar con rodillos acanalados deberá dibujarse previamente cada uno de los pasos y el orden en que se deseen efectuar los diferentes trabajos, conociéndose dicho estudio con el nombre de calibrado, por otra parte, el diámetro medio de los rodillos en cada paso se le designa con el nombre de Diámetro de Trabajo, no siendo dicho diámetro igual en los rodillos cuando se trata de un laminador dúo, ya que si el diámetro del rodillo superior es mayor, existirá una presión superior trayendo como consecuencia una desviación del material hacia el rodillo inferior, ya que la velocidad periférica que existe entre el rodillo superior y la barra, es mayor que la velocidad periférica que existe entre el rodillo inferior y dicha barra. Cuando el rodillo inferior tiene un diámetro mayor se dice que hay presión inferior, siendo lo contrario al de la presión superior, como se --

ilustra en las Figs. 5 y 6.



Laminación de lingote.- En los primeros pasos de la laminación de un lingote, se elimina la coque del lingote colado, seguidamente tiene una compresión deduciendo con ello que desaparezcan los huecos y al mismo tiempo se destruye la estructura fundida, la cual debido a la construcción cristalina a veces orientada hacia las zonas periféricas, hace que el material tenga unas propiedades desfavorables al proceso, por lo que es recomendable que en los primeros pasos la reducción relativa de la altura sea pequeña o sea entre un 13 y 20% y después puede seguir aumentando para -- que finalmente sea pequeña dicha reducción y una vez eliminada la estructura de fundición aparece una estructura uniforme y con buenas propiedades físicas del material y el aumento de la resistencia a la tracción que produce con esto no es grande en general, - en cambio el límite de fluencia y sobre todo la tenacidad aumentan

considerablemente. Cuando se procede a laminar un lingote con zonas porosas y sopladuras periféricas, éstas se agrietan dando como consecuencia un material de mala calidad, ocasionando gastos elevados de escarpado o esmerillado. La laminación de lingotes es muy importante, ya que tiene influencia en todo el proceso de laminación, por lo que es recomendable calentar los lingotes uniformemente y laminarlos a la máxima temperatura admisible. En los aceros pobres en manganeso y con defectos en la fundición, requieren un tratamiento especial y como consecuencia, una temperatura elevada y un calentamiento uniforme.

#### Laminación secundaria.

La laminación secundaria es el proceso al que será sometido el material en forma de billet (palanquilla) para transformarlo en un producto conocido en el mercado con el nombre de redondo liso.

El diseño de la calibración es muy importante en este tipo de laminación, ya que para cada medida o diámetro de redondo que se quiera obtener, los pasos, así como el número ellos, serán de acuerdo al material (billet) de que se parta y del molino o tren de laminación donde se vaya a llevar a cabo el proceso.

El material que se va a laminar llega a hacer contacto con los rodillos a una velocidad lineal determinada ( $V$ ), la cual

provoca un impacto con los rodillos, que aunque giran sobre sus ejes, su velocidad lineal es nula. El impacto se efectúa en los puntos D y D<sub>1</sub> y en los cuales se ejercerá una fuerza "N" perpendicular a la superficie de los rodillos (Fig. ). Toda fuerza provoca una reacción en sentido contrario a la misma, por lo que se ejercerá otra igual sobre el material a laminar.

