

Ruben Canas  
6/3/89.

T  
669.142  
R586



# ESCUELA SUPERIOR POLITECNICA DEL LITORAL

## Facultad de Ingeniería Mecánica



"CONSTRUCCION DE CILINDROS DE LAMINACION  
PARA MOLINO EXPERIMENTAL"

TESIS DE GRADO  
Previa a la obtención del Título de:  
INGENIERO MECANICO

Presentada por:  
Luis Ríos Jara

Guayaquil - Ecuador  
1.989



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL LITORAL

Facultad de Ingeniería Mecánica

**DEDICATORIA**

TRABAJO PARA EL ORDEN DE LAMINACION  
PARA EL DISEÑO EXPERIMENTAL

TRABAJO DE GRADO

Previa a la obtención del Título de:

INGENIERO MECANICO

**A JORGE Y BERTHA, MIS PADRES, CON MUCHO CARINO**

1984

DECLARACION EXPRESA



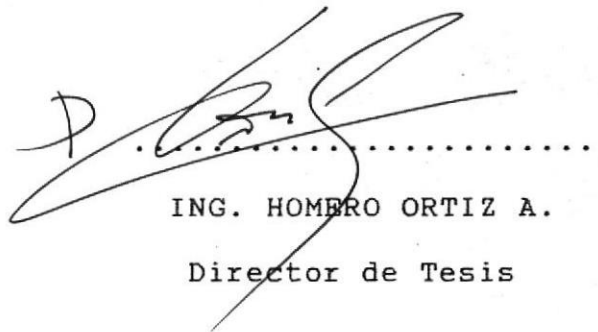
"La responsabilidad por los hechos, ideas y doctrinas expuestos en esta tesis, me corresponden exclusivamente; y, el patrimonio intelectual de la misma, a la ESCUELA SUPERIOR POLITECNICA DEL LITORAL".

(Reglamento de Exámenes y Títulos profesionales de la ESPOL).

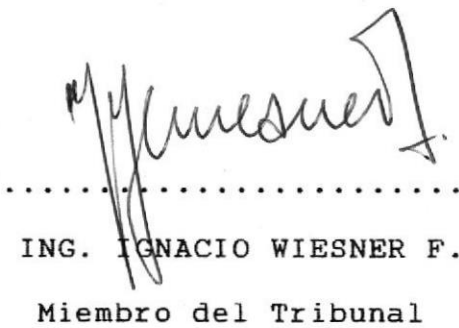
.....  
LUIS RIOS JARA



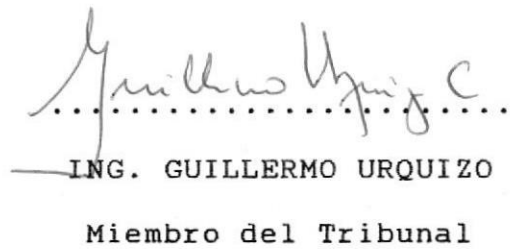
ING. NELSON CEVALLOS  
Decano de la Facultad



ING. HOMERO ORTIZ A.  
Director de Tesis



ING. IGNACIO WIESNER F.  
Miembro del Tribunal



ING. GUILLERMO URQUIZO  
Miembro del Tribunal

## RESUMEN

En la presente tesis se lleva a cabo un breve análisis de la oferta y demanda nacional por rodillos de laminación. Asimismo se plantea su fabricación a escala industrial en el Ecuador.

Por otro lado, se estudia el proceso de laminación y en particular, la producción de cilindros de laminación de hierro nodular con ayuda del horno de cubilote y aplicando un método sandwich modificado para la adición del magnesio. En la parte experimental, se logra el material de los rodillos y se hace el control de calidad del mismo en lo que respecta a composición química, metalografía, propiedades mecánicas y defectología. Los cilindros obtenidos se pueden calificar como de hierro nodular, de matriz perlítica con carburos en la estructura, que responden a normas de calidad generalmente aceptadas para laminación en caliente de barras y otras secciones ligeras.



# I N D I C E   G E N E R A L

	Pág.
RESUMEN .....	VI
INDICE GENERAL .....	VII
INDICE DE FIGURAS .....	IX
INDICE DE TABLAS .....	XV
INTRODUCCION .....	16
I   CAPITULO .....	18
1. ANALISIS DEL PROBLEMA .....	19
1.1 Desarrollo de tecnología .....	19
1.2 Estudio del nivel tecnológico .....	20
II   CAPITULO .....	22
2. RODILLOS DE LAMINACION .....	22
2.1 Principios básicos .....	22
2.2 Consideraciones generales para el diseño de rodillos de laminación .....	24
2.2.1 Diseño de pases .....	33
2.2.2 Cálculo de carga, torque y poten- cia .....	45
2.3 Criterios para construcción .....	57
2.3.1 Mecanismos de desgaste .....	57
2.3.2 Materiales .....	71
2.3.2.1 Especificaciones técnicas .....	84
2.3.2.2 Métodos de fundición ....	104
2.3.2.3 Tolerancias de maquinado .....	107
2.3.2.4 Endurecimiento superfi- cial .....	109

	Pág.
III CAPITULO .....	115
3.CONTROL DE CALIDAD .....	115
3.1 Métodos de control .....	115
3.1.1 Fundición .....	115
3.1.2 Metalúrgico .....	118
3.1.3 Grado de acabado .....	120
3.1.4 Dureza superficial .....	122
IV CAPITULO .....	122
4.PRUEBAS .....	122
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....	131
APENDICES .....	134
DIAGRAMAS TABLAS Y ANEXOS .....	163
BIBLIOGRAFIA .....	165



## INDICE DE FIGURAS

#		Pág.
1.	Zona de deformación durante el laminado.....	22
2.	Descomposición de las fuerzas que actúan sobre la barra durante el laminado.....	25
3.	Pases, collares, hombros y cuellos en rodillos de laminación.....	27
4.	Curvas para determinar el factor de magnificación de esfuerzos.....	30
5.	Actuación de la carga durante el laminado de una palanquilla.....	33
6.	Método del rectángulo equivalente.....	35
7.	Pase redondo obtenido por el método del tapón simple.....	38
8.	Ovalo guiador de radio simple.....	40
9.	Reducciones. a) cuadrado-óvalo, b) óvalo-cuadrado	42
10.	Método para producir impedimento de flujo lateral.....	46
11.	a) Relaciones geométricas de un elemento que está sufriendo deformación plana por laminación. b) Fuerzas que actúan sobre el elemento.	48
12.	Valores de $Q_p$ para encontrar la carga de laminación.....	51
13.	Resistencia a la deformación plana homogénea de aceros aleados y ordinarios suaves a diferentes temperaturas y velocidades de deforma-	

#	Pág.
ción, para barras laminadas sin impedimento lateral y grandes espesores comparados con la longitud de contacto.....	52
14. Resistencia a la deformación plana homogénea del acero medio y duro a diferentes temperaturas y velocidades de deformación para barras laminadas sin impedimento lateral y espesores grandes comparados con la longitud de contacto	53
15. Posición en el arco de contacto entre la barra y el rodillo donde se supone que actúa la carga de laminación.....	56
16. Fuerza generada por la fricción en los cuellos	57
17. Vista magnificada de dos superficies, aparentemente lisas, en deslizamiento.....	60
18. Compatibilidad de varias combinaciones de metales.....	61
19. Cinética de formación de cascarilla.....	65
20. Fluctuaciones de temperatura durante la primera revolución del cilindro.....	68
21. Excelente método de enfriamiento de rodillos con cuerpos perfilados.....	70
22. Modos de enfriamiento alrededor de la circunferencia del rodillo para tres tipos de molinos	71
23. Efecto de varios elementos sobre la profundidad enfriada (chill) de hierro fundido enfriado...	76
24. Efecto del contenido de carbono sobre la dure-	

#		Pág.
	za Shore de la superficie del barril y la resistencia tensil del corazón de rodillos de hierro enfriado.....	76
25.	Examen total del efecto del cromo y níquel sobre la dureza superficial y profundidad blanca de un rodillo de hierro enfriado con alrededor de 3% de carbono.....	78
26.	Efecto relativo de varios elementos aleantes sobre la resistencia del hierro blanco al fisuramiento en caliente en repetidos enfriamientos con agua desde 600 °C.....	82
27.	Efecto de la cementita y del grafito sobre la conductividad térmica del hierro.....	84
28.	Apariencia de la fractura de un rodillo de hierro enfriado.....	85
29.	Clasificación de rodillos de hierro enfriado en base a la estructura de la matriz en la superficie de trabajo y método de producción....	86
30.	Estructura en la capa blanca de un rodillo de hierro enfriado del tipo martensítico.....	90
31.	Clasificación de rodillos de hierro fundido conteniendo hojuelas de grafito; en base de la matriz en la superficie de trabajo y método de producción.....	91
32.	Estructura en la capa exterior de un rodillo de hierro fundido con hojuelas de grafito (ro-	

#	Pág.
	93
33.	97
34.	100
35.	103
36.	105
37.	106
38.	107
39.	108
40.	109
41.	110
42.	113
43.	

#	Pág.
ultrasónica longitudinal.....	117
44. Inspección de fallas en un rodillo con sonda ultrasónica cortante.....	117
45. Explicación gráfica de la rugosidad de una superficie y sus términos.....	119
46. Escleroscopio en posición para medir la dureza del barril de un rodillo.....	121
47. Microestructura de hierro dúctil; nódulos de grafito y lagunas de cementita en matriz perlítica. C 2-2.....	125
48. Microestructura del rodillo C 2-3 Grafito nodular irregular y lagunas de cementita en matriz perlítica	126
49. Microestructura del rodillo C 1-2.....	126
50. Posición y longitud aproximada del rechupe en el rodillo C 1-3.....	129
51. Osciloscopio detectando un rechupe en el rodillo C 1-3.....	129
52. Molino de laminación trío de la ESPOL.....	130
53. Forma de los pases en el molino de laminación	139
54. Posición y magnitud de la carga que da los esfuerzos máximos en los cuellos de los rodillos, durante el proceso de laminación.....	143
55. Posición y magnitud de la carga que da los esfuerzos máximos en el barril del rodillo, durante el proceso de laminación.....	143

#		Pág.
56.	Posición y magnitud de la carga que produce deflexión máxima.....	147
57.	Diagrama de momentos transformado.....	147
58.	Colocación de molde para rodillo en una fosa para facilitar el colado.....	151
59.	Detalle del cubilote de 550 mm de diámetro interior del Taller de Fundición de la ESPOL....	152
60.	Centrado del modelo en el molde.....	152
61.	Dimensiones del modelo para fundir los rodillos	153
62.	Moldeo de rodillos de laminación.....	154
63.	Molde armado de rodillo de laminación, en proceso de fraguado.....	154
64.	Colado desde la olla a los moldes a través del bebedero.....	155
65.	Colado desde la olla a los moldes directamente por la mazarota.....	156
66.	Dimensiones de la galleta que va colocada sobre el modelo del rodillo.....	158
67.	Colado de metal en un segundo molde para rodillo.....	158
68.	Cilindros de laminación en bruto.....	160
69.	Desbaste de cilindros de laminación.....	162
70.	Operador de torno verificando el perfil de un pase con una plantilla durante el torneado de un rodillo de laminación.....	162



## INDICE DE TABLAS

#		Pag.
I	Ensayo de dureza.....	122
II	Ensayo de impacto Charpy.....	123
III	Ensayo de tensión.....	124
IV	Dureza superficial de los rodillos.....	125
V	Análisis químico.....	127
VI	Tabla de conversión de durezas preparada por el Comité Técnico de la Asociación de Fundidores de Rodillos, Siegen, Ale- mania.....	164

## INTRODUCCION

Con la crisis económica actual, los pequeños industria - les dedicados a actividades como la fundición y el maqui - nado encuentran que resulta atractivo fabricar piezas que compitan con las importadas. Las piezas de hierro nodu - lar constituyen una cantidad importante de esta demanda.

El desarrollo tecnológico e industrial en el Ecuador es muy dependiente de la preparación de los técnicos naciona - les y de la transferencia de tecnología requerida para - implementar nuevos procedimientos de fabricación o mejo - rar los ya existentes.

Limitaciones de orden económico obligan a adoptar solu - ciones alternativas, no necesariamente las más adecuadas, para la consecución de la mejor calidad del material pro - ducido.

Los objetivos que se persiguen en el presente trabajo - son, entre otros, los siguientes:

- 1) Construcción de rodillos de hierro nodular para un moli - no de laminación experimental que se usará, junto con otras máquinas, en la enseñanza práctica de algunos pro - cesos de producción.
- 2) Desarrollar tecnología apropiada para la fabricación de dichos rodillos.
- 3) Estudiar brevemente el mercado nacional de rodillos de laminación y la proyección industrial del procedimiento

que se emplea aquí para su fabricación.

## CAPITULO I

### 1. ANALISIS DEL PROBLEMA

#### 1.1 DESARROLLO DE TECNOLOGIA

La demanda nacional de rodillos de laminación en caliente está completamente desatendida por producción local. Corresponde entonces iniciar el desarrollo de su tecnología de fabricación. Algunas de las consecuencias positivas serían:

- 1) Abastecimiento del mercado a través de la formación de empresas fabricantes de rodillos de hierro nodular para laminación en caliente.
- 2) Formación de empresas laminadoras pequeñas.
- 3) Confianza del empresario en la ingeniería ecuatoriana.
- 4) Desarrollar tecnología metalúrgica.

El procedimiento propuesto es relativamente económico. El horno a usar es el de cubilote, de cuya operación se tiene suficiente conocimiento. Aunque barato, este horno presenta desventajas con respecto a hornos eléctricos en lo concerniente a la calidad de la fundición obtenida.

La adaptación de este proceso, exige entre otras cosas:

-el uso de una cuchara que pueda contener el volumen

necesario para llenar la pieza a fundir (rodillo, mazarota y bebedero). Es en esta cuchara donde se inoculará el magnesio para la obtención de hierro nodular.

- experiencia o adecuado entrenamiento para la determinación precisa de parámetros como: temperatura de colado a la cuchara y a los moldes, forma de colado, tiempo de modificación, etc.
- preparación de moldes cilíndricos y modelos de poliuretano.
- uso de chatarra de hierro nodular
- y para la optimización del proceso se debe usar un antecrisol para homogenizar la colada cuando se desee que determinada cantidad de rodillos tengan aproximadamente la misma calidad.

### 1.1 ESTUDIO DEL NIVEL TECNOLÓGICO

En vista de que el nivel tecnológico en nuestro país no ha variado mayor cosa desde 1983, el informe final sobre Análisis del Mercado y Preparación de Proyectos de Fundición (para el Ecuador), por Mikko Hakka, experto ONUDI, da luz para tratar el problema de la escasa participación nacional de piezas fundidas en el mercado nacional.

Efectivamente, el bajo nivel de conocimiento de la tecnología de fundición es uno de los aspectos prin-

cipales y que más preocupa, así como también la negligencia de los gobiernos ante la dependencia tecnológica nuestra. Se citan sendos ejemplos, con el fin de dar una idea más clara de lo indicado.

a) Para 1987, la demanda de piezas fundidas ferrosas en el Ecuador se calculaba en 7990 toneladas métricas de las cuales tan solo 600 serían producidas localmente.

b) El fomento a la pequeña industria en los últimos años ha disminuído.

Consecuentemente, la importancia en países como el nuestro de crear fábricas donde se transformen los metales en bruto a piezas que se usen en la industria es vital e ineludible para su desarrollo.



BIBLIOTECA



## CAPITULO II

### 2. RODILLOS DE LAMINACION

#### 2.1 PRINCIPIOS BASICOS

Proceso de laminación en caliente.- Cuando una barra de acero caliente es pasada entre dos rodillos de una caja de laminación, entonces se habrá hecho un trabajo al reducir la sección de dicha barra. A este proceso se lo conoce como laminación en caliente.

Como ilustración, en la figura 1 la barra entra en contacto con los rodillos en el punto 1 y los deja en el punto 2. Inicialmente el metal tiene un ancho  $w_1$ , sección transversal  $A_1$ , velocidad  $v_1$ , espesor  $h_1$ , longitud  $l_1$  y al final, anchura  $w_2$ , sección transversal  $A_2$ , velocidad  $v_2$ , espesor  $h_2$  y longitud  $l_2$ .

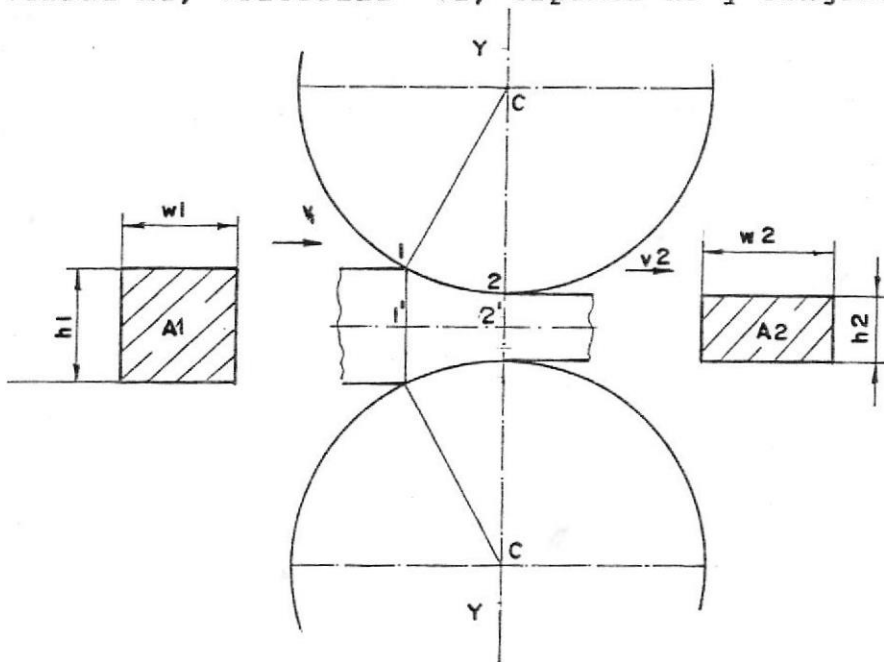


Figura 1. Zona de deformación durante el laminado.

La reducción de área se expresa como un porcentaje del área inicial, esto es,  $(A_1 - A_2)/A_1 \times 100$ .

Elongación.- Asumiendo que el mismo volumen de metal entra y sale de los rodillos, una reducción en área debe estar acompañada por un alargamiento de la barra.

Esta elongación es expresada como la relación de la longitud final a la inicial o como un porcentaje de la longitud inicial. El factor de elongación es  $E = L_2/L_1$  y este es siempre mayor que 1. El porcentaje de elongación es  $(E-1) \times 100$  o  $(L_2 - L_1)/L_1 \times 100$ .

Ensanchamiento.- Cuando el acero es comprimido entre los rodillos se moverá obviamente en la dirección de menor resistencia, de tal manera que no hay solamente flujo longitudinal sino también flujo lateral. Este flujo lateral es llamado ensanchamiento. El ensanchamiento absoluto es  $w_2 - w_1$ , es decir el cambio de anchura durante el pase. El ensanchamiento es también expresado como un factor de ensanchamiento o como un porcentaje y el factor de ensanchamiento es  $w_2/w_1$  mientras que el porcentaje de ensanchamiento es  $(w_2 - w_1)/w_1 \times 100$ .

Área de contacto, ángulo de contacto y ángulo de mordido.- Observando nuevamente la figura 1, se verá que en el plano de entrada la barra contacta con la-

superficie del rodillo, en el punto 1. Si este punto es unido con el centro del rodillo C, entonces el ángulo  $\alpha$ , formado por el radio 1-C y el eje Y-Y de los rodillos es llamado ángulo de contacto. Este ángulo crecerá conforme la altura de la barra sea mayor, hasta un punto donde los rodillos ya no muerdan o agarren la palanquilla. Este ángulo límite es algunas veces llamado ángulo de mordido.

El arco 1-2 es llamado arco de contacto. El área sobre la cual se establece el contacto entre el rodillo y la barra es el área de contacto.

## 2.2 CONSIDERACIONES GENERALES PARA EL DISEÑO DE RODILLOS DE LAMINACION

Fricción.- Cuando una palanquilla es introducida a un par de rodillos rotando, se establece una fuerza de fricción a lo largo de la tangente a los rodillos en el punto de contacto. Si la barra está moviéndose más lentamente que la periferia de los rodillos cuando se acerca, entonces la fuerza de fricción tenderá a tirar a esta hacia la abertura de los rodillos. Si el caso contrario ocurre, habrá una fuerza que se opondrá a la entrada de la barra e instantáneamente reducirá la velocidad de la misma, con lo cual la fuerza friccional cambiará de dirección y tenderá a meterla entre los rodillos.

Refiriéndose a la figura 2, el primer contacto entre los cuerpos ocurre en el punto 1, y las fuerzas mostradas son aquellas actuando sobre la barra (fuerzas iguales en magnitud pero opuestas en dirección actuarán sobre los rodillos).

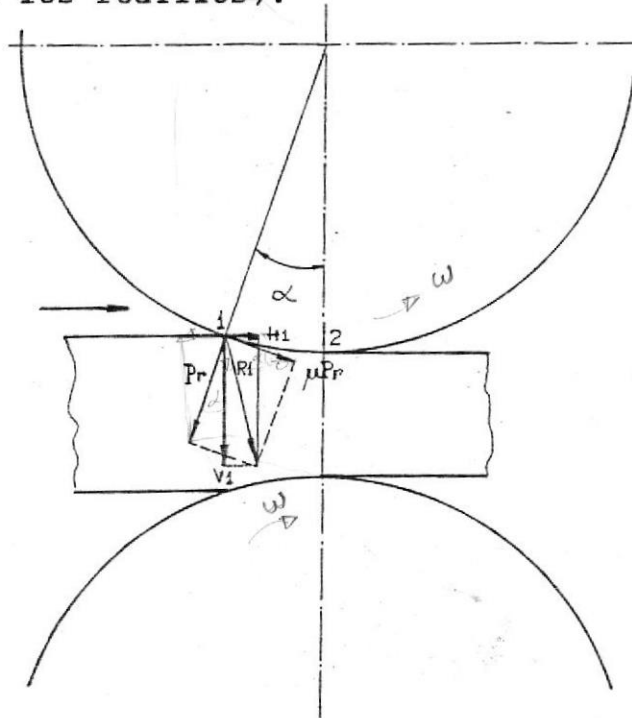


Figura 2. Descomposición de las fuerzas que actúan sobre la barra durante el laminado

La fuerza radial es  $P_r$  que comprimirá la barra, la fuerza tangencial es  $\mu P_r$ , siendo  $\mu$  el coeficiente de fricción entre barra y rodillos.  $\mu$  es siempre menor que 1, de tal manera que  $\mu P_r$  es alguna fracción de  $P_r$ . La resultante de  $\mu P_r$  y  $P_r$  es  $R_l$  que a la vez es resuelta en componentes horizontal y vertical  $H_1$  y  $V_1$  respectivamente. Las dos fuerzas opuestas  $V_1$  darán una acción comprensiva balanceada sobre la barra mientras que aquellas dos fuerzas  $H_1$  la empujarán para someterla a dicha acción.

La condición gobernante para que la barra sea aceptada o rechazada es fácil de encontrar por considerar la derivación de H1, entonces: La componente horizontal de Pr es Pr sen  $\alpha_1$ , y ésta actúa hacia afuera de la abertura entre los rodillos, mientras que la de  $\mu Pr$  es  $\mu Pr$  cos  $\alpha_1$  y tiene dirección contraria a la anterior. Si  $\mu Pr$  cos  $\alpha_1$  es mayor que Pr sen  $\alpha_1$ , la palanquilla será aceptada.

$$\mu > \frac{Pr \text{ sen } \alpha_1}{Pr \text{ cos } \alpha_1}$$

$$\mu > \text{tg } \alpha_1 \quad (2.1)$$

$$\text{tg } \alpha_1 = \frac{2 (R(h_1-h_2))^{1/2}}{(2R-h_1+h_2)}$$

$$\mu > \frac{2 (R(h_1-h_2))^{1/2}}{(2R-h_1+h_2)}$$

$$\mu > \frac{(2D (h_1-h_2))^{1/2}}{D - (h_1+h_2)} \quad (2.2)$$

En la práctica muchos diseñadores de rodillos toman el máximo ángulo de mordido como 22,5 - 24° sin rugosidad artificial.

Collares y Pases. - En la figura 3 se muestra un dibujo de dos rodillos correctamente acoplados. Es una sección a través del plano vertical del centro de

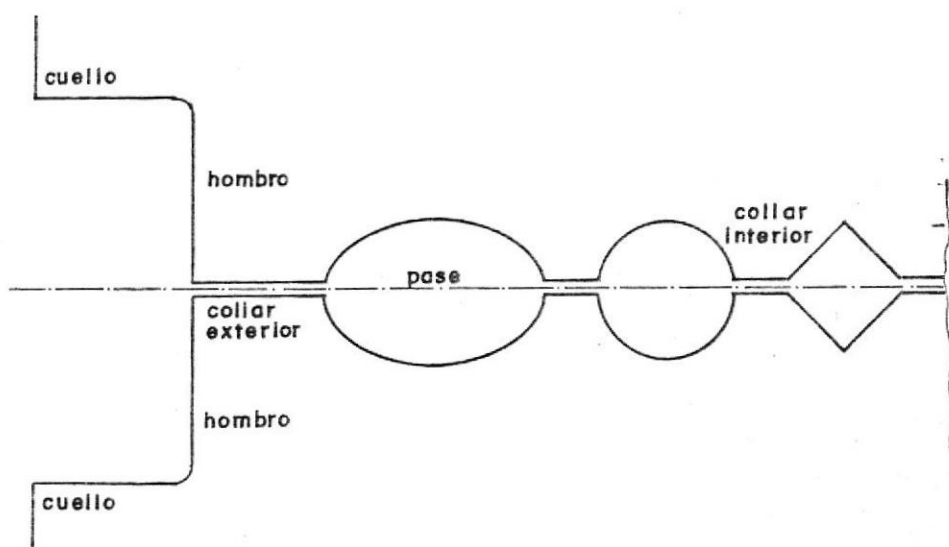


Figura 3. Pases, collares, hombros y cuellos en rodillos de laminación

los mismos y muestra los pases y los collares. Los pases pueden ser también referidos como huecos o canales y son los espacios por los que el material laminado sale, sufriendo el correspondiente cambio en su configuración. Cada pase es separado de sus vecinos por collares. Los collares entre los pases extremos y los hombros del rodillo son llamados collares exteriores y los restantes collares interiores. La anchura de los collares exteriores es a menudo determinada de tal forma que la barra pueda ser manipulada en el pase sin interferir con el espacio que pueda ser requerido para una caja guidora. Las dimensiones de los collares interiores dependerán de la resistencia del material del rodillo y del tipo de pase.

Resistencia del rodillo.- Cuando se encuentra en ser

vicio, la fuerza separadora, torque motriz y flexión de los rodillos originan esfuerzos de compresión, corte y tensión respectivamente. Un análisis de estos esfuerzos no es simple, será suficiente considerar flexión y torsión juntos y corte separadamente. La compresión directa es ignorada en laminación en caliente excepto cuando la deformación del radio del rodillo afecta la carga de laminación.

a) Esfuerzo de corte directo

El esfuerzo de corte generado por una carga  $P$  usada para laminar una barra en un canal determinado, es  $P$  para el área de la sección transversal en este punto, por tanto:

$$\text{Esfuerzo de corte} = \frac{4 P}{\pi D^2} \quad (2.3)$$

siendo  $D$  el diámetro de esta sección. La resistencia en corte deberá ser,

$$S_s > \frac{4 P}{\pi D^2} \quad (2.4)$$

b) Esfuerzo de flexión

El esfuerzo de flexión,  $f_b$ , en cualquier punto del cilindro está dado por la siguiente fórmula:

$$f_b = \frac{\text{Momento de flexión } M \times \text{distancia desde el centro } c}{\text{Momento de inercia de la sección transversal } I}$$

de allí que el esfuerzo máximo es,

$$fb \text{ máx} = \frac{M \times D/2}{I} \quad (2.5)$$

ya que en este caso  $I = \frac{\pi \times D^4}{64}$ , se tiene:

$$fb \text{ máx} \approx \frac{M}{0,1 D^3} \quad (2.6)$$

Con respecto a la flexión se deben considerar:

i) Propiedades especiales del hierro fundido

La estructura del hierro fundido hace que el material en el centro del rodillo tome una más alta proporción de la carga que aquella sugerida por la distribución lineal anterior. El material en la periferia absorbe menos esfuerzo y para compensar esto, fb máx tiene un valor

de  $\frac{M}{0,17 D^3}$  en lugar de  $\frac{M}{0,1 D^3}$

que se usa para acero.

ii) Concentración de esfuerzos

La concentración de esfuerzos causada por cambio en la sección transversal, magnifica el esfuerzo al cual el material está sujeto.

Trinks (3) ha determinado curvas para el factor de concentración de esfuerzos en función de la relación  $r/d$ , para valores dados de la relación  $d/D$  (figura 4). Estos datos se re-

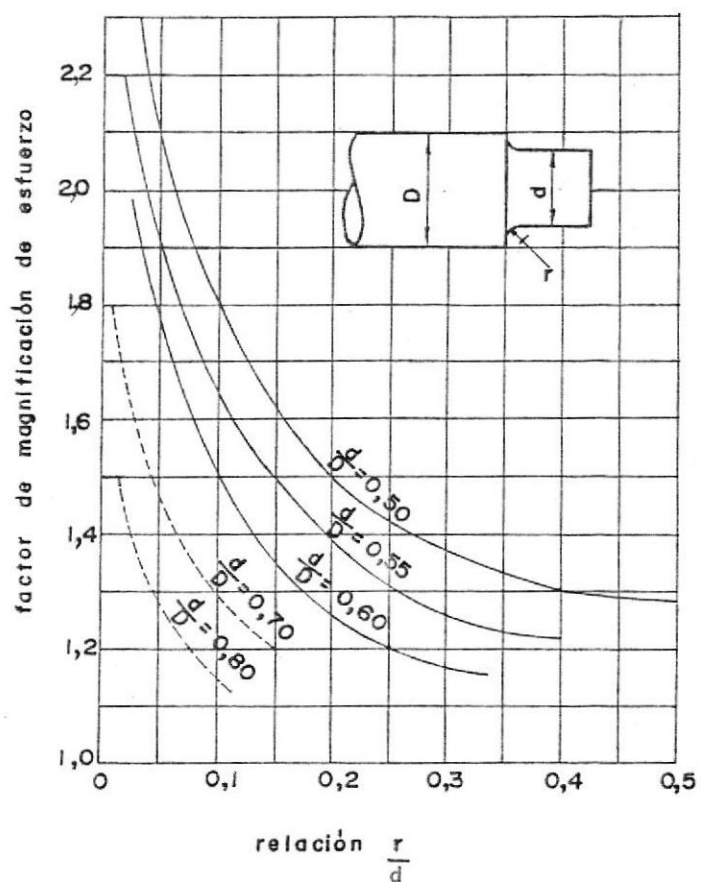


Figura 4. Curvas para determinar el factor de magnificación de esfuerzos (1)

fieren particularmente al caso entre el cuello y el cuerpo del rodillo. Trinks establece el uso de estos factores para aceros aleados, pero para aceros de bajo carbono solamente el 60% de este valor y con hierro fundido, 35%.

