

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO
FACULTAD DE QUIMICA



BASES DE DISEÑO DE UN
MOLINO DE LAMINACION

SAUL EDUARDO NAVA SANCHEZ
INGENIERO QUIMICO METALURGICO

1 9 7 7



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
FACULTAD DE QUÍMICA

Tesis 1977

300

NO. _____
FECHA _____
PROF. _____
AÑO _____



BASIS DE DISEÑO DE UN

PROYECTO DE INVESTIGACIÓN



INGENIERO QUÍMICO METALÚRGICO

1977

JURADO ASIGNADO ORIGINALMENTE SEGUN EL TEMA

PRESIDENTE	ING. KURT H. NADLER GUNDEISHEIMER
VOCAL	ING. JOSE CAMPOS CAUDILLO
SECRETARIO	ING. ENRIQUE CURIEL REYNA
1er. SUPLENTE	M.en C. Ma. EUGENIA NOGUEZ AMAYA
2o. SUPLENTE	ING. HUMBERTO MALAGON ROMERO

SITIO DONDE SE DESARROLLO EL TEMA: FACULTAD DE QUIMICA

SUSTENTANTE: SAUL EDUARDO NAVA SANCHEZ

ASESOR DEL TEMA. ING. KURT H. NADLER GUNDEISHEIMER

A MIS PADRES:

CON CARIÑO Y AGRADECIMIENTO

A MIS HERMANAS:

SYLVIA,

REBECA,

LOURDES.

A TI:

IRMA, CON MI AMOR..

I N D I C E .

PAGINA

INTRODUCCION:

I.- DESCRIPCION Y DISEÑO DEL EQUIPO Y HERRAMIENTA DE LAMINACION	3
a) Descripción	3
b) Manufactura	5
c) Características	10
II.- CONSIDERACIONES DE DISEÑO.....	18
a) Diseño	19
b) Operación	24
c) Herramienta	26
III.- TIPOS DE MOLINOS.....	27
I) Laminadores de Tochos y Planchones	29
II) Laminadores Intermedios ó Preparadores	31
III) Laminadores de Barras y Perfiles Comercia- les.	35
IV.- PRACTICA DE LAMINACION.....	39
BIBLIOGRAFIA.....	72

I N T R O D U C C I O N

De acuerdo a la importancia que siempre han tenido - todos los procesos de acabado, en especial en el trabajo - de los metales, y además, existiendo infinidad de métodos y técnicas, cabe destacar el proceso de laminación como un proceso en que se pueden obtener buenas ventajas, como es el hecho de que con un adecuado manejo es posible además - de mejorar las características del material; se puede llegar a evitar maquinaciones posteriores, resultando con - ello aumentar la eficiencia del método.

Desde el inicio de la operación de los molinos de laminación, han ocurrido muchos y muy importantes cambios, y podemos afirmar que el trabajo de diseño de molinos ha - bía siempre recaído sobre un pequeño grupo de gente espe - cializada; los cuales preferían transmitir sus conocimientos a sus descendientes y no era raro encontrar a varias generaciones de una familia dedicadas a explotar el arte - del diseño de molinos.

Estos primeros diseñadores no tuvieron las mismas ven - tajtas que los practicantes de hoy en día, ya que los avan - ces en los conocimientos tanto de dibujo como de matemáti - cas; así como las tecnológicas, como son equipos mecánicos y eléctricos, así como un amplio estudio de las caracterís - ticas físicas del material por laminar lo cual hace que el trabajo sea cada vez más perfeccionado.

Pero el paso primordial para que todas estas ventajas sean adecuadamente utilizadas, depende de la habilidad --

-y experiencia del diseñador.

Dicha experiencia solo se logra comenzando con el diseño de pasos con secciones fácilmente laminables; y después haciendo las correcciones que se consideren necesarias tras de discusiones y varios puntos de vista que se deben de tomar en consideración por parte de todo el equipo involucrado en laminación, así se irá adquiriendo mayor experiencia y conocimiento, pudiendo más adelante llegar a diseñar secciones de mayor dificultad.

Además existen muchos libros sobre el diseño de rodillos que poseen algún valor práctico y representan un buen apoyo para el estudiante de esta materia, aunque como ya se ha dicho, el desarrollo lo obtendrá a partir de la experiencia.

C A P I T U L O I.

DESCRIPCION Y DISEÑO DEL EQUIPO Y HERRAMIENTA DE LAMINACION

Con el fin de tener el conocimiento de la importancia y función de cada parte del Molino de Laminación, se dará una descripción de los elementos del mismo y así será posible entender su utilidad en el diseño.

RODILLOS:

a) DESCRIPCION:

Aún con los adelantos técnicos en laminación este continúa siendo el proceso de deformación plástica de un metal entre dos rodillos, y con ello podemos decir que estos son la pieza principal de un molino ya que son los que estarán en contacto directo con el material por laminar, y dependiendo de la forma de la calibración (entendiéndose por calibración el espacio libre entre los rodillos) será la forma del material laminado.

Un rodillo está formado por la "tabla" ó "cuerpo" que es propiamente la distancia de trabajo en la cual se colocarán los pasos de acuerdo al producto buscado. En la figura 1a. se muestra un rodillo para laminación de planos y en la figura 1b, uno para algún tipo de perfil.

La parte de menor diámetro o "cuello" es muy importante puesto que como se verá mas adelante es la parte que habrá de soportar los esfuerzos de flexión del rodillo, en el cuello va montado y soportado el balero.

A los lados de los cuellos se encuentran los "tréboles" que servirán para el acoplamiento ya sea a la caja de engranes ó a los otros castillos dependiendo del arreglo del molino.

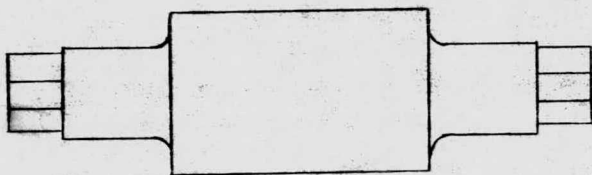


Fig. 1a. Rodillo Plano.

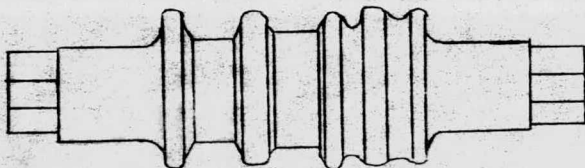


Fig. 1b. Rodillo para Perfil.

- Un molino puede ser Dúo, Dúo reversible, Trío, Cuarto ó Sendzimir (fig. 2) y aquí encontramos otra división entre los rodillos ya que pueden ser: de trabajo, ó solo de apoyo como es el caso en los arreglos cuarto ó Sendzimir. Otra división entre los rodillos se puede hacer clasificándolos por el producto que van a laminar y de esa manera encontramos: Rodillos para molinos Blooming, slabing, para bilette, redondo, estructural, tubos, flejes, etc.

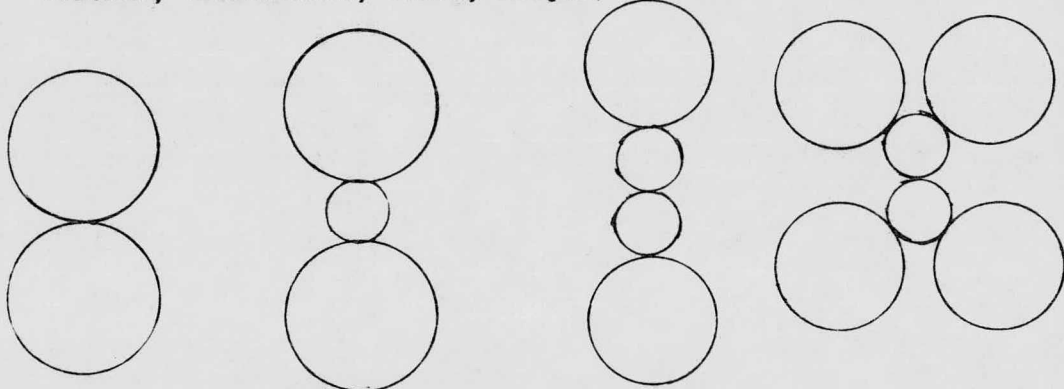


Fig. 2 Arreglo de rodillos.

b) MANUFACTURA

Al fabricar los rodillos es de vital importancia controlar las materias primas, y aquí encontramos la más importante de las clasificaciones de los rodillos ó sea por su manufactura.

Rodillos Fundidos: Estos son mas empleados que los de acero forjado, y es difícil definir entre los de hierro fundido y los de acero fundido, puesto que ambos están aleados y los métodos de fundición de ambos son muy parecidos. Sin embargo los de hierro se pueden obtener de: Enfriamiento de finido; de enfriamiento indefinido, de doble colada y colados de arena. Los cilindros de hierro fundido normalmente no reciben tratamiento térmico, excepto el enfriamiento controlado y el recocido a baja temperatura, ya que si se efectuara otro tipo de tratamiento se llegaría a un endureci -

-miento superficial.

Los rodillos de acero fundido generalmente se cuelan en un molde vertical con dos mitades longitudinales, pero siendo necesaria una mazarota grande para limitar la velocidad de solidificación y tener una colada sana. A diferencia de los rodillos de hierro fundido, en los de acero el tratamiento térmico es una fase importante y puede incluir recocido, normalizado y endurecimiento.

RODILLOS FORJADOS: Estos rodillos se fabrican de acuerdo a los procedimientos tradicionales de forja y después del torneado grueso se les horada un agujero central para ayudar al tratamiento térmico. Los cilindros forjados tienen una gran aceptación en trabajos donde lo que se busca es mayor exactitud, así como en la laminación en frío por las grandes tensiones que hay que soportar y últimamente le han ganado terreno a los fundidos también como rodillos de apoyo por su superioridad en pruebas de Resistencia a la Tensión, Resistencia a la Fatiga, Resistencia a Cargas Dinámicas y Resistencia al Astillamiento que son los requisitos de un rodillo de apoyo.

Los rodillos forjados siempre han competido en desventaja con los fundidos debido a su mayor costo sin embargo la brecha entre uno y otro se va reduciendo debido a la actual complejidad y el tratamiento térmico de los fundidos.

Podría ocurrir el caso de necesitar un rodillo forjado de grandes dimensiones, y en ese caso lo mejor es no fabricarlo de una sola pieza sino usar una estructura formada por un eje y una camisa montada cónicamente, este procedimiento también se usa para reparar algún rodillo grande que este dañado ó desgastado.

Para terminar con la parte de fabricación de rodillos - hay que mencionar los rodillos de Carburo de Tungsteno que - se usan en los casos en que se deseen producción más alta, - tolerancias más estrictas, mayor reducción y mejor terminado pero a esto hay que agregar su actual precio prohibitivo. Asimismo la colada centrífuga ha empezado a tener auge para la obtención de rodillos, pero aunque ya sobrepasaron la parte experimental y se encuentran en uso, datos de 1975 dan - solo cinco empresas que lo han integrado a sus actividades -

El uso de los rodillos como ya se ha podido observar - es muy amplio y de ese mismo modo existen varias opciones - para el usuario de un rodillo. La decisión de cual tipo de rodillos es el más conveniente en la mayoría de los casos se hace en base a resultados que se han obtenido anteriormente con algún rodillo más ó menos parecido, y cuando recién se va a trabajar con un molino nuevo ó con algún producto del que no se tenga ninguna información anterior, lo que generalmente se hace es empezar con algún rodillo blando, que aun-- que tenga el defecto de desgastarse más rápidamente, se evita el riesgo de roturas por algún mal cálculo en el diseño - ó hasta por algún mal manejo de los roleros. Cuando se comprueba que el rodillo trabaja satisfactoriamente se puede ir aumentando la dureza, pero para esto también existe un límite dado por la fragilidad, pero obrando con inteligencia se podrá llegar a una solución intermedia de dureza que será considerada la óptima de trabajo.

-Con todo esto se ve la utilidad de una tabla de aleantes - con comentarios sobre su efecto en las fundiciones de hierro y acero.

EFFECTOS DE ALEANTES EN RODILLOS DE FUNDICION Y ACERO.

RODILLOS DE ALEACION DE Fe.

- (C) Carbón.- 2.20-3.80 Aumenta dureza ayudado por Ni, Cr y Mo, aumenta la resistencia al desgaste y su fragilidad. Baja la ductilidad y la profundidad del temple.
- (Si) Silicio.- 0.40-2.20 Aumenta grafitización, y ayuda al pulido. Baja la profundidad del temple.
- (P) Fósforo.- 0.06-0.60 Incrementa dureza y fragilidad, además de dar fluidez y colabilidad al metal líquido, reduce la contracción.
- (S) Azufre.- 0.02-0.20 Igual que el P pero se le trata de tener lo más bajo posible por su exagerada acción - fragilizante.
- (Mn) Manganeso.- .20-3.50 Reduce temple en bajos rangos, incrementa temple en altos rangos, sube dureza en combinación con Ni y Cr, sube fragilidad.
- (Ni) Niquel.- 0.50-4.60 Sube dureza, fuerza y resistencia al desgaste. Baja la profundidad de temple.
- (Mo) Molibdeno.- 0.20-1.20 Sube fuerza, afina el grano, es muy empleado en rodillos que van a trabajar sin agua de refrigeración con temperaturas de hasta 400°C en esos casos se adiciona de 0.30-0.50% de Mo, con ello se disminuye el peligro del choque térmico.
- (V) Vanadio.- 0.10-0.30 Aumenta profundidad de temple y fuerza, además de resistencia a la fragilidad en caliente. Baja la ductilidad. Se usa como desoxidante limpiador y refinador de grano.

- (Cr) Cromo.- 0.50-2.00 Endurece en cualquier proporción, usado en combinación con Ni ó Mo ó ambos sube profundidad de temple, estabiliza carburos.
- (Cu) Cobre.- Similar al Ni en pequeñas cantidades.
- (B) Boro.- Endurecedor usado con discreción (0.02-0.06)- con otros aleantes, refina el grano y evita estructura cristalina columnar.

