

106-A

2ij



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO**

**FACULTAD DE INGENIERIA**

**PROYECTO PARA LA INSTALACION DE UNA  
PLANTA LAMINADORA DE VARILLA  
CORRUGADA PARA CONSTRUCCION, HASTA  
1/2" DE DIAMETRO PARA UNA PRODUCCION  
DE 15-20 T. M. /HR.**

**T E S I S**

**QUE PARA OBTENER EL TITULO DE  
INGENIERO MECANICO ELECTRICISTA**

**P R E S E N T A :**

**ALEJANDRO ROJO MEDIAVILLA**

**DIRECTOR DE TESIS  
ING. ARMANDO ORTIZ PRADO**

**MEXICO. D. F.**

**1987**



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 está protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

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

## INDICE

NOMENCLATURA.....	1
I INTRODUCCION.....	3
II TEORIA DE LAMINACION.....	4
II.1 INTRODUCCION.....	4
II.2 CLASIFICACION GENERAL.....	6
II.3 RELACIONES GEOMETRICAS.....	13
II.4 FUERZAS DE DEFORMACION.....	19
II.5 CALCULO DE LA CARGA DE LAMINACION.....	20
II.6 PAR Y POTENCIA.....	26
II.7 TECNICAS MODERNAS PARA EL CALCULO DE PARAMETROS.....	28
III LAMINACION DE VARILLA CORRUGADA.....	29
III.1 PRINCIPALES REQUISITOS MECANICOS.....	32
III.2 PRODUCTORES.....	34
III.3 ANALISIS ECONOMICO.....	37
IV DESCRIPCION DE LOS EQUIPOS AUXILIARES DE UNA PLANTA DE LAMINACION.....	39
V ANTEPROYECTO DE UNA PLANTA DE LAMINACION PARA VARILLA CORRUGADA DE CONSTRUCCION HABTA 1/2" DE DIAMETRO Y CON UNA PRODUC- CION DE 15-20 T.M./HR.....	48
V.1 INTRODUCCION.....	48
V.2 HORNO DE PRECALENTAMIENTO.....	48
V.3 TREN DE DESBASTE.....	50
V.4 TREN DE LAMINACION.....	50
V.5 TAMANO DE LA PLANTA.....	51
V.6 SERVICIOS AUXILIARES.....	64
V.7 AUTOMATIZACION DE LA PLANTA.....	66
BIBLIOGRAFIA.....	67
APENDICE.....	68

## NOMENCLATURA

PUNTO 1.....	PUNTO DE ENTRADA
PUNTO 2.....	PUNTO NEUTRO
PUNTO 3.....	PUNTO DE SALIDA
$\alpha$ .....	ANGULO DE CONTACTO
$h$ .....	ESPESOR
$V$ .....	VELOCIDAD
$V$ .....	VOLUMEN
$V_p$ .....	VELOCIDAD PERIFERICA DEL RODILLO
$b$ .....	ANCHO
$\Delta$ .....	INCREMENTO
$\theta$ .....	ANGULO CUALQUIERA EN CONTACTO
$\gamma$ .....	ANGULO DEL PUNTO NEUTRO
$a$ .....	AVANCE
$R$ .....	RADIO DEL RODILLO
$\mu$ .....	COEFICIENTE DE FRICCION
$T$ .....	TEMPERATURA
$F$ .....	CARGA DE LAMINACION
$P_m$ .....	PRESION MEDIA ESPECIFICA DE LAMINACION
$\sigma_p$ .....	RESISTENCIA A LA DEFORMACION PLANA HOMOGENEA
$L_p$ .....	LONGITUD PROYECTADA DEL ARCO DE CONTACTO
$\sigma_{p,m}$ .....	RESISTENCIA MEDIA A LA DEFORMACION PLANA HOMOGENEA
$\sigma_h$ .....	RESISTENCIA A LA DEFORMACION HOMOGENEA
$h_{min}$ .....	ESPESOR MINIMO



## I INTRODUCCION

El presente trabajo ha sido desarrollado con la finalidad de brindar un material de apoyo para aquellos interesados en el tema de la laminación en caliente en general y, en particular, la laminación de varilla corrugada de construcción. Para este fin se consideró necesaria su estructuración de tal manera que se abarcarán, de manera general, una gran variedad de aspectos relacionados con ella.

Se inicia el tratamiento del tema haciendo una definición del proceso, a continuación se realiza una clasificación general de los equipos y su constitución, así como de los diferentes arreglos existentes, y se obtienen las expresiones matemáticas que nos definen los principales efectos de la laminación.

Posteriormente se explica qué es una varilla corrugada de construcción y como se clasifican estas, se hace una recopilación de los productores de varilla a nivel nacional y se efectúa un breve análisis de la relación existente entre la producción, la exportación y la importación de dicho producto.

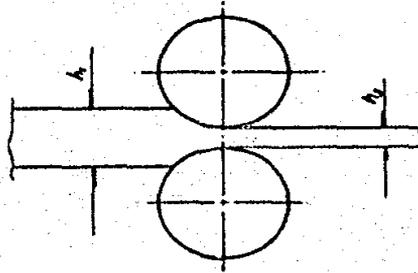
Después se realiza una descripción de todos los equipos auxiliares que son necesarios para el funcionamiento de una planta.

Finalmente se realiza un anteproyecto para la instalación de una planta laminadora.

## II. TEORIA DE LAMINACION

### II.1 INTRODUCCION

La laminación consiste en la reducción de la sección transversal de un material dado, al hacerlo pasar entre dos rodillos cilindricos girando en sentidos contrarios. Dichos cilindros producen la deformación plástica del material por medio de esfuerzos compresivos y cortantes. Los compresivos se deben a que según el material se introduce entre los rodillos, el espesor libre entre ellos va siendo menor. Los esfuerzos cortantes son debidos a que las fibras externas del material están sujetas a la fuerza de fricción con los rodillos.



Hoy en día la laminación es el medio más económico de reducir la sección transversal de un material y tiene, por esto, un gran campo de aplicaciones tanto trabajando en frío como en caliente. Dentro de las características y limitaciones de cada una de estas se encuentran:

Laminación en frío.

Buen acabado superficial.

Buen control dimensional.

Bajo porcentaje de reducción posible. Se hace necesario un recocido para aliviar tensiones por deformación plástica en frío (acritud).

Altas cargas de deformación.

Laminación en caliente.

Alto porcentaje de reducción posible.

Deficiente acabado superficial.

Bajo control dimensional.

Menores cargas de deformación.

En base a estas propiedades se elige el proceso a seguir para la obtención de un producto determinado, utilizándose en muchos casos combinaciones de ellos. En general, los primeros pasos de deformación, donde son requeridas grandes reducciones, se realizan en caliente, mientras que cuando es necesario un mejor acabado o dimensiones precisas se laminará en frío.

Este proceso surge hacia 1550 debido a la necesidad de acuffar monedas de espesor constante, razón para la cual se requería partir de hojas metálicas de las mismas características.

En 1783 Henry Court, considerado como el padre de la laminación moderna, obtiene una patente para cubrir su innovación de rodillos ranurados para la obtención de barras de hierro.

Actualmente los laminadores se clasifican en dos grandes

grupos: Los que laminan formas planas, constituidos por rodillos lisos y paralelos, y los que son utilizados para producir secciones formadas, como pueden ser: redondos, cuadrados, rieles, vigas, canales, etc.

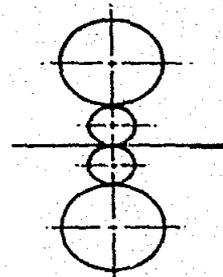
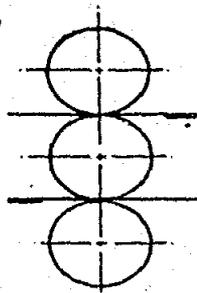
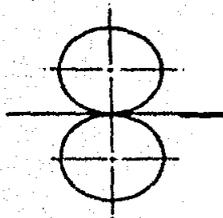
## II.2 CLASIFICACION GENERAL

Los principales arreglos laminadores son:

El dño

El trio

El cuarto



Como se puede ver, la clasificación se basa en el número de rodillos en el arreglo.

Cuando es necesaria más de una pasada de laminación, y se emplea un tren dño, es necesario regresar el material laminado al lado de entrada de la caja de laminación, lo que se complica mucho con materiales muy pesados y/o largos, en este caso se emplea una modificación en la cual los rodillos pueden girar en ambos sentidos, teniéndose así una caja dño reversible en la que

se puede laminar en ambas direcciones.

En los arreglos tríos se puede laminar en ambas direcciones con solo mover el material de la ranura superior a la inferior o viceversa, para lo cual, dependiendo del producto a laminar, se pueden utilizar mesas fijas y basculantes provistas de rodillos motrices, o en su defecto mediante repetidores o bien, manualmente.

Los laminadores cuartos son utilizados para la obtención de materiales planos de espesores pequeños, los rodillos de trabajo son de diámetros reducidos lo cual nos permite laminar espesores pequeños y reduce las cargas de laminación, los rodillos de soporte son robustos para brindar resistencia y evitar la flexión de los rodillos de trabajo.

Existen otros tipos de arreglos con aplicaciones mucho más específicas los cuales se clasifican por el número y manera de acomodar los rodillos, como son:

- a) Racimo ("Cluster")  
Sendzimir

Dichos arreglos son utilizados únicamente como acabadores para materiales muy duros y/o espesores muy pequeños.

- b) Planetario

Con el cual se obtienen grandes porcentajes de reducción en

un solo pase de laminación y es usado para materiales muy maleables. Su aplicación es muy escasa debido a su alta complejidad mecánica.

En ciertas ocasiones se utiliza la combinación de rodillos en una misma caja de laminación, teniendo un par de rodillos girados  $90^\circ$  con respecto al otro par de rodillos, a este arreglo se le conoce como caja universal, y "block X" cuando los rodillos se encuentran en dos planos a  $45^\circ$  con respecto a la horizontal.

Un tren de laminación (mostrado en la figura 1) esta compuesto por: una o más cajas de laminación (con todas sus partes tales como: castillos, rodillos, chumaceras, suspensión, mecanismo de regulación, etc.), caja de piñones, reductor, motor y coples.

Un tren de laminación es un arreglo de cajas de laminar con el cual se puede producir un producto dado.

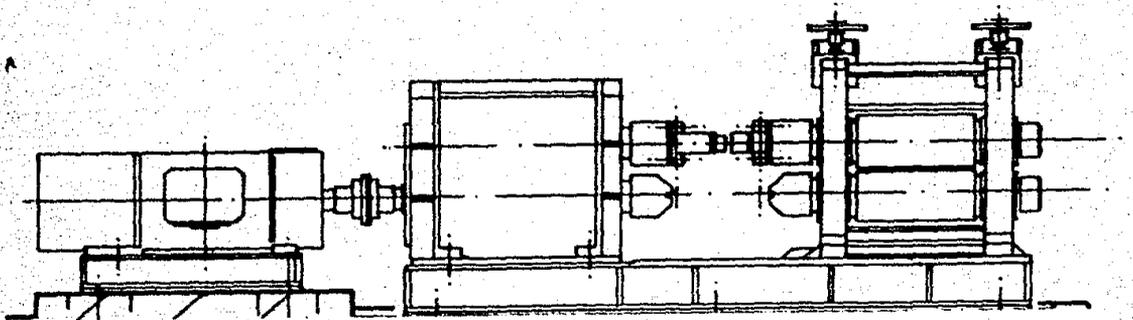


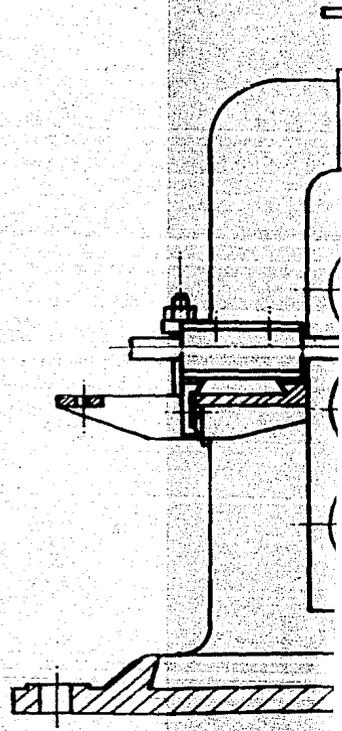
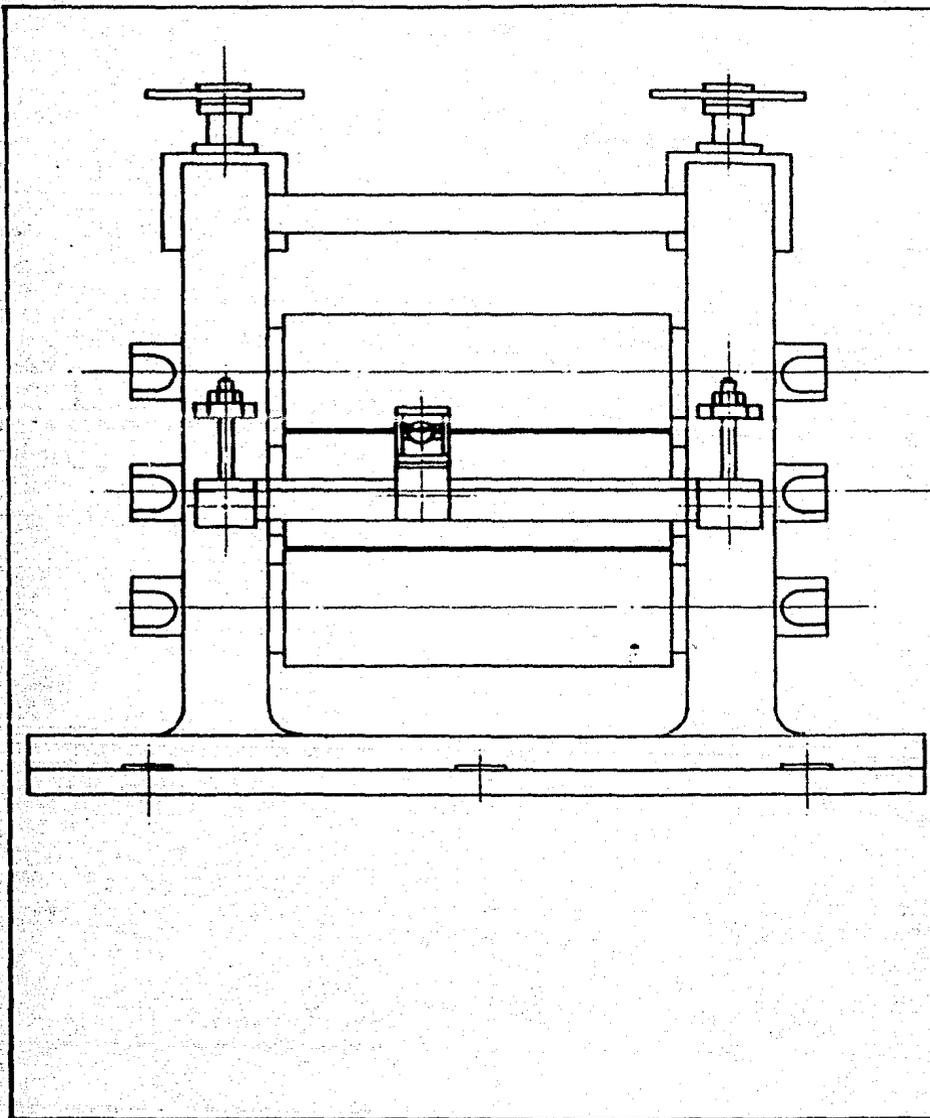
Fig. 1

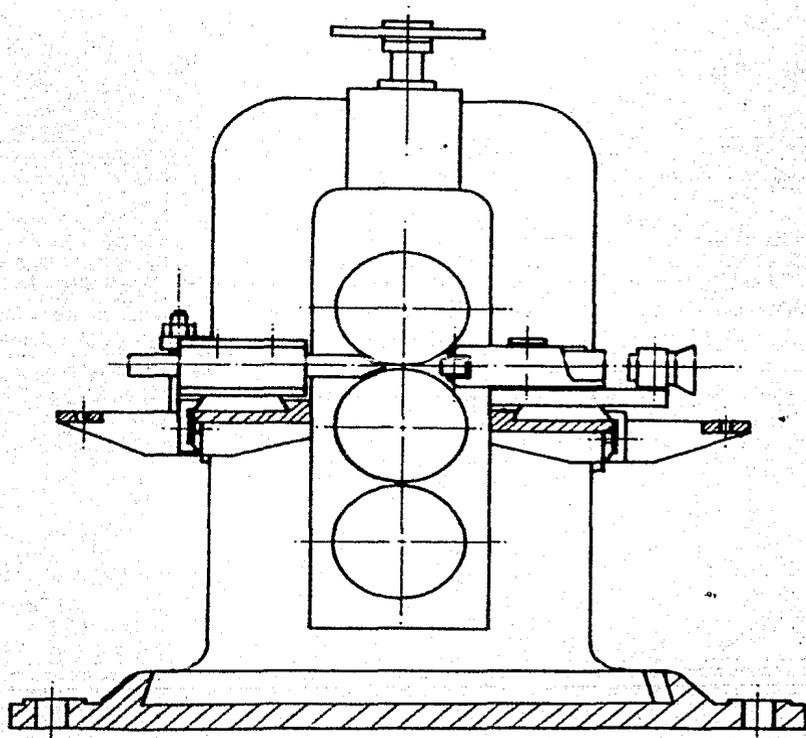
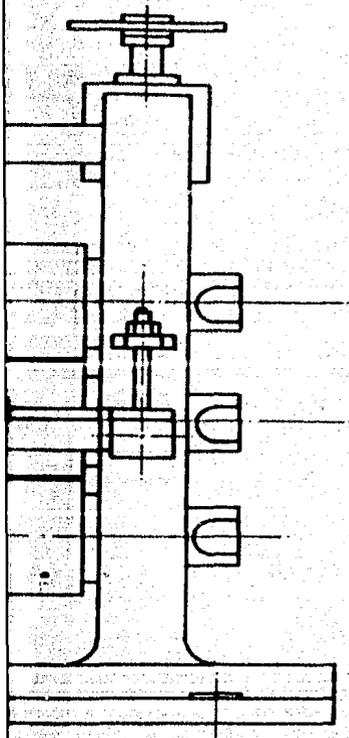
El castillo, es el bastidor donde se sujetan las chumaceras que soportan a los rodillos y es construido generalmente de acero fundido y/o forjado.

Hablando en particular de una caja trio, se tiene que las chumaceras centrales se encuentran fijas, mientras que, tanto las superiores como las inferiores, pueden ser reguladas verticalmente en ambos sentidos con la finalidad de poder ajustar el claro entre los rodillos. Las chumaceras inferiores suelen tener un mecanismo de cuña para su regulación, mientras que las superiores son reguladas mediante husillos.

Como los rodillos deben permanecer siempre en su separación máxima calibrada, es necesario mantener el rodillo superior siempre oprimido hacia arriba, para lo que se utiliza un mecanismo de suspensión el cual puede estar constituido por resortes entre las chumaceras superiores y centrales (o entre las superiores y las inferiores en el caso de un dño) o sujetando las chumaceras a la parte superior del castillo mediante tirantes.

Las chumaceras pueden ser: Tipo buje, estando practicamente deshechadas en la actualidad, estas son fabricadas generalmente en bronce o en polimeros termofijos, o bien del tipo de rodamiento, las cuales son las más utilizadas actualmente, siendo los más empleados dentro de estos rodamientos: Los esféricos de rodillos, los de rodillos cilindricos y los axiales de rodillos cónicos.





CAJA TRIO

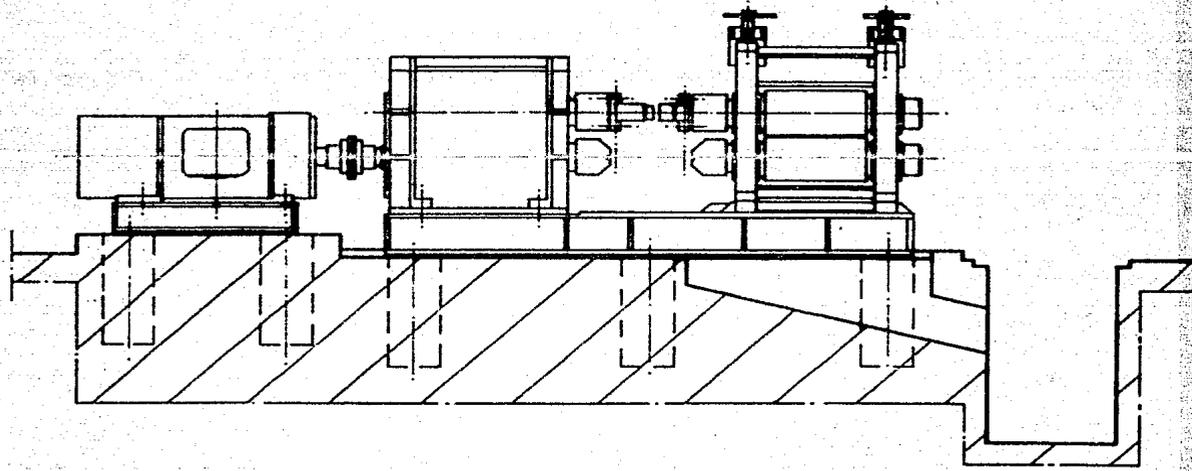
La caja de piñones es un implemento intermedio entre el reductor y los rodillos, su finalidad es la de dar movimiento a igual velocidad y sentidos contrarios a los rodillos de laminación, esta constituida por piñones de iguales diámetros, doble helicoidales (con el fin de evitar cargas axiales). Cuando se trata de la caja de piñones de un tren trio el árbol motriz es el central.

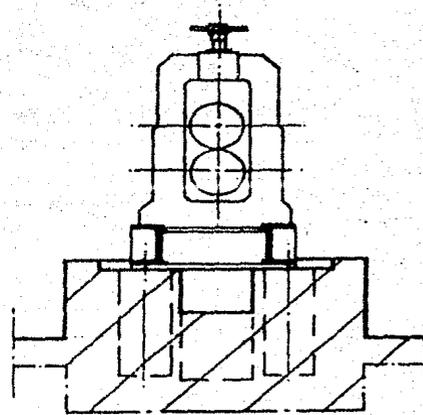
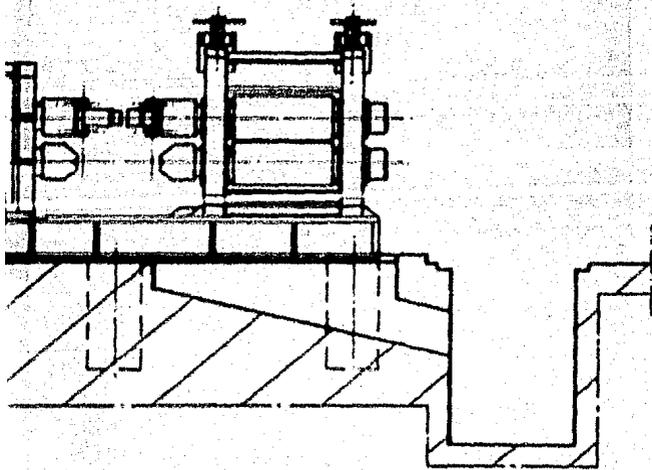
Los coples y Árboles de acoplamiento son los encargados de unir los piñones con los rodillos, o rodillos con rodillos entre cajas, deben de tener la capacidad de poder absorber un cierto grado de desalineamiento el cual se produce por la calibración de los rodillos.

Debido a que la velocidad del motor es en ocasiones mayor que la de los rodillos, será necesario entonces el empleo de un reductor de velocidad, el cual esta construido con engranes doble helicoidal. En muchos casos se encuentra incorporado en la unidad de la caja de piñones.

En ocasiones, cuando se tienen grandes cargas aplicadas durante periodos cortos (p.ej. en un desbaste), se incluye un volante de inercia entre el motor y el reductor.

El motor, unidad que proporciona el movimiento a los rodillos, puede ser de dos tipos dependiendo del tren de que se trate.