### iii) Fatiga

La rotación de los cilindros resulta en inversión continua de esfuerzos que pueden causar la falla, por lo cual se debe aplicar un

factor de seguridad para contrarrestar este efecto. Es usual tomar la resistencia a la fatiga como la mitad de la resistencia normal.

c) Esfuerzo torsional

El torque requerido para girar los rodillos con una carga de laminación produce esfuerzos de torsión  $ft$  que en cualquier posición pueden calcularse mediante la siguiente expresión:

$$ft = \frac{\text{Torque } t \times \text{distancia desde el eje central } c}{\text{Momento polar de inercia } J}$$

siendo en este caso  $J = \frac{\pi D^4}{32}$ , se llega a

$$ft = \frac{16 T}{3 \pi D} \quad (2.7)$$

d) Esfuerzo combinado y factor de seguridad total

De las teorías alternativas que existen para evaluar el esfuerzo generado cuando un cilindro está operando bajo flexión y torsión simultáneamente, aquella dada por Rankine (3) arroja el mayor factor de seguridad. Según esta hipótesis, un torque equivalente se halla para tomar en cuenta el efecto de la flexión, este es,  $T_e = M + (M^2 + T^2)^{\frac{1}{2}}$  donde  $M$  es el momento flexionante y  $T$  es el torque en el punto en cuestión.

Existen parámetros que no pueden ser estimados exac-

tamente pero que afectan el rendimiento de los cilindros. El fisuramiento en caliente causado por calentamiento y enfriamiento alternado de partes, sobrecarga debido al mal calentamiento del acero, carga de impacto y defectos en el material del rodillo, obligan al uso de un factor de seguridad en el diseño; de hecho, un valor cauteloso de 3 se sugiere cuando no es posible un buen control de estas variables.

Deflexión de los rodillos.- La figura 5 muestra una palanquilla de anchura  $b$  sujeta a laminación a cargo de rodillos de longitud  $B$  y diámetro de barril  $D$ . La deflexión de los cilindros es causada por la flexión y el corte. Para la derivación de las correspondientes fórmulas de cálculo, se los considera como vigas simplemente apoyadas.

Si la longitud del cuello es  $n$  y la distancia entre las reacciones es  $L$  entonces el punto de soporte se toma tal que  $L = B + n$ .

La expresión para la deflexión debida a la flexión es:

$$\delta b = \iint \frac{M}{EI} dx dx \quad (2.8)$$

donde  $M$  es el momento flector,  $E$  es el módulo de Young e  $I$  es el momento de inercia del barril del rodillo.

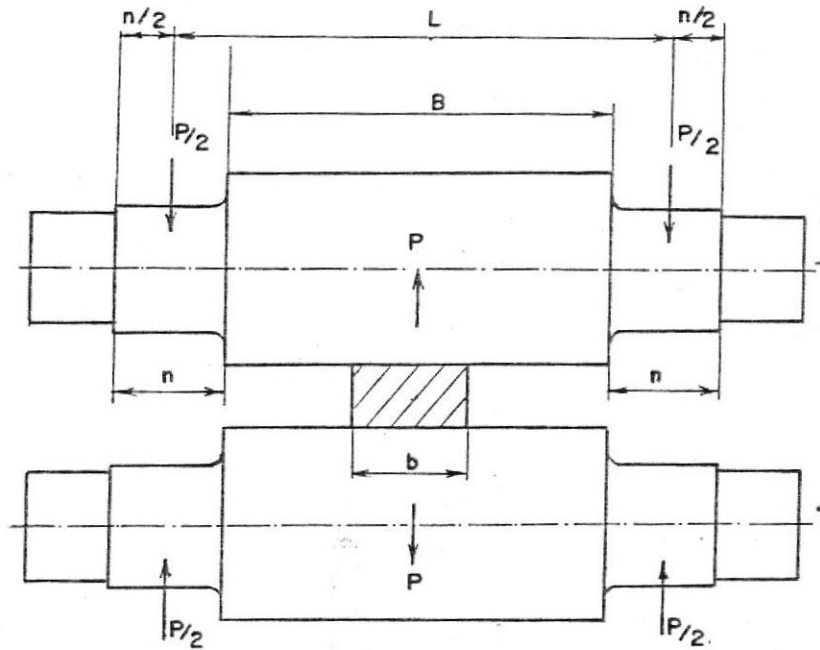


figura 5. Actuación de la carga durante el laminado de una palanquilla (1)

Para la deflexión por corte se tiene

$$\delta_s = \int \frac{S}{CA} dx \quad (2.9)$$

donde S es la fuerza de corte, C es el módulo de rigidez y A la sección transversal del cilindro.

La deflexión total se encuentra con la suma algebraica de las anteriores, así:

$$\delta_{total} = \delta_b + \delta_s$$

Los cálculos correspondientes a los rodillos para el molino de laminación de la ESPOL se detallan en el apéndice A.

### 2.2.1 DISEÑO DE PASES

Cálculo del ensanchamiento.- Anteriormente ya

fue definido el ensanchamiento. Este flujo de material en ángulo recto en las direcciones de compresión y elongación, es una limitación sobre la reducción que se puede realizar. Es importante poder determinar este ensanchamiento con razonable exactitud.

Para hallar el ensanchamiento libre en lamina-  
ción plana, se puede usar una fórmula adecua-  
da sin inconvenientes, pero cuando se trata-  
de calcular dicho parámetro en pases diamante,  
cuadrado, óvalo, etc; las condiciones tienen  
que ser reducidas a unas similares en lamina-  
ción plana y esto es hecho por el método del  
rectángulo equivalente que se explica a conti-  
nuación.

La figura 6, muestra un óvalo entrando en un  
pase cuadrado (las esquinas agudas han sido  
mantenidas en este ejemplo).

Los perfiles intersecan sobre las verticales  
XX, YY, constituyendo la distancia entre es-  
tas líneas, la anchura  $w$  de los rectángulos e-  
quivalentes, mientras que sus alturas  $h_1$  y  $h_2$ ,  
se encuentran al dividir el área del óvalo y  
el cuadrado respectivamente por  $w$ .

Queda pues reducido el problema a encontrar

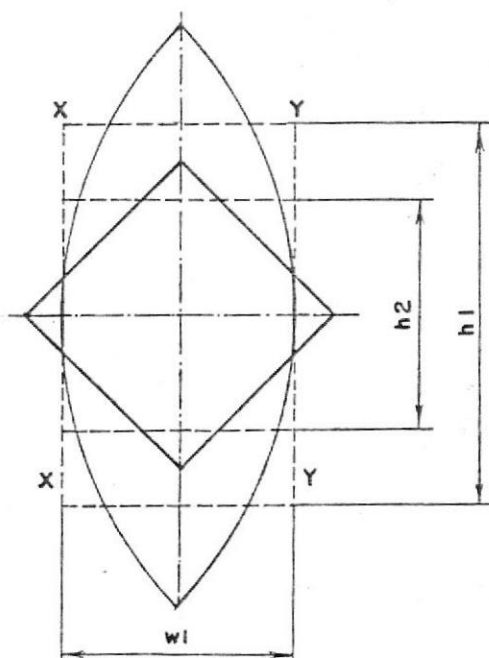


Figura 6. Método del rectángulo equivalente

el ancho  $w_2$  de una barra de altura  $h_2$ , cuando se lamina en rodillos de diámetro  $D'$  una palanquilla de altura  $h_1$  y ancho  $w_0$  (ancho original del óvalo).

× Hay muchas fórmulas disponibles para calcular el ensanchamiento. Aquí se emplea aquella concebida por Ekelund (18), que ha dado resultados aceptables; según ella:

$$X_0 = (R' (h_1 - h_2))^{1/2}$$

$$Y = 3,2 \mu X_0^2$$

$$Z = 2,4 X_0 (h_1 - h_2)$$

$$C = \frac{2(h_1 - h_2)}{h_1 + h_2}$$

$$D = \frac{w^2}{2B}$$

$$E = D + \log e w$$

$$F = E + C$$

$$\frac{w^2}{2B} + \log e w^2 = F \quad (2.10)$$

La incógnita  $w^2$  se puede encontrar rápidamente por tanteo.

Donde

$\mu$  = Coeficiente de fricción entre barra y rodillos

$R'$  = (Radio del barril + Espacio entre rodillos -  $h^2$ )/2

Producción de redondos.- La mayoría de los productos redondos son laminados por el método del "redondo guía" en el cual un óvalo conveniente es mantenido por guías, con el eje mayor vertical, alimentando el redondo acabado de manera que se forme en un pase, una sección redonda exacta. El óvalo llamado conductor, puede ser formado desde un cuadrado, un redondo o un óvalo panzón (óvalo que ha sufrido trabajo lateral), los cuales a su vez se producen en el canal preparador. Para conseguir llegar a este pase antepenúltimo son variadas las secuencias que pueden seguirse,

entre ellas tenemos: diamante-cuadrado, óvalo-cuadrado, óvalo-redondo, óvalo-óvalo, panzón-óvalo. Lógicamente, la palanquilla de arranque y el número de pases disponibles influenciarán directamente en el diseño usado.

El pase acabador.- La reducción tomada en un pase acabador puede variar desde 12 al 16% y el valor verdadero dependerá del óvalo guíador.

El pase redondo final es cortado igualmente en los dos rodillos, de los 3 métodos disponibles para hacerlo adecuadamente, el de los 3 tapones probablemente no será usado a menos que se requieran redondos de alta precisión, el de doble tapón es favorable para uso general, y el de tapón simple es como su nombre pero con alguna desventaja. Se describe este último.

a) Método del tapón simple.- El pase es torneado al tamaño de la varilla acabada en caliente, entonces la profundidad del corte es  $1/2$  (diámetro de la barra en caliente - abertura entre rodillos). Los lados son aliviados una cantidad específica y la exactitud del trabajo depende enteramente de la habilidad del tornero de rodillos.

El tapón es una herramienta cilíndrica acorde con el tamaño del redondo.

Las esquinas agudas son removidas del pase redondo final por el uso de pequeños radios, por ejemplo: alrededor de 1/32" para diámetros de hasta 1" y 1/16" para diámetros desde 1" a 1 1/2".

El tamaño de la barra en caliente es encontrado con una constante de expansión así:

$$\text{tamaño en caliente} = (1 + 0,00012 \times \text{calda de temperatura } ^\circ\text{C}) \times \text{tamaño en frío}$$

En la figura 7, se muestra un canal similar al descrito. Nótese que el máximo desgaste tiene lugar en los hombros.

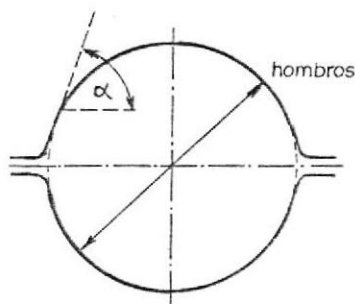


figura 7. Pase redondo obtenido por el método del tapón simple (1)

Ovalo guiador. - Teóricamente, la forma que más se acerca a un redondo es un óvalo, y da por lo mismo mejor producto acabado.

Tiene el inconveniente de ser difícil de mantener en guías fijas a menos que ellas estén muy ajustadas, lo cual introduce el riesgo de marcamiento de la superficie de la varilla.

Winton (3) da las siguientes ecuaciones para la anchura  $W$  y el espesor  $T$  del óvalo, en función del diámetro nominal  $D_c$  del redondo en frío:

$$W = 1,26 D_c + 0,1 \quad (2.11)$$

$$T = 1,00 D_c - 0,1 \quad (2.12)$$

La reducción de óvalo a redondo recomendada por Kirchberg (3) es alrededor de 12% pero Trinks puntualiza que esta debería ser variable dependiendo del tamaño del redondo, tolerancia, etc. y sugiere 5 a 15%, correspondiendo el valor más alto al caso de secciones pequeñas.

Un óvalo guiador de radio simple está formado de dos arcos iguales y simétricos con respecto a la horizontal y cuyos radios de curvatura se encuentran sobre la línea central vertical, tal como se muestra en la figura 8. Esta forma de óvalo es recomendada para barras de hasta 1 1/2" de diámetro. El área aproximada de un óvalo de ra-

radio simple es  $\pi/4.W.T$

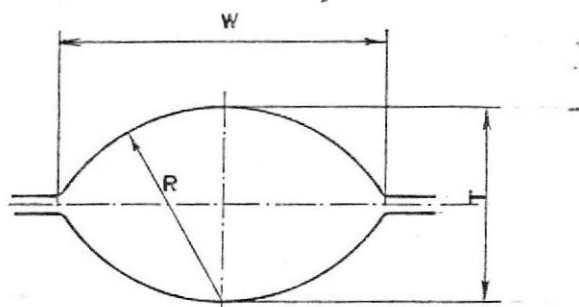


figura 8. Ovalo guiador de radio simple

El pase preparador.- Aquel pase que precede al guiador puede tomar varias formas, dependiendo de la secuencia usada para llegar a él; se describen dos de ellas:

- a) Preparador cuadrado.- Es importante que el pase cuadrado de un óvalo <sup>quede</sup> correctamente llenado para evitar luego defectos superficiales en el redondo final. Muchas reglas y fórmulas relacionan el tamaño del cuadrado con el del redondo, por lo que aquella entre el óvalo y el cuadrado se puede encontrar fácilmente.

El lado del cuadrado preparador puede estar dado al multiplicar el tamaño en caliente del redondo por 1,1 obteniéndose se entonces una reducción total desde

cuadrado a redondo de 35%.

Para redondos muy pequeños los cuadrados típicos son:

Tamaño de redondo Dc (")	Lado del cuadrado (")
0,5	0,562
0,875	1,016
1,00	1,156
1,125	1,281

b) Preparador redondo.- El que un redondo sea el pase antepenúltimo implica una ligera reducción hasta el producto acabado y valores típicos podrían ser: 23% para los tamaños pequeños y 30% para los más grandes.

Hay la ventaja en este caso de que no se inducen defectos posteriores.

Secuencias que llevan al pase preparador.- Hay varias secuencias que pueden ser usadas para alcanzar el canal antepenúltimo. Saber cual de ellas es la más satisfactoria en un caso particular, depende de consideraciones como: reducción promedio necesaria para conseguir desde la palanquilla el producto terminado, tipo de acero que se laminará y la calidad deseada.

a) Secuencia óvalo-cuadrado.- Esta es una secuencia de alta reducción. La laminación en este estado básicamente comprende colocar un cuadrado de plano en un óvalo y luego voltear  $90^\circ$  este último para meterlo en un cuadrado que tiene su diagonal vertical (figura 9 a y b).

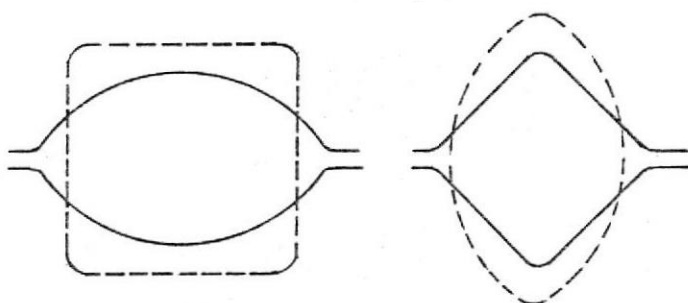


figura 9. Reducciones. a) cuadrado-óvalo, b) óvalo-cuadrado

La reducción que se puede alcanzar de cuadrado a óvalo es de hasta 42% y de óvalo a cuadrado de hasta 35%; desafortunadamente si se emplean estos porcentajes, la formación de arrugas y defectos superficiales (resultantes de elongación diferencial entre el centro y los extremos) en el óvalo son bastante probables y se recomienda por lo tanto tener cuidado con las reducciones a tomar.

Otro inconveniente con esta secuencia es que es difícil asegurar un cuadrado simétrico en el canal penúltimo porque frecuentemente dos esquinas agudas y dos redondeadas son obtenidas luego de que los cuadrados anteriores corren oblicuamente en los óvalos.

Los óvalos usados deben guiar de manera exacta y natural por lo que tendrían que ser relativamente planos, aunque una comparación práctica de Morgan y Swedish (3) muestra el uso de un óvalo panzón, con el siguiente comentario sobre ello: la relación de ancho a espesor, está usualmente entre  $2 \frac{1}{4}$  a 1 y  $3 \frac{1}{2}$  a 1. Con el interés de calidad la relación ancho a espesor es a menudo limitada a 3:1.

→ Cuando se opera en la región de máxima reducción los canales deben ser determinados como a continuación se explica: la similitud entre cuadrados es tal que el más grande tiene un lado que es igual a 1,56 por aquel del pequeño. Trabajando con un poco de seguridad una relación lado a lado de 1,5 es buena. Pa-

ra encontrar el óvalo que será llenado por el cuadrado más grande se tiene:

Ancho del óvalo =  $1,53 \times$  lado del cuad.

Altura del óvalo =  $0,53 \times$  lado del cuad.

Así también el óvalo que da origen al cuadrado más pequeño tiene las siguientes dimensiones:

Ancho del óvalo =  $2,3 \times$  lado del cuad.

Espesor del óvalo =  $0,8 \times$  lado del cuad.

Para reducciones pequeñas, se deben diseñar óvalos de mayor espesor porque habrá menos ensanchamiento para llenarlos y la forma correcta de los mismos puede ser chequeada usando la teoría del rectángulo equivalente y una fórmula adecuada de ensanchamiento.

Un alemán, Brobot, muestra fórmulas ligeramente diferentes para óvalos en esta secuencia. La anchura está dada como tres veces el espesor.

Para grandes perfiles:

Lado del cuadrado pequeño =  $1,2$  por el espesor del óvalo

Ancho del óvalo =  $1,6$  por lado del cuadrado grande

Para pequeños perfiles:

Lado del cuadrado pequeño = 1,3 por el espesor del óvalo

Ancho del óvalo = 1,2 por lado del cuadrado grande

### 2.2.2 CALCULO DE CARGA, TORQUE Y POTENCIA

Teoría de deformación.- Hencky ha propuesto que para pequeñas deformaciones plásticas el desviador de tensiones puede considerarse proporcional al desviador de deformaciones

$$\sigma' = 2 G_p e' \quad (2.13)$$

En esta expresión se desprecian las deformaciones elásticas.  $G_p$  es un módulo de cizallamiento plástico que varía en función de los valores de tensión y deformación. A causa de la hipótesis de la invariabilidad de volumen  $e'' = 0$  y  $e' = e$ , por tanto la ecuación (2.13) se puede desarrollar en términos de las tensiones y deformaciones principales para dar.

$$e_1 = \frac{2\sigma_1 - \sigma_2 - \sigma_3}{6 G_p} \quad (2.14)$$

$$e_2 = \frac{2\sigma_2 - \sigma_1 - \sigma_3}{6 G_p} \quad (2.15)$$

$$e_3 = \frac{2\sigma_3 - \sigma_1 - \sigma_2}{6 G_p} \quad (2.16)$$

Deformación plana.- Cuando existe deformación en un plano y el alargamiento en la tercera dimensión es cero, tenemos deformación plana. Esto se puede conseguir por medio de una barrera como se muestra en la figura 10.

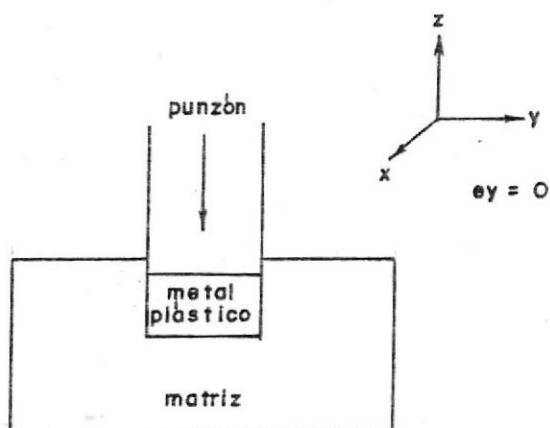


figura 10. Método para producir impedimento de flujo lateral, lubricando exteriormente, por ejemplo, la pared de una matriz. (4)

Aún cuando el alargamiento en una de las direcciones principales es igual a cero para la deformación plana, no se concluye de esto que exista una tensión cero en esta dirección. De la ecuación 2.16

$$\sigma_3 = \frac{(\sigma_1 + \sigma_2)}{2} \quad (2.17)$$

si se usa el criterio de fluencia de Von Mises

$$2\sigma_0^2 = (\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2 \quad (2.18)$$

$$2\sigma_0^2 = \frac{3}{2} (\sigma_1 - \sigma_2)^2$$

$$\frac{2}{\sqrt{3}} \sigma_0 = \sigma_1 - \sigma_2 \quad (2.19)$$

Análisis plástico del proceso de laminación (método del equilibrio).- Se hacen las siguientes asunciones:

- 1- El arco de contacto es circular; no hay de formación elástica de los cilindros.
- 2- El coeficiente de fricción es constante en todos los puntos del arco de contacto.
- 3- No hay ensanchamiento lateral por lo que la laminación puede estudiarse como un problema de deformación plana.
- 4- Las secciones verticales se mantienen planas.
- 5- La velocidad periférica de los cilindros es constante.
- 6- La deformación elástica del material que se lamina es despreciable frente a la deformación plástica.
- 7- Se cumple el criterio de la energía de distorsión para la deformación plana.

$$\sigma_1 - \sigma_3 = \frac{2}{\sqrt{3}} \sigma_0 = \sigma_0'$$

En la figura 11a), se muestran las relaciones geométricas entre los rodillos y un elemento que está sufriendo deformación plana por laminación.

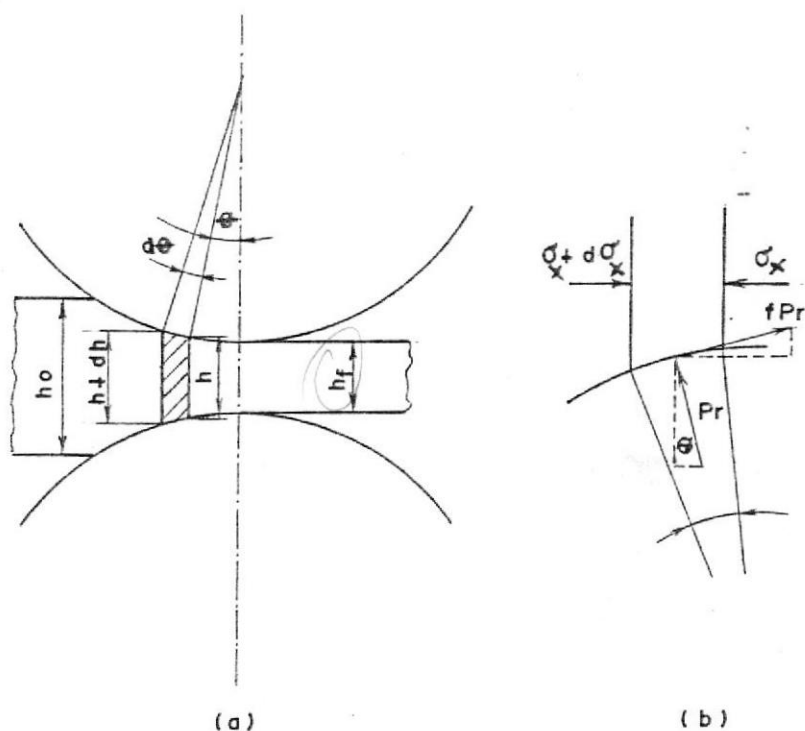


Figura 11. a) Relaciones geométricas de un elemento que está sufriendo deformación plana por laminación. b) Fuerzas que actúan sobre el elemento. (1)

En cualquier punto de contacto entre la chapa y la superficie del cilindro, indicado por el ángulo  $\theta$ , las tensiones que actúan son la radial,  $Pr$  y la tangencial  $\mu Pr$ . Estas tensiones se descomponen, en la figura 11b), en sus componentes horizontales y verticales. Se supone también, que la tensión  $\sigma_x$  está uniformemente distribuida sobre las caras verticales del elemento. La tensión normal en un extremo del elemento es  $Pr R d\theta$ , y la componente horizontal es  $Pr R \sin \theta d\theta$ . La fuerza de

fricción tangencial es  $\mu Pr R d\theta$  y su componente horizontal es  $\mu Pr \cos\theta d\theta$ . Sumando las fuerzas horizontales que actúan sobre el elemento de volumen, resulta:

$$(\sigma_x + d\sigma_x)(h + dh) + 2 \mu Pr R \cos\theta d\theta - \sigma_x h - 2 Pr R \sin\theta d\theta = 0$$

que se puede simplificar, para llegar a la ecuación de Von Karman

$$\frac{d(\sigma_x h / 2)}{dx} = 2 Pr R (\sin\theta \pm \mu \cos\theta) \quad (2.20)$$

Los signos positivo y negativo de la ecuación se deben a que el sentido de la fuerza de fricción cambia en el punto neutro (punto en el cual la velocidad del rodillo es igual a la del material).

✱ Cuando hay fricción con adherencia completa se puede escribir la ecuación 2.20 así:

$$\frac{d(\sigma_x h)}{dx} = 2 R (Pr \sin\theta \pm \sigma \sigma' \cos\theta)$$

Al desarrollar la teoría actualmente más aceptada de la laminación, supone Sims (4) que hay adherencia perfecta y que todo el proceso puede compararse con la deformación entre placas rugosas y oblicuas. Para este último caso ha deducido Orowan (4) la siguiente ecuación:

$$\sigma_x = Pr - \frac{\pi}{4} \sigma \sigma' \quad (2.21)$$

Aceptando las aproximaciones,  $\sin\theta \approx \theta$  y  $\cos\theta \approx 1$ , la ecuación 2.21 toma la forma

$$\frac{dh}{d\theta} (Pr - \frac{\pi}{4} \sigma \sigma') = 2 RPr\theta \pm R\sigma \sigma'$$

Integrando la expresión anterior obtenemos:

Desde la entrada al punto neutro

$$\frac{Pr}{\sigma \sigma'} = \frac{\pi}{4} (1 + \ln \frac{h}{h_0}) + \left( \frac{R}{hf} \right)^{1/2} \text{tg} \left\{ \left( \frac{R}{hf} \right)^{1/2} \theta - \text{tg} \left( \frac{R}{hf} \right)^{1/2} \theta \right\} \quad (2.22)$$

Desde el punto neutro hasta la salida

$$\frac{Pr}{\sigma \sigma'} = \frac{\pi}{4} (1 + \ln \frac{h}{h_f}) + \left( \frac{R}{hf} \right)^{1/2} \text{tg} \left( \frac{R}{hf} \right)^{1/2} \theta \quad (2.23)$$

La carga de laminación  $P$ , se puede determinar matemáticamente con

$$P = R b \int_{\theta}^{\theta=\alpha} Pr d\theta \quad (2.24)$$

donde

$b$  = ancho de la chapa

$\alpha$  = ángulo de contacto

Sims ha demostrado que, cuando se hacen sustituciones en la ecuación 2.24, se obtiene

$$P = \sigma \sigma' b R (h_0 - h_f) Q_p \quad (2.25)$$

donde  $Q_p$  es una función complicada de la reducción de espesor y de la relación  $R/h_f$ . Para simplificar los cálculos se pueden obtener los valores de  $Q_p$  a partir de la figura 12. Las comparaciones disponibles relativos a la laminación en caliente muestran que las ecuaciones de Sims concuerdan dentro de  $\pm 15\%$ , con las cargas experimentales de laminación, en el 90% de los casos.

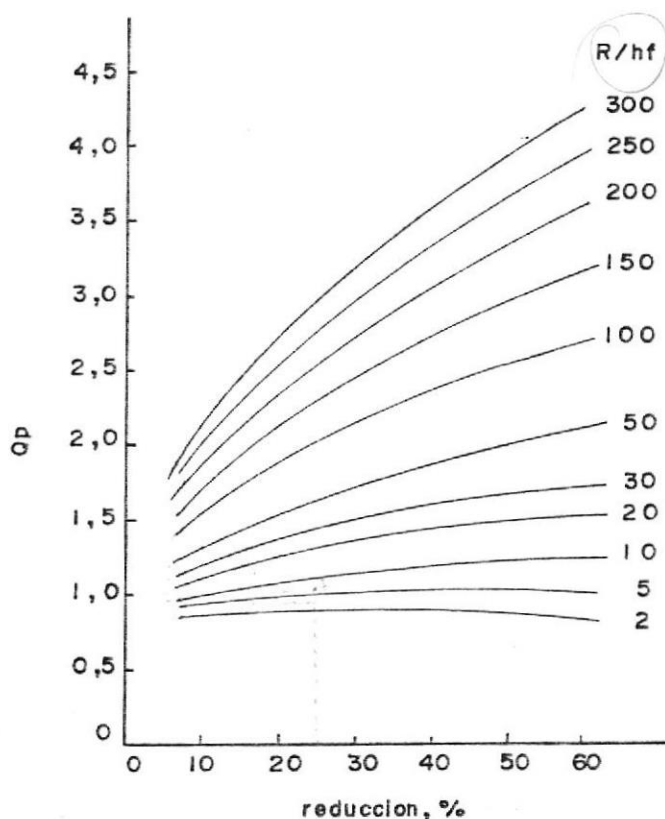


figura 12. Valores de  $Q_p$  para encontrar la carga de laminación.(4)

\* Las curvas de las figuras 13 y 14 muestran el efecto del material y de la temperatura sobre la resistencia a la deformación plana homogénea. Se aplican al laminado de secciones con ensanchamiento libre. Cuando este se restringe moderadamente, los experimentadores han encontrado que la presión aumenta en 35%, llegando a valores comprendidos entre 120 y 200% en el caso de que el ensanchamiento esté fuertemente limitado. La velocidad de deformación definida como  $\frac{1}{h} \frac{dh}{dt}$  en este caso se a-

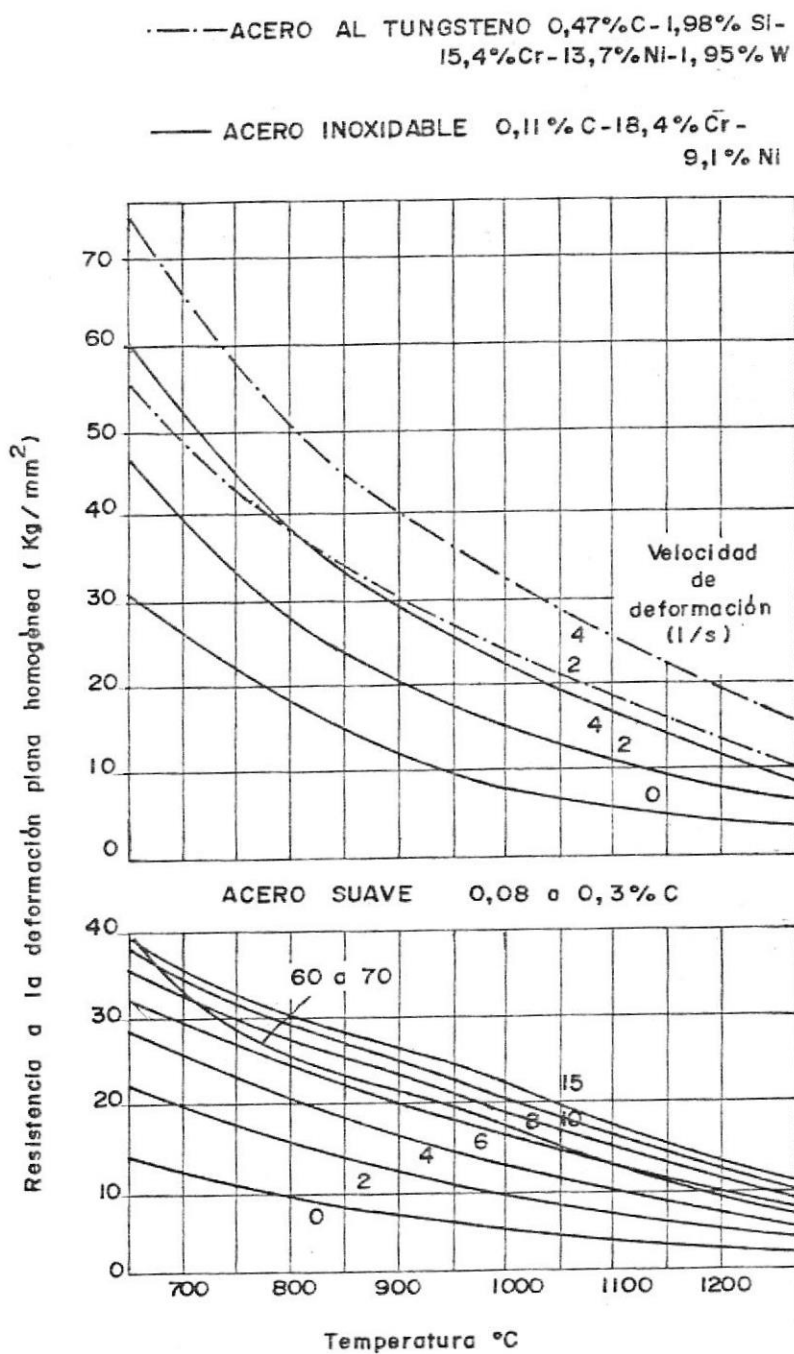


figura 13. Resistencia a la deformación plana homogénea de aceros aleados y ordinarios suaves a diferentes temperaturas y velocidades de deformación, para barras laminadas sin impedimento lateral y grandes espesores comparados con la longitud de contacto. Los valores para el acero ordinario suave se han deducido de ensayos de Pomp y Weddige, Lueg, Siebel y Fangmeier, Henneck, Riedl y datos del autor (3).