RODILLOS DE ALEACION DE ACERO:

- (C) Carbón.- Aumenta dureza, resistencia al desgaste y a la fragilidad. Baja resistencia al choque. Desde 0.80-1.20 se usa para desbastes pequeños, y aleado con Mn-Cr-Mo como rodillo de apoyo. Y de 1.20-2.60 son los únicos con cementita libre, lo que aumenta su dureza, pero también su resistencia al desgaste. Este tipo de rodillo es invariablemente aleado por existir el peligro de precipitación del grafito.
- (Si) Silicio.- 0.20-0.60 Pule al acero en proporción de 0.20-0.35. Sube la dureza. Desoxida, ayuda a un vaciado sano. Se usa en la forma de ferrosilicio y su efecto aleante comienza arriba del 0.50%.
- (P) Fósforo.- 0.03-0.06 Incrementa dureza y fragilidad. Baja ductilidad tiene tendencia a segregarse.
- (S) Azufre.- 0.03-0.06 Lo mismo que para el P, pero deberá mantenerse lo más bajo posible ya que fragiliza la estructura.
- (Mn) Manganeso.- 0.25-2.50 Se comporta como desoxidante hasta 0.80% y como limpiador de estructura. Cerca del 1.0% se comienza a sentir su efecto de aleante, dando fluidez al metal líquido refinando su grano y aumentando la dureza y resistencia al desgaste. El

aumento de dureza es notorio a partir de 1.05%

- (Ni) Níquel.- 0.25-2.00 Sube fuerza y resistencia a la fragilidad en caliente en combinación con Cr y otros. El Ni tiende a bajar temperaturas críticas y amplía el rango de temperaturas de tratamientos térmicos - con posibilidades de éxito.
- (Mo) Molibdeno.- 0.15-0.75 Sube la resistencia a la rotura y al impacto. Mejora el aspecto del agrietamiento - por calor dando grietas finas y tupidas en vez de pocas grietas grandes y abiertas.
- (V) Vanadio.- 0.15-0.30 Sube tenacidad, dureza y susceptibilidad a tratamiento térmico. Poco usado debido a que es caro y escaso.
- (Cr) Cromo.- 0.25-2.50 Mejora trabajo de endurecimiento en combinación con Ni ó Mo ó ambos. Favorece la formación de carburos evitando la grafitización.
- (Cu) Cobre. Similar al Ni.
- (B) Boro.- Sube dureza. Poco usado.
- (W) Tungsteno.- Poco usado, se recomienda para rodillos que van a trabajar al impacto.

CARACTERISTICAS DE LOS RODILLOS.

1) Resistencia al desgaste.- Los rodillos tienen un desgaste continuo debido a la fricción entre su superficie y el material laminado al estar presionados fuertemente uno contra otro. Si el rodillo no está suficientemente endurecido, podría causar excesivo desgaste y ocasionalmente marcas en el rodillo, las cuales se transmitirán al material-- y afectarán su calidad superficial además de deteriorar sus características mecánicas.

2) Resistencia a la rotura.- Se considera que es la capacidad del material de absorber altas tensiones de impacto en su superficie y transmitir estas tensiones a sus capas interiores.

3) Resistencia al choque térmico.- El trabajo de un rodillo es intermitente y esta expuesto a que en algún momento la barra que va a laminar pudiera estar mas fría de lo que en el diseño se ha calculado y tendrá que soportar esto, así como también existe el riesgo de algún problema en el enfriamiento del rodillo que si no se previene será de consecuencias lamentables.

4) Acabado Final.- El acabado superficial de un rodillo lo mismo se hace buscando mejores condiciones de operación como puede ser aumentar el angulo de entrada, evitar patinazos etc., y también puede ser para transmitir ese acabado superficial al producto laminado.

Con todo esto que se ha mencionado de los rodillos se entenderá la dificultad de una buena selección de ellos, pero además a estos factores mencionados se tendrá que adicionar el de los costos directos e indirectos, puesto que lo más fácil sería suponer que la mejor selección sería aquella que posea todas las anteriores características pero también esto depende de que tipo de material y que cantidad de él se va a trabajar, y en muchos casos se tendrá que pensar en alguna selección de menor costo que cumpla los requerimientos en forma más ó menos satisfactoria. Y a manera de conclusión de esto se tiene que tener en cuenta que el fabricante esta imposibilitado por el mismo material de entregar exactamente lo que se le pide, y siempre se deberán esperar algunas variaciones.

A continuación la descripción del restante equipo de laminación.

BALEROS O COJINETES.

Estos se encuentran integrados a ambos lados del rodillo, soportados por los cuellos, la función de cada balero es aminorar la fricción, además de servir como amortiguador de la tensión que causa el material al pasar entre los rodillos, Los baleros se diseñan asimismo para prevenir desplazamientos laterales de estos mismos rodillos. El diseño y cálculo del balero que se va a emplear se hace en base a la carga dinámica y estática que soportará así como al no. de revoluciones al cual va a trabajar.

Los baleros constan de dos partes; una en contacto con la superficie del cuello que es fabricado de Bronce, latón ó Babbit y que puede ser reemplazado cuando sea necesario, el uso de estas aleaciones es necesario para reducir la fricción, que es mucho menor entre metales diferentes, debido a la diferencia en tamaño de grano y a la tendencia de los metales blandos a fluir. La otra parte del balero es la que está en contacto con la chumacera y algunas veces también se hace de babbit.

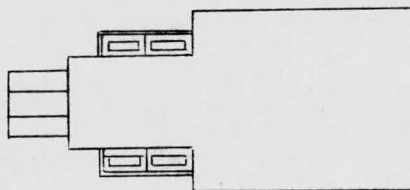


Fig. 3 Montaje de Balero

CHUMACERAS.

Algunos molinos no **están** dotados de baleros y el **tra** bajo entonces ocurre sobre las chumaceras, las cuales de - ben ser hechas de algún material altamente resistente al desgaste, las fibras fenólicas como la "micarta" son sa - tisfactoriamente usadas. Damos los datos de esta micarta.

Phenol-Formaldehyde Grade C Thermosetting laminada

Resistencia última 7.5 ksi

Dureza Rock M100

Resistencia última a la comprensión-Módulo de Elasticidad

20

3.5-15 X 10-5

Resistencia a la Flexión 17

gravedad específica

1.35

Promedio absorción de agua 1.2%
en 24 hrs.

El módulo de elasticidad y la resistencia a la flexión se deben de tomar siempre en cuenta por que hay que recor - dar que el "salto" del molino viene a ser absorbido por la chumacera.

El ajuste de los rodillos es obtenido mediante volan - tes, que hacen presión sobre las chumaceras y harán que

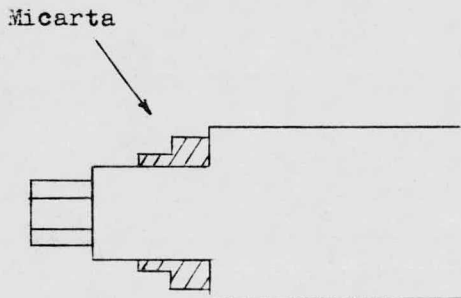


Fig. 4 Detalle del Montaje de la chumacera.

-los rodillos se desplacen. Al existir con esto el peligro de una sobre-presión por el paso del material sobre los rodillos, es necesario colocar los llamados "fusibles" sobre las chumaceras, estos fusibles son una base de fierro fundido que romperán en el caso de que exista la sobre presión anteriormente mencionada, protegiendo con esto al rodillo. Además de los volantes de ajuste vertical, se debe de contar con ajustes laterales para poder alinear los rodillos - que pudieran estar cruzados (ver fig. 4) .

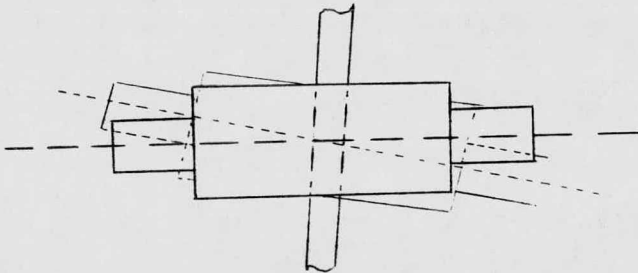


Fig. 5. Rodillos Cruzados (exagerados)

CASTILLOS.- El castillo es el bastidor donde se montan todas las piezas anteriormente mencionadas, el castillo generalmente se fabrica de fierro fundido, aunque a veces por razones de economía se pueden fabricar de placas soldadas eléctricamente. En el castillo también ocurre una gran parte de la tensión de trabajo y esto deberá ser tomado en cuenta para el diseño.

ACOPLAMIENTOS.- Los coples han tenido un gran avance en su diseño; es posible clacular su capacidad de trabajo y conseguir el cople exacto de acuerdo a la potencia que se va a transmitir.

GUIAS.- Las cajas de entrada ó guías van colocadas sobre las barras de apoyo, las guías deben tener la forma del paso al cual va a entrar el material; las guías se montan en las cajas ó "portaguías" que son enfriadas por agua y si poseen a la salida rodajas se enfrían por aceite. (fig. 5) La buena colocación de una guía es de gran importancia en la operación, ya que si está mal colocada ó mal calculada - causará que el material voltee y forme sobrellenados ó que no pueda ser tomado por los rodillos.

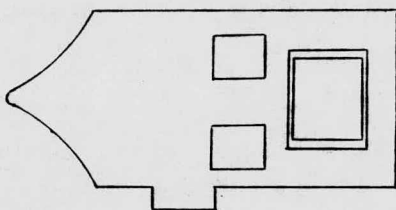


Fig. 5 . Cajas de entrada.

GINCELES O GUIAS DE SALIDA.- Igual que las guías, los cinceles se colocan sobre las barras de apoyo y sobre el rodillo, cuando trabajan sobre el rodillo inferior pero cuando trabajan sobre el rodillo superior los cinceles se ponen mediante contrapesos (fig. 6). La función de los cinceles es hacer que el material al salir de los rodillos despegue y no llegue a formar un "cordón" que causaría el rompimiento del rodillo.

El cincel no debe tener aristas agudas que podrían causar que el material se raye.

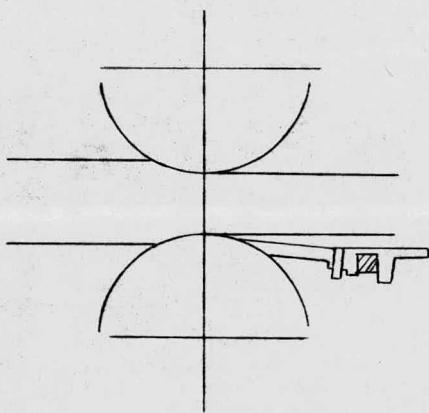


Fig. 6. Colocación del cincel en el rodillo superior.

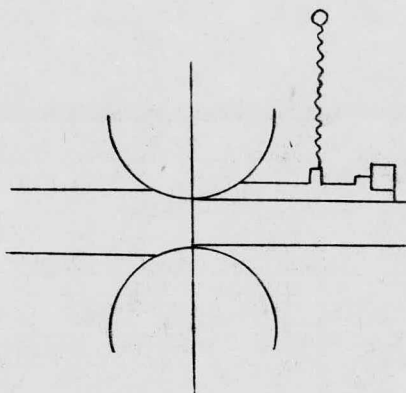


Fig. 6a. Colocación del cincel en el rodillo inferior.

La fuerza motriz para mover todo este conjunto esta proporcionado por un motor que a su vez esta acoplado a un reductor, lo cual nos dará la potencia requerida para mover el tren de laminación. Del reductor se acopla a la caja de engranes, y de ahí al primer stand ó castillo.

C A P Í T U L O 2

CONSIDERACIONES DE DISEÑO.

Cuando se va a diseñar una nueva sección, el procedimiento acostumbrado es calcular las dimensiones de la sección terminada en caliente, para tener en cuenta la contracción del metal al enfriarse. El problema del diseño sigue siendo mas parecido a una artesanía que a una regla mecánica, esto se demuestra por el hecho de que no existen dos diseños iguales para la misma sección hecha por diferentes diseñadores.

El hecho de partir de atrás hacia adelante dando reducciones en cada parte de acuerdo a su propio criterio hará que muy rara vez se llegue a las dimensiones del lingote o billete de partida. Sin embargo se hacen ajustes entre paso y paso hasta llegar con buena aproximación a la sección de entrada.

Existen ya tablas y fórmulas sobre el número de pasos recomendables de acuerdo al % de reducción que se va a trabajar, estas tablas han sido publicadas por los autores mas reconocidos y son de gran utilidad sobre todo para alguien que recién empiece a diseñar. Pero la recomendación mas útil será el comenzar con secciones simples y regulares, para después mediante experiencia ir intentando diseños mas complicados.

Las variables a considerar son muchísimas, sin embargo para el estudiante de laminación, que es para quien este trabajo de Tesis esta dirigido, será de gran ayuda no olvidar las siguientes consideraciones.

Podemos agrupar las consideraciones en tres grandes

grupos que serán: Diseño, Operación y Herramienta.

Obviamente la mas importante será el diseño que contiene desde el estudio de la sección por laminar, sus calibraciones, hasta tener el diseño de los rodillos y el tren de laminación completo.

Las consideraciones de operación son todas aquellas - en las que hay que tener especial cuidado para respetar en lo mas posible el diseño y las condiciones que se han calculado.

Y de no menor importancia es el equipo ó herramienta que ya fue descrito en el capítulo anterior.

DISEÑO.

I) Correcta elección del Diámetro del rodillo:

Para una laminación correcta es indispensable no solo la correcta magnitud y distribución de la presión, sino también la elección correcta del diámetro de los rodillos, si tenemos gran diferencia entre los diámetros de rodillos inferior y superior, habrá distorsión, la cual si es grande perjudicará la calidad del material, además del consumo de energía y desgaste de rodillos.

II) En las primeras pasadas no debe haber gran reducción, un máximo de 13-18%. Esto es suficiente para que se destruya la estructura dendrítica de colada y se logre afinar y homogeneizar el tamaño de grano.

