

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

FACULTAD DE QUIMICA

ESTUDIO DE LAS DIFERENTES ETAPAS
BASICAS PARA LAMINAR PERFILES

JORGE MIRANDA ZALDIVAR

INGENIERO QUIMICO METALURGICO

1977
verificado



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.

LAB Tesis 1977

NO. [REDACTED]

FECHA _____

REC. _____ **278**



QUIMICA

PRESIDENTE: MANUEL GAVIÑO RIVERA

V O C A L: KURT H. NADLER GUNDEISEMER

Jurado asignado
originalmente
según el tema.

SECRETARIO: DARIO RENAN PEREZ PRIEGO

1er.SUPLENTE: MA. EUGENIA NOGUEZ AMAYA

2do.SUPLENTE: HUMBERTO MALAGON ROMERO

Sitio donde se desarrolló el tema: ACEROS INDUSTRIALES, S.A.

Nombre completo y firma del sustentante: JORGE MIER VALDIVAR


Nombre completo y firma del asesor del tema: KURT H. NADLER
GUNDEISEMER

A mis padres, con admiración y respeto, que siempre me han guiado, por el camino recto, honrado y moral.

A mi novia Emmy, que con apoyo en su cariño y confianza sea un profesionista digno.

A mis hermanos, por su apoyo moral que oportunamente me ofrecieron.

A mis maestros, por todos los conocimientos de ellos aprendidos.

A todas las personas que directa e indirectamente hicieron posible la realización de este trabajo.

CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCION	2
CAPITULO I Principios básicos de la laminación	3
CAPITULO II Descripción y disposición de las partes principales de un molino o tren de laminación	18
CAPITULO III Calentamiento del material	29
CAPITULO IV Factores básicos que afectan el proceso de laminación	50
CAPITULO V Control y preparación de la materia prima	62
CAPITULO VI Laminación primaria	73
CAPITULO VII Laminación y calibración de canales para perfiles angulares	92
CAPITULO VIII Inspección de productos terminados	103
CAPITULO IX Conclusiones	109
BIBLIOGRAFIA	111

INTRODUCCION

El objetivo que aporta este trabajo, tiene la intención, de exponer la importancia que adquiere cada una de las operaciones adaptativas en la laminación en caliente, tanto de planeación como de ejecución, realizadas para llegar a un producto terminado.

Los problemas de la laminación en caliente, son una búsqueda constante de técnica y medios para obtener el máximo de resultados positivos y a la vez un mínimo en los costos de operación. Por lo anterior, no solamente es indispensable, sino necesario, por el alto costo que representa un equipo, estudios detallados y exhaustivos de principios físicos y mecánicos básicos.

Situamos a la laminación de barras y perfiles de pequeño y mediano tamaño entre la ciencia y el arte, es por ello que muchas de las notas, tablas o experiencias en general pueden diferir ligeramente si se consultan diferentes libros o apuntes, no debe olvidarse que en la laminación hay muchos caminos para llegar al mismo resultado, algunos mejores que otros y probablemente haya uno solo para hacer las cosas absolutas y correctamente.

Por lo tanto tratare de explicar las diferentes etapas para el destaste de lingote a billet y posteriormente la laminación y calibración de perfiles angulares partiendo de un billet.

PRINCIPIOS BASICOS DE LA LAMINACION

El principio básico de la laminación en caliente es que un metal — a una temperatura de plasticidad adecuada, al introducirse en un par de rodillos, se alarga y se ensancha en proporción a la reducción proporcionada, usualmente el ensanchamiento solo es una fracción del alargamiento, con algunas excepciones que se explicarán posteriormente. El control del alargamiento y ensanchamiento es fundamental en el arte del diseño de las calibraciones.

En la laminación en caliente hay recristalización (recuperación del grano), acompañada de las siguientes propiedades: (Fig. 1).

- a.- No hay cambio de propiedades
- b.- Deformación no limitada
- c.- Esfuerzo de deformación más bajo
- d.- Acabado pobre

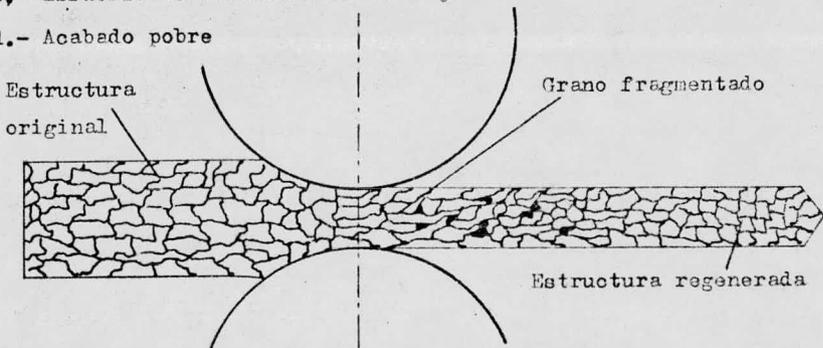


Fig. 1 Eliminación de la segregación dendrítica y recristalización de la estructura.

Resistencia a la deformación.— Para poder cambiar mecánicamente la forma de un metal es preciso que sea dúctil, debiendo advertir que cuanto más se diferencien el límite de elasticidad y el de rotura por trac-

ción, tanto mayor será la deformación que admita el metal. Generalmente-- ambos límites descienden cuando el metal es calentado. El descenso del-- límite de elasticidad, al aumentar la temperatura, permite trabajar el - metal, es decir, cambiar su forma aplicando esfuerzos menores que a la - temperatura ordinaria, y si aquel descenso es más rápido que el experi-- mentado por el coeficiente de rotura, el grado de deformación posible es mayor.

La producción de la rotura intercrystalina demuestra que algunas -- condiciones el movimiento entre los granos puede tener una relativa im-- portancia, ya que a temperaturas ordinarias sólo se produce la rotura -- siguiendo los bordes de los granos cuando el metal contiene muchas inclu-- siones localizadas en los bordes, o se ha producido hacia éstos una se-- gregación intensa de algún elemento.

Sometidos los cristales a fuerzas gradualmente crecientes sufren un alargamiento que se caracteriza por una ascensión continua de la curva-- esfuerzo-deformación. Para cargas pequeñas la deformación es reversible-- y lineal pero en el momento en que la carga excede un cierto valor, parte del alargamiento es permanente, y la deformación produce cambios estruc-- turales fundamentales en el acero.

Los materiales plásticos que tienen una temperatura crítica debajo de la cual la deformación provoca endurecimientos (acritud) y limita nue-- vas deformaciones, si se abusa de esta situación, se fractura el material, arriba de la temperatura crítica no hay límite de deformación si es a -- compresión, es por ello que se establece el canteado para evitar esfuer-- zos de tensión en las caras laterales y evitar grietas por exceso de com-- presión en un solo sentido.

Línea de laminación y sentido del laminado.- La disminución de la sección de la barra que se lamina comienza en la entrada de la abertura de laminación, entre los puntos designados con A y A₁, ambos situados en el plano determinado por los ejes de los dos cilindros M y M₁. Fig. 2

A este plano se le llama plano de laminación. La entrada y salida de la barra que se lamina se efectúa en dirección perpendicular al plano de laminación (el flujo de material siempre es perpendicular a la fuerza aplicada). Esta dirección se designa con el nombre de sentido de laminado.

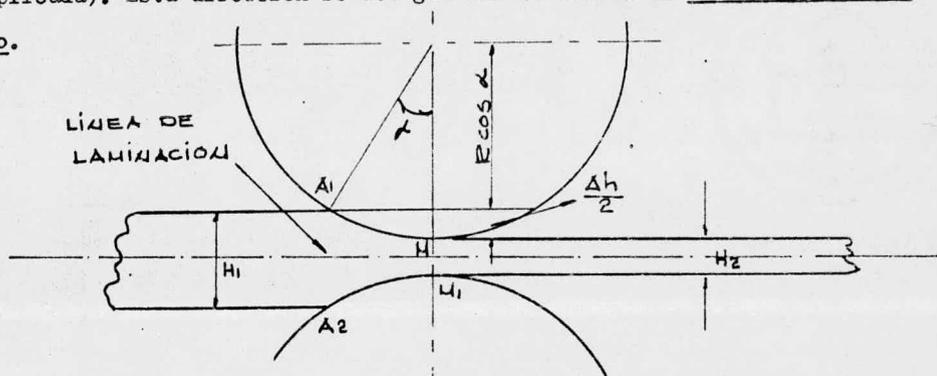


Fig. 2 Representación de la disminución de sección de una barra

Ahora bien, al pasar una barra de sección rectangular entre dos cilindros (lisos ó acanalados), disminuye su sección de Q_0 a Q_1 , aumenta su longitud de L_0 a L_1 y baja su espesor de h_0 a h_1 . Con esto su anchura aumenta de b_0 a b_1 (Fig. 3). Si se le hace volver a pasar de nuevo en la misma posición, vuelven a variar sus medidas en el mismo sentido aumentando su anchura de b_1 a b_2 .

A este proceso se le llama pasada plana. En el caso de que se quiera obtener una barra de sección cuadrada, deberá entonces girarse a 90° la barra después de algunas pasadas, introduciéndolo de nuevo de canto.

Este tipo de pasadas se llama pasada de canto (Fig. 4).

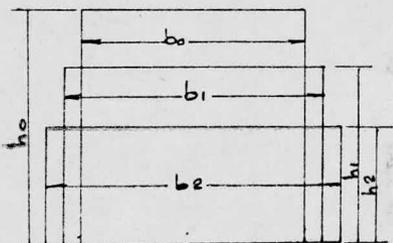


Fig. 3

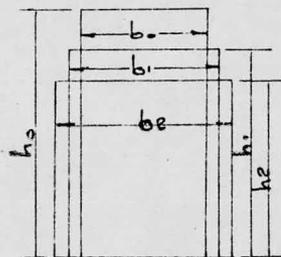


Fig. 4

Limitaciones de la reducción.- Una gran reducción elimina pasos, cada paso es muy costoso, requiere tiempo y potencia, el diseño debe ser siempre encaminado a obtener las mayores reducciones posibles.

1.- El uso de una reducción muy elevada dificulta la entrada.

2.- A mayor reducción, mayor proyección del área de contacto y mayor tensión en los rodillos.

3.- A mayor reducción mayor potencia en motores, así los motores también limitan las reducciones, se debe ser muy cuidadoso en este aspecto, sobre todo cuando se aumentan diámetros o tablas en un molino para producir algo que antes no se producía o bien instalar repetidores que requieren motores de mayor potencia por tener pasadas simultáneas, siempre será conveniente establecer comparaciones, un factor de comparación muy conveniente entre molinos es el producto de la reducción de área (mm^2) por la velocidad de laminación.

4.- El desgaste de los rodillos influye ya que a mayor reducción, mayor desgaste, esto es más notorio a medida que los molinos trabajan --

más cerca de los acabadores, en desbastes influyen poco, en acabadores - las reducciones recomendadas no deben ser mayores de 20% y en algunos casos solo del 10%.

5.- La facilidad de deformación del material es uno de los factores más importantes ya que en el material se forman fuerzas de tensión indeseables y a veces en lugares no provistos.

En la laminación de perfiles con alas como viguetas, canales, ángulos, rieles, etc. debe tenerse cuidado ya que puede haber diferentes velocidades de deformación entre alma y alas, provocando esfuerzos de tracción que desgarran el material, esto sucede especialmente cuando el material es poco deformable o sea del acabador cuando ha perdido mucha temperatura.

6.- La formación de grietas y pliegues en las barras laminadas son causa de fuertes reducciones, las primeras especialmente ocurren en ciertos aceros aleados y de alto carbono.

7.- El excesivo ensanchamiento que ocurre bajo determinadas circunstancias constituye un factor limitativo de la reducción.

8.- Deformación excesiva de los extremos sobre todo en perfiles que forman la llamada cola de pescado y dificultan la entrada de la barra al paso siguiente.

Ensanchamiento.- Es el principal problema del diseñador, conocer que porción de la deformación es alargamiento y que porción es ensanchamiento, una mala estimación provoca falta de material o excesos que a su vez provocan bigotes, costillas, traslapes en pasos siguientes.

Si tenemos una barra de acero de 4 in x 2 in x 12 in. y la reducimos en altura a 1 1/2" en un par de rodillos de 12" ϕ a 150 RPM., tendremos-

después del paso una área de $4 \frac{1}{8}'' \times 1 \frac{1}{2}''$, el alargamiento es proporcional a la reducción de área, por lo tanto:

$$A. \text{ inicial} = 4 \times 2 = 8 \text{ plg}^2$$

$$A. \text{ final} = 4.125 \times 1.5 = 6.1875 \text{ plg}^2$$

$$\frac{A_i}{A_f} = \frac{8}{6.1875} = 1.293$$

esto es lo que se conoce como rango de elongación, de tal forma, la barra después del paso medirá:

$$12 \times 1.293 = 15.516 \text{ plg.}$$

Ahora tomamos otra barra igual, de $4'' \times 2'' \times 12''$ y la introducimos en dos roles de $24''$ de diámetro, el ensanchamiento resultará mayor, la barra medirá $4 \frac{3}{16}'' \times 1 \frac{1}{2}''$, por lo tanto:

$$A. \text{ inicial} = 4 \times 2 = 8 \text{ plg}^2$$

$$A. \text{ final} = 4.1875 \times 1.5 = 6.28125 \text{ plg}^2$$

$$\frac{A_i}{A_f} = \frac{8}{6.28125} = 1.273$$

y por lo tanto tendremos menor alargamiento o elongación, y la barra finalmente medirá:

$$12 \times 1.273 = 15.276 \text{ plg.}$$

Este alargamiento y ensanchamiento se representan esquemáticamente en la Fig. 5

Factores que afectan el ensanchamiento.- Como podemos ver en la Fig. 5, depende de los siguientes factores:

1.- Longitud del arco de contacto, proyección del área y su forma y el rozamiento entre barra y rodillos.

Son factores muy ligados y complejos de analizar, algunas considera

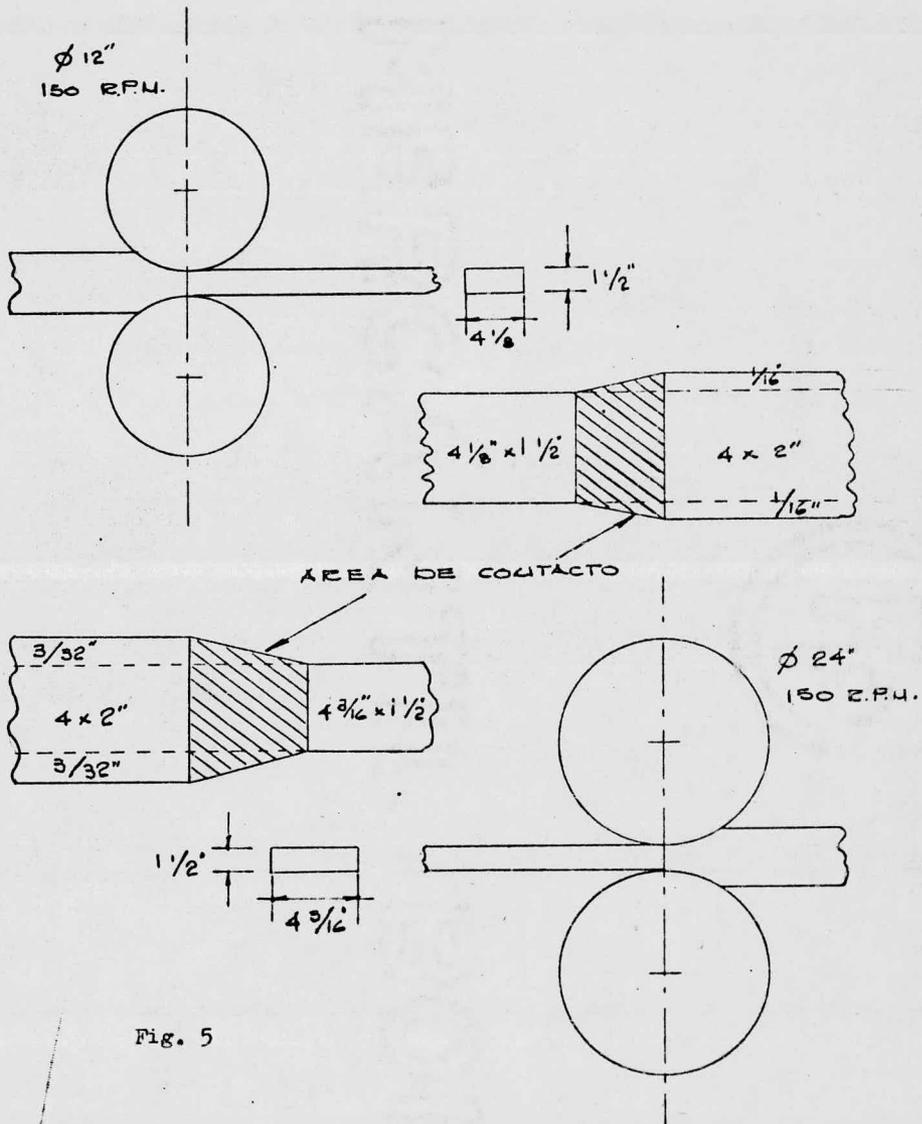


Fig. 5

ciones concluyen que para un espesor fijo y un ancho pequeño, el ensanchamiento será casi directamente proporcional a la proyección de la longitud de contacto (esto sucede si se tiene mayor diámetro de rodillos).

Otra expresión válida en muchos casos, las barras demasiado anchas no ensanchan ya que cuando más material tiende a ensanchar, más rozamiento se opone a ello.

2.- Velocidad.- En términos generales, las velocidades bajas facilitan el ensanchamiento y las velocidades altas facilitan el alargamiento, en esto influyen mucho la temperatura, en bajas velocidades, la acción enfriadora del contacto con el rodillo es más energética, además el agua de enfriamiento en bajas velocidades se evapora más rápidamente y el contacto directo entre rodillo y barra empieza más rápidamente.

Respecto al alargamiento podemos decir que si este se impide en una sección comprimida, la deformación se transforma en ensanchamiento, en ambos movimientos influye mucho la forma de la canal.

Fuerzas que actúan en el proceso de laminación

El proceso de deformación del material en los rodillos, es continuo (velocidad \times área = $\text{cm}/\text{seg} \times \text{cm}^2 = \text{cm}^3/\text{seg}$) y transcurre de acuerdo a la magnitud de reducción que se necesite (a bajas velocidades el ángulo de agarre y las reducciones pueden ser altas no así al aumentar la velocidad).

En la Fig. 6, podemos ver esquemáticamente la forma en que el material es tomado por los rodillos.

En los puntos A y A_1 , el material toca la superficie de los roles, - hasta aquí no ha sufrido ninguna deformación la altura inicial, la que podemos indicar como H_1 .

En el punto C y C_1 , el material ha sido ya deformado, sufriendo una reducción en su altura, la cual ha sido denominada H_2 , ésta es igual a la abertura entre los rodillos.

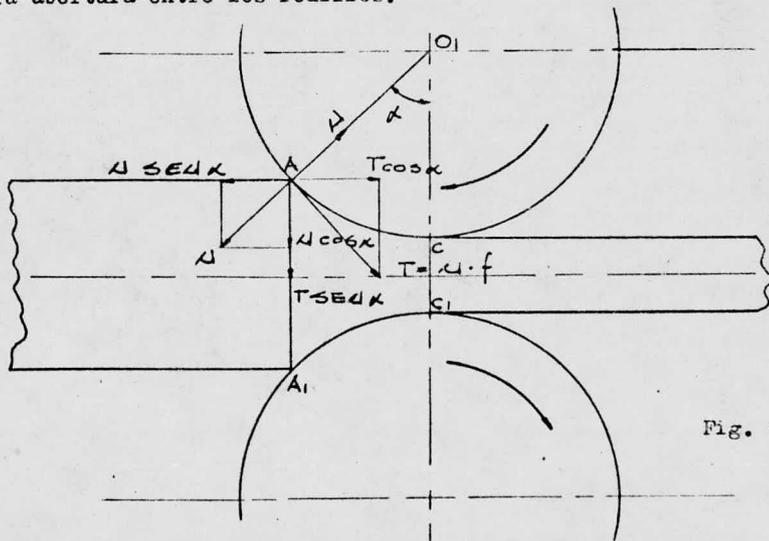


Fig. 6

El ángulo formado por $A O_1 C$, se llama ángulo de entrada. El tamaño de este ángulo depende del diámetro del rodillo, de la altura inicial -- del material y de la altura final que se pretende dar a la pieza o sea -- la luz entre los rodillos.

De la Fig. 6, podemos deducir que el ángulo α es más grande cuando mayor es la altura H_1 , siempre y cuando permanezcan constantes el diámetro de los rodillos y la luz entre los mismos, o sea H_2 , y es inversamente proporcional a H_2 , es decir, tanto mayor cuanto menor es la luz -- permaneciendo constantes el diámetro de los rodillos y H_1 ; de todo esto podemos indicar que α equivale a la reducción que sufre el material y es una función de la misma $\alpha = f(\Delta h)$. Permaneciendo constante la -- reducción Δh , el ángulo de entrada aumentará si disminuye el diámetro -- del rodillo (D), por lo que α es también función de D .

Tomando en cuenta que la velocidad tangencial de los roles es mayor que la velocidad de la barra que entra, el impacto se efectúa en los puntos A y A_1 como podemos ver en la Fig. 6, y en los cuales se ejercerá una fuerza (N) en forma perpendicular a la superficie de los rodillos. Toda fuerza provoca una reacción en sentido contrario a la misma, por lo que se ejercerá otra igual sobre el material a laminar.

Si descomponemos la fuerza N que actúa en el material en sus -- componentes horizontales y verticales, obtendremos:

$$N \cdot \text{sen } \alpha$$

y la componente vertical será igual a:

$$N \cdot \text{cos } \alpha$$

La componente horizontal ($N \cdot \text{sen } \alpha$) tenderá a alejar la pieza de los rodillos y la componente vertical ($N \cdot \text{cos } \alpha$) actúa ejerciendo una presión sobre el material, es decir, tenderá a reducir la altura.

En el punto A se provoca también una fuerza friccionante (T) la cual será igual a la fuerza normal N que actúa sobre los rodillos multiplicada por el coeficiente de fricción f:

$$T = N \cdot f$$

Esta fuerza actúa en el punto A perpendicular a la presión normal N, la podemos descomponer también en sus dos componentes horizontal y vertical:

$$T \cdot \text{cos } \alpha$$

y tenderá a jalar la pieza hacia el sentido de la laminación; mientras tanto la componente vertical:

$$T \cdot \text{sen } \alpha$$

Tratará de comprimir o sea reducir la altura de la pieza. El mismo fenómeno que sucede en el punto A sucederá en A_1 .