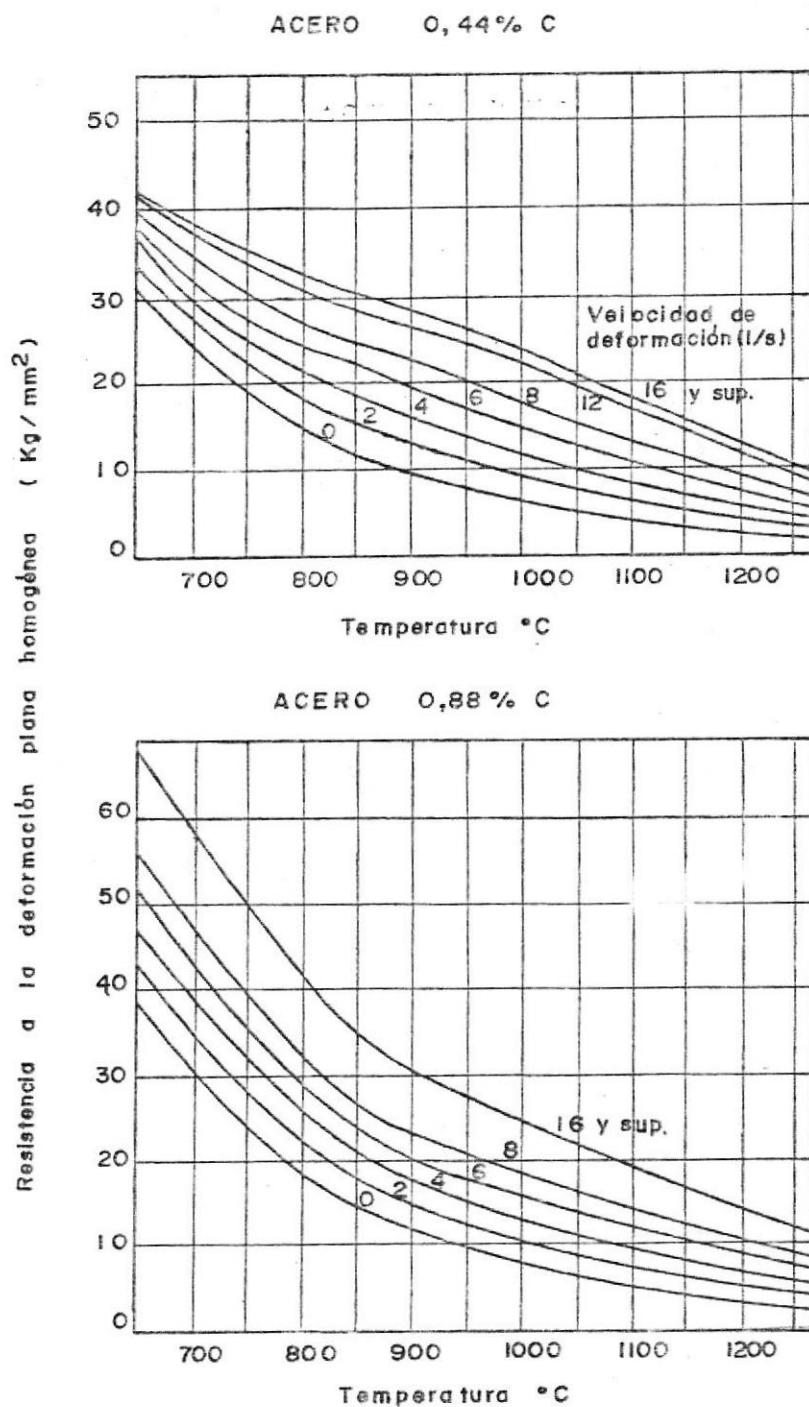


figura 14. Resistencia a la deformación plana homogénea del acero medio y duro a diferentes temperaturas y velocidades de deformación para barras laminadas sin impedimento lateral y espesores grandes comparados con la longitud de contacto (3).

proxima a:

$$\frac{h_1 - h_2}{h_1} \frac{1}{\text{tiempo de contacto}} \quad (2.26)$$

Cálculo de la carga de laminación con la fórmula de Ekelund en productos planos. - La fórmula empírica de Ekelund para el cálculo de la fuerza separatriz de los rodillos en productos planos es la más conocida de todas y la que da resultados más exactos. Tiene en cuenta los principales factores que influyen al respecto. La expresión es:

$$P = b_m \left( R(h_1 - h_2) \right)^{1/2} K_p + 2 \frac{e v \left( (h_1 - h_2) / R \right)^{1/2}}{h_1 + h_2} \left( 1 + \frac{1,6 \mu (R(h_1 - h_2))^{1/2} - 1,2 (h_1 - h_2)}{h_1 + h_2} \right)$$

siendo  $\frac{m_m^2 K_p}{\text{mm}^2}$  +  $\frac{K_p}{\text{mm}^2}$  +  $\frac{v \mu}{\text{mm/s}}$

$b_m$  = ancho medio

$K_p = (14 - 0,01 T \text{ } ^\circ\text{C}) (1,4 + \%C + \%Mn)$  resistencia a la deformación plana homogénea en  $\text{Kg/mm}^2$ .

$\epsilon = 0,01(14 - 0,01 T \text{ } ^\circ\text{C})$  coeficiente de plasticidad en  $\text{Kg/mm}^2$ .

$\mu$  = coeficiente de rozamiento externo

$\mu = (1,05 - 0,0005 T \text{ } ^\circ\text{C})$  para cilindros de acero basto o fundición gris

$\mu = 0,8(1,05 - 0,0005 T \text{ } ^\circ\text{C})$  para cilindros de fundición templada o de acero pulido duro

$v$  = velocidad de laminación en  $\text{mm/s}$ .

Aunque la presión media de laminación se puede calcular con buena aproximación, no se conoce como se distribuye realmente en la superficie de contacto. Si el esfuerzo entre los cilindros y la barra fuese uniforme, la fuerza resultante pasaría necesariamente por el centro de gravedad del área de contacto proyectada. Factores como rozamiento, variación de la velocidad de deformación, cambios en la temperatura de la barra, etc., desplazan la resultante fuera de este punto, de tal forma que, aumentan o disminuyen la magnitud del brazo del par. En la práctica, la carga  $P$  actúa en un punto a lo largo de  $AD$  (figura 15) y el brazo  $t$  está expresado como  $m (R(h_1 - h_2))^{1/2}$ . Dos autores alemanes, han mostrado que el valor de  $m$  puede variar desde 0,44 hasta 0,64. Para propósitos de diseño es suficiente emplear  $m = 0,5$ .

El torque de laminación será entonces:

$$2 P t = P (R(h_1 - h_2))^{1/2} \quad (2.27)$$

El par de rozamiento en los cuellos es igual al producto de la carga de laminación  $P$  por el coeficiente de rozamiento  $\mu$  y por el radio del cuello  $R$  (figura 16). En las condiciones

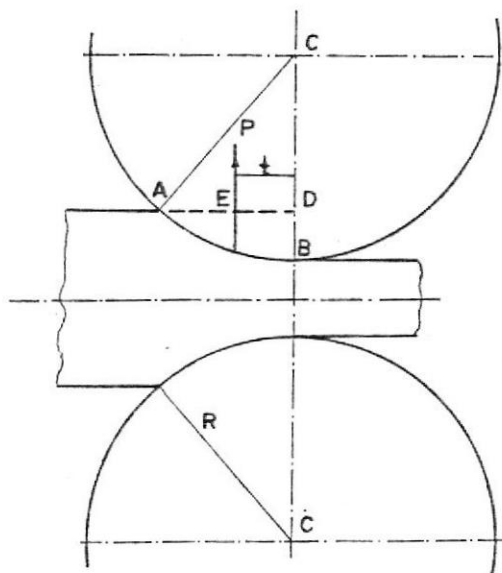


figura 15. Posición en el arco de contacto entre la barra y el rodillo donde se supone que actúa la carga de laminación.

normales de funcionamiento, el coeficiente de rozamiento ( relación de la fuerza tangencial a la normal ) en los cuellos no se puede determinar exactamente, al menos en los cojinetes de deslizamiento corrientes (suele tomarse  $\mu = 0,07$ )

El torque total absorbido por los cilindros será el torque de laminación más el de rozamiento en los cuellos, esto es

$$T = P \times (t + \mu R) \quad (2.28)$$

La potencia correspondiente se puede encontrar con la conocida fórmula

$$HP = \frac{2 \pi N T}{33000} \quad (2.29)$$

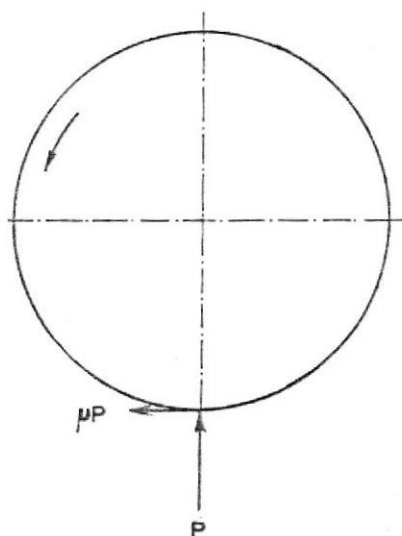


figura 16. Fuerza generada por la fricción en los cuellos

donde  $N$  es velocidad de laminación en R.P.M.  
y  $T$  el torque total en lb.pié.

### 2.3.1 MECANISMOS DE DESGASTE

En esta sección se discute el contacto entre sólidos. En muchos casos el daño resultante en la superficie es clasificado como desgaste.

Los tipos más comunes de desgaste en los rodillos de laminación son: desgaste adhesivo y desgaste abrasivo. Puede haber además desgaste por película de corrosión, en donde la superficie corroída (película) es alternativamente removida por deslizamiento y entonces reformada. Un importante deterioro de la superficie, algunas veces cla-

sificado como desgaste, ocurre por fatiga superficial.

Todas las formas de desgaste son fuertemente influenciadas por la presencia de un lubricante, tanto es así que la velocidad de desgaste para un cojinete no lubricado puede ser 100000 veces mayor que si hubiera lubricante en la frontera.

En típicos componentes de máquinas bien diseñados, la velocidad de desgaste inicial sobre superficies en frotamiento durante el arranque puede ser relativamente alta. Conforme los más profundos picos en la superficie son desbastados, causando el incremento del área del contacto, la velocidad de desgaste disminuye a un valor pequeño constante. Después de un período de tiempo la velocidad de desgaste puede otra vez incrementarse debido a factores tales como contaminación del lubricante, incremento en la temperatura de la superficie, etc.

Desgaste adhesivo.- Al observar en un microscopio las superficies deslizantes, se puede concluir que nunca son lisas. Aunque la rugosidad de la superficie puede ser de unas po-

cas micropulgadas solamente, picos inevitables (a menudo llamados asperezas) y valles ocurren, como se muestra en la figura 17.

Puesto que la presión y calentamiento friccional por deslizamiento están concentrados en las áreas de contacto pequeñas indicadas por las flechas, las temperaturas y presiones son extremadamente altas y las condiciones son favorables para la soldadura de estos puntos (las temperaturas instantáneas locales pueden alcanzar el punto de fusión del metal). Si ocurre la fusión y soldadura de las superficies ásperas, entonces uno de los dos metales debe fallar por corte para permitir el movimiento relativo. Las nuevas uniones y sus correspondientes fracturas continuarán ocurriendo, dando lo que es apropiadamente llamado desgaste adhesivo. Ya que este es básicamente un fenómeno de soldadura, los metales que se sueldan fácilmente son más susceptibles al mismo. Las partículas sueltas de metal y óxidos provenientes del desgaste adhesivo causan daño de la superficie por abrasión.

El desgarre por la transferencia de metal desde una superficie a otra durante el desgaste

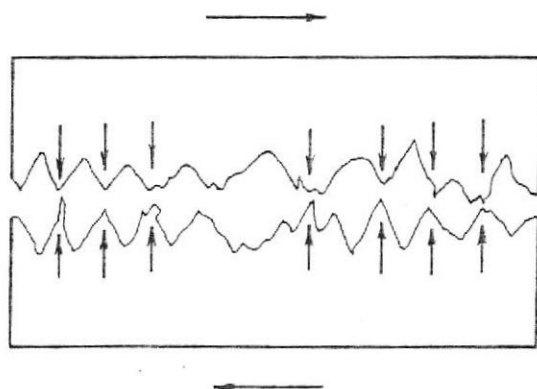


figura 17. Vista magnificada de dos superficies, aparentemente lisas, en deslizamiento.

es llamado muescamiento.

Cuando metales iguales se deslizan bajo presiones y velocidades adecuadas, las condiciones son ideales para la soldadura de las asperezas tanto porque ambas superficies tienen el mismo punto de fusión como por el hecho de que los lazos cohesivos son normalmente más resistentes que aquellos adhesivos entre picos soldados de materiales distintos. Los metales similares metalúrgicamente son referidos como compatibles. Los metales compatibles son definidos como los que tienen completa miscibilidad y menos de 1% de solubilidad sólida de un metal en otro a temperatura ambiente. La figura 18 muestra el grado de compatibilidad de varias combinaciones de metales.



BIBLIOTECA



BIBLIOTECA

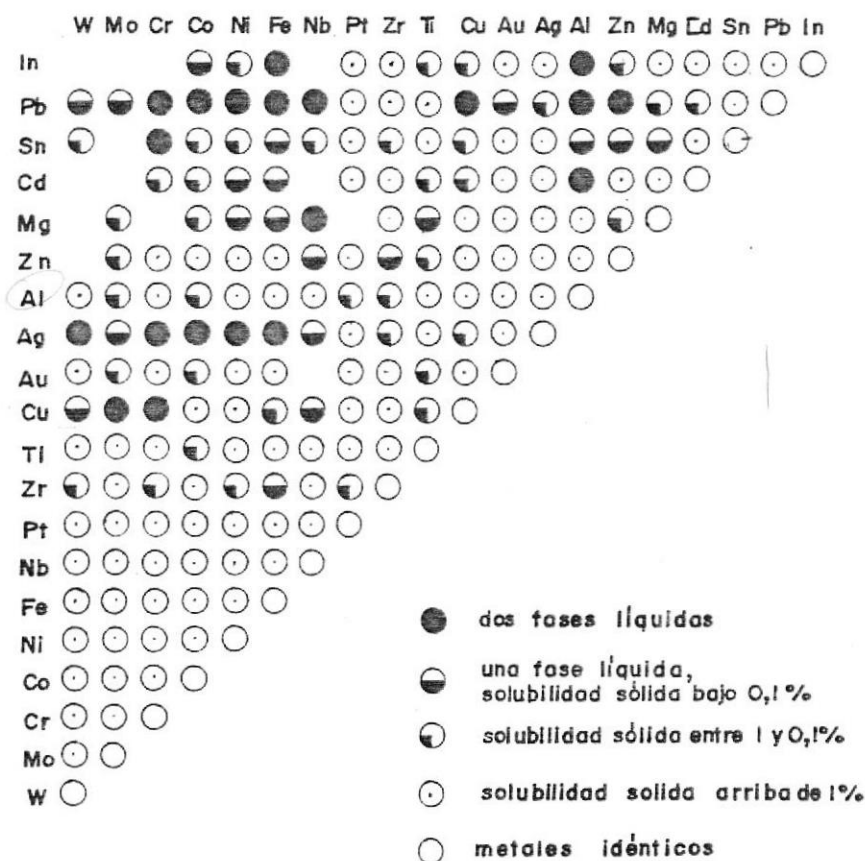


figura 18. Compatibilidad de varias combinaciones de metales (6).

Desgaste abrasivo.- Se origina por la presencia de partículas abrasivas entre las superficies deslizantes. Estas partículas son típicamente pequeñas, duras y tienen bordes agudos; pueden ser: granos de arena, partículas de metal u óxidos que resultan del desgaste de la superficie, etc.

Irritamiento.- Es clasificado como una forma de desgaste adhesivo pero normalmente com-

prende desgaste abrasivo y desgaste por película de corrosión. El irritamiento tiene lugar cuando dos superficies presionadas una contra otra, experimentan ligeros movimientos relativos. El daño puede ser simple descoloración, formación de hoyos (más común), o el desbastamiento de más de un milímetro de material (caso extremo). La rugosidad y el ahuecamiento causado por irritamiento hace a la superficie más vulnerable a la falla por fatiga.

Una teoría ampliamente aceptada para explicar lo que sucede afirma que se dan las condiciones para que se rompa la película protectora natural, resultando de la exposición del metal desnudo, picos que se sueldan y son entonces desgarrados por el movimiento relativo. En muchos casos los escombros formados se oxidan transformándose en pequeños granos abrasivos que causan continuo desgaste. La resistencia al irritamiento varía ampliamente entre los materiales. En general, cuando sucede con acero sobre acero, o con hierro fundido sobre hierro fundido, es bueno.

La creación de esfuerzos compresivos residuales en la superficie por tratamiento térmico

o trabajo en frío ha probado ser particularmente efectivo en retardar la propagación de fisuras por fatiga iniciadas por irritamiento.

Aproximación analítica al desgaste.- Aunque el diseño de componentes de máquinas desde el punto de vista de la resistencia es grandemente empírico, hay la disponibilidad de aproximaciones analíticas. La ecuación reconocida usualmente como desgaste que surge en 1940 es, para una superficie a que se mueve sobre otra b.

$$\text{Velocidad de desgaste } a = \frac{\delta a}{t} = \frac{K p v}{H_a} \quad (2.30)$$

donde

$\delta a$  = profundidad de desgaste en a, mm

K = coeficiente desgaste, sin dimensiones

$H_a$  = dureza superficial de a, MPa

P = presión en la interfase, MPa

v = velocidad de deslizamiento, mm/s

t = tiempo, s

La literatura da valores de K para algunas aplicaciones particulares. Si este no es el caso, K puede obtenerse de la experimentación, involucrando los mismos materiales y operando bajo condiciones esencialmente iguales.

En laminación, la fricción por deslizamiento proveniente del flujo de material a través de la abertura entre los rodillos es principal responsable para el desgaste de los mismos. Entre los factores que influyen dicha fricción los más importantes son :

1. Velocidad diferencial
2. Presión normal
3. Película de líquido o lubricante presente
4. Característica del material que está siendo laminado: a) temperatura, b) calidad superficial
5. Material del rodillo
6. Enfriamiento de los rodillos

Estudios realizados indican que el contacto metal - metal puede no ser la mayor razón del desgaste. La teoría mantenida por Thieme (6) y otros es que el deterioro de la superficie es causado por efecto de la penetración de óxidos en ella.

Hace poco se ha demostrado que los óxidos formados arriba de 1650-1750 °F son mucho más abrasivos que aquellos constituidos abajo de esta temperatura. De los óxidos de hierro, los hematites (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) son alrededor de dos veces más duros que la magnetita (Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>) mien-

tras que esta última es aproximadamente 50 % más dura que la wustita (FeO). Las diferencias en desgaste son causadas por la mayor fracción molar del más abrasivo (Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>) (figura 19), formado arriba de 1650 °F.

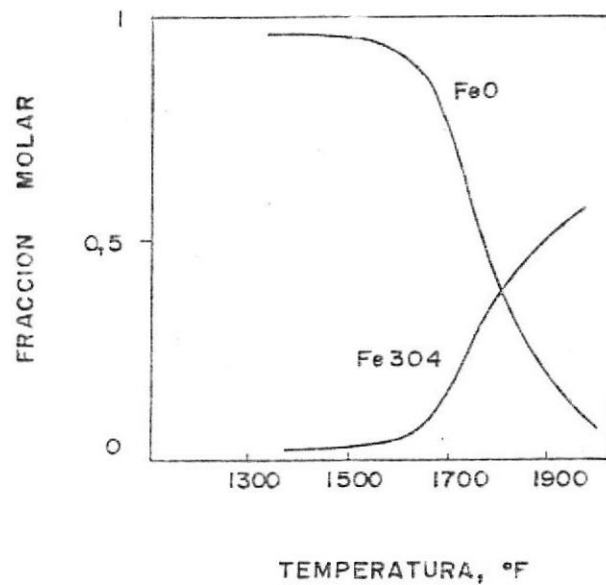


figura 19. Cinética de formación de cascarilla (6).

En vista de las cualidades <sup>(Protectiva)</sup> lubricantes de los óxidos, se podría esperar que la oxidación de los rodillos ofrezca alguna protección. Sin embargo como advierte Ohnuki (6) y Nakaji (6) la fatiga térmica siempre progresa y destruye la superficie. Kihara reproduciendo modelos de desgaste encontrados en operaciones típicas de producción mostró que la lubricación

con un compuesto a base de petróleo reduce el desgaste y conjeturó que la película negra a menudo observada sobre los rodillos es debida a transferencia de cascarilla desde el mate que se trabaja.

El desgaste de rodillos es en ocasiones bastante uniforme a través de la superficie de contacto; otras veces localizado, por la formación de profundas bandas.

Hay acuerdo general en que el desgaste uniforme es originado principalmente por abrasión en combinación con fatiga térmica. El daño por corrosión juega un papel secundario.

El desgaste localizado puede ser más peligroso. Varias causas contribuyen a este problema. En el trabajo de Funke (6), la acumulación de cascarilla es la razón primordial. Tal acumulación es más probable con un rodillo rugoso y hay bastantes molestias en los pases iniciales donde las temperaturas son todavía altas. Judd (7), llega a la conclusión de que las bandas son el resultado de la siguiente secuencia: la fatiga térmica inicia fisuras perpendiculares a la superficie del rodillo, en grandes carburos eutécticos las

fisuras se alinean longitudinalmente; la oxidación en las fisuras causa hinchazón y descascamiento de celdas; finalmente las capas sucesivamente removidas conforman las bandas.

Algunos mecanismos de desgaste de rodillos están relacionados con los ciclos térmicos a los que ellos están sometidos.

Una refrigeración adecuada aparece como un arma muy útil para:

1. Disminuir la abrasión en la superficie del cilindro, al evitar que desmejoren las propiedades mecánicas del mismo por aumento de temperatura.
2. Aminorar la fatiga térmica de las capas superficiales. Para ello es necesario un buen conocimiento de la distribución de temperaturas en el cuerpo y superficie del rodillo en función del tiempo.

\* Una idea básica de una buena refrigeración es que en cada revolución del cilindro debe extraerse todo el calor absorbido durante el proceso de conformado del producto. Si extraemos menos, la temperatura media iría creciendo hasta hacerse inadmisiblemente alta. Este criterio aún se usa como única guía para el control de la refrigeración, limitando a las va-

riables geométricas, presión y caudal los posibles cambios a realizar a fin de extraer de la mejor manera el calor excesivo.

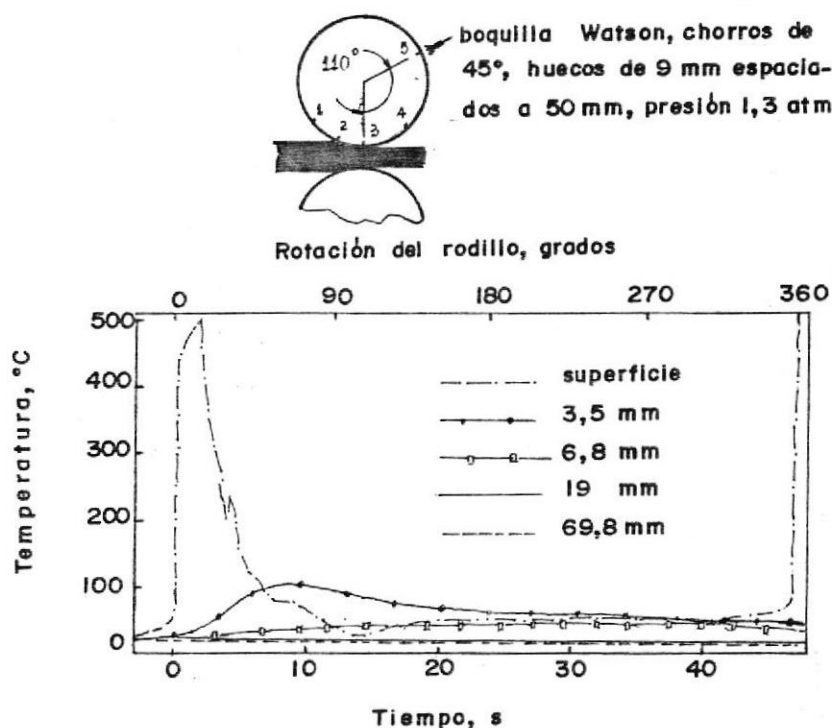


figura 20. Fluctuaciones de temperatura durante la primera revolución del cilindro (9).

Los sistemas convencionales producen una distribución de temperaturas como la que se muestra en la figura 20, donde se observa lo ocurrido durante la primera revolución del cilindro. La temperatura superficial subió hasta los 500 °C en el arco de contacto y que las variaciones están concentradas en una capa superficial muy fina. La zona central se mantiene a una temperatura razonablemente constante. Entre los puntos marcados 1 y 2 hay calenta-

miento del cilindro por efecto de la radiación desde el material laminado. En la zona de contacto 2-3, hay un aumento muy rápido de la temperatura superficial, la cual disminuye al final del arco de contacto por efecto de la conducción hacia el interior del barril. En el punto 4 se halla el extremo de la capa de agua que fluye por la superficie del rodillo. En esta zona la temperatura fluctúa debido a la ebullición del agua. En el tramo 4-5 la temperatura continúa disminuyendo por efecto de la refrigeración, llegándose al mínimo justo debajo del chorro. Como las capas interiores adyacentes a la superficie están a mayor temperatura, al pasar los rociadores, la periferia se calienta por conducción desde el cuerpo. Como resultado de estas extremas variaciones cíclicas de temperatura aparece la fatiga térmica y el correspondiente deterioro de la superficie en contacto con el material laminado.

Por lo anterior, en rodillos acanalados es necesario enfriar no solamente el pase de trabajo sino que adicionalmente las partes más altamente esforzadas deben recibir mayor enfriamiento. La figura 21, ilustra dos medios

convenientes de hacer esto, los cuales pueden ser apropiadamente adaptados en todos los casos. Con pases pequeños, al menos una manguera

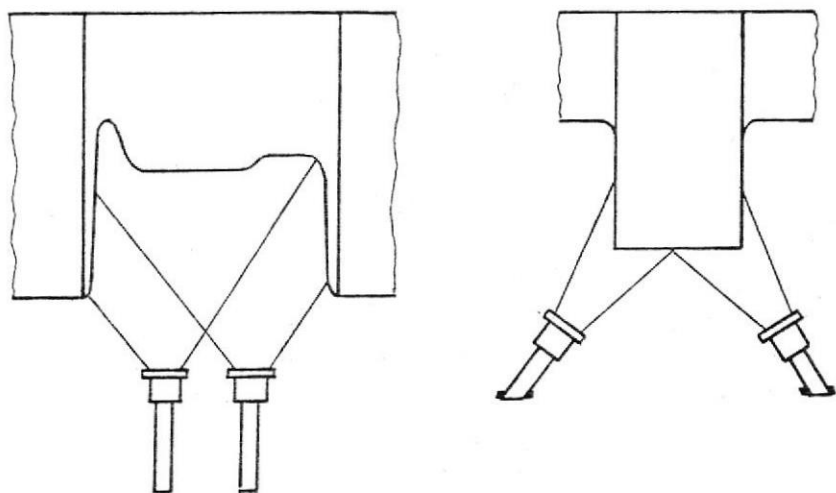


figura 21. Excelente método de enfriamiento de rodillos con cuerpos perfilados. Un pase caja es mostrado a la izquierda y un pase abierto a la derecha. El flujo más grande de agua por lo tanto golpea las áreas donde mayor calor es desarrollado (10).

ra dirigida hacia los pases de trabajo debería suplir el riego general. Es además útil colocar la salida de agua tan cerca a la abertura de los rodillos como la construcción de la caja lo permita (figura 22).

Se deben evitar los enfriamientos localizados. La presión de agua es un importante factor en esta refrigeración. Esta no debería ser ni tan baja (efecto helado), ni tan alta (reflexión del agua). Con enfriamiento por boquilla, una presión de alrededor de 2 a 4 at-

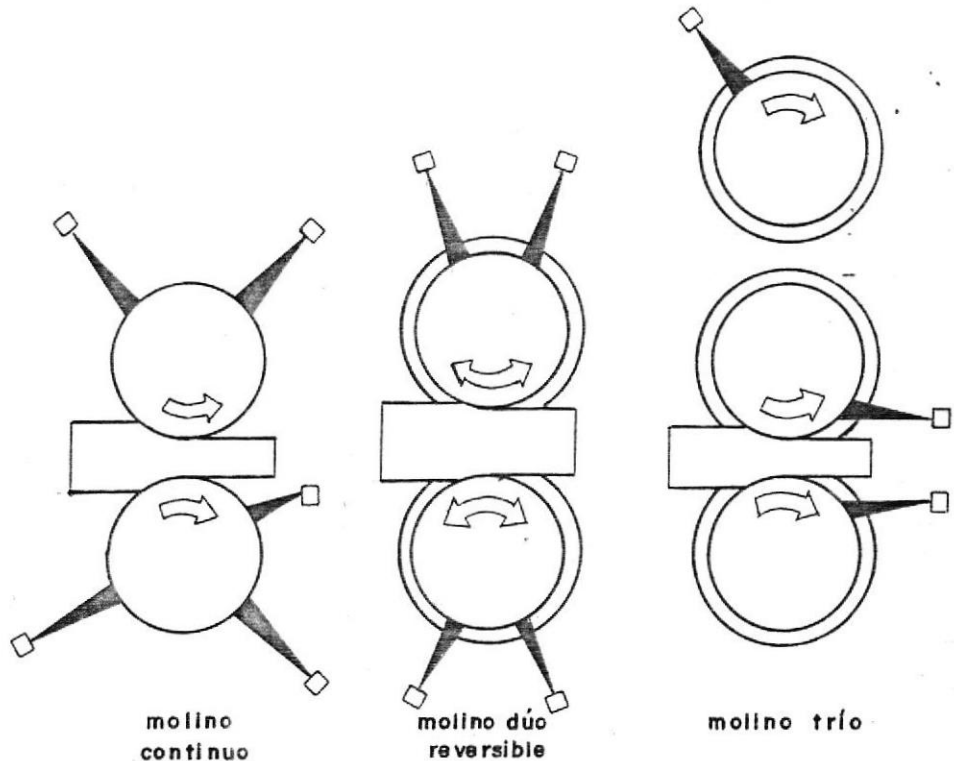


figura 22. Modos de enfriamiento alrededor de la circunferencia del rodillo para tres tipos de molinos. Boquillas rociadores deberían siempre ser usadas (10).

mósferas ha funcionado satisfactoriamente. En cualquier caso, debe ser frecuentemente chequeada. Para poder predecir caudal y presión de agua de manera precisa, se requiere conocer como varía el coeficiente de transferencia térmica entre cilindro y agua en las condiciones reales de laminación.