Una vez logrado esto se puede ya aumentar el porcentaje de reducción. Sin rebasar el límite que nos impone el diámetro del rodillo que no será capaz de tomar la barra si esta es demasiado grande; se podría llegar a arre

glar esto elevando el coeficiente de fricción entre la barra y el mismo rodillo torneando muescas en el rodillo pero pudieran llegar a ocurrir pliegues como se ve en la fig. 7.

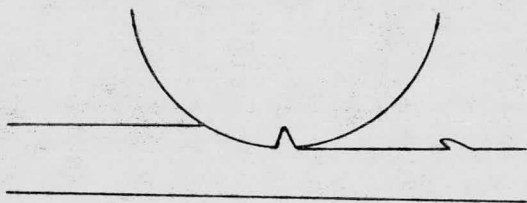


Figura 7

III) Buscar el menor número de pasos posibles por economía de operación, pero sin caer en el caso de excesiva reducción por paso, lo que causaría que el esfuerzo del rodillo sea grande y ocurra un desgaste exagerado, lo cual estará en perjuicio de la vida normal del rodillo.

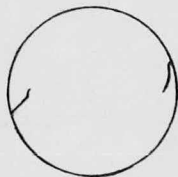
IV) Como las partes delgadas de cualquier sección, enfriarán rápidamente que las partes gruesas, entonces estas secciones delgadas se deberán formar solo en los pasos finales, evitando con esto arrastre de una sección por otras lo que ocasionaría ondulaciones ó distorsiones del material.

Una buena práctica consiste en dar rápidamente en los primeros pasos la forma aproximada del producto y después ir balanceando cuidadosamente la elongación de las diferentes partes de la pieza, ya que si el alargamiento de una sección comprimida se impide, la deformación se transforma en ensanchamiento.

V.- Todos los lados de la pieza deberán ser trabajados, en laminación de planos esto es difícil de realizar pero se calcula que cuando la relación entre el ancho y la altura es de 6-9, el material ya no ensanchará. Pero si la parte mas comprimida del material es menor que la que no está tan comprimida, entonces el material si ensanchará.

Además el ensanchamiento depende de la reducción de área ó de altura obviamente a mayor reducción habrá mas ensanchamiento, con mayor diámetro de rodillos podría llegar a ocurrir mayor ensanchamiento, y por último la velocidad y temperatura de laminación también son un factor del ensanchamiento.

VI.- La pieza no deberá entrar a varios pasos sucesivos en la misma posición, el hacer esto causará que al material se le presione excesivamente entre los rodillos y causa el llamado "bigote", ó se puede hacer el paso con alguna convexidad lo cuál dará forma concáva al material dando por resultado mayor permisibilidad de ensanche sin llegar a la formación de bigotes. Pero siempre existe el peligro de hacer demasiado concáva a la pieza y en las esquinas podrían ocurrir traslapes que al cantearse producirán una especie de cisura que ya no tiene arreglo ni con posterior laminación debido a la capa de óxido que se formó entre el metal (Fig. 8)



Capa de óxido que no permite que el material solde.

Fig. 8

Es muy importante distinguir entre bigote y sobrellenado, puesto que el sobrellenado se puede cantar y laminar sin perjuicio del material y el bigote al ser laminado causará traslape y deterioro del material.



Fig. 9, a) bigote, b) sobrellenado.

VII.- Se debe evitar que el paso sea demasiado profundo puesto que esto hace al rodillo más débil al ser reducido su diámetro, de la misma manera los pasos deberán ser estrictamente modelados para evitar lados forzados en los rodillos puesto que los ángulos vivos y las esquinas son concentradores de tensiones.

Cuando el paso se hace muy profundo, la diferencia de velocidad periférica entre el fondo y el tope del paso hará que la parte del material que pase por el diámetro mayor elongará más rápidamente que la que pase por el interior del paso con lo cuál la pieza se ondulará y torcerá. Para evitar esto se recurre a usar rodillos con pequeña diferencia de diámetro, ya sea bajando ó subiendo el centro de masa de la pieza ó restringiendo la cantidad de reducción en la parte que se elonga más rápidamente.

G).- Si una canal va a trabajar con gran reducción no se debe colocar junto a ella una que efectúe poca reducción la razón de este es que con una y otra reducción la flexión de los rodillos no será la misma, y si el "salto" del rodillo está ya considerado en los cálculos, podría llegar a o - - -

-currir que al utilizar ambos pasos al mismo tiempo el "salto" del paso de gran reducción será mucho mayor, que el menor reducción, con el resultado de que no reducirá lo que se había calculado previamente.

La mejor colocación de la canal es aquella en la cual el radio de trabajo del rodillo superior es igual al radio de trabajo del rodillo inferior. Pero también se considera bueno en la práctica el tratar de obtener Presión Superior en el material (Fig. 10,) para mantener la barra contra el cincel inferior.

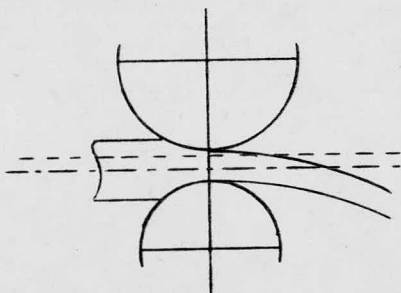


Fig. 10, Presión Superior.

La distribución de las canales en el rodillo también depende del tonelaje que se va a laminar, si es poca cantidad por laminar lo mejor es distribuir en el cuerpo del rodillo canales que sirvan para varios productos y así poder hacer una programación de varios productos aunque en poca cantidad pero sin tener que cambiar los rodillos.

Por otro lado si la campaña va a ser larga lo mejor se rá tener repetidos en el cuerpo los pasos ó calibraciones - para ese producto que se va a producir en gran cantidad y - así se tiene la ventaja de ir cambiando en el mismo rodillo conforme este se vaya gastando. Pero todo esto último son consideraciones en general y la decisión final se tomará en

-base a la situación particular de producción del molino de laminación.

H).- Al haber alguna duda en el diseño se pueden realizar pruebas que ayudarán a ir ajustando el diseño, pero el diseño mismo se debe de hacer para que esas correcciones y ajustes se hagan en la forma de torneado ó esmerilado y nunca aportando material como sería por soldadura ó cualquier relleno de material.

B).- OPERACION.

I.- El billete debe ser laminado a la máxima temperatura admisible, y el calentamiento debe ser uniforme para evitar grietas durante la laminación, esto es consecuencia del control que setenga del horno de precalentamiento, pero aún si se logra un buen calentamiento en la barra podrían llegar a ocurrir retrasos de operación que causará pérdida de temperatura en la barra, por eso se debe operar a la máxima temperatura, y lo más homogéneo posible para evitar ondulaciones del material.

II.- Se deben de tener en cuenta los cambios posibles de material al laminar ya que no todos responden de la misma manera a las condiciones de laminación.

III.- Si la velocidad de laminación es excesiva causará un aumento de resistencia a la comprensión pero por otro lado si se lamina a muy baja velocidad, ocurrirá lo que se mencionaba en el párrafo A del enfriamiento del material y con ello aumento de resistencia a la deformación causado por el excesivo "salto" del molino, y si la barra enfría demasiado podría llegarse hasta la rotura de los rodillos.

IV.- Se debe de tener cuidado de la temperatura en el caso líder, puesto que si la barra entra a una tem

-peratura al líder, la falta de plasticidad del material hará que los rodillos flexionen y la consecuencia de esto será un sobrellenado que al llegar así al paso acabador cuyos rodillos son más cortos y rígidos el material sólo tendrá el camino del ensanchamiento, resultando por lo tanto un producto defectuoso.

V.- Otra consideración la encontramos con respecto a la longitud de la barra laminada, es posible que si se ha laminado en un paso determinado con una longitud de barra y se han obtenido resultados satisfactorios; si ahora se tratara de laminar una barra de digamos una longitud dos veces mayor, la barra en este segundo caso enfriará por necesitar más tiempo para laminarse, con el resultado de mayor resistencia, mayor tenacidad y mayor salto.

VI.- El rechazo del material laminado puede tener su origen desde la acería, y al ser laminado salen a la superficie los defectos de fundición, pero ocurre con frecuencia que el fabricante responsabilice al laminador de los defectos en el producto. Pero si se cumplen las siguientes especificaciones el rechazo bajaría en al menos un 60%.

1.- Calidad superficial:

Evitar Inclusiones superficiales de restos de escoria refractario del horno, ó lingotera etc. Arrugas formadas por capas de óxidos tenaces no disueltos. Salpicaduras oxidadas que no soldarán durante el trabajado. Exudaciones producidas por segregación inversa. Fisuras por tensiones de tracción durante el enfriamiento.

2.- Calidad Interior:

Disminuir ó evitar: Rechuce producido por la contracción. Sopladuras producidas por gases. Inclusiones no metáli

-cas. Fisuras internas producidas durante la solidificación ó el enfriamiento. Segregación.

3.- Estructura:

Capaz de deformar en cualquier dirección y sin riesgo - de fractura ó grietas. Estructura Columnar lo menor posible, procurando que sea toda equiaxial. Si hay precipitados ó fases dispersas que estén lo más finamente distribuidos.

III.- HERRAMIENTA:

Esta parte ya ha sido mencionada en el primer capítulo sin embargo es de utilidad tener ciertos otros detalles como los que se mencionan a continuación.

a) Con respecto a los rodillos la resistencia que posean esto es la que nos dará la máxima reducción posible, ya que a mayor reducción es mayor la proyección del área de contacto debido a la flexión de los rodillos y también la tensión será mayor.

Si se busca mayor reducción, se necesitará mayor potencia y habrá más desgaste del rodillo y en algunos rodillos, si se da mayor reducción, ocasionará grietas de la superficie y pliegues superficiales.

En el capítulo de Práctica de Laminación se darán las maneras de calcular, longitud, área, y tiempo de contacto; velocidad de deformación, factor de elongación, resistencia a la compresión, fuerza separatriz, brazo de palanca y los cálculos de la potencia requerida en el molino de laminación.

TIPOS DE MOLINOS:

Los molinos ó trenes de laminación se clasifican en función del tamaño y la forma de la sección que producen; con ayuda del diagrama de laminación (fig. 11) podemos hacer una clasificación general de los trenes de laminación:

- I.- Laminadores de Tochos y Planchones. (Blooming, slabs, medios y slabs grandes.)
- II.- Laminadores intermedios.- (bilete, ó palanquilla, slabs pequeños).
- III.- Laminadores de Barras y Perfiles Comerciales. (Vigas, Angulos, Canales, Hexagonos, Zetas, redondos, cuadrados, etc.)
- IV.- Planos.
- V.- Tubos sin Costura.
- VI.- Laminación en Frio

Los tres últimos temas no serán tratados en el presente trabajo por la extensión que se requeriría para darles el tratamiento adecuado.

La materia prima con la que trabajan los Molinos Primarios es el lingote y normalmente este es de sección cuadrada ó rectangular y con sus aristas redondeadas, aunque se ha llegado a trabajar con secciones redondas ú ovaladas. Pero siempre se prefiere una sección cuadrada o rectangular que cumple ciertas ventajas como son: su mayor facilidad de manejo, se pueden almacenar simétricamente, su introducción al horno de precalentamiento es más sencilla, pueden ser guiados más fácilmente por los caminos de rodillos, y para el diseño es importante ya que no ofrecen gran dificultad en cuestiones de cálculo.

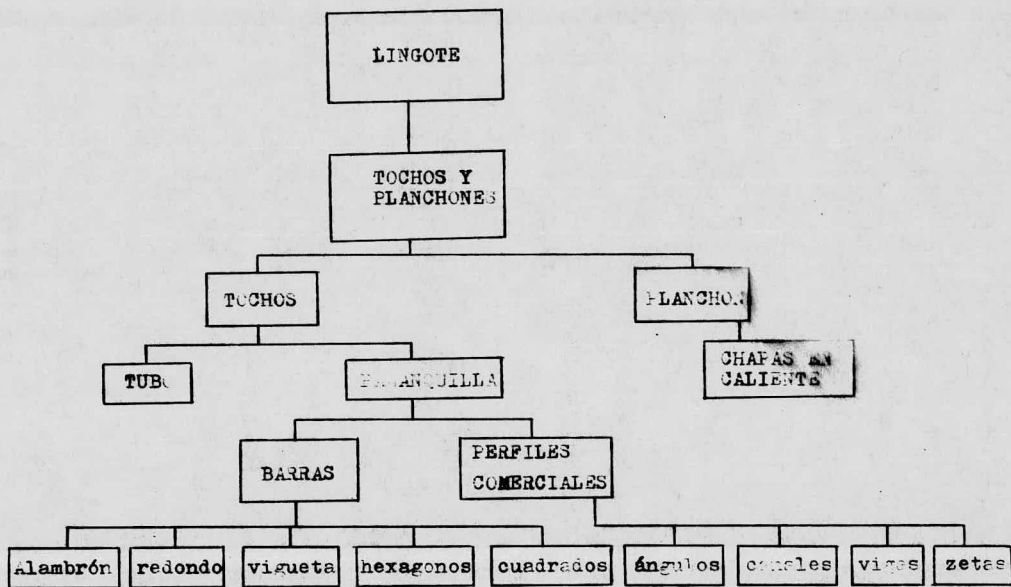


FIG. 11

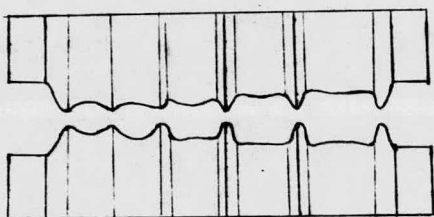
I) Laminadores Primarios ó de Tochos y Planchones.

a) Blooming ó Desbaste.