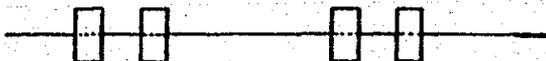
**TREN DUO**

Para trenes continuos se utilizan motores de corriente continua con la finalidad de que se pueda variar la velocidad de estos, y así, controlar el lazo formado entre cajas de laminación debido a las variaciones de velocidad producidas durante la laminación.

En trenes en línea o desplegados, se utilizan motores de corriente alterna de anillos rozantes los cuales nos brindan suficiente par y potencia para impulsar todo el tren.

Dependiendo de la disposición en la planta de las cajas de laminación se tienen dos tipos básicos de trenes:

**CONTINUOS:** Son aquellos en los que las cajas están dispuestas una tras otra de tal forma que el material se lamina en línea recta.

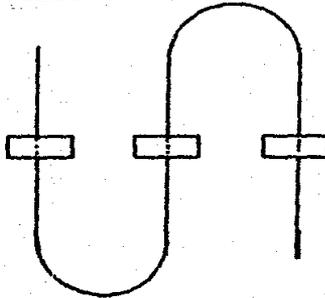


Se utilizan cajas dobles en grupos de dos, controlando el lazo entre cada grupo.

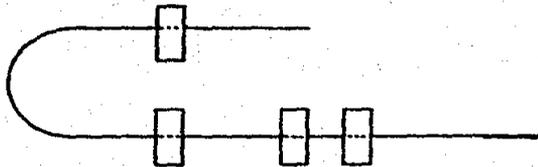
Si se tienen rodillos horizontales y verticales de tal forma que el material pueda ser deformado en dos direcciones, o si se tienen cajas universales o "block X" se habla de trenes "no

twist" (sin giro).

**EN LINEA o DESPLEGADOS:** Es aquel arreglo en el que se tienen alineadas las cajas y son impulsadas todas por un solo motor. En este tipo de arreglo suelen utilizarse cajas trio, en el caso de requerirse laminar en una sola dirección en alguna de las cajas, solo dos de los rodillos de esta trabajarán, en dado caso el tercer rodillo servirá únicamente como un árbol de transmisión, si este caso se presenta en la última caja, esta puede substituirse esta por una caja dño.

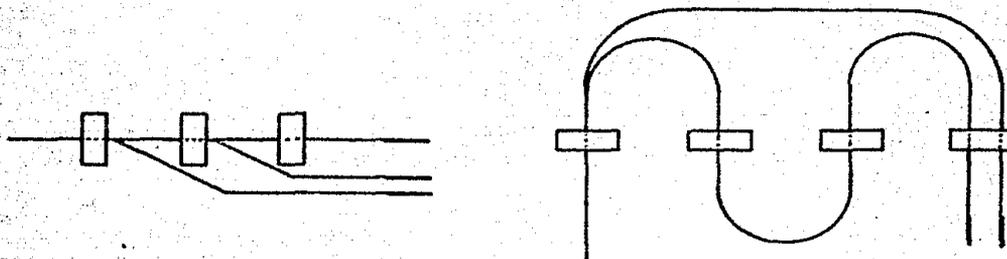


En ocasiones se recurre a la combinación de trenes continuos y desplegados, esto se hace para reducir, bien sea, el área de trabajo o la velocidad de laminación, a esto se le conoce como un tren CROSS-COUNTRY.



Quando es posible eliminar ciertos pases de laminación, para con esto obtener distintos productos, se dice que es un tren

semicontinuo.



### II.3 RELACIONES GEOMETRICAS

**ANGULO DE CONTACTO ( $\alpha$ ):** Es el ángulo descrito entre el plano que contiene a los ejes de rotación de los rodillos, y el formado entre el eje de rotación de uno de los mismos y su respectiva línea de contacto con el material.

$$\alpha = \tan^{-1} \frac{L_p}{R - \Delta h}$$

**LONGITUD PROYECTADA DEL ARCO DE CONTACTO ( $L_p$ ):** Es la proyección del arco de contacto sobre el plano de laminación.

$$L_p = \sqrt{R \Delta h}$$

**ESPESOR MINIMO ( $h_{min}$ ):** Es el mínimo espesor que se puede obtener con un arreglo dado.

Existen muchas y muy variadas expresiones para la determinación del espesor mínimo, una de ellas es:

$$h_{min} = \frac{MR \sigma_{mp}}{1.86}$$

Todas las expresiones para la determinación de  $h_{min}$  están basadas en:

$$h_{min} \sim C \mu R G \bar{h}$$

Donde:

C = constante elástica del rodillo.

REDUCCION DE ESPESOR ( $\Delta h$ ): Es la diferencia de espesor antes y después de ser laminado.

$$\Delta h = h_1 - h_2$$

PORCENTAJE DE REDUCCION: Es la relación existente entre el espesor del material antes y después de ser laminado.

$$\% \Delta h = \frac{h_1 - h_2}{h_1}$$

Existen métodos analíticos mediante los cuales se pueden calcular aproximadamente la carga de laminación y la potencia requerida para procesos de laminación en frío, pero para procesos de laminación en caliente solo se cuenta con algunas ecuaciones empíricas para dichos cálculos, la razón de que no se puedan determinar analíticamente es el importante cambio de propiedades mecánicas que se presentan con relativamente reducidos incrementos en la temperatura, y a la alta velocidad de deformación en el proceso.

Para poder resolver las ecuaciones que nos conducen a los

métodos analíticos, se suele considerar:

- 1.- Arco de contacto circular
- 2.- Coeficiente de fricción constante
- 3.- Expansión lateral despreciable
- 4.- La sección del plano perpendicular a la dirección del rodillo permanece plana
- 5.- La deformación elástica se desprecia
- 6.- Se aplica el criterio de von Mises

Para estudiar los principios básicos de la laminación imaginemos el caso sencillo de laminar una barra entre dos rodillos planos.

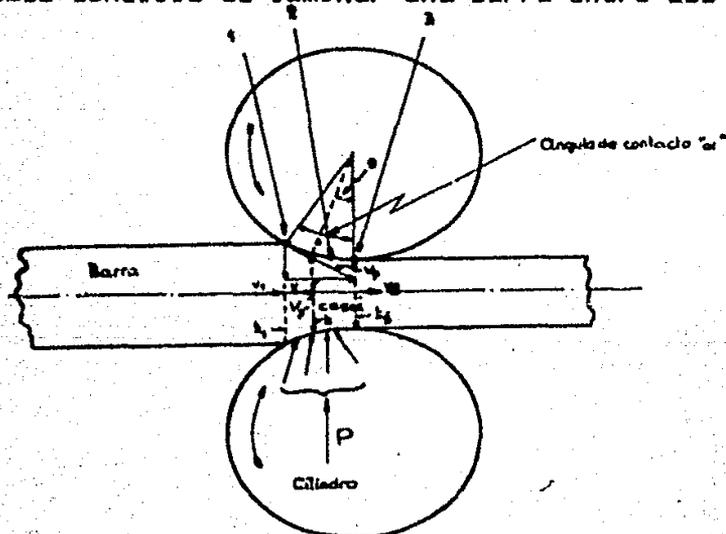


Fig. 2

Supongamos que la barra antes de ser laminada tiene un espesor  $h_1$  y un ancho  $b_1$  y por lo tanto una sección transversal  $S_1 = h_1 b_1$ , tras de ser laminada dicha barra tendrá un espesor  $h_3$ , un ancho  $b_3$  y una sección transversal  $S_3 = b_3 h_3$  donde  $h_3 < h_1$ ,

$b_3 > b_1$  (\*) y  $S_3 < S_1$ .

El aplastamiento del material se inicia en la sección de entrada (1 - 1') y termina en la sección de salida (3 - 3'), el material, entre estas 2 secciones queda estirado.

Si  $V_1$  es la velocidad de entrada de la barra y  $V_3$  es la velocidad de salida, entonces, aplicando la ley de la conservación del volumen:

$$V_1 S_1 = V_3 S_3$$

Y como :

$$S_1 > S_3$$

Implica :

$$V_1 < V_3$$

Es decir que la velocidad de la barra, al ser laminada, crece desde un valor  $V_1$  a la entrada de los rodillos hasta un valor  $V_3$  a la salida de estos. Sin embargo, la velocidad periférica del rodillo ( $V_p = \omega R$ ) permanece constante, por lo que se producirá un deslizamiento entre el material y el rodillo, este deslizamiento será mayor en la sección 1-1' e irá disminuyendo paulatinamente hasta ser nulo en un cierto punto entre las secciones 1-1' y 3-3'. A dicho punto donde no existe movimiento relativo entre la barra y el rodillo lo llamaremos punto neutro (2-2'), después de este punto el deslizamiento cambia de sentido

(\*) En sentido estricto  $b_3 > b_1$  pero la diferencia es tan pequeña que se desprecia.

y vuelve a aumentar hasta la sección 3-3'.

Podría pensarse que la velocidad de avance de la barra en la sección 1-1' es solo  $V_p \cos \alpha$  y que sería posible una relación de secciones tal que :

$$\frac{S_3}{S_1} = \frac{V_p \cos \alpha}{V_p}$$

Y de esta manera evitar el deslizamiento, pero si suponemos que no hay deslizamiento entre la barra y el rodillo, tenemos que la velocidad  $V$  de cualquier sección de la barra en los rodillos debe ser igual a la proyección de la velocidad periférica de ellos, como por todas las secciones ha de circular el mismo volumen en el mismo tiempo, y despreciando el ensanchamiento (práctica muy común) se tiene que:

$$h_1 V_p \cos \alpha = h V_p \cos \theta = h_3 V_3$$

Y la única manera de cumplir esta relación es, si el espesor varía en la misma relación que aumenta la proyección de la velocidad periférica, y esto no se cumple en un perfil circular.

Debido a que en la sección 2-2' (también llamada sección crítica de deformaciones longitudinales) no existe movimiento relativo entre la barra y los rodillos, la barra es arrastrada a una velocidad:

$$V_2 = V_p \cos \theta$$

Y como en general para la laminación en caliente  $\delta \approx 0$ ,  
 $\cos \delta = 1$  por lo que:

$$V_2 \approx V_p$$

Desde la entrada hasta la sección 2-2' la velocidad de la barra es menor que la velocidad periférica de los rodillos, y de la sección 2-2' a la salida es mayor.

Se llama avance a la diferencia entre la velocidad de salida de la barra ( $V_3$ ) y la velocidad periférica de los rodillos ( $V_p$ ) con respecto a esta.

$$a = \frac{V_3 - V_p}{V_p}$$

Pudiéndose expresar en porcentaje y llamándose entonces avance relativo.

Tanto la localización del punto neutro (2-2') como el valor del avance depende de factores geométricos tales como:

- El radio de los rodillos
- La reducción conseguida
- El ángulo de contacto
- La longitud proyectada del arco de contacto

Así como también depende de factores físicos tales como:

Coefficiente de fricción

Temperatura

Tipo de material

Presencia de devanadores y/o frenos

#### II.4 FUERZAS DE DEFORMACION

En la Figura 2 se puede observar que la laminación es un proceso de compresión y que la magnitud de la fuerza  $F$  está determinada por la resistencia a la compresión de la barra y por el área comprimida. El área de contacto entre la barra y los rodillos (4-5-6-7) (Figura 3) se verá como una superficie plana, si dicha área se multiplica por la resistencia a la compresión no homogénea, se obtendrá la fuerza que tiende a separar a los rodillos.

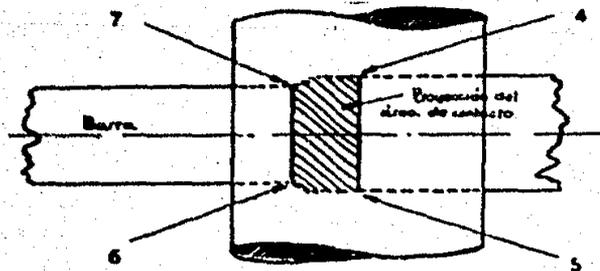


Fig. 3

## CARGA DE LAMINACION (F).

Es la fuerza con la cual los rodillos presionan contra el material. Debido a que esta fuerza presenta su reacción contra los rodillos también es llamada fuerza de separación.

## PRESION MEDIA ESPECIFICA DE LAMINACION (Pm)

Se define como la relación entre la carga de laminación y la proyección del área de contacto. Como proyección del área de contacto se toma el valor:

$$A_p = b_m L_p = b_m \sqrt{R \Delta h}$$

Donde

$b_m$  = ancho medio

$R$  = radio de los rodillos

(El valor exacto sería  $A_p = b_m \sqrt{R \Delta h - (\Delta h^2/4)}$  pero se suele despreciar el valor  $\Delta h^2/4$  por ser mucho menor que  $R \Delta h$ ).

## II.5 CALCULO DE LA CARGA DE LAMINACION

A continuación se presentan a grandes rasgos los métodos teóricos y experimentales seguidos para el cálculo de la carga de laminación.

## MÉTODOS TEÓRICOS

Los métodos teóricos desarrollados por todos los investigadores (excepto Drowan) parten de la ecuación diferencial de equilibrio de un elemento infinitesimal vertical en la ranura de laminación. Las diferencias entre las distintas teorías estriban en la forma de integrar dicha ecuación, y de las hipótesis simplificativas que para ello se tomen en consideración. El primero en deducir dicha ecuación fue von Karman, razón por la cual lleva su nombre, la forma de la ecuación de von Karman es:

$$\frac{1}{2} P \frac{dh}{dx} \pm P \tan \theta = \frac{d \left[ \frac{h}{2} (P - \sigma_p) \right]}{dx}$$

Donde:

P = Componente vertical de la presión radial entre rodillos y material.

x = Distancia del elemento considerado al plano de salida.

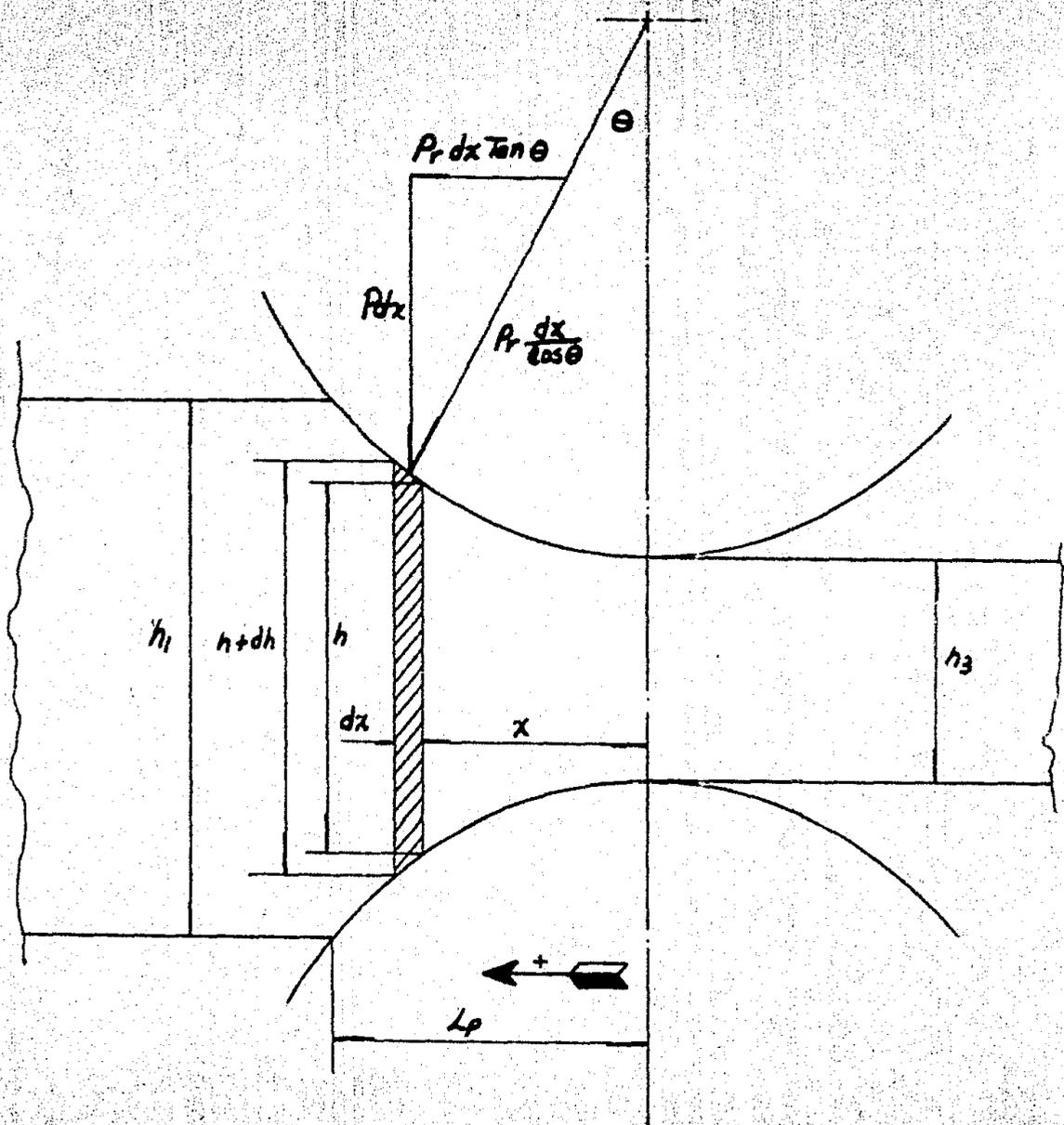
dθ = Angulo de rozamiento

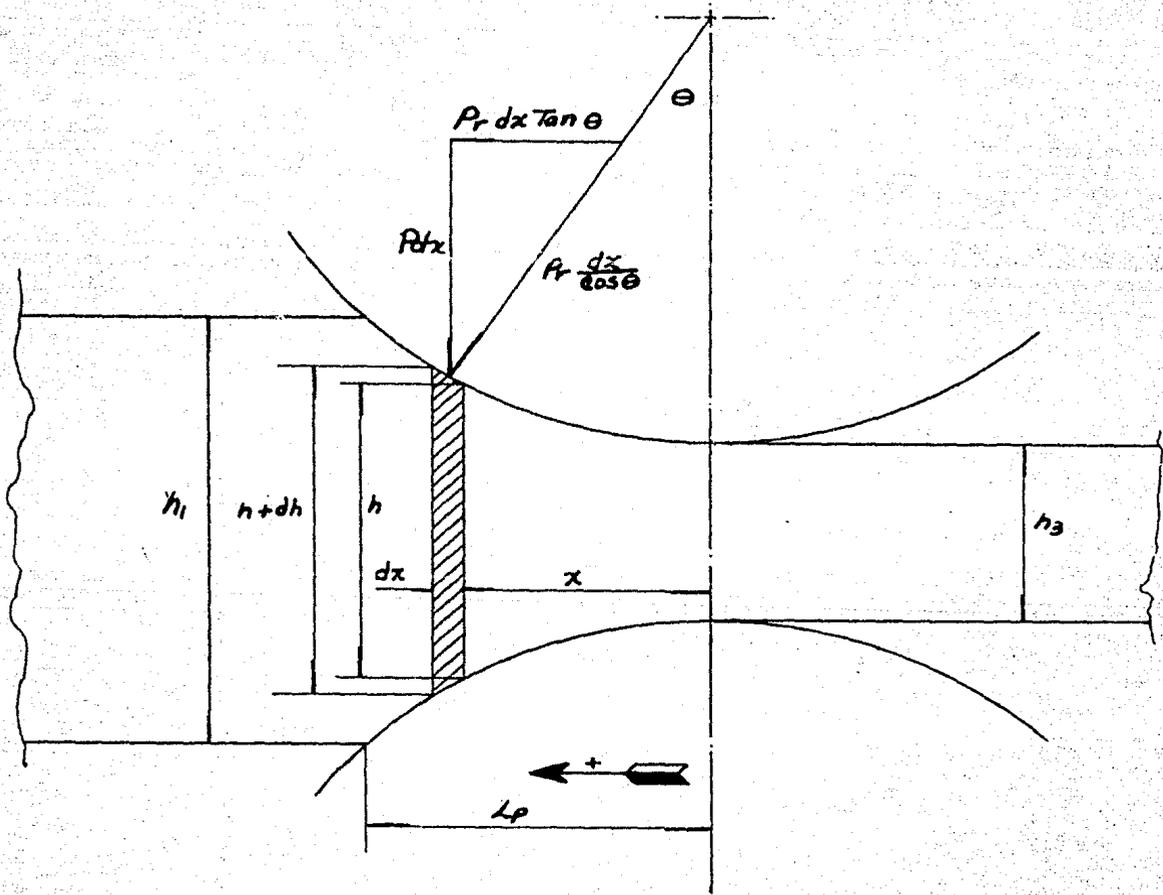
h = Espesor menor del elemento

σ<sub>p</sub> = Resistencia a la deformación plana homogénea

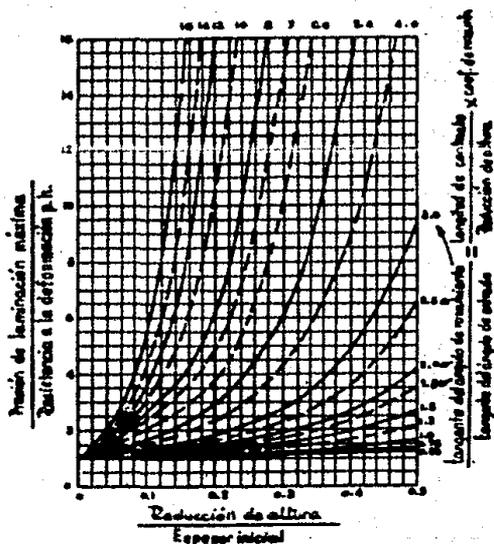
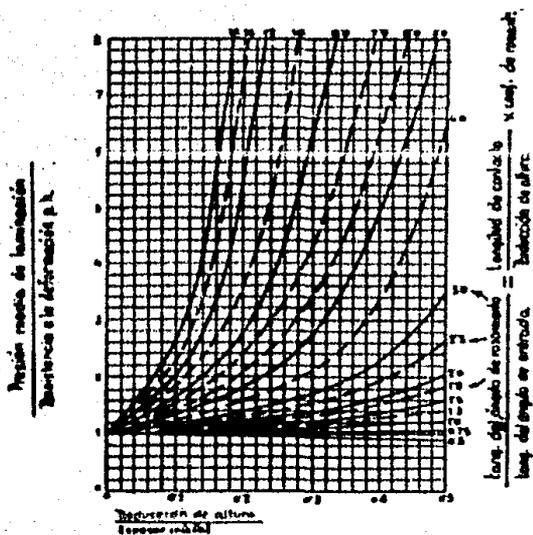
Dicha ecuación fue transformada por Smith a:

$$\frac{d(P/\sigma_p)}{d(x/L_p)} = \frac{\frac{2\Delta h}{h_3} \left( \frac{x}{L_p} \pm \frac{P L_p}{\sigma_p \Delta h} \tan \theta \right)}{1 + \frac{\Delta h x^2}{h_3 L_p^2}}$$





A esta ecuación corresponden las soluciones gráficas:



Esta es la misma línea teórica de desarrollo seguida por: Tsakelov, Nadai, Ford, etc.