### 2.3.2 MATERIALES

Las propiedades que deben reunir los materiales de rodillos de laminación, son bastante complejas, entre ellas se pueden citar:

- alta resistencia al desgaste

- alta resistencia a la fractura (tenacidad)
- insensibilidad al fisuramiento en caliente
- buena calidad superficial

Con la metalurgia y el conocimiento de materiales, no debería ser particularmente difícil satisfacer cualquiera de estos requerimientos. La combinación de ellos, en cambio, constantemente representa serios problemas al productor de cilindros porque las soluciones son mutuamente contradictorias. Resulta entonces que es necesario diseñar una metalurgia de compromisos con los materiales de rodillos.

Son de interés en el presente trabajo de investigación, los rodillos de hierro fundido, debido a que son ampliamente utilizados para la producción de barras y perfiles ligeros.

El horno alto es el medio tradicional de fusión de cilindros de hierro fundido. Con el paso del tiempo este ha sido objeto de considerables mejoras, especialmente por la introducción de coque pulverizado. Los hornos de inducción, de arco eléctrico y rotatorios también resultan adecuados para este propósito y en forma limitada, los hornos de cubilotes.

A diferencia de los rodillos de acero donde

las propiedades deseadas normalmente se obtienen después de un tratamiento térmico, un rodillo de hierro fundido enfriado desde el estado líquido queda generalmente en la condición final requerida consecuentemente, no hay oportunidad de compensar por posibles desviaciones en calidad. Los cilindros de hierro nodular son una excepción, ya que un concienzudo tratamiento térmico se puede usar en algunos casos.

La solidificación ocurrirá en estado estable (Fe-C), o en el estado metaestable (Fe-Fe<sub>3</sub>C); puede ser hecho esto por uso de una adecuada velocidad de enfriamiento desde el estado líquido o, con una específica velocidad de enfriamiento, por apropiada selección de la composición. Solamente el molde tiene una apreciable influencia sobre la rapidez de enfriamiento en el rango de solidificación. La fundición en un molde grueso de metal cubierto apenas con una solución ennegrecida da como resultado un enfriamiento veloz y por lo tanto una mayor probabilidad para el estado metaestable del hierro. Una rapidez moderada se obtiene cuando el molde está recubierto con una delgada capa (0,1/0,4") de arena o barro.

La más baja velocidad de enfriamiento, el mejor camino para la solidificación en estado estable, ocurre en moldes de arena, los cuales sin embargo, normalmente tienen intercalados enfriadores de hierro fundido cerca al barril para densificar la superficie, modificando el patrón de solidificación.

La composición debe ser adaptada al molde y consecuentemente a la rapidez de enfriamiento. Esto significa que el fundidor de rodillos debe a menudo trabajar con una composición inestable, formándose una estructura rica en grafito con leve enfriamiento y una estructura blanca con carburos eutécticos por solidificación rápida.

En medio está el área moteada, la cual es muy importante. Aquí el carbono hipereutectoide es precipitado parcialmente como grafito y ledeburita. La caída en velocidad de solidificación desde la superficie al centro depende del tipo de molde. Si este factor es manejado convenientemente se puede obtener una superficie de barril resistente al desgaste ya sea con una caída brusca de la dureza a una profundidad específica, esto es, a un centro suave para evitar la fractura del barril,

o con una caída de dureza más lenta pero continua desde la superficie al centro de la pieza.

La composición base y los elementos aleantes pueden tener un muy variado efecto sobre la conducta de solidificación, como indica la figura 23. En fundición en molde metálico, aquellos elementos con un efecto estabilizante sobre los carburos incrementan la profundidad de la capa blanca, mientras que aquellos con una acción grafitizante la disminuyen. Con un hierro blanco no aleado, el contenido de carbono solo determina la dureza superficial (figura 24); consecuentemente, para una dureza específica la profundidad enfriada (chill) deseada se puede obtener solamente por ajuste del contenido de silicio. Puesto que tanto el carbono como el silicio, favorecen la formación de grafito, generalmente, un incremento en el contenido del uno es acompañado por una disminución en el otro y viceversa. Una alteración de 0,1% en el porcentaje de silicio presente produce un cambio de alrededor de 0,18" en la profundidad de la capa blanca. Los problemas son mucho más complejos cuando se producen rodillos de hierro aleado.

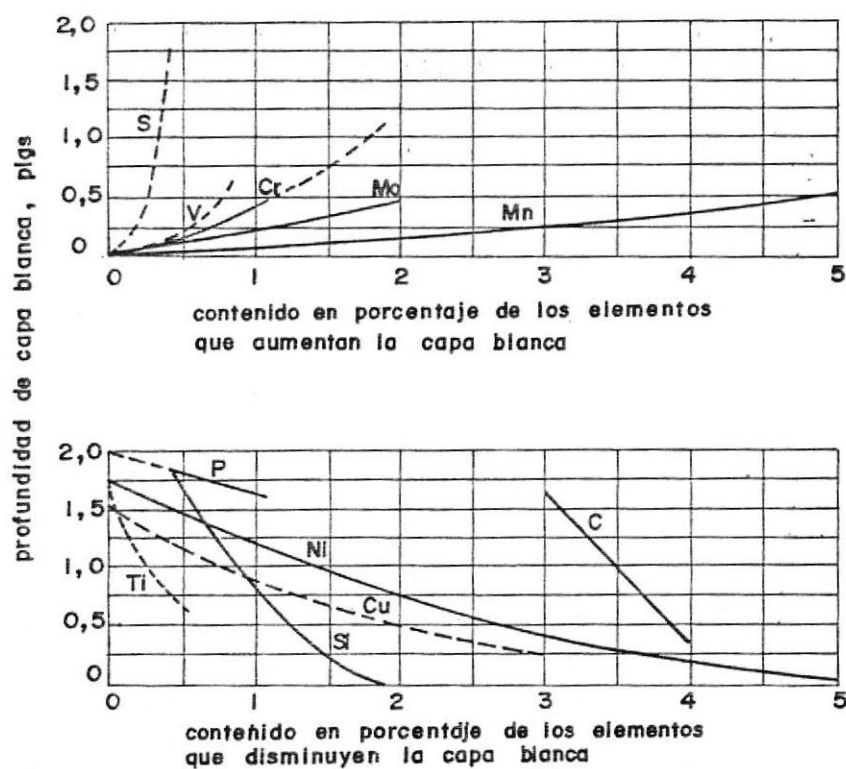


figura 23. Efecto de varios elementos sobre la profundidad enfriada (chill), de hierro fundido enfriado (10).

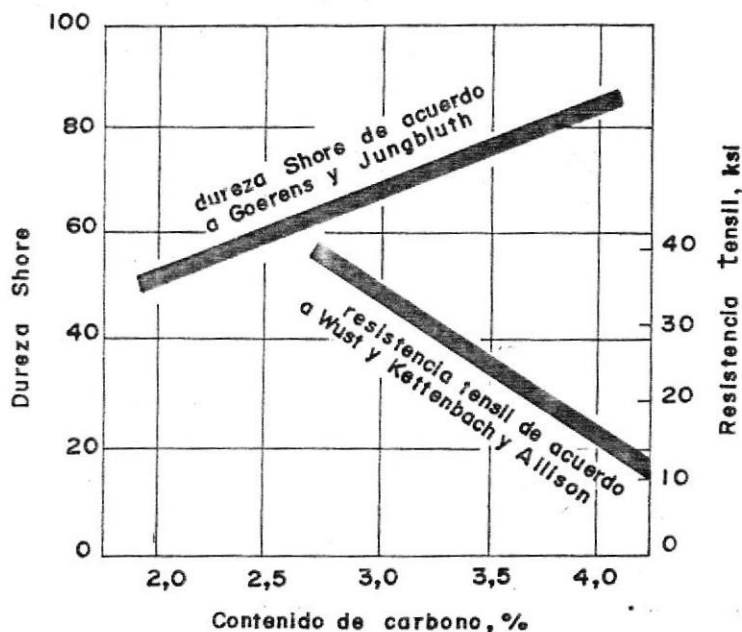


figura 24. Efecto del contenido de carbono sobre la dureza Shore de la superficie del barril y la resistencia tensil del corazón de rodillos de hierro enfriado (10).

Los elementos aleantes agregados para alterar significativamente la estructura de la matriz metálica también afectan las características de grafitización y por tanto merecen especial atención. El níquel es un ejemplo típico. Teóricamente es posible producir una fundición enfriada con la más alta dureza alcanzable (matriz martensítica), por fundición de un hierro con alrededor de 4,5% de níquel en un molde metálico. En la práctica, sin embargo, el níquel disminuye tan drásticamente la profundidad de la capa blanca que este efecto ya no puede ser balanceado por disminución del silicio, de manera que el hierro solidificará gris. La producción de dichos rodillos es factible por la adición suplementaria de un estabilizador de carburos, principalmente el cromo. La figura 25 es una representación general de este ejemplo en los aspectos más importantes.

La profundidad de la capa blanca no es una medida del rendimiento del cilindro. Una transición abrupta en la zona moteada suele promover el descascaramiento y una transición suave puede causar rotura del rodillo. En general, el espesor del área manchada aumenta

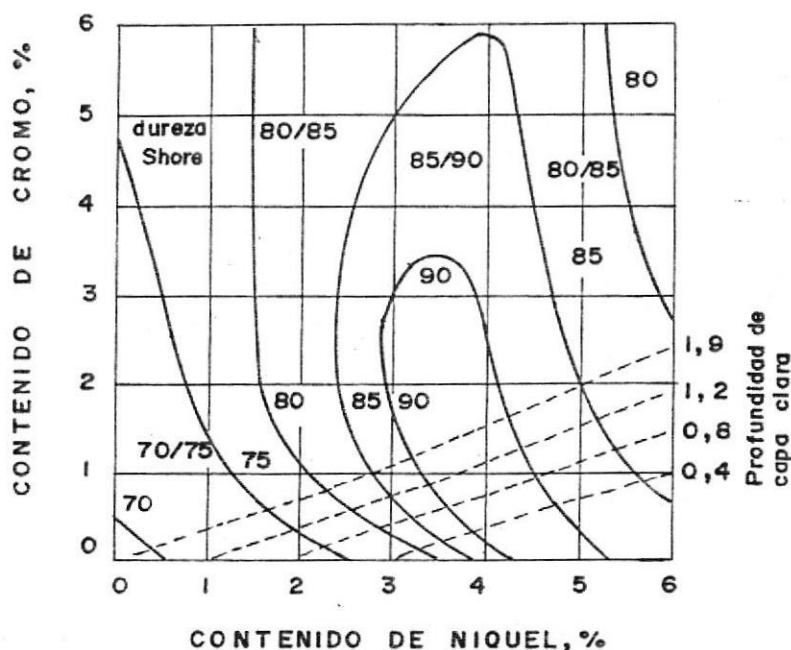


figura 25. Examen total del efecto del cromo y níquel sobre la dureza superficial y profundidad blanca de un rodillo de hierro enfriado con alrededor de 3 % de carbono (10).

con la profundidad de la capa blanca. Es muy difícil producir rodillos de hierro enfriado con una profundidad de capa blanca tal, que todavía tenga suficiente hierro gris en el centro para seguridad en la operación. También aquí, el efecto específico de los diferentes elementos es evidente. El azufre, por ejemplo, provoca una zona de transición relativamente corta, además de un incremento en

la profundidad de la capa blanca. Elementos tales como el cromo y el vanadio incrementan la profundidad de la zona de transición, hecho que puede también ser de significancia práctica. A través de una selección adecuada de la composición del hierro base y contenido de aleantes, por un lado, así como las condiciones de fusión y solidificación, por otro, la formación de carburo y grafito puede ser modificada sucesivamente de tal manera que ni una estructura blanca completa, ni una gris pura, sino más bien una moteada sea producida.

Para producir rodillos con carburos libres con una estructura completamente gris, se debe realizar una solidificación lenta (fundición en arena) o un considerable aumento en el contenido de silicio (fundición en un molde metálico). El último método da como resultado un tamaño de grano más pequeño y la formación de un grafito más fino.

\* El grafito actúa de dos maneras para disminuir la resistencia del hierro fundido: A causa de su baja densidad y la forma en la cual está presente no solamente tiene una gran área superficial sino también una resis-

tencia insignificante; por lo mismo, al aplicarle una carga disminuye bruscamente la sección transversal que debe soportarla. Las hojuelas de grafito ejercen un efecto interno de muesca (concentración de esfuerzos), lo cual aumenta el esfuerzo correspondiente sobre la matriz metálica. La resistencia ingenieril del hierro fundido disminuye con el incremento en las cantidades de grafito; naturalmente la forma y distribución de las hojuelas juega un papel primordial en determinar la magnitud de dicha resistencia.

Aún cuando la mayoría de las veces el grafito se presenta en forma de hojuelas, se puede hacer que precipite como nódulos en cuyo caso tendría la más pequeña área superficial posible y no habría un efecto de muesca ya que una esfera no lo puede producir. El hierro fundido con grafito nodular tiene una alta resistencia, aproximada a aquella del acero y respetables valores de elongación. Las características de rendimiento de tales rodillos se acercan a las de rodillos de acero sin pérdidas significativas de las ventajas en servicio como resultado de la presencia del grafito. (La conversión del grafito a la

forma nodular es llevada a cabo por adición de magnesio o ciertas tierras raras. Varias teorías, las cuales no se discutirán aquí, han sido propuestas para describir la mecánica de formación del grafito nodular. Se mencionará solamente que el magnesio causa primero una completa desulfuración y desoxidación y entonces, pequeñas cantidades del orden de 0,03/0,1% se disuelven en el metal. La producción de hierro nodular requiere un hierro de alta pureza, ya que aún trazas de algunos elementos tales como titanio y plomo son suficientes para prevenir la formación de los nódulos. El magnesio es un fuerte estabilizador de carburos, de allí que una inoculación concienzuda ( 15 , 16 ) se requiere para suprimir la formación de cementita. En muchos casos, sin embargo, esta característica es utilizada para producir un hierro conteniendo carburos con alta resistencia a la abrasión.

Los elementos aleantes pueden tener otros efectos específicos además de su influencia sobre la estructura:

- Tienen que ver con la resistencia al choque térmico, el cual puede ocurrir en finas capas exteriores de rodillos de laminación en ca-

liente en cada revolución y llevar a fisuramiento en caliente (figura 26). Por ejemplo, se puede mejorar la resistencia al choque térmico por adición de molibdeno y níquel en

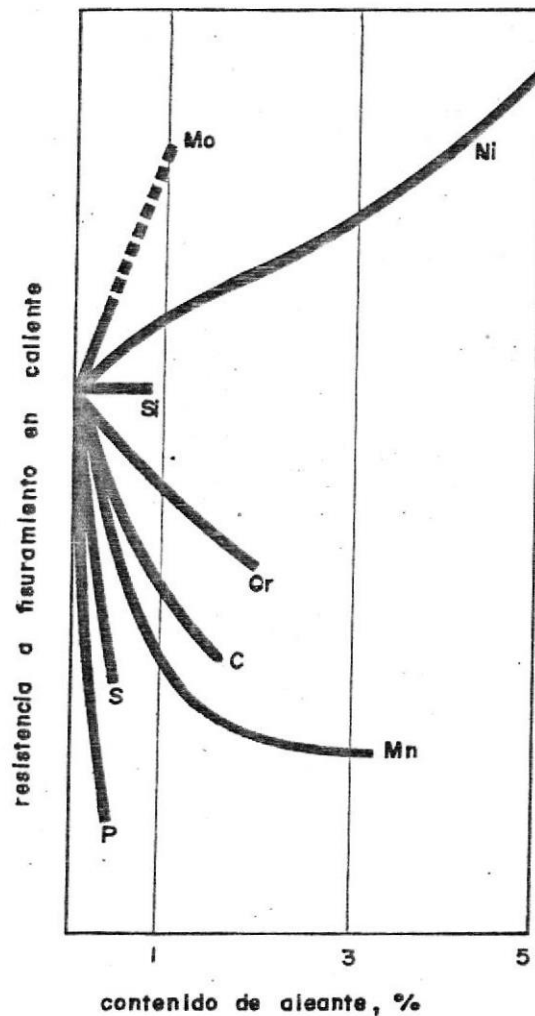


figura 26. Efecto relativo de varios elementos aleantes sobre la resistencia del hierro blanco al fisuramiento en caliente en repetidos enfriamientos con agua desde 600 C. hierro base: 3,7 %C; 0,45 %Si; 0,94 %Mn; 0,05 %P; 0,023 %S (10).

las cantidades usuales; el cromo y el manganeso por el contrario, producen una disminución de la misma.

Disminuyen la conductividad térmica conforme la estructura cambia desde perlita gruesa, fina, bainita y martensita. Experimentos recientes indican que la conductividad térmica es, en primera aproximación, una función logarítmica del porcentaje atómico de aleantes y otros elementos contenidos en el hierro. Esto significa que mientras más alto es el peso atómico de un elemento, más baja será la pérdida de conductividad térmica. Consecuentemente, el carbono y el silicio disminuyen bruscamente la conductividad térmica. Los elementos aleantes comunes caen en el siguiente orden para disminuir pérdidas de conductividad térmica para igual porcentaje en peso de aleante: cromo, manganeso, níquel, cobre, molibdeno. La proposición general que puede ser hecha es que los rodillos aleados siempre tienen más pobre conductividad térmica que los no aleados y esto tiene gran significación para su conducta en el molino de laminación. La presencia de fases también afecta la conductividad térmica y la figura 27 ilustra el efecto del grafito y la cementita.

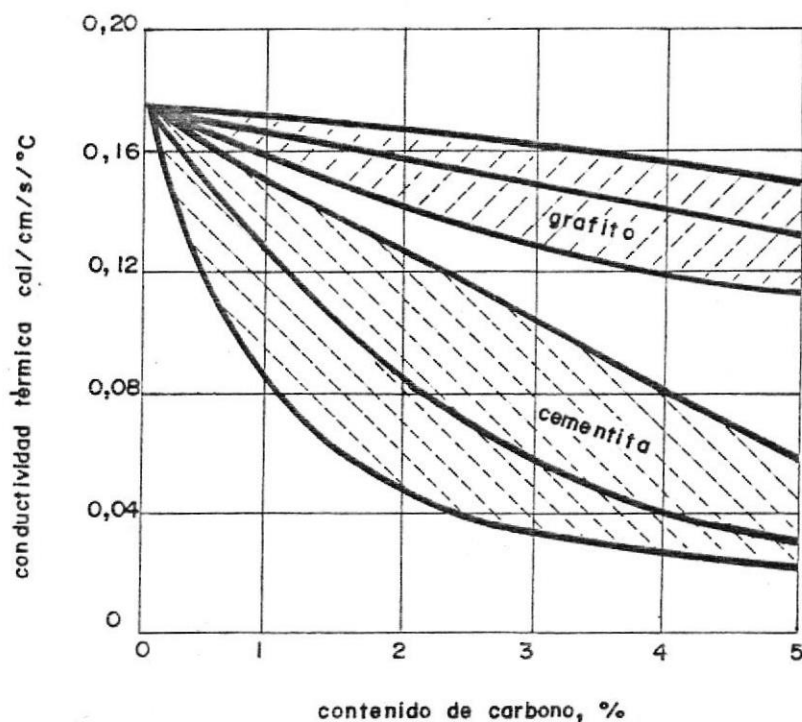
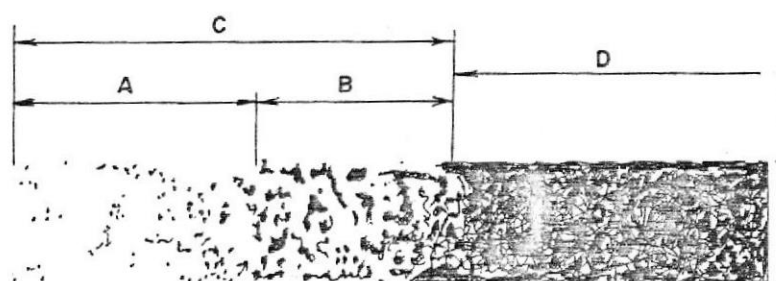


figura 27. Efecto de la cementita y del grafito sobre la conductividad térmica del hierro (10).

#### 2.3.2.1 ESPECIFICACIONES TECNICAS

Rodillos de hierro fundido sin grafito sobre la superficie de trabajo (rodillos de hierro enfriado).- Para mejor entendimiento de ellos, véase la fractura típica (figura 28). Ya que solamente la capa enfriada rápidamente (capa chill), está sujeta a uso durante laminación, la estructura de la misma es empleada para



- A - Capa blanca
- B - Zona de transición
- C - Total de profundidad enfriada
- D - Corazón de hierro gris

figura 28. Apariencia de la fractura de un rodillo de hierro fundido enfriado(10).

sub-clasificación de estos rodillos. La mejor forma de hacerlo es de acuerdo a la constitución de la matriz metálica (figura 29), porque no obstante que la variación del carbono se realiza en un rango definido, esta no permite hacer una clasificación cualitativa. El manganeso, cromo, molibdeno y níquel son agregados principalmente para producir cambios en la matriz.

El rendimiento en servicio de un rodillo de hierro enfriado está gobernado no solo por la calidad de la superficie de trabajo sino también por la estructura en la sección transversal total, por ello son adecuados solamente para laminar productos planos y pequeños

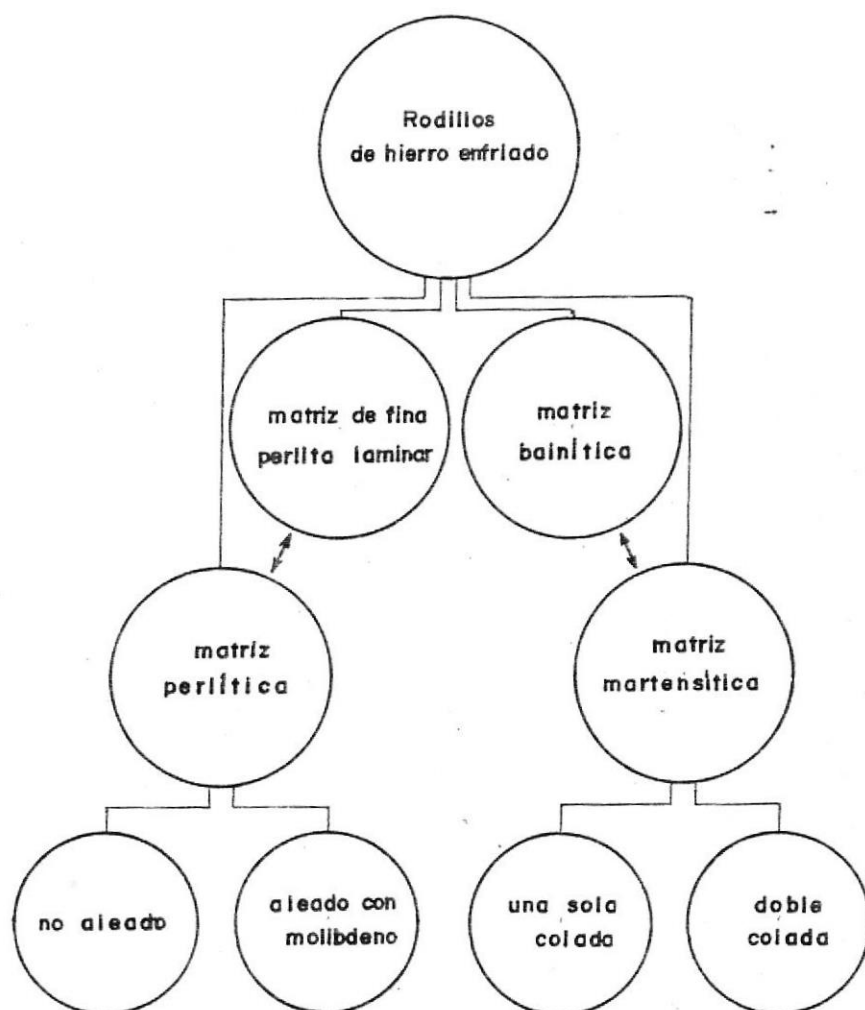


figura 29. Clasificación de rodillos de hierro enfriado (rodillos de hierro fundido sin grafito sobre la superficie de trabajo), en base a la estructura de la matriz en la superficie de trabajo y método de producción. Las flechas dobles indican una transición gradual de un tipo a otro (10).

perfiles (varilla y alambre).

Rodillos de hierro enfriado con matriz perlítica gruesa.- La elevada dureza de la capa blanca de rodillos de hierro enfriado no aleados es dependiente no de la matriz metálica sino de la dureza de los carburos de hierro y entonces será mayor con el incremento en el

contenido de carbono. La figura 24, muestra el efecto del carbono sobre la dureza superficial y la resistencia mecánica del corazón. La composición química de los rodillos de hierro enfriado de este tipo varía dentro del siguiente rango:

%C	%Si	%Mn	%P	%S
2,6/3,8	0,4/1,0	0,2/0,8	0,3/0,6	0,06/0,15

En ciertos casos, resulta ventajosa una combinación de resistencia en caliente elevada y baja resistencia al fisuramiento en caliente, por lo que estos rodillos son aleados con 0,2/0,5% Mo, aún cuando no se requiera algún incremento en dureza o cambios fundamentales de la matriz.

Rodillos de hierro enfriado con matriz perlítica fina.- Otro buen incremento en dureza sobre aquella correspondiente al contenido de carbono puede obtenerse solamente por cambio de la matriz metálica. Si el incremento de la resistencia al desgaste obtenida por elevación de la dureza en unas pocas unidades Shore sobre aquella de rodillos no aleados del mismo contenido de carbono es suficiente, se utiliza el níquel en cantidades de 1,5 o

2,5% y 0/0,06% Cr. Esta combinación produce una fina perlita del tipo conocido antiguamente como sorbita.

En razón de la disminución en conductividad térmica, los aleantes anteriores aumentan la susceptibilidad a los esfuerzos, lo cual resulta peligroso cuando se utilizan rodillos de gran tamaño en molinos de laminación en caliente. El máximo contenido de aleante en los límites luego indicados, únicamente puede ser usado en rodillos acabadores para varilla y alambre puesto que un excelente enfriamiento es un requisito indispensable. A esto se agrega la posibilidad de incrementar la resistencia en caliente por adición de 0,2/0,4% Mo. Dos análisis típicos son:

%C	%Si	%Mn	%P	%S	%Cr	%Ni	%Mo
3,2/3,8	0,4/0,8	0,4/0,8	0,3/0,5	0,08/0,15	0/0,6	0,5/1,5	-
3,4/3,8	0,4/0,8	0,4/0,8	0,3/0,5	0,08/0,15	0,4/1,0	1,5/2,5	0/0,4

Rodillos de hierro enfriado con matrices bainítica y martensítica.- Para rodillos de laminación en frío, se acostumbra utilizar contenidos altos de níquel y cromo. Como se indicó antes, el níquel es realmente el elemento efectivo y el cromo sirve tan solo para

controlar la profundidad de la capa blanca. El molibdeno es ventajoso, sino absolutamente indispensable, para obtener bainita. Aunque en la práctica, el proceso de laminación en frío se lleva a cabo generalmente con rodillos de acero forjado, los rodillos de hierro enfriado con durezas de hasta 95 Shore D son extensamente usados para pases moderados y de acabado.

La composición química se acerca a la siguiente:

%C	%Si	%Mn	%P	%S	%Cr	%Ni	%Mo
3,5/3,8	0,4/0,8	0,4/0,8	0,3/0,6	0,08/0,15	0,6/1,2	2,5/3,5	0/0,6

Para terminación de plancha negra, los rodillos de hierro enfriado martensíticos (figura 30) con una dureza de 96/102 Shore D han dado resultados satisfactorios.

Su composición química normal es:

%C	%Si	%Mn	%P	%S	%Cr	%Ni
3,7	0,4/0,6	0,6/0,8	0,3/0,5	0,02/0,06	1,6/1,9	4,0/4,3
3,7	0,5/0,7	3,5/3,8	0,3/0,5	0,01/0,02	0,1/0,5	2,6/3,0

Los cilindros de hierro enfriado con estas composiciones son a menudo producidos como



figura 30. Estructura en la capa blanca de un rodillo de hierro enfriado del tipo martensítico. Atacado con Nital. Magnificado 500 X.

fundiciones compuestas.