De todo ésto podemos ver que se pueden establecer tres fenómenos diferentes.

La componente ($N \cdot \text{sen } \alpha$) puede ser mayor que la componente ($T \cdot \text{cos } \alpha$) o bien igual e inclusive menor.

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 o sea cuando estas fuerzas son iguales, puede ser el material tomado por los rodillos, pero no necesariamente; aquí realmente dependerá de algún im-

pulso ajeno al proceso que pueda hacer que éste se realice o no. En el último de los casos, que es el típico por decirlo así en el proceso de laminado, el material será tomado por los rodillos.

Estas tres posibilidades las podemos escribir de la siguiente manera:

$$N \cdot \operatorname{sen} \alpha \geq T \cdot \cos$$

o bien:

$$\operatorname{tg} \alpha \geq \frac{T}{N}$$

De esto se deduce que los principales factores que influyen en la laminación sobre todo cuando los rodillos atrapan el material, son el ángulo de entrada y el coeficiente de fricción. Desde luego, se presenta en la práctica en que dando una mayor fuerza inicial a la pieza a laminar influye para que los roles atrapen el material y también el rozamiento puede aumentarse con grabados, lo cual mejora el agarre. Sin embargo, creemos que en estos casos más bien se debe a que en cierta forma se modifica el ángulo de agarre al deformarse las esquinas del material por el impacto en los puntos A y A₁. Por otro lado, el enfriamiento por la operación de empuje del material, lo que provoca un incremento en el coeficiente de fricción.

Una vez determinadas todas las canales de la calibración, éstas se deben de colocar sobre los rodillos, tomándose en cuenta los puntos siguientes:

a) Diámetro de trabajo.- Es el diámetro medido en cada paso, una regla práctica señala que es el diámetro correspondiente al centro de gravedad del material que se está laminando. Al diámetro de trabajo le corresponde una velocidad periférica igual a la de salida de la barra.

Este diámetro no es siempre igual en el rodillo superior que en el-

inferior, tratándose de un tren dúo.

Si el diámetro de trabajo del rodillo superior es mayor que el del inferior, entonces se dice que existe presión superior; el material es desviado hacia el rodillo inferior de menor diámetro, debido a la velocidad periférica como se muestra en la Fig. 7; la barra recibe un determinado sentido de salida. Basta por tanto, disponer cinceles de despegue en el rodillo inferior, los cuales deben soltar del fondo del paso, la parte de la pieza que sale, impidiendo con ello, el que se siga hacia abajo formándose un anillo al rededor del rodillo inferior, evitando una posible rotura de los rodillos.

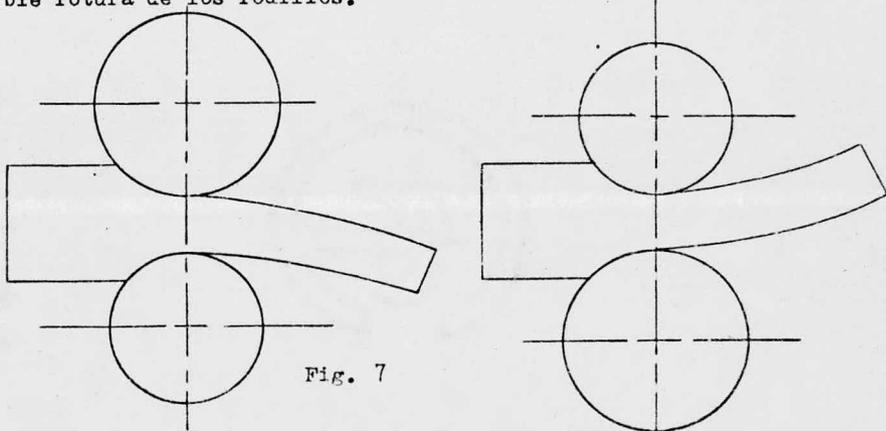


Fig. 7

Si el diámetro de trabajo del rodillo inferior es mayor que el superior, entonces se dice que hay presión inferior; en este caso la pieza que se lamina, ira dirigida hacia arriba, por lo tanto se colocan cinceles de despegue en el rodillo superior.

Si los dos diámetros de trabajo son iguales, el sentido de salida del material no está definido; en este caso el sentido de doblado del material vendrá determinado por el rodillo, en el que haya más rozamiento por lo que se aconseja colocar cinceles en ambos rodillos.

b) Diámetro medio.- "Dm" Fig. 8

El diámetro medio de dos rodillos es la distancia entre sus ejes, en molinos tríos, hay diámetro medio superior e inferior.

c) Línea media.- Es una línea paralela a los ejes de los rodillos, en su mismo plano y al centro del diámetro medio. (Fig. 8).

d) Línea de laminación.- Es paralela a los ejes, encima o debajo -- (dependiendo si hay presión superior o inferior), la separación "X" entre la línea media y la línea de laminación es la cuarta parte de la presión o diferencia de diámetros, cuando no hay presión la línea media es la misma línea de laminación.

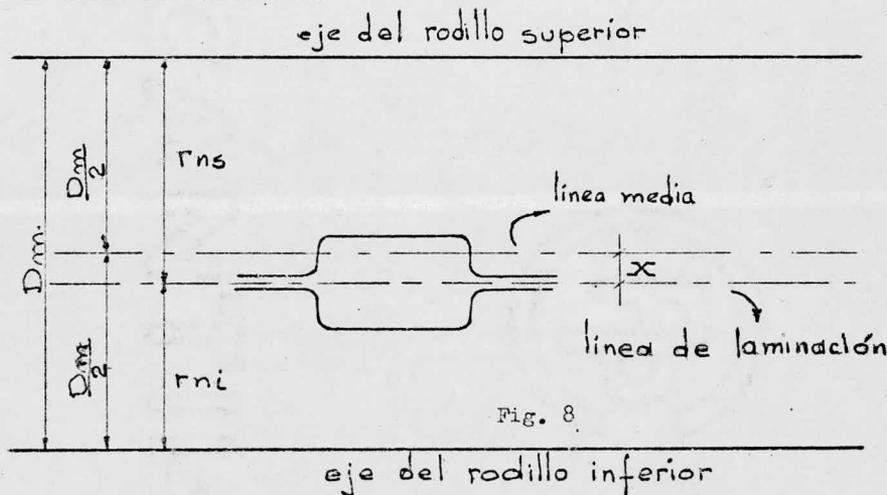


Fig. 8

e) Diámetro nominal.- Es el doble del radio nominal y este a su vez la distancia entre el eje del rodillo y la línea de laminación.

r_{ns} = radio nominal superior

r_{ni} = radio nominal inferior

Al existir varias líneas de laminación habrá varios diámetros nomi-

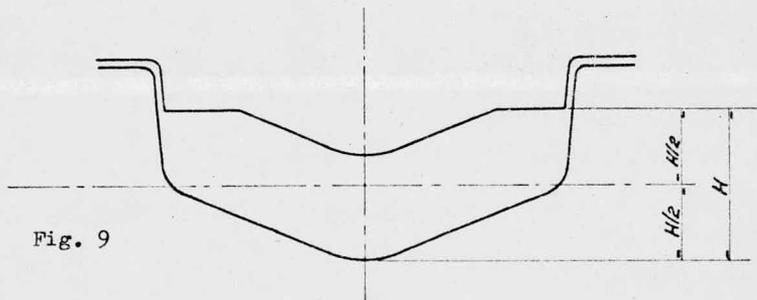
nales tanto superiores como inferiores.

f) Línea neutra de una canal.- Es una línea de diferencia que divide a la canal en dos áreas iguales, la canal se coloca en los rodillos de manera que la línea neutra sea la línea de laminación, si teóricamente se hace coincidir con la línea media, las velocidades de salida serían iguales tanto en la mitad superior como en la inferior.

En perfiles simétricos, la línea neutra será la línea media de la canal (Fig. 8).

Para perfiles asimétricos hay varios métodos: (sólo tratare en el perfil angular, ya que es este el que nos interesa en este proyecto).

Calibres con superficies que trabajan a presión y estas no son paralelas a la línea de laminación. (Fig. 9).



Se dibuja en la posición que debe ocupar en los rodillos, la línea neutra se localiza al centro de la altura del calibre, es decir, $A_1 = A_2$.

Una vez conocida la distancia entre ejes de rodillos y determinada la presión superior e inferior, la línea de laminación queda fija y determinada, no es correcto decir que la línea de laminación se colocará de tal o cual forma en el calibre ya que esta línea no se determina, lo que se hace es coincidir su línea neutra con la línea de laminación.

DESCRIPCION Y DISPOSICION DE LAS PARTES PRINCIPALES
DE UN MOLINO O TREN DE LAMINACION.

El equipo que sirve para la deformación del metal entre los rodillos se denomina equipo básico (castillo ó caja de rodillos) y la línea en la que está dispuesto es la línea principal del tren de laminación.

La línea principal del tren de laminación, consta de las siguientes máquinas:

- a.- Máquinas motrices.
- b.- Máquinas de transmisión.
- c.- Máquinas de fabricación.
- d.- Máquinas auxiliares y equipos auxiliares.

Las máquinas motrices son los motores y generadores del sistema de impulsión.

Las máquinas de transmisión son los reductores, engranajes, caja de piñones, acoplamientos, flechas, etc.

Las máquinas de fabricación son los castillos donde van alojados — los rodillos, las barras porta herramientas, las cajas guías, los guíados res, chumaceras.

Las máquinas auxiliares y equipos auxiliares son grúas, hornos, esmeriles, cizallas, transportadores, repetidores, mesas de enfriamiento, tijeras de acabado sierras, etc.

CLASIFICACION

Por designación.— Esta es la más sencilla, diferenciándose los laminadores por el tipo de perfiles laminados. Según esta clasificación — los laminadores se pueden dividir en gran número de tipos, en vista de — que las dimensiones del laminador en la mayoría de los casos se determinan en función de las dimensiones de los perfiles a laminar.

Aquí es necesario hacer notar que la dimensión principal de los molinos de barras y perfiles se definen por el diámetro de los rodillos y los molinos de productos planos se definen por la longitud de la tabla de los rodillos, un molino de producción de tubos se define por el diámetro exterior de los tubos que produce. Por Ejem., cuando decimos, molino de perfiles 200, o molino de cintas 1000; daremos a entender que en el primer caso, el molino tiene rodillos de diámetro aproximado a 200 mm y en el segundo caso los rodillos tendrán, una longitud aproximada de 1000 mm.

DISPOSICION DE RODILLOS EN LOS CASTILLOS

Depende de la función y capacidad del molino.

I) Rodillos horizontales

- 1.- Castillos dúos. Los más empleados.
- 2.- Castillos tríos. Se lamina en ambos sentidos, en rieles y perfiles, en producción de billets y perfiles de poca capacidad.
- 3.- Doble dúo. Son cuatro rodillos en dos parejas en plano vertical, para perfiles de alta calidad, no se usa mucho.
- 4.- Castillos cuarto. Son 4 rodillos. 2 de trabajo pequeños y motrices y dos de apoyo, se usan en producción de planos en caliente y en frío.
- 5.- Molinos planetarios. Para bandas en caliente muy delgadas y con grandes reducciones (90 - 95%). Con cilindros de apoyo motrices y cilindros de trabajo girando sobre cada rodillo de apoyo.
- 6.- Molinos con rodillos múltiples. Tienen 12 ó 20 rodillos algunos con rodillos de diámetro diferentes. Iniciados en 1934 han sido muy empleados en laminación en frío de hojas de ban

das muy delgadas.

II) Rodillos verticales

Para reducción lateral en perfiles, cuando no se desea girar la barra 90° o para enderezar bordos en láminas.

III) Rodillos horizontales y verticales. (Universales)

Son dúos o tríos o cuádruples con verticales. Para slabs, para - bandas anchas, para vigas de ala ancha.

IV) Rodillos inclinados. Para laminar helicoidalmente, principalmente para tubos por punzonado.

DISPOSICION DE MOLINOS

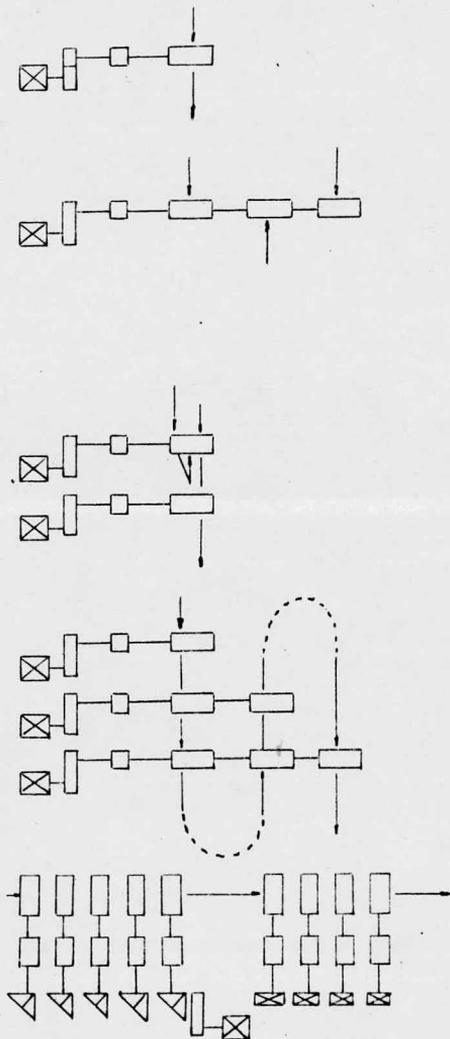
La disposición obedece a varios factores, tales como la función del molino, el número de pasadas necesarias y la capacidad de la producción - principalmente, aparte de factores económicos de mano de obra, automatizaciones, etc.

Una clasificación general puede establecerse según el número de castillos y su acomodo y pueden ser: Fig. 10

- a) Con un solo castillo.
- b) Con castillos múltiples uno al lado del otro o en línea.
- c) Con castillos uno a continuación de otro o tandem.
- d) Escalonados y con trenes sucesivos de castillos, uno junto a otro.
- e) Contínuos con accionamiento común.
- f) Contínuos con accinamiento individual.
- g) Semi - contínuos.
- h) En zig - zag.
- i) En forma de tablero de ajedrez.

FIGURA 10

USO



Duos reversibles y no reversibles, - bloomings, slabbings, chapas, molinos cuartos o múltiples para bandas en frío y laminación en caliente de bandas anchas.

Dos a siete castillos generalmente, laminación en frío de redondos, secciones grandes y pequeñas, bandas, - perfiles, dificultad por control de velocidad y transferencia, se prefiere el tandem últimamente.

Al tratar de mecanizar aún más y obtener mayor producción se llega al continuo.

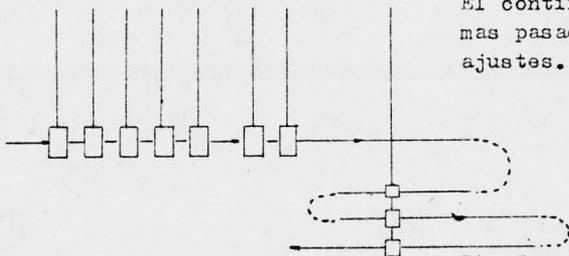
Debe controlarse diámetro y reducción en cada paso para mantener la condición:

Area x Velocidad de salida = cte.

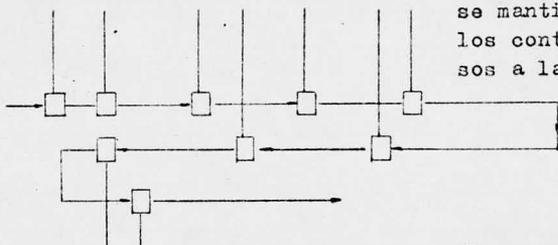
esto a todo lo largo del tren.

Más eficiente por control de velocidad y ajustes, muy productivos aunque de difícil ajuste.

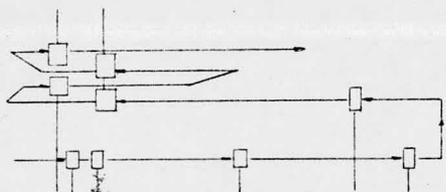
El continuo como desbaste y las últimas pasadas en línea para frecuentes ajustes.



Zig Zag para perfiles medianos y pesados, en estos molinos la barra solo se mantiene en un solo paso, no como los continuos que está en varios pasos a la vez.



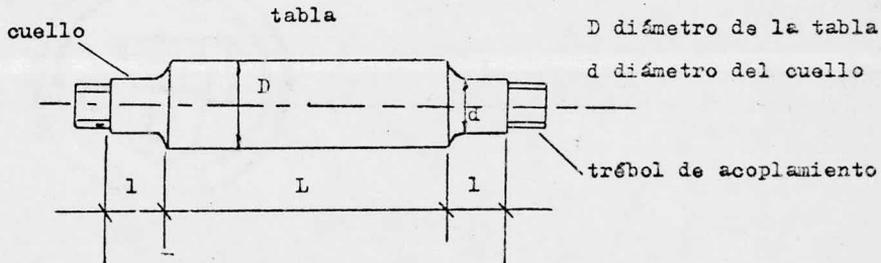
El acomodo en tablero es una variante del zig-zag y para no alargar mucho la línea, algunos castillos se colocan fuera de la línea y la barra se transfiere lateralmente, se conoce también como Cross Country mill.



A medida que se ha avanzado en requerimientos de calidad y tonelaje, se han tenido que desarrollar mecanismos de automatización que permitan disminuir el tiempo entre barras y aumentar velocidades, de otra forma se trabajaría con el límite natural humano que es de aproximadamente 488 m/min., esto por lo que toca a barras delgadas, los gruesos se producen a bajas velocidades en que la limitación proviene del peso que se maneja y en general podemos decir que la automatización y disminución de mano de obra han sido necesarias para conservar la rentabilidad de los molinos y la reducción de costos.

Las diversas variantes señaladas en la Fig. 10, han servido desde el inicio de la laminación, los primeros molinos fueron hechos en línea con el 1° y/o 2° castillo como trío, el resto como duos hasta el acabador, después se desarrolló el molino con el desbaste trío de un castillo, separado del molino preparador y acabador, esto aumentó la velocidad y la producción. Después vino otra variante similar con 2 castillos Trío-desbastes y el resto separado, aumentó velocidad, diversifica aún más la producción. Posteriormente hay desbaste en continuo y preparador en línea con giro de la barra, este diseño aumentó más la producción. Hay otras combinaciones con el anterior al adicionar otras unidades posteriores en línea o en continuo.

RODILLOS



La tabla es la zona de trabajo.

El cuello es la zona de apoyo sobre chumaceras de diversos tipos.

Como característica fundamental tenemos la dureza de acuerdo con su aplicación:

- Rodillos Blandos. Dureza 150 - 250 Brinell (25 - 35 Shore). Laminadores primarios, desbastes de perfiles pesados, intermedios, Fundición, acero forjado y fundición gris.

b) Rodillos semi-duros. Dureza 250-400 Brinell (35-60 Shore).

Desbastes de rieles y perfiles de todas clases, planos, acabadores de perfiles grandes e intermedios.

Fundición semi-endurecida, acero fundido y forjado.

c) Rodillos duros. Dureza 400-600 Brinell (60-85 Shore).

Acabadores de bandas, chapa fina, rieles y perfiles grandes, medianos y ligeros.

En rodillos cuarto para apoyo. Hierro fundido en coquilla, acero especial y aleaciones de gran dureza.

d) Rodillos extra-duros. Dureza 600-800 Brinell (85-100 Shore).

Trenes de laminación en frío. Forjados en acero al cromo, carburo de tungsteno (carboly) y aleaciones duras.

En la fundición de rodillos de hierro estos pueden ser blandos ---- (fundidos en arena), semi-duros (fundidos en coquilla recubierta de arena) y duros (fundidos en coquilla directamente). Las profundidades de la capa dura dependen del grueso de la coquilla y del metal mismo del rodillo, dependiendo de los requerimientos, pueden fundirse rodillos lisos o con canales, en cuyo caso se emplean coquillas bipartidas y anillos endurecedores de canales, también bipartidos en 2, 3 ó 4 secciones, llamados chills. Algunos rodillos de gran tamaño se construyen en dos partes, un eje forjado y el cuerpo o tabla ensamblado en caliente (270°C aprox.) el eje es convexo para evitar muchos esfuerzos en los extremos.

Compras. En la práctica al adquirir rodillos para laminación, se recurre con mucha seguridad a la experiencia acumulada del fabricante, proporcionándole toda clase de datos para hacer una correcta selección del tipo de rodillo, material, forma de fundir, durezas, profundidad de la -

dureza, etc.

Los datos que generalmente se proporcionan son:

Potencia del motor impulsor del molino, velocidad, diámetro nominal del molino y diámetro exacto real del rodillo, tipo de molino, características especiales del castillo en que va a trabajar, tipos de acero que se van a rolar, temperatura de rolado, forma y profundidad de los calibres que se van a maquinar y todos los datos estadísticos de dureza que hayan trabajado con éxito.

MOTORES.- En los casos en que la velocidad de laminación no tiene que ser regulada, se emplean, motores de corriente alterna: síncronos, sin volante y asíncronos con un volante y/o poca potencia. Cuando se requiere regulación de la velocidad se emplean motores de corriente directa. La potencia depende de la función y de la producción, generalmente de 200 a 2000 H.P. solo en grandes molinos de blooms o slabs se llega hasta 10000 H.P.

Los mecanismos de transmisión de un castillo de laminación dependen del tipo de éste y de sus condiciones de trabajo. En muchos laminadores, aquéllos consisten en una caja de piñones, reductor de velocidades, acoplamientos y flechas. Algunas veces la transmisión incluye un volante.

Un ejemplo de un laminador que tiene los mecanismos de transmisión es el laminador de la Fig. 11

Cajas de piñones. El diseño más adecuado es el de dientes dobles helicoidales con 30° de ángulo de hélice y un número de dientes bajo.

Es muy importante mantener la alineación del molino respecto a la caja de piñones, a pesar de que los acoplamientos admiten cierto desalineamiento, es importante mantener la alineación del rodillo central al mismo nivel y perfectamente alineados al piñon central (en cajas tríos);

de otra forma, el ángulo de desalineamiento del rodillo superior o el inferior aumentará al doble de lo usual y se podrá provocar la rotura de coples, de rodillos y aún de los propios piñones, especialmente al arrancar el molino.

Reductores. También es recomendable el uso de engranes dobles helicoidales que evitan esfuerzos axiales dañinos sobre las chumaceras.

El uso de reductores dependen del tipo de trabajo que se desarrolla y son usados en función, de la velocidad de laminación.