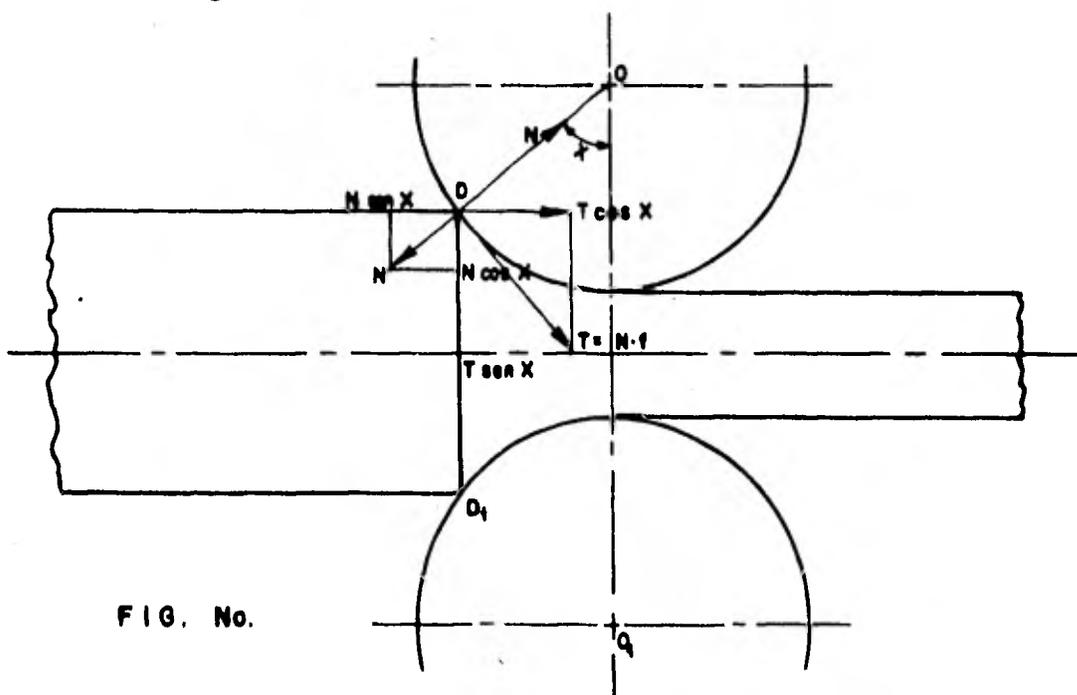


FIG. No.

Descomponiendo la fuerza  $N$  que actúa en el material a laminar, en sus componentes horizontal y vertical tenemos:

componente horizontal ( $N \text{ sen } x$ )

componente vertical ( $N \text{ cos } x$ )

La componente mencionada en primer término tenderá a alejar la pieza a laminar de los rodillos y la otra componente ( $N \text{ cos } x$ ) tenderá a reducir la altura del material.

En el punto D se provoca una fuerza friccionante T, la cual es igual a N, que actúa sobre los rodillos multiplicada por f (coeficiente de fricción).

$$T = N f$$

Esta fuerza que actúa en el punto D perpendicular a la presión normal N, descomponiéndola en sus componentes horizontal y vertical tenemos

componente horizontal      T cos x

componente vertical        T sen x

La primera componente tenderá a jalar la pieza hacia el sentido de laminación y la segunda tratará de reducir la altura de la pieza. El mismo fenómeno sucederá en el punto D<sub>1</sub>.

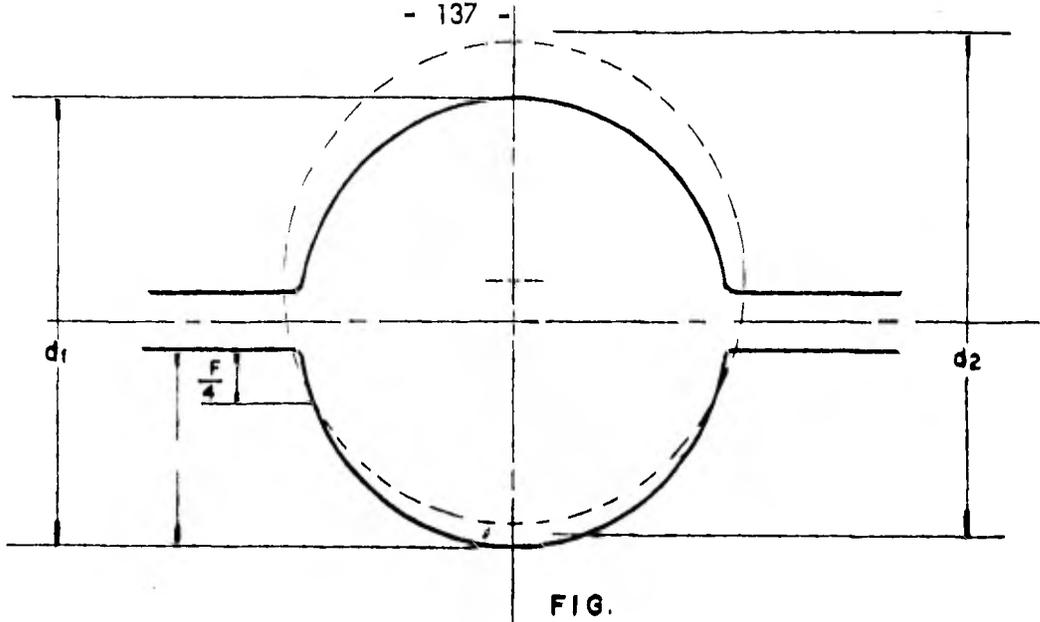
De lo anterior se pueden establecer tres fenómenos diferentes: la componente (N sen x) puede ser mayor, igual o menor que la componente (T cos x). En el primero de los casos, el material es repelido por los rodillos y el proceso de laminación no se realizará. En el segundo caso, puede ser el material tomado por los rodillos pero no necesariamente. En el último de los casos, el material será tomado por los rodillos y desde luego modificada su sección.