Rodillos de hierro fundido con hojuelas de grafito sobre la superficie de trabajo

Rodillos de estructuras con carburos libres  
Rodillos fundidos en arena (medio duros).- Es  
 tos rodillos son fundidos en arena o moldes de tierra provistos con enfriadores; muestran un grafito relativamente grueso, una matriz que consiste predominantemente de perlita (figura 31) y una dureza de 30/35 Shore D. Su desarrollo ha sido posible a través de un conocimiento adecuado de ciertas variables para:

- evitar que los contenidos de ferrita provo-

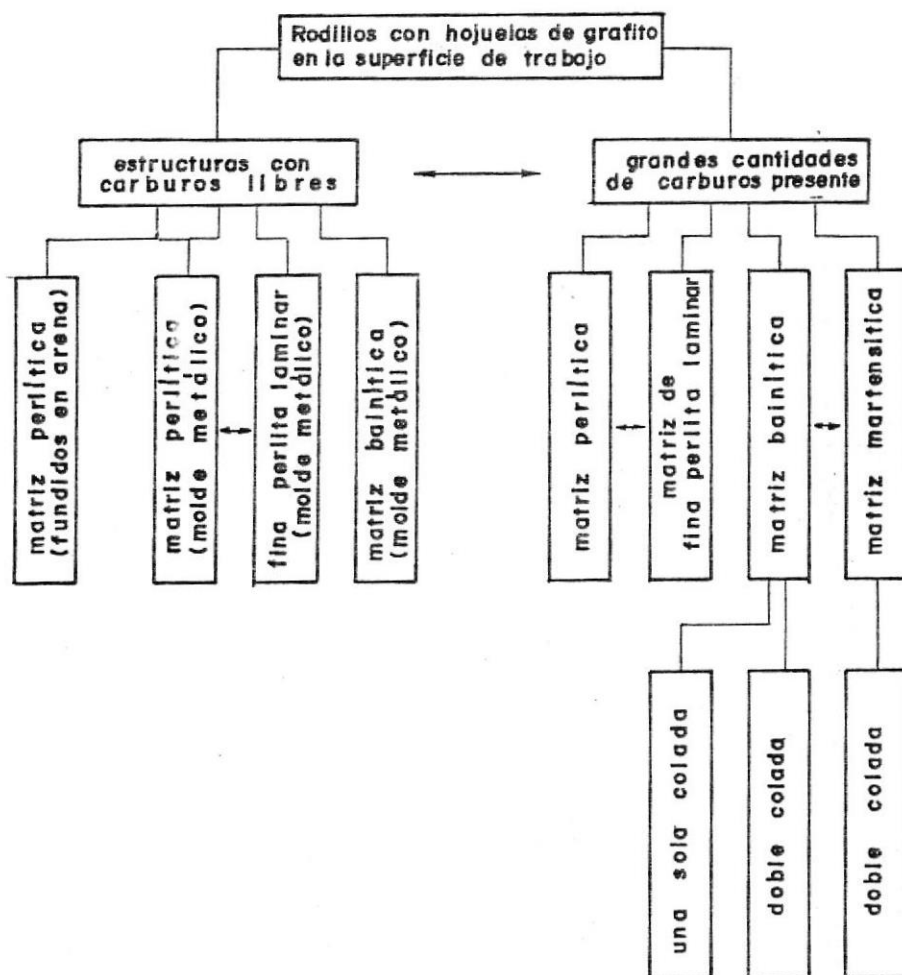


figura 31. Clasificación de rodillos de hierro fundido conteniendo hojuelas de grafito; en base de la matriz en la superficie de trabajo y método de producción. Las flechas con doble dirección indican una transición gradual de un tipo a otro.(10).

quen un desgaste excesivo

- refinar el grafito por mejores técnicas de moldeo
- conseguir perlita laminada fina con durezas de 40 Shore D por una adecuada selección de la composición.

La composición química está dentro de los siguientes límites:

%C	%Si	%Mn	%P	%S	%Cr	%Ni
2,0/2,8	0,8/1,2	0,6/1,2	≈0,3	≈0,1	0/0,5	0/0,5

Los rodillos en este grupo son todavía adecuados para laminar perfiles pesados, particularmente cuando las cantidades de material a ser laminado son tan pequeñas que no se justifica alta calidad. Una pequeña proporción de estos cilindros son también aleados. En este caso, aparte de un incremento en el contenido de manganeso hasta 1,2% ; el cromo es el principal elemento que entra en consideración para estabilizar la perlita. A causa del mayor peso de fundiciones individuales (generalmente sobre las diez toneladas), adiciones elevadas de níquel y molibdeno no producen una ganancia proporcional. Si se requiere un mejor rendimiento en un caso específico, se debe seleccionar otro tipo de rodillos.

Rodillos fundidos en molde metálico (principalmente rodillos medio duros). -Se logra esta clase de cilindros usando prácticas acostumbradas para rodillos de hierro enfriado con cambios adecuados de composición principalmente incrementando el contenido de silicio para prevenir la formación de la capa blanca

o darle un espesor delgado tal que pueda ser maquinado posteriormente. Si se usa el mismo contenido en carbono normal para rodillos fundidos en arena (2,0/2,8) resulta un material con buenas características de resistencia al desgaste por la textura de grano fino, pero se presenta descascaramiento de los bordes. Para evitar este último inconveniente, se acostumbra utilizar contenidos de carbono de 2,6 hasta 3,2%. En este caso hay también un grafito muy fino, normalmente perlita fina y algunas pequeñas cantidades de cementita (figura 32). La dureza es 40/45 shore D, dependiendo de su tamaño.

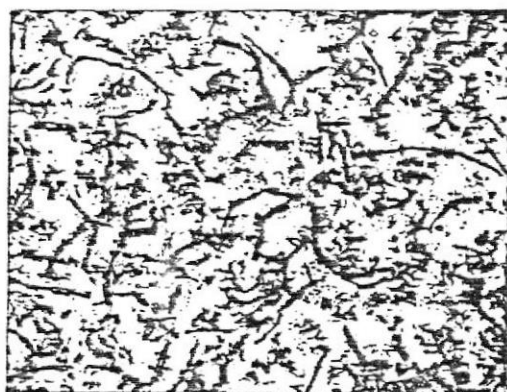


figura 32. Estructura en la capa exterior de un rodillo de hierro fundido con hojuelas de grafito (rodillos medio - duros). Atacado con Nital. 200X. (10).

De acuerdo a la aplicación, es posible cambiar la matriz a una perlita extremadamente fina simplemente con aumentar el contenido de manganeso, pero una mayor estabilidad de los carburos debe ser balanceada con un aumento en el contenido de silicio, lo cual impone un límite a este procedimiento por varias razones. Una combinación de manganeso y níquel es más conveniente. Muy buenos resultados pueden obtenerse al añadir molibdeno en cantidades de hasta 0,6% pero, por razones de costo, se lo hace únicamente para pequeños rodillos.

La adición simultánea de molibdeno y níquel lleva a una matriz bainítica y al tipo óptimo dentro de este grupo. Las cantidades añadidas de estos elementos deben incrementarse con el diámetro.

Estos cilindros son raramente usados para producir productos planos; su principal aplicación es para perfiles medios. La acción del molde metálico decrece hacia el centro pero a causa de la composición química, hay una disminución gradual en la dureza.

Rodillos con carburos en la estructura. - Una

mayor resistencia al desgaste, para el mismo uso anterior puede obtenerse cuando la estabilidad de los carburos se incrementa suficientemente, de tal forma que los carburos finamente distribuidos estén embebidos en la matriz. En general, este objetivo es logrado por la adición de cromo, independientemente de si la colada es aleada o contiene manganeso, molibdeno y/o níquel. Si la proporción de carburos relativa a aquella de grafito es baja, estos rodillos son a menudo llamados "aleados medio-duros"; lo contrario de esta condición lleva a los llamados de temple indefinido. Este último tipo es además menos altamente aleado mientras que el anterior contiene una cantidad de aleante bastante elevada.

7/10

Rodillos con matriz perlítica (rodillos aleados medio-duros).- En comparación con los grados no aleados, estos cilindros no solo tienen una dureza superficial más alta (alrededor de 50/60 shore D), sino que son también más duros hasta una mayor profundidad bajo la superficie, de tal manera que resultan adecuados para pases acanalados profundos y tienen gran vida aún con rectificado frecuente.

Listamos algunos análisis químicos de ellos:

%C	%Si	%Mn	%P	%S	%Cr	%Ni	%Mo
2,5/2,8	1,2/1,6	0,7/1,2	0,3 máx.	0,1 máx	-	-	-
2,5/2,8	1,2/1,6	0,7/1,2	0,3 máx.	0,1 máx	0,4/0,6	0,2/0,5	-
2,5/2,8	1,2/1,6	0,7/1,2	0,3 máx.	0,1 máx	0,5/0,8	1,0/1,5	-
2,7/3,0	1,2/1,6	0,7/1,2	0,3 máx.	0,1 máx	-	-	0,3/0,5

Se ha encontrado que cilindros aleados con una moderada cantidad de carburos en la estructura son admirablemente apropiados para laminación de planchas y particularmente para laminar planchones en las cajas desbastadoras de molinos de laminación de lámina en caliente que, en contraste a los de hierro enfriado y los rodillos más duros de temple indefinido, ellos son bastante insensibles a los esfuerzos térmicos que pueden fácilmente causar rotura de cilindros y resistencia al fisuramiento en caliente. Debido a su estructura, que puede tener grandes cantidades de bainita, estos rodillos son una transición a los de temple indefinido reales. Con una dureza de 60/65<sup>1</sup> shore D, ellos contienen:

%C	%Si	%Mn	%P	%S	%Cr	%Ni	%Mo
3,1/3,3	0,0/1,0	0,0/1,0	0,2 máx.	0,1 máx	0,9/1,2	2,0/3,0	0,3/0,5

Rodillos con matriz bainítica y martensítica.-

Representan los verdaderos rodillos de temple indefinido los cuales han ganado constantemente importancia en los últimos años. Se caracterizan no solamente por el alto contenido de carbono sino también por la estructura de la matriz y la forma del grafito. Con buenos cilindros de esta clase, el grafito debería ser distribuido interdendríticamente como se muestra en la figura 33. Los aleantes básicos que tienen son cromo, molibdeno y níquel. La matriz consiste predominantemente de bainita y/o martensita, aunque alguna perlita fina puede estar presente.

El rango de dureza 60/65 Shore D, se producen cilindros pequeños y medianos que sirven para laminación de perfiles ligeros, láminas y a-



figura 33. Estructura de la cáscara de un rodillo de temple indefinido. Atacado con Nital 200X. (10).

lambre. Ellos son por lo tanto competitivos con rodillos de hierro enfriado y nodular. Es no solo difícil para el laminador hacer la selección correcta en estos casos, sino que aún el fundidor tiene problemas en recomendar el tipo más conveniente.

Los cilindros de temple indefinido con durezas más altas han ganado especial importancia en molinos continuos para laminación de láminas en caliente.

Los rodillos de trabajo para lámina y particularmente para lámina ancha, no están hechos de material de temple indefinido a través de la sección transversal completa, puesto que se romperían porque no serían capaces de absorber esfuerzos térmicos y mecánicos, sino que son producidos como fundiciones compuestas (método de doble colada). La composición química en la superficie de los mismos está dentro de los siguientes rangos:

desbastamiento

%C	%Si	%Mn	%Cr	%Ni	%Mg
3,1/3,3	0,8/1,0	0,4/0,6	0,7/1,2	0,2/0,3	2,0/3,5

acabado

3,2/3,5	0,8/1,2	0,5/1,0	1,5/2,0	0,3/0,5	4,0/4,6
---------	---------	---------	---------	---------	---------

Las durezas están entre 64/75 y 70/90 Shore D respectivamente.

\* Los factores decisivos para el buen desempeño de estos rodillos en el molino son: forma de grafito, matriz, espesor de cáscara, disminución de dureza dentro de la cáscara y otras características que algunas veces son tan ligeras que a primera vista no parecen ser importantes pero son significativas para el rendimiento en servicio.

Los esfuerzos residuales después del enfriamiento a temperatura ambiente son inevitables en la elaboración de rodillos compuestos y una de las mayores causas generadoras de dichas tensiones es la presencia de dos materiales diferentes en la misma fundición.

Los rodillos de temple indefinido de composiciones similares a aquellas indicadas arriba y producidos como fundiciones dobles, también son de uso frecuente en molinos de lámina de cuatro rodillos, donde generalmente dan mayor rendimiento que aquellos de hierro enfriado. Para esta aplicación se utilizan durezas de 65/80 Shore D.

\* Rodillos de hierro nodular.-El hierro fundido

con grafito nodular también llamado hierro dúctil tiene considerable éxito en cilindros de laminación. La mayor diferencia con aquellos descritos anteriormente consiste en el hecho de que el grafito esté presente no como hojuelas sino como nódulos. Los cilindros de hierro nodular combinan las ventajas resultantes de la presencia de grafito (tales como mordido, resistencia al fisuramiento en caliente y ausencia de soldaduras), con las buenas propiedades del acero; además, pueden estar sujetos a tratamiento térmico. Son consecuentemente, muy resistentes a la rotura y pueden reemplazar a rodillos tanto de acero como de hierro fundido con grafito en hojuelas. La figura 34, presenta un cuadro de los

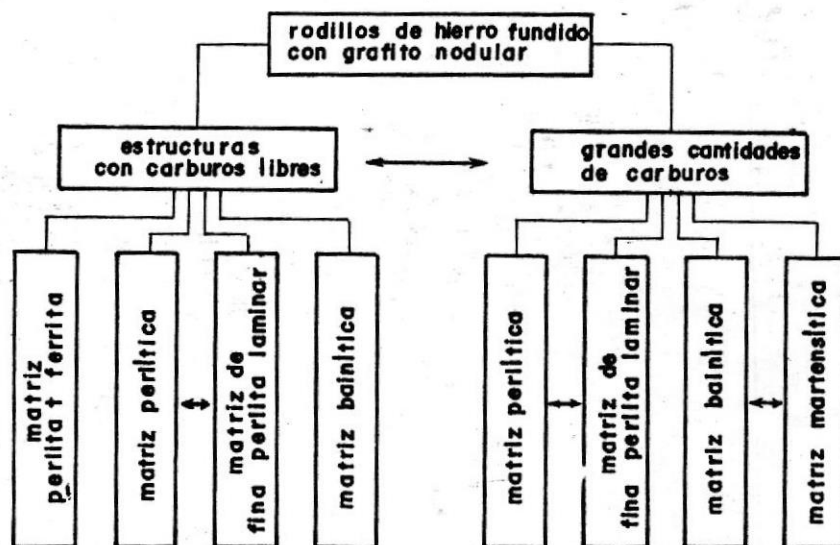


figura 34. Clasificación de rodillos de hierro nodular en base a la estructura de la matriz en la superficie de trabajo. Las flechas con doble dirección indican una transición gradual de un tipo a otro.

grados desarrollados con este material.

Rodillos de hierro nodular de estructuras con carburos libres.- Rodillos pesados de esta clase se funden generalmente en arena, pero tamaños medianos y ligeros se funden en moldes metálicos. A continuación se indican sus composiciones químicas normales :

Estructura de la matriz	%C	%Si	%Mn	%Cr	%Mo	%Ni
perlita, ferrita	2,8/3,4	1,5/2,2	0,2/0,8	0/0,5	0/0,4	0,5/2,0
perlita	3,2/3,6	1,0/1,8	0,5/1,5	0/0,8	0/0,4	0,5/2,0
perlita fina lam.	3,2/3,6	1,0/1,8	0,5/2,5			
bainita	3,2/3,6	1,0/1,8	0,5/1,5			
martensita	3,4/3,8	0,8/1,5	0,5/1,5			

Para todos los tipos: %P 0,1 máx; %S 0,01 máx; %Mg 0,05/0,1

Nótese que como los nódulos de grafito debilitan la matriz metálica solo ligeramente, los aleantes son más importantes que para rodillos con grafito en hojuelas.

Los cilindros de este material son empleados exclusivamente en laminación de perfiles, con los tipos más suaves para desbaste y los duros como intermedios y aún acabadores. Presentan las siguientes propiedades mecáni-

cas:

Estructura de la matriz	Dureza Brinell	Dureza Shore D	Resistencia tensil, ksi	Elongación %
perlita, ferrita	200/260	30/40	65/90	2/5
perlita	250/340	38/50	70/100	1/3
perlita fina lam.	300/380	45/55	80/105	0,5/2
bainita	260/380	40/55	70/115	0,5/2

Rodillos de hierro nodular con carburos en la estructura.- El uso de estos cilindros es mucho más común que aquellos de estructuras con carburos libres, un hecho que no es sorprendente, pues su mayor resistencia en comparación con aquella del hierro con hojuelas de grafito, permite un contenido mayor de carburos reductores del desgaste, sin comprometer la resistencia a la rotura. Estos rodillos son siempre fundidos en moldes metálicos. Sus composiciones se asemejan a las dadas para rodillos de hierro nodular de estructuras con carburos libres. La relación entre carburos libres y combinados está generalmente ajustada por medio de los contenidos de silicio y/o cromo.

El tipo perlítico, cuya microestructura es mostrada en la figura 35, encuentra uso en el

desbaste de plancha, pero principalmente para laminar perfiles. Una elevación en la productividad puede obtenerse con el empleo del tipo bainítico. Finalmente, los rodillos de grafito nodular martensíticos son utilizados particularmente en molinos de varillas. Las propiedades mecánicas aproximadas son:

Estructura de la matriz	Dureza Brinell	Dureza Shore D	Resistencia tensil, ksi	Elongación %
perlita, ferrita	340/450	50/65	50/80	0,5/1
perlita	410/510	60/75	55/85	0,2/0,8
perlita fina lam.	410/550	60/80	55/100	0/0,6
bainita	510/630	75/95	-	-

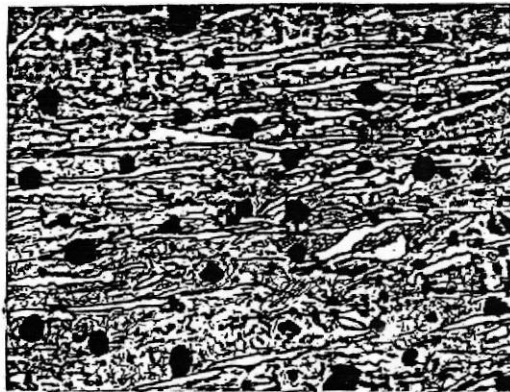


figura 35. Estructura de la capa exterior de un rodillo de hierro nodular del tipo perlítico. (10).

Debido a su estructura, los rodillos de hierro nodular con un alto contenido de carburos pueden también ser llamados como de temple indefinido con grafito nodular. Esta similitud ha llevado de nuevo a la producción de tales cilindros como fundiciones compuestas. La tenacidad del hierro nodular ha sido utilizada para facilitar el material del corazón de rodillo de trabajo de temple indefinido que tienen cáscara con grafito en forma de hojuela. Los mencionados cilindros son utilizados en aquellos casos que involucran cargas particularmente elevadas.

#### 2.3.2.2 MÉTODOS DE FUNDICION

Método de una sola colada.- Se caracteriza porque el molde es utilizado generalmente en posición vertical y llenado por el fondo, de una sola vez, con un chorro tangencial. La figura 36 muestra moldes listos para la fundición de rodillos por este método. El objetivo de la pared de hierro fundido en la figura 36a), es la obtención de hierro enfriado en el barril, mientras que el de los anillos insertados en el molde de la figura 36 b) es promover una estructura más refinada y mayor resistencia al desgaste en los pases.

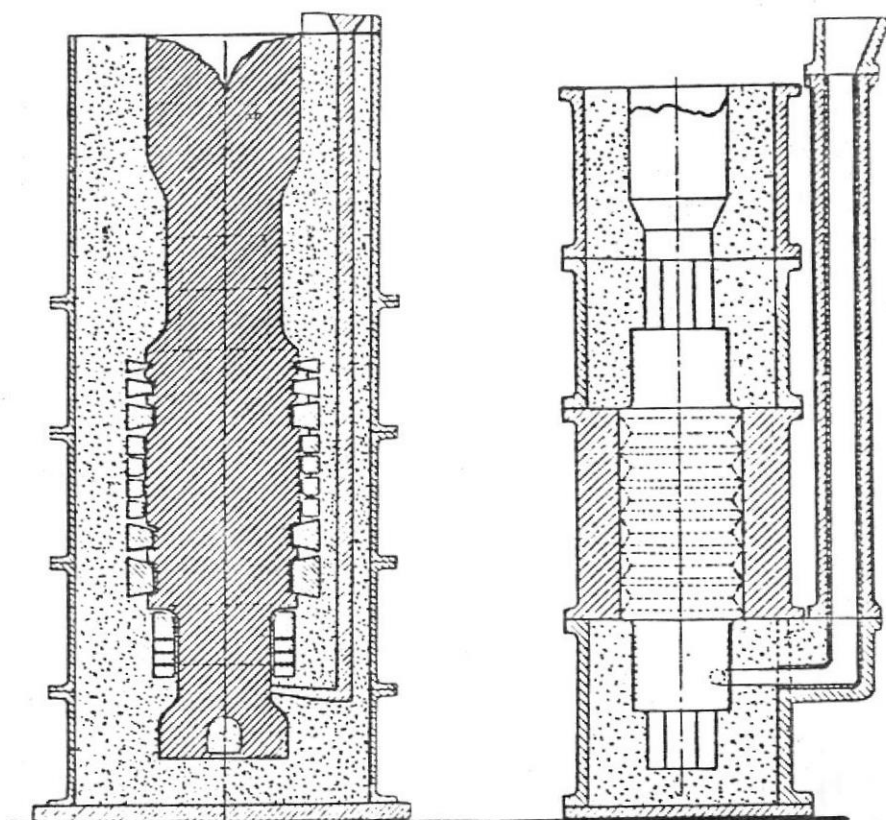


figura 36. Moldes para fundir rodillos por simple colado. a) Con anillos de hierro fundido en el barril y cuello b) Con pared de hierro fundido en el barril. (17).

Método de doble colada. - En una variedad de este método introducido inicialmente en 1936, se conecta una piquera al cuello superior del molde convencional, unas pocas pulgadas arriba del cuerpo del rodillo (figura 37). El metal de una composición tal como para proporcionar buena dureza y resistencia al desgaste en la superficie se cuela primero. Después de la solidificación de éste hasta un espesor

adecuado cerca de los enfriadores, el hierro remanente todavía líquido es evacuado por un segundo vaciado consistente de una aleación que proporcionará la tenacidad y resistencia al choque requerida en el corazón del cuerpo, cuello y uniones de transmisión.

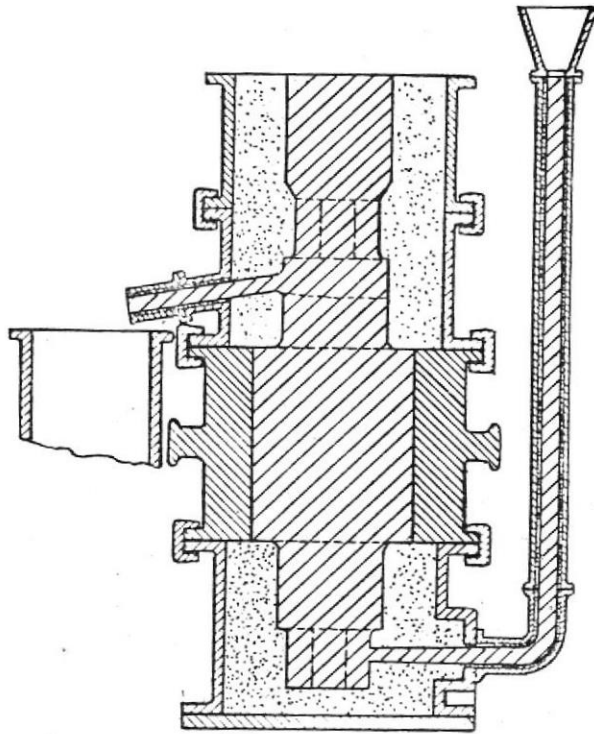


figura 37. Molde para fundición de rodillos por doble colada. (17).

La incorporación de una compuerta deslizante en la parte inferior del molde es una mejora de este procedimiento (figura 38). Posterior a la solidificación de lo que luego será la superficie de trabajo del cilindro, la compuerta se abre para drenar el metal fundido remanente y se cierra entonces para proceder

a fundir lo que resta de la pieza.

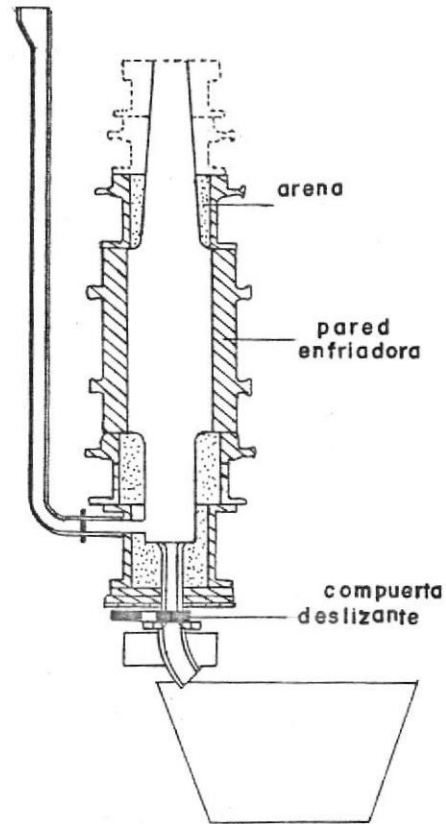


figura 38. Diseño de molde para producción de rodillos por el método de doble colada (7).

### 2.3.2.3 TOLERANCIAS DE MAQUINADO

Para considerar las tolerancias de maquinado, se fija la atención en la secuencia seguida para el tallado de los canales, esto es:

- a) diseño del pase
- b) elaboración de la plantilla
- c) preparación de la cuchilla
- d) maquinado del canal

Las plantillas, que son una reproducción de un pase o parte de él (figura 39), se con-

feccionan en chapas de acero de 1,5 mm de espesor aproximadamente, mediante el uso de sierras y limas, por lo que se puede estimar variaciones del orden de  $\pm 0,05$  mm. Estas plantillas son utilizadas en primer lugar para efectuar el afilado de las herramientas verificando con ellas mediante superposición, la correcta forma que esta debe adquirir; permitiéndose entonces desviaciones de  $\pm 0,05$  mm de la medida nominal. Luego, para maquinarse el pase en un torno, se usa la cuchilla preparada previamente y se va comprobando con la plantilla correspondiente el progreso en esta operación; consecuentemente, errores de  $\pm 0,02$  mm se podrían admitir.

De las consideraciones anteriores, la tolerancia máxima que se puede dar en el maquinado

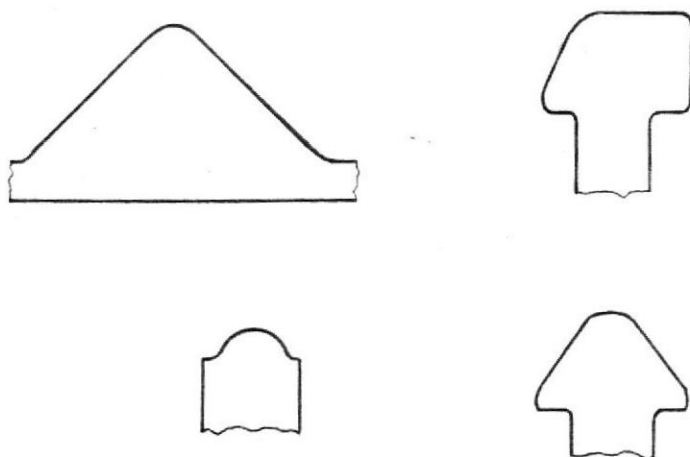


figura 39. Plantillas de diferentes formas para usar en el maquinado de rodillos de laminación.

do de los pases será  $\pm 0,12$  mm obtenida de la suma algebraica de los valores  $\pm 0,05$ mm;  $\pm 0,05$  mm;  $\pm 0,02$  mm.

Además de las plantillas que representan exclusivamente la forma de los pases, se construyen otras adicionales que facilitan el torneado durante el desbaste y contribuyen a la ubicación correcta de los canales (figura 40).

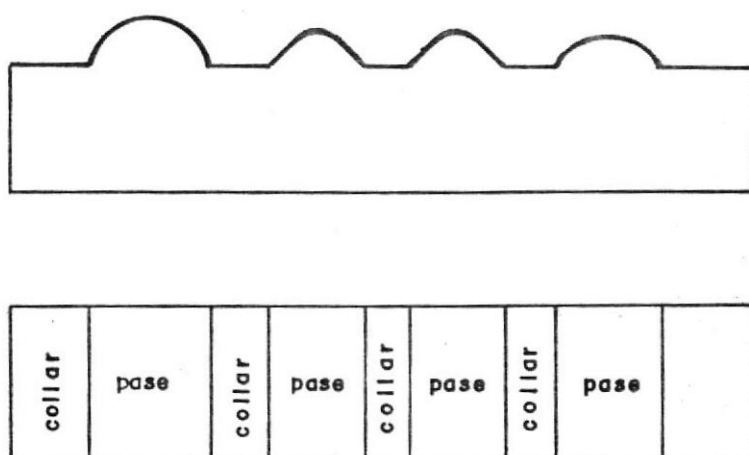


figura 40. Plantillas para desbaste, en el maquinado de los pases de rodillos de laminación (19).

#### 2.3.2.4 ENDURECIMIENTO SUPERFICIAL

Temple a la llama.- Este procedimiento consiste en templar una capa superficial delgada de una pieza, calentándola rápidamente con llama a la temperatura de austenización conveniente y luego enfriándola en agua o aire. La llama de alta temperatura se obtiene por

combustión de una mezcla de gas combustible con oxígeno o aire. Aunque este tratamiento térmico se presta más para aplicarlo en piezas de sección uniforme se usa también en grandes piezas que por su volumen no pueden ser introducidas en los hornos de temple.

En rodillos de laminación, este endurecimiento puede ser hecho con un método conocido como rotativo-progresivo, en el que al cilindro se lo hace rotar con el objeto de que los quemadores distribuidos radialmente (figura 41), calienten una banda circunferencial an-gosta. Al ir desplazando a lo largo del rodillo, el anillo que porta los quemadores y las duchas de temple, simultáneamente se calienta un nuevo trozo de banda y se temple uno similar.

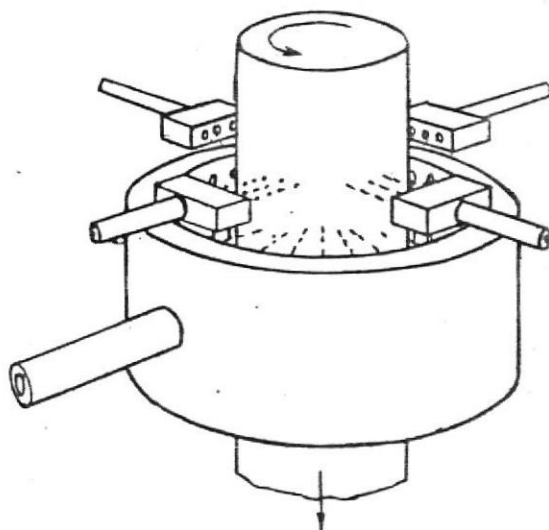


figura 41. Método rotativo-progresivo para endurecimiento superficial de rodillos de laminación (18).

Con grandes secciones se pueden lograr penetraciones de dureza de hasta 13 mm y factores tales como combustible usado, duración del calentamiento, templabilidad del material de los rodillos como medio de enfriamiento, etc; deben ser convenientemente seleccionados para obtener los mejores resultados con este tratamiento.

Endurecimiento por inducción.-Con este método, el calentamiento superficial del rodillo resulta de la resistencia del metal al paso de corrientes de inducción generadas por un campo magnético rápidamente cambiante. El funcionamiento del horno para el tratamiento es semejante al de un transformador en el cual el primario está constituido por varias vueltas de tubería de cobre enfriadas por agua, y el cilindro a endurecerse desempeña el papel del secundario. Las corrientes inducidas de alta frecuencia tienden a viajar por la superficie del metal, lo cual se conoce como efecto de piel, siendo posible de este modo, calentar una capa poco profunda del material sin calentar el interior. Sin embargo, el calor aplicado a la superficie, tiende a fluir hacia el centro por conducción, por tanto, el

tiempo de calentamiento es un factor importante para controlar la profundidad de la zona endurecida. La capa superficial se calienta prácticamente al instante, a una profundidad que es inversamente proporcional a la raíz cuadrada del valor recíproco de la frecuencia. La figura 42 a), muestra el esquema de un temple por inducción estático mientras que la figura 42 b) el esquema de un temple por inducción progresivo. El intervalo de frecuencias comúnmente empleadas varía entre 2000 y 50000 ciclos por segundo, aunque con cierto tipo de rodillos se han usado con éxito frecuencias de hasta 50 ciclos por segundo, sin almacenar demasiadas calorías que no podrían ser eliminadas con bastante rapidez por el sistema de enfriamiento.