El uso de volantes requiere de mucho cuidado por el peligro que pueden representar al entrar indebidamente el material a los rodillos, con el consiguiente riesgo para el reductor, piñones y demas equipo. Se emplean en motores de inducción o de c.c. cuando el tiempo de la barra al laminarse es de 3 a 5 segundos, arriba de este tiempo no son muy recomendables pero no hay un criterio absoluto definido sobre el uso de volantes de inercia, en general hay tendencia a desaparecerlos por el uso de motores síncronos y por el uso de lingotes o billets de mayor peso que toman más tiempo en los pasos de laminación, siempre se montan en los ejes de alta velocidad en el caso de reductores.

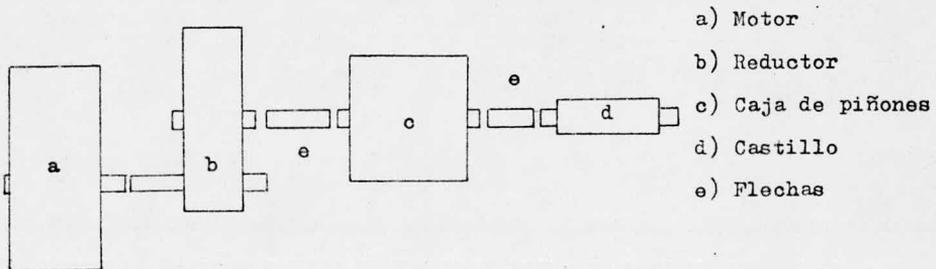


Fig. 11, Accionamiento de un molino de laminación.

MECANISMOS DE AJUSTE Y ADITAMENTOS.

Todos los molinos tienen en principio, las mismas necesidades de -
ajuste:

- a) Ajuste vertical del rodillo superior
- b) Ajuste vertical del rodillo medio
- c) Ajuste vertical del rodillo inferior
- d) Ajuste lateral de los rodillos
- e) Ajuste horizontal y vertical de las barras portaherramientas
- f) Ajuste de avance y retroceso de las cajas de entrada (gufas) y -
de salida (cinceles).

Dependiendo del tipo y tamaño del molino, algunos mecanismos operan eléctricamente, en molinos de barras y perfiles medianos y pequeños generalmente los accionamientos son manuales.

Aditamentos:

a) Gufas. Sirven para dirigir la barra a la entrada (llamadas gufadores) y a la salida (llamadas cinceles) de los rodillos, en los molinos de perfiles tienen la misma forma de la barra que se lamina, se deben -- sujetar firmemente. Fig. 12

Los gufadores nunca deben tocar los rodillos y su sujeción es muy - importante, pues en la laminación de barras que pueden girar y adquirir defectos, lo cual a su vez provoca que la barra entre al calibre inadecuadamente y vienen deformaciones, dobleces, material fuera de medida.

Cinceles. Las gufas de salida o cinceles constan de 2 partes, una - son las gufas de despegue y otra las gufas laterales, las de despegue o cinceles evitan que la barra se enrolle sobre el cilindro, estos se montan ligeramente holgados dentro de una caja que constituye la gufa late-

ral. Aún cuando se reparten las presiones en los planos de laminación - es práctica en la mayoría de los molinos de barras y perfiles, colocar cinceles en ambos rodillos, sobretodo en acabadores y preparadores.

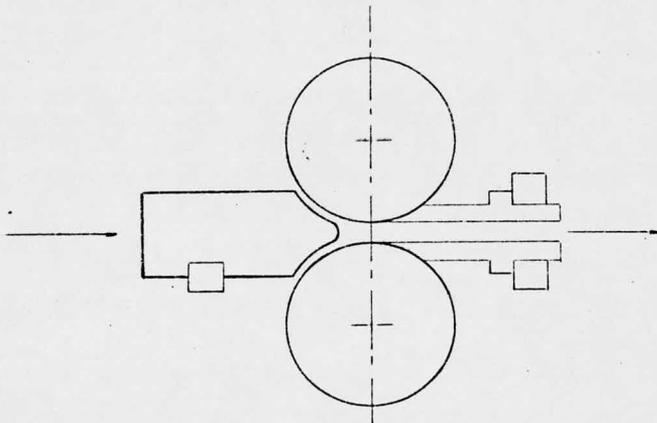


Fig. 12, Guías de entrada y salida.

La punta de los cinceles apoya sobre el calibre, teniendo la forma del mismo. Este apoyo es de suma importancia, ya que si no apoya en el - calibre el material que sale puede botar dichos cinceles, con el peligro de que se enrolle la barra en el rodillo.

CALENTAMIENTO DEL MATERIAL.

El presente capítulo denominado calentamiento del material, es un tema de mucha importancia dentro de la laminación en caliente, por ser una etapa del proceso donde el acero en forma de lingote o billet se somete a temperatura de plasticidad apropiada para su desbaste a secciones de las cuales pueda obtenerse subproductos y posteriormente productos de buena calidad.

Para un buen calentamiento debe tenerse especial atención en:

LOS TIEMPOS DE TRANCITO.

TEMPERATURA DEL HORNO.

RELACION AIRE - COMBUSTIBLE.

LA OXIDACION.

El trabajo en caliente de los metales es considerado como la acción simultánea de la deformación y cristalización, con las características de que el laminado se realiza por encima de la temperatura de recristalización del material, y la necesidad de ablandamiento debido a la recristalización ha de ser mayor que la velocidad de endurecimiento por forzamiento, por lo que la velocidad y el grado de laminado han de relacionarse con la temperatura de trabajo.

La temperatura más conveniente para el laminado en caliente es cuando se equilibran la disminución de la resistencia mecánica y el aumento de la plasticidad. Ahora bien, el acero calentado exactamente por encima de una zona crítica en general no es lo suficientemente plástico y no retiene bastante calor para trabajarlo, por lo que es necesario calentarlo a temperaturas más elevadas, sobre todo cuando los lingotes o semi-pro-

ductos son grandes, aún cuando entonces al enfriarse, sin trabajo simultáneo, crece el tamaño del grano hasta la zona crítica, y algunas veces hay que refinar el grano por tratamiento térmico.

Por consiguiente la temperatura de acabado ha de ser exactamente superior a la temperatura de recristalización, con el fin de obtener un grano fino, sin los efectos de un trabajo en frío, con lo que se mejora siempre la calidad del metal. En los aceros austeníticos sólo se consiguen ciertas propiedades físicas por una rigurosa regulación de las temperaturas de acabado. La temperatura de acabado debe ser muy superior a la temperatura de recristalización.

La deformación ha de ser lo suficientemente grande para romper los granos primitivos del lingote, y también para impedir el crecimiento del grano a partir de ciertas deformaciones críticas.

Los aceros con grano muy grande, por haber sido calentados a temperaturas muy por encima de la zona crítica se denominan sobrecalentados, y como en estas condiciones la resistencia a la tracción y ductilidad son pequeñas, conviene restaurar el tamaño del grano normal por medio del trabajo mecánico.

La temperatura de recristalización se eleva a medida, que es mayor la temperatura de fusión del metal (SYKES).

El fenómeno de la recristalización consiste en la formación continua de núcleos y el crecimiento de estos hasta que se alcanza la nueva microestructura; los nuevos núcleos se forman de preferencia en los bordes de grano y en los planos de deslizamiento o maclado pues se requiere un mínimo determinado de energía para la agrupación atómica en los nuevos cristales y puesto que esas áreas son regiones de máxima inestabilidad o de mayor contenido energético requieren menor energía exterior para alcanzar la movilidad atómica necesaria para el reagrupamiento.

Los nuevos cristales pequeñísimos, que se forman tienen la misma -- composición y estructura fina que los granos primitivos sin deformar pero son aproximadamente equiaxiales.

Durante la recristalización no hay cambio en el tipo básico de su estructura cristalina, aunque pueda haber orientación preferida.

La recristalización no es completamente instantánea a una temperatura fija, pues en todas las modificaciones estructurales cristalinas, el fenómeno es función tanto del tiempo como de la temperatura, es decir, es un fenómeno de velocidad.

El crecimiento de grano o coalescencia es el fenómeno que sigue a la recristalización completa y produce un ablandamiento del metal.

TEMPERATURAS EN LOS PUNTOS DE TRANSFORMACION DE LOS ACEROS

Todas las principales transformaciones que se verifican en el acero y en las demás aleaciones de hierro están relacionadas directamente con las modificaciones polimórficas que aparecen en el hierro y el carbono -- son muy distintas según que aquél se encuentre en una o en otra de las dos variedades polimórficas α y γ .

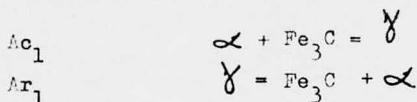
La forma γ del hierro tiene la propiedad de disolver hasta un máximo de un 2% de carbono, mientras que la forma α sólo disuelve como máximo 0.02% de carbono a 723°C. El efecto de la adición de carbono es descender la temperatura de transformación $\gamma \longrightarrow \alpha$ hasta que se alcanza un mínimo para un 0.80% de carbono. También se ha encontrado que -- tiene efectos pronunciados sobre la temperatura a que se verifica esa -- transformación la velocidad de enfriamiento o calentamiento y como consecuencia, la transformación al calentar se verifica a una temperatura más alta que la correspondiente al enfriar.

PUNOS DE TRANSFORMACION DE LOS ACEROS

(Fig. Diagrama HIERRO - CARBON)

Ac: El Fe_3C a $210^{\circ}C$ se hace magnético por enfriamiento, y deja de serlo por calentamiento.

A_1 Transformación eutéctide según las reacciones:



Ac_1 : Temperatura de equilibrio para la transformación A_1 , a pequeñas velocidades de calentamiento y enfriamiento que se aproxima a 0.

A_2 : Transformación magnética de α :

Ac_2 : Por calentamiento α deja de ser magnética.

Ar_2 : Por enfriamiento α no-magnética se hace magnética.

Ae_2 : Temperatura de equilibrio para la transformación A_2 .

A_3 : Transformación de la solución sólida:

Ac_3 : Por calentamiento todo α se transforma en γ y forma una solución sólida.

Ar_3 : Por enfriamiento γ queda sobresaturada y precipita α alrededor de γ .

Ae_3 : Transformación de equilibrio.

A_4 : Transformación de γ a δ reversible a unos $1400^{\circ}C$.

Ac_4 : Por calentamiento γ se transforma eutécticamente en δ .

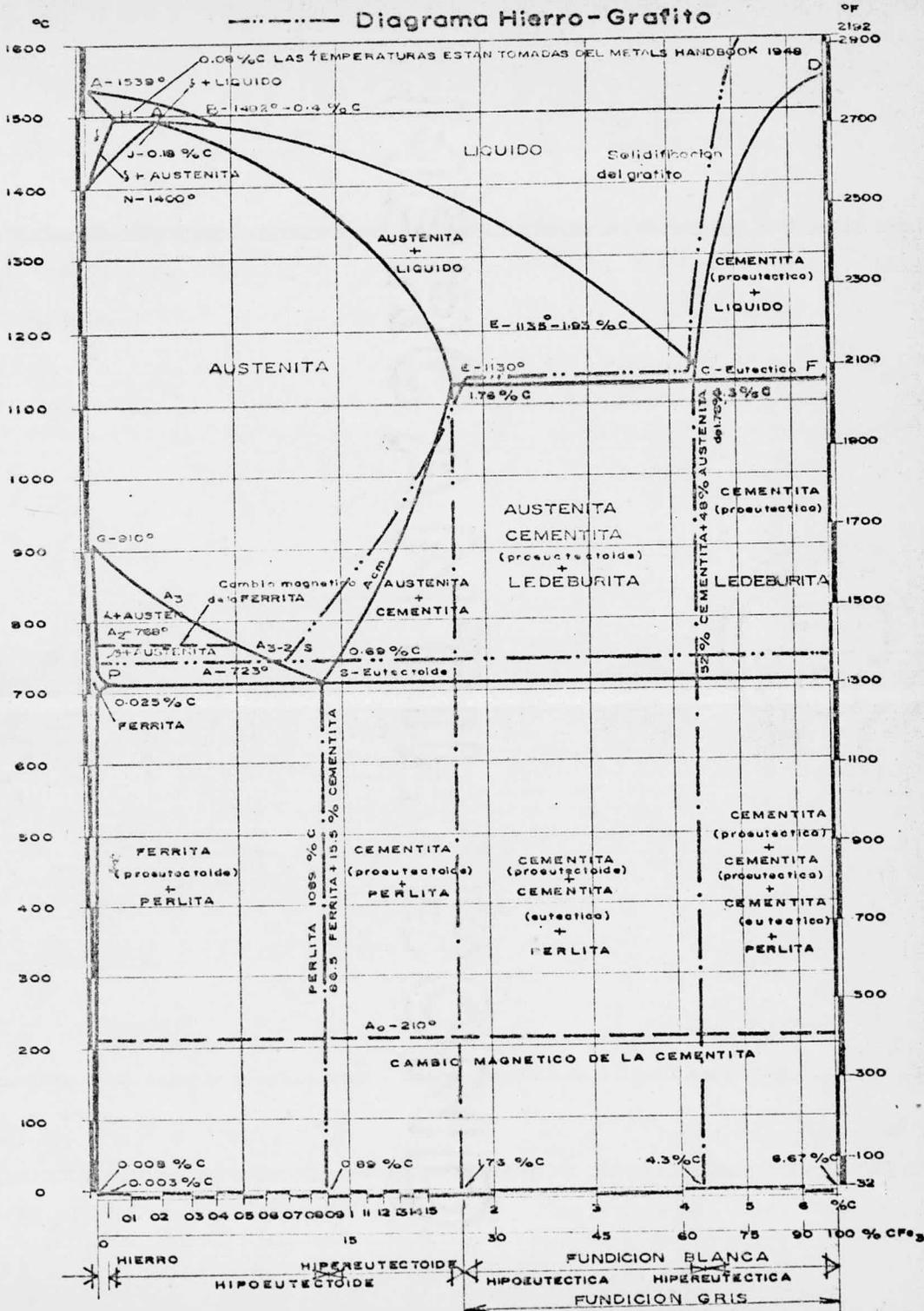
Ar_4 : Por enfriamiento δ se transforma peritéticamente en γ .

Ae_4 : Transformación de equilibrio.

Acm : Línea de solubilidad del Fe_3C .

Por encima de la línea Fe_3C se disuelve en γ . Por enfriamiento las

Diagrama Hierro-Grafito



aleaciones con más de 0.80% de carbono, comienza a precipitar Fe_3C de la solución saturada. γ .

Las transformaciones de importancia para la laminación en caliente, - así cómo también de importancia industrial son la A_1 y A_3 .

Los aceros al carbono, conocidos cómo aceros ordinarios, son de tipo perlítico. Por enfriamiento normal en aire estos aceros tienden a formar perlita, y la estructura es una mezcla ferrita-perlita, o perlita-cementita. La perlita se presenta masiva o en red, la perlita puede ser la minar o glovular, y la cementita puede estar en forma de agujas o mallas.

ESTRUCTURA CRISTALINA DE LOS LINGOTES AL SOMETERLOS

A UN CALENTAMIENTO PARA SU DESBASTE.

Se ha mencionado anteriormente que los lingotes se calientan para llevarlos a condiciones plásticas adecuadas para su laminado; por lo tanto es pertinente hablar un poco sobre la estructura que tendrán los lingotes de los diversos grados de acero, una vez que éstos han tenido el reposo suficiente para su solidificación y quedan listos para enviarse a los hornos de calentamiento, se mencionará también cómo quedará la estructura del acero una vez que salen los lingotes de los hornos para su desbaste primario.

Durante la operación de vaciado, comienza la solidificación del acero, que es un fenómeno de cristalización. Los cristales que se precipitan del acero líquido se denominan cristales primarios; en el estado sólido se verifica la cristalización secundaria denominándose entonces estructura secundaria.

La cristalización comienza alrededor de los núcleos de cristalización, los cuales pueden ser formados por átomos de la substancia solidificante denominándose en este caso nucleación exógena.

Los cristales en su desarrollo, se estorban entre sí su crecimiento, siendo por ésto difícil obtener una superficie cristalina regular.

La estructura primaria depende principalmente del número de núcleos y la velocidad de cristalización y ésto a su vez depende del enfriamiento. La velocidad de cristalización dependerá de la composición química - del acero, su valor máximo se encuentra a la temperatura de solidificación.

FACTORES QUE INFLUYEN EN LA OBTENCION DE UNA DETERMINADA

ESTRUCTURA.- Durante la solidificación del acero en las lingoteras, debemos considerar los siguientes factores que influyen en forma determinante en la estructura obtenida y por lógica consecuencia en la velocidad de cristalización y son: composición química, temperatura de vaciado, forma y temperatura de las lingoteras, tipos de vaciado.

Considerando los anteriores factores, se puede decir que en la parte exterior del lingote se tiene una capa más o menos gruesa de cristales finos (enfriamiento rápido), en seguida se encuentra una zona de cristales alargados o zona de cristales arborescentes que han crecido en forma dendrítica, con ejes normales a las paredes de la lingotera, es decir paralelos al flujo de calor del lingote, cuando el flujo de calor es bastante grande, esta zona llega hasta el centro del lingote, cuando es menor aparecerá entonces una zona de cristales globulares.

Es conveniente el control adecuado de los factores antes mencionados para la obtención de una estructura cristalina lo más regular posible u homogénea.

Durante el calentamiento debemos tener el conocimiento de los diversos puntos de transformación de las fases del acero (puntos críticos), - para poder determinar la temperatura correcta y llevarlo a condiciones - plasticidad. Para ello nos basaremos en el diagrama Hierro-Carbon, que nos permite el conocimiento de las transformaciones que se producen al -

enfriar un acero de distinto contenido de carbono desde las temperaturas correspondientes al líquido, si a continuación se examinan los microconstituyentes estructurales al estado físico. La posición de los puntos críticos en estado sólido por enfriamiento se encuentra comúnmente entre --30 y 50°C, por debajo de los obtenidos en el calentamiento.

En nuestro caso el objeto del calentamiento del acero es con el fin de elevar su temperatura donde sea suficientemente plástico, por lo tanto interesará fundamentalmente el punto crítico A_3 arriba de éste se tendrá al lingote en estas condiciones.

En el diagrama Hierro-Carbono se observará que A_3 por calentamiento alfa se transforma en gamma formando una solución sólida, por enfriamiento gamma queda sobresaturada precipitándose alfa alrededor de gamma, los aceros al carbono son del tipo perlítico, este microconstituyente se forma por enfriamiento al aire, pudiendo precipitar ferrita-perlita o bien perlita-cementita.

Continuando con este aspecto diremos que el calentamiento del acero por arriba de A_3 alcanza las condiciones austeníticas, por elevada temperatura y el tiempo de calentamiento, los granos austeníticos crecen hasta quedar en forma tosca que se refinará por el trabajo en caliente, la estructura de granos muy desarrollados se refinará con el trabajo inicial en los trenes laminadores de desbaste primario, donde el lingote recibe reducciones fuertes que rompen y deforman los granos austeníticos, recrystalizando en granos de menor tamaño, el tamaño de los granos dependerá de la temperatura, grado de enfriamiento y porcentaje de reducción para la obtención del semi-producto.

Considerando que el lingote se trabaja en caliente a una temperatura superior a A_3 , con enfriamientos relativamente rápidos, el semi-producto (billet en este caso), quedará con una microestructura formada de-

los componentes derivados de la transformación de la austenita; con un control estricto de las temperaturas de acabado se consigue una distribución homogénea de los granos de menor tamaño.

CAMBIO EN LAS PROPIEDADES EN LOS ACEROS LENTAMENTE ENFRIADOS.

Las estructuras metalográficas explican las propiedades de los aceros lentamente enfriados, la ferrita es relativamente blanda con una carga nominal de rotura de unos 35 Kg./mm^2 . El eutéctide perlita es mucho más duro y resistente 88 Kg./mm^2 .

El compuesto cementita como se puede suponer por lo antes indicado es duro y frágil y su resistencia sólo es de aproximadamente 3.5 Kg./mm^2 .

Puesto que todos los aceros ordinarios son mezclas de ferrita y cementita, su dureza aumenta a medida que aumenta el porcentaje de carbono en el hierro, en relación casi lineal. En cambio en la resistencia a la tracción influye más el modo de agruparse las partículas de ferrita y cementita, y puesto que en los aceros lentamente enfriados a la composición eutéctide aparece el estado más fino de la agregación, es lógico que ésta sea la estructura más fuerte, a partir de este valor máximo, la resistencia a la tracción, disminuye rápidamente en los aceros hipereutéctides en relación con el tanto por ciento de perlita. Los aceros hipereutéctides son un poco más fuertes que el de composición eutéctide pero la diferencia no es muy grande.

Por lo tanto los factores principales que afectan a las propiedades de los aceros son la proporción de carbono, y la microestructura, pero además aquellas pueden modificarse por la presencia de gases, especialmente oxígeno, nitrógeno e hidrógeno y sus productos de reacción.

TEMPERATURA DE CALENTAMIENTO

Para los aceros aquí discutidos que lo limitaremos a baja aleación, no hay prácticamente temperaturas críticas dadas por la solubilización de carburos, nitruros, etc. Puede suponerse que todos los elementos aleantes se encuentran en solución sólida a la temperatura de trabajo.

Una tabla de las temperaturas máximas para el desbastado en función del contenido de carbono se dá a continuación.

TABLA I -- Temperaturas de desbaste para aceros al carbono y aleados.

Contenido	T máx.	T máx. aleados	T máx.
%	°C	°C	°C
0.10	1315	1285	30
0.20	1300	1260	40
0.30	1285	1230	45
0.40	1285	1230	45
0.50	1260	1200	60
0.60	1230	1200	30
0.70	1215	1185	30

Soler estudió la influencia de la composición química sobre las temperaturas para el trabajo en caliente. Hall recoge estos datos en un gráfico reproducido en la Fig.13 . Los valores aquí representados son ligeramente menores que los de la tabla anterior (unos 30°C) y muestran que prácticamente no hay diferencias entre aceros al carbono o ligeramente aleados. Todos los datos se encuentran en una banda de temperaturas de 50°C.

En lo que hace a las temperaturas mínimas de trabajado, para el rango de 0.2 á 0.6 %, se puede considerar que estarán unos 70°C á 100°C por encima de las temperaturas de transformación eutéctide. Ello hace que - el níquel y el manganeso la disminuyan levemente, mientras que el cromo, silicio y molibdeno la incrementan, en ese orden, para iguales tenores - de composición.

Lo expuesto es válido para operaciones primarias de trabajado (quedá productos semi-elaborados). En operaciones secundarias o de acabado, - se puede llegar prácticamente a la temperatura de transformación eutéctíde.