Drowan basa su teoría en las investigaciones realizadas por Prantl sobre la compresión de una masa plástica entre dos superficies paralelas rugosas y planas. Este desarrollo conduce a una ecuación demasiado compleja (aunque parece ser la más exacta y es utilizada como punto de comparación de las otras teorías). En

unión con Pascoe desarrolló una expresión simplificada, quedando:

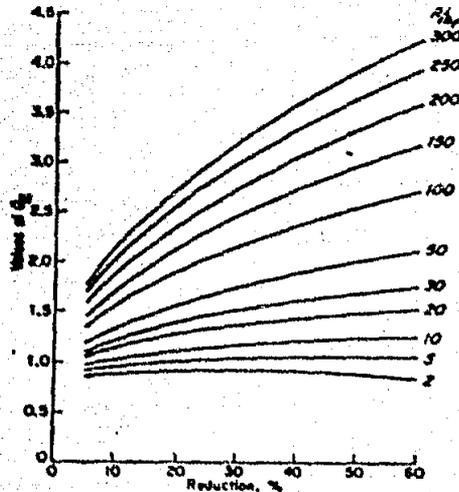
$$F = \bar{U}_{mp} b_m L_p \frac{1}{4} \left[ \pi + \sqrt{\frac{R}{h_3} \left( \frac{\Delta h}{h_3} \right)^3} \right]$$

Otra de las teorías más exactas es la desarrollada por Sims, partiendo de la ecuación de von Karman, y con la ayuda de funciones auxiliares desarrolladas por Drowan obtuvo la expresión:

$$F = \bar{U}_{mp} b_m L_p Q(E)$$

$$Q(E) = \sqrt{\frac{h_3}{4\Delta h}} \left[ \pi \tan^{-1} \left( \frac{\Delta h}{h_3} \right)^{1/2} - \left( \frac{R}{h_3} \right)^{1/2} \ln \left( \frac{h_2}{h_3} \right) \right] - \frac{\pi}{4}$$

El valor de  $Q(E)$  puede ser obtenido graficamente de:



Se puede observar que para poder efectuar el cálculo de la carga de laminación, es necesario conocer los valores de la resistencia a la deformación homogénea del material para la velocidad de deformación, temperatura y reducción empleada.

Conociendo la resistencia a la deformación homogénea se obtiene la resistencia a la deformación plana homogénea de la siguiente manera:

$$\sigma_p = \frac{2}{\sqrt{3}} \sigma_h$$

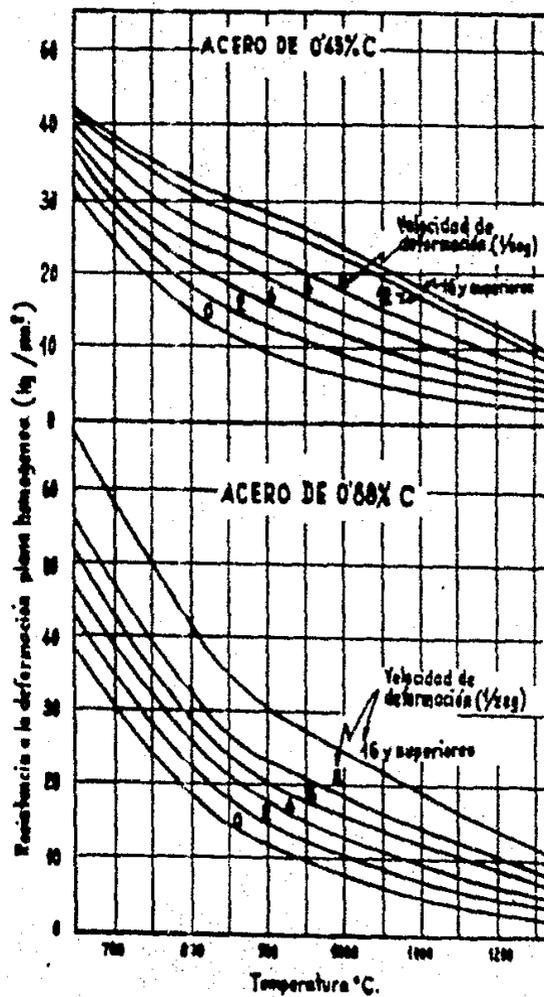
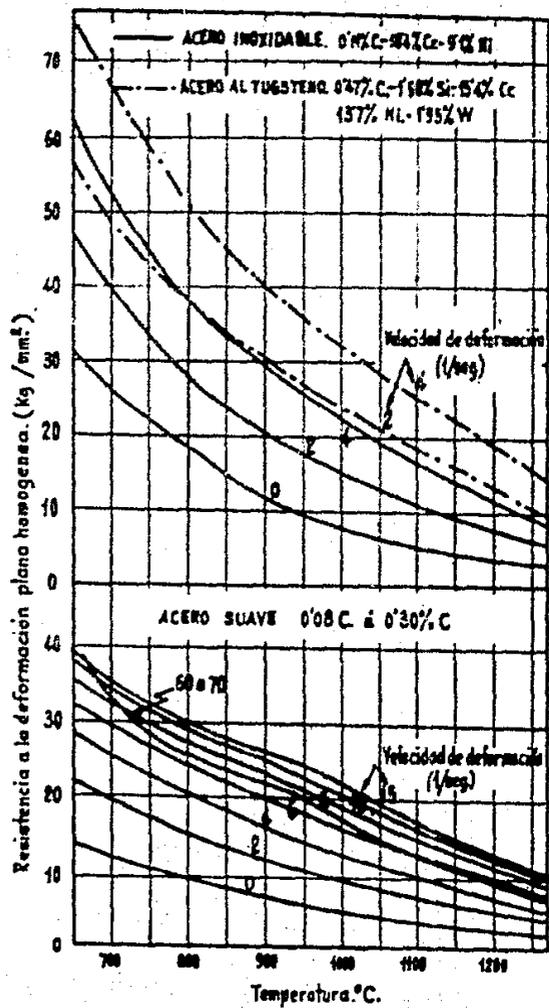
A partir de ésta se puede obtener la resistencia media a la deformación plana homogénea mediante:

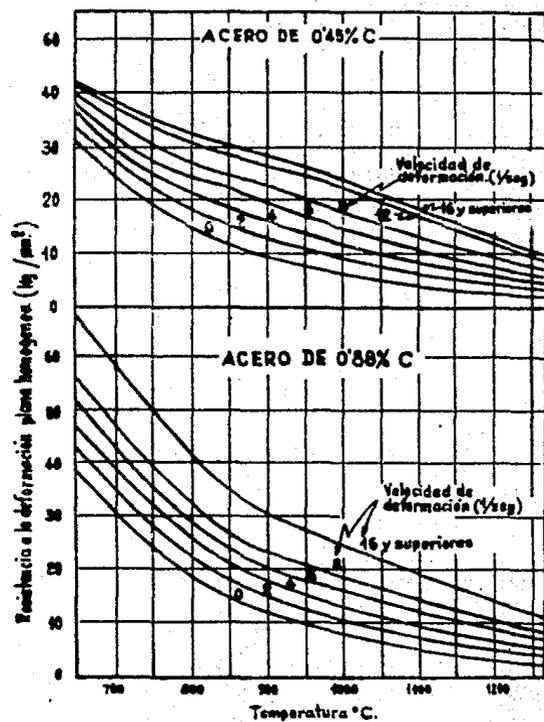
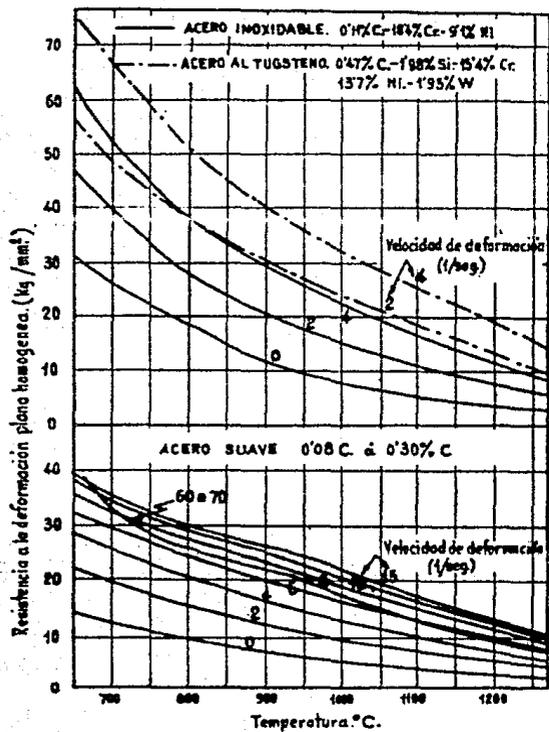
$$\sigma_{mp} = \frac{1}{\alpha} \int_0^{\alpha} \sigma_p d\theta$$

#### MÉTODOS EXPERIMENTALES

Como ya se mencionó anteriormente, las teorías de laminado en caliente no están tan desarrolladas como las de laminado en frío debido a las dificultades existentes para determinar la deformación inhomogénea y las condiciones de fricción, el esfuerzo de fluencia es función de la temperatura y la velocidad de deformación.

La rapidez de deformación para fricción adherente esta dada





por:

$$\dot{\epsilon} = \frac{V}{h} = \frac{2V_p \operatorname{sen} \theta}{h_3 + 2R(1 - \cos \theta)}$$

La rapidez media de deformación esta dada por :

$$\dot{\epsilon} = \frac{V_p}{\sqrt{Rh_1}} \sqrt{r} (1 + r/4)$$

$$r = \frac{\Delta h}{h_1}$$

Ford y Alexander desarrollaron la teoría experimental considerada más exacta para los cálculos de la carga de laminación para laminado en caliente:

$$F = \bar{\sigma} b m L_p \left( \frac{\pi}{2} + \frac{L_p}{h_1 + h_3} \right)$$

Donde:

$$\bar{\sigma} = \text{Esfuerzo medio de fluencia al corte puro} = \frac{1}{\sqrt{3}} \sigma_h$$

Otro desarrollo empírico, y el más antiguo, es el debido a los estudios de Ekelund, es una de las fórmulas más conocidas y usadas pues sus resultados son relativamente exactos:

$$F = b m L_p \left[ \bar{\sigma}_p + \frac{2 \bar{\sigma}_p V \sqrt{\Delta h / R}}{h_1 + h_3} \right] \left[ \frac{1 + 1.6 \mu L_p - 1.2 \Delta h}{h_1 + h_3} \right]$$

Donde:

$\bar{f}$  = Coeficiente de plasticidad

$f = 0.01 (14 - 0.01T(°C))$

$\mu = 1.05 - 0.0005T(°C)$  para cilindros de fundición gris.

$\mu = 0.8 (1.05 - 0.0005T(°C))$  para cilindros de acero duro pulido.

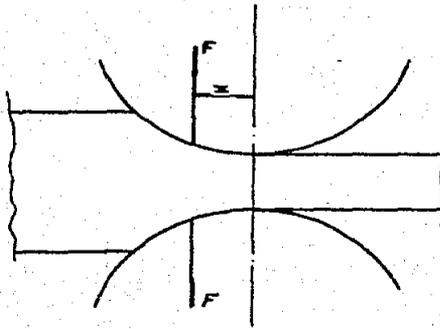
V en [mm/s]

## 11.6 PAR Y POTENCIA

La potencia se consume en cuatro puntos principalmente:

- 1.- Deformación del metal
- 2.- Fricción en los rodamientos
- 3.- Pérdidas en reductores y piñones
- 4.- Pérdidas en motores.

De estos puntos el que mayor potencia requiere es la deformación del material, ésta se puede calcular por medio del par en los rodillos, para esto se considera a la carga de laminación concentrada en un punto a una distancia  $x$  de la línea entre centros.



El par es producto de la fuerza por el brazo de palanca:

$$M = Fx$$

Pero como se tiene el mismo par en los dos rodillos el par total será:

$$M_t = 2Fx$$

Para determinar x se define:

$$\lambda = \frac{x}{L_p}$$

y

$$\lambda = 0.5 \left( \frac{R}{R'} \right)^{1/2} - (0.5 - \lambda') \left( \frac{R'}{R} \right)^{1/2}$$

$\lambda = 0.5$  para laminación en caliente

Donde:

$\lambda'$  se encuentra en tablas.

Ford y Alexander desarrollaron un expresión empírica para determinar el par:

$$M_T = \sqrt{h} \, b m L_p^2 \left( 1.6 + 0.91 \frac{L_p}{h_1 + h_2} \right)$$

La potencia requerida puede ser evaluada, como el producto del par por la velocidad angular.

$$\dot{W} = \frac{M_T \pi N}{60}$$

## II.7 TECNICAS MODERNAS PARA EL CALCULO DE PARAMETROS

Actualmente el empleo de las computadoras ha tomado una gran importancia como herramientas auxiliares en un gran campo de la ingeniería.

En el ramo de la laminación se aplica la computación en el cálculo de parámetros físicos (potencia, cargas, etc.) únicamente como un auxiliar para facilitar la solución de las ecuaciones diferenciales ya propuestas, puesto que el uso de la computadora no nos brinda nuevas alternativas de solución.

Pero existe otra aplicación de gran importancia, esta es en el estudio de las deformaciones a nivel microestructural utilizando para ello métodos desarrollados básicamente para ser resueltos mediante la computadora como es el caso del método del elemento finito.

### III LAMINACION DE VARILLA CORRUGADA

La varilla corrugada es uno de los productos de laminación más ampliamente producido, conocido y utilizado, y se define como:

**VARILLA CORRUGADA:** es una barra de acero que ha sido fabricada especialmente para ser utilizada como refuerzo de concreto, su superficie esta dotada de rebordes o salientes llamados corrugaciones, los cuales inhiben el movimiento longitudinal relativo entre la varilla y el concreto que las rodea.

Aquellas varillas desprovistas de corrugaciones o que teniendo no cumplan con las especificaciones, se clasifican dentro del grupo de varillas lisas.

Debido a que la función de las varillas corrugadas es brindar resistencia a la tracción al concreto, estas se clasificarán de acuerdo a su límite de fluencia a la tracción, existiendo tres divisiones principalmente (grados):

Grado	Límite de fluencia	
	Kgf/mm <sup>2</sup>	N/mm <sup>2</sup>
30	30	294
42	42	412
52	52	510

Algunos fabricantes producen varilla grado 62, no siendo

este grado de uso generalizado. Las varillas de grado 62 se obtienen a partir de varillas grado 42 o 52 a las cuales se les practica un cierto trabajo en frío (generalmente torcido).

## PRODUCCION

Las varillas se producen por laminado de lingote o palanquilla los cuales deben de ser obtenidos por proceso de: horno de hogar abierto, básico al oxígeno u horno eléctrico o bien por una combinación de ellos.

En México la mayor parte de la varilla se produce a partir de palanquillas provenientes de horno eléctrico.

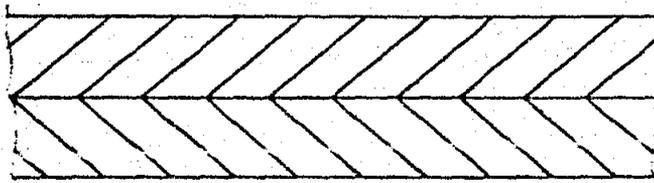
En el análisis químico de la colada de dicho lingote, los niveles de fósforo y azufre deben ser menores al 0.05 %, debido a que dichos elementos disminuyen la tenacidad del material.

El acero que suele ser utilizado para la elaboración de las varillas según su grado es:

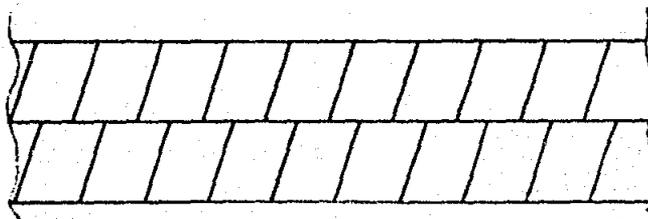
GRADO	AISI
30	1018
42	1040
52	1050-1060

Pudiéndose utilizar acero de distinta norma dependiendo del tipo de enfriamiento que sufra la varilla.

Las corrugaciones en la varilla deberán estar dispuestas de tal forma que formen un ángulo no menor a  $45^\circ$  con el eje longitudinal de la varilla. Cuando dicho ángulo este comprendido entre los  $45$  y  $70^\circ$  las corrugaciones deberán alternar su dirección en las dos mitades de la varilla.



Cuando dichas corrugaciones formen un ángulo mayor a  $70^\circ$  con respecto al eje de la varilla, no será necesario alternar sus direcciones.



Los números de designación, masas y dimensiones nominales y los requisitos de corrugación de las varillas para refuerzo de concreto se muestran en la tabla 1.

Es importante hacer notar que el diámetro nominal esta basado en el peso por longitud de varilla, razón por la cual el diámetro real de una varilla corrugada es ligeramente menor que el diámetro nominal en el cual se clasifica.

Tabla 1.- Número de designación, masas y dimensiones nominales y requisitos de corrugación para las varillas de refuerzo de concreto (a).

Número de designación (b)	Masa nominal en Kg/m.	Dimensiones nominales (a)			Requisitos de corrugación		
		Diámetro, en mm.	Área de la sección transversal, en mm <sup>2</sup>	Perímetro, en mm.	Espaciamiento máximo, promedio, en mm.	Altura mínima promedio, en mm.	Distancia máxima entre extremos de corrugaciones transversales (cuerda) en mm.
2	0.248	6.4	32	20.0	4.5	0.2	2.5
2.5	0.384	7.9	49	24.8	5.6	0.3	3.1
3	0.560	9.5	71	29.8	6.7	0.4	3.7
4	0.994	12.7	127	30.9	8.9	0.5	5.0
5	1.552	15.2	198	50.0	11.1	0.7	6.3
6	2.235	19.0	285	60.0	13.3	1.0	7.5
7	3.042	22.2	388	69.07	15.5	1.1	8.7
8	3.973	25.4	507	79.8	17.8	1.3	10.0
9	5.033	28.6	642	89.8	20.0	1.4	11.2
10	6.225	31.8	794	99.9	22.3	1.6	12.5
11	7.503	34.9	957	109.8	24.4	1.7	13.7
12	8.938	38.1	1140	119.7	26.7	1.9	15.0

- a) El diámetro nominal de una varilla corrugada es equivalente al diámetro de una varilla lisa que tenga la misma masa nominal que la varilla corrugada.
- b) El número de designación de las varillas corrugadas corresponde al número de octavos de pulgada de su diámetro nominal.

### III.1 PRINCIPALES REQUISITOS MECANICOS

#### RESISTENCIA A LA TRACCION.

Se requiere que el material cumpla con los siguientes requisitos:

	GRADO 30	GRADO 42	GRADO 52
Resistencia a la tracción mínima en N/mm (kgf/mm )	490 (50)	617 (63)	686 (70)
Límite de fluencia mínimo en N/mm (kgf/mm )	294 (30)	412 (42)	510 (52)
Alargamiento en 200 mm. mínimo en % Varilla número :			
2, 2.5 y 3	11	9	8
4, 5 y 6	12	9	8
7	11	8	7
8	10	8	7
9	9	7	7
10	8	7	7
11 y 12	7	7	5

#### DOBLADO.

Las muestras deberán soportar el doblado a 180°, sin presentar agrietamiento en la parte exterior de la zona doblada, alrededor de un mandril de diámetro "d" los cuales deberán cumplir con la siguiente especificación:

Designación	Diámetro del mandril para doblado		
	Doblez a 3.14 rad. ( 180° )		
	GRADO 30	GRADO 42	GRADO 52
2, 2.5, 3, 4 y 5	$d = 4t$	$d = 4t$	$d = 5t$
6	$d = 5t$	$d = 5t$	$d = 6t$
7 y 8	$d = 5t$	$d = 6t$	$d = 7t$
9, 10, 11 y 12	$d = 5t$	$d = 8t$	$d = 8t$

t = diámetro de la varilla

Dicha prueba será practicada a temperatura ambiente y nunca a menos de 16 °C.

### III.2 PRODUCTORES

A continuación se citan los productores de varilla a nivel nacional indicando el grado y número de designación (\*) de la varilla que producen.

PRODUCTOR	GRADOS	NUMERO DE DESIGNACION
Aceros Ahuehuetes	42	2.5, 3
Aceros de Chiapas	42	
Aceros de Fortín	42	
Aceros de Hidalgo	30,42	
Aceros de Jalisco	60	
Aceros del Fuerte	42	
Aceros Ecatepec	42,62	3, 4, 5, 6, 8, 10, 12
Aceros Hidalgo de Pachuca	42	
Aceros Industriales	42	3,4
Aceros Palma	42	
Aceros San Luis	30,42,52	
Aceros Valuarte	30	2.5,3,4
Altos Hornos de México	30,42	
Barras y Perfiles	42	2.5,3,4,5,6,8,10,12,
Cia. Siderúrgica de Guadalajara	30,42	
Corrugados y Perfiles Comerciales	30,42	3,4,5,6,8

(\*) El número de designación corresponde al número de octavos del diámetro nominal de la varilla.

PRODUCTOR	GRADOS	NUMERO DE DESIGNACION
EBLA Talleres Industrial	42	
Fundición Fierro-Mex	42	
Fundiciones de Hierro y Acero	30	3
Fundidora Monterrey	42	
Hierro y Acero Industrializado	30,42	
HYLSA	42	
Industria de Transformación Siderúrgica	42	
Internacional de Aceros	42	2,5,3,4,5,6,8,10,12
Jesús Galarza Vázquez y Copropietario	42	
Laminadora Azcapotzalco	30,42	2,5,3,4,5,6,8
Laminadora Cervera	30	
Laminadora Oriental	30,42	3
Laminadora Satélite	30	3,4
Laminadora Valdez	42	3,4
Laminados y Troquelados Monterrey	30,42	
Manufacturas Industriales Tepetzotlán	30,42	
Metales Peninsulares	30,42	
Metalúrgica Veracruzana	42	
Omega Manufacturera	42	2,5,3,4,5
Pacas de Metal y Lamina-ción	30,42	
Perfiles de México	42	
Perfiles y Varilla	30	
Siderúrgica de Yucatán	30,42	

PRODUCTOR	GRADOS	NUMERO DE DESIGNACION
Siderúrgica Lázaro Cárdenas- Las Truchas	42	
Siderúrgica Potosina	30,42	
Talleres Garcet	30	
Talleres Preciado	42	
Transformadora de Aceros	30,42	3,4,5,6,8

### III.3 ANALISIS ECONOMICO

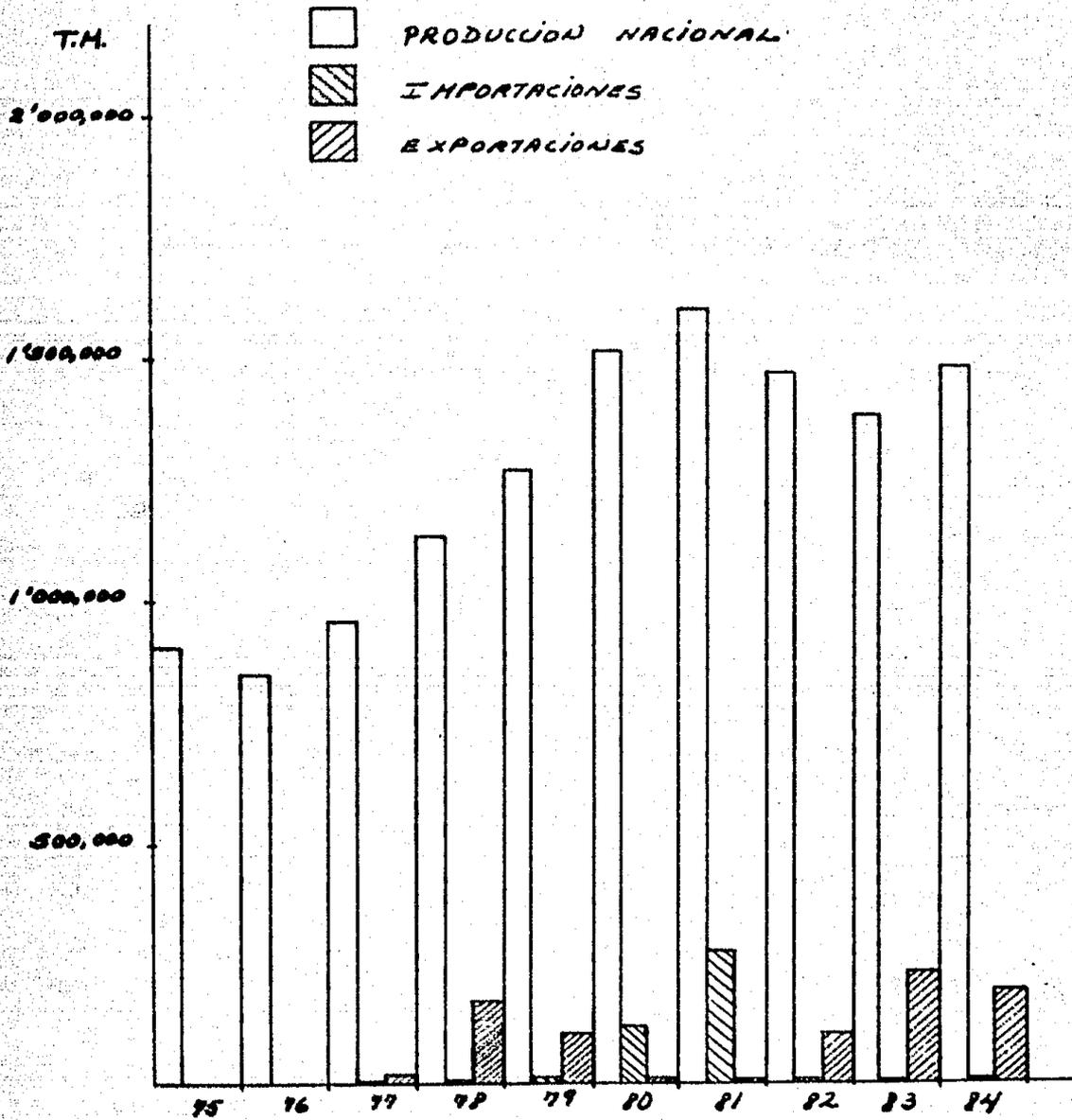
Uno de los indicadores básicos de la economía de un país, como es bien sabido, es la producción y el consumo de acero, esto esta fundado en el hecho de que:

1.- La planta productiva necesita tanto de maquinaria nueva como de mantenimiento para la ya existente, a una nación con mayor industrialización corresponde un mejor ámbito económico.