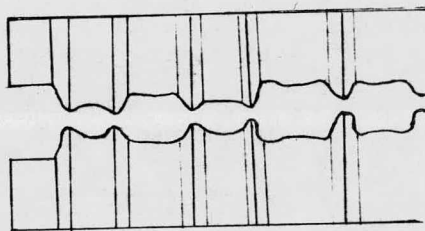
En el diseño de un molino de desbaste es necesario incluir:

-Un esquema completo de la secuencia de pasos; el cual incluirá el número de pasos, la distribución del coeficiente de reducción, y la observación de en que número de pasos ocurrirá el giro del material.

-Seleccionar la forma y dimensiones de los pasos y su arreglo en el cuerpo del rodillo, ya sea consecutivo ó simétrico (fig. 12)



a) Consecutivo



b) Simétrico

Los trenes de desbaste son los más potentes y de mayor producción que existen, y su producto ó sea el desbaste esta comprendido desde los 125 X 125 mm. a 450 X 450 mm. de sección transversal.

En vista de esa gran producción que deben ser capaces de dar y que van a trabajar con materiales distintos, y que

-van a producir desbastes de diferentes tamaños, se ve la necesidad de diseñar un molino de desbaste de una gran versatilidad.

Esa versatilidad en parte es lograda por el manejo individual de velocidad que poseen con sus propios motores, y en otra cierta medida porque generalmente son trenes dúos - reversibles, con lo cuál es más fácil ir ajustando para cada material y sección las dimensiones del paso ya sea subiendo ó bajando uno de los rodillos que para el caso se ha diseñado libre, con el otro rodillo fijo.

B) Slabbing ó Desbaste Plano.

El tren de desbaste plano tiene una producción menor - que el tren blooming aún cuando trabajan con lingotes de mayor paso y produce desbastes planos que van desde 75-200 mm. de grueso y 700-1600 mm. de ancho.

El diseño de los trenes de desbaste plano universales es sencillo ya que lo único que se debe calcular es la relación de longitud al diámetro del rodillo y la potencia necesaria para mover el laminador.

En los trenes Blooming-Slabbing lo único que hay que diseñar son las canales de canteo, estos trenes tienen generalmente en la primera caja los rodillos verticales y en la segunda horizontales y se disponen de tal manera que el slab se lamine simultáneamente en ambas, y el manejo de la primera caja se efectúa por medio de un motor para el stand completo y en el segundo mediante un motor para cada rodillo.

Siendo el molino slab un laminador primario al igual - que el Blooming, no podrá efectuar una gran reducción en las primeras pasadas, por lo general hasta la cuarta ó quinta pa

-sada podrá aumentar el porcentaje de reducción.

II.- Laminadores Intermedios ó Preparadores.

Los laminadores intermedios son el puente entre los trenes desbaste y los trenes acabadores; es decir su función es producir semiacabados como son palanquilla ó bilette, así como perfiles pequeños, los cuales se convierten en materia prima de los trenes acabadores.

Esta separación entre los trenes desbastadores y acabadores mediante los laminadores intermedios es un punto importante en el diseño de una planta, puesto que hace independiente el diseño del molino acabador, lográndose con esto flexibilidad y libertad de diseño. Además de que es posible realizar una inspección del material antes de ser laminado a su forma final.

Los rodillos preparadores a diferencia de los de trenes de perfiles solo realizan un trabajo de alargamiento y disminución de sección; y no de modificación de la forma de la pieza como en el de perfiles. Y en el diseño de rodillos preparadores se tiende a producir el mayor número de cuadrados posible, los cuales van a ser utilizados como sección de partida para el tren acabador.

Los trenes intermedios ó preparadores son en su enorme mayoría tríos, y en este caso es necesario tomar en cuenta otros factores como son la presión superior ó inferior que es el resultado del diámetro de diseño de los rodillos laminadores. Al respecto Hoff y Dahall aconsejan que para la mejor utilización de los rodillos estos se diseñen con diámetros idénticos; lográndose con esto que se puedan intercambiar sin ningún problema. Pero si se trabaja en un tren trío con rodillos intercambiables, debe procurarse, a causa de -

-los planos de laminación superpuestos, disponer un sentido de salida fijo para la barra que se lamina y resultado de ello se trabajará con presión superior ó presión inferior. Y puesto que lo que se ha buscado es que los rodillos sean intercambiables y por otro lado nose afecte la presión superior ó inferior, entonces los autores antes mencionados proponen dos procedimientos para la solución de esta situación.

-- Si lo que se preveen ambos planos de laminado es presión superior, el rodillo superior tendrá que ser el mas grueso. "Para esto se disponen dos pares de líneas de laminación, como las representadas en la fig. 12 con líneas de puntos y de punto y trazo, respectivamente. Sobre la línea de punto y trazo vendrá dispuesta la línea neutra de la canal utilizada en el rodillo superior; en cambio la línea neutra de la canal utilizada en el rodillo inferior coincidirá con la línea de puntos. El rodillo superior tiene un diámetro mayor que el central cuando se presiona desde arriba. El rodillo central tiene un diámetro mayor que el inferior cuando se presiona desde abajo. En consecuencia, existe presión superior en todas las canales utilizadas. Las relaciones permanecen invariables cuando se cambian entre si los rodillos superior e inferior."

-- "El rodillo central es más grande ó mas pequeño que los otros dos (superior e inferior). Si es mayor, entonces se tiene presión inferior para el plano superior de laminación y presión superior para el plano inferior. Si, por el contrario, el cilindro central es menor, se tiene presión superior en el plano superior y presión inferior en el plano inferior. La línea neutra de todas las canales coincide con la línea de laminación superior ó inferior. Si los rodillos superior e inferior tienen el mismo diámetro, pueden intercambiarse sin modificar las relaciones" Fig. 13

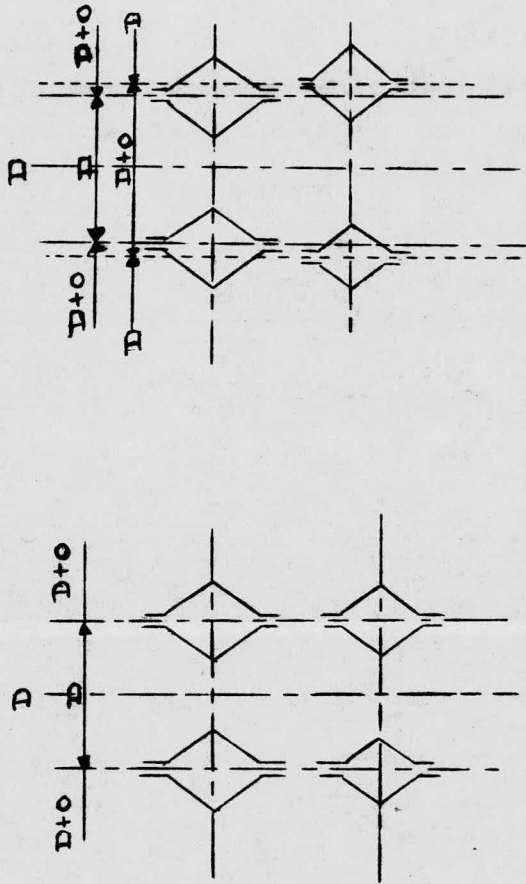
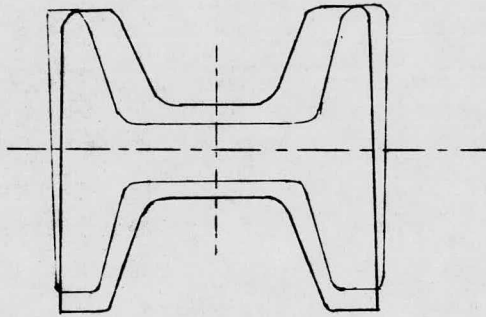


Fig. 13

FIG. 14

Parte abierta de la canal. Pequeña
reducción de altura y gran reducción
de anchura



alma
gran reducción de altura y
pequeña reducción de anchura.
parte cerrada de la canal.
Gran reducción de altura y
pequeña reducción de anchura

III.- Laminadores de Barras y Perfiles Comerciales.

A) Laminadores de Perfiles.

Usualmente se ha clasificado a los laminadores de perfiles en tres tipos: grandes, medios y ligeros, como se puede ver esta división es totalmente arbitraria y debido al desarrollo de los molinos laminadores con una gran variedad de productos también ha perdido algo de validez.

Sin embargo se sigue entendiendo como perfiles livianos a los ángulos de 16 X 16 mm. a 50 X 50 mm; Teés de 20 X 20 hasta 40 X 40 mm.; Ués y Dobles Teés de hasta 60 mm. de anchura etc.

Los perfiles medianos podrían ser: Dobles T y Ues hasta 120 mm. de profundidad, ángulos de 50 X 50 mm. a 100 X 100 mm. y perfiles similares.

Y los perfiles grandes: vigas y Ues de 120-240 mm. de altura, canales de alma delgada, y perfiles similares. Cuando se necesita laminar alguna canal con alma demasiado grande se utiliza el molino universal que consiste de un juego de rodillos verticales y horizontales en el mismo plano.

En el diseño de perfiles comerciales las tolerancias dimensionales y de peso que exigen las normas de aceptación son fácilmente llenadas, aquí lo que hay que buscar es que la reducción elegida no desgaste demasiado rápido los rodillos y los calibres y cuidar que no haya problemas de entrada del material.

El método de laminar los perfiles como: Canales, Teés, Ués, Zetas y rieles es tan extenso como el uso que se les va a dar a cada uno de estos perfiles.

Sin embargo un problema común de todos estos perfiles mencionados es la conformación distinta que cada una de las partes del perfil deberá sufrir hasta llegar a la forma final.

Al laminar el alma de una canal esta sufrirá reducción de tamaño en sentido vertical y las alas se deformarán ya sea en la parte abierta ó cerrada de la canal. Si es en la parte abierta se reducirá el espesor con el consecuente crecimiento en las alas, y se considera esto como un ensanchamiento, si la deformación ocurre en la parte cerrada de la canal ó sea la que está limitada solo por un rodillo, ocurrirá una reducción de altura del ala.

Existen múltiples opiniones de expertos sobre la forma de resolver este problema de diseño, sin embargo casi todas las opiniones difieren en su base.

La opinión de Hoff y Dahall basada en la experiencia del autor y partiendo de un hecho bastante evidente como es la gran diferencia en la distribución de tensiones y flujo del material en las canales cerradas y abiertas (fig. 14), se llega a la conclusión de que es posible lograr una reducción tanto en la canal abierta como en la cerrada aunque se debe tener en cuenta que en la canal cerrada solo será posible cuando se trabaja con un determinado grado de esbeltez.

B) Laminadores de Barras comerciales.

Dentro de las barras comerciales se encuentran los redondos y cuadrados que también se han clasificado en grandes (30-150 mm.), medios (40-30 mm.) y ligeros de (8-40 mm .), además los hexagonos y el alambón que en los últimos años se ha tendido a independizar de los trenes para barras.

Al contrario de las tolerancias permitidas en los

-perfiles, en la laminación de barras comerciales las tolerancias se vuelven más restringidas, y la tolerancia mínima aceptable para un alambron va en relación al trabajo que va a realizar la pieza.

En el diseño del rodillo laminador de barras y alambrones siempre se buscará producir la mayor cantidad de medidas en el mismo juego de rodillos, y con ello se evitan los cambios constantes de rodillos durante la producción.

Para el desbaste de barras y alambrones se ha generalizado el uso de tres tipos de reducciones:

Pasada Cajón.- La cual presenta el problema de no permitir reducción muy grande y además es complicado el control del ensanchamiento por lo cual no se utiliza para materiales con alta ductilidad. Pero la pasada de cajón posee la ventaja de no ocupar demasiado espacio de tabla y dar un eficaz descascarillado del metal.

Pasada Cuadrado-Diamante.- La forma diamante ocupa mucho espacio en la tabla del rodillo además de que en las llamadas "puntas" del diamante en enfriamiento de la barra es más rápido. Pero la secuencia Cuadrado-diamante permite una gran reducción y el descascarillado es satisfactorio.

Pasada Cuadrado-Ovalo.- Este tipo de secuencia va cayendo en desuso debido al pobre descascarillado y ala dificultad que presenta para obtener un buen ensanchamiento del óvalo y en consecuencia una correcta entrada en el cuadrado.

En los pasos intermedios se usa ampliamente la secuencia cuadrado-óvalo ya que en estos pasos intermedios no es tan importante el descascarillado como en el desbaste.

Cuando el producto final sea muy fino y además se necesite obtener una reducción rápida para evitar que el material se enfríe, la secuencia óvalo-cuadrado es lo más adecuado;- pero si lo que se está buscando es mayor calidad es posible utilizar la secuencia óvalo-redondo como serie acabadora.

Pero como es lógico razonar, el tamaño de la sección de partida y el número de pasadas disponible en el tren serán determinantes en la secuencia a utilizar.

Para el diseño del óvalo terminador es necesario tener en cuenta varios factores como son:

--Evitar gran reducción entre los pasos líder y acabador ó sea que el óvalo líder sea lo más semejante al redondo acabador, con lo cual también se evita gran desgaste de la canal, mejor calidad de superficie y mayor precisión de llenado, pero este tipo de óvalo acarrea el problema de tener un buen manejo de los guías de entrada, las guías con rodajas ayudan a esto con bastante aceptación.

--Es práctica común usar óvalos "panzones" para redondos grandes y óvalos planos para redondos chicos, es decir, la relación: ancho-espesor del óvalo líder aumenta en relación directa al tamaño del redondo acabador.

C A P I T U L O 4

PRACTICA DE LAMINACION:

En este último capítulo se tratará de dar un ejemplo - lo más completo posible de los datos de calibración necesarios en el diseño de un Molino de Laminación.

Cuando se diseñe un molino es imprescindible determinar todos los datos que en la siguiente Práctica de Laminación se mostrarán. Además se dará una explicación de la manera en que han sido obtenidos.

Cuando se hayan determinado todos estos datos se podrá predecir con bastante exactitud la eficiencia del Molino, y en el caso de un diseño deficiente será posible analizar - las potenciales causas del fallo.

PRACTICA DE LAMINACION Y DATOS DE CALIBRACION PARA UNA CANAL DE 4" X 4".

Columna A: Indica el número de paso.