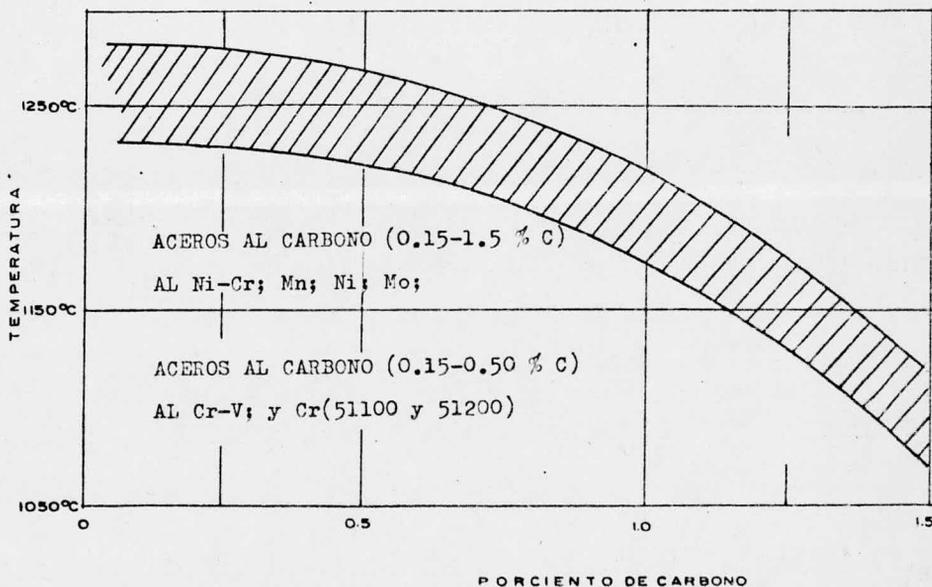


Fig.13

TEMPERATURA INICIAL DE DESBASTADO PARA DIVERSOS ACEROS

INFLUENCIA DE LA TEMPERATURA

Al pasarse de las temperaturas indicadas en la tabla I, surge el -- problema del sobrecalentamiento. Su efecto hay que considerarlo por separado sobre los lingotes o sobre el material semielaborado.

En una atmósfera muy oxidante, la oxidación será muy violenta y el aumento de temperatura en la superficie que se oxida puede producir también sobrecalentamiento. Se tiene entonces que son importantes: temperatura, tiempo y atmósfera del horno.

En el caso de lingotes, la alta temperatura no modifican la estructura de solidificación, pues sólo elimina la segregación microscópica.

Pero en el caso de material semi-elaborado, el principal problema es el enorme crecimiento de grano que tiene lugar.

Si la temperatura es superior a los 1370°C , puede fundirse el óxido superficial, dando un "lingote lavado", se produce una excesiva oxidación, con el consiguiente menor rendimiento del lingote.

A temperaturas mayores puede producirse el quemado, fenómeno sumamente complejo por el cual el óxido de hierro y el sulfuro de hierro difunden en los límites de grano, llegan a fundirse y dejan los granos disgregados en toda la zona cercana a la superficie.

En general este quemado no aparece en aceros de bajo carbono (.30%) pero por arriba de esos tenores, la sensibilidad al quemado aumenta notablemente con el carbono. El níquel y el molibdeno también incrementan el quemado, mientras que el cobre, el silicio y el cromo disminuyen la tendencia al quemado.

HORNOS DE RECALENTAMIENTO

Estos hornos se clasifican de acuerdo a las características siguientes: por el número de quemadores, por la posición del quemador, por la forma del horno, por la forma de suministro de calor y por las facilidades de economizar combustibles.

Siendo estos los más comunes:

- a).- De fosa.
- b).- Intermitentes.
- c).- Continuos:

De encendido directo.

De encendido inferior.

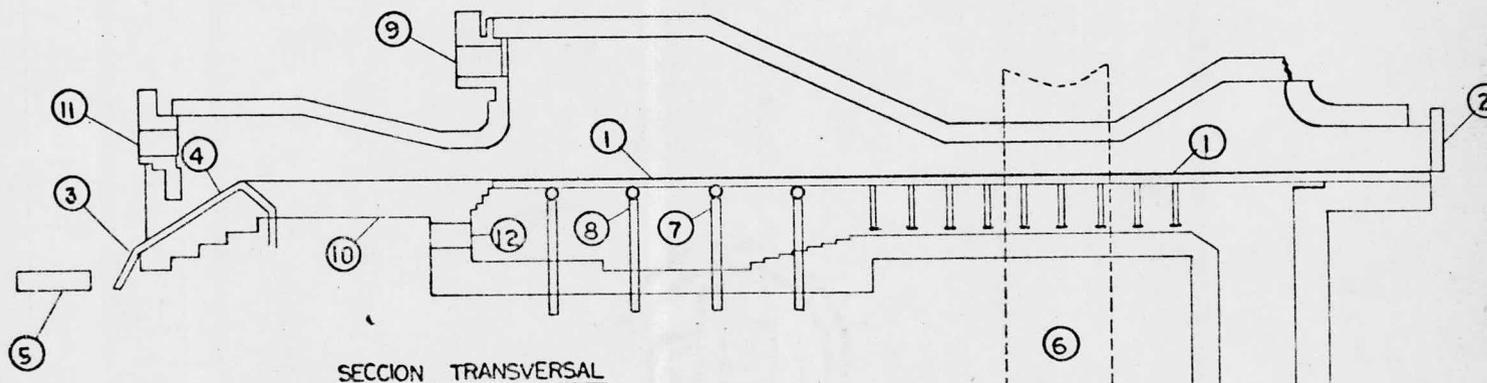
Veamos sólo brevemente el horno continuo, figura 14, en el cual las piezas de acero frías se cargan por una puerta colocada al extremo opuesto de frente a los quemadores del horno y avanzan en unos casos automáticamente, a la puerta de descarga. Dentro de éstos tipos, el material puede pasar a través de una cama estacionaria o bien una cama móvil.

Desde el punto de vista térmico es más económico, pues los gases calientes que tratan de salir por el tiro de la chimenea, recorren una mayor longitud y ceden su calor a la carga fría conforme ésta avanza de la puerta de carga a las zonas de calentamiento del horno y posteriormente a la puerta de descarga.

Estos hornos se dividen en tres zonas:

Zona de precalentamiento.- primera zona que atraviesa el material por calentar. Aquí reciben parte de las calorías que los gases de combustión llevan a la chimenea.

HORNO DE RECALENTAMIENTO



SECCION TRANSVERSAL

- 1.- DESLIZADORES
- 2.- CARGA
- 3.- DESCARGA
- 4.- RAMPA
- 5.- MESA DE LAMINACION
- 6.- CHIMENEA
- 7-8.- SOPORTES
- 9.- QUEMADORES SUPERIORES
- 10.- PISO
- 11.- QUEMADORES
- 12.- QUEMADORES INFERIORES

FIG. 14

Zona de calentamiento.- es la de más alta temperatura. Con el objeto de que el material reciba calor tanto por arriba como, por abajo, en esta zona y en la de precalentamiento, el material se desliza sobre tubos longitudinales enfriados por agua.

En esta zona el material (lingote o billet) adquiere su temperatura de descarga, pero como están colocados sobre tubos enfriados por agua, las porciones de las caras sobre ellos ceden gran cantidad de calor, enfriándose en esas porciones. Con el objeto de uniformizar la temperatura en todo el cuerpo, se pasa a la siguiente y última zona llamada de saturación donde en vez de tubos hay un piso de ladrillo refractario y un grupo de quemadores colocados en la parte superior del horno.

Este horno está provisto de controles automáticos de temperatura y flujos de gas y aire al igual que controles de presión interna. Para el control de temperatura se cuenta con pirómetros de radiación colocados, uno en la zona de saturación y el otro en la de calentamiento.

El combustible usado es gas natural, usando para su combustión aire sin calentar, la longitud de la flama puede ser variable de acuerdo con las necesidades tales como: espesor del material a calentar, temperatura deseada, por ciento de carbono, ect.

Los factores que afectan la capacidad del horno pueden ser: análisis químico del acero, dimensiones del lingote o billet, la temperatura de saturación requerida de acuerdo con el producto al laminar y el uso, combustión empleada, tipo y longitud de la flama, distribución de temperaturas dentro del horno, operación continua o no continua motivada por detensiones en el horno o en el tren de laminación, ect.

PRACTICA DE CALENTAMIENTO

El tiempo requerido para calentar una carga de lingotes o billet -- en hornos continuos, esta intimamente ligado con el tiempo de tránsito, mientras más largo sea éste, el tiempo de calentamiento será mayor y viceversa.

Se entiende tiempo de tránsito, al lapso transcurrido desde que se vacía al molde o lingotera el último lingote de la colada hasta que el total de ellos se descarga en el horno o fosa de calentamiento.

El tiempo requerido para el calentamiento de lingotes de acero al carbono ordinarios, varía de aproximadamente de una vez y media su tiempo de tránsito siempre y cuando éste no sea demasiado largo.

El calentamiento de lingotes frios depende del tamaño del lingote -- y el calentamiento debe ser lento al principio con el objeto de evitar tensiones internas que provoquen grietas.

Este calentamiento además de la función específica de calentar y -- homogeneizar la temperatura en el lingote, permite también en muchos casos, mejorar sensiblemente la calidad superficial de los lingotes por -- oxidación y posterior descascarillado de los defectos de superficie.

OXIDACION

Para enfocar este problema, se debe tener presente que es una solución de compromiso entre:

a) espesor de la cascarrilla suficiente como para oxidar la mayor -- parte de los defectos superficiales y permitir un correcto descascarilla do.

b) rendimiento del lingote con poca pérdida por metal oxidado.

Atmósfera del horno: en base a lo dicho se procura que sea ligeramente oxidante (O_2 , CO_2 , H_2O , SO_2 . ect.) y con el menor contenido posible

de oxígeno libre.

La absorción del azufre de los gases de combustión por parte de la superficie oxidada del lingote, hace que este difunda como sulfuro en el acero y la atmósfera reductora acelera esta absorción, mientras que una atmósfera oxidante la retarda. El níquel, cobre y molibdeno incrementan la absorción de azufre.

En presencia de óxido de níquel no conviene usar atmósfera reductora, pues al efecto anterior se agrega la reducción del óxido de níquel, quedando níquel en la interfase FeO-Fe. Cuando el FeO llega a tener un contenido en hierro mayor del 72%, el NiO es reducido según la ecuación:



el níquel se deposita entonces en la interfase y fija la cascarilla, dificultando su eliminación. Para tener una idea de este problema, basta el dato de la presión del chorro de agua descascarillador, que es de 70Kg - por mm².

Composición de la cascarilla: el mecanismo de formación de la cascarilla es de naturaleza dinámica, formándose y reduciéndose conjuntamente los óxidos de hierro más enriquecidos en oxígeno. Hasta los 566°C no se presenta el óxido ferroso y las películas de óxido férrico y ferroso-férrico son muy adherentes y difíciles de eliminar, incluso por decapado ácido.

A las temperaturas de calentamiento para desbastado, o sea de 800°C a 1300°C, se forman tres capas en la cascarilla:

--- hematita u óxido férrico en la superficie (poco espesor: 0.5 á 2%).

---magnetita u óxido ferroso-férrico en la capa inmediata inferior-

(espesor del 10 al 15%)

— wustita u óxido ferroso en contacto con el metal (espesor del 85 al 90%).

Estos compuestos en la práctica se comportan como óxidos puros y tienen las siguientes propiedades físicas:

COMPUESTO	DENSIDAD	TEMP. DE FUSION
FeO	5.55	1370°C
Fe2O3	5.2	1595°C
Fe3O4	5.4	"

Su apariencia depende esencialmente de las condiciones en que fué formada, a los 1280°C es altamente cristalizada, a los 1300°C tiene una forma que no es compacta, a los 1350°C es muy plástica y de superficie uniforme.

Adherencia de la cascarilla: dada la importancia de su eliminación, se estudia su adherencia. En general ésta es inversamente proporcional al espesor. Desde los 700°C, la máxima adherencia se tiene entre 800°C y 820°C y es muy débil por arriba de los 950°C.

Lustman, en base a trabajos de E. Scheil, supone que el agregado de cromo, aluminio y silicio, forma óxidos internos y/o dobles con el FeO, que se depositan en la superficie del metal (a menudo en bordes de grano) y dificultan la eliminación de la cascarilla. Por el contrario, Bernard indica que en caso de aceros ligeramente aleados, los elementos de adición que tienen una afinidad con el oxígeno mayor que la del hierro, dan lugar a la formación de una capa intermedia de óxido, disminuyendo la adherencia.

Este último se basa en trabajos más recientes.

Cuando los elementos aleantes tienen una afinidad con el oxígeno menor que la del hierro, ocurre lo contrario de lo expuesto anteriormente.

te. Es el caso del cobre y del azufre que presipitan en la interfase -- Fe-FeO en forma de inclusiones plásticas.

Se ha observado que la temperatura no tiene influencia en la composición de la cascarilla, la oxidación sí tiene influencia en la forma -- ción y composición de la cascarilla.

POROSIDAD DE LA CASCARILLA.- la mayoría de los autores que han hecho estudio sobre este particular consideran que la porosidad de la cascarilla determina su comportamiento durante el desbaste, los óxidos formados en los hornos recalentadores son más fácilmente incrustados cuando la cascarilla es menos porosa.

El origen de la porosidad es por difusión del oxígeno que difunde a través del óxido férrico, óxido ferroso-férrico y óxido ferroso que está en contacto con el acero. La porosidad se encuentra en la parte inferior del óxido ferroso (FeO) cuando tiene lugar la siguiente reacción:



La parte superior del óxido ferroso, Fe₃O₄ y Fe₂O₃ tienen menos -- sustituciones y no son porosas, lo que justifica la oportunidad de liberarse de la cascarilla es menor cuando el número de átomos de oxígeno -- encontrados es mayor lo que viene a aumentar su espesor y disminuir la -- porosidad.

Con el aumento de la temperatura se incrementa la porosidad, si la temperatura alcanza los 1370°C que el punto de fusión del óxido ferroso se tiene la máxima porosidad, por ello es aconsejable mantener la temperatura entre los 1330°C y 1370°C para que no haya fusión parcial de los -- lingotes.

La experiencia ha demostrado que los lingotes deben ser calentados en el menor tiempo posible para conseguir la máxima porosidad de la cas-

carilla y consecuentemente su mayor eliminación en el acero, debido a — que tiene una fase inestable y tiende a compactarse, si se deja el tiempo suficiente para ello y el espesor de la cascarilla aumenta con el — tiempo de calentamiento y saturación.

DEFECTOS EN EL CALENTAMIENTO.— las causas más importantes de defectos son: velocidad de calentamiento, temperatura tiempo y atmósfera del horno.

Velocidad de calentamiento.— debido a la baja conductividad térmica de los aceros, se produce un gradiente de temperatura desde la superficie hacia el centro de los lingotes durante el calentamiento. Esa conductividad térmica disminuye con el agregado de elementos aleantes, variará la disminución en función del elemento aleante.

El gradiente de temperatura produce un estado de tensiones térmicas debido a dos efectos diferentes:

a) Dilatación lineal en la superficie. La superficie, a mayor temperatura, dilata más que el centro. Ello hace que el centro del lingote se encuentre traccionado y la superficie comprimida. A bajas temperaturas, cuando el material aún no es suficientemente plástico, aparecen grietas internas que generalmente sueldan en el posterior trabajado.

b) Transformación alfa- gamma. Con la consiguiente contracción de volumen que se inicia en la superficie más caliente. Se produce compresión en el centro y tracción en la superficie. Este desfavorable estado de tensiones actúa sobre los defectos superficiales (que son consentrados de tensiones) y forma grietas que oxidan y no sueldan, dejando defectos permanentes.

Otro factor a tener en cuenta con la velocidad de calentamiento, es la relación entre la masa a calentar y la superficie de calentamiento, — esto es, el tamaño del lingote. Se dan algunas normas empíricas al res—

pecto:

- i) Lingotes pequeños: de 100 Kg á 1/2 ton. Suele indicar la velocidad de calentamiento como el tiempo necesario para calentar el lingote por cm. de espesor o diámetro.
 - espesor min. ó diámetro = 75 mm; aceros de $\approx 0.50\%$ C — min./cm.
 - espesor min. ó diámetro = 75 mm; aceros al carbono y ligeramente aleados — 2.5 - 3 min./cm.
 - espesor min. ó diámetro de 75 mm á 225 mm; aceros al carbono y ligeramente aleados — 6 min./cm.
- ii) Lingotes grandes: de 1/2 ton á 10 ton. Se dan los tiempos totales de calentamiento.
 - aceros con 0.3% C; — (peso en ton) horas + 1 hora.
 - aceros con 0.3 á 0.8% C; — (peso en ton) horas + 4 horas.

De lo expuesto se desprende que es necesario considerar tres etapas de calentamiento para evitar defectos:

- 1) Baja velocidad de calentamiento para bajas temperaturas y hasta pasada la temperatura de transformación.
- 2) Alta velocidad de calentamiento compatible con la oxidación y — los otros factores, desde la temperatura de transformación.
- 3) Mantener la entrega de energía calórica a un valor que compense las pérdidas del horno y permita homogeneizar la temperatura en el interior del lingote.

DESCARBURIZACION: durante el calentamiento, no sólo se oxida el hierro, sino también el carbono. El hidrógeno también se combina con el carbono dando hidrocarburos. A estos fenómenos se les llama descarbonización.

En las zonas adyacentes a la superficie, el carbono difunde hacia — la superficie, para reducir el gradiente de concentración que aparece.

Se forma así una zona de bajo contenido de carbono o descarbonizada

da.

Los factores más importantes que influyen sobre la descarburización son: atmósfera del horno, temperatura, tiempo y tamaño del lingote.

En forma muy general se pueden distinguir tres zonas:

- a) zona superficial con muy poco carbono (prácticamente ferrita pura)
- b) zona intermedia con el gradiente de concentración del carbono
- c) zona interior sin descarburizar, en la cual se mantiene la composición nominal del carbono

Las zonas a) y b) dan la profundidad de descarburización.

El efecto de los elementos aleantes sobre la descarburización es el siguiente: el carbono, aluminio y cromo la incrementan; el silicio y el níquel prácticamente no la afectan; el manganeso la disminuye.

Blain, describe un método utilizado en algunas fábricas alemanas — para eliminar la capa descarburada. Consiste en calentar en una atmósfera levemente oxidante primero, cambiando luego y por un corto tiempo a una atmósfera muy oxidante. De esta manera, la zona descarburada se oxida y es eliminada en el posterior descascarillado.

Influencia de las inclusiones: el efecto más marcado de las inclusiones es lo que hace al calentamiento, es el de actuar como concentradores de tensión cuando se encuentran sobre la superficie o la cortan.

Para aceros calmados y semicalmados, si la temperatura es muy alta, el material no-metalico de la cabeza del lingote, que se puede suponer — como mezcla de inclusiones y de escoria, llega a fundir. Llena así las cavidades del rechupe y no permite que éste suelde al ser deformado el lingote en caliente.

RELACION AIRE - COMBUSTIBLE

En el proceso de control de oxígeno en el horno si se considera una cámara de combustión ideal y un quemador susceptible de operar con cantidades variables de aire se podrá observar que el análisis del flujo de gases de combustión varía ampliamente de acuerdo con el aire suministrado y la cantidad de combustible.

Cuando la cantidad de aire es suficiente para la combustión del combustible transformando los elementos que lo componen a CO_2 y H_2O sin dejar remanentes en forma de CO ó H_2 se dice que la combustión es perfecta, en estas condiciones en el análisis de flujo de gases de combustión se tiene un valor máximo de CO_2 y N_2 y ausencia total de CO , H_2 y oxígeno.

Al incrementarse la cantidad de aire, en el análisis de los gases de combustión hay un incremento en el porcentaje de CO_2 , incrementándose gradualmente el porcentaje de O_2 , debido a que el suministro de aire ha sido aumentado resultando en estas condiciones una atmósfera oxidante.

Si el flujo de aire se reduce para la misma cantidad de combustible, en el análisis de gases de combustión, hay una disminución en el porcentaje de CO_2 , ausencia de O_2 y un incremento de CO ó H_2 lo que indica que la operación del horno en estas condiciones es rica en combustible y tiene atmósfera reductora y por lo tanto la combustión es incompleta.

La concentración del oxígeno en el flujo de gases de combustión, es la base para el control de la combustión y puede decirse que es un control indirecto debido a que los productos de la combustión dependen del C y el H_2 que no son constantes para todos los combustibles.

FACTORES BASICOS QUE AFECTAN EL PROCESO DE LAMINACION.

El objetivo de este punto es enumerar los factores que pueden afectar al proceso de laminación. Como es lógico, al ser la laminación un -- proceso que produce cambio de forma en el metal, interesan fundamental -- mente los que interactúan con la resistencia a la deformación del mismo.

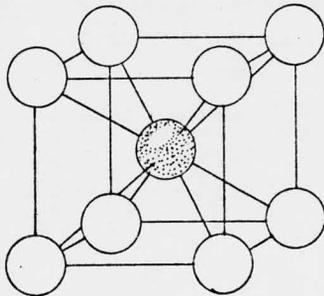
FACTORES ESTRUCTURALES DEL MATERIAL

a) Estructura cristalina: en el caso del hierro puro y aceros de -- baja aleación, se presentan normalmente dos estructuras: cúbica centrada en el cuerpo (Fe-alfa o ferrita) y cúbica centrada en las caras (Fe-gamma o austenita). Si bien la primera presenta mayores posibilidades-- de deformación por poseer mayor número de sistemas de deslizamiento (48-- sistemas), es fuertemente influenciada por las impurezas. Esto hace que -- en la práctica, para las aleaciones comerciales, la cúbica centrada en -- en las caras (12 sistemas) ofrezca mejores características de deformabi-- lidad. Este hecho es importante porque proporciona a los metales cúbicos centrados en las caras propiedades físicas diferentes de los otros meta-- les, entre las cuales está la habilidad para soportar deformaciones plás-- ticas severas.

En concordancia con la falta de un plano compacto está la elevada -- tensión cizallante crítica para el deslizamiento en los metales cúbicos-- centrados en el cuerpo. En el hierro es aproximadamente 4000 lb/in^2 --- (281 Kg/cm^2) a temperatura ambiente.

Las direcciones de deslizamiento coinciden siempre con las líneas -- reticulares de átomos más proximamente empaquetados, la dirección de des-- lizamiento es siempre la que tiene más densidad de átomos y por lo tanto la red cúbica centrada en las caras es la que posee tan gran número de --

planos compactos y direcciones compactas.