2.- La industria de la construcción requiere necesariamente de la varilla corrugada como refuerzo para el concreto, el cual es necesario para la edificación de una buena infraestructura, y a su vez se puedan lograr avances económicos y sociales al contar con mejores comunicaciones, mayores fuentes energéticas aprovechables, un mayor número de viviendas, etc.

Refiriéndonos a los valores de producción, importaciones y exportaciones de varilla corrugada (cuadro 1), y el momento político-económico que comprende un lapso de 10 años (1975 a 1984) podemos observar que:

a) Debido a la situación existente al fin del sexenio 70-76 y a la devaluación de 1976, la producción se ve disminuida. En el periodo 76-81 se impulsa fuertemente a la industria y se tiene un aumento notable en la producción de varilla, en 1982 se vive un momento crítico en la economía nacional y se reduce sensiblemente la producción, para 1983 la situación económica nacional se ve



todavía afectada por los hechos ocurridos en 1982 y la producción descendiendo todavía más, para el siguiente año se vuelve a obtener un repunte en la producción debido al nuevo impulso dado a la industria.

b) En lo que a importaciones y exportaciones se refiere, se puede ver claramente que el mercado se ve directamente afectado por la relación valor real-valor teórico de una divisa frente a la otra, se puede notar que en los periodos inmediatos anteriores a las devaluaciones, las importaciones son elevadas mientras que las exportaciones son casi nulas, estos papeles se invierten en los periodos posteriores a las devaluaciones.

Las importaciones se ven fuertemente afectadas por la falta de oferta de productos nacionales en las zonas fronterizas, mientras que las exportaciones se incrementan por la escasa demanda de dicho producto en estas zonas.

Un problema grave que se presenta en México es que el gobierno ha invertido demasiado en la instalación de plantas cuyos productos se pueden considerar "baratos" (varilla, perfiles pequeños, etc.) obteniendo alta calidad en la elaboración de estos, olvidándose de la calidad de los otros productos (perfiles grandes, placa, etc.).

#### IV DESCRIPCION DE LOS EQUIPOS AUXILIARES DE UNA PLANTA DE LAMINACION

Para la obtención de varilla, por medio de la laminación, se requiere además de un tren de laminación un cierto equipo auxiliar, parte del cual es indispensable (\*) y otra parte del mismo que puede ser utilizado o no para contar con un proceso más automatizado o simplemente para tener un mejor control de la laminación.

A continuación se describen dichos equipos:

##### HORNO DE PRECALENTAMIENTO.

El objeto de dicho horno es el de calentar las palanquillas hasta una temperatura tal, variable según nuestro arreglo, que nos permita laminar el último pase con una temperatura aún mayor que la temperatura de recristalización del material trabajado, siendo recomendable que ésta se encuentre en un rango comprendido entre 850-900 °C en el paso terminador.

Dichos hornos suelen trabajar en base a quemadores de petróleo, utilizando como combustible petróleo crudo, combustóleo o gas natural. En su operación se requiere de la generación de una presión positiva en el interior para evitar la entrada de aire y con esto reducir al mínimo la merma de material debido al descas-

(\*) Como puede ser el horno de precalentamiento o las tijeras de despunte y descole.

carillado producido por el óxido, con el mismo fin se tendrá una combustión pobre en oxígeno.

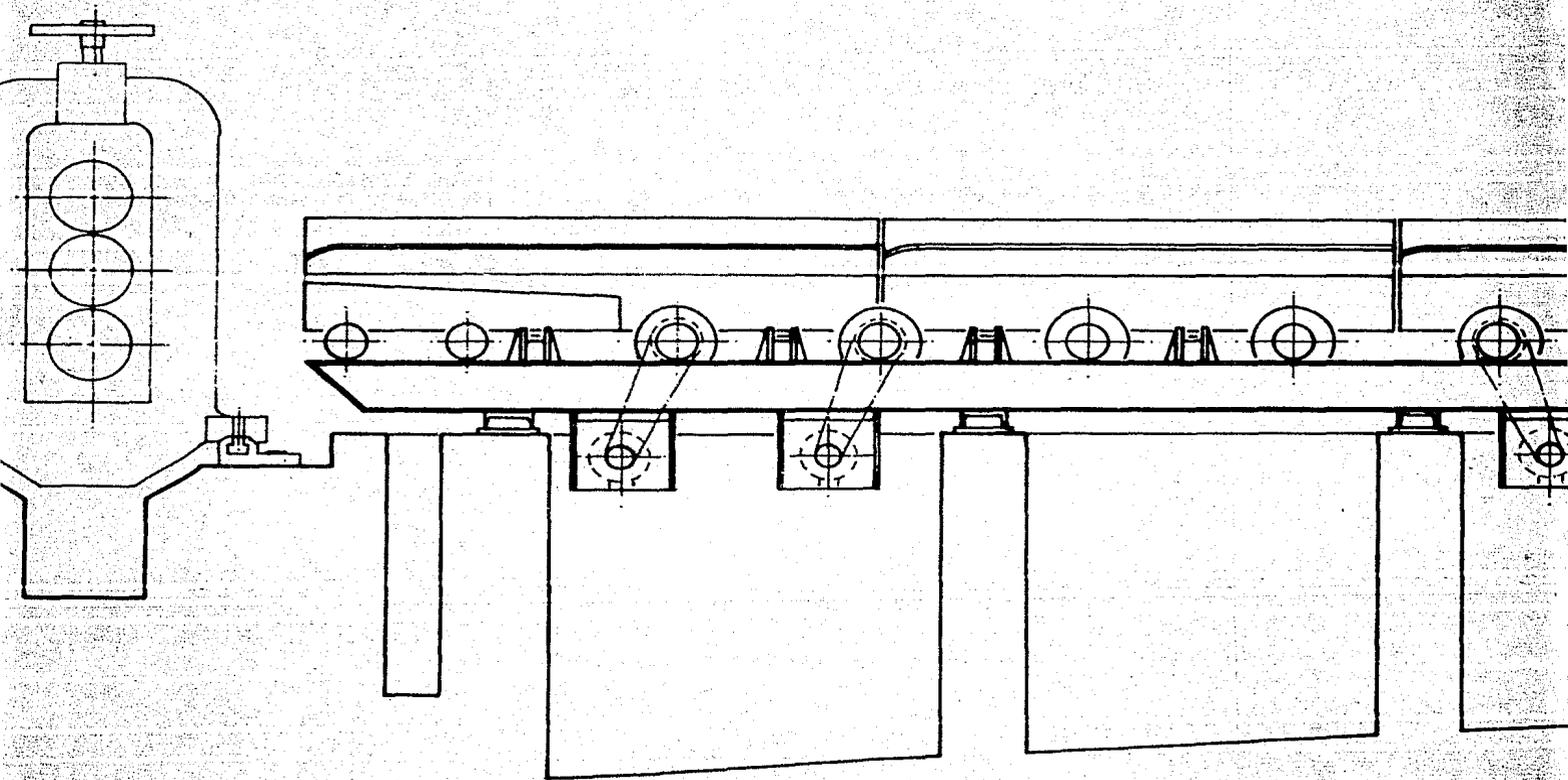
El avance de las palanquillas en el horno se logra por medio del empuje de un cilindro hidráulico, y la extracción de las mismas puede ser por medio manual o por medio de otro cilindro hidráulico dependiendo del grado de automatización que se desee.

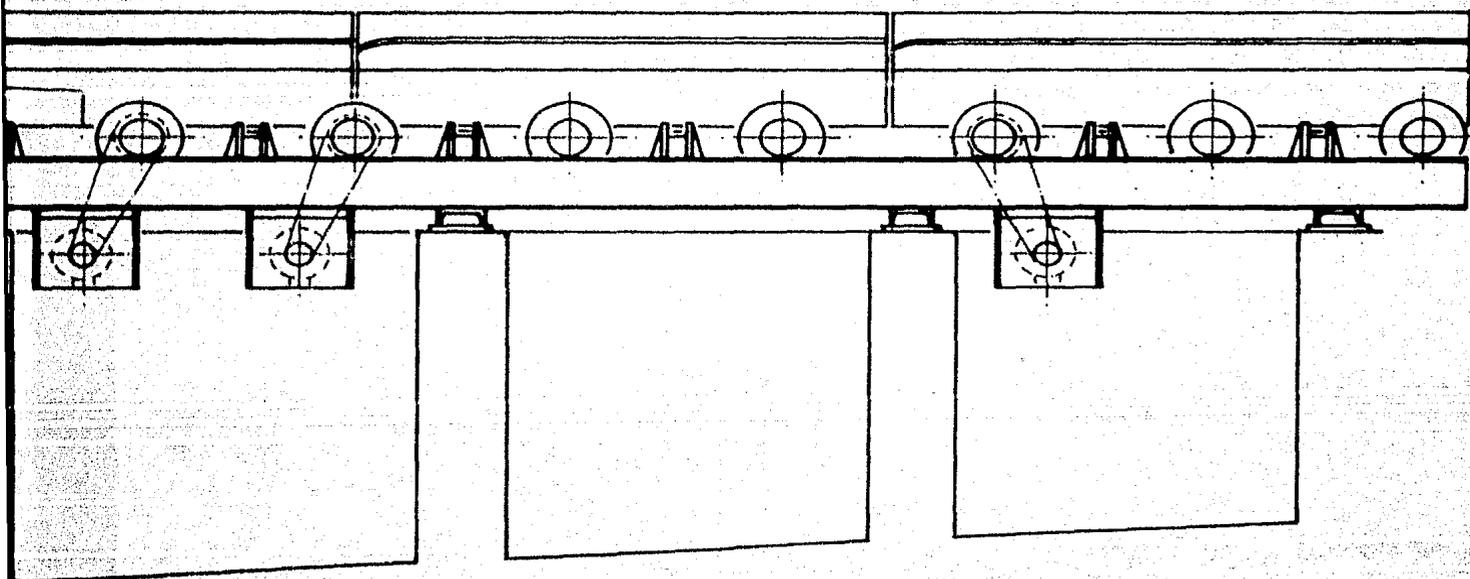
#### MESAS FIJAS Y BASCULANTES.

En el desbaste se tiene un tren trio, en el cual se requiere introducir el material tanto en la ranura superior como en la inferior, para la automatización de este proceso se utilizan las mesas fijas y basculantes, ambos tipos funcionan de manera semejante, cuentan con una serie de acanaladuras o guías especialmente diseñadas para recibir el material de la ranura deseada y posteriormente introducirlo en la ranura indicada. Para dicho fin se cuenta con una serie de rodillos motrices en la parte inferior. Debido a sus características "fija" y "basculante" cada mesa tiene distinta aplicación:

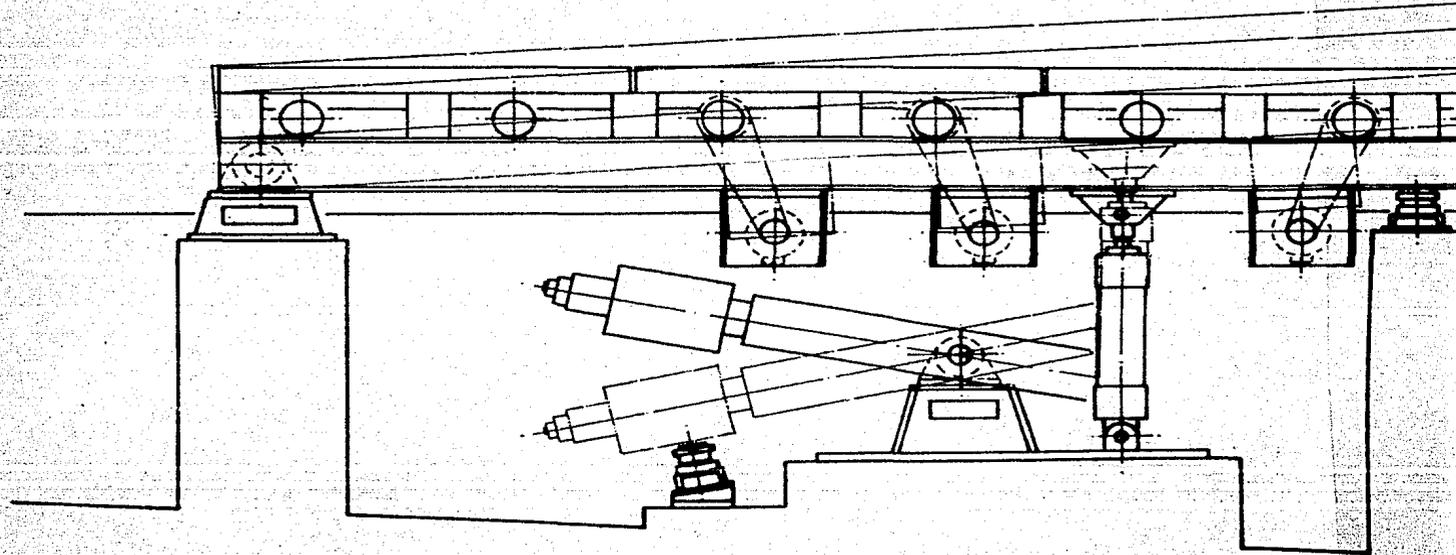
Las mesas fijas son utilizadas en el lado que se requiere mover el material hacia las ranuras inferiores.

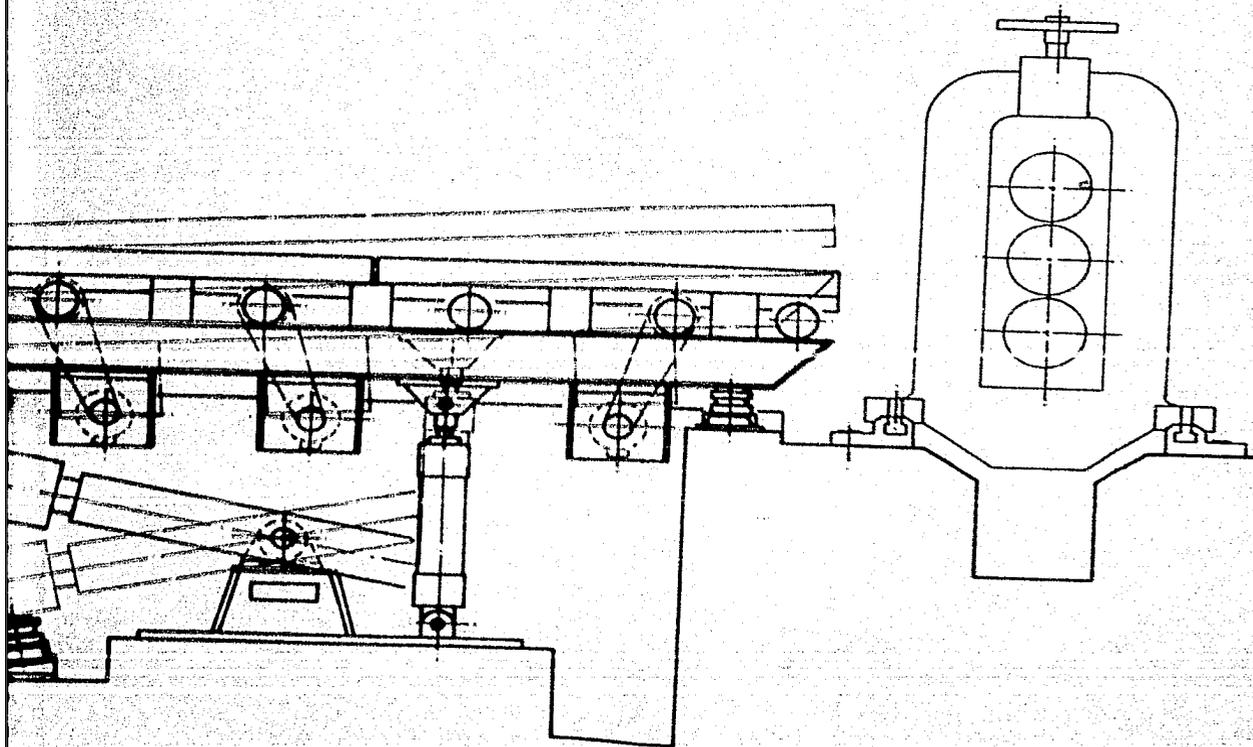
Las mesas basculantes son así llamadas pues reciben el material de las ranuras inferiores y basculan para poder guiar el material a las ranuras superiores.





MESA FIJA





MESA BASCULANTE

## TIJERAS DE DESPUNTE Y DESCOLE.

Este equipo es necesario para evitar problemas de entrada y salida del material en los pases de laminación cuando la punta y la cola no presentan un acabado regular debido a ciertos pliegues ocasionados por la deformación plástica. Con dichas tijeras se logra un perfil recto tanto en la punta como en la cola, lo cual nos reduce al máximo los problemas de entrada al calibre así como posibles atascamientos a la salida del mismo.

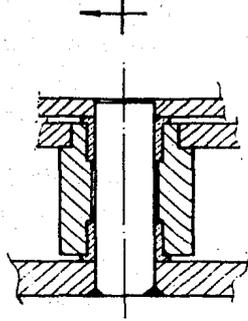
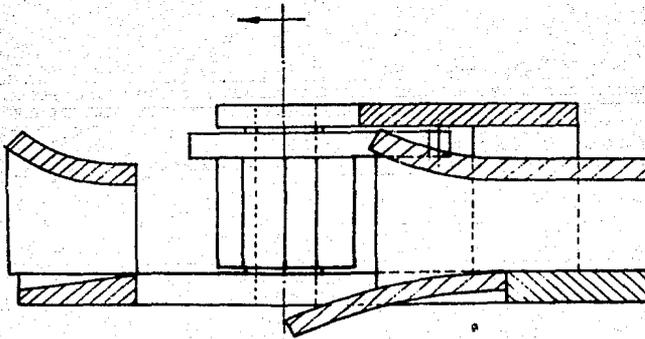
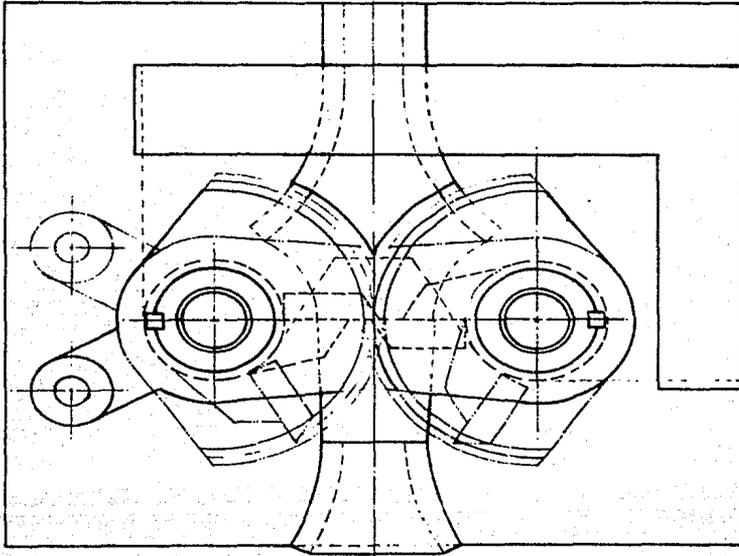
## GUIAS DE ENTRADA Y SALIDA.

El objeto y la disposición de las guías es tal que nos permita dirigir la barra en la entrada y la salida de los rodillos de laminación.

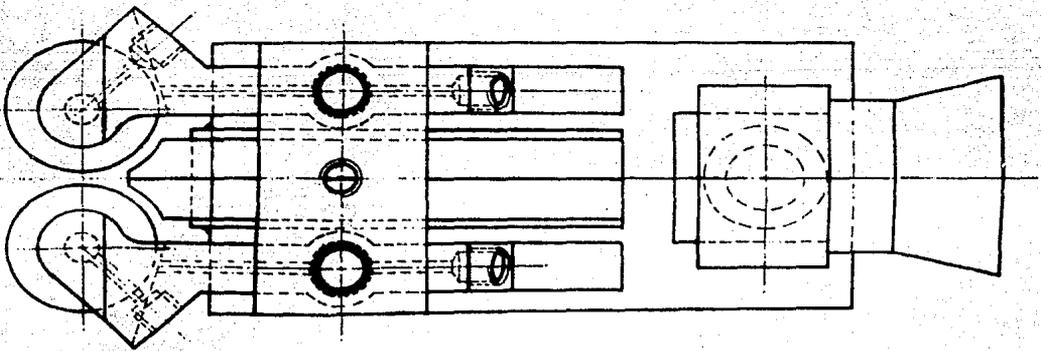
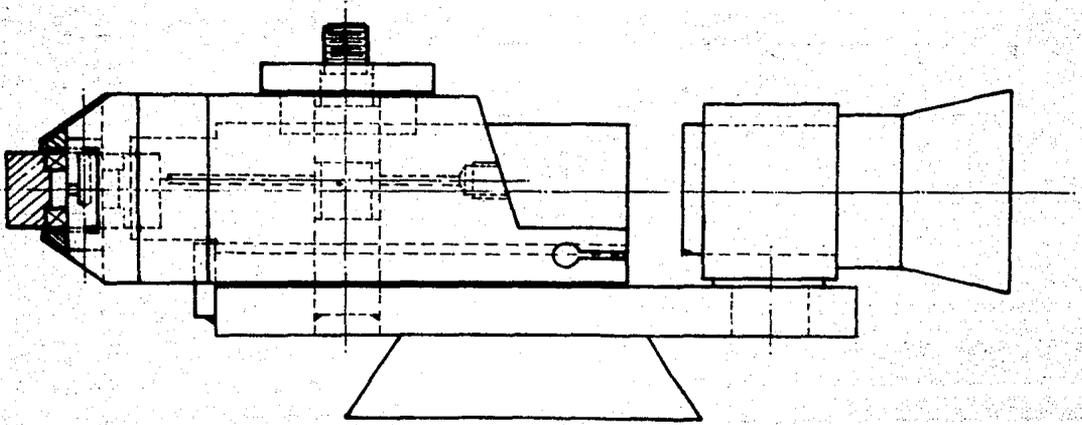
### Guías de entrada.

Dentro de los diferentes diseños se encuentran las guías a base de cuchillas o partidas fabricadas en hierro, y las cajas guías con rodillos, siendo estas últimas las que actualmente tienen mayor empleo por ofrecer las siguientes ventajas:

- I Mejoran la tolerancia del producto
- II Disminuyen la merma
- III Ayudan a mejorar el acabado del producto
- IV Fácil instalación y ajuste.



CORTA COLAS



**GUIA DE ENTRADA  
CON RODILLOS**

Dichas cajas son usadas para guiar secciones simétricas tales como: redondos, óvalos líderes, cuadrados, hexágonos, soleras, etc. Siendo apropiados para todo tipo de molinos.

