

Fabricación y Aplicación de los Cilindros Para Laminación

En el diseño y escogencia de los rodillos de laminación, usuarios y fabricantes deben tener en cuenta los siguientes lineamientos generales, que, por razones de espacio, trataremos en forma muy limitada en este artículo: 1) Influencia del proceso de fabricación en las propiedades, costo y comportamiento del cilindro; 2) Efecto de la composición y de los tratamientos térmicos en las propiedades del núcleo y de la superficie de trabajo; 3) Los requerimientos y exigencias a que va a ser sometido el cilindro en la aplicación específica para optimizar los materiales, procesos, tratamiento térmico y costos que inciden en el cilindro.

Por: Ing. Héctor Mosquera Mosquera
Ingeniero Metalúrgico
Post-grado en Metalurgia
y Física Profesor Asistente

Existen en Colombia siete empresas usuarias de cilindros que aunque no producen un tonelaje apreciable de acero laminado que justifique la fabricación de cilindros en el país, si podrían encarar la producción de este bien capital, puesto que dentro del Pacto Andino ya encontramos países que tienen capacidad instalada para acero laminado de hasta 5Ton/año, es el caso de Venezuela.

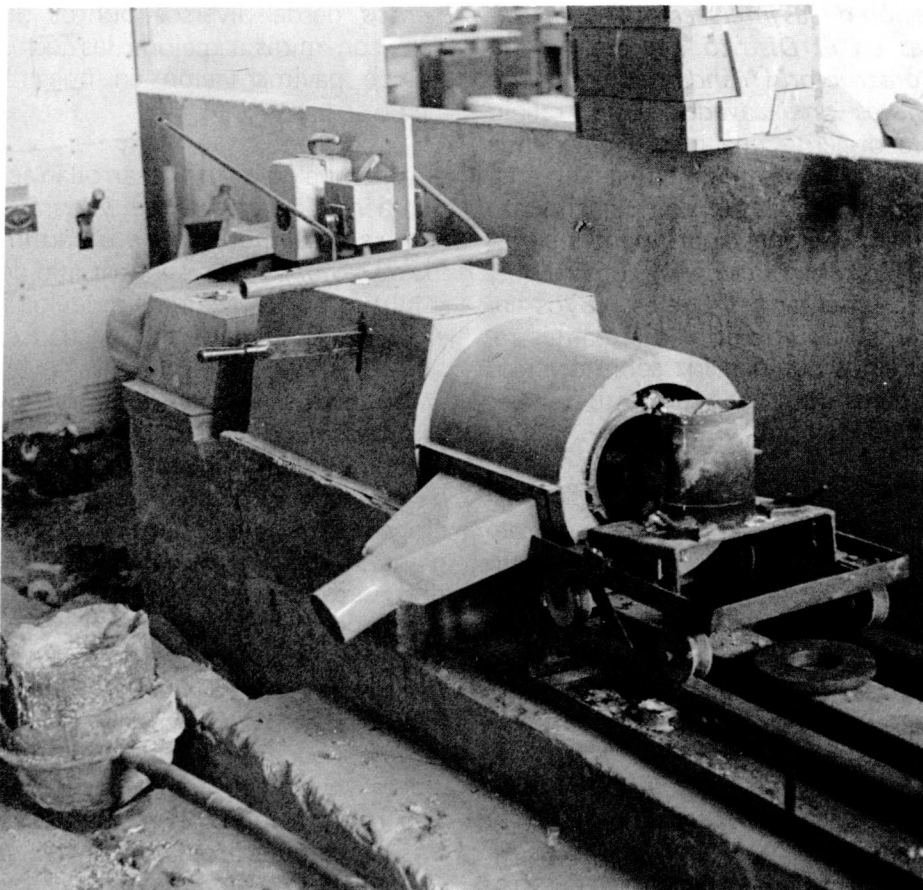
Además dentro de los acuerdos del Pacto Andino, Colombia tiene la responsabilidad de producir bienes de capital en el área de Fundición

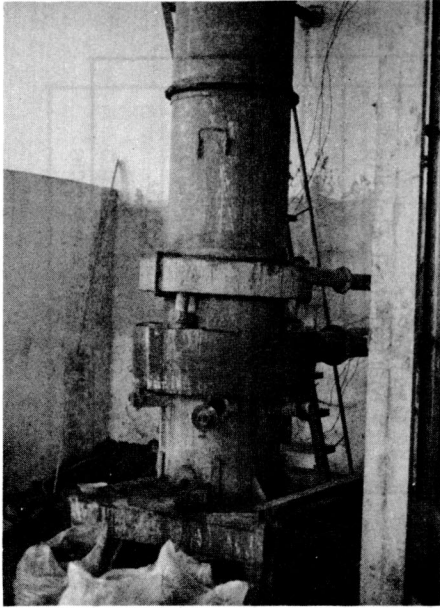
y Forja. Movidos por esta inquietud, en 1978 la Sección de Metalurgia de la Facultad de Ingeniería - U. Nal., conjuntamente con INDUSTRIAS MILITARES y COLCIENCIAS, firmaron un convenio de cooperación mutua para adelantar el proyecto de "Desarrollo y Adaptación de Tecnología en Fundiciones Nodulares" el cual fue financiado por Colciencias. Dentro de esta investigación además de abordar otros temas sumamente importantes (los cuales serán preparados y presentados en próximos informes), se encaró el problema de diseñar la tecnología para fabricar un cilindro de laminación en Fundición Nodular que se ajustara al tipo de cilindro más consumido por las industrias siderúrgicas del país. En este trabajo se tuvo en cuenta que ACERIAS PAZ DEL RIO, es el máximo consumidor y que su demanda en toneladas es por cilindros mucho mayor, comparada con lo requerido por las 6 industrias restantes.