(c c)

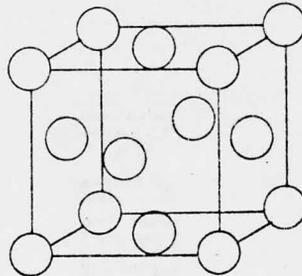
12 planos

Cada plano con 4

direcciones

$12 \times 4 = 48$ sistemas de

deslizamiento



(c c c)

4 planos

Cada plano con 3

direcciones

$4 \times 3 = 12$ sistemas de

deslizamiento

b) Densidad y distribución de defectos. Consideraremos como tales:

--- número de vacancias e intersticiales (en equilibrio térmico o — producidos por deformación).

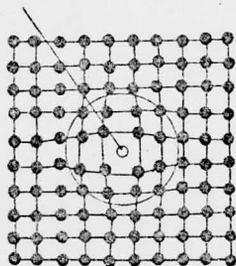
La formación de defectos puntuales está relacionada con el movimiento de difusión¹ (térmico) de los átomos y la existencia de impurezas en el metal, que deforman su red cristalina.²

El proceso de difusión en el cuerpo cristalino se puede explicar — por el hecho de que, bajo la influencia de las fluctuaciones térmicas, — algunos átomos, la energía cinética de los cuales sobrepasa considerablemente sus valores medios, pueden salir de su posición normal que ocupan—

en los nudos de la red cristalina al espacio entre los nudos (fig. 15a) a la superficie del cristal, (fig. 15b), o bien, a la dislocación vecina.

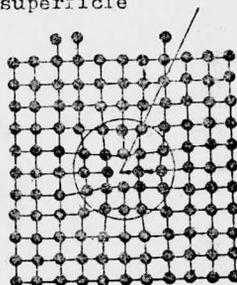
El átomo que sale de su posición de equilibrio al espacio entre los nudos se llama átomo dislocado o intersticial, y al lugar libre que se forma en el nudo de la red se le llama hueco o vacancia. La formación de átomos intersticiales y vacancias provoca una deformación de la red.

Átomo intersticial
(dislocado)



(a)

Paso del átomo
a la superficie Vacancia



(b)

Fig. 15 Esquema que ilustra los defectos puntuales del cristal (a y b) y el desplazamiento de difusión de los átomos (huecos o vacancias) (b).

¹ Por difusión se entiende el desplazamiento de los átomos en el cuerpo cristalino a distancias que superan a las distancias interatómicas. Si las dislocaciones de los átomos no están relacionadas con las concentraciones en separados volúmenes, entonces este proceso se llama autodifusión.

² La dislocación de los átomos en los nudos de la red es equiponde-

rante. En esta posición los átomos poseen una energía potencial mínima.-

Para sacar a los átomos de la posición de equilibrio hay que gastar trabajo contra las fuerzas interatómicas internas. En este caso, los átomos y toda la red reciben una energía elevada.

Tal posición de desequilibrio se caracteriza por la deformación de la red, es decir, por la modificación de las distancias entre los átomos.

La cantidad de vacancias a una temperatura próxima a la de fusión alcanza 1.0% con relación al número de átomos en la red. La formación de vacancias no está relacionada con el paso del átomo precisamente al espacio entre los nudos. Por eso la cantidad de vacancias y de átomos dislocados es distinta.

La formación de vacancias, con más frecuencia, tiene lugar debido a la evaporación de los átomos de la superficie al medio ambiente. Semejante mecanismo de formación de vacancias se puede observar en las redes de los metales con empaquetamiento compacto de los átomos, donde la formación de átomos dislocados prácticamente es imposible a causa de la deformación brusca de la red. Los defectos puntuales de la red aparecen como resultado de la introducción de impurezas, que, por lo general, están -- presentes incluso en los metales más puros..

--- densidad y distribución de dislocaciones: la dislocación es el mecanismo básico de la deformación.

Las dislocaciones se forman en el proceso de cristalización y fundamentalmente al deformarse el metal.

El movimiento de una dislocación simple a través de un cristal produce un escalón sobre la superficie cuya profundidad es de una distancia atómica. Como una distancia atómica en un cristal metálico es del orden de unas cuantas unidades Angstrom, tal escalón no será visible a simple vista. Para poder producir una línea de deslizamiento visible se deberán

producir muchos cientos o miles de dislocaciones a través de un plano de deslizamiento. (Fig. 16).

La densidad de las dislocaciones¹ en el metal antes de la deformación es de $10^4 - 10^6 \text{ cm}^{-2}$ y después de ser deformado la densidad alcanza 10^{12} cm^{-2} . Lo cual explica la discrepancia entre las cargas de deformación aparente y real descansa en el hecho de que los cristales reales no son perfectos sino que contienen defectos.

Hay dos orientaciones básicas de una dislocación — la de borde y la helicoidal; las primeras están confinadas a moverse en un plano de deslizamiento simple (sus vectores de Burgers son normales a las líneas de dislocación) y las helicoidales, con sus vectores de Burgers paralelos, son capaces de moverse en cualquier plano que pase a través de la línea de dislocación (producen el deslizamiento transversal).

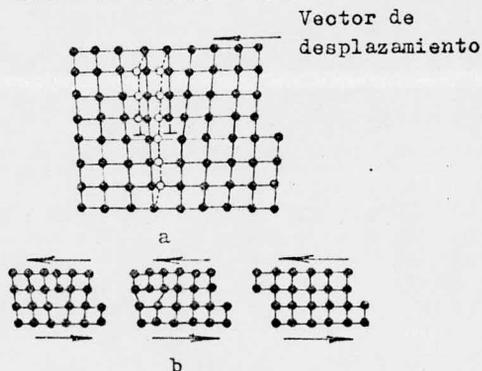


Fig. 16, Desplazamiento de los átomos al avanzar la dislocación de borde un espacio interatómico.

¹ La densidad de dislocaciones $= \frac{\sum l}{V} \text{ cm}^{-2}$, donde $\sum l$ es la longitud total de las dislocaciones en el cristal, en cm; V es el volumen del cristal, en cm^3 .

--- bordes de grano: inversamente relacionado al tamaño de grano.

Los bordes de grano juegan un papel importante en la determinación de las propiedades de un metal. Por ejemplo, a bajas temperaturas los bordes de grano son, como regla, bastante fuertes y no debilitan a los metales. De hecho, los metales puros muy deformados, y la mayoría de las aleaciones, fallan a bajas temperaturas por fisuras que pasan a través de los cristales y no de los bordes de grano. Las fracturas de este tipo se llaman transcristalinas. Sin embargo, a temperaturas elevadas y a deformaciones bajas, los bordes de grano pierden su resistencia con mayor rapidez, resultando que las fracturas no atraviesan ya a los cristales sino que corren a lo largo de los bordes de grano. Las fracturas de este último tipo se denominan intercristalinas.

En el primer caso podemos considerar una oxidación intergranular de impurezas, resultando por un calentamiento prolongado del metal. Para el segundo caso, tomemos el ejemplo del hierro conteniendo pequeñas cantidades de azufre como impureza. El sulfuro de hierro es líquido a temperaturas bien por debajo del punto de solidificación del hierro, y el sulfuro líquido forma una película de borde de grano que separa casi completamente a los cristales de hierro. Como un líquido no posee una fuerza real, el hierro o el acero en estas condiciones son frágiles y no pueden ser trabajados en caliente sin que se desintegren.

ESTADOS DE TENSIONES Y DEFORMACIONES Y SUS RELACIONES

Dentro del campo de la mecánica del continuo, se pueden considerarse dos aspectos:

a) el enfoque metalúrgico, que procura determinar, mediante la aplicación de las teorías de plasticidad y los métodos de investigación de -

los procesos de trabajado, las tensiones y fuerzas necesarias para producir las deformaciones requeridas en el material.

b) el enfoque mecánico, que utiliza el estado de tensiones resultante del estudio anterior, para poder diseñar, aplicando relaciones elásticas u otros criterios de cálculo, los equipos laminadores en que se efectúa el proceso. Naturalmente que también interviene en la operación del proceso, afin de asegurar la viabilidad de aplicar determinadas deformaciones a materiales de características de resistencia mecánica conocida.

TIPO DE TENSIONES A QUE SE ENCUENTRA SOMETIDO EL MATERIAL

El comportamiento mecánico de los materiales varía con el estado de tensiones a que se encuentra sometido.

Así, mientras un acero SAE 1010 sometido a tracción solo puede deformar un 25 a 30%, pues aparece la inestabilidad plástica en tracción; si se deforma por compresión, puede llegar a un 90 ó 95% de deformación.

Afortunadamente, en la laminación las tensiones actuantes son de compresión, pero debe tenerse en cuenta la baja deformabilidad en tracción cuando se lamina en frío con tensión delantera o trasera.

GEOMETRIA DE LA DEFORMACION

Sólo en forma excepcional la deformación es homogénea. Esta inhomogeneidad conduce a la creación de tensiones residuales en el material.

Por ejemplo, pequeñas reducciones en laminación hacen que la deformación sea superficial. El caso extremo es el llamado laminado superficial (surface rolling) que es un tratamiento superficial para dejar un estado de tensiones residuales de compresión en la superficie del mate-

rial. Por el contrario, si las deformaciones son muy grandes, la deformación es mayor en la zona central del material, invirtiendo el signo de las tensiones residuales.

TEXTURA

La rotación que se produce en los planos cristalográficos de deslizamiento de cada uno de los cristales que forman el policristal sometido a deformación, hace que éste pierda las características isotrópicas que presentaba por una distribución al azar de sus pequeños cristales anisótropos. Luego de una dada deformación aparecerá una orientación preferencial o textura en el material laminado, que se acentuará al aumentar la deformación.

RELACIONES ENTRE EL MATERIAL Y LOS CILINDROS

En mayor o menor grado, siempre se producen puntos de unión entre - dos superficies en contacto a elevada presión. La formación y posterior destrucción de estas uniones conduce al fenómeno de fricción.

La minimización del mismo se procura con el uso de lubricantes adecuados (agua en nuestro caso). Mientras que la fricción puede ser muy baja en la laminación en frío, adquiere valores elevados para la laminación en caliente, en especial para la laminación en canales cerrados de ciertos perfiles.

TEMPERATURA

La temperatura modifica radicalmente el comportamiento mecánico de un material. Si se utiliza la llamada relación de temperaturas homólogas

$\theta = T/T_f$ - donde T_f es la temperatura de fusión absoluta del metal (en $^{\circ}\text{K}$) y T la temperatura absoluta actual, se podría dibujar el esquema de la Fig.17, que es un segmento que vá desde 0°K hasta $T_f^{\circ}\text{K}$. En el mismo se aprecian dos temperaturas características: T_t - temperatura de transición, en la que se produce la transición de un mecanismo de deformación por deslizamiento, a uno de fractura por clivaje (fractura a temperatura suficientemente baja, llamada también fractura transcristalina); La otra, T_r - temperatura de recrystalización, es por definición: la temperatura en que se obtiene un 90% de estructura recrystalizada, si se mantiene durante una hora, el metal deformado en frío entre 70 y 80%.

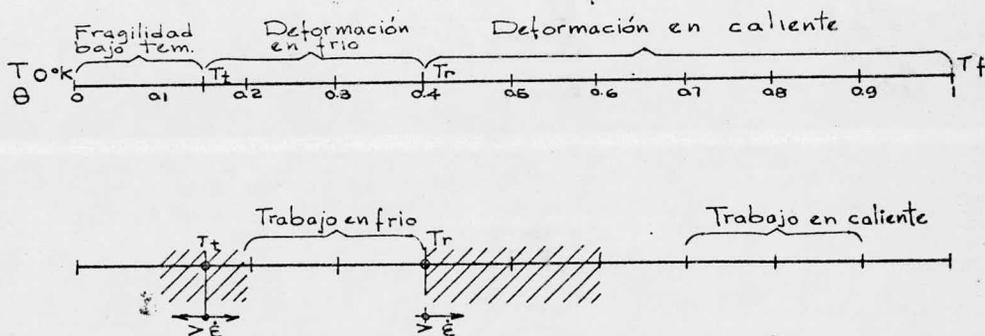


Fig.17, Efecto de la velocidad de deformación sobre T_t y T_r .

Estas dos temperaturas determinan tres zonas características:

- I - fragilidad a baja temperatura: entre 0° y $T_t^{\circ}\text{K}$ (aprox. $0.15T_f$)
- II - deformación en frío: entre T_t y $T_r^{\circ}\text{K}$ (T_r aprox. 0.40 para metales puros).

III - deformación en caliente: entre T_r y T_f °K. se puede apreciar que en esta zona se superpone al mecanismo de deformación, otro mecanismo de recuperación y recristalización.

Desde el punto de vista práctico, lo visto permite fijar los rangos de temperatura de trabajado en frío y en caliente. Si tomamos cierto margen de seguridad:

- a) trabajado en frío: entre 0.20 y 0.40 de T_f .
- b) trabajado en caliente: entre 0.7 y 0.9 de T_f (o de la temperatura de sólidos).

Esto quiere decir que el rango de temperaturas es independiente de la temperatura ambiente. El plomo o el zinc, a 20°C deforman en caliente, mientras que el tungsteno a 600°C está deformado en frío.

A los efectos descriptos de la temperatura, deben agregarse la transformación polimorfa o alotrópica que se produce en ciertos metales. Tal de Fe-alfa a Fe- gamma a 910°C. Esta transformación de fase modifica también las características de deformación, pues como se vio anteriormente, la estructura cristalina influye sobre la misma.

TIEMPO

El tiempo durante el cual se efectúa el proceso, es también un factor muy importante. Normalmente se le incluye o estudia como velocidad de deformación.

Es conveniente analizarlo en relación con la temperatura.

- a) temperatura de transición: al aumentar la velocidad de deformación, aumenta también la temperatura de transición, o sea, el material se

torna frágil a temperatura cada vez más elevadas. Por esta razón, la determinación de la temperatura de transición se hace mediante el ensayo-- impacto, que se efectúa a alta velocidad de deformación.

b) temperatura de recristalización: el aumento de la velocidad de deformación indica que la deformación se produce en tiempos cada vez más cortos. Como la temperatura de recristalización estaba definida para un tiempo de una hora, al disminuir el tiempo, será necesario mayor temperatura y se tiene entonces una temperatura de recristalización aparente.

Por esta razón se toma como límite mínimo para el trabajado en caliente $0.7 T_f$.

c) trabajado en frío: puede considerarse que el efecto del aumento de la velocidad de deformación, prácticamente no influye sobre la resistencia a la fluencia del material para este rango de trabajo.

d) trabajado en caliente: por razones idénticas a las dadas en b), al ser los tiempos cada vez menores, no dá lugar a que se produzca la -- recuperación de las propiedades mecánicas ni la recristalización (ambos procesos activados térmicamente), esto hace que la resistencia a la deformación del material se incremente notablemente al aumentar la velocidad de deformación. La Fig.18, muestra esa influencia para un acero con 0.17% de carbono para 930°C y 1200°C .

TRANSMISION DE CALOR Y SHOCK TERMICO

Durante las operaciones de calentamiento y enfriamiento, es muy importante esta propiedad, pues puede conducir a tensiones residuales térmicas elevadas en el lingote o semielaborados. Además, las velocidades de calentamiento y enfriamiento deben ser cuidadosamente controladas en algunos aceros para obtener permanentemente condiciones de equilibrio --

termodinámico en soluciones sólidas con gases.

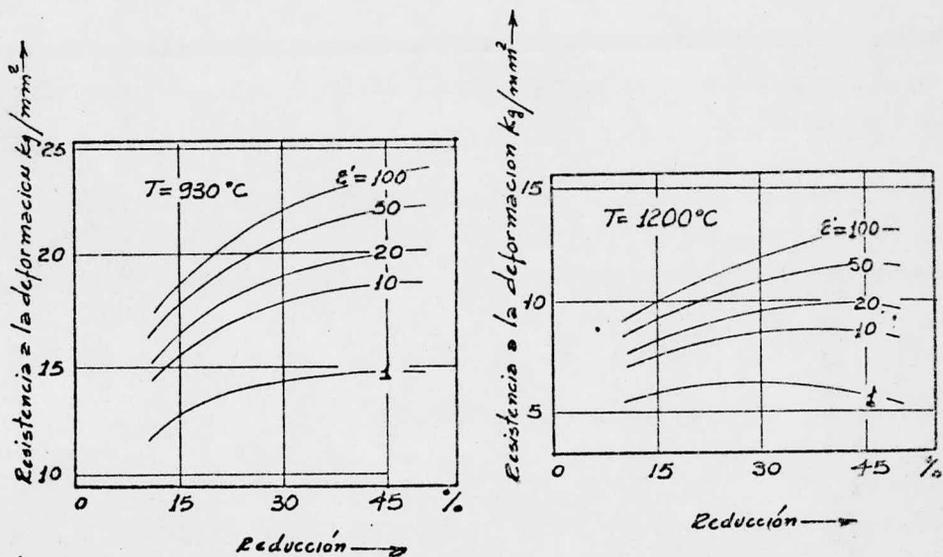


Fig. 18, Influencia de la velocidad de deformación a diversas temperaturas.

CONTROL Y PREPARACION DE LA MATERIA PRIMA.

Como materia prima que interviene en este proceso (laminación en -- nuestro caso) es: lingote de fundición convencional y palanquilla o bi--llet. Para poder hablar del control y preparación, mencionaremos las formas de vaciado de lingotes; así como los factores que influyen en los -- defectos que aparecen en lingotes y semi-productos.

Colada del acero. - El acero se cuela generalmente en ollas que son recipientes de chapa de acero con un revestimiento refractario provista de un orificio en el fondo, que es obturable a voluntad por medio de una barra de acero cubierto por refractario circular, esta barra llamada espina es accionada por medio de un juego de palancas.

Lingoteras. - Son moldes de hierro colado en forma de tronco de pirámide y generalmente de sección cuadrada aunque las hay también en forma rectangular y octagonal. El peso de los lingotes depende, entre otros -- factores, de la capacidad de los trenes de laminación y del semi-producto que se desea obtener.

Formas de vaciado - Ventajas y Desventajas. - El llenado se hace por dos procedimientos: por colada directa y por colada en estrella.

Vaciado por arriba. - Ventajas. Instalación y mano de obra barata, -- más alto rendimiento, ocupa menor espacio.

Desventajas. - Generalmente usa tiempos cortos de vaciado, tiene difícil control.

Vaciado por abajo. - También se denomina colada ensifón. Se disponen las lingoteras unidas por su parte inferior con ductos refractarios a -- una lingotera principal cubierta interiormente por material refractario.

La colada se efectúa por el tubo central llenándose las lingoteras -- a través de los conductos de abajo a arriba. Se usa generalmente en ace-

rias donde los hornos son de baja capacidad.

Ventajas.- Se obtienen lingotes de mejor superficie, mejor control y mejor observación.

Desventajas.- Menor rendimiento por el rechupe, mayores costos en instalación y mano de obra, requiere mayor espacio.

El mejor vaciado se consigue:

Poniendo un aislante exotérmico.

Vaciar por arriba.

Usar lingoteras que den cabeza perdida.

Usar lingoteras de conicidad invertida y adecuada.

Colada continua.- En los últimos años se ha trabajado bastante sobre el perfeccionamiento de algún método que permita la elaboración directa de semi-productos por colada continua del acero. Las principales dificultades consisten en la necesidad de adaptar las velocidades de colada a la velocidad de solidificación y en asegurar una refrigeración y lubricación adecuada de la coquilla.

El acero líquido se cuele en un depósito provisto de un sistema de calefacción cuya salida es una boquilla de circonio de 19 mm de diámetro interior. A continuación pasa el chorro de acero a una coquilla de 50cm. de longitud de cobre, cromada interiormente con 0.13 mm de espesor y refrigerada con agua.

La boquilla acompaña al semi-producto en formación en su movimiento de descenso y después se remonta bruscamente a su posición primitiva. Este movimiento de vaivén acelera la refrigeración del metal ya sólido y facilita su separación de la lingotera. El semi-producto es seccionado periódicamente en trozos de longitud deseada.

Defectos de los lingotes. Los defectos que presentan los lingotes - se deben a la heterogeneidad de su masa, de caracter químico, estructural y físico.

Heterogeneidad química.- La composición del lingote no es la misma en toda la masa sino, que en el curso de la solidificación se produce-- acumulación de algunos elementos en determinadas zonas. En general podemos decir que:

1.- El contenido de carbono es más elevado en el centro y en la parte superior del lingote.

2.- Hay más Si, P, S, en el centro del lingote, que en la zona superficial .

3.- El contenido de Mn varía poco.

4.- En los aceros calmados, la composición es más uniforme que en los aceros efervescentes.

Heterogeneidad estructural.- La cristalización del lingote al enfriarse no es uniforme, pudiendose distinguirse, cuatro zonas bastante bien definidas:

1.- Zona superficial.- Formada por cristales muy menudos, producidos por el enfriamiento relativamente rápido del metal al contacto con las paredes frías de la lingotera.

2.- Zona de dendritas orientadas.- Está formada por cristales más gruesos, que los anteriores, alargados por deformación dendrítica (arborescentes), cuyos ejes son normales a las paredes de la lingotera.

3.- Zona central de cristalización globular.- El metal en la zona central, se enfría lentamente dando tiempo a engrosarse los cristales, que se distribuyen en forma regular. En la parte alta queda una cavidad producida por la contracción del metal que se denomina rechupe.

4.- Zona de sedimentación.- Al fondo del lingote que es donde tiene lugar la solidificación más lenta, se acumulan mayor cantidad de impurezas.

Heterogeneidad física.- Está producida por varios defectos: rechupes, sopladuras, grietas, sapicaduras, rebabas e inclusiones.

Descripción de estos defectos y explicación de su origen.

1.- Rechupe.- Son cavidades que se producen en el centro y parte superior del lingote. La solidificación empieza por la zona superficial y va aumentando su espesor gradualmente a costa del metal que permanece líquido en el centro; y como el volumen del metal sólido es inferior al líquido, queda en el centro una cavidad, que se localiza en la parte superior del lingote en forma de cono. La contracción es de un 8% del volumen del lingote.

Las paredes del rechupe están oxidadas y no se sueldan por forja o laminación en caliente, debiendo a veces desechar por su causa un tercio o más del lingote.

2.- Sopladuras.- Son pequeñas cavidades producidas por los gases desprendidos en el enfriamiento del lingote, que no pueden salir a la superficie. Generalmente las sopladuras contienen óxido de carbono y anhídrido carbónico desprendidos en la reducción de los óxidos de hierro y manganeso.

Contienen también hidrógeno procedente de la reducción del vapor de agua atmosférica introducido a los hornos y también pequeñas cantidades de nitrógeno.

3.- Grietas serpenteadas.- Son fisuras de formas caprichosas y se producen al solidificarse los lingotes.

Grietas superficiales.- Se originan al final de la solidificación por la desigualdad de enfriamiento de las diversas partes del lin-

gote.

Grietas profundas.- Se producen al final del enfriamiento y son debidas a tensiones internas producidas por un reparto desigual de las temperaturas en la masa del lingote. Se localizan en general en las esquinas del lingote. Durante la operación del desbaste, es fácil detectarlas con ayuda de un cristal opaco.