#### Guías de salida.

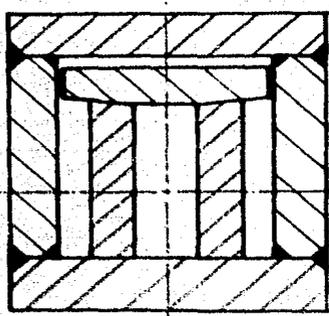
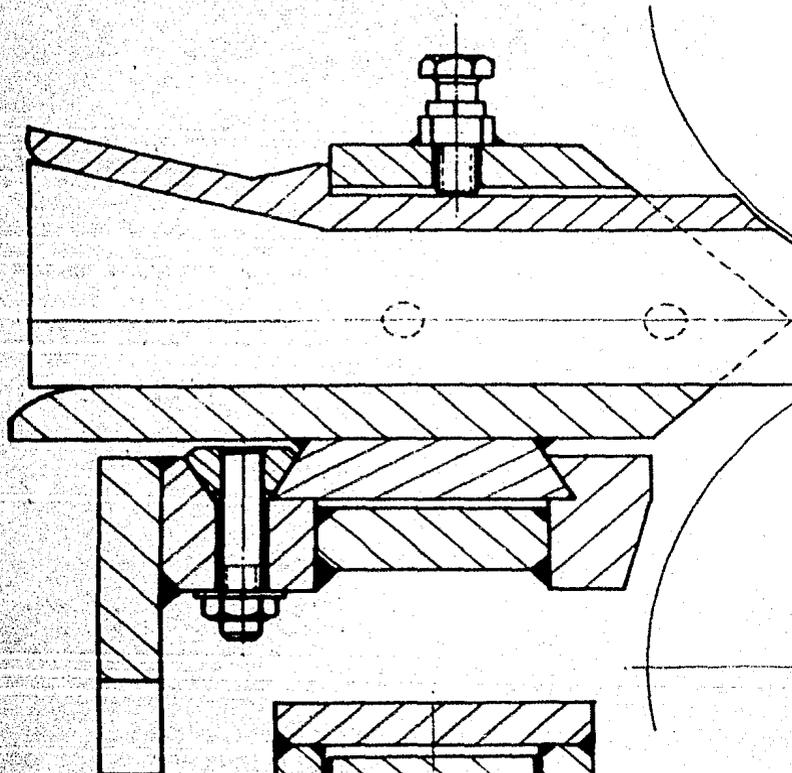
Las guías de salida o cinceles se utilizan para evitar que el producto laminado se enrolle sobre los rodillos de laminación y para guiar al material hacia donde se desee.

Los cinceles se diseñan con el perfil del producto a laminar y van sobrepuestos en la canal del rodillo de laminación y en la barra de apoyo o barrón, cuando se requiere de cinceles superiores estos son mantenidos en contacto con el rodillo superior mediante contrapesos.

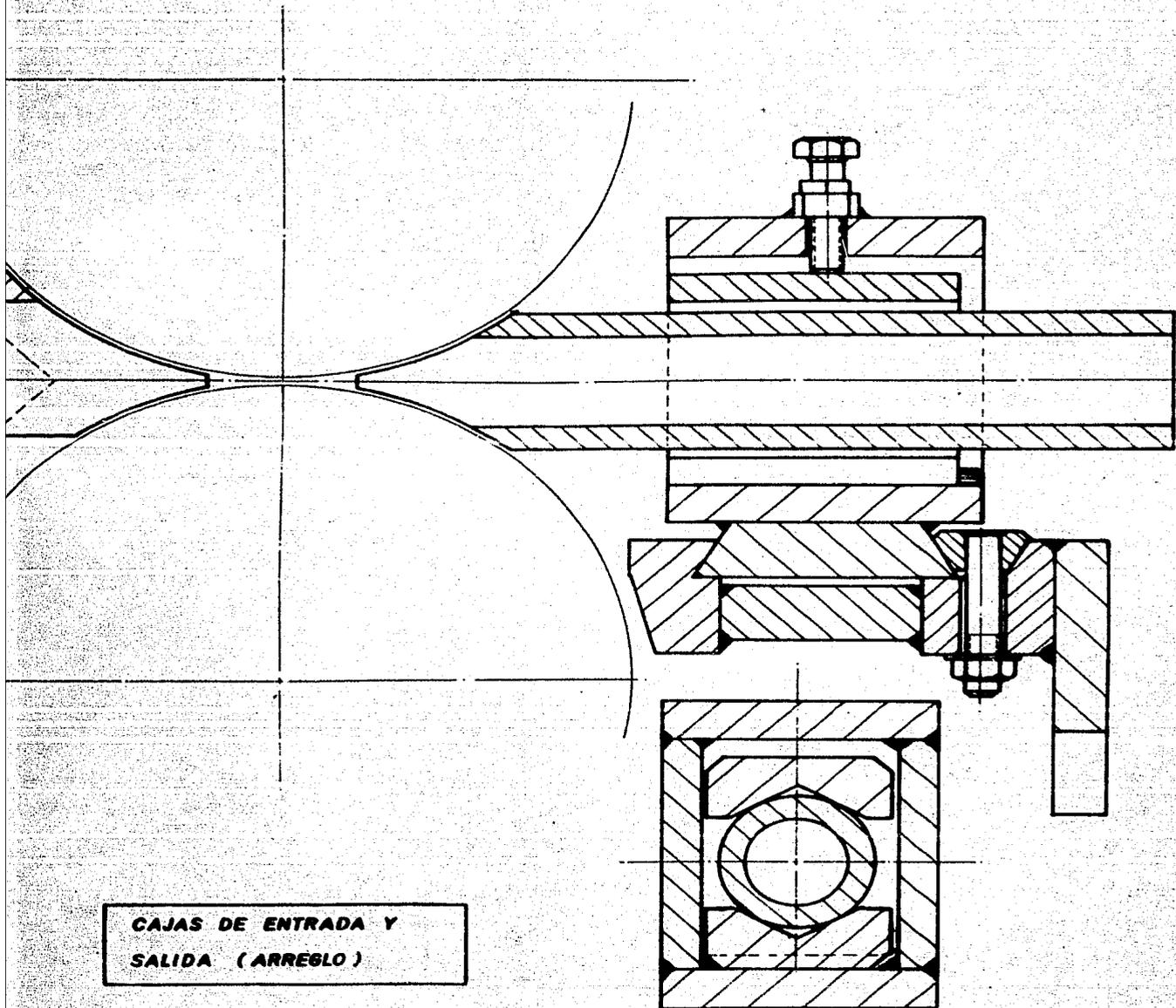
#### REPETIDORES.

Los repetidores son utilizados para cambiar 180° el sentido del material laminado cuando sale de un canal y lo introduce en el siguiente, se utilizan para materiales ligeros (cuadrados, soleras, óvalos, ángulos) cuando se cuenta con trenes desplegados y se lamina con formación de lazo.

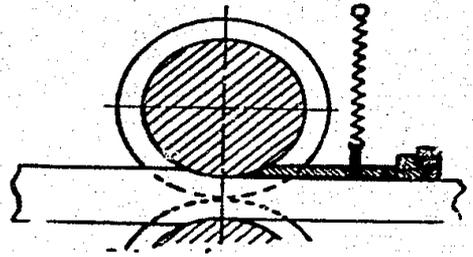
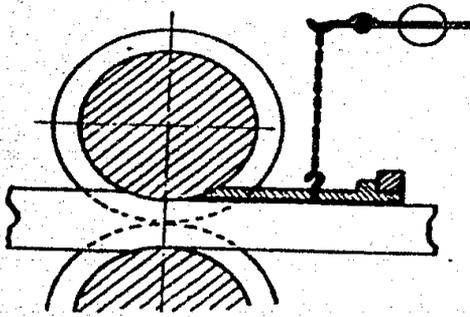
Existen diversas formas de repetidores, pero en todos los casos se toma en cuenta el aumento del tamaño del lazo, debido a la diferencia de velocidades entre salida y entrada en un cambio



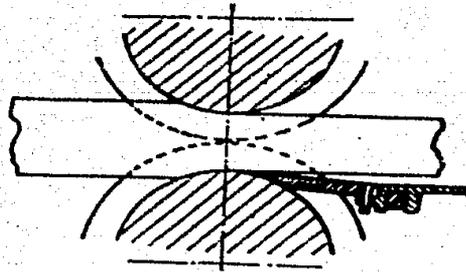
CAJAS DE ENTRADA Y SALIDA (ARREGLO)



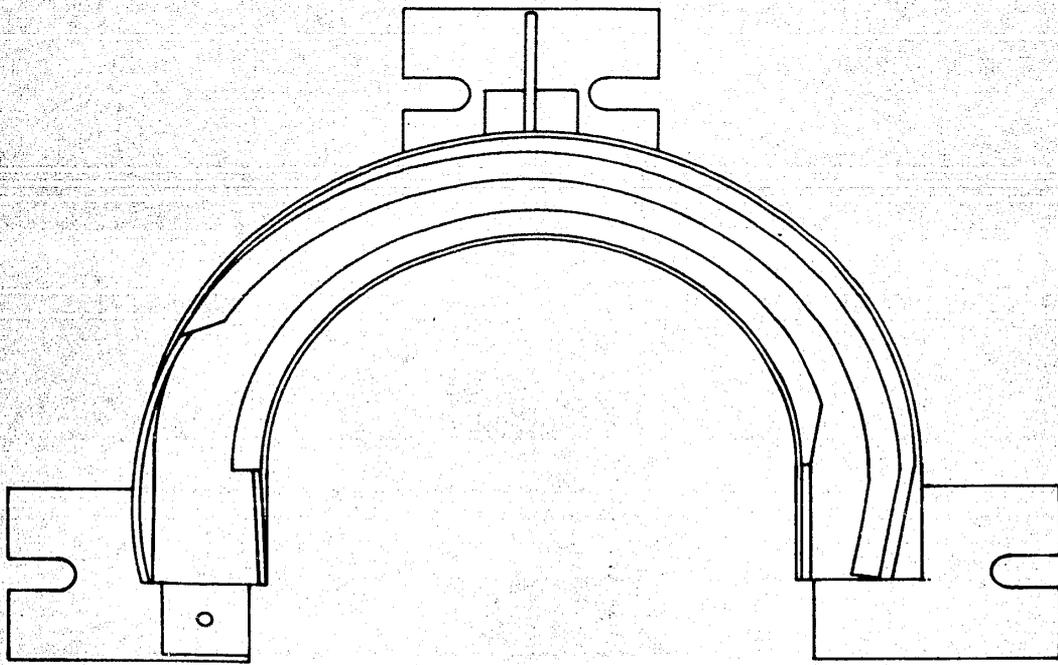
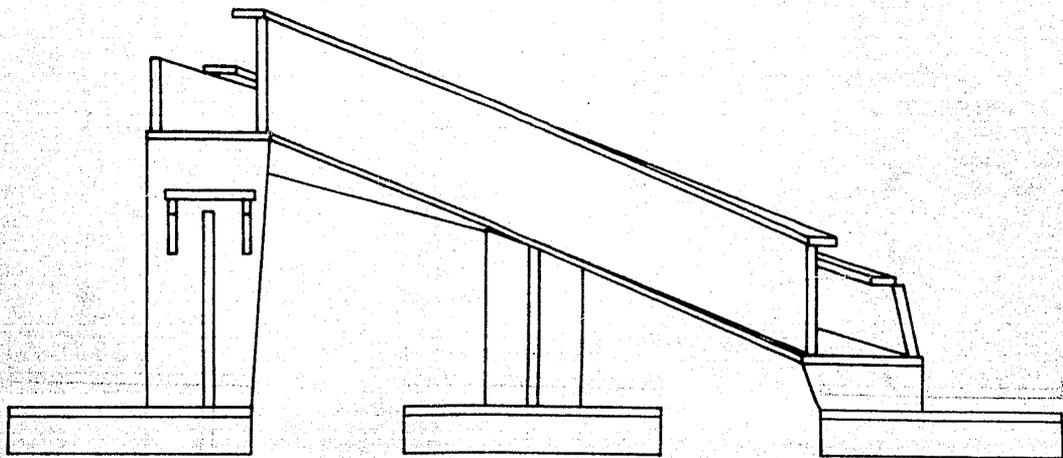
**CAJAS DE ENTRADA Y SALIDA (ARREGLO)**



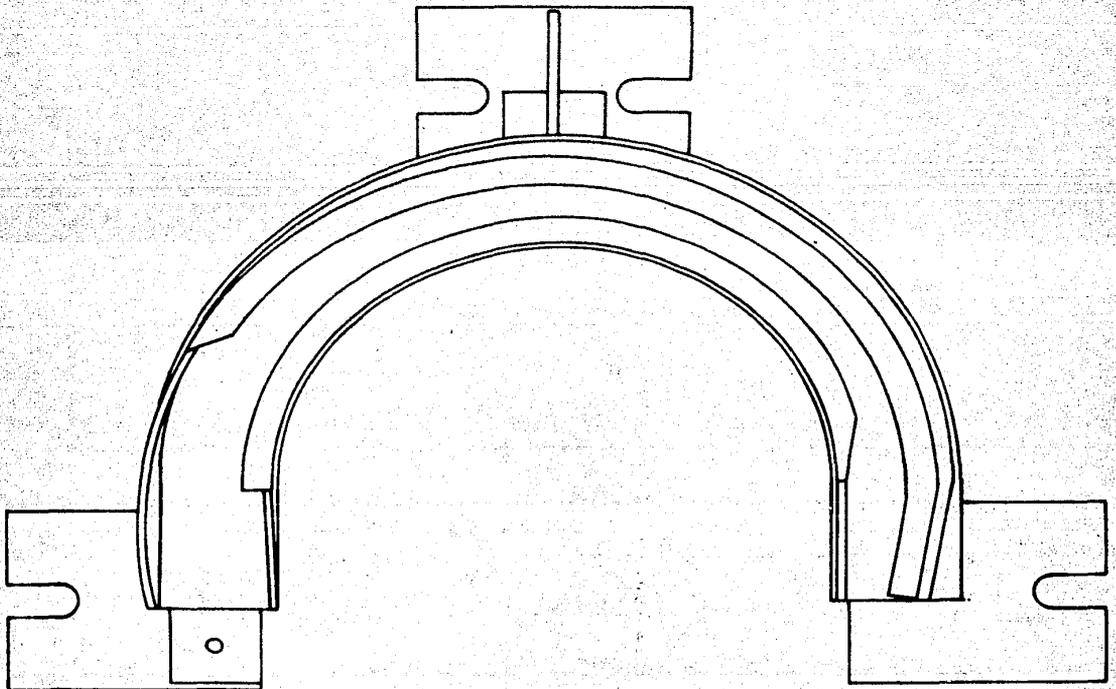
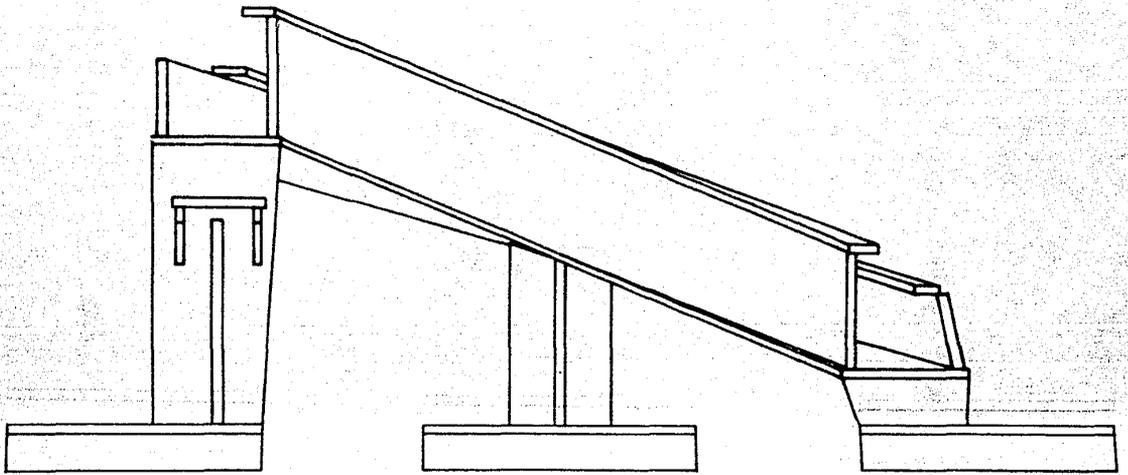
*Cincales Superiores*



*Cinca Inferior*



**REPETIDOR ABIERTO**



**REPETIDOR ABIERTO**

de pases.

Dependiendo del perfil que se desee repetir podrán utilizarse repetidores abiertos o cerrados.

Los repetidores abiertos son simplemente una guía semicircular, sin tapa, la cual dirige al material al siguiente canal de laminación, al crecer el lazo el material sale solo del repetidor.

Los repetidores cerrados tienen la tapa y la pared exterior incorporados en una unidad, la cual puede ser levantada cuando el material entra en la canal de laminación para así permitir el crecimiento del lazo, este mecanismo de apertura suele ser accionado por cilindros neumáticos y requiere de un sistema de control para su operación.

#### ARRASTRADORES.

En muchas ocasiones se requiere transportar el material de un punto de la planta a otro a la mitad del proceso (p. ej. del tren de desbaste al tren de laminación), en estos casos se utilizan los arrastradores.

Un arrastrador consiste en un rodillo matriz el cual presiona al material contra un rodillo loco, con esto impulsa al material por las guías dispuestas para el transporte de este.

## TIJERAS DE EMERGENCIA

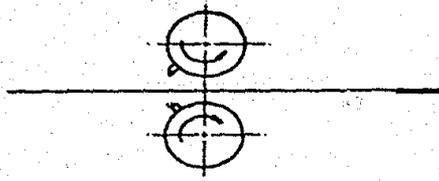
Tienen como finalidad brindar mayor seguridad al personal y/o facilitar la reparación de una falla producida cuando, por algún motivo, el material impulsado por los rodillos de laminación no pasa por alguna guía y se forman lazos y bucles en el material. Dichas tijeras cortan el material cerca de la entrada a los rodillos disminuyendo con esto el peligro y la cantidad de material atascado.

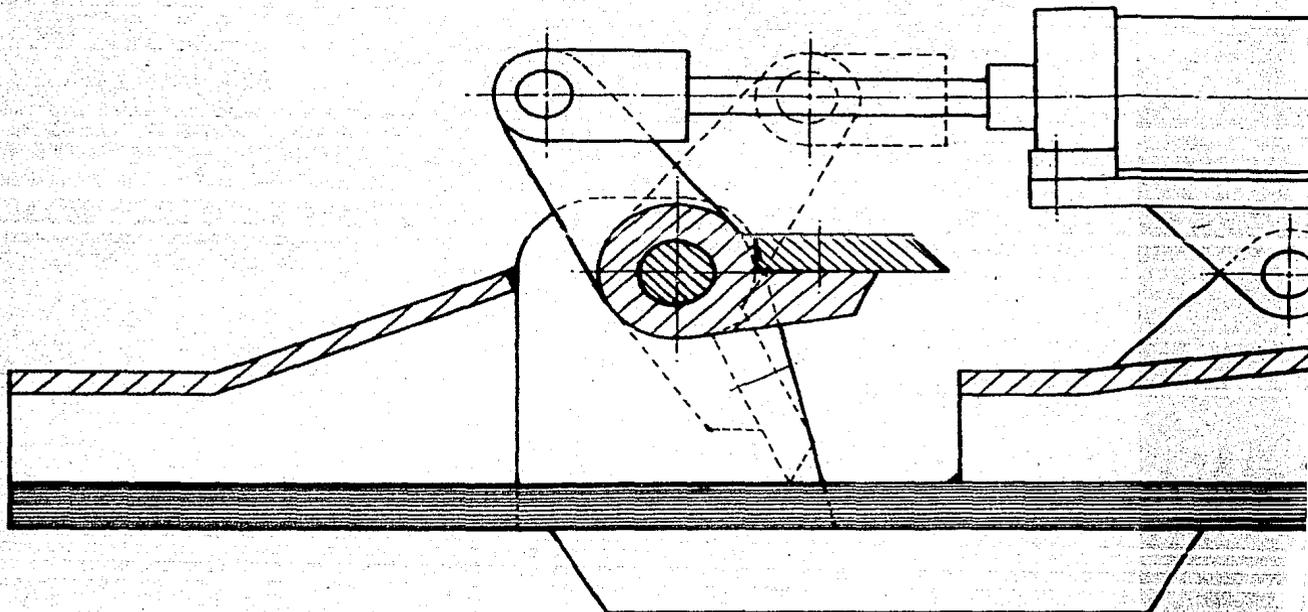
## TIJERAS DE CORTE A MEDIDA

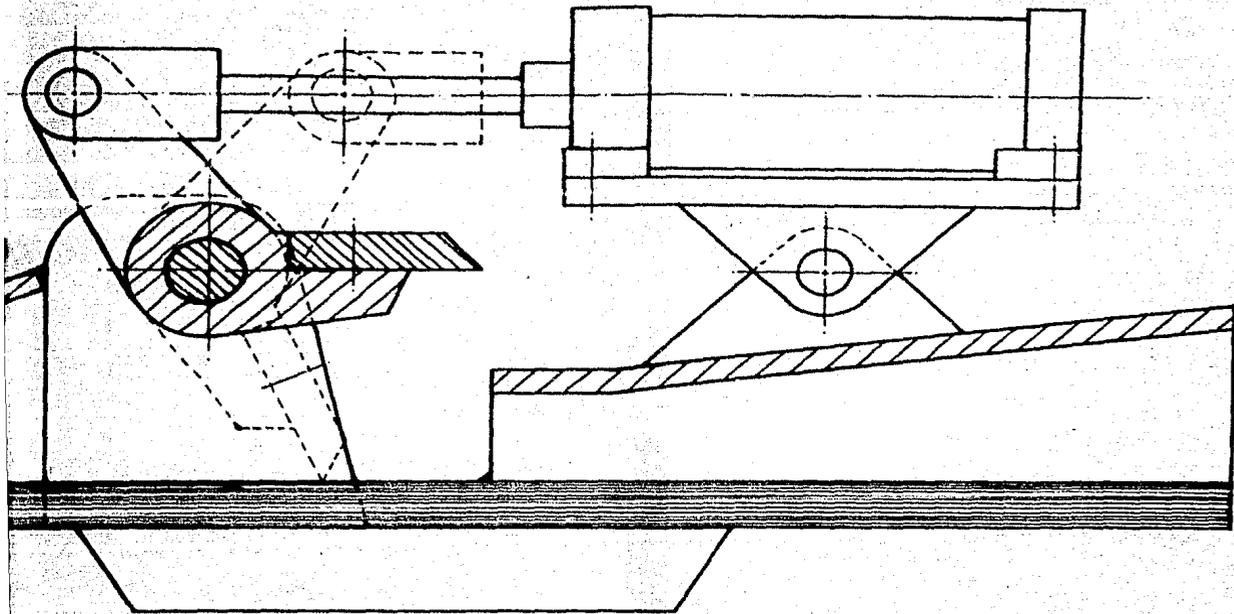
Estas tijeras se utilizan después del paso acabador, estas son las que, como su nombre lo indica, cortan el material a la medida deseada. Son utilizados para materiales de tamaños pequeños y medianos.

Dichas tijeras constan de dos cuchillas montadas sobre unos rodillos (dispuestas paralelas al eje de giro de estos), dichos rodillos giran con una velocidad periférica igual a la velocidad del material a cortar.

Por medio de un mecanismo el material es introducido entre los rodillos y las cuchillas lo cortan.





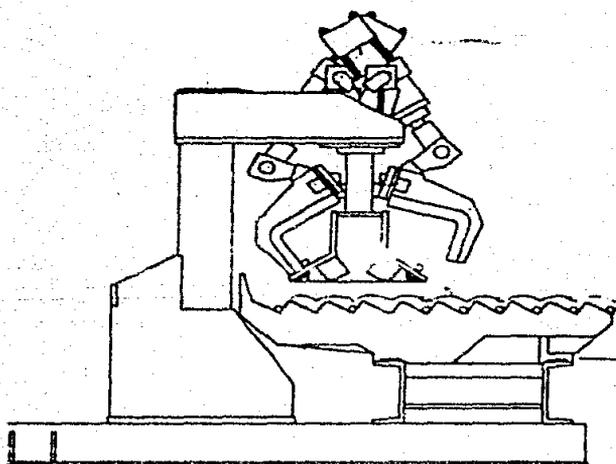


**TIJERA DE EMERGENCIA**

Para el corte a medida de materiales pesados se utilizan sierras circulares.