Columna B: Indica el número del castillo.

(en el Paso 0 se usa el desbaste de 22", en los pasos 1o. y 2o. se usa el 1er. castillo del molino 14", en los pasos 3o. y 4o. se pasa al 2o. castillo, el 5o. paso se da en el 3er. castillo, y el paso líder en el 4o. castillo, para finalmente el paso acabador se da en el 5o. castillo).

Columna C: Indica el tamaño nominal del molino, siendo en este caso de 14".

Columna D: Representa la forma y dimensiones de cada una de las secciones a la salida del paso. (ver croquis).

Columna E: Indica la altura a la salida del paso.

Columna F: Indica el ancho a la salida del paso.

Columna G: Indica el espesor del patin.

Columna H: Indica las áreas de cada sección.

Columna I: Indica la reducción de área.

$$\text{Relativa} = A_i - A_f$$

Columna J: Indica la reducción relativa del área en %.

$$r_1 = \frac{A_0 - A_1}{A_0} = \frac{8.60 - 5.73}{8.60} \times 100 = 33.3 \%$$

$$r_2 = \frac{A_1 - A_2}{A_1} = \frac{5.73 - 4.64}{5.73} \times 100 = 19.02 \%$$

$$r_3 = \frac{A_2 - A_3}{A_2} = \frac{4.64 - 3.34}{4.64} \times 100 = 28.01\%$$

$$r_4 = \frac{A_3 - A_4}{A_3} = \frac{3.34 - 2.55}{3.34} \times 100 = 23.65\%$$

$$r_5 = \frac{A_4 - A_5}{A_4} = \frac{2.55 - 2.09}{2.55} \times 100 = 18.03\%$$

$$r_6 = \frac{A_5 - A_6}{A_5} = \frac{2.09 - 1.76}{2.09} \times 100 = 15.78\%$$

$$r_7 = \frac{A_6 - A_7}{A_6} = \frac{1.76 - 1.58}{1.76} \times 100 = 10.22\%$$

COLUMNA K.- Indica la altura del **rectángulo** equivalente (he)

$$\text{Paso 1.- } he_1 = \frac{A_1}{b_1} = \frac{5.73}{4.044} = 1.416$$

$$\text{Paso 2.- } he_2 = \frac{A_2}{b_2} = \frac{4.64}{4.093} = 1.133$$

$$\text{Paso 3.- } he_3 = \frac{A_3}{b_3} = \frac{3.34}{4.0625} = 0.822$$

$$\text{Paso 4.- } he_4 = \frac{A_4}{b_4} = \frac{2.55}{4.031} = 0.632$$

$$\text{Paso 5.- } he_5 = \frac{A_5}{b_5} = \frac{2.09}{4.015} = 0.520$$

$$\text{Paso 6.- } he_6 = \frac{A_6}{b_6} = \frac{1.76}{4.0625} = 0.433$$

$$\text{Paso 7.- } h_{e7} = \frac{A_7}{b_7} = \frac{1.58}{4} = 0.395$$

Columna L: Indica la longitud proyectada del arco de contacto
(se utiliza el diámetro de trabajo).

$$\text{Paso 1.- } AB = \sqrt{R_{t1} (h_o - h_{e1})}$$

$$AB_1 = \sqrt{7.292 (3.125 - 1.416)} = 3.530''$$

$$AB_2 = \sqrt{7.4335 (1.416 - 1.133)} = 1.450''$$

$$AB_3 = \sqrt{7.5883 (1.133 - 0.8221)} = 1.536''$$

$$AB_4 = \sqrt{7.6837 (0.8221 - 0.6325)} = 1.206''$$

$$AB_5 = \sqrt{7.7398 (0.6325 - 0.5204)} = 0.931''$$

$$AB_6 = \sqrt{7.7834 (0.5204 - 0.4332)} = 0.823''$$

$$AB_7 = \sqrt{7.8025 (0.4332 - 0.395)} = 0.545''$$

Columna M.- Indica el area proyectada del arco de contacto
considerando un ensanchamiento lineal.

$$\text{Paso 1.- } \frac{b_o + b_i}{2} = \frac{3.875 + 4.044}{2} = 3.959$$

$$A_1 = 3.959 \times 3.530 = 13.975$$

$$\text{Paso 2.- } \frac{4.044 + 4.093}{2} = 4.068$$

$$A_2 = 4.068 \times 1.450 = 5.898$$

$$\text{Paso 3.- } \frac{4.093 + 4.062}{2} = 4.077$$

$$A_3 = 4.077 \times 1.536 = 6.262$$

$$\text{Paso 4.- } \frac{4.062 + 4.031}{2} = 4.046$$

$$A_4 = 4.046 \times 1.206 = 4.879$$

$$\text{Paso 5.- } \frac{4.031 + 4.015}{2} = 4.023$$

$$A_5 = 4.023 \times 0.931 = 3.745$$

$$\text{Paso 6.- } \frac{4.015 + 4.062}{2} = 4.038$$

$$A_6 = 4.038 \times 0.823 = 3.323$$

$$\text{Paso 7.- } \frac{4.062 + 4}{2} = 4.031$$

$$A_7 = 4.031 \times 0.545 = 2.196$$

Columna N.- Indica el diámetro del collar del rodillo en cada uno de los pasos y castillos.

Columna O.- Indica el diámetro de trabajo efectivo y es el que corresponde al centro de gravedad de la sección que está en contacto con los rodillos.

$$D_t = D \text{ nominal} + \text{luz entre rodillos} - h_{e1}$$

$$\text{Paso 1.- } D_{t1} = 15^{11}/16^{11} + 5/16^{11} - 1.416 = 14.584$$

$$\text{Paso 2.- } D_{t2} = 15^{11}/16^{11} + 5/16 - 1.133 = 14.867$$

$$\text{Paso 3.- } D_{t3} = 15^{23}/32 + 9/32 - 0.822 = 15.178$$

$$\text{Paso 4.- } D_{t4} = 15^{23}/32 + 9/32 - 0.632 = 15.368$$

$$\text{Paso 5.- } D_{t5} = 15^3/4 + 1/4 - 0.520 = 15.480$$

$$\text{Paso 6.- } D_{t6} = 15^{13}/16 + 3/16 - 0.433 = 15.567$$

Paso 7.- $D_{t7} = 15^{1.3} 16 + 3/16 - 0.395 = 15.605$

Columna P.- Indica la velocidad de los rodillos en R.P.M.

Columnas Q y R.- Indican la velocidad de la barra a la salida del paso.

Paso 1.- $V_1 = \frac{\pi n D_t}{12}$

$$V_1 = \frac{\pi \times 165 \times 14.584}{12} = 629.98 \text{ pies/min. } \div 60 = 10.49 \text{ pies/seg.}$$

Paso 2.- $V_2 = \frac{\pi \times 165 \times 14.867}{12} = 642.20 \text{ pies/min. } \div 60 = 10.70 \text{ pies/seg.}$

Paso 3.- $V_3 = \frac{\pi \times 165 \times 15.178}{12} = 655.64 \text{ pies/min. } \div 60 = 10.92 \text{ pies/seg.}$

Paso 4.- $V_4 = \frac{\pi \times 165 \times 15.368}{12} = 663.84 \text{ pies/min. } \div 60 = 11.06 \text{ pies/seg.}$

Paso 5.- $V_5 = \frac{\pi \times 165 \times 15.480}{12} = 668.68 \text{ pies/min. } \div 60 = 11.14 \text{ pies/seg.}$

Paso 6.- $V_6 = \frac{\pi \times 400 \times 15.567}{12} = 1,630.17 \text{ pies/min. } \div 60 = 27.16 \text{ pies/seg}$

Paso 7.- $V_7 = \frac{\pi \times 400 \times 15.605}{12} = 1,634.15 \text{ pies/min. } \div 60 = 27.23 \text{ pies/seg.}$

Columna S.- Indica la velocidad de deformación

Paso 1.- $\bar{AB} = \left[\frac{R_t^2 - (R_t - h_{e_0} - h_{e_1})^2}{2} \right]^{1/2} = X$

Con esto se puede sacar el ángulo de contacto

$$\sin \alpha = \frac{X}{R_t} = X_1 \qquad \alpha = Y^\circ$$

Después se calcula el tiempo de contacto.

$$\text{Tiempo de contacto} = \frac{60 \times Y^0}{N \times 360^\circ} = Y_1$$

Y entonces es posible calcular la velocidad de deformación.

$$\text{velocidad de deformación} = \frac{he_0 - he_1}{he_0} \times \frac{1}{Y_1}$$

$$\text{Paso 1.- } \overline{AB} = \left[7.292^2 - \frac{(7.292 - 3.125 - 1.416)^2}{2} \right]^{1/2}$$

$$= \left[53.173 - (41.441) \right]^{1/2} = 3.425$$

$$\text{sen } \alpha = \frac{3.425}{7.292} = 0.469 \quad \alpha = 28.01^\circ$$

$$T = \frac{60 \times 28.01}{165 \times 360} = 0.0282$$

$$\text{vel. de def.} = \frac{3.125 - 0.0282}{0.0282} = 19.39 \text{ l/seg.}$$

$$\text{Paso 2.- } \overline{AB} = \left[7.433^2 - \frac{(7.433 - 1.416 - 1.133)^2}{2} \right]^{1/2}$$

$$= \left[55.256 - (53.165) \right]^{1/2} = 1.44$$

$$\text{sen } \alpha = \frac{1.44}{7.433} = 0.193 \quad \alpha = 11.17$$

$$t = \frac{60 \times 11.17}{165 \times 360} = 0.0112$$

$$\text{vel. de def.} = \frac{1.416 - 0.0112}{0.0112} = 17.84$$

$$\text{Paso 3.- } \overline{AB} = \left[7.589^2 - (7.589 - \frac{1.133 - 0.822}{2})^2 \right]^{1/2}$$

$$\overline{AB} = \left[57.592 - (55.256) \right]^{1/2} = 1.528$$

$$\text{sen } \alpha = \frac{1.528}{7.589} = 0.201 \quad \alpha = 11.61^\circ$$

$$t = \frac{60 \times 11.61}{165 \times 360} = 0.0117$$

$$\text{vel. de def.} = \frac{1.133 - 0.822 \times 1}{1.133 \quad 0.0117} = 23.46$$

$$\text{Paso 4.- } \overline{AB} = \left[7.684^2 - (7.684 - \frac{0.822 - 0.632}{2})^2 \right]^{1/2}$$

$$\overline{AB} = \left[59.043 - (57.592) \right]^{1/2} = 1.20$$

$$\text{sen } \alpha = \frac{1.20}{7.684} = 0.156 \quad \alpha = 9.02^\circ$$

$$t = \frac{60 \times 9.02}{165 \times 360} = 0.0091$$

$$\text{vel. de def.} = \frac{0.822 - 0.632 \times 1}{0.822 \quad 0.0091} = 25.34$$

$$\text{Paso 5.- } \overline{AB} = \left[7.74^2 - (7.74 - \frac{0.632 - 0.520}{2})^2 \right]^{1/2}$$

$$\overline{AB} = \left[59.9 - (59.04) \right]^{1/2} = 0.925$$

$$\text{sen } \alpha = \frac{0.925}{7.74} = 0.119 \quad \alpha = 6.86$$

$$t = \frac{60 \times 6.86}{165 \times 360} = 0.0069$$

$$\text{vel. de def.} = \frac{0.632 - 0.520 \times 1}{0.632 \quad 0.0069} = 25.63$$

$$\text{Paso 6.- } \overline{AB} = \left[7.783^2 - (7.783 - \frac{0.520 - 0.433}{2})^2 \right]^{1/2}$$

$$= \left[60.582 - (59.899) \right]^{1/2} = 0.825$$

$$\text{sen } \alpha = \frac{0.825}{7.783} = 0.106 \quad \alpha = 6.09$$

$$t = \frac{60 \times 6.09}{400 \times 360} = 0.0025$$

$$\text{vel. de def.} = \frac{0.520 - 0.433 \times 1}{0.520 \quad 0.0025} = 67.02$$

$$\text{Paso 7.- } \overline{AB} = \left[7.80^2 - (7.80 - \frac{0.433 - 0.395}{2})^2 \right]^{1/2}$$

$$\left[60.87 - (60.54) \right]^{1/2} = 0.574$$

$$\text{sen } \alpha = \frac{0.574}{7.80} = 0.073 \quad \alpha = 4.22^\circ$$

$$t = \frac{60 \times 4.22}{400 \times 360} = 0.0017$$

$$\text{vel. de def.} = \frac{0.433 - 0.395 \times 1}{0.433 \quad 0.0017} = 49.91$$

Columna T.- Indica la máxima elongación de la barra.

$$\text{Paso 1.- Grado de alargamiento} = \frac{A_0}{A_1} = \frac{8.60}{5.73} = 1.500$$

$$\text{Paso 2.-} = \frac{A_0}{A_2} = \frac{8.60}{4.64} = 1.853$$

$$\text{Paso 3.-} = \frac{A_0}{A_3} = \frac{8.60}{3.34} = 2.574$$

$$\text{Paso 4.-} \quad = \frac{A_0}{A_4} = \frac{8.60}{2.55} = 3.372$$

$$\text{Paso 5.-} \quad = \frac{A_0}{A_5} = \frac{8.60}{2.09} = 4.144$$

$$\text{Paso 6.-} \quad = \frac{A_0}{A_6} = \frac{8.60}{1.76} = 4.88$$

$$\text{Paso 7.-} \quad = \frac{A_0}{A_7} = \frac{8.60}{1.58} = 5.44$$

Columna U.- Indica la longitud de la barra caliente en pies.