De lo anterior se deduce que unos de los factores que influyen en la acción de laminado sobre todo cuando los rodillos atrapan el material, son el ángulo de entrada y el coeficiente de fricción. Otros de los factores que tienen gran influencia en este tipo de proceso son: la calidad del acabado de los rodillos, el tipo de material de que están fabricados, así como también los niveles de temperatura a que permite trabajar el material por laminar.

En el caso de la laminación de redondos el paso de acabado no es exactamente redondo. Una vez que se ha maquinado el paso de redondo a la medida que se quiera obtener tomando en cuenta la contracción del acero (de 0.013 a 0.020), es necesario ensanchar el calibre con otra pastilla de un diámetro mayor.

Si llamamos "d" al diámetro nominal del redondo que se quiera obtener, entonces el diámetro de la pastilla  $d_1$  con la cual se va a maquinar el rodillo, se verá incrementada dependiendo del tamaño de "d" en la siguiente forma:  $d_1 = d (1.013 \text{ a } 1.020)$ .

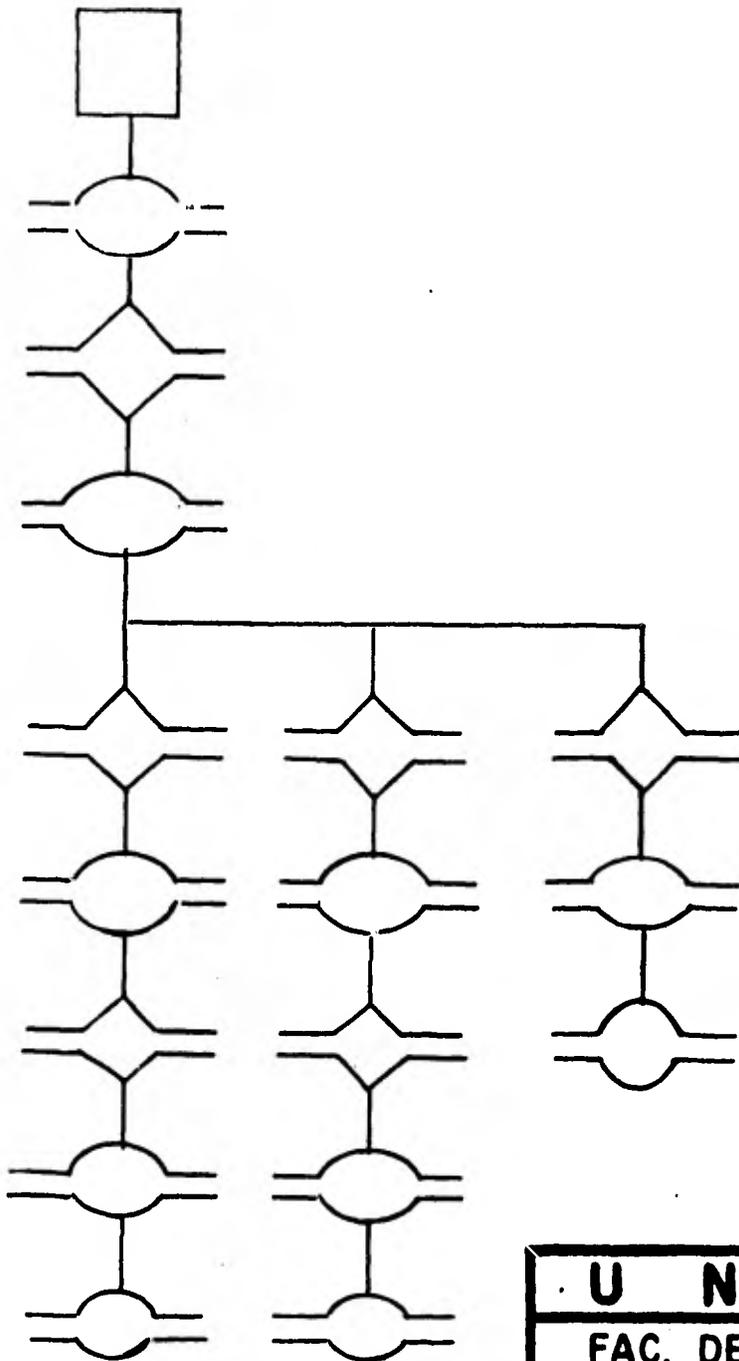
En la siguiente figura No. se muestra gráficamente lo expresado anteriormente, siendo  $d_2 = d_1 (1.013 \text{ a } 1.020)$  el diámetro de ensanchamiento a ambos lados del paso de acabado.