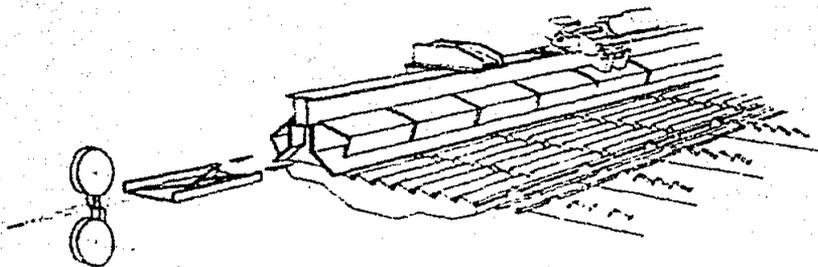
#### CANALETA DOBLE.

Es una guía separada en dos secciones, con la finalidad de que una barra circule por una sección y la siguiente barra por la otra alternativamente, esto se hace con el fin de facilitar el trabajo cuando se tienen velocidades de laminación muy altas y el espacio entre barras es muy reducido (por ej. a la entrada de una mesa de enfriamiento).



Estas canaletas se colocan después de la tijera volante. Mediante un embudo se guía a la barra a una de las secciones, en el momento en que la barra entra en dicha sección el embudo

cambia para guiar hacia la otra sección manteniendo forzado al material.



Cuando la tijera corta la barra, esta entra en la otra sección repitiendo el mismo procedimiento.

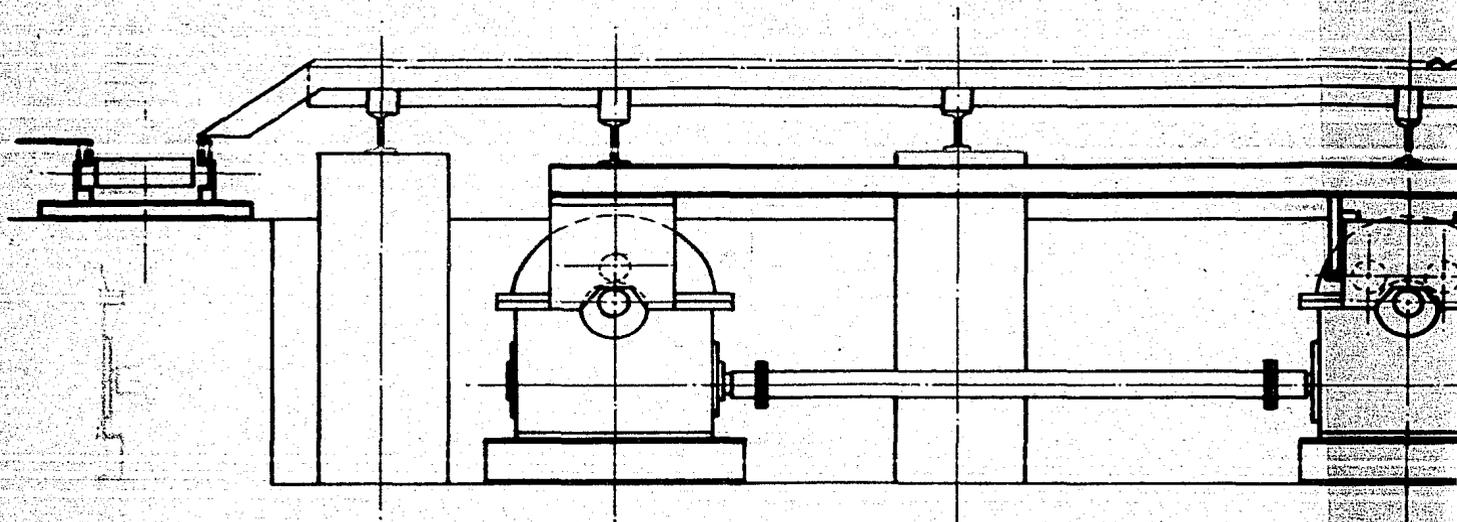
#### FRENACOLAS.

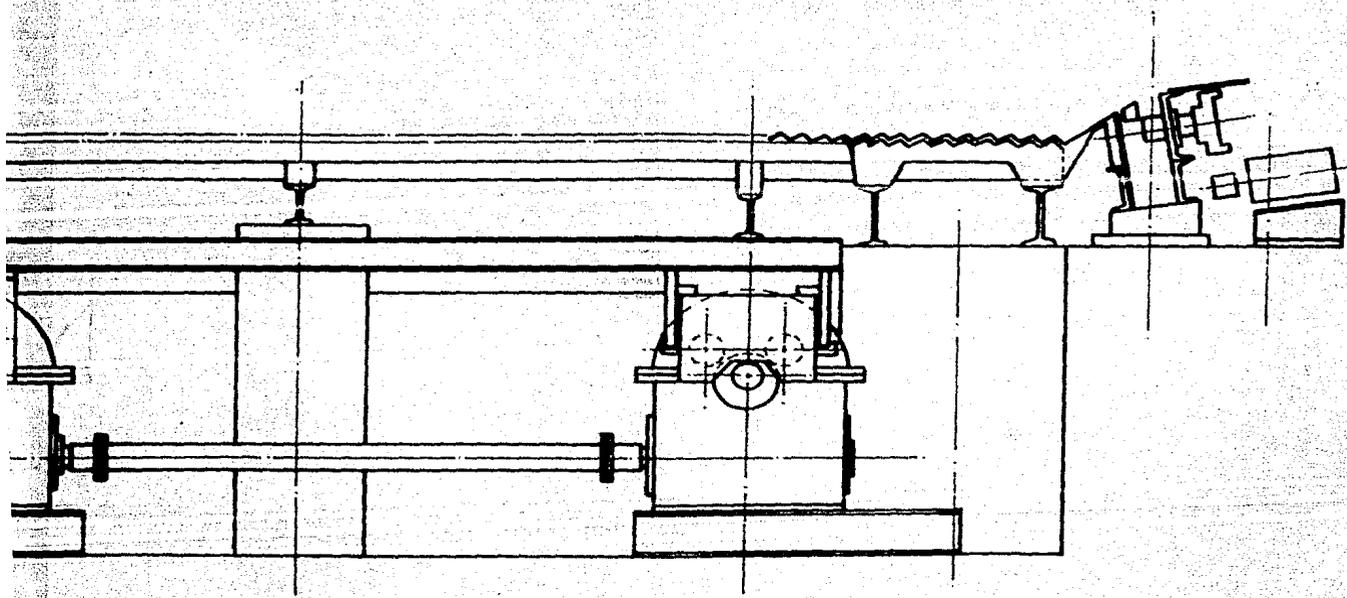
Se utilizan en sitios donde se tienen barras sueltas a gran velocidad y se quiere disminuir esta.

Su funcionamiento es a base de un rodillo loco y un rodillo matriz que gira con velocidad periférica igual a la velocidad lineal requerida, estos rodillos prensan al material y con esto se reduce la velocidad de este. Es necesario que se frene al material de su sección final (razón por la cual recibe su nombre), con objeto de evitar posibles atascamientos del mismo.

#### MESAS DE ENFRIAMIENTO.

Su finalidad es la de brindar al material un enfriamiento





**MESA DE ENFRIAMIENTO**

relativamente lento. Dependiendo del material a enfriar puede haber diferentes tipos de mesas de enfriamiento con funcionamientos distintos, para el caso particular de la varilla se utilizan cartabones dentados y un mecanismo que nos desplaza la varilla de cavidad en cavidad.

#### DOBLADORAS.

En algunas ocasiones se opta por doblar los atados de varilla a la mitad, para hacerlos así más manejables al tener estos una menor longitud. Los equipos para doblar varillas están provistos esencialmente de un empujador y una serie de topes situados de tal forma que nos proporcionan un doblado lo más cerrado posible sin llegar a maltratar la varilla.

V ANTEPROYECTO DE UNA PLANTA DE LAMINACION PARA VARILLA CORRUGADA DE CONSTRUCCION HASTA 1/2" DE DIAMETRO Y CON UNA PRODUCCION DE 15-20 T.M./HR.

V.1 INTRODUCCION

Se plantea la instalación de una planta de laminación para varilla corrugada con una producción de 15-20 T.M./hr, se ha pensado en la producción de varillas en diámetros de 5/16", 3/8", y 1/2" en grado 42 por ser estas las características más comerciales para dicho producto, teniendo en cuenta la posibilidad de laminar, en un futuro, varilla en grados 52 y 60 para lo cual sería necesario partir de palanquillas con un mayor contenido de carbono y, en el caso de producir varilla grado 60, equipo auxiliar para deformación en frío ( torcedora o estiradora ).

Para el diseño de dicha planta se tiene pensada la laminación de la varilla mediante tres trenes de laminación, el primero constituido por un tren trio de desbaste, a continuación un tren trio desplegado, y finalmente dos grupos de dos dños continuos como terminadores.

Se ha pensado en un tren desplegado para la laminación con formación de lazo, sobre la alternativa de la laminación continua, por ser una solución más económica al no requerir de regulación de velocidad entre cada grupo de cajas de laminación, así como no representar un mayor problema por la velocidad de laminación, ya que se requiere, para la producción deseada, una veloci-

dad de laminación baja ( aproximadamente 7 m/s ) para la obtención del producto de 1/2". Por otro lado para la producción de la varilla de 5/16" y 3/8" se requiere de una velocidad de laminación mayor (14 y 16 m/s aproximadamente), lo cual nos dificulta el trabajo en un tren desplegado, por lo tanto se necesitará un tren continuo para dichos diámetros.

Para el desarrollo de el presente proyecto se considerarán las dos condiciones extremas:

a) La opción de una planta de operación eminentemente manual.

b) Una planta con un alto grado de automatización y por lo tanto con el mínimo de personal posible.

( Cabe hacer mención de que estos son los dos casos extremos, y que es posible hacer tantas combinaciones de ellos como se desee ).

La selección de la configuración final de la planta dependerá, pues, de las necesidades y recursos particulares del interesado así como las posibles restricciones legales que le pudieran ser impuestas ( p.ej. número de empleos generados ).

Dentro de las dos opciones que se plantean las diferencias estriban básicamente en el equipo auxiliar que se utiliza, por tal motivo se hará en primer término el desarrollo general de la laminación del producto haciendo mención exclusivamente de este y

sin tomar en cuenta equipos auxiliares.

La laminación de la varilla corrugada de 5/16", 3/8" y 1/2" se realizará a partir de billet de 4" x 4".

## V.2 HORNO DE PRECALENTAMIENTO

Para el proceso deseado es necesario, en principio, calentar el billet a una temperatura de aproximadamente 1200 oC. Para lo cual se requiere de un horno de precalentamiento el cual funciona mediante quemadores de combustóleo, petróleo crudo o gas natural.

El horno deberá de tener capacidad para calentar 25 T.M./Hr. de palanquillas. Para el calentamiento del acero de 20 a 1200 oC se requieren:

$$340,000 \text{ Kcal/T.M.} = 1,423,512 \text{ KJ/T.M.}$$

Por lo tanto se requerirán:

$$35,587,800 \text{ KJ/Hr} = 10 \text{ MW} = 34,120,000 \text{ BTU/Hr}$$

## V.3 TREN DE DESBASTE

El proceso se inicia en el desbaste, en el cual se llevan a cabo grandes porcentajes de reducción en cada pase de laminación, aprovechando que, por ser los primeros pases, el material cuenta

aún con una muy alta temperatura.

Para dicho fin se ha elegido un tren trío con rodillos de 16" de diámetro, en base a que:

- a) No se van a obtener espesores pequeños.
- b) Se desean grandes reducciones y por ello se requieren rodillos robustos.
- c) Es necesario maquinar los rodillos con las ranuras de los perfiles deseados lo cual nos disminuye la sección transversal de estos.

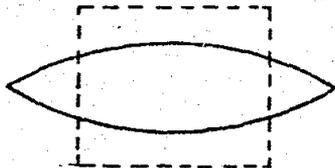
#### V.4 TREN DE LAMINACION

Aquí se efectúa el trabajo sobre el material cuando el espesor y la longitud de este, hacen poco práctico el seguirlo laminando en el tren de desbaste.

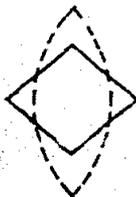
Para la producción de la varilla se requiere seguir una secuencia de cuadrados y óvalos en la laminación, esto se hace con la finalidad de obtener una deformación más homogénea en el material, para poder obtener mayores porcentajes de reducción y bordes con mejor acabado en el producto. Para este fin la forma de introducir el material en las ranuras es la siguiente:

Los cuadrados deberán entrar "planos" en las canales de los

Óvalos.



Los óvalos deberán entrar "parados" en las canales de los cuadrados.



Antes de pensar en la producción deseada, es conveniente hacer el diseño de la calibración de los pases de laminación, pues estos no dependen de manera importante de la velocidad de laminación que, finalmente, es de la que dependerá la producción.

Como en el paso acabador tenemos que entrar con un óvalo y para los diferentes productos deseados necesitamos distintas dimensiones de óvalos, se ha pensado en eliminar pases de laminado para los productos de mayor espesor, 2 para 3/8" y 4 para 1/2".

Es conveniente hacer un diseño de la calibración que nos permita realizar esta maniobra sin cambiar los rodillos de laminación, exceptuando el acabador.

Para el diseño de la calibración se pueden utilizar dos métodos:

1.- Empírico, basado en la experiencia, sabiendo qué porcentaje de reducción se puede obtener en un pase óvalo-cuadrado y en un cuadrado-óvalo y la relación altura-espesor en los óvalos tal que al laminar el material nos "llene" el óvalo y no sobresalga del mismo formando "bigote".



Con base a esto se puede realizar el diseño de la calibración por tanteo.

2.- Teórico, pueden utilizarse los desarrollos teóricos tomando en cuenta ciertas consideraciones para aplicar las fórmulas generales a algún caso en particular.

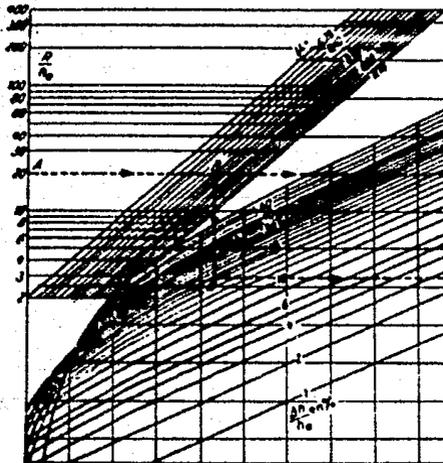
Existen también métodos teóricos que nos permiten comprobar las calibraciones realizadas por métodos experimentales, tal es el caso de la fórmula del ensanchamiento desarrollada por Ekelund.

$$\frac{b_1 - b_0}{2} = 4m \sqrt{r \Delta h} - 2m(h_0 - h_1) \sqrt{r \Delta h} \ln \frac{b_1}{b_0}$$

$$m = \frac{1.6 \sqrt{r \Delta h} - 1.2 \Delta h}{h_0 + h_1}$$

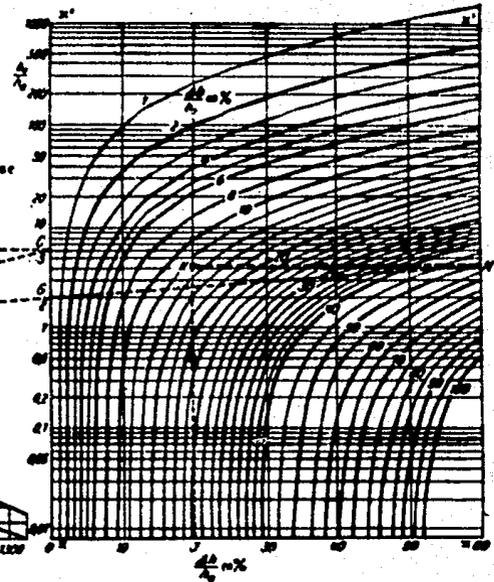
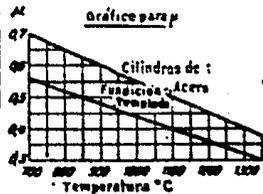
Se tiene  $\frac{a}{b_1}$ ,  $\frac{\Delta b}{b_1}$  y  $\frac{b_2}{b_1}$  se determina  $\mu$  y se obtiene  $\frac{\Delta b}{b_1}$  en %, a continuación  $\Delta b$  y  $b_2 = b_1 + \Delta b$

Ejemplo:  $\frac{a}{b_1} = 20$ ;  $\frac{\Delta b}{b_1} = 20\%$ ;  $\frac{b_2}{b_1} = 2$ ;  $\mu = 0.5$ ;  $\frac{\Delta b}{b_1} = 13\%$  y  $b_2 = 4.13 b_1$



Línea de referencia

Nota: Si H cae por encima de  $\mu$  se  $\frac{\Delta b}{b_1} < 1\%$   
Si H cae por debajo de  $\mu$  se deberá sumar en esta recta.



Nomograma para el cálculo del ensanchamiento según la fórmula de «Klein»

Donde:

$b_0$  = ancho del material antes del paso  
 $b_1$  = ancho del material después del paso (INCOGNITA)  
 $h_0$  = altura del material antes del paso  
 $h_1$  = altura del material después del paso  
 $r$  = radio de trabajo de los rodillos

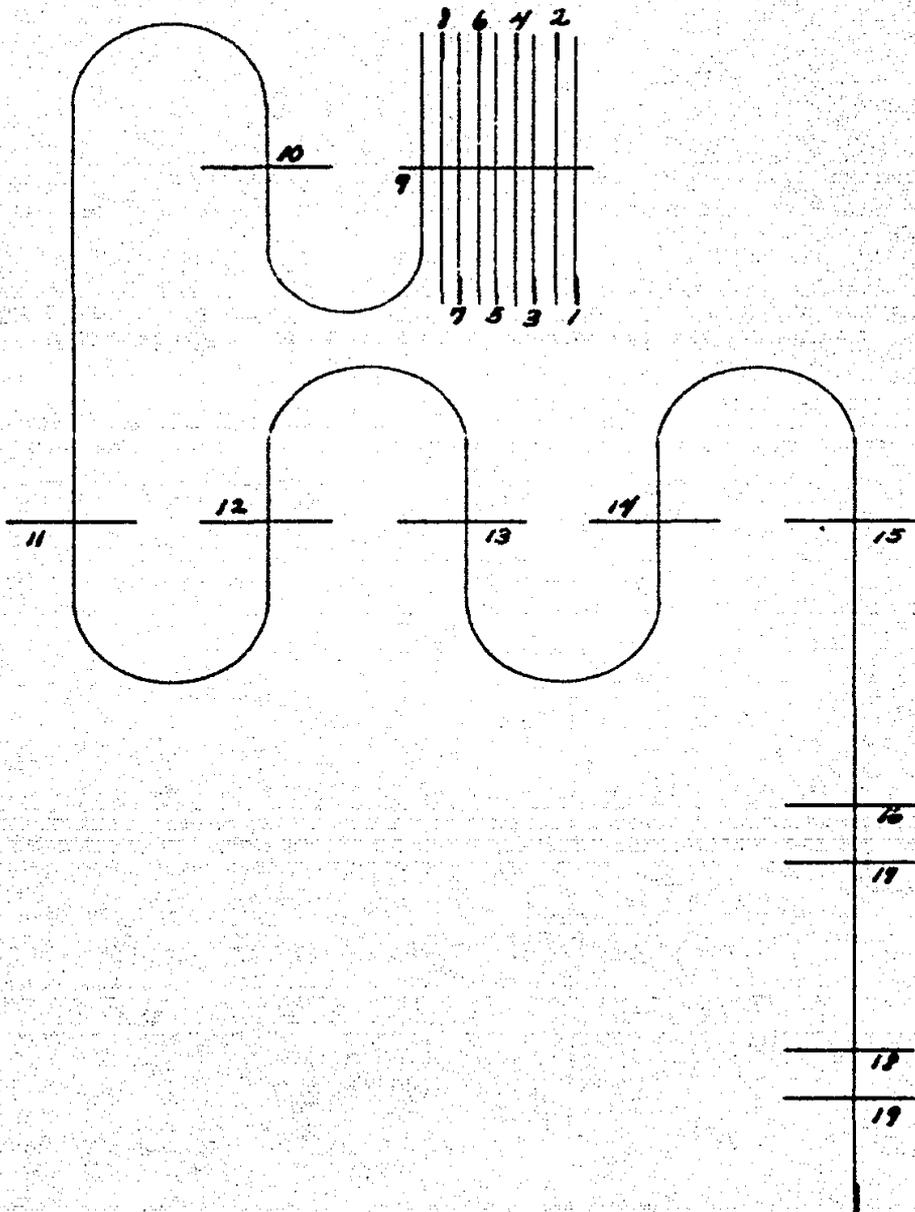
$$r = \frac{D_1 + S_1 - h_1}{2}$$

$D_1$  = diámetro del cuerpo de los rodillos  
 $S_1$  = separación entre los rodillos  
 $\mu$  = coeficiente de fricción entre material y rodillos  
 $\frac{\mu}{\mu}$  = (1.05 - 0.0005 T) Para rodillos de acero  
 $\frac{\mu}{\mu}$  = 0.8 (1.05 - 0.0005 T) Para rodillos de hierro  
T = temperatura del material ( °C )

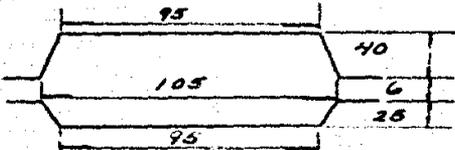
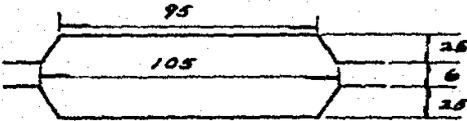
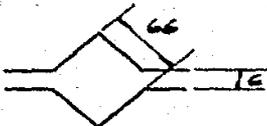
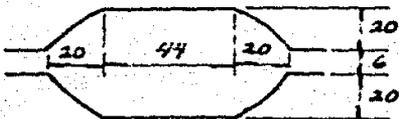
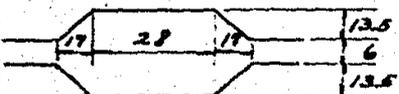
El desarrollo de Ekelund para la determinación del ensanchamiento está realizado para la laminación de productos planos, para poder aplicar dicha fórmula a la laminación de productos no planos se hace necesario transformar las secciones antes y después del proceso en rectángulos equivalentes. El desarrollo de la transformación de óvalos y diamantes a rectángulos equivalentes fue realizado por Lendl. (Ver apéndice)

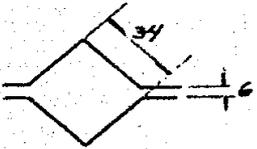
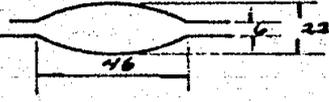
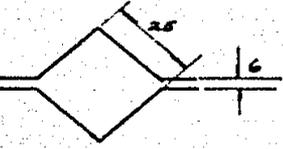
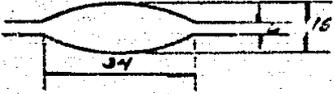
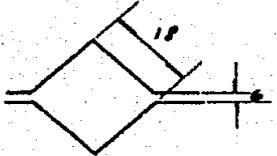
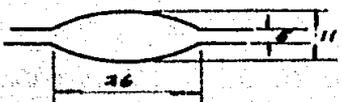
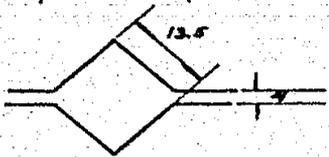
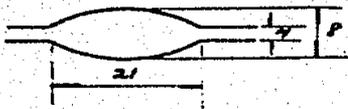
En base a la experiencia se ha considerado a priori que las varillas de 5/16", 3/8" y 1/2", se producirán en 19, 17 y 15 pases respectivamente, contando con el siguiente equipo de laminación:

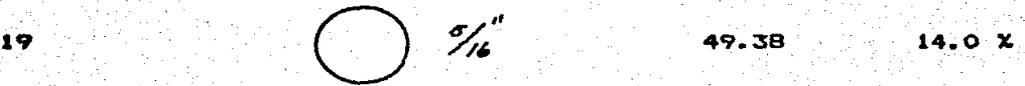
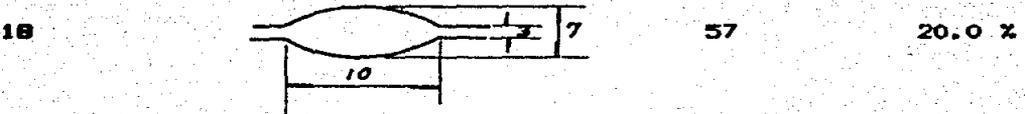
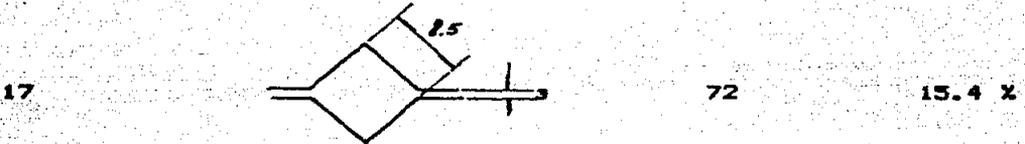
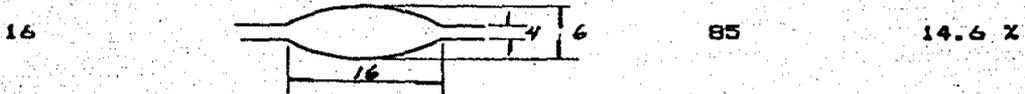
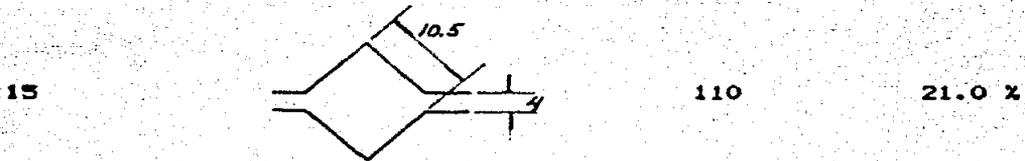
- 1 Desbaste 16" Ø, 2 castillos (10 pases).
- 1 Tren desplegado 3 cajas trio y 2 dño 12" Ø (5 pases).
- 2 Grupos de 2 dños continuos 10" Ø (4 pases).