$$\text{Paso 0.- } l_0 = 24.17$$

$$\text{Paso 1.- } l_1 = 1.500 \times 24.17 = 36.25$$

$$\text{Paso 2.- } l_2 = 1.853 \times 24.17 = 44.79$$

$$\text{Paso 3.- } l_3 = 2.574 \times 24.17 = 62.21$$

$$\text{Paso 4.- } l_4 = 3.372 \times 24.17 = 81.50$$

$$\text{Paso 5.- } l_5 = 4.114 \times 24.17 = 99.44$$

$$\text{Paso 6.- } l_6 = 4.88 \times 24.17 = 117.96$$

$$\text{Paso 7.- } l_7 = 5.44 \times 24.17 = 131.49$$

Columna V.- Indica la temperatura de la barra al salir de cada paso. Las fórmulas usadas son las de H. Wright y T. Hope.

$$\text{Paso 0 temp. Inicial} = 2,200^{\circ}\text{F}$$

La fórmula para determinar la caída de temperatura en el paso se divide en tres partes (Ganancia de temperatura por el trabajado mecánico; pérdida por radiación y pérdida por conducción).

$$\Delta\Theta = \frac{\text{Ganancia mecánica}}{100} + \frac{\text{Pérdida radiación}}{15.25 t_2} - \frac{0.2 \ln H - 41.5}{h} - \frac{0.1 \cdot 10^{-12}}{h}$$

Caída de temperatura
Donde

$$- \frac{5.70 \cdot i}{H + h} \cdot \frac{1}{NR} \quad (Rd) \quad 0.5$$

Pérdida por conducción

θ_1 = Temperatura del material a la entrada; °C

H = Altura del material a la entrada; MM

h = Altura del material a la salida; MM

t_2 = Tiempo de enfriamiento; °C

θ = Temp. del material; °K

N = Vel. de los rodillos; RPM

d = H - h

R = radio del rodillo; MM

Paso 1.-

$$\theta_1 = 1,204 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$H = 3.125" = 78.125 \text{ MM}$$

$$h = 2.273 = 57.73 \text{ MM}$$

$$t_2 = 3 \text{ seg.}$$

$$\theta = 1204 + 273 = 1477 \text{ } ^\circ\text{K}$$

$$N = 165 \text{ R.P.M.}$$

$$d = H - h = 20.39 \text{ MM}$$

$$R = 7.292" = 185.21 \text{ MM}$$

$$\Delta\theta_1 = \left[\frac{77(1+1100-1204 \cdot 0.2)}{100} \ln \frac{78.125}{57.73} - 41.5 \right] \frac{15.25 (3)(1477)^4 \times 10^{-12}}{57.73}$$

$$\left[\frac{-5.7 (1,204)}{78.125+57.73} \frac{1}{165 (185.21)} (185.21 \times 20.39)^{0.5} \right]$$

$$= -23.19 - 3.77 - 0.044 = -27.92 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Paso 2.-

$$\theta_1 = 1204 - 27.92 = 1,176 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$H = 2.273'' = 57.73 \text{ mm.}$$

$$h = 2.156'' = 54.76 \text{ mm}$$

$$t_2 = 3 \text{ seg.}$$

$$\theta = 1176 + 273 = 144 \text{ } ^\circ\text{K}$$

$$N = 165 \text{ R. P. M.}$$

$$d = H - h = 2.97 \text{ mm}$$

$$R = 7.433'' = 188.79 \text{ mm}$$

$$\Delta \theta_2 = \left[77 \left(1 + \frac{1100 - 1176 \cdot 0.2}{100} \right) \ln \frac{57.73}{54.76} - 41.5 \right] - \left[\frac{15.25 (3)}{54.76} \right. \\ \left. (1449)^4 \times 10^{-12} \right] \\ - \left[\frac{5.7 (1,176)}{57.73 + 54.76} \frac{1}{165} \frac{(188.79 \times 2.97)^{0.5}}{(188.79)} \right]$$

$$\Delta \theta_2 = -38.05 \quad 3.68 \quad 1.64 = -43.37^\circ\text{C}$$

Paso 3.-

$$\theta_1 = 1176 - 43.37 = 1132.6^\circ\text{C}$$

$$H = 2.156'' = 54.76 \text{ mm}$$

$$h = 1.906'' = 48.41 \text{ mm}$$

$$t_2 = 5 \text{ seg.}$$

$$\theta = 1132.6 + 273 = 1.405.6$$

$$N = 165 \text{ R. P. M.}$$

$$d = H - h = 54.76 - 48.41 = 6.35$$

$$R = 7.588'' = 192.7 \text{ mm}$$

$$\Delta \theta_3 = \left[77 \left(1 + \frac{1100 - 1132.6 \cdot 0.2}{100} \right) \ln \frac{54.76}{48.41} - 41.5 \right] - \left[\frac{15.25 (5)}{48.41} \right. \\ \left. (1405.6)^4 \times 10^{-12} \right]$$

$$- \left[\frac{5.7 (1132.6)}{54.76 + 48.41} \frac{1}{165} \frac{1}{(192.7 \times 6.35^{0.5})} \right]$$

$$\Delta \theta_3 = -32.6 \quad 6.14 \quad 2.07 = -38.7^\circ\text{C}$$

Paso 4.-

$$\theta_1 = 1132.6 - 38.7 = 1093.9^\circ\text{C}$$

$$H = 1.906" = 48.41 \text{ mm}$$

$$h = 1.812" = 46.02 \text{ mm}$$

$$t_2 = 3 \text{ seg.}$$

$$\theta = 1093.9 + 273 = 1366.9^\circ\text{K}$$

$$N = 165 \text{ R. P. M.}$$

$$d = H - h = 48.41 - 46.02 = 2.39 \text{ mm}$$

$$R = 7.683" = 195.14 \text{ mm}$$

$$\Delta \theta_4 = \left[\frac{77(1+1100-1,093.9 \cdot 0.2)}{100} \ln \frac{48.41}{46.02} - 41.5 \right] - \left[\frac{15.25(3)(1366.9)^4}{46.02} \right. \\ \left. \times 10^{-12} \right] \\ - \left[\frac{5.7 (1093.9)}{48.41 + 46.02} \frac{1}{165} \frac{1}{(195.14 \times 2.39^{0.5})} \right]$$

$$\Delta \theta_4 = -37.55 \quad 3.47 \quad 1.71 = -41.01^\circ\text{C}$$

Paso 5.-

$$\theta_1 = 1093.9 - 41.01 = 1052.9^\circ\text{C}$$

$$H = 1.812" = 46.02 \text{ mm}$$

$$h = 1.781" = 45.23 \text{ mm}$$

$$t_2 = 3 \text{ seg.}$$

$$\theta = 1052.9 + 273 = 1,325.9^\circ\text{K}$$

$$N = 165 \text{ R. P. M.}$$

$$d = H - h = 46.02 - 45.23 = 0.79 \text{ mm}$$

$$R = 7.739'' = 196.57 \text{ mm}$$

$$\Delta\theta_5 = \left[77 \left(1 + \frac{1100 - 1052.9 \cdot 0.2}{100} \right) \ln \frac{46.02 - 41.5}{45.23} - \left[\frac{15.25 (3)}{45.23} \right. \right. \\ \left. \left. \frac{(1325.9)^4 \times 10^{-12}}{5.7 (1052.9)} \frac{1}{46.02 + 45.23} \frac{1}{165 (196.57)} (196.57 \times 0.79)^{0.5} \right] \right]$$

$$\Delta\theta_5 = [-40.16 - 3.12 - 0.019] = -43.27^\circ\text{C}$$

Paso 6.-

$$\theta_1 = 1052.9 - 43.27 = 1,009.63^\circ\text{C}$$

$$H = 1.781'' = 45.23 \text{ mm}$$

$$h = 1.656'' = 42.06 \text{ mm}$$

$$t_2 = 5 \text{ seg.}$$

$$\theta = 1009.63 + 273 = 1,282.63^\circ\text{K}$$

$$N = 400 \text{ R. P. M.}$$

$$d = H - h = 45.23 - 42.06 = 3.17 \text{ mm}$$

$$R = 7.783'' = 197.6 \text{ mm}$$

$$\Delta\theta_6 = 77 \left(1 + \frac{1100 - 1009.6 \cdot 0.2}{100} \right) \ln \frac{45.23 - 41.5}{42.06} - \frac{15.25}{42.06}$$

$$\frac{(5) (1282.6)^4 \times 10^{-12}}{5.7 (1008.6)} \frac{1}{45.23 + 42.06} \frac{1}{400 (197.6)} (197.6 \times 3.17)^{0.5}$$

$$- \frac{5.7 (1008.6)}{45.23 + 42.06} \frac{1}{400 (197.6)} (197.6 \times 3.17)^{0.5}$$

$$\Delta\theta_6 = -34.8 \quad 4.9 \quad 0.017 = -39.5^\circ\text{C}$$

Paso 7.-

$$\theta_1 = 1009.6 = 970.1$$

$$H = 1.656" = 42.06 \text{ mm}$$

$$h = 1.906" = 48.41$$

$$t_2 = 5 \text{ seg.}$$

$$\theta = 970.1 + 273 = 1243.1^\circ\text{K}$$

$$N = 400 \text{ R. P. M.}$$

$$d = H - h = 42.06 - 48.41 = -6.35 \text{ mm}$$

$$R = 7.802" = 198.1 \text{ mm}$$

$$\Delta\theta_7 = \left[77 \left(1 + \frac{1100 - 970.1 \cdot 0.2}{100} \right) \ln \frac{42.06 - 41.5}{48.41} \right] - \left[\frac{15.25 (5)}{48.41} \right]$$

$$\frac{(1243.1)^4 \times 10^{-12}}{42.06 \text{ etc.}} - \frac{5.7 (970.2)}{42.06 \text{ etc.}}$$

$$\Delta\theta_7 = -27.8 \quad 3.76 \quad .021 \quad = -31.5 = 938.4^\circ\text{C}$$

$$\text{Temperatura final} = 970 - 31.5 = 938.4^\circ\text{C}$$

Columna W.- Indica la resistencia a la compresión.

El cálculo está basado en fórmulas de Cook y Mc Crum. La resistencia a la compresión está dado directamente en las tablas de Cook y Mc Crum bajo las siglas J_p (ver cálculo fuerza separa, - triz. Columna AA). El valor de la resistencia a la compresión está dado en toneladas por pulgada cuadrada.

De tablas:

$$\text{Paso 1.- } 3.9 \text{ ton/pulg}^2$$

$$\text{Paso 2.- } 5.2 \text{ ton/pulg}^2$$

$$\text{Paso 3.- } 6.7 \text{ Ton/pulg}^2$$

$$\text{Paso 4.- } 6.6 \text{ ton/pulg}^2$$

$$\text{Paso 5.- } 6.3 \text{ ton/pulg}^2$$

$$\text{Paso 6.- } 9.9 \text{ ton/pulg}^2$$

Paso 7.- En el paso acabador ya no se aplican las tablas, pues to que como se ven en los datos de diseño, ya no hay reducción de altura; pero se consideran para fines prácticos que el paso líder y el acabador tienen las mismas características.

Paso 7.- 9.9 ton/pulg²

Columnas X, Y y Z.- Indican el tiempo estimado en segundos.

Tiempo t_x = $\frac{\text{longitud de la barra en pies}}{\text{vel. a la salida del paso en pies/seg.}}$

tiempo t_y = es el intervalo entre pasos

tiempo t_z = es el intervalo en el paso, entre pasos y el paso siguiente.

Paso 1.- $t_x = \frac{36.25}{10.49} = 3.45 \text{ seg.} \approx 3.5 \text{ seg.}$	}	$t_y = 3 \text{ seg.}; t_z = t_x = 3.5 \text{ seg.}$
Paso 2.- $t_x = \frac{44.79}{10.70} = 4.18 \text{ seg.} \approx 4.2 \text{ seg.}$		
Paso 3.- $t_x = \frac{62.21}{10.92} = 5.69 \text{ seg.} \approx 5.7 \text{ seg.}$	}	$t_y = 5 \text{ seg.}; t_x = 10.7 + 5 + 5.7 = 21.4 \text{ seg.}$
Paso 4.- $t_x = \frac{81.50}{11.06} = 7.36 \text{ seg.} \approx 7.4 \text{ seg.}$		
Paso 5.- $t_x = \frac{99.44}{11.14} = 8.92 \text{ seg.} \approx 8.9 \text{ seg.}$	}	$t_y = 5 \text{ seg.}; t_z = 31.8 + 5 + 8.9 = 45.7 \text{ seg.}$
Paso 6.- $t_x = \frac{117.96}{27.16} = 4.34 \text{ seg.} \approx 4.3 \text{ seg.}$		
Paso 7.- $t_x = \frac{131.49}{27.23} = 4.82 \text{ seg.} \approx 4.8 \text{ seg.}$	}	$t_y = 5 \text{ seg.}; t_z = 55 + 5 + 4.8 = 64.8 \text{ seg.}$

Nota: ver columna R y U

Columna AA.- Indica la fuerza separatriz de laminado. "El cálculo está basado en fórmulas de Cook y Mc Crum. Con el dato de la columna S (vel. de deformación) y

$(\frac{r}{H} = \frac{d}{h})$; $(\frac{R}{h})$, se recurre a las tablas de Cook y Mc Crum ob-
teniéndose C_p y J_p

P (fza. separatriz) = $R' \times J_p$ = Fza. separatriz por pulgada de
ancho

Paso 1.- vel. de def. = 19.39

$$\frac{r}{H} = \frac{d}{h} = \frac{3.125 - 2.273}{3.125} = 0.272$$

$$\frac{R}{h} = \frac{7.292}{2.273} = 3.20$$

de tablas;

$$C_p = 0.25$$

$$J_p = 8.9$$

$\bar{P} = 7.292 \times 8.9 \times 0.25 = 16.2$ ton/pulg. de ancho

Cook y Mc Crum recomienda rehacer el cálculo con el R ó sea el radio deformado por la fuerza separatriz. Y R se evalúa mediante la expresión de Hitchcock, que dice que:

$$R' = R \times (1 + \frac{2 \times c \times P}{d}); \quad c = \frac{1.67 \times 10^{-4}}{\text{pulgadas}}$$

$$R' = 7.292 \times (1 + \frac{2 \times 1.67 \times 10^{-4} \times 16.2}{0.872}) = 7.33$$