Estas dos formas de defecto, pueden adjudicarse tanto al departamento de aceración como al de laminación en caliente por las razones siguientes:

Aceración.-

- a.- Altos contenidos de azufre en el acero.
- b.- Muy altas o muy bajas temperaturas de vaciado a las lingoteras.
- c.- Altos contenidos de FeO en la escoria durante la etapa de refinación del acero.
- d.- Imperfecciones en el interior del molde que desgarran el lingote al desmoldearlo.
- e.- Exceso de adiciones a las lingoteras, (desoxidantes y activadores de efervescencia).
- f.- Bajas velocidades de vaciado a las lingoteras.
- g.- Carencia de un buen espesor de piel en los aceros efervescentes y semimuertos. La piel es una porción de acero muy plástica que por sí sola evita la formación de grietas, pero si es muy delgada, se consumirá por oxidación durante el calentamiento, provocandose el defecto.

Laminación en caliente.-

- a.- Calentamiento insuficiente del lingote que origine que el acero no fluya con facilidad al trabajarse en caliente y se abra.
- b.- Exceso de enfriamiento de los rodillos del tren primario de des-

baste, fuga excesiva de agua por alguna espreea, operación lenta del desbastador, etc., que provoquen enfriamientos localizados que causen el defecto.

Grietas longitudinales.- Son fisuras que aparecen en líneas rectas casi siempre paralelas al sentido de la laminación. Únicamente son adjudicables al departamento de laminación en caliente.

a.- Principalmente originadas por una mala operación del desbaste o bién por mal estado de los rodillos.

4.- Salpicaduras.- Son plastas de acero adheridas que son provocadas por salpicaduras del acero al ser vaciado a las lingoteras. Al caer el chorro sobre la base salpican gotas de metal a las paredes que se solidifican y sueldan imperfectamente al cuerpo del lingote cuando llega a su nivel el acero fundido.

5.- Inclusiones.- Se encuentran también en la masa de los lingotes inclusiones de escoria, trozos de revestimientos refractarios, óxidos y sulfuros, manganeso, aluminio, etc.

Estas inclusiones sólo se pueden distinguir por la operación de pulido con o sin la intervención de reactivo alguno.

a.- Óxidos.- Son generalmente de aluminio (alumina) y se provocan en la desoxidación del acero.

b.- Sulfuros.- El más representativo es el de manganeso, no son tan peligrosos debido a su plasticidad a la temperatura de laminación, se presentan en formas alargadas de color gris paralelas a la dirección del laminado.

c.- Silicatos.- Son silicatos complejos y son las inclusiones más nocivas debido a su forma acicular con ángulos vivos.

Las inclusiones pueden distribuirse de diferentes formas y por lo general provocan fragilidad debido a la heterogeneidad y las tensiones -

que provocan.

Pueden ser micro o macro inclusiones. La forma de la inclusión nos dá el tipo al que corresponde y la distribución al grado de segregación que ha sufrido.

Macroinclusiones metálicas originadas por desprendimiento de refractario (baja temperatura de vaciado).

Microinclusiones son originadas por reacción entre elementos nocivos (azufre, fósforo, aluminio, etc.).

Segregaciones.- Representan la distribución de las inclusiones y su magnitud depende de las condiciones de solidificación y de la velocidad de enfriamiento (temperatura demasiado elevada de vaciado).

La segregación conocida como fragilidad intergranular es una segregación de sulfuros y fosfuros, imparte fragilidad y no es removida en el calentamiento del material para su laminación. Estos sulfuros y fosfuros tienen un punto de fusión más bajo que el hierro y están en forma de solución sólida. Cuando el acero tiene una baja relación de manganeso a -- azufre, generalmente menor de 5:1, se presenta el fenómeno de fragilidad en caliente (formación del eutéctico manganeso-azufre-hierro). La formación de esta liga se lleva a cabo entre los granos cristalinos del acero de tal forma que cuando éste se calienta la aleación funde y crea fallas intergranulares originando el defecto.

El fósforo viene como fosfuro de hierro (Fe_3P) en solución sólida - pudiendo causar aumento de grano con subsecuente fragilidad. La zona de segregación se extiende a través del centro del lingote, pues siendo las impurezas de menor punto de fusión, solidificarán al último. También los gases CO y CO_2 hacen variar el contenido de carbono y ayudan a la segregación durante la solidificación.

Ahora bién, el control y el acondicionado de la materia prima y sus defectos se realiza:

- 1.- Inspección de defectos de la práctica de vaciado.
- 2.- Inspección de productos semi-elaborados en el momento mismo de la laminación al salir del castillo de acabado.

Esta inspección es realizada por personal del Departamento de Control de Calidad, el cual basándose en normas establecidas de antemano y tomando muestras en períodos de tiempo constantes, se reducen y se evitan los defectos de la práctica de vaciado, así como los de los productos semi-elaborados.

INSPECCION DE DEFECTOS DE LA PRACTICA DE VACIADO.

Esta inspección se realiza visualmente y metalográficamente, es decir, se inspeccionan las heterogeneidades físicas; ya que la heterogeneidad química y estructural desaparecen con la laminación.

Rechupes.- Se puede eliminar o disminuir por tres procedimientos:

- a.- Colando con la base grande del lingote arriba.
- b.- Disminuyendo la velocidad de enfriamiento del lingote por precalentamiento de la parte superior de la lingotera o empleando mazarotas.
- c.- También puede disminuirse y aún suprimirse el rechupe comprimiendo el lingote durante el enfriamiento con prensas hidráulicas.

Sopladuras.- Las sopladuras de los aceros ordinarios se sueldan en laminación, pero en general, no se sueldan las de aceros aleados.

El mejor procedimiento para eliminar las sopladuras es desoxidar bien los aceros con ferromanganeso, ferrosilicio o aluminio. Se disminuye al mínimo la cantidad de inclusiones formadas en las reacciones de desoxidación, realizándose ésta en el horno por medio de ferromanganeso, y se completa la sesoxidación con adiciones de ferrosilicio, ferromangane-

so y aluminio en la olla de colada.

Grietas.-

Superficiales.- Se evitan disminuyendo la velocidad de enfriamiento aumentando el espesor de las paredes de la lingotera.

Profundas.- Se evitan bastante redondeando los ángulos de las lingoteras y colando a temperaturas menos elevadas.

INSPECCION Y ACONDICIONAMIENTO DE DEFECTOS EN PRODUCTOS

SEMI-ELABORADOS

Esta inspección se lleva a cabo en el momento mismo de la laminación al salir el material del castillo de acabado

Se verifica que la cuadratura del material así como el tamaño de sus caras estén dentro de las tolerancias marcadas en la norma y se observa que la superficie del material no presente defectos, tales como excesos de material en las esquinas (bigotes), traslapes, rallas y otros que resultan en la laminación. Cuando cualquiera de éstos defectos se detectan, inmediatamente se dá aviso al encargado del molino de laminación para que proceda a su eliminación.

El exceso de material (bigote), se presenta a lo largo de toda la barra o en parte de ella y en uno o en los dos vértices que se forman por la separación de los rodillos de acabado.

Cuando el bigote se presenta en un sólo lado de la barra, el defecto se corrige corriendo la gufa de entrada del material para el lado contrario al que se presenta este exceso de material; es decir, que la caja de entrada debe estar perfectamente centrada con el calibre acabador, para que el material se reparta uniformemente en todo el calibre.

Por otro lado si el bigote se presenta en ambos lados de la barra -

quiere decir que la caja de entrada está perfectamente centrada con el calibre de acabado; por lo que el exceso de material puede deberse a que el paso anterior al acabado ó sea el paso anteacabador es más grande para la medida que se está laminando y entonces hay que reducirlo desde los primeros pasos o cuando menos de dos o tres anteriores al paso anteacabador para que el material que llegue al paso de acabado, sea el absolutamente necesario.

Los traslapes que se presentan en el material de acabado, son provocados por exceso de material en los pasos anteriores a éste, pudiéndose presentar este defecto desde los primeros pasos de la laminación, por eso cuando se presenta este tipo de defectos es necesario revisar todos y cada uno de los pasos que intervienen para saber en cual ó en cuales de ellos hay exceso de material y eliminarlo de inmediato.

Las rayas que comunmente se presentan en el material de acabado, son debidas al roce con las guías de entrada, guías de salida ya sea en el paso de acabado o en los anteriores a éste, por lo que para corregir este tipo de defecto hay necesidad de observar cuidadosamente al material desde el inicio de la laminación hasta el último paso para detectar en donde se está provocando el defecto y corregirlo, ya sea con el cambio de ^ocinceles, guías de entrada, etc., ó simplemente evitando que el material tenga rozamientos fuertes con cualquier otro cuerpo extraño durante su laminación.

La inspección y eliminación de los defectos que se presentan durante la laminación, nos permite un ahorro considerable de tiempo y de costos en el acondicionamiento del material antes de pasar a la laminación secundaria.

El acondicionamiento se lleva a cabo minuciosamente en todos y en -

cada uno de los billets. Los defectos superficiales que se hayan localizado, tales como, hojeaduras, porocidades, inclusiones de refractario, — cuarteaduras, etc.; al hacerse la inspección deberán de ser marcados para que posteriormente se proceda asu eliminación.

Es muy recomendable que el acondicionado se realice con piedras --- abrasivas adecuadas y que no provoquen quemaduras en la superficie del - acero, ya que con frecuencia en estos puntos, se originan fisuras debido a una excesiva concentración de esfuerzos.

Cuando algunòs defectos que no es posible eliminar totalmente y dado que éstos se han marcado oportunamente, es aconsejable cuando la longitud del material lo permita, cortar la parte afectada. Pero cuando esto último no sea posible, se tiene que rechazar toda la pieza para evitar que este material defectuoso se lamine, puesto que de todas maneras los defectos aparecerán más adelante.

LAMINACION PRIMARIA

Cuando se observa un molino en operación, salta a la vista que el trabajo básico consiste en la transformación de una barra, lingote, billet, o cualquier denominación usual, de forma regular o casi regular, al diseñarse las calibraciones, se procede a la inversa, es decir, se parte de la forma final deseada y se va estudiando y diseñando cada paso hasta llegar a la barra que es la materia prima, en esto deben tomarse en cuenta todas las circunstancias adicionales del caso, el problema más común consiste en obtener determinado producto a partir de determinada materia prima habitual, y utilizando para ello un molino ya existente, las variantes a este caso común pueden ser la necesidad de proponer determinada materia prima cuando sea posible obtenerla con las características que se requieran, esto en un molino ya existente, o bien, determinar el número de pasos que debe tener el molino cuando este no exista.

Se conoce como molino desbastador primario a los molinos que van a iniciar el proceso de laminación recibiendo lingote para convertirlo en blooms, billets o slabs, estos términos a pesar de no pertenecer al idioma español, representan la terminología técnica usual, se habla de bloom cuando es un producto intermedio, generalmente de forma cuadrada con esquinas redondeadas y destinado a recalentamiento posterior para todavía ser desbastado a billets, se habla de billet cuando es un producto intermedio pero listo a un proceso último de laminación para obtención de productos utilizables como redondos, cuadrados, perfiles, ect. los billets son de forma cuadrada, se habla de slabs cuando es un producto intermedio de sección rectangular más o menos alargado y destinado a laminación y obtención de productos planos. Esta descripción general no es absolutamente cierta en todos los casos ya que aún existen muchas instalaciones-

pequeñas que funden en hornos eléctricos pequeños lingotes que se recalcian y se laminan directamente a productos terminados, la descripción hecha está orientada a los grandes y modernos procesos del acero, donde existen los llamados Molinos Blooming.

Al laminar un lingote los primeros pasos deben ser ligeros hasta -- que la superficie este forjada y bien trabajada y pueda entonces deformarse más bruscamente, no debe haber sobre llenados o bigotes que provocarían dobleces en pasos posteriores. Con las primeras pasadas se suprime primero la conicidad del lingote; seguidamente tiene lugar una compresión producida por el cierre y soldadura de los huecos (sopladuras y cavidades de contracción). Al mismo tiempo se destruye la estructura fundida, la cual, debido a su constitución cristalina, orientada hacia las zonas periféricas, hace que el material tenga propiedades desfavorables.

En las primeras pasadas, la reducción relativa de altura ha de ser pequeña, no debiendo exeder de un 10 al 13%. Después puede ir aumentando para volver a ser pequeña en las últimas pasadas. Una vez lograda la homogeneidad estructural aparece una estructura de grano fino y uniforme -- con buenas características físicas del material. El aumento de la resistencia a la tracción que se produce con esto no es grande en general, pero, en cambio, el límite de fluencia y, sobre todo, la tenacidad aumenta considerablemente. Ahora, la deformación puede ser tan grande como lo -- permita el tren de laminación, en cuyo caso hay que evitar una presión lateral demasiado intensa debido al ensanchamiento restringido.

Para evitar grietas laterales o agrietamientos de las aristas hay -- que laminar el lingote caliente a una temperatura de laminación lo más elevada posible y volteando con frecuencia (volteo de canto a 90°) para evitar que el material experimente un esfuerzo excesivo durante el libre-ensanchamiento y, con ello, el riesgo de la formación de grietas en las-

aristas.

Sistemas de desbaste más comunes: Fig. 19.

Los lingotes se laminan en trenes de laminación trío o dño. Los más convenientes suelen ser los trenes trío con cilindros fijos y los que tienen cilindros susceptibles de ajuste.

1.- En rodillos lisos: laminación con ensanchamiento libre.

2.- En rodillos acanalados o calibrados: laminación con ensanchamiento restringido.

a.- Caja:

En trenes con cilindros fijos, en cada canal se da solamente una pasada, estando la misma siempre llena y los que tienen cilindros susceptibles de ajuste, en cada canal se dan varias pasadas.

b.- Rombo - Cuadrado:

Se produce mejor calidad de billet por ejercer trabajo de forja por los cuatro costados a diferencia del sistema de caja en que solo hay contacto arriba y abajo.

En el trazado de canales, no sólo se fija la reducción de altura, sino también el ensanchamiento y en el caso de los cilindros trío con canales desiguales, hay que repartir en ambos planos del cilindro la presión superior con uniformidad en el plano superior e inferior.

La tabla II, sirve para obtener fácilmente el número de pasadas necesarias para obtener cierto producto a partir de la reducción deseada y el alargamiento.

El alargamiento de la barra será proporcional a la reducción de área obtenida después del paso de laminación; la longitud resultante en la barra será igual a esta relación obtenida, por la longitud original.

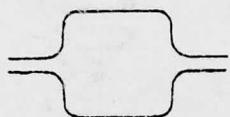
Pero no hay que olvidar que este modo de operar solo es posible en la práctica con ciertas limitaciones, debido a que hay que tener presen-

te que con la sección varía también la temperatura del material. Pero, -- dentro de lo posible, el trazado de los pasos se hace siempre utilizando en las primeras pasadas unos alargamientos muy grandes, ya que en ellas -- el material conserva aun una temperatura elevada y su plasticidad es, -- por lo mismo grande. Este alargamiento va disminuyendo paulatinamente a medida que el material se aproxima a la pasada final, o sea a medida que baja la temperatura y decrece la plasticidad.

Fig. 19.

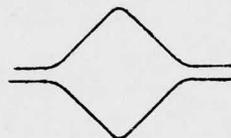
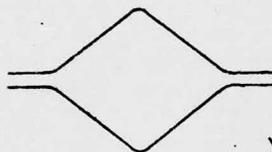
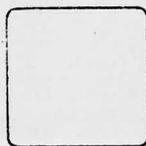
SISTEMAS DE DESBASTE

a.- Sistema de caja



90°

b.- Sistema rombo-cuadrado



90°

TABLA II.

Magnitud de alargamiento para diferentes reducciones relativas en -
función del número de pasadas (Seg. Trinks).

No. Pasos	REDUCCION POR PASO							
	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	2.041	2.367	2.779
3	1.167	1.372	1.628	1.953	2.369	2.916	3.642	4.630
4	1.228	1.524	1.915	2.441	3.160	4.165	5.610	7.720
5	1.293	1.694	2.254	3.052	4.215	5.950	8.625	12.870
6	1.361	1.882	2.650	3.815	5.620	8.500	13.270	21.400
7	1.432	2.090	3.120	4.770	7.490	12.150	20.400	35.700
8	1.508	2.323	3.670	5.960	9.980	17.350	31.000	59.500
9	1.587	2.581	4.320	7.450	13.320	24.800	48.300	99.200
10	1.670	2.868	5.080	9.310	17.750	35.400	74.200	166.000
11	1.758	3.188	5.980	11.640	23.650	50.500	114.000	276.000
12	1.851	3.540	7.030	14.550	31.500	72.200	176.000	460.000
13	1.948	3.930	8.270	18.200	42.000	103.000	271.000	765.000
14	2.051	4.370	9.720	22.750	56.100	147.500	417.000	1280.000
15	2.159	4.860	11.430	28.400	74.800	211.000	640.000	2120.000
16	2.273	5.400	13.470	35.500	99.600	201.000	985.000	3530.000
17	2.392	6.000	15.820	44.400	133.000	430.000	1515.000	5900.000
18	2.518	6.660	18.620	55.500	177.000	615.000	2320.000	9800.000
19	2.651	7.400	21.900	69.300	236.000	880.000	3580.000	
20	2.791	8.230	25.800	86.700	315.000	1260.000	5500.000	
21	2.938	9.140	30.400	108.000	420.000	1790.000	8500.000	
22	3.092	10.150	35.700	135.500	560.000	2560.000		
23	3.255	11.290	42.000	169.000	745.000	3650.000		
24	3.427	12.530	49.400	211.000	990.000	5210.000		
25	3.607	13.920	58.100	264.000	1325.000	7420.000		
26	3.798	15.500	68.200	331.000	1760.000	10600.000		

Por otra parte, el ensanchamiento es el principal problema del diseñador, conocer que porción de la deformación es alargamiento y que porción es ensanchamiento, una mala estimación provoca falta de material o exesos que a su vez provocan bigotes, pliegues doblados en pasos siguientes. Por lo mismo, los fenómenos de ensanchamiento ha sido objeto de numerosas investigaciones de las cuales se ha visto que la magnitud del ensanchamiento depende, de los siguientes factores:

- a.- $h_0 - h_1 = \Delta h$
- b.- r = Radio de los rodillos.
- c.- Temperatura de la pieza y de los rodillos.
- d.- Composición de la pieza y de los rodillos.
- e.- Condición superficial de la pieza y de los rodillos.
- f.- Velocidad de laminación.
- g.- Coeficiente de fricción.

El ensanchamiento por lo general es indeseable ya que los propósitos de la laminación son comprimir y alargar.

Un método empírico pero efectivo que sin embargo demanda gran experiencia es el de superponer los dibujos de la barra y el paso calibre siguiente y estimar si llena o no la canal, si habrá sobrantes (bigotes) o no, fuera de este método práctico existen varias formas matemáticas de hacerlo, las fórmulas de ensanchamiento de Tafel y Sedlaczek, así como la de Siebel, arrojan resultados útiles para las condiciones que predominan en la laminación en caliente del acero.

$$\text{Fórmula de Tafel y Sedlaczek} \quad \Delta b = \frac{b_0 (\sqrt{b_0 \cdot r \cdot \Delta h})}{3 (b_0^2 + h_0 \cdot h_1)}$$

$$\text{Fórmula de Siebel} \quad \Delta b = C \sqrt{r \cdot \Delta h} \cdot \frac{\Delta h}{h_0} \quad C = \text{cte.}$$

Con lo visto anteriormente y auxiliándome con la tabla II de Trinks- y en la fórmula de Tafel y Sedlaczek, pasare al cálculo de los pasos que se necesitan para obtener una barra (billet), de sección transversal cuadrada de 101.6 mm. (4 in.) por lado, partiendo de un lingote de sección transversal media por lado de 203.2 mm.

$$\text{Grado total de alargamiento} = \frac{Q_0}{Q_n} = \frac{203.2 \times 203.2}{101.6 \times 101.6} = 4$$

De la tabla II, se deduce, que con una reducción de 15% por paso, el alargamiento total despues de 9 pasos es de 4.32; por lo tanto hacen falta teóricamente 9 pasos necesarios para el desbaste del lingote y con esto tendremos una reducción por paso un poco menor del 15%.

Ahora bien, sabiendo que el número total de pasos será de 9, seguireé la secuencia, tabla, canto para el cálculo de estos.

Teniendo en cuenta las dimensiones del lingote en el cual tenemos una sección transversal media de 203.2 mm. por lado, se calcula la altura h_1 , de la tabla del paso 1.

Tomando una reducción en altura de 13%, tenemos:

$$h_0 = 203 \text{ mm.} \quad b_0 = 203 \text{ mm.}$$

$$\frac{h_0 - h_1}{h_0} \times 100 = 13 \dots\dots\dots (\text{Reducción relativa en altura}).$$

De la ecuación tenemos:

$$\frac{h_0 - h_1}{h_0} = \frac{13}{100} \quad \frac{h_0 - h_1}{h_0} = 0.13 \quad 1 - \frac{h_1}{h_0} = 0.13$$

$$h_1 = h_0 (1 - 0.13)$$

$$h_1 = h_0 (0.87)$$

Por consiguiente:

$$h_1 = (203) (0.87)$$

$$\underline{h_1 = 176 \text{ mm.}}$$



Para determinar el ancho (b_1) de la tabla y considerando por experiencia, que el material aumenta en el ancho de 1.5 á 6%; dependiendo de la temperatura del material, velocidad de laminación y el porcentaje de reducción en altura, tenemos:

Considerando un aumento en anchura de 6%

$$\frac{b_1 - b_0}{b_0} \times 100 = 6 \dots\dots\dots (\text{Aumento relativo en anchura})$$

De la ecuación tenemos:

$$\frac{b_1 - b_0}{b_0} = \frac{6}{100} \qquad \frac{b_1 - b_0}{b_0} = 0.06 \qquad \frac{b_1}{b_0} - 1 = 0.06$$

$$\frac{b_1}{b_0} = 1.06$$

$$b_1 = b_0 (1.06)$$

Por consiguiente:

$$b_1 = (203) (1.06)$$

$$b_1 = 215 \text{ mm.}$$

Comprobando si la anchura es correcta por medio de la fórmula de Tafel y Sedlaczek, tenemos:

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

Δb = Incremento de anchura

$b_0 = 203$ mm. (ancho de la sección transversal media del lingote)

$r = 279$ mm. (radio de los rodillos que se utilizarán)

$\Delta h = 27$ mm. (decremento en altura)

$h_0 = 203$ mm. (altura de la sección transversal media del lingote)

$h_1 = 176$ mm. (altura del paso 1)

Por consiguiente:

$$\Delta b = \frac{203 \sqrt{(203) (279) (27)}}{3 (203)^2 + (203) (176)}$$

$$\Delta b = \frac{203 \sqrt{(203) (279) (27)}}{231054}$$

$$\Delta v = \frac{203 \times 1236.60}{231054}$$

$$\Delta b = 1.08 \text{ mm.}$$

$$203 + 1.08 = 204.08 \text{ mm.}$$

Por lo que $b_1 = 215 \text{ mm.}$, esta dentro de tolerancias.