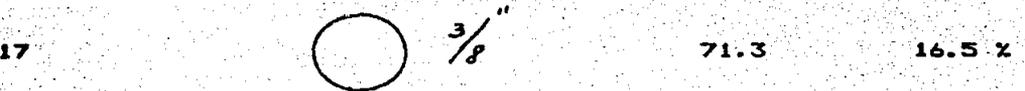
Dicha calibración se muestra a continuación:

PASE	FORMA	SECCION mm <sup>2</sup>	REDUCCION
0		10,000	---
1		7,130	28.7 %
2		5,630	21.0 %
3		4,356	22.0 %
4		3,224	26.0 %
5		2,209	31.5 %
6		1,587	28.2 %

7		1,156	27.1 %
8		778	32.5 %
9		625	20.0 %
10		435	30.5 %
11		324	20.0 %
12		235	30.5 %
13		182	25.5 %
14		140	23.0 %



Para la varilla de 3/8"



Para la varilla de 1/2"



En base a la producción que se desea obtener, 15- 20 T.M./Hr. de varilla corrugada de 5/16", 3/8" y 1/2", se tiene que:

5/16"

Peso nominal 0.388 Kg/mt.

15 T.M./Hr. @ 0.388 Kg/mt. = 38,660 mt/Hr. = 10.75 m/s

20 T.M./Hr. @ 0.388 Kg/mt. = 51,547 mt/Hr. = 14.32 m/s

Considerando una eficiencia del 70 %, tenemos que la velocidad de laminación deberá oscilar entre los valores:

$V_{min} = 15.35 \text{ m/s}$

$V_{max} = 20.45 \text{ m/s}$

3/8"

Peso nominal 0.559 Kg/mt.

15 T.M./Hr. @ 0.559 Kg/mt. = 26,835 mt/Hr. = 7.46 m/s

20 T.M./Hr. @ 0.559 Kg/mt. = 35,778 mt/Hr. = 9.94 m/s

Con una eficiencia del 70 %.

$V_{min} = 10.65 \text{ m/s}$

$V_{max} = 14.2 \text{ m/s}$

1/2"

Peso nominal 0.995 Kg/mt.

Procediendo de igual manera y considerando una eficiencia de 75 % se tiene:

$$V_{\min} = 5.6 \text{ m/s}$$

$$V_{\max} = 7.5 \text{ m/s}$$

Del arreglo general de la planta se sabe que el paso acabador para la varilla de 1/2" está impulsado por un motor de anillos rozantes de C.A. y que, por lo tanto, no podemos elegir libremente la velocidad de este, ya que:

$$N = \frac{120 f}{P}$$

Donde: P = No. de polos  
f = frecuencia (Hz)

En base a la velocidad de producción que se requiere, y al diámetro de los rodillos (12" [0.3m]) se calcula la velocidad de estos.

$$N = \frac{60V}{\pi D}$$

V = velocidad  
D = diámetro del rodillo

$$N_{\min} = 356.5 \text{ R.P.M.}$$

$$N_{\max} = 477.46 \text{ R.P.M.}$$

Y para un motor con 8 pares de polos:

$$N = 120 (60) / 16$$

$$N = 450 \text{ R.P.M.}$$

Con lo cual tenemos una velocidad de laminación de:

$$V = \frac{N \pi D}{60}$$

$$V = 7.07 \text{ m/s}$$

A partir de esta velocidad se pueden obtener las velocidades de laminación de los otros dos productos, puesto que el producto de la velocidad por la sección transversal ha de ser constante (conservación del volumen), por lo tanto:

$$V_{15} S_{15} = V_{17} S_{17} = V_{19} S_{19}$$

$$7.07 (126.67) = V_{17} (71.18) = V_{19} (49.38)$$

$$V_{17} = 12.58 \text{ m/s}$$

$$V_{19} = 18.13 \text{ m/s}$$

Como estas dos velocidades se requieren en dños continuos en los cuales son necesarios, para poder variar la velocidad de estos y así regular el lazo formado por el material entre grupo y grupo, motores de C.D., no se tiene problema para obtener la velocidad deseada.

$$N_{17} = 946 \text{ R.P.M.}$$

$$N_{19} = 1364 \text{ R.P.M.}$$

Para obtener una mayor eficiencia y un mayor control del producto, el tren desplegado será impulsado por 2 motores, uno

para los pasos "preparador" y "terminador", y otro para el resto del tren, el motor para los primeros pasos de dicho tren puede ser un poco más lento que el acabador (siempre y cuando la diferencia de velocidad entre ellos no sea mayor que la reducción conseguida en el pase del cambio de motores).

Si para los primeros pasos de dicho tren tenemos un motor de 10 pares de polos:

$$N = 120 (60) / 20$$

$$N = 360 \text{ R.P.H.}$$

Y

$$V = 5.66 \text{ m/s}$$

Con lo cual tenemos un incremento de velocidad que es de:

$$V = 20 \%$$

Y como en nuestro caso la reducción es de 23.0 % el arreglo funcionará.

Para el desbaste será utilizado un motor de 120 R.P.M. ( 30 pares de polos) y rodillos de 16" con lo que:

$$V = 2.55 \text{ m/s}$$

Por lo que a potencia de los motores se refiere, se ha visto en base a la práctica, que para dicho desbaste se requiere un motor de 1,500 H.P.. Para cada una de las secciones del tren desplegado se requerirán 750 H.P. y para los dos dños 500 H.P.

para cada uno.

Dichos motores serán alimentados con tensiones de 2,300 V.C.A. y 500 V.C.D.

Por lo tanto los requerimientos serán:

1 motor	C.A.	120	R.P.M.	1500	H.P.	2300 V	
1	"	"	360	"	750	"	2300 V
1	"	"	450	"	750	"	2300 V
1	"	C.C.	1000	"	500	"	500 V
1	"	"	1500	"	500	"	500 V

Es también posible utilizar motores de mayor velocidad y utilizar reductores para conseguir la velocidad deseada.

Para el accionamiento de los motores C.A. requerimos de 2650 KVA (\*) alimentando los motores a 2300 V, para los motores C.D. se requieren de 885 KVA a 440 V.C.A..

En base a la experiencia se calcula que el consumo de los motores de los trenes es aproximadamente el 65 % del total de la energía eléctrica de la planta, el resto, 35%, se utiliza en bombas de agua, compresor de aire, grúa, tornos, ventiladores, alumbrado, etc.

(\*) El consumo en VA se obtiene dividiendo la potencia (dada en Watts) entre el factor de potencia, este cálculo se realizará para un factor de potencia de 0.85 por ser este el más bajo que se permite sin representar esto castigos económicos.

De tal manera que los servicios auxiliares nos representan 1910 KVA. los cuales serán alimentados a 440 y 220 V.

Por consiguiente requerimos:

2650 KVA @ 2.3 KV

2800 KVA @ 440/220 V.

-----  
5450 KVA

Se requiere de una subestación de 6000 KVA la cual tendrá una cometa de 23 KV y 2 transformadores:

1 de 3000 KVA 2300 V

1 de 3000 KVA 440/220 V

Al laminar en un tren continuo (pases 15 a 19) se requiere variar la velocidad de los rodillos, para con esto poder controlar el lazo que se forma al aumentar la longitud del material laminado.



El tener los castillos agrupados en conjuntos de 2 se hace con la finalidad de regular el lazo únicamente entre grupo y grupo, dejándole en los dos rodillos de cada conjunto una relación de velocidades fija de tal manera que el segundo rodillo

siempre jale al material y con esto el material siempre se encuentre tenso. Esto es fácil de lograr con dos pases, pero se dificulta mucho para 3 o más pases, para lograr esto se requiere que el 2do. rodillo del conjunto tenga una relación de velocidad ligeramente mayor que la relación de reducción en ese pase.

Para la regulación del lazo entre conjunto y conjunto se utilizan sistemas comerciales, los cuales funcionan en base a dos fotoceldas colocadas como límites superior e inferior del lazo, cuando la fotocelda inferior lo detecta incrementa la velocidad del grupo posterior, y cuando este es detectado por la fotocelda superior, esta manda reducir la velocidad.

El producto será cortado por una tijera volante de corte en caliente, en tramos de 18 a 24 m, antes de ser enviado a la mesa de enfriamiento, el transporte hasta dicha mesa se realizará mediante un camino de rodillos, la mesa de enfriamiento será de 28 x 6 m y a la salida de esta se tendrá otro camino de rodillos equipado con una sierra de corte a medida y dos dobladoras.

#### V.5 TAMAÑO DE LA PLANTA.

La determinación del tamaño de la planta y el arreglo general de esta, suelen estar restringidos por el terreno con que se cuenta, pues en realidad pocas son las ocasiones en las que uno puede decidir sobre la forma y el tamaño del terreno, debido a esto, en el presente trabajo se propone un arreglo en un terreno que se piensa rectangular, con el conocimiento de que para una

aplicación real se tendrán que realizar ciertas modificaciones.

Se ha pensado instalar la planta en un terreno de 110 x 40 m, donde tendremos dos naves de 110 x 20 m, una será básicamente en la que se encontrará el equipo de laminación, y la otra será para almacenaje y servicios. En ambas naves se considera necesaria la instalación de grúas viajeras a una altura aproximada de 7 m. y con una capacidad de 5 T.M. siendo aconsejable que en la nave de almacenamiento se utilicen dos grúas.

#### V.6 SERVICIOS AUXILIARES.

Dentro de los servicios auxiliares que se necesitan se encuentran:

Taller mecánico para el maquinado de los rodillos y reparaciones generales, con al menos :

Dos tornos (uno de ellos para el maquinado de los rodillos y el otro para el mecanizado de refacciones).

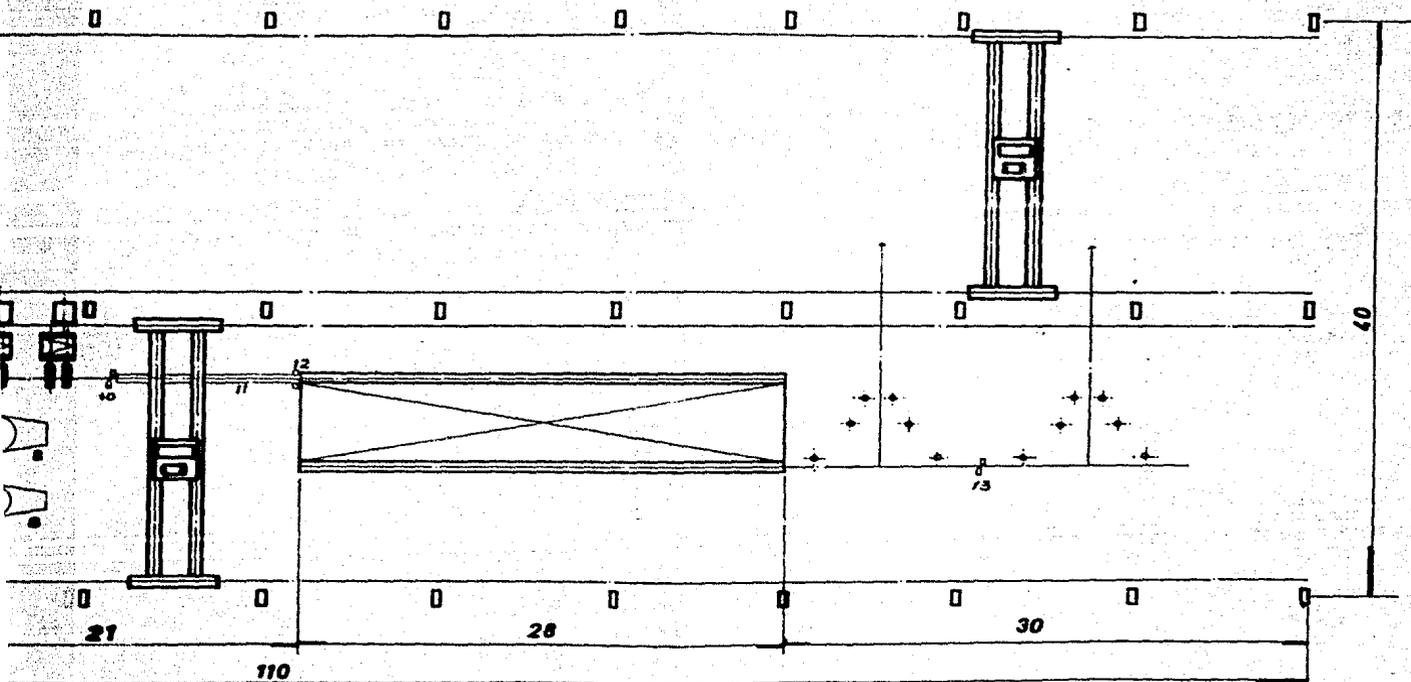
Un cepillo de codo.

Una fresadora horizontal.

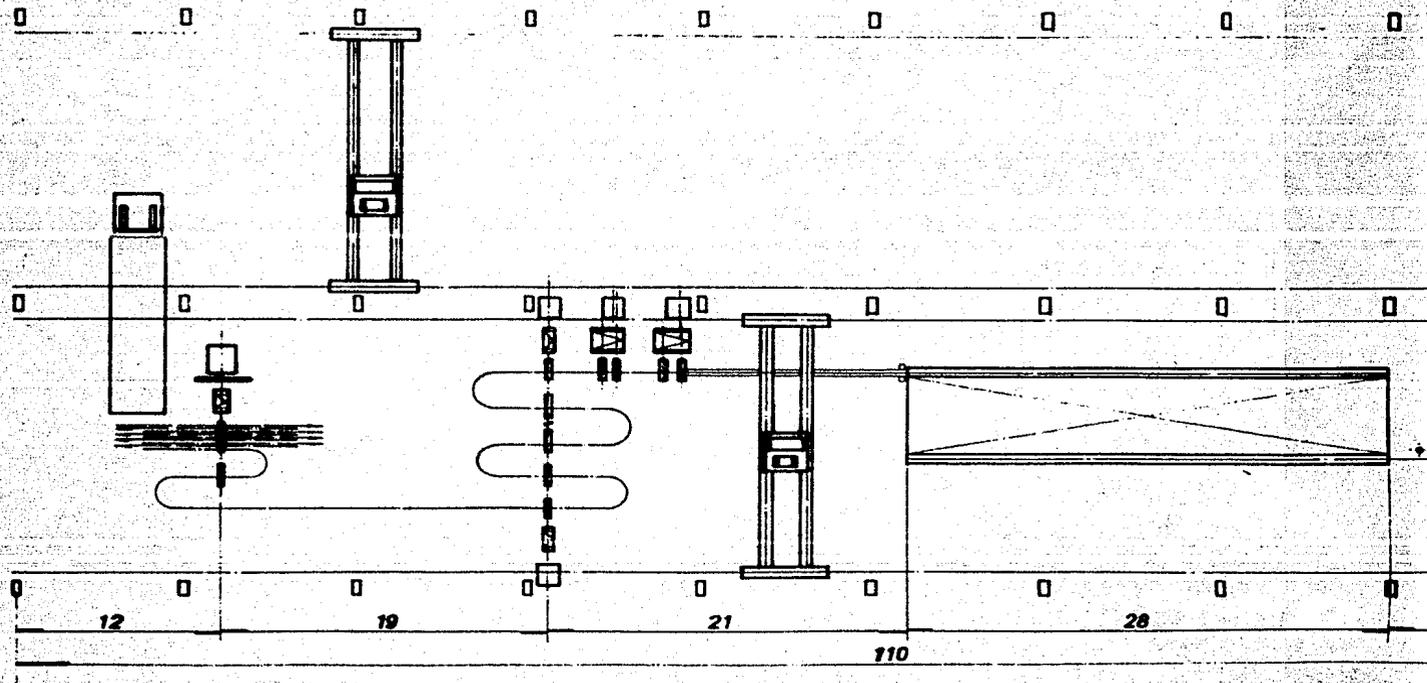
Un equipo de soldadura eléctrica.

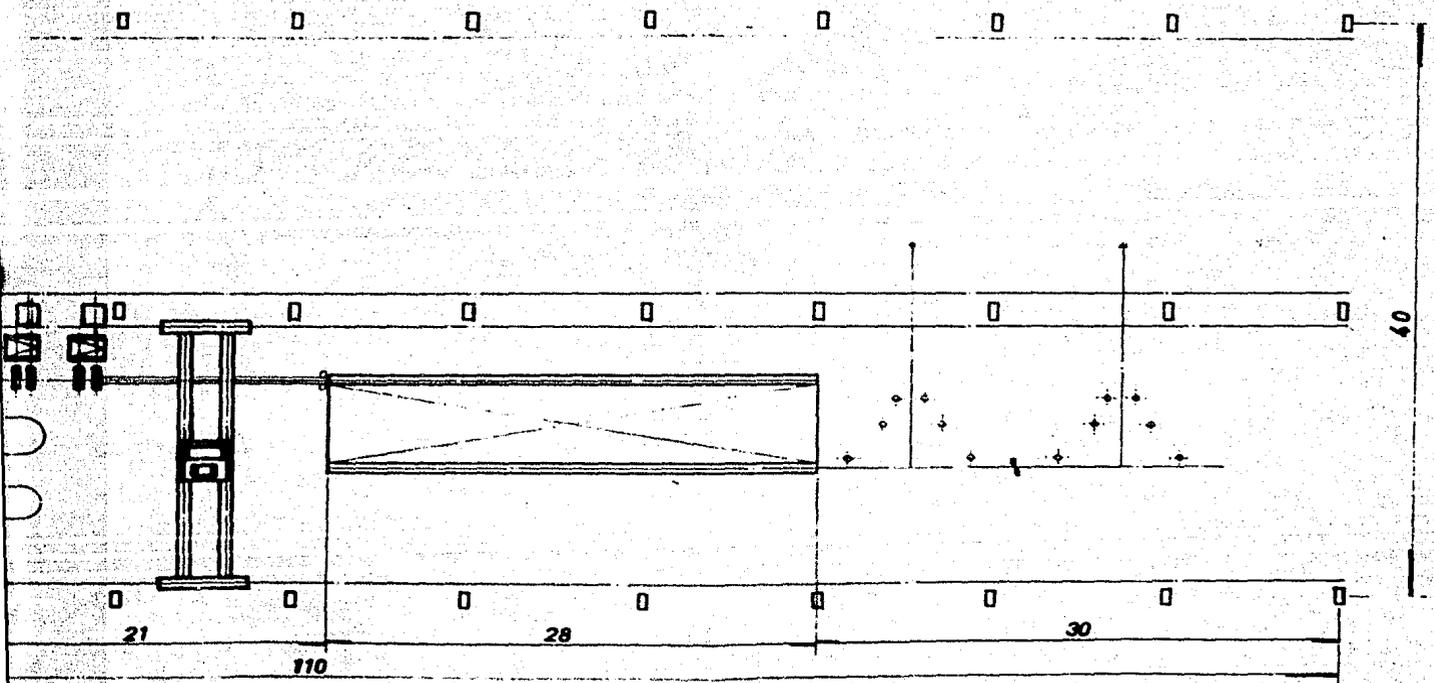
Compresoras de aire, a una presión aproximada de 90-100 psi y con suficiente capacidad para alimentar todos los equipos neumáticos existentes (arrastradores, repetidores, cizallas, etc.).





<b>ARREDO GENERAL 2</b>	
<b>ESCALA</b>	<b>ACOTACIONES</b>
<b>GRAFICA</b>	<b>m.</b>





<b>ARREGLO GENERAL 1</b>	
<b>ESCALA</b>	<b>ACOTACIONES</b>
<b>GRAFICA</b>	<b>m.</b>

Equipo de bombeo de agua para el enfriamiento de los rodillos y castillos en general, con un gasto de 1800 lt/min distribuidos de la siguiente manera: 300 lt/min en la primera caja del tren de desbaste y 150 lt/min en cada una de las restantes cajas. Con una capacidad de almacenamiento de 150 m<sup>3</sup> con intercambiador de calor para su enfriamiento.

Equipos de oxicorte.