$\bar{P} = 7.33 \times 8.9 \times 0.25 = 16.3$ ton/pulg. de ancho

y como el ancho medio es: $b_0 + b_1 = \frac{3.375}{2} + \frac{4.044}{2} = 3.95$

\bar{P} total = $7.33 \times 3.95 = 29.02$ toneladas ó 63,978 lbs

Paso 2.-

$$\text{vel. de def.} = 17.84$$

$$r = d = \frac{2.273 - 2.156}{2.273} = 0.051$$

$$R = \frac{7.433}{2.156} = 3.44$$

de tablas

$$C_p = 0.108$$

$$J_p = 5.2$$

$$\bar{P} = 7.433 \times 5.2 \times 0.108 = 4.17 \text{ ton/pulg. de ancho}$$

$$R' = 7.433 \times (1 + 2 \times 1.67 \times 10^{-4} \times 4.17) = 7.52$$

$$\frac{0.117}{}$$

$$\bar{P} = 7.52 \times 5.2 \times 0.108 = 4.22 \text{ ton/pulg. de ancho}$$

$$b_1 + b_2 = 4.044 + 4.093 = 4.068$$

2

2

$$P \text{ total} = 4.22 \times 4.068 = 17.16 \text{ toneladas } \text{ ó } 37,831.2 \text{ lbs}$$

Paso 3.-

$$\text{Vel. de def.} = 23.46$$

$$r = d = \frac{2.156 - 1.906}{2.156} = 0.115$$

$$R = \frac{7.588}{1.906} = 3.98$$

de tablas:

$$C_p = .155$$

$$J_p = 6.7$$

$$\bar{P} = 7.588 \times 6.7 \times .155 = 7.88 \text{ tons/pulg. de ancho.}$$

$$R' = 7.588 \times (1 + 2 \times 1.67 \times 10^{-4} \times 7.83) = 7.66$$

$$\frac{0.25}{}$$

$$\bar{P} = 7.66 \times 6.7 \times .155 = 7.95 \text{ tons/ pulg. de ancho}$$

$$b_2 + b_3 = 4.093 + 4.0625 = 4.077$$

2

2

$$\bar{P} \text{ total} = 7.95 \times 4.077 = 32.41 \text{ toneladas } \delta \text{ } 71,469.6 \text{ lbs.}$$

Paso 4.-

$$\text{vel. de def.} = 25.34$$

$$r = d = \frac{1.906 - 1.812}{1.906} = 0.049$$

$$R = \frac{7.683}{1.812} = 4.24$$

$$h = 1.812$$

de tablas:

$$C_p = .091$$

$$J_p = 6.6$$

$$\bar{P} = 7.683 \times 6.6 \times .091 = 4.61 \text{ tons/pulg. de ancho}$$

$$R' = 7.683 \times (1 + 2 \times 1.67 \times 10^{-4} \times 4.61) = 7.80$$

$$\frac{0.094}{2}$$

$$\bar{P} = 7.80 \times 6.6 \times .091 = 4.68 \text{ tons/pulg. de ancho}$$

$$b_3 + b_4 = \frac{4.0625}{2} + \frac{4.03125}{2} = 4.046$$

$$\bar{P} \text{ total} = 4.68 \times 4.046 = 18.9 \text{ toneladas } \delta \text{ } 41,754 \text{ lbs}$$

Paso 5.-

$$\text{vel. de def.} = 25.68$$

$$r = d = \frac{1.812 - 1.781}{1.812} = 0.017$$

$$R = \frac{7.739}{1.781} = 4.34$$

$$h = 1.781$$

de tablas:

$$C_p = .06$$

$$J_p = 6.3$$

$$\bar{P} = 7.739 \times 6.3 \times 0.06 = 2.92 \text{ tons/pulg. de ancho}$$

$$R' = 7.739 \times (1 + 2 \times 1.67 \times 10^{-4} \times 2.52) = 7.98$$

$$\frac{0.031}{2}$$

$$\bar{P} = 7.98 \times 6.3 \times 0.06 = 3.01 \text{ tons/pulg. de ancho}$$

$$b_4 + b_5 = 4.03125 + 4.0156 = 4.0234$$

$$\frac{\quad}{2} \quad \quad \quad \frac{\quad}{2}$$

$$\bar{P} \text{ total} = 3.01 \times 4.0234 = 12.14 \text{ toneladas } \acute{o} \text{ 26,764 lbs.}$$

Paso 6.-

$$\text{Vel. de def.} = 67.02$$

$$r = d = 1.781 - 1.656 = 0.07$$

$$\frac{\quad}{H} \quad \quad \quad \frac{\quad}{1.781}$$

$$R = \frac{7.783}{\quad} = 4.69$$

$$h \quad 1.656$$

de tablas:

$$C_p = 0.109$$

$$J_p = 9.9$$

$$\bar{P} = 7.783 \times 9.9 \times 0.109 = 8.39 \text{ tons/pulg. de ancho}$$

$$R' = 7.783 \times (1 + 2 \times 1.67 \times 10^{-4} \times 8.39) = 7.95$$

$$\frac{\quad}{0.125}$$

$$\bar{P} = 7.95 \times 9.9 \times 0.109 = 858 \text{ tons/pulg. de ancho}$$

$$b_5 + b_6 = 4.0156 + 4.0625 = 4.039$$

$$\frac{\quad}{2} \quad \quad \quad \frac{\quad}{2}$$

$$\bar{P} \text{ total} = 8.58 \times 4.039 = 34.6 \text{ toneladas } \acute{o} \text{ 76,401 lbs}$$

Paso 7.- Por las mismas razones que la resistencia a la compresión (columna W), en el paso 7 ó acabador, se consideró semejante a las del paso 6 ó líder; la fuerza separatriz aquí también se considera similar por lo tanto:

$$\text{Paso 7.- } \bar{P} \text{ total } \approx 34.6 \text{ ton}$$

Columna AB.- Indica el brazo de palanca C

C = 0.6 X long de la proyección del arco de contacto (ver columna L).

- Paso 1.- 0.6 X 3.53 = 2.118
- Paso 2.- 0.6 X 1.45 = 0.87
- Paso 3.- 0.6 X 1.536 = 0.521
- Paso 4.- 0.6 X 1.206 = 0.723
- Paso 5.- 0.6 X 0.931 = 0.558
- Paso 6.- 0.6 X 0.823 = 0.493
- Paso 7.- 0.6 X 0.545 = 0.372

Columnas AC y AD.- Indican los HP - HR por tonelada totales y por pasos.

Si el ciclo de cada barra es de 60 seg.

$$\frac{3600 \text{ seg/hr} = 60 \text{ barras/hr}}{60 \text{ seg/barra}}$$

la barra pesa 1,220 lbs.

$$\frac{60 \text{ seg} \times 1,220 \text{ lbs/barra} = 36.6 \text{ ton/hr al } 100\% \text{ de eficiencia}}{2,000 \text{ lbs/ton}}$$

$$\text{Paso 1.- } \frac{709.5 \text{ H.P.}}{36.6 \text{ ton/hr}} = 19.38 \frac{\text{H.P.}}{\text{ton}} \text{ hr total} = 19.38 \frac{\text{H.P.}}{\text{ton}}$$

$$\text{Paso 2.- } \frac{172.32}{36.6} = 4.70 \frac{\text{H.P.}}{\text{ton}} \text{-hr total} = 24.08 \text{ "}$$

$$\text{Paso 3.- } \frac{344.64}{36.6} = 9.41 \frac{\text{H.P.}}{\text{ton}} \text{-hr total} = 33.49 \text{ "}$$

$$\text{Paso 4.- } \frac{158.06}{36.6} = 4.31 \frac{\text{H.P.}}{\text{ton}} \text{-hr total} = 37.8 \text{ "}$$

$$\text{Paso 5.- } \frac{78.19}{36.6} = 2.13 \frac{\text{H.P.}}{\text{ton}} \text{-hr total} = 39.93 \text{ "}$$

$$\text{Paso 6.- } \frac{197.21}{36.6} = 5.38 \frac{\text{H.P.- hr}}{\text{ton}} \quad \text{total} = 45.31 \text{ "}$$

$$\text{Paso 7.- } \frac{197.21}{36.6} \quad 5.38 \frac{\text{H.P.-hr}}{\text{ton}} \quad \text{total} = 50.69 \text{ "}$$

Columna AE.- Indica el momento de Rolado estimado en Lbs/pie

$$\text{Momento} = 2 \text{ Pc}$$

$$\text{Paso 1.- Momento} = 2 \frac{63,978 \times 2.118}{12} = 22,584.2$$

$$\text{Paso 2.- Momento} = 2 \frac{37,831 \times 0.87}{12} = 5,485.4$$

$$\text{Paso 3.- Momento} = 2 \frac{71,469 \times 0.921}{12} = 10,970.4$$

$$\text{Paso 4.- Momento} = 2 \frac{41,754 \times 0.723}{12} = 5,031.3$$

$$\text{Paso 5.- Momento} = 2 \frac{26,764 \times 0.558}{12} = 2,489.0$$

$$\text{Paso 6.- Momento} = 2 \frac{76,401 \times 0.493}{12} = 6,277.6$$

$$\text{Paso 7.- Momento} = 2 \frac{76,401 \times 0.453}{12} = 6,277.6$$

Columna AF.- Indica la potencia requerida por paso

$$\text{HP} = \frac{2 \sqrt{N} \text{ momento}}{60 \times 550}$$

$$\text{Paso 1.- HP} = \frac{2\pi 165}{60 \times 550} \times 22,584.2 = 0.031415926 \times 22,584.2 = 709.5 \text{ HP}$$

$$\text{Paso 2.- HP} = 0.031415926 \times 5,485.4 = 172.32 \text{ H.P.}$$

$$\text{Paso 3.- HP} = 0.031415926 \times 10,970.4 = 344.64 \text{ H.P.}$$

$$\text{Paso 4.- HP} = 0.031415926 \times 5,031.3 = 158.06 \text{ H.P.}$$

$$\text{Paso 5.- HP} = 0.031415926 \times 2,489.0 = 78.19 \text{ H.P.}$$

$$\text{Paso 6.- HP} = 0.031415926 \times 6,277.6 = 197.21 \text{ H.P.}$$

$$\text{Paso 7.- HP} = 0.031415926 \times 6,277.6 \approx 197.21 \text{ H.P.}$$

Columna AG.- Indica la potencia requerida en la columna AF,
con un 20% de seguridad.

$$\text{Paso 1.- } 709.5 \times 1.2 = 851.5 \text{ H.P.}$$

$$\text{Paso 2.- } 172.32 \times 1.2 = 206.8 \text{ H.P.}$$

$$\text{Paso 3.- } 344.64 \times 1.2 = 413.6 \text{ H.P.}$$

$$\text{Paso 4.- } 158.06 \times 1.2 = 189.7 \text{ H.P.}$$

$$\text{Paso 5.- } 78.19 \times 1.2 = 93.9 \text{ H.P.}$$

$$\text{Paso 6.- } 197.21 \times 1.2 = 236.7 \text{ H.P.}$$

$$\text{Paso 7.- } 197.21 \times 1.2 = 236.7 \text{ H.P.}$$

PRACTICA DE ROLADO Y DATOS DE CALIBRACION DE CANAL DE 4"

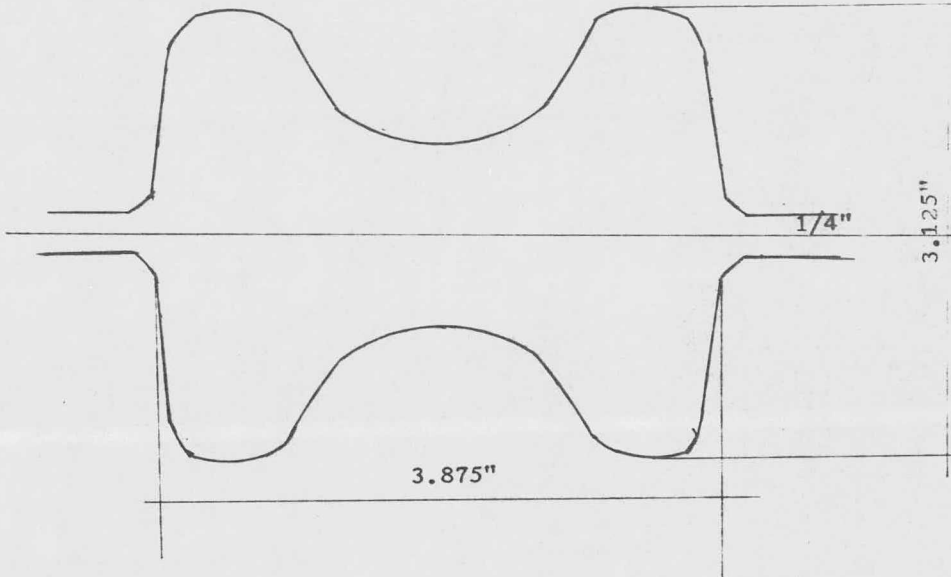
LAMINADO EN 7 PASOS

A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R
No. de paso	Castillo usado para cada paso		Forma al dejar el paso	Tamaño de la barra en caliente a la salida				Reducción de Area		altura del rectángulo equivalente	Proyección del arco de contacto		Diámetro de rodillo en pulg.		RPM de los rodillos	Velocidad de la barra a la salida del paso	
	número	tamaño		Alt. pulg.	anchura pulg.	grueso pulg.	area pulg.	Pulg.	por ciento		long. pulg.	area pulg.	diám. collar	diám. tra bajo		P.P.M.	
0	I	22	ver croquis	3.125	3.875	1.265	8.60										
1	I	14	"2	2.273	4.044	0.906	5.73	2.87	33.3	1.416	3.53	13.97	1 11/16	14.58	165	629.9	10.49
2	I	14	"3	2.156	4.093	0.812	4.64	1.09	19.02	1.133	1.45	5.898	1 11/16	14.86	165	642.2	10.70
3	II	14	"4	1.906	4.062	0.687	3.34	1.30	28.01	0.822	1.53	6.262	1 23/32	15.17	165	655.6	10.92
4	II	14	"5	1.812	4.031	0.562	2.55	0.79	23.65	0.632	1.20	4.879	1 23/32	15.36	165	663.8	11.06
5	III	14	"6	1.781	4.015	0.437	2.09	0.46	18.03	0.520	0.93	3.745	1 3/4	15.48	165	668.6	11.14
6	IV	14	"7	1.656	4.062	0.406	1.76	0.33	15.78	0.433	0.82	3.323	1 13/16	15.56	400	1630.	27.16
7	V	14	"8	1.906	4	0.406	1.58	0.18	10.22	0.395	0.54	2.196	1 13/16	15.60	400	1634.	27.23

PRACTICA DE ROLADO Y DATOS DE CALIBRACION DE CANAL DE 4"

LAMINADO EN 7 PASOS.