Las ventajas del endurecimiento por inducción con relación al temple a la llama son las siguientes:

- durante toda la operación del equipo se puede mantener un estrecho control de la temperatura dentro de un margen de más o menos 6°.
- se puede obtener mayor profundidad en penetración de dureza, sin cambios de importancia, hasta 5/8 " por debajo de la superficie.
- en las operaciones de reendurecimiento es

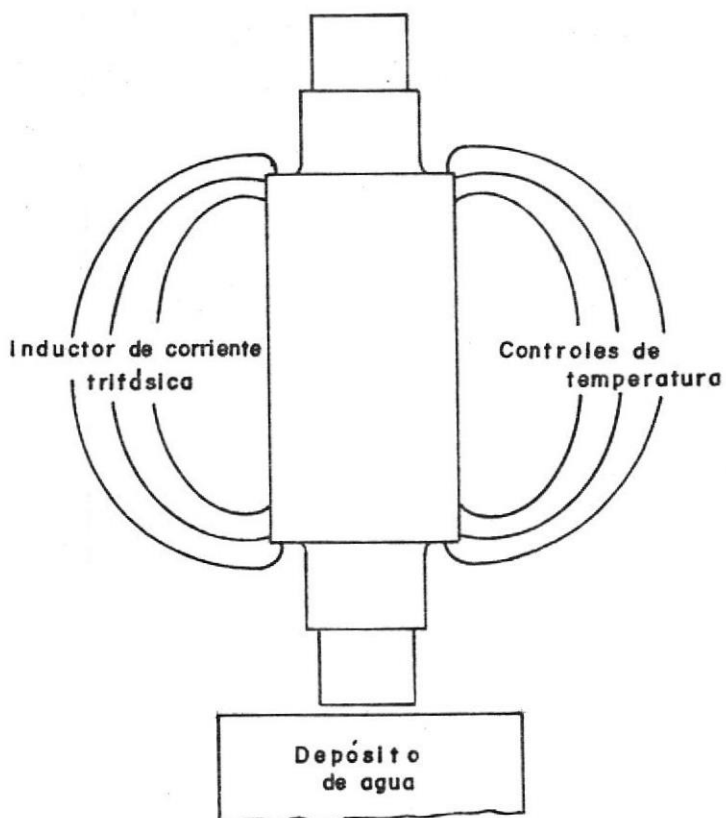


figura 42 a). Esquema de un temple por inducción electromagnética estática (19).

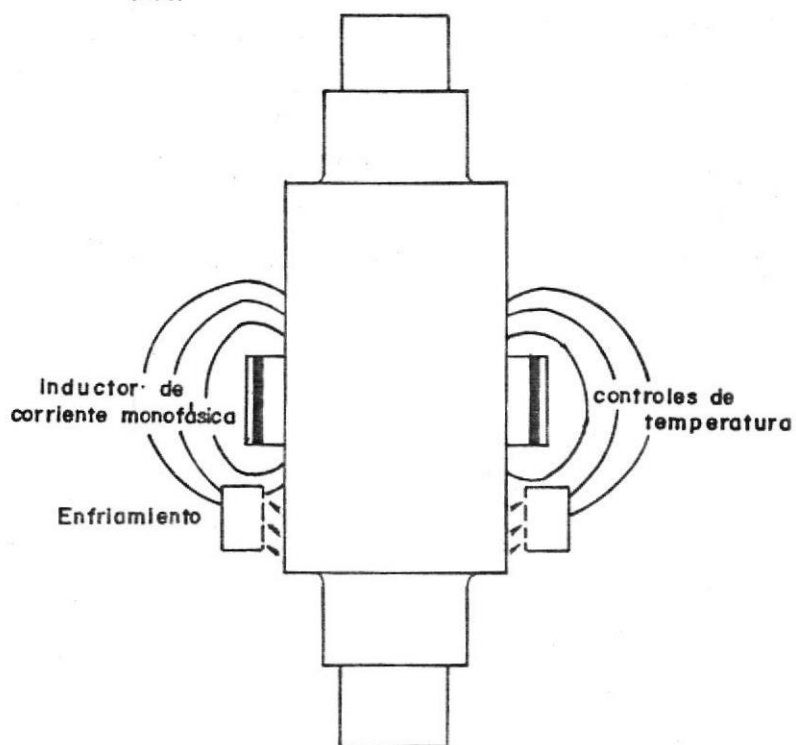


figura 42 b). Esquema de un temple por inducción electromagnética al desfile.

preferible el endurecimiento progresivo por inducción, dado que se pierde un mínimo de material por la baja tasa de oxidación que resulta de las elevadísimas velocidades de calentamiento (300 °C/min.) durante el tratamiento; los cilindros se pueden reendurecer con un mínimo de 0,025 a 0,03 " de pérdida de material en el diámetro.

-las tensiones térmicas que se producen con el endurecimiento progresivo por inducción se mantienen en un mínimo. Estas tensiones son consecuencia principalmente, de una dilatación del 4 % en volumen que se produce cuando la austenita se transforma en martensita. Con el método de inducción progresivo, solo se endurece una capa exterior del metal de hasta 63 mm. por debajo de la superficie y la naturaleza progresiva del endurecimiento permite un alivio parcial de la tensión, pues el anillo de metal frío y endurecido está junto a un anillo de metal caliente y dúctil que se encuentra directamente encima y que, como es plástico, está libre para moverse y aliviar las tensiones.

## CAPITULO III

### 3. CONTROL DE CALIDAD

#### 3.1 METODOS DE CONTROL

Un riguroso control de calidad durante la fundición y el maquinado de los cilindros de laminación se debe observar, parcialmente en vista de lo caro del rodillo mismo, pero principalmente a causa del bastante mayor costo involucrado en un molino detenido debido a rotura de un rodillo.

Las pruebas y métodos de control usados a lo largo de la manufactura de los rodillos incluyen:

- a) Cuidadoso control de calidad de materiales añadidos al horno.
- b) Control de composición química y de parámetros de fusión.
- c) Pruebas de endurecimiento para controlar la capa dura.
- d) Pruebas de dureza y ultrasónicas previas al maquinado final.
- e) Pruebas de rugosidad en la superficie de los rodillos.

##### 3.1.1 FUNDICION

La composición del material que conformará las cargas para el horno se debe verificar

continuamente. Para cada caso, el procedimiento de fusión es generalmente supervisado a través del análisis de una o más muestras preliminares y de una muestra final; después de que se logra los porcentajes deseados de los elementos en el metal, se procede con el colado. Suelen usarse espectrómetros con capacidades de detección de hasta 14 elementos en cinco minutos. El carbono y el azufre son determinados en aparatos automáticos separados. La temperatura del metal líquido inmediatamente antes del colado es un factor muy importante por ello se comprueba varias veces con pirómetros de inmersión.

Luego del desmoldeo, por observación visual, se pueden notar muchos defectos en los rodillos fundidos tales como: uniones frías, porosidades superficiales, apariencia, etc. Si aún no se detectan fallas, con la finalidad de evitar el innecesario y costoso maquinado de una fundición defectuosa es deseable confirmar la presencia (o ausencia) de ellas en un estado temprano de la fabricación, usando el ensayo de ultrasonido. De una consideración de las cualidades metalúrgicas de los rodillos de hierro fundido ha sido encontrado

que una frecuencia de inspección de  $1/2$  Mc/s es la más satisfactoria con ondas de prueba longitudinales ya sea a lo largo o a través de los rodillos. Para rangos de trabajo estrechos o para el escudriñamiento exacto de un desgarramiento interno, una vez que su presencia se detecta, se emplea generalmente una frecuencia de prueba de 1-2 Mc/s (figura 43).

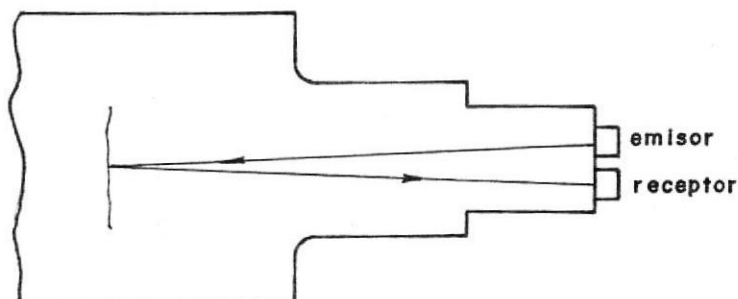


figura 43. Inspección de fallas en un rodillo con sonda ultrasónica longitudinal de  $1/2$  Mc/s.

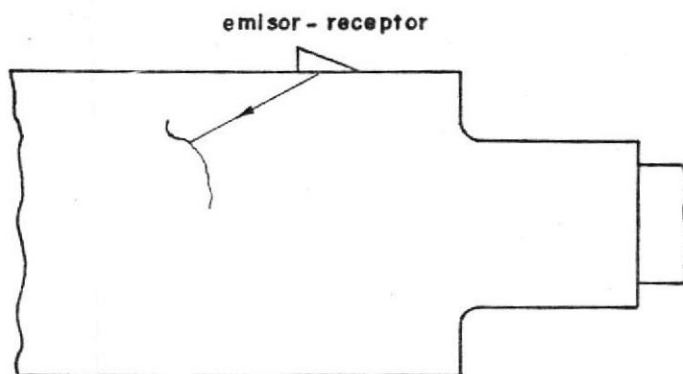


figura 44. Inspección de fallas en un rodillo con sonda ultrasónica cortante de  $2\ 1/2$  Mc/s  $60^\circ$ .

El uso de transductores con ondas cortantes (figura 44), también juega un papel esencial en la evaluación del tamaño y orientación de las fallas. Es recomendable tener una gran cantidad de transductores con ondas de corte disponibles a frecuencias de 1-5 Mc/s y ángulos de 45, 60 y 70°

### 3.1.2 METALURGICO

El control metalúrgico que certificará si el material de los rodillos cumple o no con las normas puede dividirse en:

- control de propiedades mecánicas
- control de microestructura

### 3.1.3 GRADO DE ACABADO

Los rodillos de laminación al igual que otros elementos deben responder a rigurosas condiciones de rozamiento, deslizamiento y desgaste con el tiempo. Además de los límites geométricos y dimensionales es necesario, por tanto, establecer el grado de pulimentación de las superficies. Estos límites en otros términos, deben contener los errores microgeométricos, los cuales definen el grado de rugosidad. Todos estos errores microgeométricos dependen del modo según el cual se ha podido

realizar la superficie. Las mismas cuchillas de corte pueden haber creado, por su forma, rayaduras superficiales; los mecanismos que determinan los movimientos de las herramientas pueden provocar anomalías periódicas con una frecuencia regular.

La rugosidad de una superficie y sus términos están expresados en la figura 45. La rugosidad media, indicada con el símbolo  $R_a$ , está representada por el valor medio aritmético de los desplazamientos  $Y$  en valor absoluto del perfil de la línea media de longitud  $L$ . Entonces,

$$R_a = \frac{1}{L} \int_0^L Y \, dx \quad (3.1)$$

Entre los equipos que sirven para controlar

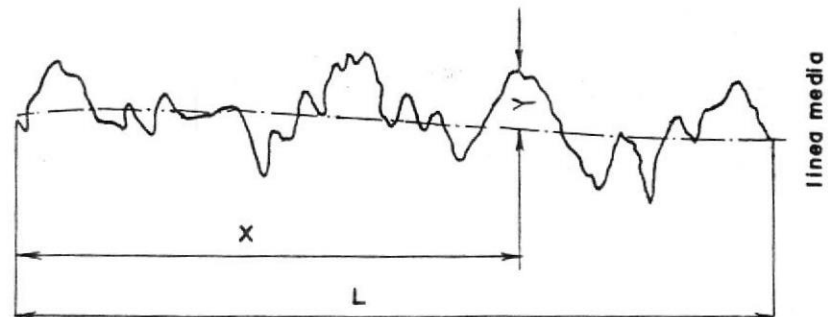


Figura 45. Explicación gráfica de la rugosidad de una superficie y sus términos(20).

el acabado superficial, algunos estudian la superficie de la pieza mediante una punta especial en forma de aguja. Los perfilómetros son aparatos en los cuales el desplazamiento de la aguja se transmite a una escala graduada; mientras que en los perfilógrafos, los movimientos de la aguja son graficados a escala aumentada.

Existen además, muestrarios que contienen patrones de rugosidad superficial de los seis principales métodos de maquinado en los valores comunes, Ra. Los datos de maquinado para la producción de estos especímenes modelos han sido seleccionados en cooperación con muchas empresas industriales y en base a investigaciones realizadas. Las 30 muestras de la tabla de patrones de comparación utilizadas en el presente trabajo, están calibradas en micras, Ra. Dichos valores son exactos dentro de  $\pm 10\%$  de los nominales indicados, excluyendo errores de instrumentos. Esta tabla se usa palpando el espécimen probable y comparando esta sensación con la que produce palpar la pieza cuya rugosidad se desea conocer.

#### 3.1.4 DUREZA SUPERFICIAL

De los numerosos métodos disponibles para me-

dir la dureza de la superficie de los rodillos, la técnica basada en la relación de la dureza superficial a las características de impacto de un pequeño cuerpo sobre dicha superficie, son las más empleadas debido a su simplicidad. Este tipo de dureza (Shore), se mide mediante el escleroscopio mostrado en la figura 46, el cual permite conocer la altura de rebote de un pequeño martinete que lleva en la punta un diamante, al caer desde una altura determinada sobre la superficie que se va a ensayar. Normalmente este durómetro dispone de un cuadrante indicador en el que automáticamente queda registrada la altura de rebote del martinete, así que cuanto mayor es el número que corresponde sobre la escala, mayor es la dureza de la pieza ensayada.

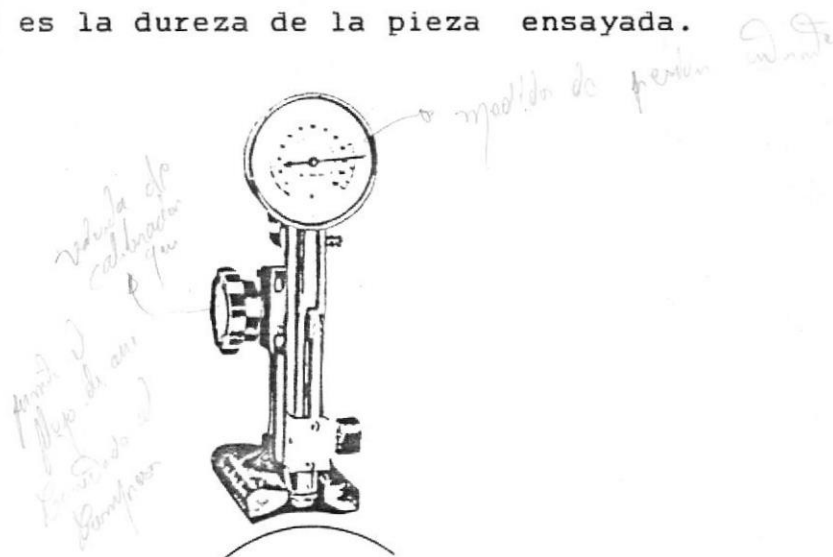


figura 46. Escleroscopio en posición para medir la dureza del barril de un rodillo.

## CAPITULO IV

### 4 PRUEBAS

Los cilindros fabricados son denominados a continuación con las siglas

C X-Y

que significan respectivamente:

C = cilindro

X = número de fundición

Y = orden de colado.

### ENSAYOS MECANICOS

Los ensayos de dureza, impacto y tracción; cuyos resultados se dan en las tablas I, II y III respectivamente se realizaron en los laboratorios de la ESPOL. Los valores de dureza superficial de los rodillos después de maquinados se muestran en la tabla IV.

TABLA I

### ENSAYO DE DUREZA

Equipo usado: Durómetro Rockwell  
Fecha: 23-04-87

Denominación	Dureza Rockwell C promedio
C 1-1	30
C 1-2	32
C 2-2	31
C 2-3	28

TABLA II

## ENSAYO DE IMPACTO CHARPY

Material: Hierro nodular                      Norma: E 23  
 Temp. de ensayo: Temp. amb.              Fecha: 23-04-87  
 Equipo usado: Máquina universal de impacto

Denominación: C 2-2

Probeta #	Energía absorbida Kg.m
1	1,3
2	1,4
3	1,6
4	1,1

Denominación C 2-3

Probeta #	Energía absorbida Kg.m
1	0,7
2	0,6
3	0,8

TABLA III

## ENSAYO DE TENSION

Material: Hierro nodular  
 Temp. de ensayo: Temp. amb.  
 Velocidad de ensayo: 1 mm/min  
 Equipo usado: INSTRON 1128  
 Denominación: C 2-2

Norma: ASTM 370  
 Fecha: 24-04-87

Probeta #	Diámetro de la muestra mm	Sección de la muestra mm <sup>2</sup>	Longitud inicial mm	Longitud final mm	Resistencia a la tracción Kg/mm <sup>2</sup>	Alargamiento %
1	7,79	47,66	35,5	36,65	83,93	3,23
2	7,97	49,89	35,0	35,90	78	2,56

Denominación C 2-3

Probeta #	Diámetro de la muestra mm	Sección de la muestra mm <sup>2</sup>	Longitud inicial mm	Longitud final mm	Resistencia a la tracción Kg/mm <sup>2</sup>	Alargamiento %
1	8,59	57,95	35,0	35,35	59,53	1,0
2	8,80	60,82	35,0	35,65	60,01	1,86

TABLA IV

## DUREZA SUPERFICIAL DE LOS RODILLOS

Material: Hierro nodular  
Equipo usado: Escleroscopio

Denominación	Dureza Rockwell C promedio
C 1-1	29
C 1-3	31
C 2-3	30

## MICROSCOPIA

Por el análisis metalográfico se determina el tamaño forma y distribución de las diversas fases e inclu-

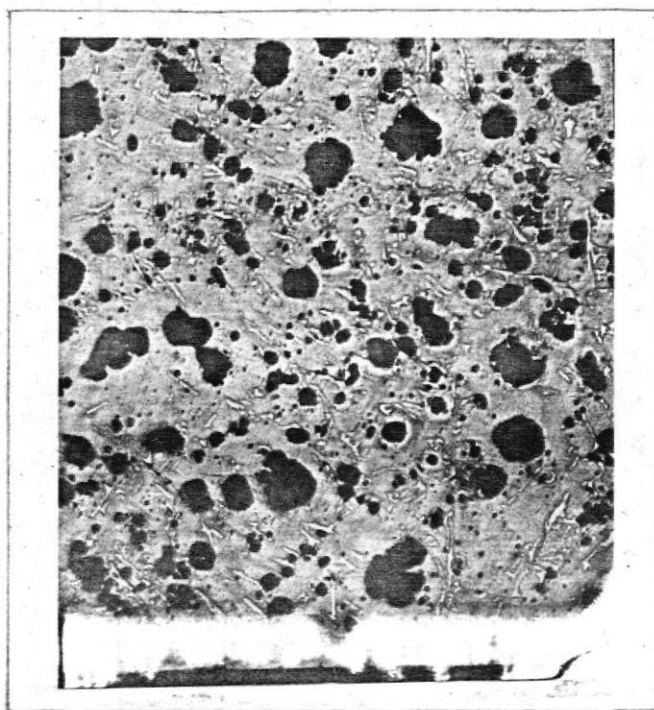


figura 47. Microestructura de hierro dúctil; nódulos de grafito y lagunas de cementita en matriz perlítica. C 2-2. Atacado con Nital al 2%. 100X

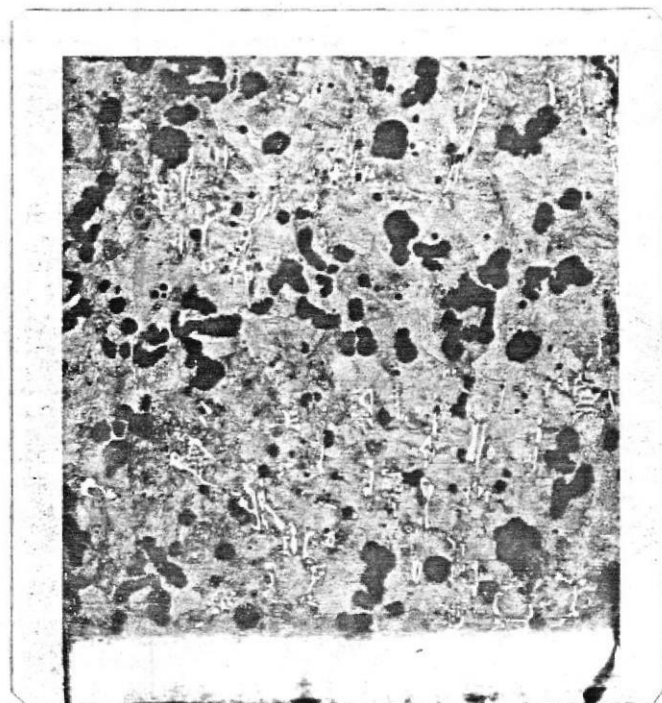


figura 48. Microestructura del rodillo C 2-3. Grafito nodular irregular y lagunas de cementita en matriz perlítica. Atacado con Nital al 2%. 100X

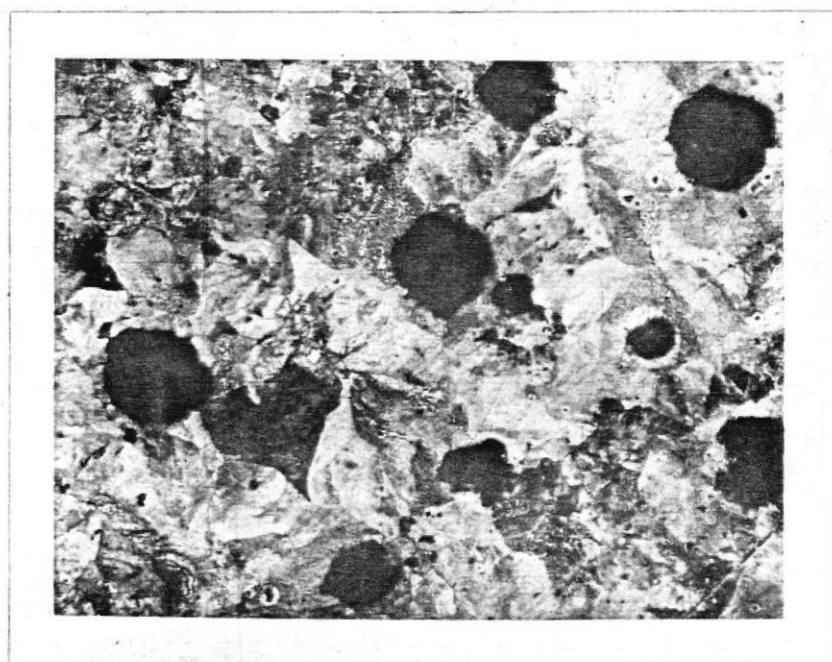


figura 49. Microestructura del rodillo C 1-2. Se observa grafito nodular y algunas lagunas de cementita en matriz perlítica. Atacado con Nital al 2%. 113 X.

siones del hierro nodular. Las figuras 47 a 49 son las microestructuras del material de los rodillos.

#### ANALISIS QUIMICO

El análisis químico del material obtenido en la primera fundición de rodillos de hierro nodular, se hizo en España por una gentileza del Centro Nacional de Investigaciones Metalúrgicas CENIM. Los resultados se dan en la tabla V

TABLA V  
ANALISIS QUIMICO

%	D e n o m i n a c i ó n		
	C 1-1	C 1-2	C 1-3
C	2,55	2,29	2,42
Si	2,40	2,65	2,25
Mn	0,52	0,50	0,50
S	0,004	0,004	0,004
P	0,058	0,058	0,059
Cr	0,50	0,60	0,50
Ni	3,20	3,20	3,30
Mg	0,02	0,03	0,03

## ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS

Inspección visual.- Observando a simple vista el rodillo C 1-2, presenta una unión fría profunda en su barril. Por lo demás no hay novedad.

Ensayo de ultrasonido.- Para la detección de fallas internas en los cilindros fundidos, se usa el equipo de ultrasonido del Laboratorio de Metalurgia de la ESPOL. Este equipo tiene un osciloscopio KRAUTKRAMER USK6 y el transductor para inspección es de 2 MHz con ondas de prueba longitudinales. Con una ganancia de inspección de 32 db y calibración en la pantalla de 1:5, se determinó lo siguiente:

De los tres rodillos maquinados, aquel cuya denominación es C 1-3 presenta un rechupe como se muestra en las figuras 50 y 51; además, tiene algunas porosidades pequeñas ya que se observa bastante atenuación en la pantalla del osciloscopio. Los otros dos rodillos, esto es C 1-1 y C 2-3, están en mejor condición: no presentan rechupe y tienen menos porosidades.

### \* PRUEBAS DE FUNCIONAMIENTO DE LOS RODILLOS

Hasta hoy no se realizan pruebas experimentales de funcionamiento del molino de laminación (figura 52), por falta de presupuesto para la reparación de la unidad motriz.

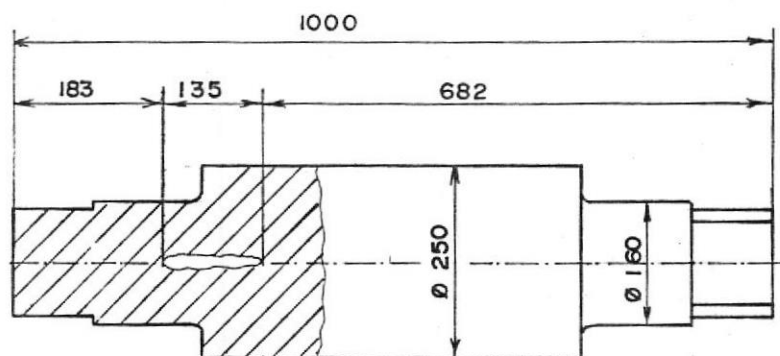


figura 50. Posición y longitud aproximada del rechupe en el rodillo C 1-3

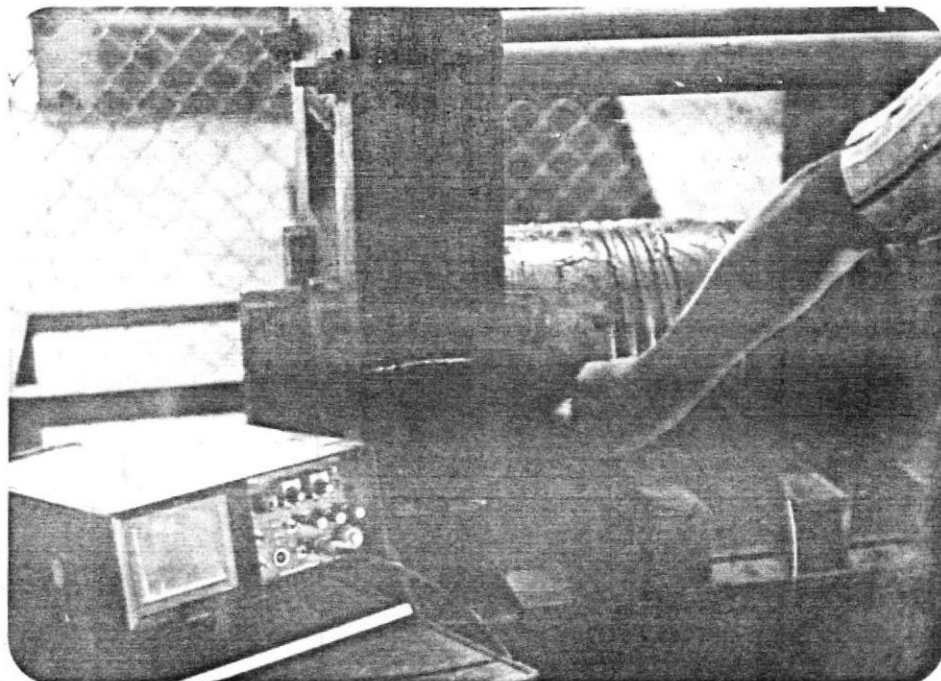


figura 51. Osciloscopio detectando un rechupe en el rodillo C 1-3

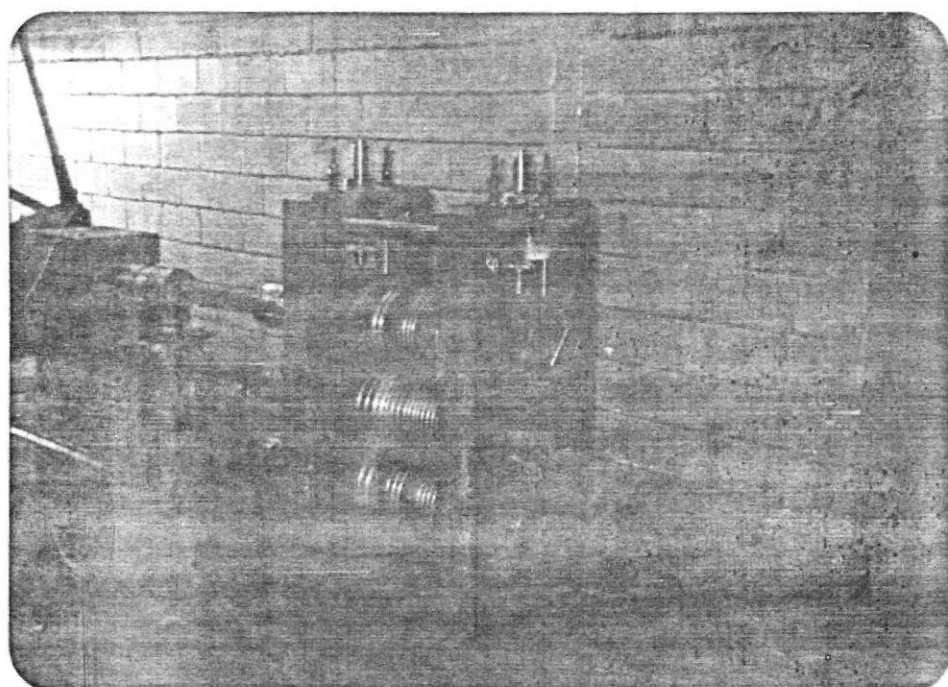


figura 52. Molino de laminación trío de la ESPOL

## CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Los ensayos mecánicos y no destructivos, el análisis metalográfico y químico realizado al material de los rodillos dan cuenta de los resultados satisfactorios obtenidos pese a ser la primera ocasión que se construye cilindros de laminación en el Ecuador. Sin embargo, se debe aclarar lo siguiente:

-Es significativamente económico el método de producción utilizado tanto por el precio del horno de cubilote comparado con el de otros, como por la facilidad de su operación.

-Por la presencia del rechupe en uno de los rodillos, además de las porosidades, se deduce la importancia del control de temperatura del metal inmediatamente antes del colado.

-La igualdad de dureza en la superficie del rodillo con la del centro del mismo indica que los enfriadores colocados en el molde, a lo largo de lo que será el barril del rodillo, no han producido endurecimiento.

-La composición química del material de los rodillos de hierro nodular logrados en la primera fundición debería haber sido

%C	%Si	%Mn	%S y %P	%Cr	%Ni	%Mo
3,5	1,9	0,45	0,015	0,65	2,7	0,4

pero según la tabla IV hay bajo contenido de carbono por lo que es necesario buscar los causales, que pueden ser: cantidad, tipo y tamaño del coque empleado; temperatura de fusión; uniformidad en el régimen de fusión; temperatura del aire soplado; humedad en el aire soplado, etc. Es por tanto muy importante el control de composición química durante la fundición.