#### V.7 AUTOMATIZACION DE LA PLANTA

Por otro lado tenemos que se puede lograr una completa automatización en esta planta, para tal efecto se requerirá de la instalación del siguiente equipo auxiliar:

- 1.- Evacuador del horno de calentamiento
- 2.- Mesas fija y basculante en el 1er. castillo de desbaste
- 3.- Cizallas de despunte en los pasos 7 y 8
- 4.- Repetidor entre los pasos 9 y 10
- 5.- Repetidor al salir del paso 10
- 6.- Arrastradores
- 7.- Cizallas de despunte y descole
- 8.- Repetidores abiertos entre las cajas 11 y 12, 13 y 14
- 9.- Repetidores cerrados entre las cajas 12 y 13, 14 y 15
- 10.- Tijera volante
- 11.- Canaleta doble
- 12.- Frenacolas
- 13.- Tijera de corte en frío

## BIBLIOGRAFIA

- 1.- ALVAREZ SALGADO, M., RODRIGUEZ BERMUDEZ, M. y GARCIA TIJERINA, J., Desarrollo y aplicación de procedimiento para manejo de la fórmula de ensanchamiento de Sven Ekelund, AHMSA-HYLSA, México.
- 2.- BAUMEISTER, T. et al., Marks Manual del ingeniero mecánico, Mc.Graw-Hill, Octava edición, México 1984.
- 3.- BRITISH STEEL CORPORATION. Roll pass design. Sheffield, England 1979.
- 4.- DIETER, GEORGE. Mechanical metalurgy. Ed. Mc Graw-Hill, segunda edición, Tokio, Japón 1976.
- 5.- DIRECCION GENERAL DE NORMAS. Norma oficial mexicana NOM B-6-1983 "varillas corrugadas y lisas de acero, procedentes de lingote o palanquilla, para refuerzo de concreto". Secretaria de Comercio y Fomento Industrial, México, 1983.
- 6.- HARRIS, J.N. Mechanical working of metals theory and practice. Hoon Higer Institute, Ed. Pergamon, primera edición, Libya, 1983.
- 7.- HIGGINS, RAYMOND. Ingeniería metalúrgica. Ed. C.E.C.S.A., primera edición, México 1980.
- 8.- HOFF-DAHALL. Laminación. Ed. Dossat, tercera edición, Madrid, España 1965.
- 9.- RIO, JESUS del. Deformación plástica de los materiales. Ed. Gustavo Gili, primera edición, Barcelona, España 1980.
- 10.- SELLARS C.M. and G.J. DAVIES. Hot working and forming processes. The Metals Society, Sheffield, England 1979.
- 11.- SKF. Bearings in rolling mills. Estocolmo, Suecia 1959.
- 12.- TRINKS, W. Fundamentos de la laminación. Ed. Interciencia, segunda edición, Madrid, España 1973.
- 13.- UNITED STATES STEEL CORPORATION. The making, shaping and treating of steel. Septima edición. Pittsburgh, E.U.A. 1957.

## APENDICE

### Método Lendl de intersecciones y rectángulos equivalentes.

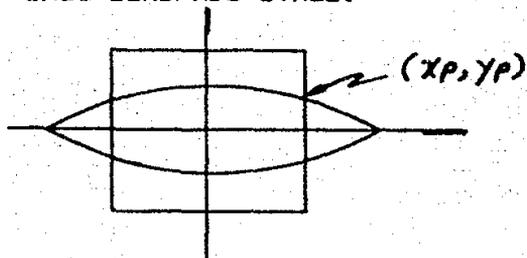
Este procedimiento se basa en calcular el rectángulo equivalente en función de los puntos donde la sección de entrada interseca al pase en cuestión.

Para definir el rectángulo equivalente de la sección de entrada, se toma como ancho del rectángulo la distancia entre los puntos de intersección. A continuación se calcula el área comprendida por el perímetro de la sección hasta los puntos de intersección, la altura del rectángulo se calcula utilizando los parámetros antes definidos.

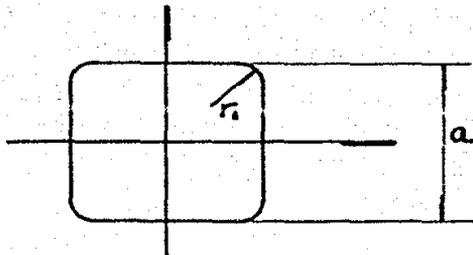
En el caso del rectángulo equivalente de la sección en consideración se procede de la misma manera, únicamente tomando en cuenta, para el cálculo del área, el perímetro de la sección de salida.

A continuación se ejemplifica lo anterior en forma gráfica para una mayor comprensión del método. Se utilizará la secuencia cuadrado-óvalo-cuadrado, desarrollando el procedimiento total del cálculo y su aplicación usando una calculadora programable.

CASO CUADRADO-OVALO.

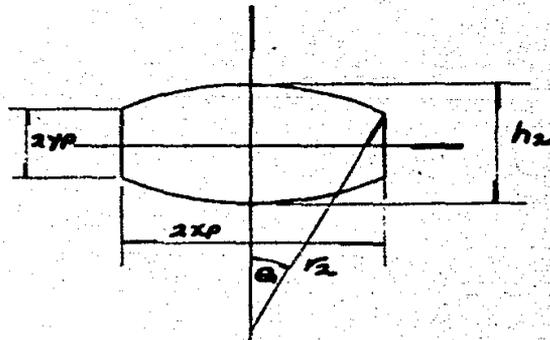
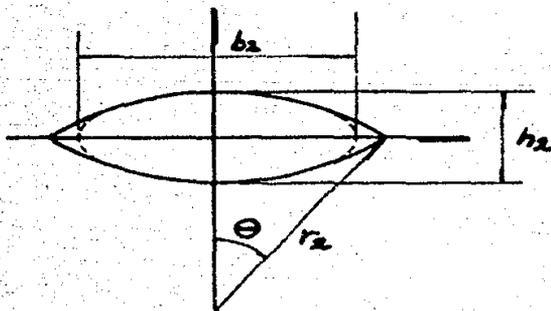


SECCION DE ENTRADA.



Donde:  $a$  = lado del cuadrado  
 $b_1 = a$  = ancho de la sección de entrada  
 $r_1$  = radio de redondeo

SECCION DE SALIDA.



$\theta$  = ángulo hasta  $x_p$   
 $\theta$  = ángulo hasta puntas  
 $h_2$  = altura del óvalo  
 $r_2$  = radio del óvalo  
 $x_p$  = ancho al punto de intersección  
 $y_p$  = altura al punto de intersección

## CALCULO DE PUNTOS DE INTERSECCION.

Cuadrado:

El lado del cuadrado que interseca al óvalo se puede definir con la ecuación de la línea recta

$$y = mx + b$$

sustituyendo:

$$\begin{aligned}x &= 0.5a \\x_p &= x \\x_p &= 0.5a\end{aligned}\quad (1)$$

Ovalo:

La ecuación de un círculo con centro en (h,k)

$$(x - h)^2 + (y - k)^2 = r^2$$

Donde:

$$\begin{aligned}h &= 0 \\k &= -(r^2 - 0.5h^2)\end{aligned}$$

Sustituyendo y encontrando la intersección con (1)

$$y^2 + 2(r^2 - 0.5h^2)y + (r^2 - 0.5h^2)^2 + (0.5a)^2 - r^2 = 0$$

Resolviendo para  $y = y_p$

$$y_p = \frac{h^2 - r^2 + \sqrt{4r^2 - a^2}}{2}$$

El punto de intersección será  $(x_p, y_p)$ .

## CALCULO DE LAS AREAS Y ALTURAS EQUIVALENTES.

Cuadrado :

$$A1 = a^2 - r1^2 (4 - \pi)$$

En este caso, el área del cuadrado es igual al área equivalente de entrada. Para calcular la altura equivalente se utiliza la siguiente relación

$$h1' = \frac{A1'}{2xp}$$

Ovalo :

$$A2' = r2^2 (\theta_1 - \text{sen } \theta_1) + 4xyp$$

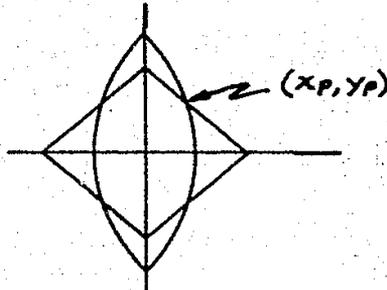
Donde

$$\theta_1 = 2 (\text{sen}^{-1} xp/r2) \quad \theta_1 \text{ en radianes}$$

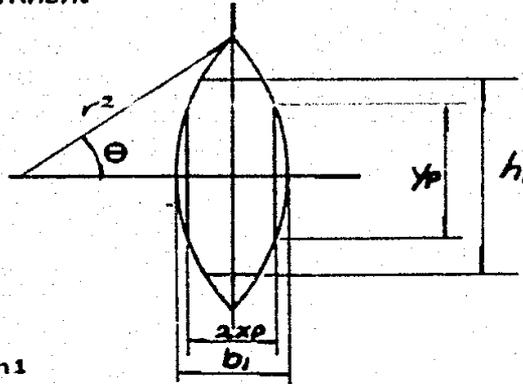
Para el cálculo de la altura equivalente se utiliza la relación

$$h2' = \frac{A2'}{2xp}$$

CASO OVALO-CUADRADO.

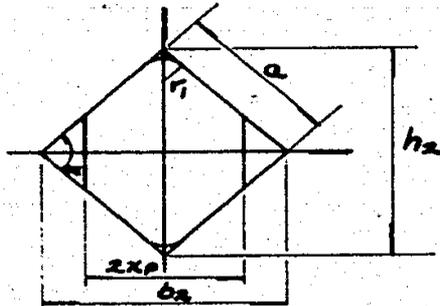


SECCION DE ENTRADA.



- $\Theta$  = hasta  $h_1$
- $\Theta_1$  = hasta  $y_p$
- $h$  =  $b_2$  del cálculo anterior
- $b_1$  = ancho del óvalo ( $h_2$  del cálculo anterior)

SECCION DE SALIDA



$h_2 = b_2 =$  diagonal a puntas del cuadrado

## CALCULO DE LOS PUNTOS DE INTERSECCION.

Cuadrado :

De igual manera que en el caso anterior

$$y = mx + b$$

$$b = 0.5 h2$$

$$m = \frac{0.5 h2 - 0}{0 - 0.5 h2} = -1$$

Sustituyendo

$$y_p = 0.5 h2 - x_p \quad (2)$$

Ovalo :

$$(x - h)^2 + (y - k)^2 = r^2$$

Donde

$$h = -(r1 - 0.5h1)$$

$$k = 0$$

Sustituyendo e intersectando con (2)

$$2x_p^2 + (2r1 - h1 - h2) x_p + 0.25 (h1 + h2)^2 - r1h1 = 0 \quad (3)$$

Resolviendo (2) y (3) se obtiene el punto de intersección  $(x_p, y_p)$ .

## CALCULO DE AREAS Y ALTURAS EQUIVALENTES.

Ovalo :

$A_1$  = dato del cálculo anterior

$$A = r_1^2 (\theta_1 - \sin \theta_1)$$

Donde

$$\theta_1 = 2 (\sin^{-1} x/r_1)$$

$$A_1' = A_1 - A$$

Y

$$h_1' = \frac{A_1'}{2xp}$$

Cuadrado :

$$A_2' = 2xp^2 + 4xyp - 2 (r_2^2 \tan^2 \gamma/2) - \frac{(r_2^2 \sin \gamma/2)}{2}$$

Y

$$h_2' = \frac{A_2'}{2xp}$$

PROGRAMA PARA CALCULADORA HP-41 PARA LA RESOLUCION DE LA ECUACION DE ENSANCHAMIENTO DE EKELUND.

```

01 LBL "A"
02 "E1=?"
03 PROMPT
04 STO 00
05 STO 01
06 "HE1=?"
07 PROMPT
08 STO 07
09 "HE2=?"
10 PROMPT
11 STO 08
12 LBL "C-0"
13 FSTC 00
14 BEEP
15 "Y1=?"
16 PROMPT
17 STO 20
18 "B1=?"
19 PROMPT
20 STO 30
21 "FRI=?"
22 PROMPT
23 STO 32
24 "S1=?"
25 PROMPT
26 STO 37
27 "ERROR ABS=?"
28 PROMPT
29 STO 09
30 SF 10
31 XEQ "EKa"
32 RCL 30
33 RCL 37
34 XEQ "EKb"
35 RCL 26
36 *
37 CHS
38 +
39 RCL 32
40 XEQ "EK"
41 CF 10
42 RCL 02
43 "B2="
44 PRCL X
45 AVIEW
46 END
    
```

```

01 LBL "EKa"
02 RCL 07
03 RCL 08
04 -
05 STO 05
06 RCL 07
07 RCL 06
08 +
09 STO 04
10 RTN
11 LBL "EKb"
12 RCL 08
13 -
14 +
15 2
16 /
17 RCL 03
18 *
19 SORT
20 STO 05
21 1.05
22 ENTER
23 .0005
24 RTN
25 LBL "EK"
26 *
27 1.6
28 RCL 05
29 *
30 *
31 1.2
32 RCL 03
33 *
34 -
35 RCL 04
36 /
37 STO 06
38 4
39 RCL 03
40 RCL 05
41 *
42 *
43 *
44 STO 03
45 2
46 RCL 06
47 RCL 04
48 *
49 RCL 05
50 *
51 *
    
```

```

52 STO 04
53 LBL 01
54 RCL 01
55 X12
56 RCL 00
57 X12
58 -
59 2
60 /
61 STO 05
62 RCL 01
63 RCL 06
64 /
65 LN
66 RCL 04
67 *
68 STO 06
69 RCL 05
70 RCL 03
71 -
72 RCL 06
73 +
74 RCL 04
75 RCL 01
76 +
77 RCL 01
78 +
79 /
80 CHS
81 RCL 01
82 +
83 STO 02
84 RCL 05
85 RCL 02
86 FC? 10
87 GTO 02
88 PSE
89 LBL 02
90 RCL 01
91 GTO 05
92 PSE
93 LBL 05
94 -
95 ABS
96 X<Y?
97 GTO 04
98 RCL 02
99 STO 01
100 GTO 01
101 LBL 04
102 END
    
```

PROGRAMA PARA CALCULADORA HP-41 PARA LA RESOLUCION DE LA  
EQUACION DE ENSANCHAMIENTO DE EKELUND MEDIANTE EL METODO DE  
LENDL.

```
01*LBL "LAMINA"  
02 CF 00  
03 CF 01  
04 CF 02  
05 CF 03  
06 CLRG  
07 "NO. DE PASES=?"  
08 PROMPT  
09 STO 22  
10 "INICIA CUA (S.R)"  
11 "I)=?"  
12 RDN  
13 PROMPT  
14 RCLF  
15 RTOX  
16 R3  
17 X=Y?  
18 GTO 06  
19*LBL 05  
20 XEQ "OV-CUA"  
21 DSE 22  
22 STOP  
23 XEQ "CUA-OV"  
24 DSE 22  
25 GTO 05  
26 GTO 04  
27*LBL 06  
28 XEQ "CUA-OV"  
29 DSE 22  
30 STOP  
31 XEQ "OV-CUA"  
32 DSE 22  
33 GTO 06  
34 GTO 04  
35*LBL 04  
36 END
```

01+LBL "CUN-CY"  
02 F37C 02  
03 GTD 01  
04 SF 00  
05 "CUADRADO"  
06 AVIEW  
07 PSE  
08 "a=?"  
09 PROMPT  
10 STO 00  
11 STO 01  
12 STO 40  
13 "R1=?"  
14 PROMPT  
15 STO 11  
16+LBL 01  
17 "OVALO"  
18 AVIEW  
19 PSE  
20 "R2=?"  
21 PROMPT  
22 STO 12  
23 "R2=?"  
24 PROMPT  
25 STO 13  
26 RCL 00  
27 2  
28 /  
29 RCL 13  
30 /  
31 ASIN  
32 2  
33 \*  
34 STO 14  
35 RCL 13  
36 X12  
37 4  
38 \*  
39 RCL 00  
40 X12  
41 -  
42 SGT  
43 RCL 12  
44 +  
45 RCL 13  
46 2  
47 \*  
48 -  
49 2  
50 /  
51 STO 15  
52 RCL 00  
53 X12  
54 RCL 11  
55 X12

56 4  
57 PI  
58 -  
59 \*  
60 -  
61 STO 16  
62 RCL 06  
63 /  
64 STO 07  
65 RCL 14  
66 D-R  
67 RCL 14  
68 SIN  
69 -  
70 RCL 13  
71 X12  
72 \*  
73 RCL 00  
74 RCL 15  
75 \*  
76 2  
77 \*  
78 +  
79 RCL 06  
80 /  
81 STO 08  
82 XEQ "C-0"  
83 RCL 02  
84 RCL 13  
85 /  
86 2  
87 /  
88 ASIN  
89 2  
90 \*  
91 STO 18  
92 2  
93 /  
94 COS  
95 CHS  
96 1  
97 +  
98 RCL 13  
99 \*  
100 2  
101 \*  
102 CHS  
103 RCL 12  
104 +  
105 RCL 02  
106 \*  
107 RCL 18  
108 D-R  
109 RCL 18  
110 SIN

111 -  
112 RCL 15  
113 X12  
114 =  
115 +  
116 STO 20  
117 RCL 16  
118 /  
119 CHS  
120 1  
121 +  
122 100  
123 \*  
124 STO 21  
125 "A2=".  
126 RCL 20  
127 AVIEW  
128 FC? 55  
129 STOP  
130 "REP=".  
131 RCL 21  
132 "F2"  
133 AVIEW  
134 FC? 55  
135 STOP  
136 SF 01  
137 END

01 LBL 01-000  
02 FS?C 01  
03 STO 01  
04 "OVALC"  
05 AVIEW  
06 PSE  
07 "B1=?"  
08 PROMPT  
09 STO 12  
10 "R1=?"  
11 PROMPT  
12 STO 13  
13 LBL 01  
14 RCL 12  
15 STO 00  
16 STO 01  
17 X12  
18 2  
19 \*  
20 STO 41  
21 "CURRABD"  
22 AVIEW  
23 PSE  
24 "R2=?"  
25 PROMPT  
26 STO 44  
27 X12  
28 2  
29 \*  
30 STO 45  
31 "B2=?"  
32 PROMPT  
33 STO 46  
34 "R2=?"  
35 PROMPT  
36 X12  
37 STO 47  
38 RCL 44  
39 X12  
40 2  
41 /  
42 SGT  
43 STO 40  
44 RCL 44  
45 RCL 46  
46 /  
47 ATAN  
48 STO 48  
49 RCL 13  
50 2  
51 \*  
52 RCL 12  
53 -  
54 RCL 44  
55 -

56 STO 45  
57 X12  
58 RCL 41  
59 -  
60 RCL 45  
61 -  
62 RCL 12  
63 RCL 13  
64 \*  
65 5  
66 \*  
67 +  
68 SORT  
69 RCL 49  
70 CHS  
71 +  
72 4  
73 /  
74 STO 50  
75 CHS  
76 RCL 44  
77 2  
78 /  
79 +  
80 STO 51  
81 RCL 13  
82 /  
83 ASIN  
84 2  
85 \*  
86 STO 52  
87 LBL 8  
88 RCL 06  
89 RCL 52  
90 D-R  
91 RCL 52  
92 SIN  
93 -  
94 RCL 13  
95 X12  
96 \*  
97 CHS  
98 RCL 20  
99 +  
100 2  
101 /  
102 RCL 50  
103 /  
104 STO 07  
105 RCL 50  
106 X12  
107 2  
108 \*  
109 RCL 50  
110 RCL 51

111 \*  
112 4  
113 \*  
114 +  
115 RCL 49  
116 TAN  
117 RCL 47  
118 \*  
119 RCL 45  
120 D-R  
121 RCL 47  
122 \*  
123 -  
124 2  
125 /  
126 STO 53  
127 4  
128 \*  
129 -  
130 2  
131 /  
132 RCL 50  
133 /  
134 STO 03  
135 SF 00  
136 XEQ "C-0"  
137 LBL C  
138 CHS  
139 RCL 46  
140 +  
141 RCL 40  
142 SIN  
143 1/X  
144 1  
145 -  
146 2  
147 \*  
148 /  
149 STO 54  
150 RCL 44  
151 RCL 46  
152 \*  
153 2  
154 /  
155 RCL 53  
156 4  
157 \*  
158 -  
159 RCL 54  
160 X12  
161 RCL 40  
162 TAN  
163 \*  
164 RCL 54  
165 X12

166 RCL 45  
167 D-R  
168 \*  
169 -  
170 2  
171 /  
172 4  
173 \*  
174 -  
175 STO 55  
176 RCL 20  
177 /  
178 CHS  
179 1  
180 +  
181 100  
182 \*  
183 STO 56  
184 "A"  
185 ARCL 55  
186 AVIEW  
187 FC? 55  
188 STOP  
189 "ZRED"  
190 ARCL 56  
191 "F"  
192 AVIEW  
193 FC? 55  
194 STOP  
195 SF 02  
196 RCL 40  
197 STO 00  
198 STO 01  
199 END

NO. DE PASES XEO "LAMINA"

11.0200 RUN

INICIA CUA (S.N.)=? RUN

CUADRADO a=? RUN

R1=? 34.0000 RUN

CVALO H2=? 3.0000 RUN

R2=? 22.0000 RUN

T1=? 34.0000 RUN

D1=? 1.130.0000 RUN

FRI=? 406.0000 RUN

SI=? .0000 RUN

ERROR ABS=? 6.0000 RUN

ERROR ABS=? .2000 RUN

B2=41.4212  
A2=725.8369  
XRED=36.7915%

CUADRADO H2=?

B2=? 35.4000 RUN

R2=? 35.4000 RUN

T1=? 3.0000 RUN

D1=? 1.110.0000 RUN

FRI=? 406.0000 RUN

SI=? .0000 RUN

ERROR ABS=? 6.0000 RUN

ERROR ABS=? .2000 RUN

S2=24.2754  
A=545.3137  
XRED=24.6671%

CVALO H2=?

CVALO H2=?

R2=? 16.0000 RUN

T1=? 31.4000 RUN

D1=? 1.090.0000 RUN

FRI=? 406.0000 RUN

SI=? .0000 RUN

ERROR ABS=? 6.0000 RUN

ERROR ABS=? .2000 RUN

B2=35.1005  
A2=440.7405  
XRED=28.7799%

CUADRADO H2=?

B2=? 25.4600 RUN

R2=? 25.4600 RUN

T1=? 3.0000 RUN

D1=? 1.070.0000 RUN

FRI=? 300.0000 RUN

SI=? .0000 RUN

ERROR ABS=? 5.0000 RUN

ERROR ABS=? .2000 RUN

B2=22.7521  
A=315.6576  
XRED=20.3016%

CVALO H2=?

R2=? 11.0000 RUN

T1=? 29.0000 RUN

D1=? 1.050.0000 RUN

FRI=? 300.0000 RUN

SI=? .0000 RUN

ERROR ABS=? 5.0000 RUN

ERROR ABS=? .2000 RUN

B2=25.0500  
A2=337.0000  
XRED=20.1700%

CUADRADO

M2=?  
 B2=? 13.1678 RUN  
 R2=? 13.1688 RUN  
 T1=? 2.6888 RUN  
 T1=? 1.838.8888 RUN  
 B1=? 388.8888 RUN  
 FRI=? .8888 RUN  
 SI=? 5.8888 RUN  
 ERROR ABS=? .2088 RUN

B2=16.5845  
 A=175.6887  
 %RED=24.6261%

OVALO

M2=?  
 B2=? 8.8888 RUN  
 R2=? 25.6888 RUN  
 T1=? 1.818.8888 RUN  
 B1=? 388.8888 RUN  
 FRI=? .8888 RUN  
 SI=? 5.8888 CLX  
 4.8888 RUN  
 ERROR ABS=? .2888 RUN

B2=28.8812  
 A=136.2488  
 %RED=22.8811%

CUADRADO

M2=?  
 B2=? 14.8588 RUN  
 R2=? 14.8588 RUN  
 T1=? 2.8888 RUN  
 T1=? 998.8888 RUN  
 B1=? 388.8888 RUN  
 FRI=? .8888 RUN  
 SI=? 4.8888 RUN  
 ERROR ABS=? .2888 RUN

B2=12.3548  
 A=164.8795  
 %RED=23.1695%

OVALO

M2=?  
 B2=? 6.8888 RUN  
 R2=? 32.5888 RUN  
 T1=? 978.8888 RUN  
 B1=? 258.8888 RUN  
 FRI=? .8888 RUN  
 SI=? 4.8888 RUN  
 ERROR ABS=? .2888 RUN

B2=15.5638  
 A=83.6277  
 %RED=18.4483%

CUADRADO

M2=?  
 B2=? 12.8888 RUN  
 R2=? 12.8888 RUN  
 T1=? 1.8888 RUN  
 B1=? 958.8888 RUN  
 FRI=? 258.8888 RUN  
 SI=? .8888 RUN  
 4.8888 RUN  
 ERROR ABS=? .2888 RUN

B2=9.1346  
 A=66.4361  
 %RED=28.5574%

OVALO

M2=?  
 B2=? 7.8888 RUN  
 R2=? 7.2588 RUN  
 T1=? 938.8888 RUN  
 B1=? 258.8888 RUN  
 FRI=? .8888 RUN  
 SI=? 3.8888 RUN  
 ERROR ABS=? .2888 RUN

B2=3.5931  
 A=57.1753  
 %RED=11.8448%