En la laminación de redondos hasta de 30 mm de diámetro es aconsejable trabajar con pasos de cuadrados antes de óvalo antecabador y para diámetros mayores de 30 mm, es mejor trabajar con pasos de canto en lugar de cuadrado, ya que con el canto se obtiene un óvalo mejor formado y se produce un menor desgaste en éste último que si se trabaja en cuadrado.

En el diseño de los pasos para la laminación de redondos, la exactitud de las medidas de los tres últimos es determinante para poder obtener un producto que satisfaga cada una de las dimensiones comerciales exigidas, así como del buen diseño que se haga del cuadrado, canto, óvalo y del paso de acabado, dependerán en mucho la calidad del producto laminado a obtener.

En la figura siguiente se muestran algunas secuencias de pasos con los cuales se pueden obtener barras redondas de diámetros comerciales de 16 a 22 mm., partiendo del billet (palanquilla) de 76 mm por lado.



U N A M
FAC. DE INGENIERIA
Proceso de laminacion .
Fig. No.

En las Figs. 44, 45, 46 y 47, se muestran respectivamente, la microestructura de un acero con 0.5% de carbón como fundición y hasta trabajo en caliente y en frío.

En las Figs. 48 y 49 se muestra también la microestructura del acero con un 0.1% de carbón y que ha sido rolado en frío y estirado en frío.

C O N C L U S I O N E S .

En la época actual, la Industria Siderúrgica tiene una - importancia capital en el desarrollo económico del país.

En esta rama de producción, se encuentra la "Laminación", que fué objeto de nuestra tesis. Durante el desglose de la misma y al ir desarrollando cada punto, nos hemos percatado del papel tan importante que desempeña el Ingeniero Mecánico Electricista, en la Industria Siderúrgica de México.

Como diseñador, proyectista o ejecutor de obras, tiene la responsabilidad de obtener un máximo rendimiento, con un mínimo de inversión.

Por lo mismo, debe saber conjugar perfectamente todas las inversiones tecnológicas con métodos tradicionales, teniendo muy presente, hasta dónde es posible eliminar mano de obra, con el empleo de maquinaria.

El Ingeniero Mecánico Electricista, debe ir borrando la imagen del ente, que aplica solo conocimientos científicos para la Inversión; o utiliza la técnica industrial en todas sus determinaciones, ya que el presente requiere una actualización que abarca el sentido social y humano.

Debe tomar conciencia de que la improvisación y empirismo, deben sustituirse por la técnica científica y conocimientos con base firme.

La Industria Siderúrgica necesita alta capacitación en su personal, no solo para llevar a cabo los procesos planteados, sino por adoptar las transformaciones tecnológicas -- del futuro.

Esta perspectiva futura, hace del Ingeniero Mecánico Electricista, una pieza indispensable en la optimización y búsqueda de recursos, para el sector siderúrgico.

En la organización de una Laminadora, la responsabilidad -- del Ingeniero Mecánico Electricista es marcada, pues la -- intervención del mismo empieza desde el proyecto, diseño, -- supervisión de un planta Laminadora y posteriormente, la -- dirección, mantenimiento y funcionamiento de la misma.

Por todo lo anterior, es necesario que el Ingeniero Mecánico Electricista, recién egresado de la Universidad, debe tener en mente el deseo constante de superación profesional, ya que con ello logrará su ubicación dentro de la industria siderúrgica y en particular en la planta de laminación, ayudando a la solidez de esta industria, base -- de la economía de nuestro país.

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

- 1.- An introduction to the metallurgy of iron and steel.  
H. M. Boylston, Second Edition.  
John Wiley and Sons, Inc.
  
- 2.- Metalurgía y metalografía.  
N. Barinov y A. Landa  
Editorial MIR, Moscú.
  
- 3.- Tecnología de los metales.  
A. Málishev, G. Nikólaiev, Y. Shuvólov.  
Editorial PAZ, Moscú.
  
- 4.- Rolling Mill Practice.  
P. Polukhin, N. Fedosov, A. Korolyov and Y. Matveyev.  
Peace Publishers, Moscow.