- La cantidad de magnesio disuelto en el material (0,03%), está en un valor esperado, por ello la modificación realizada con 1,2 % de Fe-Si-Mg es adecuada.
- De los cálculos de esfuerzos se deduce que el material de los rodillos responderá sin mayor riesgo de rotura a las exigencias impuestas por el proceso de laminación para el que se diseñan.

Se recomienda:

- Usar un antecrisol para homogenizar el metal cuando se desee obtener rodillos fundidos en horno de cubilote que tengan su composición química igual.
- Una desulfuración previa a la modificación ya que reduciendo el porcentaje de azufre se disminuiría la cantidad de Fe-Si-Mg que hay que añadir, abaratando de esta forma el costo de producción del material.
- Un método de desulfuración intenso daría las ventajas de usar chatarra de hierro gris, tales como: precio y faci-

lidad de obtenerlo en el mercado.

- Estudiar una forma económica de producir palanquilla como materia prima para molinos de laminación.
- Promocionar los rodillos además de otras piezas que se pueden fabricar con este material.
- Hacer estudios de factibilidad para empresas laminadoras pequeñas.
- Los resultados halagadores obtenidos en esta investigación, permiten a futuro, el rápido perfeccionamiento de la técnica y la fácil adaptación a otro tipos de hornos.

APENDICES

APENDICE A

CALCULOS RELATIVOS AL DISEÑO DE RODILLOS  
PARA EL MOLINO DE LAMINACION DE LA ESPOL

Para propósitos de diseño de estos rodillos es necesario tener siempre una idea de la temperatura de la barra desde que sale del horno, ello implica saber el efecto de factores como: el contacto de la barra con los rodillos, el aumento de temperatura debido a la compresión, la caída de temperatura debida a la radiación, entre los principales. Trinks da fórmulas para cada caso. En este trabajo, por razones de experimentación se asume una caída de temperatura por pase de 50°C. Se estima una temperatura de la barra justo antes de entrar al primer pase de 1100°C. Ya que el procedimiento de laminación es manual, una velocidad lineal de la barra entre 3 y 5 m/s permite operar sin mayor peligro de quemaduras para el laminador.

a) ángulo de contacto

Para encontrar el coeficiente de fricción entre barra y rodillos, se usa la expresión  $\mu = 1,05 - 0,0005 T(^{\circ}\text{C})$ ; El ángulo de contacto crítico ocurre en el primer pase donde  $T = 1100^{\circ}\text{C}$  entonces se obtiene,  $\mu = 0,5$ ; luego de la ecuación (2.2), con  $R = 118,55$ ,  $h_1 = 22 \text{ mm}$ ,  $h_2 = 16 \text{ mm}$

$$0,5 \geq \frac{(2 \cdot 237,1 \cdot (22 - 16))^{1/2}}{237,1 - (22 + 16)} = 0,23$$

de lo que se deduce que la barra será "mordida" por los

rodillos

b) diseño de pases

En primer lugar se calcula el ensanchamiento y para esto se usa la ecuación (2.10)

pase # 1

- reducción de área de 25 %
- el ancho de entrada es 22 mm
- la temperatura de entrada de la barra es 1100 °C
- la altura inicial es 22 mm (rectángulo equivalente)
- la altura final es 16 mm (rectángulo equivalente)
- el espacio entre los rodillos es 2,5 mm

$$R = \frac{250 - (15,4 - 2,5)}{2} = 118,55 \text{ mm}$$

$$X_0 = [118,55 (22 - 15,4)]^{1/2} = 27,97$$

$$Y = 3,2 \cdot 0,5 \cdot 27,97^2 = 1251,71$$

$$Z = 2,4 \cdot 27,97 \cdot (22 - 15,4) = 443$$

$$B = 1251,71 - 443 = 808,67$$

$$C = \frac{2 \cdot (22 - 15,4)}{22 + 15,4} = 0,353$$

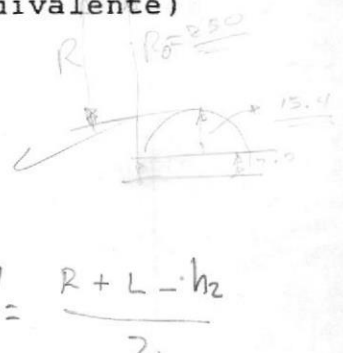
$$D = \frac{2}{2 \cdot 808,67} = 0,299$$

$$E = 0,299 + \log e \quad 22 = 3,39$$

$$F = 3,39 + 0,353 = 3,743$$

$$\frac{w_2^2}{2 \cdot 808,67} + \log e \quad w_2 = 3,743$$

$$w_2 = 27 \text{ mm}$$



se adopta un óvalo de 16 mm de espesor y 27 mm de altura. En la figura 53 están dibujados los pases.

pase # 2

- reducción de área 29 %
- temperatura de la barra 1050 °C
- coeficiente de fricción 0,525
- altura inicial 22,3 mm (rectángulo equivalente)
- altura final 15,92 mm (rectángulo equivalente)

$$R = 118,3 \text{ mm}$$

$$w_2 = 21 \text{ mm}$$

pase # 3

- reducción de área = 25 %
- temperatura de la barra 1000 °C
- coeficiente de fricción = 0,55
- altura inicial 15,5 mm (rectángulo equivalente)
- altura final 11,61 mm (rectángulo equivalente)

$$R = 120,44 \text{ mm}$$

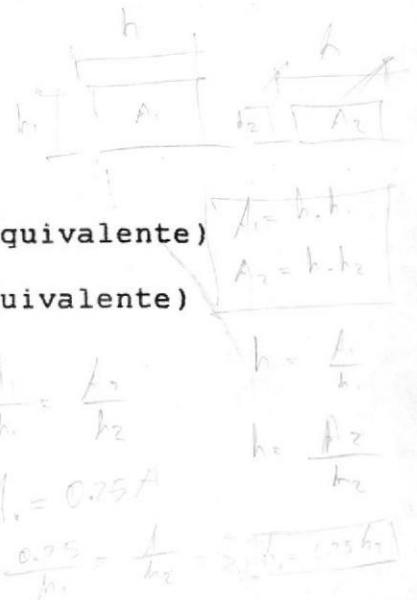
$$w_2 = 19 \text{ mm}$$

pase # 4

- reducción de área 25 %
- temperatura de la barra 950 °C
- coeficiente de fricción = 0,575
- altura inicial = 16,83 (rectángulo equivalente)
- altura final = 12,62 (rectángulo equivalente)

$$R = 119,94 \text{ mm}$$

$$w_2 = 13,5 \text{ mm}$$



pase # 5

- reducción de área = 20 %
- temperatura de la barra = 900 °C
- coeficiente de fricción = 0,6
- altura inicial = 15 mm (rectángulo equivalente)
- altura final = 12 mm (rectángulo equivalente)

$$R = 120,25 \text{ mm}$$

$$w_2 = 15,3 \text{ mm}$$

pase # 6

- reducción de área = 15 %
- temperatura de la barra = 850 °C
- coeficiente de fricción = 0,625
- altura inicial = 12 mm (rectángulo equivalente)
- altura final = 9 mm (rectángulo equivalente)

$$R = 121,75 \text{ mm}$$

$$w_2 = 10,2 \text{ mm (sobre-ensanchamiento)}$$

b) Carga necesaria para deformar la barra en cada pase.

Para esto, se usa la fórmula empírica de Ekelund que se discutió en la sección 2.2.2, entonces,

$$P = b_m (R(h_1 - h_2)) \left[ \mu_p + 2 \frac{e v ((h_1 - h_2)/R)}{h_1 + h_2} \right]^{1/2} \left[ 1 + \frac{1,6 \mu (R(h_1 - h_2))}{h_1 + h_2} - 1,2 (h_1 - h_2) \right]^{1/2}$$

pase # 1

$$b_m = 22 \text{ mm}$$

$$R = 118,55 \text{ mm}$$

$$h_1 = 22 \text{ mm}$$

$$h_2 = 15,4$$

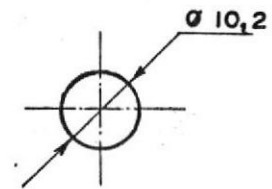
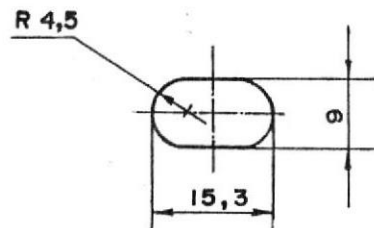
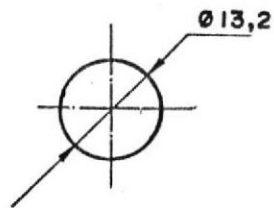
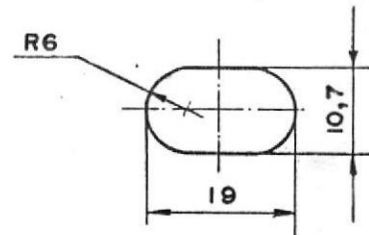
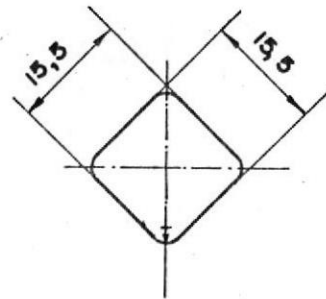
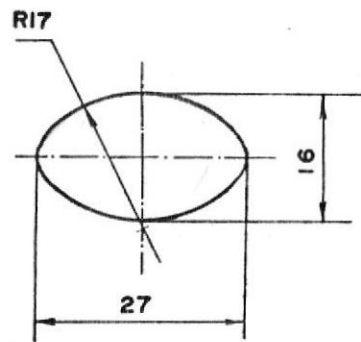


figura 53. Forma de los pases en el molino de laminación

$$K_p = [14 - 0,01 \cdot (1100)] \cdot (14 + 0,3) = 5,1$$

$$\epsilon = 0,01 \cdot [14 - 0,01 \cdot (1100)] = 0,03$$

$$\mu = 0,5$$

$$v = 250 \cdot 2\pi/60 \cdot 118,55 = 3087 \text{ mm/s,}$$

Este valor de la velocidad de laminación se usa en los otros cálculos de la carga.

$$P = 6976,11 \text{ Kg}$$

pase # 2

$$b_m = 15,2 \text{ mm}$$

$$R = 118,3 \text{ mm}$$

$$h_1 = 22,3 \text{ mm}$$

$$h_2 = 15,92 \text{ mm}$$

$$K_p = [14 - 0,01 \cdot (1050)] \cdot (14 + 0,3) = 5,95$$

$$\epsilon = 0,01 \cdot [14 - 0,01 \cdot (1050)] = 0,035$$

$$\mu = 0,525$$

$$P = 5463 \text{ Kg}$$

pase # 3

$$b_m = 15,5 \text{ mm}$$

$$R = 120,44 \text{ mm}$$

$$h_1 = 15,5 \text{ mm}$$

$$h_2 = 11,61 \text{ mm}$$

$$K_p = [14 - 0,01 \cdot (1000)] \cdot (1,4 + 0,3) = 6,8$$

$$\epsilon = 0,01 \cdot [14 - 0,01 \cdot (1000)] = 0,04$$

$$\mu = 0,55$$

$$P = 3976,14 \text{ Kg}$$

pase # 4

$$b_m = 10,7 \text{ mm}$$

$$R = 119,94 \text{ mm}$$

$$h_1 = 16,83 \text{ mm}$$

$$h_2 = 12,63 \text{ mm}$$

$$K_p = [14 - 0,01 \cdot (950)] \cdot (1,4 + 0,3) = 7,65$$

$$\epsilon = 0,01 \cdot [14 - 0,01 \cdot (950)] = 0,045$$

$$\mu = 0,575$$

$$P = 3464 \text{ Kg}$$

pase # 5

$$b_m = 7,29 \text{ mm}$$

$$R = 120,25 \text{ mm}$$

$$h_1 = 15 \text{ mm}$$

$$h_2 = 12 \text{ mm}$$

$$K_p = [14 - 0,01 \cdot (900)] \cdot (1,4 + 0,3) = 8,5$$

$$\epsilon = 0,01 \cdot [14 - 0,01 \cdot (900)] = 0,05$$

$$\mu = 0,6$$

$$P = 2413,2 \text{ Kg}$$

pase # 6

$$b_m = 9 \text{ mm}$$

$$R = 121,75 \text{ mm}$$

$$h_1 = 12 \text{ mm}$$

$$h_2 = 9 \text{ mm}$$

$$K_p = [14 - 0,01 \cdot (850)] \cdot (1,4 + 0,3) = 9,35$$

$$\epsilon = 0,01 \cdot [14 - 0,01 \cdot (850)] = 0,055$$

$$\mu = 0,625$$

$$P = 3551,31 \text{ Kg}$$

Según la ecuación 2.28, si se usa  $\mu = 0,1$ ; el torque total absorbido por los cilindros es:

$$T = 6976,11 \left[ \frac{118,55 (22 - 15,4)}{2} + 0,1 \cdot 160 \right]$$

$T = 306753,16 \text{ Kg} \cdot \text{mm}$

y por tanto, la potencia de laminación es:

$$\text{H.P.} = \frac{2 \cdot \pi \cdot 250 \cdot 306753,16}{1844040}$$

$$\text{H.P.} = 261,3 - 288$$

$N = 250 \text{ RPM}$

A continuación se calculan los esfuerzos a que se someten los rodillos de hierro nodular durante el proceso de laminación para el que se diseñan:

La resistencia tensil del material de los rodillos se considera es de  $75 \text{ Kg/mm}^2$ .

En la figura 54 se indica la posición en los rodillos y la magnitud de la carga que produce los esfuerzos máximos en los cuellos, mientras que en la figura 55 para los esfuerzos máximos en los barriles.

Se considera en primer lugar los esfuerzos en el barril

a) Esfuerzo de corte directo

$$f_s = \frac{4 \cdot 5463}{\pi \cdot 236,6^2} = 0,1242 \text{ Kg/mm}^2$$

Se supone la resistencia al corte del material como la mitad de la resistencia tensil, esto es;  $37,5 \text{ Kg/mm}^2$  y el esfuerzo de corte directo está muy por debajo de es-

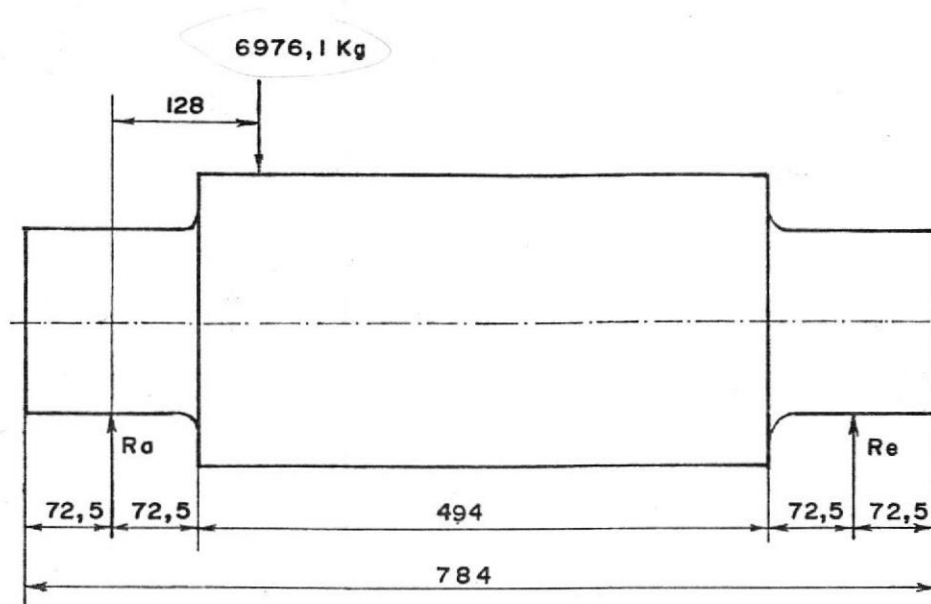


figura 54. Posición y magnitud de la carga que da los esfuerzos máximos en los cuellos de los rodillos, durante el proceso de laminación.

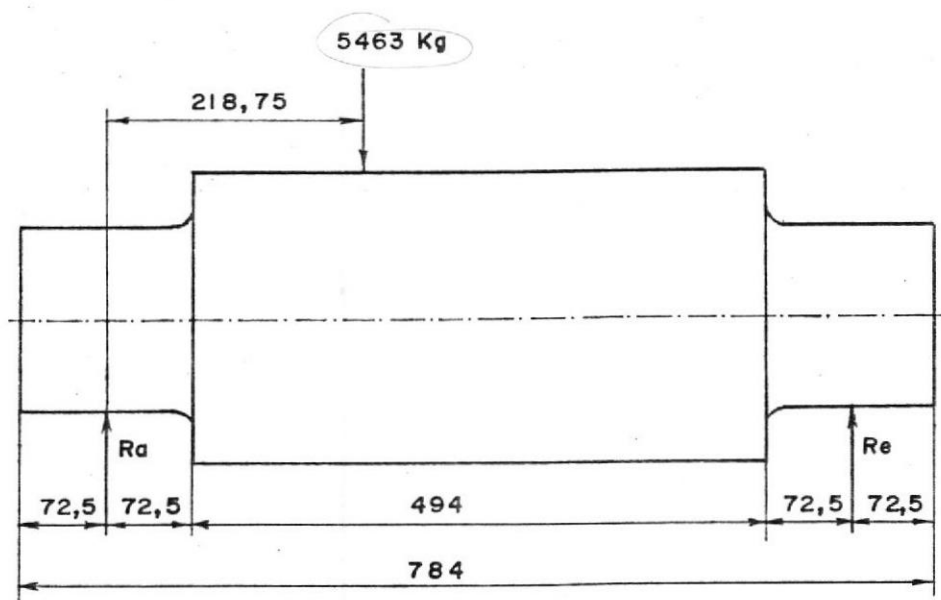


figura 55. Posición y magnitud de la carga que da los esfuerzos máximos en el barril del rodillo durante el proceso de laminación

te valor. Nótese además que, se ha usado el mínimo diámetro del barril en la fórmula.

b) Esfuerzo de flexión

El momento de flexión M en este caso es,

$$M = 0,6576 \cdot P \cdot x - P (x - 218,75)$$

entonces, cuando  $x = 218,75$  mm.  $M = 785852,55$  Kg.mm. y,

$$f_b = \frac{785852,55}{0,17 \cdot 236,6^3} = 0,349 \text{ Kg/mm}^2$$

No se dispone de datos para concentraciones de esfuerzos que se adapten a rodillos con estos pases y por esto se hace necesario aplicar un factor de seguridad.

c) Esfuerzo torsional

El momento torsor es:

$$T = 5463 [0,64 (118,3 \cdot (22,3 - 15,92))^{1/2} + 0,1 \cdot 160] = 183461,65 \text{ Kg.mm}$$

y entonces,

$$f_t = \frac{16 \cdot 183461,65}{\pi \cdot 236,6^3} = 0,0705 \text{ Kg/mm}^2$$

d) Esfuerzo combinado

El torque equivalente es

$$T_e = 785852,55 + [785852,55^2 + 183461,65^2]^{1/2} = 1592836,58 \text{ Kg.mm,}$$

y el esfuerzo de corte equivalente es:

$$f_{te} = \frac{1592836,58 \cdot 16}{\pi \cdot 236,6^3} = 0,6124 \text{ Kg/mm}^2$$

Si se aplica un factor de seguridad de 3 contra factores indeterminados, el esfuerzo de corte equivalente llega a ser  $1,837 \text{ Kg/mm}^2$ , el cual es mucho menor que la resistencia al corte del material de los rodillos.

Se analizan ahora los esfuerzos en los cuellos de los rodillos.

a) Esfuerzo de corte directo

$$f_s = \frac{4 \cdot 6976,11}{\pi \cdot 160^3} = 0,3469 \text{ Kg/mm}^2$$

b) Esfuerzo de flexión

En el hombro del rodillo  $x = 72,5$  y en ese punto el momento flector es:

$$M = 0,8 \cdot 6976,11 \cdot 72,5 = 404613 \text{ Kg.mm,}$$

por lo que

$$f_b = \frac{404613}{0,17 \cdot 160^3} = 0,581 \text{ Kg/mm}^2$$

Una concentración de esfuerzos ocurrirá en el radio del cuello y se encuentra el correspondiente factor de concentración:  $r/d = 16/160$ ;  $d/D = 160/250$ . De la figura 4, el correspondiente factor de magnificación de esfuerzo es aproximadamente 1,4 pero para hierro fundido según Trinks, se reduce a 1,17; por esta razón, el esfuer



BIBLIOTECA

zo de flexión llega a ser 0,6797 Kg/mm<sup>2</sup>.

c) Esfuerzo torsional

El momento torsor es:

$$T = 6976,11 \{ 0,64 (118,3 \cdot (22,3 - 15,92))^{1/2} + 0,1 \cdot 160 \} = 234275,8 \text{ Kg.mm}$$

$$f_t = \frac{16 \cdot 234275,8}{\pi \cdot 160^3} = 0,291 \text{ Kg/mm}^2$$

d) Esfuerzo combinado

El torque equivalente es:

$$T_e = 404613 + (404613^2 + 234275,8^2)^{1/2} = 872156,4 \text{ Kg.mm}$$

y el esfuerzo de corte equivalente es:

$$f_{te} = \frac{16 \cdot 872156,4}{\pi \cdot 160^3} = 1,0844 \text{ Kg/mm}^2$$

el factor de magnificación de esfuerzo da un valor de  $f_{te} = 1,2687 \text{ Kg/mm}^2$ .

Un factor de seguridad de 3 brinda un esfuerzo de corte de 3,806 Kg/mm<sup>2</sup>, el cual también está dentro de la resistencia al corte del material de los rodillos

Finalmente, se calcula la deflexión de los rodillos bajo la carga de laminación crítica (figura 56), tanto en el punto de aplicación de dicha carga como en el punto de deflexión máxima. Se usa para calcular la deflexión por

flexión el método del área de momentos y dado que el momento de inercia del rodillo varía desde el cuello al barril, se transforma el diagrama de  $M$  en diagrama de  $M/EI$  figura 57.

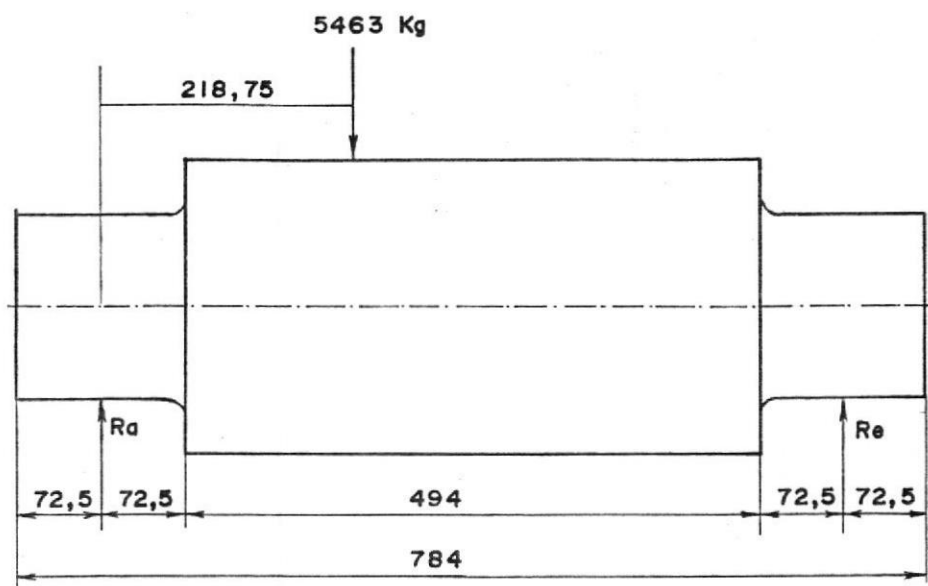


figura 56. Posición y magnitud de la carga que produce deflexión máxima.

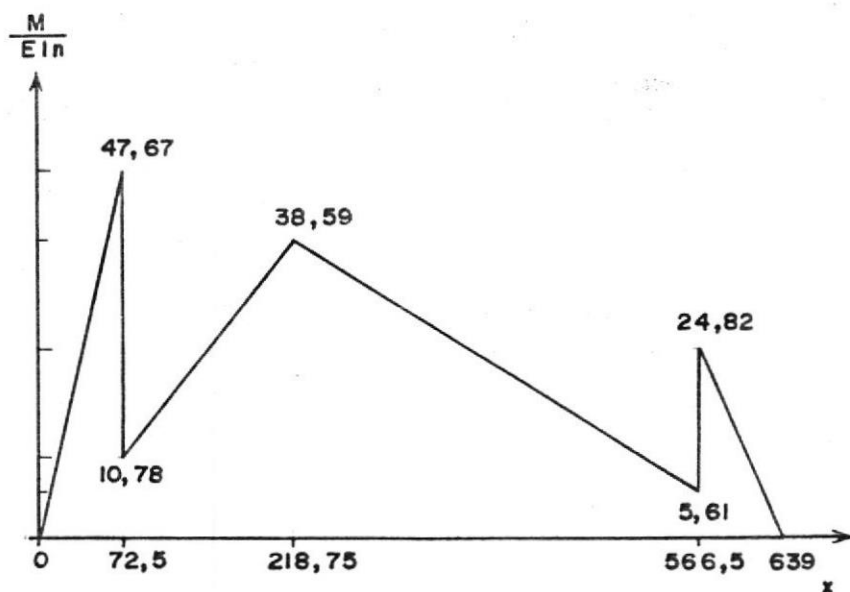


figura 57. Diagrama de momentos transformado

De la figura 56,  $R_a = 0,6576 \cdot P$ ;  $R_e = 0,3424 \cdot P$ ;  
 $I_n = 1/4,42 \text{ Ib}$

De acuerdo a la figura 57:

$$t_{A/E} = \frac{P}{E \cdot I_n} \left[ 24,82 \cdot \frac{72,5}{2} \cdot \left( \frac{72,5}{3} + 566,5 \right) + 5,61 \cdot 347,75 \cdot \left( \frac{347,75}{2} + 218,75 \right) + (32,97 \cdot \frac{347,75}{2} \cdot \left( \frac{347,75}{3} + 218,75 \right) + 10,78 \cdot 146,25 \cdot \left( \frac{146,25}{2} + 72,5 \right) + 27,8 \cdot \frac{146,25}{2} \cdot \left( \frac{2}{3} \cdot 146,25 + 72,5 \right) + 47,67 \cdot \frac{72,5}{2} \cdot \left( \frac{2}{3} \cdot 72,5 \right) \right]$$

$$t_{A/E} = 3875763,59 \cdot \frac{P}{E \cdot I_n}$$

por semejanza de triángulos

$$\frac{\Delta c-c'}{420,25} = \frac{t_{A/E}}{639}$$

$$\Delta c-c' = 2548966,58 \cdot \frac{P}{E \cdot I_n}$$

$$t_{C/E} = \frac{P}{E \cdot I_n} \cdot \left[ 24,82 \cdot \frac{72,5}{2} \cdot \left( \frac{72,5}{3} + 347,75 \right) + 5,615 \cdot \frac{347,75}{2} \cdot 347,75 + 32,97 \cdot \frac{347,75}{2} \cdot \frac{347,75}{3} \right]$$

$$t_{C/E} = 1338799 \cdot \frac{P}{E \cdot I_n}$$

La deflexión en ese punto resulta de la diferencia entre  $\Delta c-c'$  y  $t_{C/E}$ , esto es:

$$\delta c-c' = (2548966,58 - 1338799) \cdot \frac{P}{E \cdot I_n}$$

tomando  $E = 15810 \text{ Kg/mm}^2$  para hierro fundido,

$$\delta c - c' = 0,0165 \text{ mm}$$

Se encuentra también la deflexión máxima para esta carga

$$t_{x/E} = \frac{P}{E \cdot I_n} \cdot \left( 24,82 \cdot \frac{72,5}{2} \cdot \frac{(72,5 + 566,5 - x)}{3} + \right.$$

$$\left. \frac{(0,3424 \cdot (639 - x) - 5,61) \cdot (566,5 - x)}{4,42 \cdot 3} + \right.$$

$$\left. \frac{(566,5 - x)}{2} + 5,61 \cdot (566,5 - x) \cdot \frac{(566,5 - x)}{2} \right)$$

$$t_{x/E} = \frac{P}{E \cdot I_n} \cdot (-0,013 x^3 + 24,7 x^2 - 16499 x + 3776064)$$

$$\frac{\Delta x - x'}{(639 - x)} = \frac{t}{A/E} = \frac{t}{639}$$

$$\Delta x - x' = 3875763,59 \frac{P}{E \cdot I_n} \cdot \frac{(639 - x)}{639}$$

$$\delta x - x' = 3875763,59 - 6065,35 x + 0,0129 x^3 - 24,72 x^2 + 16498,77 x - 3776064,23 \quad (a.1)$$

Esta expresión es válida en cualquier lugar entre el apoyo izquierdo y la carga. El punto donde se da la flecha máxima se obtiene igualando a cero la primera derivada de la ecuación (a.1), así:

$$\frac{d\delta}{dx} = \frac{P}{E \cdot I_n} \cdot (0,0387 x^2 - 49,44 x + 10433,42) = 0$$

$$x = 266,71 \text{ mm}$$

y si se sustituye este valor de  $x$  en la ecuación (a.1) se halla:

$$\delta_{\text{máx}} = 0,0186 \text{ mm}$$

La deflexión por corte es

$$\delta_{sc} = \frac{1}{C \cdot A_1} \int_0^{72,5} 0,6576 P \, dx + \frac{1}{C \cdot A_2} \int_{72,5}^{218,75} 0,6576 P \, dx +$$

tomando  $C = 2/5 E$  para hierro fundido,  $A_1 = \pi/4 D_n^2 = 20104 \text{ mm}^2$  y  $A_2 = \pi/4 D_b^2 = 49087,4 \text{ mm}^2$

$$\delta_{sc} = 0,0024 \text{ mm}$$

entonces la deflexión total en c (figura 56) es:

$$\delta_{bc} + \delta_{sc} = (0,0165 + 0,0024) \text{ mm}$$

$$\delta_{c \text{ total}} = 0,019 \text{ mm}$$

## APENDICE B

OBTENCION DE RODILLOS DE HIERRO NODULAR  
EN LOS TALLERES DE LA ESPOL

Luego de un adiestramiento previo del personal en la operación de los hornos de cubilote del Taller de Fundición de la ESPOL, se procede a fundir un rodillo de hierro gris (figura 58) para pruebas de moldeo, alimentación, pintura, etc. El horno de cubilote usado tiene 550 mm de diámetro interior (figura 59).