Para evitar que el material desgaste las paredes de los anillos en los rodillos, se le dá el paso, lo que se llama salida del material, esto 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° ; (esto es función del ensanchamiento que se dá al paso).

Por lo tanto el paso 1, se presentará en la Fig. 20, con todos sus detalles y a escala.

Una manera práctica para comprobar si los pasos calculados están correctos, se hace dibujandolos a escala natural en papel transparente (albanene), con el fin de determinar, el área de cada uno de ellos y así poder sacar el porcentaje de reducción, de un paso a otro y además si se

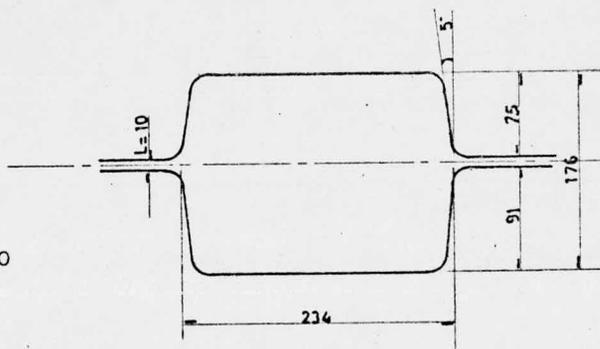


Fig. 20

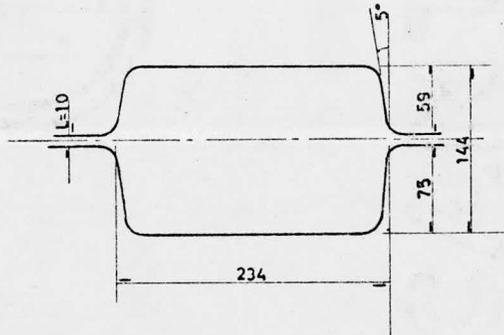
se colocan superpuestos, se puede observar si físicamente el material pasará de un paso al inmediato siguiente o hay necesidad de modificar sus dimensiones.

Como el área de la sección transversal media del lingote es conocida; $Q_0 = (203.2)^2 = 41290.24 \text{ mm}^2$ y determinando el área de la sección transversal del paso No 1 (utilizando un planimetro), $Q_1 = 37748 \text{ mm}^2$; por lo tanto la reducción relativa del ler. paso será.

$$\frac{Q_0 - Q_1}{Q_0} \times 100 = \frac{41290 - 37748}{41290} \times 100 = 8.3 \%$$

Como esta reducción es admisible el paso No 1 queda definido.

Fig. 21



El paso No 2 será una tabla, que tendrá el mismo ancho que el paso No 1, pero diferente altura; esto se hace con el fin de que en la longitud total de los rodillos, entren el mayor número de pasos posibles; esto se logra colocando el paso No 2 inmediatamente arriba del paso No 1, según un plano vertical.

Por lo anterior $b_2 = b_1$ y la altura h_2 se calculará como sigue:

$$h_1 = 176 \text{ mm.} \quad b_1 = 215 \text{ mm.}$$

Tomando una reducción en altura de 18 %, tenemos:

$$\frac{h_1 - h_2}{h_1} \times 100 = 18 \quad \frac{h_1 - h_2}{h_1} = 0.18 \quad 1 - \frac{h_2}{h_1} = 0.18$$

$$h_2 = h_1 (1 - 0.18) \quad b_2 = h_1 (0.82) \quad h_2 = (176) (0.82)$$

$$h_2 = 144 \text{ mm.} \quad \text{y} \quad b_2 = 215 \text{ mm.}$$

Con estos datos y siguiendo el mismo procedimiento anterior, tenemos en la Fig. 21, el paso No 2 a escala.

Para el diseño de pasos mostrados anteriormente, así como para todos los demás pasos, ya sea tabla o canto se seguirán por lo regular, las reglas que a continuación se enumeran.

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

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

3.- Se fija la salida del paso ampliando el ancho b hacia ambos lados según un ángulo escojido de antemano (función del ensanchamiento).

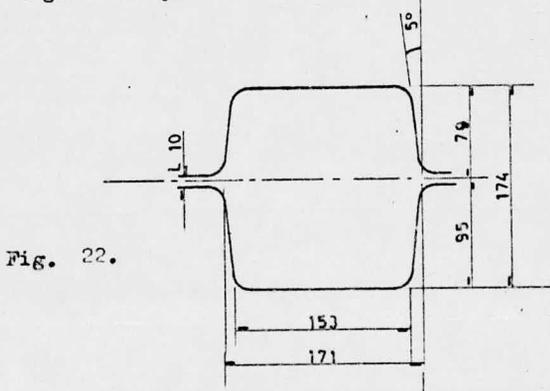


Fig. 22.

4.- Se trazan las medias cuñas, por medio de arcos circulares con—

radios R.

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

Para calcular los radios R se recurre a la experiencia generalmente, en la práctica y a falta de datos o experiencia se deben maquinar rasios exedidos y la práctica indicará si deben reducirse en el torno.

Para el calculo del paso No 3 se toma en cuenta el giro de 90° , una vez que haya pasado por los pasos 1 y 2, con lo que se logrará que desaparezcan las zonas porosas y la conicidad del lingote.

Al calcular la altura h_3 se toma como base el ancho del paso 2 (b_2)

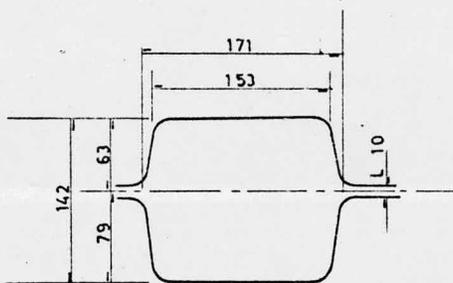


Fig. 23.

y suponiendo una reducción en altura de 19 % tenemos:

$$\frac{b_2 - h_3}{b_2} \times 100 = 19 \quad 1 - \frac{h_3}{b_2} = 0.19 \quad h_3 = b_2 (0.81)$$

$$h_3 = (215) (0.81)$$

$$h_3 = 174 \text{ mm.}$$

Para calcular el ancho b_3 de este paso se toma como base la altura h_2 y suponiendo un incremento en anchura de 6% tenemos:

$$\frac{b_3 - h_2}{h_2} \times 100 = 6 \quad \frac{b_3}{h_2} - 1 = 0.06 \quad b_3 = h_2 (1 + 0.06)$$

$$b_3 = (144) (1.06)$$

$$b_3 = 153 \text{ mm.}$$

Con los datos obtenidos de h_3 y b_3 , se traza a escala el paso No 3

mostrado en la Fig. 22, La anchura de este paso es correcta, pues se obtiene que $\Delta b = 1.06$ mm. y por lo tanto $b_3 = 153$ mm., esta dentro de tolerancias.

El paso No 4, tendrá el mismo ancho del paso No 3, esto es $b_4 = b_3$; y la altura h_4 se calcula tomando una reducción de 18%, tenemos:

$$\frac{h_3 - h_4}{h_4} \times 100 = 18 \quad 1 - \frac{h_4}{h_3} = 0.18 \quad h_4 = h_3 (1 - 0.18)$$

$$h_4 = h_3 (0.82) \quad h_4 = (174) (0.82) \quad h_4 = 142 \text{ mm.}$$

Presentándose en la Fig. 23, el paso No. 4 a escala con todos sus detalles.

Para el calculo del paso No. 5 se toma en cuenta el giro de 90° , para evitar grietas laterales o agrietamiento de las aristas y se toma como base el ancho del paso No.4 (b_4).

Con una reducción en altura de 16% tenemos:

$$\frac{b_4 - h_5}{b_4} \times 100 = 16 \quad 1 - \frac{h_5}{b_4} = 0.16 \quad h_5 = b_4 (0.84)$$

$$h_5 = (153) (0.84) \quad h_5 = 128 \text{ mm.}$$

Para calcular el ancho b_5 se toma como base la altura h_4 y suponiendo un incremento en anchura de 6% tenemos:

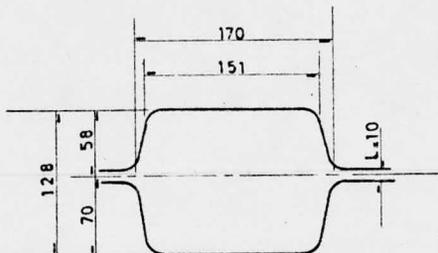


Fig. 24.

do un incremento en anchura de 6% tenemos:

$$\frac{b_5 - h_4}{h_4} \times 100 = 6 \qquad \frac{b_5}{h_4} - 1 = 0.06 \qquad b_5 = h_4 (1 + 0.06)$$

$$b_5 = (142) (1.06)$$

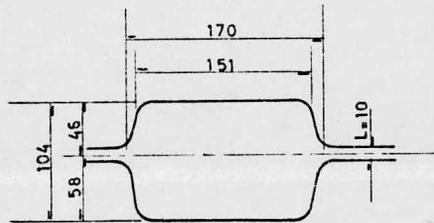
$$b_5 = 151 \text{ mm.}$$

Con estos datos se traza a escala el paso No.5 como se muestra en la Fig. 24. El incremento en anchura Δb de este paso resulta ser igual a 2.18 mm., por lo tanto el ancho del paso No.5 esta dentro de tolerancia.

El paso No 6, sera colocado inmediatamente arriba del paso No 5, -- por lo que tendrá el mismo ancho del paso No 5, esto es $b_6 = b_5$; y la -- altura h_6 se calcula tomando una reducción de 19% respecto a h_5 .

$$\frac{h_5 - h_6}{h_5} \times 100 = 19 \qquad 1 - \frac{h_6}{h_5} = 0.19 \qquad h_6 = h_5 (0.81)$$

Fig. 25.



$$h_6 = (128) (0.81)$$

$$h_6 = 104 \text{ mm.}$$

Con estos datos el paso No 6, se presenta en la Fig. 25, a escala.

Para calcular el paso No 7, se toma en cuenta el giro de 90° , del material y se toma como base el ancho del paso No 6 (b_6) y suponiendo una reducción en altura del 17%, tenemos los siguientes calculos:

$$\frac{b_6 - h_7}{b_6} \times 100 = 17 \qquad 1 - \frac{h_7}{b_6} = 0.17 \qquad h_7 = b_6 (0.83)$$

$$h_7 = (151) (0.83) \qquad h_7 = 125 \text{ mm.}$$

Para calcular el ancho b_7 del paso No 7 se toma como base la altura h_6 , y suponiendo un incremento en anchura de 1.5%:

$$\frac{b_7 - h_6}{h_6} \times 100 = 1.5 \qquad \frac{b_7}{h_6} - 1 = 0.015 \qquad b_7 = h_6 (1.015)$$

$$b_7 = (104) (1.015) \qquad b_7 = 105 \text{ mm.}$$

Presentándose a continuación en la Fig. 26, el paso No 7, a escala y con todos los detalles.

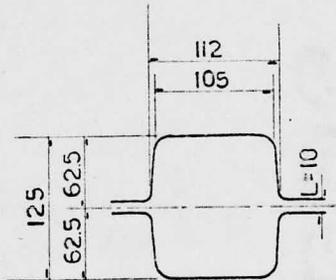


Fig. 26.

El paso No 8, sera colocado en el segundo castillo y tomando las --
dimensiones del paso No 7, tenemos que:

$$h7 = 125 \text{ mm.}$$

$$b7 = 105 \text{ mm.}$$

$$\frac{h7 - h8}{h7} \times 100 = 20$$

$$1 - \frac{h8}{h7} = 0.20$$

$$h8 = h7 (0.80)$$

$$h8 = 125 (0.80)$$

$$h8 = 100 \text{ mm.}$$

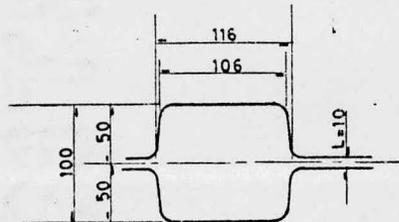


Fig. 27.

Para el calculo del ancho $b8$ del paso No 8, se supone un incremento en anchura de 1.5%:

$$\frac{b8 - b7}{b7} \times 100 = 1.5$$

$$\frac{b8}{b7} - 1 = 0.015$$

$$b8 = b7 (1.015)$$

$$b8 = (105) (1.015)$$

$$b8 = 106 \text{ mm.}$$

Presentándose el paso No 8, en la Fig. 27, a escala y con todos sus--
detalles.

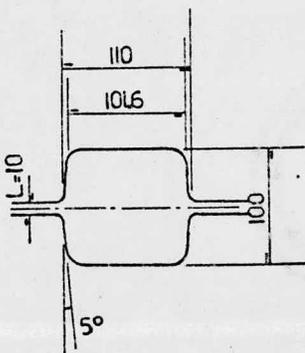
Calculo para el paso No 9 ó acabado. Considerando el giro de 90° del paso No 8, y tomando en cuenta las dimensiones finales del producto terminado, tenemos los siguientes calculos:

$$\frac{106 - 101.6}{106} \times 100$$

$$1 - \frac{101.6}{106}$$

$$1 - 0.95 = 5\%$$

Fig. 28.



Con una reducción en altura del 5% tenemos:

$$\frac{b_8 - h_9}{b_8} \times 100 = 5$$

$$1 - \frac{h_9}{b_8} = 0.05$$

$$h_9 = b_8 (0.95)$$

$$h_9 = (106) (0.95)$$

$$h_9 = 100 \text{ mm.}$$

Para calcular el ancho b_9 del paso No 9, tenemos:

$$\frac{101.6 - 100}{100} \times 100$$

$$\frac{101.6}{100} - 1 \times 100$$

$$1.016 - 1 = 1.6\%$$

Por lo que, con un incremento en anchura de 1.6%, el ancho del paso-
No 9 será de:

$$\frac{b_9 - h_8}{h_8} 100 = 1.6 \qquad \frac{b_9}{h_8} - 1 = 0.016 \qquad b_9 = h_8 (1.016)$$

$$b_9 = (100) (1.016)$$

$$b_9 = 101.6 \text{ mm.}$$

Presentándose el paso No 9 en la Fig. 28, a escala y con todos sus-
detalles.

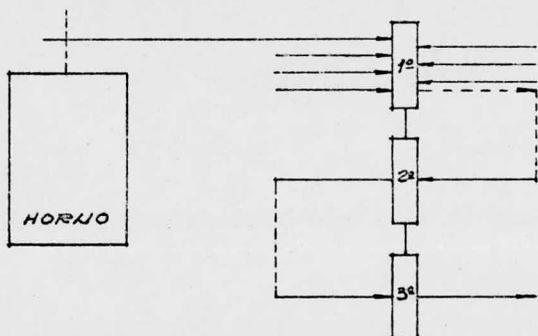
Con los datos obtenidos, se procede a efectuar la disposición de ca-
da paso en los rodillos, que consiste en el trazado de los planos (Fig.--
29), para que en el taller de tornos se proceda a su maquilado.

En la tabla III, se muestra el programa de pasadas y la secuencia ---
que seguirá el material por laminarse.

Tabla III.

Programa de pasadas para laminar billets de 101.6 x 101.6 mm, procedentes de lingotes de 203.2 x 203.2 mm.

PASADA N ^o	h	b	Δh	Δb	$\frac{\Delta h \cdot 100}{h_0}$	CAJAL	CASTILLO	OBSERVACIONES
0	203	203						
1	176	215	27	12	13	caja	1 ^o	
2	144	215	32	0	18	caja	"	voltear 90°
3	174	153	41	9	19	canto	"	
4	142	153	32	0	18	caja	"	voltear 90°
5	128	151	25	9	16	canto	"	
6	104	151	24	0	19	caja	"	voltear 90°
7	125	105	26	1	17	canto	"	
8	100	106	25	1	20	caja	2 ^o	voltear 90°
9	100	101	6	1	5	canto	3 ^o	



LAMINACION Y CALIBRACION DE CANALES PARA PERFILES ANGULARES

A esta etapa, donde un billet es laminado para transformarlo a un perfil angular; se llama laminación secundaria o de acabado.

Las secciones angulares pueden considerarse como una forma de transición entre las secciones sencillas y los perfiles irregulares.

Podemos decir que dentro de los perfiles es la forma más sencilla de laminar, de hecho es un plano doblado a 90° , históricamente podemos mencionar que hubo muchos intentos y diseños hasta llegar actualmente a varios métodos de calibración adaptados a las diferentes características de los trenes laminadores, los cuales pueden clasificarse de la siguiente forma:

- a) Método mariposa.
- b) Método mariposa modificado.
- c) Método de plano y canteo.
- d) Método de plano.
- e) Método combinado.

El acabado distingue dos formas (Fig. 30):

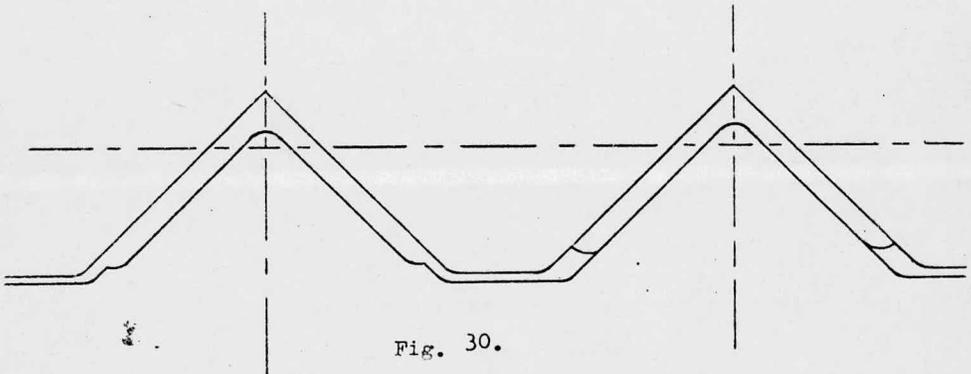
- 1.- Canal abierta con topes de limitación de alas.
- 2.- Canal abierta sin limitación de alas.

En los ángulos delgados no es muy importante el uso de la canal (1), es más justificable en los gruesos para mejorar el aspecto de las alas y ayudar al control del largo de las alas, este método requiere mayor tamaño de tabla de rodillos y un calibre por medida generalmente que encarece la operación y no siempre se justifica su uso.

La canal (2) se diseña abierta, de manera de poder utilizarse para--

todos los espesores y con longitudes de alas diferentes. Si se utiliza, por ejemplo, una pasada final a fin de laminar tres diferentes largos de ala, el eje neutro se calcula para el ángulo correspondiente a la medida intermedia, no teniendo consecuencias de importancia cuando se producen las otras medidas.

En los ángulos, tanto regulares como irregulares es aconsejable usar la canal acabadora para 3 tamaños de grueso e iguales dimensiones de ala, se calcula y diseña para el peso central y arriba o abajo se manobra mediante separación de rodillos en acabadores y preterminadores principalmente.



(1)

Canal abierta con topes de
limitación de alas

(2)

Canal abierta sin limitación
de alas

Ángulos de lados desiguales.- Se siguen básicamente los mismos principios, exep^to en las últimas pasadas donde el canal no debe situarse en forma simétrica respecto a las alas por el efecto de torcido que provoca el ala grande al ofrecer mayor resistencia, mayor flexión del rodillo en esa zona, lo que se hace es colocar la canal en forma inclinada y dar en las últimas pasadas una menor reducción en el ala grande para compensar esfuerzos y evitar el giro. Tanto para ángulos de lados iguales, como -- de lados desiguales se requiere una firme sujeción de las guías de entrada para mantener en su posición a la barra y se pueda formar correctamente y al centro el vértice, esto sobre todo en las primeras pasadas.

Los preterminadores y acabadores requieren muy fuerte sujeción de los collares para la entrada correcta de la barra y obtener uniformidad de dimensiones de ala a lo largo de toda la barra.

Diversos preterminadores y ángulos de colocacion en acabadores de ángulo.



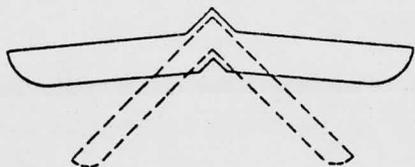
Hay peligro de falta de control a la salida.



Menos peligro de falta de control a la salida.



Exige mucho cuidado en la entrada, puede provocar variación de alas, y también falta de coincidencia de vértices de barra y del calibre, el vértice podrá no llenar en su lugar

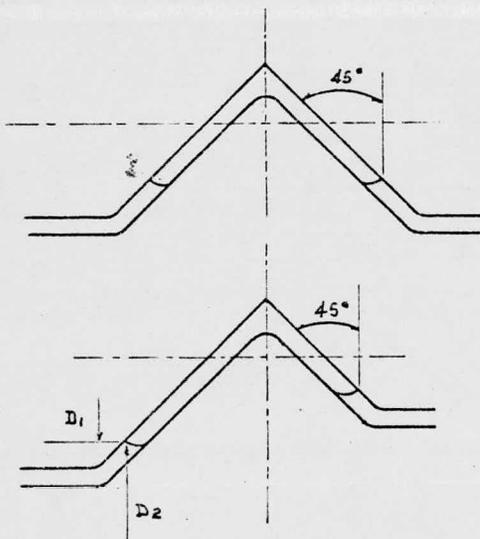


correcto sino descentrado.

Muy difícil de estabilizar por tener alas muy abiertas el preterminador.

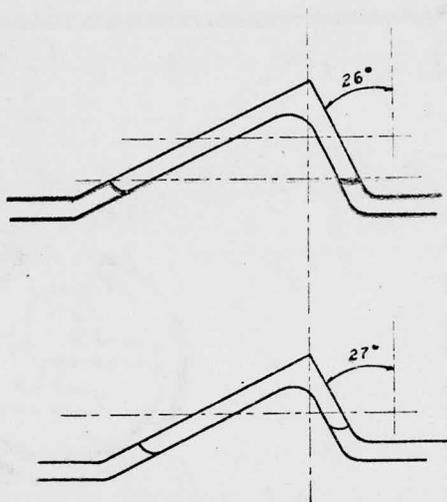
Cuando se usan preterminadores con parte del ala completamente abierta o sea paralela al eje del rodillo se tienen varias desventajas, una es que el espesor del ala después del acabador no es el mismo, será más delgada en el extremo y más gruesa en el vértice y por efectos de ensanchamiento podrá perderse el control en el ancho de las alas.