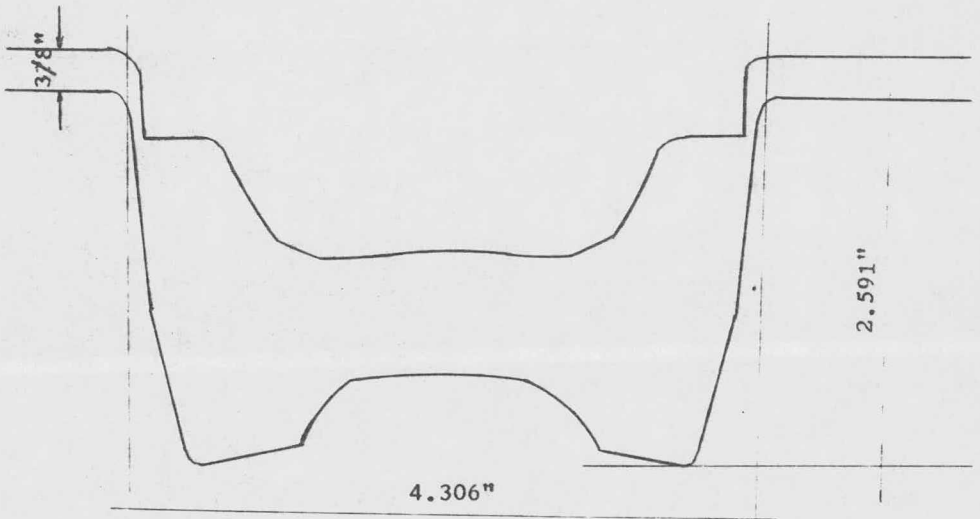
S	T	U	V	W	X	Y	Z	AA	AB	AC	AD	AE	AF	AG
vel. de de- forma- ción l/seg.	factor de e- longa- ción Li/Lf	Long. de la barra en pies	Temp. de lam. en °C	resist. a la comp. ton/ pulg. ²	Tiempo estima- do en segundos			fuerza separa- triz LBS	Brazo de Palan- ca pulg.	H.P. - H.R. por tonelada		momento de rola- do en LBS. Pies	Poten- cia re- queri- da por paso H. P.	Poten- cia re- queri- da por paso H. P.
					en el paso	al sig. paso	Total			Total	por paso			
		24.17	1,204											
19.39	1.500	36.25	1,176	8.9	3.5	3	3.5	63,978	2.118	19.38	19.38	22,584	709.5	851.5
17.84	1.853	44.79	1132.6	5.2	4.2	5	10.7	37,831	0.87	24.08	4.70	5,485.4	172.32	206.8
23.46	2.574	62.21	1093.9	6.7	5.7	3	21.4	71,469	0.921	33.49	9.41	10,970	344.64	413.6
25.34	3.372	81.50	1052.9	6.6	7.4	5	31.8	41,754	0.723	37.8	4.31	5,031.3	158.06	189.7
25.68	4.114	99.44	1009.6	6.3	8.9	5	45.7	26,764	0.558	39.93	2.13	2,489.6	78.19	93.9
67.02	4.88	117.96	970.1	9.9	4.3	5	55	76,401	0.493	45.31	5.38	6,277.6	197.21	236.7
49.91	5.44	131.49	938.4	9.9	4.8		64.8	76,401	0.372	50.69	5.38	6,277.6	197.21	236.7



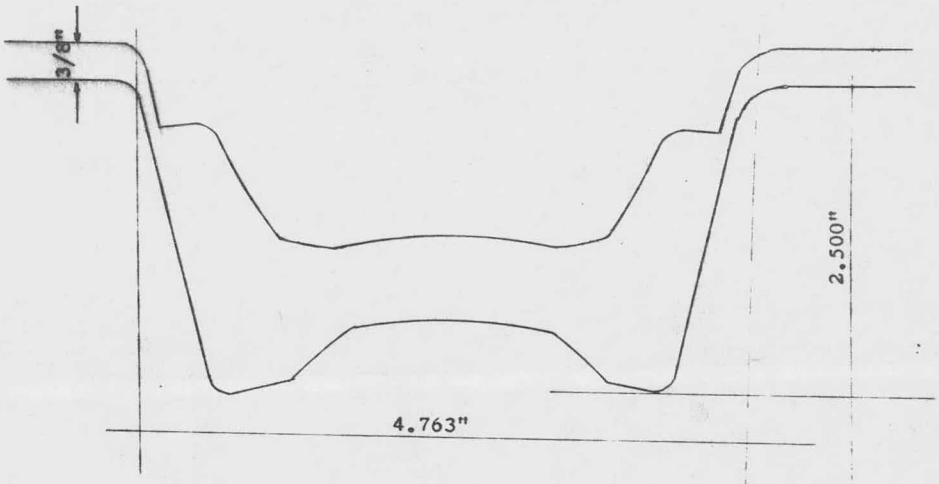
Area Total = 3.600 " ²

Molino 22

Groquis I . Escala Natural



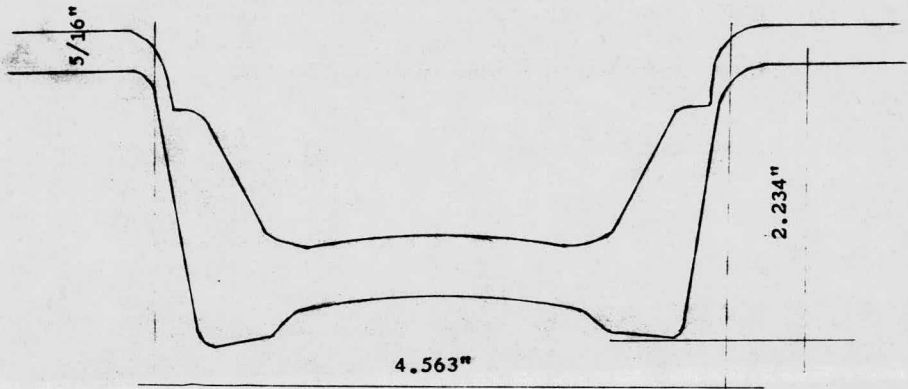
Area Total = 5.730 " ²
Molino 14 Paso 1
Croquis 2 Escala Natural



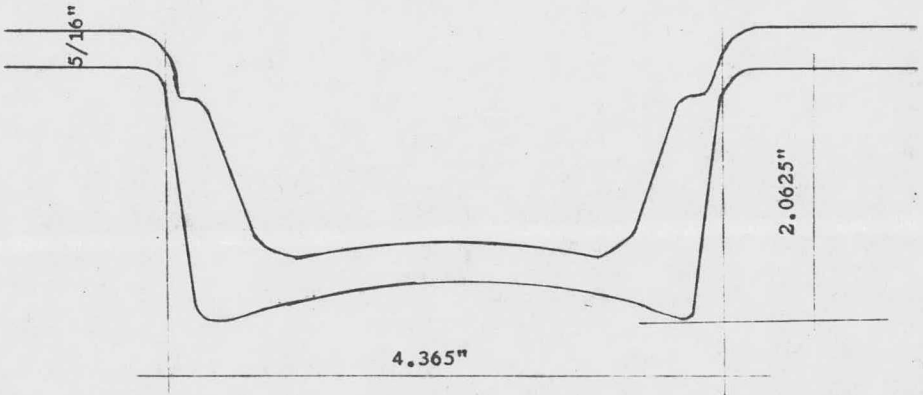
Area Total = 4.640 " ^2

Molino 14 Paso 2

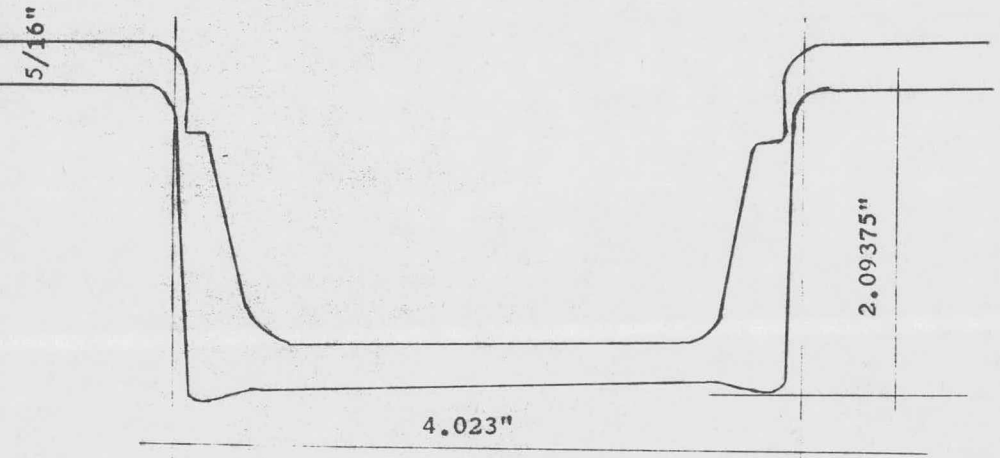
Croquis 3 Escala Natural



Area Total = 3.340 " ²
Molino 14 Paso 3
Croquis 4 Escala Natural



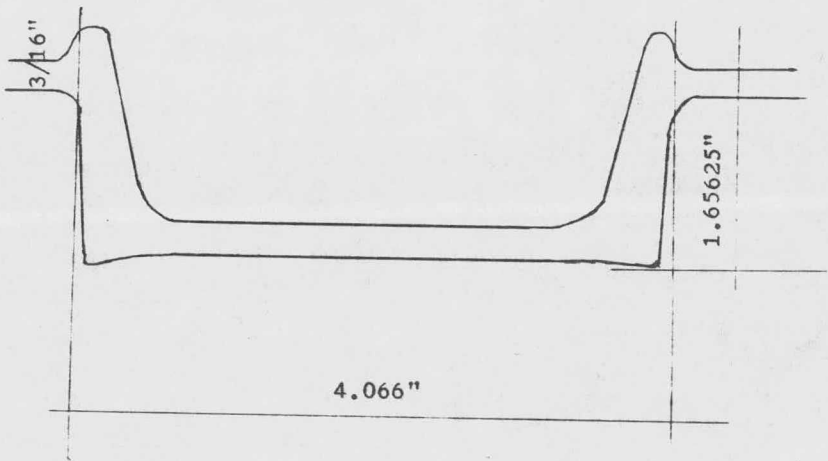
Area Total = 2.550 " ²
Molino 14 Paso 4
Croquis 5 Escala Natural



Area Total = 2.090 " ²

Molino 14 Paso 5

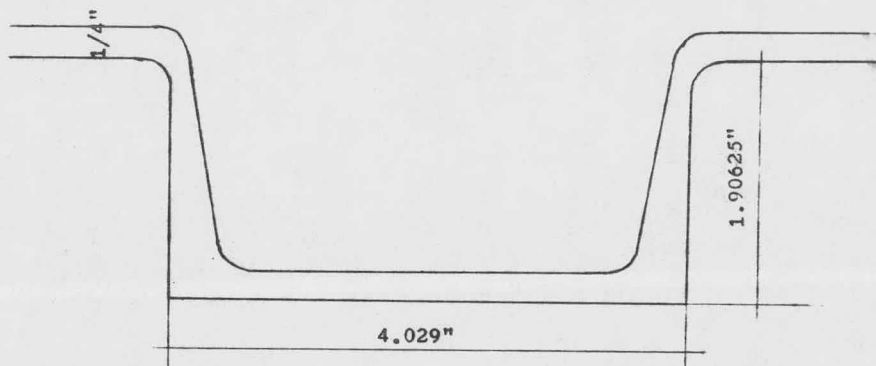
Croquis 6 Escala "atural



Area Total: 1.760 " ²

Molino 14 Paso 6

Croquis 7 Escala Natural



Area Total = 1.580 " ^2
Molino 14 Paso 7
Croquis 8 Escala Natural

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

- 1.- FUNDAMENTOS DE LA LAMINACION
W. TRINKS 1965 EDITORIAL INTERCIENCIA,
MADRID, ESPAÑA
- 2.- LAMINACION
HUBERT HOFF Y THEODOR 1957 EDITORIAL DOSSAT,
DAHALL MADRID, ESPAÑA
- 3.- TRENES DE LAMINACION
A.I. TSELIKOV Y V.V. EDICIONES URMO
SMIRNOV
- 4.- ROLLING PRACTICE
K. BURTSEV 1970 MIR PUBLISHERS,
MOSCU
- 5.- ROLL PASS DESIGN
THE UNITED STATES GROUP OF COMPANIES LTD.
PUBLICATION DEP. P.O. BOX 64, THE MOUNT BROOMHILL.
SHEFFIELD 10. YORKS. INGLATERRA
- 6.- ROLL DESIGN AND MILL LAYOUT
ROSS E. BEYNON 1956 ASSOCIATION OF AND STEEL ENGINEERS
1010 EMPIRE BUILDING, PITTSBURGH 22 P.A. E.U.A.
- 7.- METALURGIA MECANICA
GEORGE E. DIETER EDITORIAL AGUILAR
- 8.- THE CALCULATION OF LOAD AND TORQUE IN HOT FLAT ROLLING
THE BRITISH IRON AND STEEL RESEARCH ASSOCIATION 1958
P.M. COOK Y R.W. MC GRUM