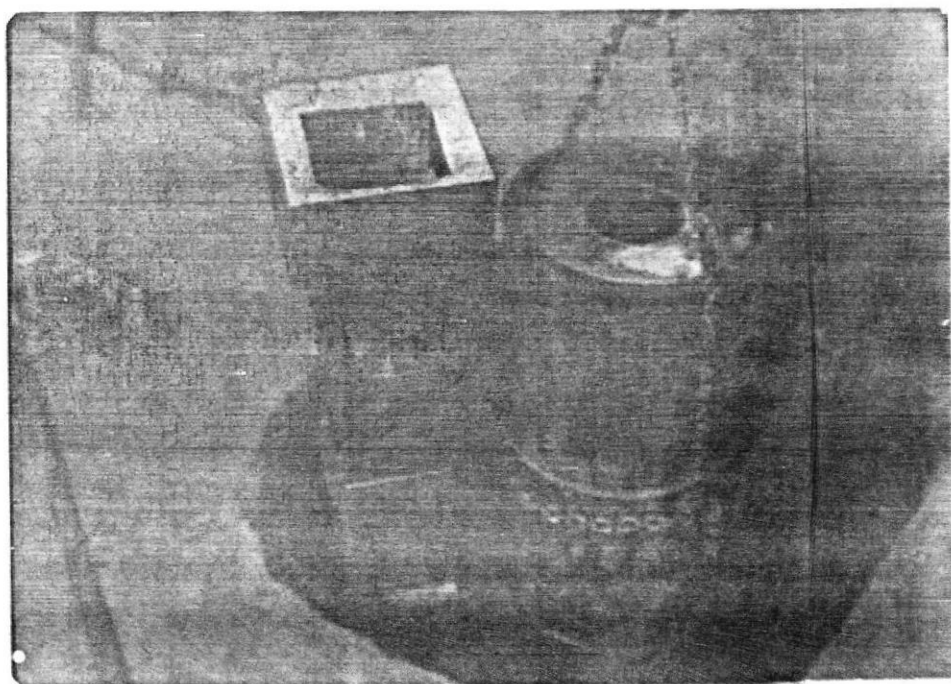


figura 58. Colocación de molde para rodillo en una fosa para facilitar el colado.

El modelo (figura 60), es de poliuretano expandido y sus dimensiones se muestran en la figura 61. La arena de moldeo se elabora por un proceso de aglomeración con cemento,

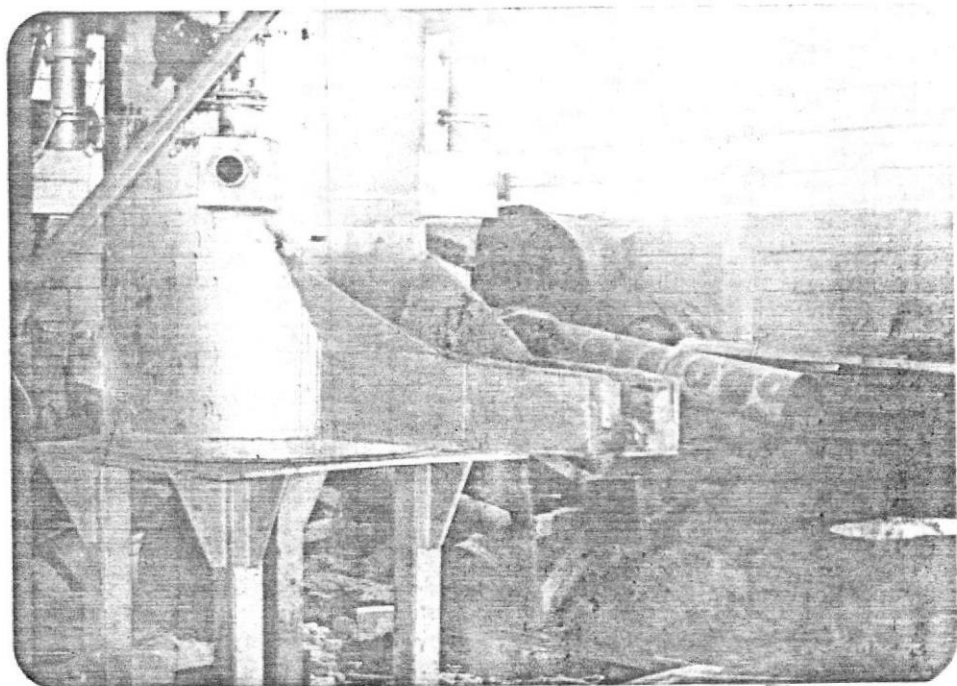


figura 59. Detalle del cubilote de 550 mm. de diámetro interior del Taller de Fundición de la ESPOL.

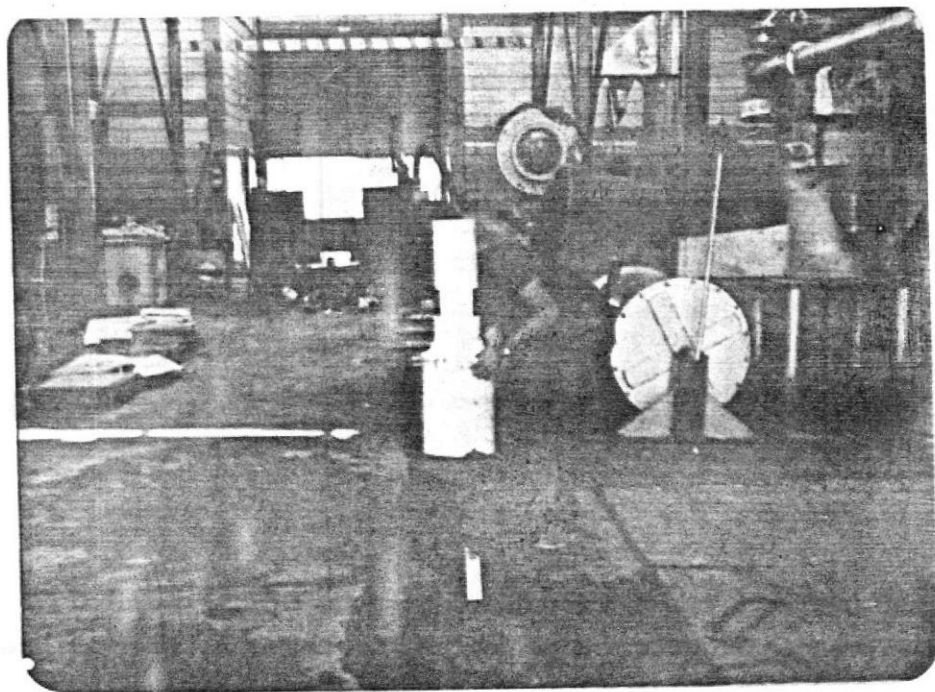


figura 60. Centrado del modelo en el molde

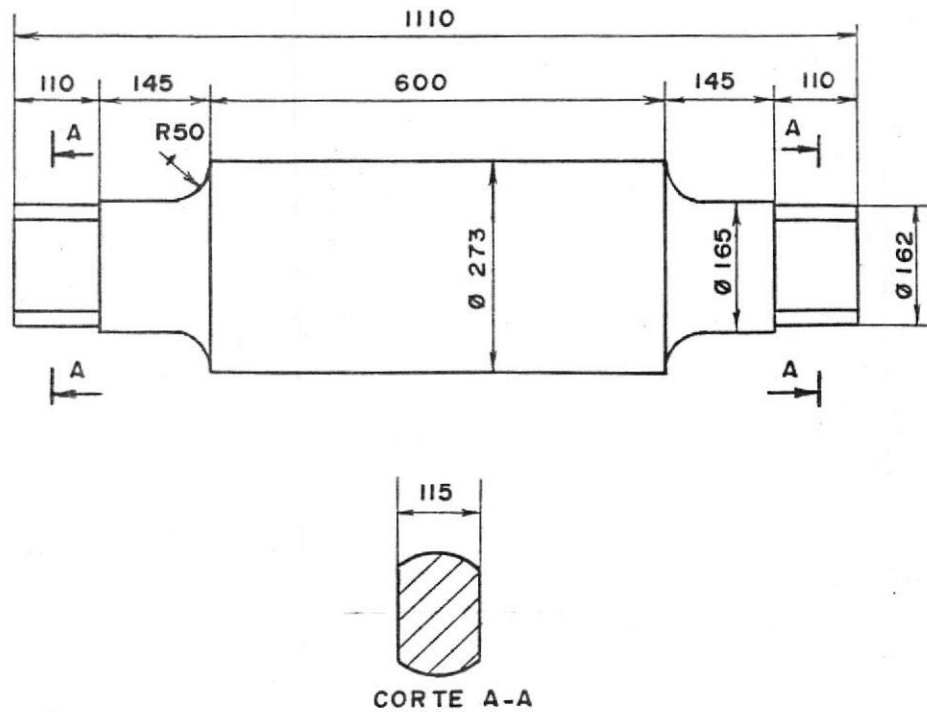


figura 61. Dimensiones del modelo para fundir los rodillos

siendo su composición en peso la siguiente:

arena de sílice	84,5 %
cemento Portland	8 %
agua	7 %
harina de trigo	0,5 %

Las cajas de moldeo son cilíndricas y se constituyen por tres partes desarmables que se aseguran entre sí por pernos (figura 62), para facilitar el desmoldeo y el secado. El moldeo se realiza según el método de modelo perdido, por lo que el poliuretano se saca al día siguiente con la ayuda de un hierro caliente. Es necesario otro día más para buen fraguado (figura 63), antes de desarmar la caja para operaciones de secado; aún cuando, se airee la arena

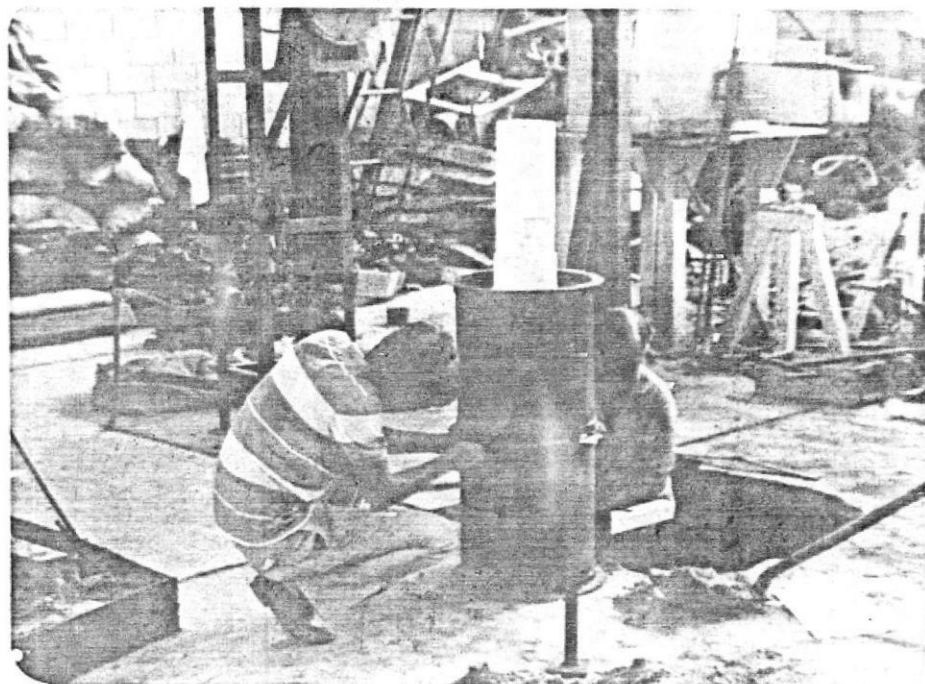


figura 62. Moldeo de rodillos de laminación

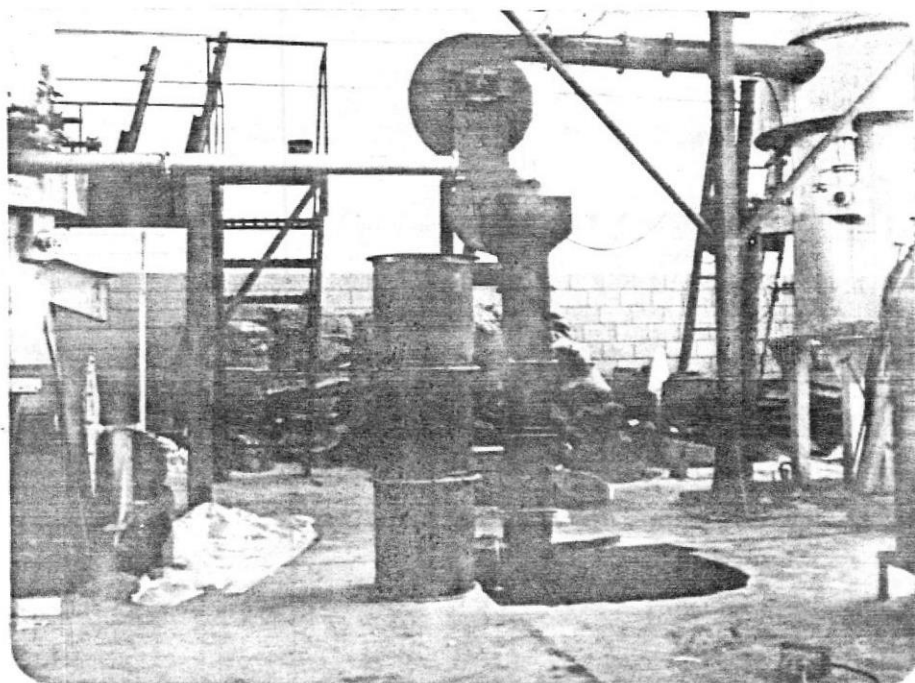


figura 63. Molde armado de rodillo de laminación, en proceso de fraguado.

por medio de hoyos practicados a través de las paredes cilíndricas del molde.

El número de cargas empleadas durante la fusión del metal es de cuatro que se añaden en el siguiente orden y cantidad:

122,7 Kg de chatarra de hierro gris

11 Kg de coque

8,18 Kg de caliza

Se registra una altura de cama de 150 cm. La pieza se funde en posición vertical por el método de simple colada; el llenado final se completa por la mazarota (figura 64 y 65), para aumentar la eficiencia de esta proveyéndola de metal a relativamente mayor temperatura.

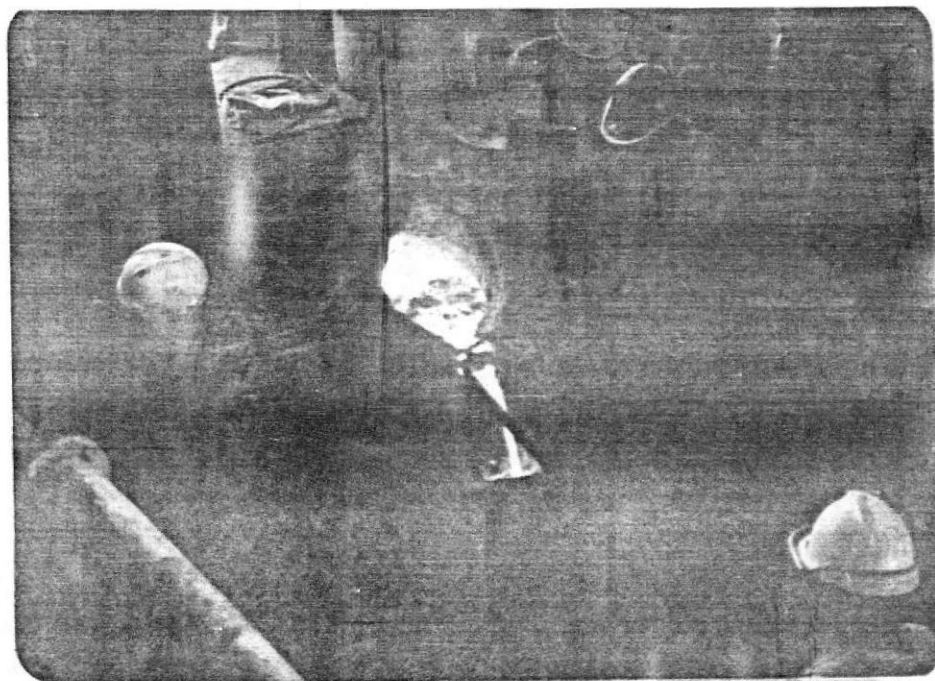


figura 64. Colado desde la olla a los moldes a través del bebedero



figura 65. Colado desde la olla a los moldes directamente por la mazarota.

Los inconvenientes que se encuentran son los siguientes:

- temperatura de colado muy alta que se deduce por la gran sinterización de arena en la pieza.
- la mazarota es muy pequeña porque el rechupe avanza hasta el cuello del rodillo.
- desgaste excesivo del refractario del horno debido a exceso de aire y/o poca altura de cama.
- dificultad en el corte de la mazarota.

Entonces, para la fundición de los rodillos de hierro nodular se hicieron las correcciones que indicamos a continuación:

- para evitar piezas con excesiva cantidad de arena en su superficie, se cubren los moldes con pintura cuya compo-

sición en volumen es:

agua	15 partes
plumbagina	10 partes
harina de trigo	2 partes
blanca	1 partes
detergente	1/8 partes

-para contrarrestar un rechupe profundo, se agranda la mazarota hasta un diámetro de 20 cm. y altura 40 cm. y, -se coloca 6 enfriadores de platina de acero de dimensiones 1" X 1 1/2" X 20" sobre lo que será el barril de los rodillos

-colocación en uno de los moldes de una galleta (figura 66), confeccionada de arena con silicato, justo entre la mazarota y el rodillo para no separar posteriormente estas 2 partes por corte en la sierra.

-Se emplea una altura de cama de 160 cm.

Las cargas son doce, cuatro por cada rodillo, conformadas así:

chatarra de hierro nodular	92,18 Kg
despunte de laminación	20,5 Kg
níquel puro	0,71 Kg
acero inoxidable	1,36 Kg

Después de obtener varias piezas que se usarán en el castillete de la caja de laminación, se funden tres rodillos (figura 67).

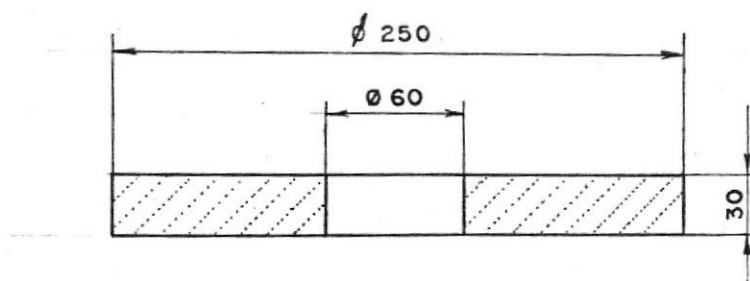


figura 66. Dimensiones de la galleta que va colocada sobre el modelo del rodillo

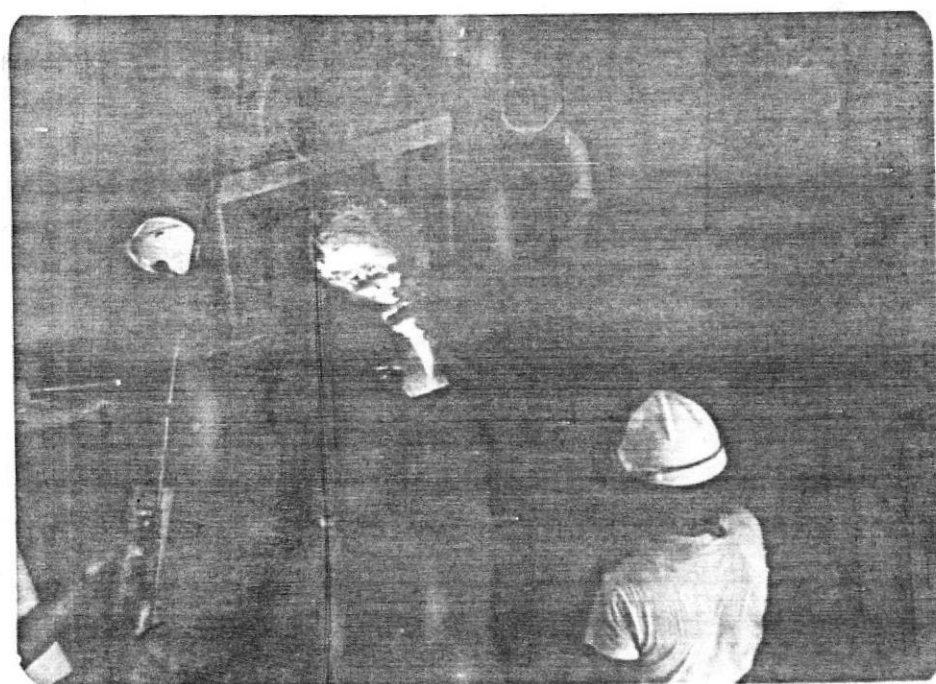


figura 67. Colado de metal en un segundo molde para rodillo.

Luego, se determinan las siguientes novedades:

- hay metal sobrante en el horno por no haber descargado todo el hierro gris en el inicio del proceso.
- hay deficiencia en el espesor de la capa de pintura en algunas partes de la pieza.
- uno de los rodillos presenta una unión fría profunda de-

- bidó a una temperatura de colado baja.
- los moldes no han sido bien centrados ya que el barril presenta ligeras desviaciones.
  - los enfriadores han absorbido humedad porque hay porosidades donde ellos estaban colocados (los moldes fueron secados mucho antes de que se usen).
  - la galleta es de gran ayuda por evitar el corte de mazorca, sin embargo, se encuentra escoria atrapada bajo ella.
  - el desgaste del recubrimiento del horno es excesivo a causa de una cama muy alta, demasiado flujo de aire y/o puenteo de la carga.

Para obtener las tres últimas piezas para rodillos de laminación (figura 68), dos de hierro nodular y la otra de hierro gris, se ha reducido la entrada de aire y la altura de la cama a 120 cm.

Las cargas igualmente son doce, introducidas en el horno en el siguiente orden y cantidad:

coque (cama falsa)	12,5 Kg
chatarra de hierro nodular	122,7 Kg
coque	11,13 Kg
caliza	8,18 Kg

tres cargas restantes se añaden en la misma proporción y luego se agrega:

coque (cama falsa)	12,5 Kg
chatarra de hierro nodular	92,18 Kg

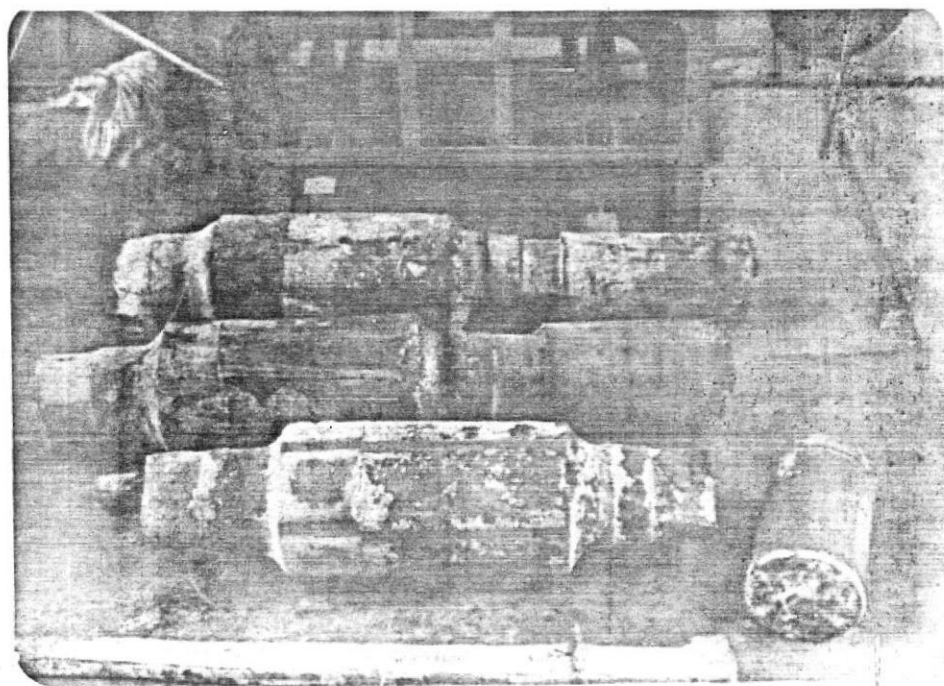


figura 68. Cilindros de laminación en bruto.

déspuntes de laminación	20,45 Kg
coque	12,5 Kg
caliza	8,18 Kg
chatarra de hierro nodular	92,18 Kg
déspuntes de laminación	20,45 Kg
coque	12,5 Kg
caliza	8,18 Kg
chatarra de hierro nodular	92,18 Kg
acero inoxidable	2,27 Kg
níquel	1,88 Kg
coque	12,5 Kg
caliza	8,18 Kg
chatarra de hierro nodular	92,18 Kg

acero inoxidable	2,27 Kg
níquel	1,88 Kg
coque	12,5 Kg
caliza	8,18 Kg
coque (cama falsa)	12,5 Kg

Las cargas correspondientes al tercer rodillo se adicionan de igual forma que las cuatro últimas anteriores. El acero inoxidable y el níquel se colocan en las dos últimas cargas para evitar la fusión violenta de ellos debido a su espesor delgado.

Desafortunadamente en esta fundición, después de la primera picada del horno se descarga muy poco metal, por demorar la apertura del escoriadero, perdiéndose el control de la cantidad de hierro guardado en la cuba y de la composición química del material porque cantidades considerables de níquel y acero inoxidable no se funden.

Las piezas para cilindros tienen buena apariencia y el desgaste del revestimiento del horno es normal.

El correspondiente maquinado de los rodillos obtenidos se lleva a cabo en el Taller Mecánico de la ESPOL (figuras 69 y 70).



figura 69. Desbaste de cilindros de laminación.

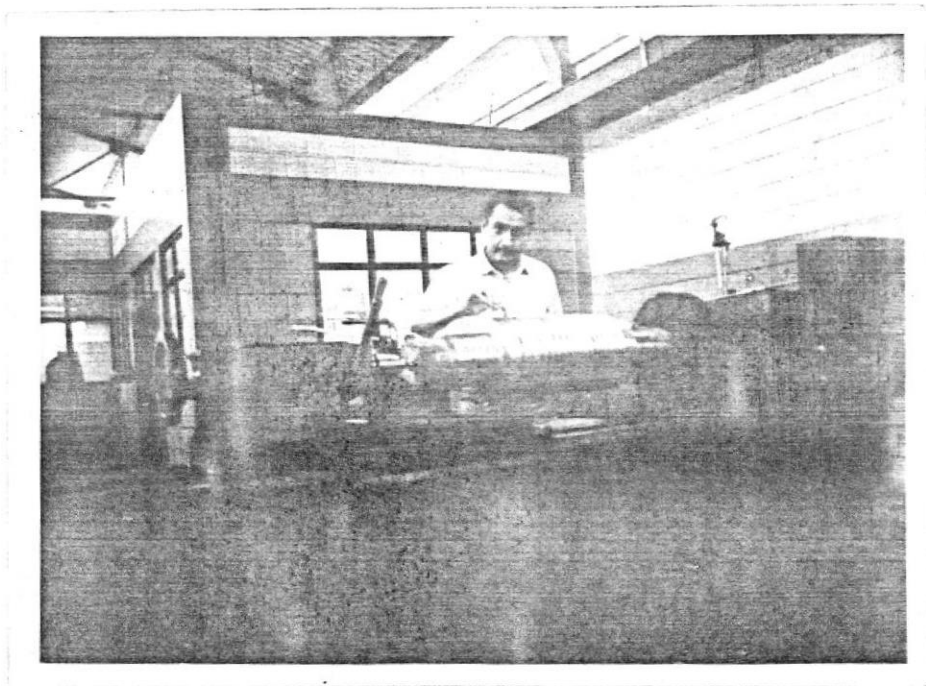


figura 70. Operador de torno verificando el perfil de un pase con una plantilla durante el torneado de un rodillo de laminación.

DIAGRAMAS, TABLAS Y ANEXOS

TABLA VI

TABLA DE CONVERSION DE DUREZAS PREPARADA POR EL COMITE  
TECNICO DE LA ASOCIACION DE FUNDIDORES DE RODILLOS,  
SIEBEN, ALEMANIA

Dureza Rockwell C	Dureza Shore		Número de dureza Vickers	Número de dureza Brinell
	D	C		
19		34,8		229
20		35,5		234
21		36,7		239
22		37,7		244
23		38,5		250
24		39,3		256
25		40,0		262
26		41,0		269
27		42,0		276
28		43,0		283
29		44,0		290
30		45,0		298
31		46,0		306
32		47,0		314
33		48,0		323
34		49,0		332
35		50,0		341
36		51,1		350
37		52,2	360	359
38		53,3	370	368
39		54,4	381	376
40		55,5	392	387
41		57,1	404	396
42		58,5	416	404
43		60,0	428	414
44		61,2	440	423
45		62,5	453	431
46		64,0	466	438
47		65,5	480	450
48		67,0	495	461
49		68,5	510	474
50	70,0		526	486
51	72,0	69,6	542	497
52	74,0	71,5	558	509
53	76,0	73,0	575	524
54	78,0	74,5	593	535
55	80,0	76,2	612	544
56	82,3	77,8	632	556
57	84,6	79,6	652	569
58	86,9	81,5	672	582
59	89,2	83,2	693	597
60	91,5	84,9	715	613
61	93,5	86,7	738	626
62	95,5	88,5	762	640
63	97,5	90,3	787	654
64	99,5	92,1	813	668
65	101,5	94,2	840	682
66	102,8	96,4	870	-
67	104,0	98,8	903	-
68	105,0	101,4	940	-
		104,2		-

## BIBLIOGRAFIA

1. British Steel Corporation, Roll-Pass Design, (Sheffield, England: Chorley & Pickers Gill Ltd., tercera edición, 1979).
2. M. Hakka, Análisis del Mercado y Preparación de Proyectos de Fundición (para el Ecuador), Informe Final, Proyecto ONUDI SI/ECU/84/801, Quito, 1983.
3. W. Trinks, Roll-Pass Design, (Ohio: Penton Publishing Co., 1933).
4. G. Dieter, Metalurgia Mecánica, (Nueva York: McGraw-Hill Book, Company Inc., 1961).
5. S. Avner, Introducción a la Metalurgia Física, (Nueva York: McGraw-Hill, primera edición, 1964).
6. R. Hemphill, A Study of the Conflict Between Wear and Toughness in Steel Roll Material for Hot Working Applications (Bethlehem, Pennsylvania: Bethlehem Steel Corporation, 1969), pp. 1-24.
7. W. Roberts, Hot Rolling of Steel (New York: Marcel Dekker, Inc, 1983), pp. 527 - 536.
8. D. Moore, Principles and Applications of Tribology, (Oxford: Pergamon Press Ltd., 1975).
9. H. Bertorello, "Algunos Problemas Importantes en la

Refrigeración de Cilindros de Laminación" Revista Siderurgia, (Oct - Dic, 1979), Buenos Aires, Argentina.

10. J. Thieme y S. Ammareller, Rolling-Mill Rolls (New York: Climax Molibdenum Company, 1968), pp. 1-85. =
11. A. Tselikov y V. Smirnov, Trenes de Laminación, (Bilbao, España: ediciones Urmo, 1970). #
12. R. Villanueva, Roll Making for Rolling Mills, (Draughtmens and Allied Technicians Association, session 1962-1963), pp. 37.
13. Climax Molibdenum Company. The Uses of Molibdenum in Nodular Irons, (New York, 1964),
14. Curso Panamericano de Metalurgia, Ciclo Especializado Procesos de Fundición, México, Compendio IV, 1972.
15. J. Zevallos, "Estudios de los Cambios Estructurales en Hierros Grises por Medio de Inoculación" (Tesis, Facultad de Ingeniería Mecánica, Escuela Superior Politécnica del Litoral, 1981).
16. F. Espinoza, "Obtención de Hierro Nodular en Horno de Cubilote de Revestimiento Acido" (Tesis, Facultad de Ingeniería Mecánica, Escuela Superior Politécnica del Litoral, 1980).
17. E. Mc-Cannon, The Making, Shaping and Treating of Steel, (United Steel Corporation, Pennsylvania, novena