Angulo de colocación en acabadores:



Angulo correcto de colocación en acabadores de ángulos de lados iguales.

Colocación incorrecta demasiada diferencia de diámetros en el mismo punto D_1 D_2 , se presentan fuertes diferencias de velocidades, problemas de deslizamiento de ambos rodillos, fuerte efecto de giro en la barra terminada, rodillo inferior muy delgado y debil.



Colocación correcta, los rodillos no se debilitan y casi funcionan como ángulos normales, diferencia de diámetros mínimo y la mayor parte del efecto de giro es eliminada, en ángulos mayores surgen nuevos problemas aún con este arreglo.

Otro ejemplo con un ángulo mayor donde los extremos de las alas si llevan diámetros ligeramente diferentes.

Las reducciones en el acabador en los ángulos en general se recomienda para un acabador de $1/4$ " , recibir un preterminador de $5/16$ " , y reducir $1/16$ " , con la misma proporción, un acabador de $1/2$ " puede recibir un preterminador de $5/8$ " y reducir un $1/8$ " , todo esto en espesor de alas.

Las pasadas procedentes se hacen abiertas alternativamente en la parte superior e inferior, y conforme a una práctica general se suelen realizar las salientes con una conicidad de 6° para las pasadas abiertas en la parte superior y de 3° para las abiertas en la parte inferior.

Al igual que en muchos otros productos, la canal acabadora siempre conviene tenerla en un castillo separado y sola para no afectar su ajuste con el ajuste de canales desbastadoras y preparadoras; en molinos trios de tamaño medio es usual tener en el primer castillo de desbaste las-

canales desbastadoras y preparadora; y en el segundo castillo trío las-- canales preterminadoras, teniéndose la canal acabadora en un terser casti-- llo, de esta forma no se afecta acabador que puede ajustarse por separa-- do. Otra alternativa sería que en ocasiones el preterminador en un senti-- do y el acabador en otro sentido, con lo cual no se afectan preterminador y acabador que puede ajustarse por separado, manteniendo fijo el rodillo-- central.

Las aberturas de los canales siempre serán en el extremo agudo del-- vértice de las alas pero con la precaución de que el radio en ese punto-- de la canal anterior sea lo suficientemente amplio para evitar que el vér-- tice agudo se llene y pueda provocar rebabas o dobleces más adelante.

A continuación se muestra el calculo del número de pasos necesarios-- para laminar un perfil angular partiendo de un billet de 4"x4".

Con lo visto en la laminación primaria, un molino ya existente y --- auxiliandose con la tabla de Trinks:

Material de partida: 4"x4".

Producto acabado: 3"x3"x1/4".

$A_i = 10322.56 \text{ mm}^2$ (Area de la sección del material por laminar)

$A_f = 934.615 \text{ mm}^2$ (Area de la sección del material por obtener)

$$\text{Alargamiento total} = \frac{10322.56}{934.615} = 11.04$$

De la tabla II, se deduce que con una reducción de sección del ---- orden de 30% por paso, el alargamiento total despues de 7 pasos es de ---

12.15; con una reducción de sección de 25% por paso, el alargamiento después de 8 pasos es de 9.98; y con una reducción de 25% por paso, el alargamiento después de 9 pasos es de 13.32. Por lo tanto, sin olvidar que este modo de operar solo es posible en la práctica con ciertas limitaciones y de acuerdo a la disposición del molino, la laminación se puede realizar con 9 pasadas con una reducción menor del 25% por pasada.

En el diseño de las calibraciones, se prosede a la inversa, es decir, se parte del perfil acabado deseado y se va estudiando y diseñando cada paso hasta llegar a la barra que es la materia prima. Estos diseños, aún cuando no siempre serán los definitivos, nos sirven de base para el diseño final de cada uno de ellos.

En la Fig. 31, tenemos una secuencia para obtener un perfil angular de $3'' \times 3'' \times l/4''$ y en la cual podemos observar el método que consiste en la combinación de pasadas del tipo de plano y canteo con las del tipo mariposa.

La sección de entrada a la primera pasada de forma es un cuadrado de 101.6 mm., sobre el cual se efectúan dos pasadas que comienzan a formar el vértice del ángulo. La pasada No 3 es canteadora y esta diseñada para canteo la barra y dejarla con el ancho apropiado para el control del largo de las alas, y las pasadas subsiguientes son del tipo mariposa y van produciendo el doblado del ángulo.

Las tres primeras pasadas pueden ser usadas para varias medidas de ángulo, haciéndose el ajuste del ancho necesario con la pasada canteadora que como puede observarse en la Fig. 31, el vértice encaja entre la aber-

tura de los cilindros, por lo cual éstos no detienen cualquier posible -- flujo de material al vértice.

El hecho de levantar los cilindros tiene muy poco efecto en el aumen to del largo de las alas.

Levantando los cilindros en los antepreterminadores se incrementa la longitud del ala afectada además por un aumento de espesor proporcional-- mente mayor en las terminales del ala respecto al vértice. Con este espe-- sor incrementado en los finales o terminales de las alas, la reducción -- siguiente en el preterminador y terminador causa un incremento en la lon-- gitud del ala, resultando finalmente un ángulo con longitudes de alas ma-- yores que las requeridas.

Por lo que, se deben tomar las debidas precauciones de controlar el-- ancho en la pasada canteadora para una corecta formación del vértice, por lo cual las dimensiones que va teniendo éste de pasada en pasada deben -- permitir un buen flujo del acero en esas partes de forma tal de obtener -- un vértice perfectamente formado y un control de la longitud de las alas.

Para llegar a los diseños difinitivos que se muestran en la Fig. 31 , se establece, la separación o juego entre los rodillos, que de acuerdo al diámetro de éstos últimos y al tren de laminación, se toma de 6 mm. para-- todas las pasadas.

Una vez establecida la separación de los rodillos, se van dibujando-- a escala 1:1 en una hoja de papel transparente y por separado cada uno de de los pasos de acuerdo a los valores calculados con anterioridad. Esto -- permite determinar el área de la sección transversal de los pasos y con --

ello el % de reducción relativa que se tendrá de cada uno al inmediato siguiente; haciendo una repartición del % de reducción de tal manera que éste sea mayor en los primeros pasos, para una recuperación de temperatura que permita continuar el proceso sin mayores complicaciones; y menor en los últimos. A continuación se traza la línea neutra de cada canal y con los datos obtenidos se procede a efectuar la calibración de los rodillos.

En la Fig.32 , se muestra la calibración del rodillo que tiene las canales aobadoras.

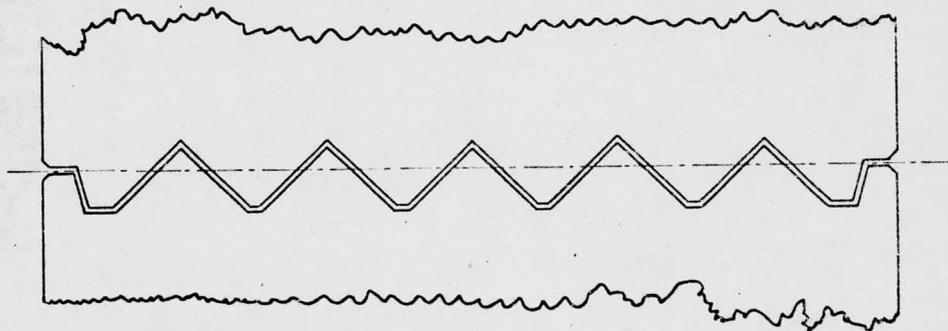


Fig. 32.

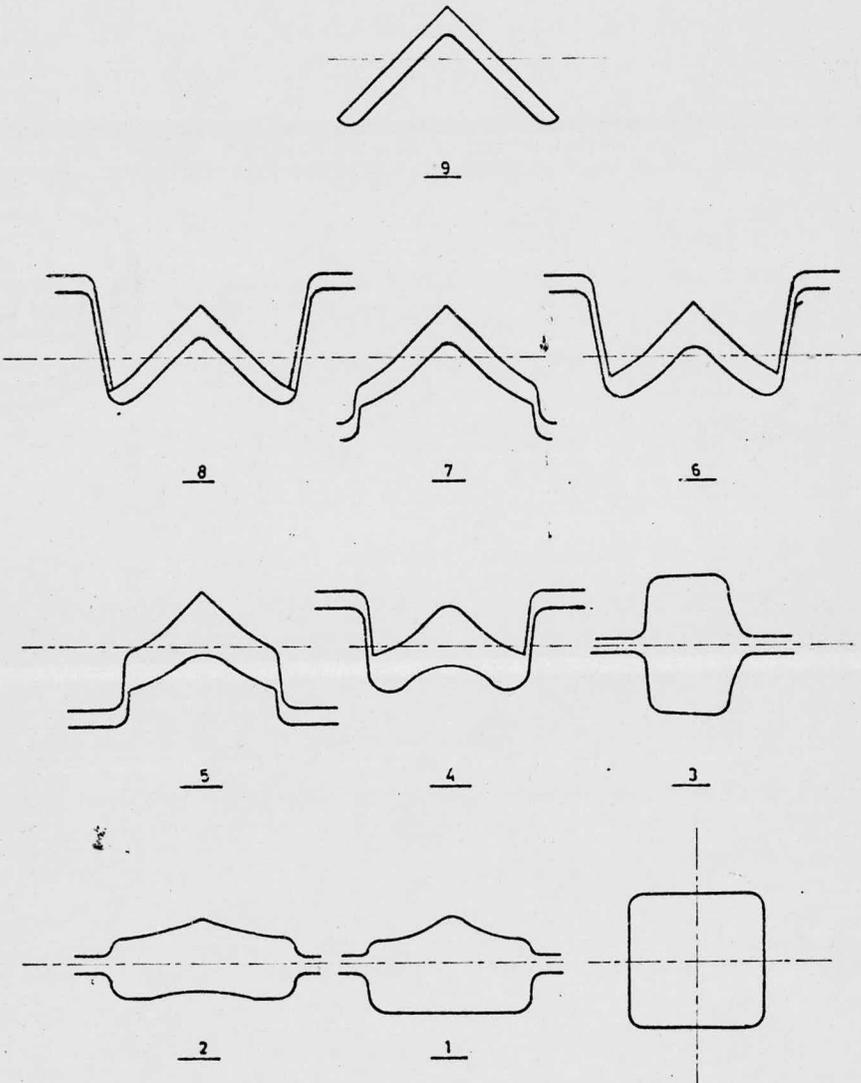
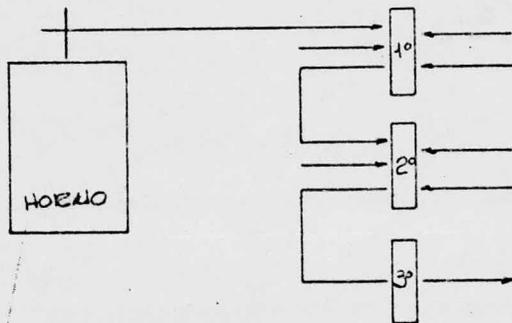


Fig. 31 . Secuencia para obtener un perfil angular de 3" x 3" x 1/4".

Tabla IV.

Programa de pasadas para laminar un perfil angular de 76.2 x 76.2 mm.
x 6.35 mm., procedentes de billets de 101.6 x 101.6 mm.

PASADA No	h_0 mm	h_1 mm	Δh mm	%	b_0 mm	b_1 mm	$b_1 - b_0$ mm	CAJAL	OBSEZY
0	101.6				101.6				
1	101.6	69.0	32.6	32.0	101.6	105.0	3.4	plano	
2	69.0	48.0	21.0	30.0	105.0	109.0	4.0	plano	giro 90°
3	109.0	98.0	11.0	10.0	48.0	50.0	2.0	canteo	giro 90°
4	53.0	31.0	22.0	41.0	50.0	54.0	4.0	mpza	
5	31.0	21.0	10.0	32.0	54.0	60.0	6.0	mpza	
6	21.0	17.0	4.0	19.0	60.0	66.0	6.0	mpza	
7	17.0	9.0	8.0	47.0	66.0	71.0	5.0	mpza	
8	9.0	7.3	1.7	19.0	71.0	73.0	2.0	mpza	
9	7.3	6.3	1.0	14.0	73.0	76.2	3.2	acabado	



INSPECCION DE PRODUCTOS TERMINADOS.

En la laminación de perfiles angulares, así como todo producto terminado, es necesario llevar a cabo al final del proceso un control de las características, tanto en lo que concierne a las dimensiones y a las tolerancias en peso; y dimensiones de manera tal que los productos obtenidos cumplan con las normas establecidas y satisfagan los requerimientos pedidos por los clientes.

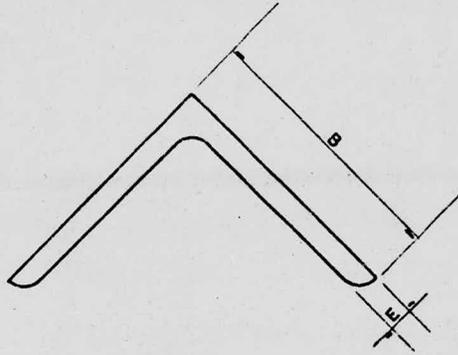
Inspecciones a que es sometido el material una vez que ha pasado por el proceso de laminación:

- a) Inspección dimensional y defectos superficiales.
- b) Pruebas mecánicas.

La inspección dimensional y defectos superficiales, se lleva a cabo en el momento mismo de la laminación, basándose en normas establecidas -- para el producto terminado.

Personal encargado del control de calidad toma muestras en períodos de tiempo constante y antes de verificar sus dimensiones se marca el sentido de salida del material para poder reportar el ancho A y B; así como el grueso A y B. A continuación se procede a determinar el peso por metro que exige la norma.

En caso de que estas lecturas (Fig. 33) no estén dentro de las tolerancias que marcan las normas, se da aviso al encargado del proceso de -- fabricación para que haga los ajustes necesarios para su corrección.



PRODUCTO 3" x 3" x 1/4"

ANCHO:

MINIMO 73.82 mm. PROMEDIO 76.60 mm. MAXIMO 79.38 mm.

GRUESO:

MINIMO 5.97 mm. PROMEDIO 6.35 mm. MAXIMO 6.73 mm.

PESO: Kgs./m.

MINIMO 7.107 PROMEDIO 7.290 MAXIMO 7.472

ANCHO

GRUESO

PESO

A B
78.0 76.8

A B
6.15 6.35

7.457

ANCHO A 78.0 + 1.4 D

 " B 76.8 + 0.2 D

GRUESO A 6.15 - 0.2 D

 " B 6.35 - 0.0 D

PESO Kgs./m. 7.457 - 0.015 D

Fig. 33.

Se puede decir, que los defectos superficiales que con mayor frecuencia se presentan en la laminación de perfiles angulares, son los mismos - que en cualquier otro ferfil laminado en caliente y son ocasionados por - exceso de material en el paso de acabado, mala distribución de presiones, rodillos cruzados, empuje axial, enfriamiento del material, traslapes y - dobleces probocados por exceso de material en cualquiera de los pasos anteriores al acabado, rallas debidas al rose del material con las guías; - cinceles, o cualquier otro cuerpo extraño.

Como decíamos anteriormente, se requiere de parte del personal de -- supervisión, un control permanente de manera de que no toleren la forma - ción de pasos con secciones inexactas o con defecto, con el objeto de evi - tar en lo posible todo rechazo del producto.

En el laminado de perfiles angulares se observa con mucha frecuencia una torsión o giro del mismo al salir del castillo de acabado, que se ori - gina por una presión irregularmente repartida en la sección (reducción -- irregular de altura).

El perfil puede adquirir un sentido distinto de giro como consecuen - cia de la influencia de varias circunstancias, de las cuales podemos con - siderar las siguientes:

1.- Diferencia de velocidades tanto en la parte superior como en la inferior del perfil (mala colocación de la línea neutra en las canales), - o también a la diferencia de diámetros en un punto determinado del perfil, es decir, la diferencia de diámetros de la canal colocada entre los rodi - llos.

2.- Posición incorrecta de las guías de entrada.

Se requiere un buen ajuste de las guías de entrada cuando la laminación se realiza con pasadas abiertas, así como un perfecto alineamiento que posibilite la obtención de un ángulo con alas iguales.

3.- Posición incorrecta de guías de salida y cinceles.

Esto ocasiona que a la salida del castillo el perfil, salga desviado a la derecha o a la izquierda si los guías y cinceles estén desplazados a la izquierda.

4.- Rodillos desviados de la posición horizontal debido al montaje descuidado de las chumaceras de soporte o mal ajuste de los laterales.

El giro o torsión del perfil puede ser hacia la izquierda o derecha dependiendo en que lado del perfil se ejerce más presión y sesa de girar en el momento en que la presión está repartida con uniformidad por toda la sección del perfil.

Para reconocer la causa de este giro se analiza el perfil en el sentido de la laminación, comparandose la desigualdad en el grueso de las alas del perfil. Si por ejemplo el grueso A fuese mayor que el B y el perfil girase a la derecha, es que los rodillos no están correctamente colocados entre sí, sino tal y como se indica en la Fig. 34. La mayor presión sobre el patin B provoca el giro del perfil hacia la derecha, o sea hay torsión derecha.

Para eliminar esta diferencia de gruesos en los patines hay que correr el rodillo superior hacia la derecha o el inferior hacia la izquierda, con lo cual queda eliminada la causa del giro.

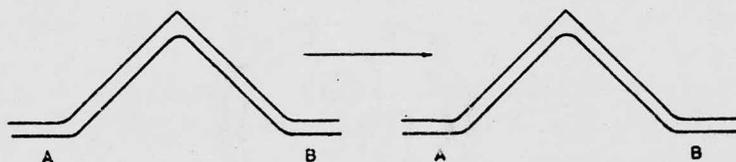


Fig. 34.

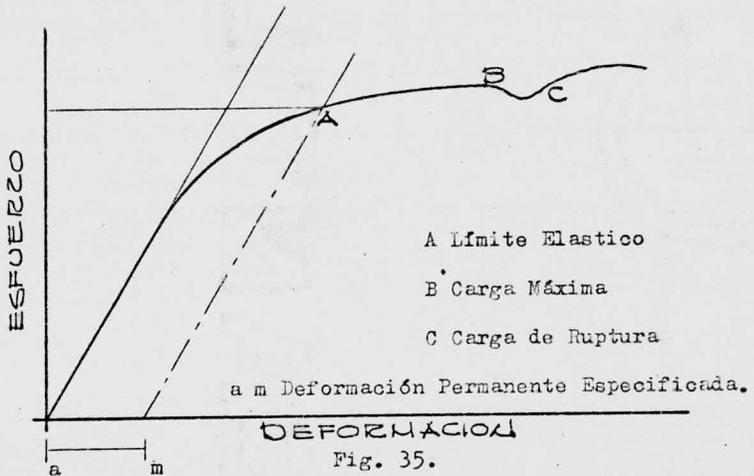
Si a pesar de la corrección anterior, la torsión no desaparece, la causa puede ser por una mala colocación de la caja de las guías de entrada y habrá que desplazar ésta hacia la derecha o a la izquierda cuando hay giro hacia la derecha.

b) Pruebas mecánicas al material.

Para determinar las propiedades mecánicas del perfil obtenido del proceso de laminación, normalmente se somete el material a la prueba de tensión; encontrando con ello, el límite elástico, carga máxima, carga de ruptura y su alargamiento.

Si sometemos una probeta, tomada de un perfil a una deformación permanente en sentido longitudinal aplicándole una carga cuantificada por --

medio de una prensa hidráulica se puede obtener la gráfica Esfuerzo-Deformación (Fig. 35).



Si dividimos los valores de las cargas aplicadas (en Kg.), entre el área (en cm.) de la sección transversal de la probeta; obtenemos el límite elástico, la carga máxima y la carga de ruptura en Kg./cm.².

El alargamiento del material expresado en % se toma de la gráfica — sobre el eje de las abscisas, o bien por medio de marcas de calibración, — las cuales se medirán con precisión antes y después de la fractura del — material. Con la ayuda de la fórmula $\frac{L_f - L_i}{L_i} \times 100$; se calculará el — % de alargamiento del material.

CONCLUSIONES.

Los aspectos indicados, a través de las etapas que tienen que efectuarse para llegar a obtener un semiproducto, así como su terminación, sólo son posibles con la supervisión calificada, basada en la comprensión de los principios tecnológicos fundamentales y en las relaciones humanas.

Propiamente, en el diseño de calibraciones para cualquier perfil, se enfrenta uno con la tarea de tener que trazar pasos en los que, al laminar desde una determinada sección inicial, se obtenga el perfil final requerido con un número de pasos que se adapten a la capacidad de deformación del material, o sea, por su resistencia a la deformación. Esta resistencia depende de la temperatura del material y a sus propiedades estructurales del mismo.

Para conseguir, las exigencias a las que debe responder el producto-elaborado, con el máximo de rendimiento, se tienen que considerar los siguientes factores:

- 1.- Personal de supervisión altamente calificado.
- 2.- Uniformidad de la temperatura en el material
- 3.- Clase de deformación, influida por el diámetro de los rodillos, la velocidad de laminación y el calibrado de los pasos.
- 4.- La forma constructiva del tren de laminación y su conservación.
- 5.- La condición de los dispositivos o máquinas que componen la línea principal del tren de laminación.

En todo caso, se debera de llegar al producto requerido con un número determinado de pasos que no sobrepasen el límite de conformación del material, con el fin de obtener un producto de mejor calidad en lo que -- respecta a la exactitud de medidas y condiciones superficiales.

BIBLIOGRAFIA

- | | |
|---|--|
| SEMINARIO SOBRE CONTROL DE CALIDAD
EN LAMINACION | REUNION BIENAL
(BRASIL) ILAFA. |
| CALIBRADO DE CILINDROS PARA
LAMINACION DE ANGULOS | ING. P. WOLKOWICZ |
| LAMINACION DE BARRAS Y PERFILES DE
ACEROS DE ALTA ALEACION | ING. RICARDO SANTAMARIA R.
SIDERURGICA NACIONAL, S.A.
PRIMERA REUNION BIENAL DE
LA INDUSTRIA SIDERURGICA
NACIONAL. |
| INDUSTRIAL FURNACE | W. TRINKS, THIRD EDITION
1955. |
| PRINCIPIOS DE METALURGICA FISICA | ROBERT E. REED-HILL.
EDITORIAL CONTINENTAL. |
| LAMINACION DE REDONDO LISO
PARTIENDO DEL LINGOTE | ING. ROBERTO VALDERRAMA S.
(TESIS)
FAC. DE INGENIERIA |
| TRENES DE LAMINACION | A. I. TSELIKOV
V.V SMIRNOV
EDICIONES URMO. |