A finales del año 1979 se logró fabricar un cilindro de laminación con propiedades acordes con las metas propuestas; el cual al ser sometido a servicio en la Planta Santa Bárbara -INDUMIL- Sogamoso; tuvo un comportamiento excelente. En la actualidad se está poniendo a punto en la Universidad Nacional un dispositivo que permita el temple superficial de los cilindros.

ALTERNATIVAS PARA FABRICAR UN CILINDRO

Los rodillos de laminación se diseñan, se seleccionan y se fabrican te-





niendo en cuenta los siguientes requisitos:

- Alta resistencia al desgaste y larga vida
- Elevada resistencia a la fractura
- Insensibilidad a las grietas en caliente
- Insensibilidad al descascaramiento
- Buen acabado superficial
- Adecuado agarre del metal a laminar
- Elevada carga de flexión
- Buena resistencia al impacto
- Alta resistencia a la torsión

En términos generales, los anteriores requerimientos imponen en el producto adecuada pureza superficial y excelente tenacidad del núcleo.

Materiales y procesos seguidos en la fabricación:

Dependiendo de la microestructura en la superficie de trabajo, de la composición y del proceso de fabricación, los cilindros se pueden clasificar de la siguiente manera, (ver tabla 1):

CILINDROS EN ACERO

1- CILINDROS EN ACERO FORJADO

En comparación con los cilindros fundidos presentan una estructura y composición más homogénea, con

un tamaño de grano mucho más fino de lo que se deduce su elevada tenacidad. En consecuencia se utilizan cuando las exigencias durante el laminado (carga de impacto, carga de laminación, reducción de área por pasadas, etc.) son excesivamente elevadas. Los cilindros en acero forjado mejoran su resistencia al desgaste a medida que aumenta la dureza y resistencia a la tracción. Generalmente la pieza se obtiene después de cuatro operaciones de forja.

Los cilindros en acero forjado se clasifican en (tabla 1):

A. Cilindros en acero forjado hipoeutectoide: El tratamiento térmico de estos cilindros debe garantizar una superficie exterior libre de tensiones residuales.

Estos cilindros se utilizan en laminación de perfiles en caliente.

Debido al contenido de ferrita, estos rodillos no tienen la resistencia al desgaste de los hechos en acero endurecidos; sin embargo son aceptados en vista del principal requerimiento: su alta tenacidad a la fractura. La tendencia a que el material que se está laminando se suelde al cilindro, debido a las altas presiones y temperatura, aumenta a medida que aumenta el contenido de ferrita del cilindro; por consiguiente en la fabricación se debe escoger un carbón mínimo de 0.45% con lo cual la soldabilidad ha decaído considerablemente. Con el incremento del contenido de carbono, los daños por aglomeración (soldadura entre el rodillo y el metal que se lamina) disminuyen, al punto que un acero con carbono superior a 1.3% o una fundición de hierro no son susceptibles a este fenómeno.

La adición de cromo y molibdeno, respectivamente estabiliza la perlita y aumenta la resistencia en caliente.

En la escogencia del grado de estos rodillos, hay que tener en cuenta que en servicio deben absorber altos esfuerzos de pandeo, torsión e impacto.

Para favorecer la elevada tenacidad que deben tener los cilindros, la resistencia a la tracción se debe mantener dentro de los siguientes límites:

Diámetro del cilindro en pulgadas

40 mínimo
32 mínimo
24 aprox.

Resistencia a la tracción en K.S.I.

85 a 105
90 a 115
100 a 120

La composición oscila entre los siguientes límites:

% C	% Mn	% Si
0.45-0.55	0.50-0.80	0.25-0.50
	% Cr	% Mn
	0.20-0.60	0.15-0.30

B. Cilindros en acero forjado cerca del eutectoide:

Existen dos categorías:

Los Cilindros Normalizados o tratados térmicamente con revenido a altas temperaturas utilizados en laminación en caliente en el tren de acabado. El endurecimiento de estos cilindros se realiza en aceite o al aire.

Los valores de resistencia y dureza después de templado y revenido son:

Medio de Temple	Resistencia a la Tracción en K.S.I.		
aire	105	a	140
aceite	130	a	155
	Dureza Shore D.		
aire	40	a	45
aceite	50	a	60

Dependiendo del diámetro y de la aplicación, estos rodillos se fabrican ▶

TABLA 1 CLASIFICACION DE LOS CILINDROS DOMINADORES

Material	Proceso	Carbono	Tratamiento térmico	Microestructura	
ACERO	Cilindros en Acero forjado	Acero Hipoeutectoide	Normalizado o tratado térmicamente con alta temperatura de revenido.	Ferrita más perlita	
		Acero con % C cerca del Eutectoide	Normalizado o tratado térmicamente con alta temperatura de revenido.	Perlita fina + Bainita	
			Templado y Revenido	Martensita (Bainita)	
		Acero Hipereutectoide	Templado y Revenido	Martensita + carburos eutecticos	
	Cilindros en Acero fundido	Acero Hipereutectoide (una colada)	Normalizado o tratado térmicamente con alta temperatura de revenido.	Ferrita más perlita	
		Acero con % C cerca del Eutectoide (una colada o doble colada "material compuesto")	Normalizado o tratado térmicamente con alta temperatura de revenido.	Perlita fina + Bainita	
			Templado y Revenido	Martensita + Bainita	
		Acero Hipereutectoide (una colada)	Normalizado	Perlita + Carburos	
		Grafito y Normalizado	Grafito y Normalizado	Grafito y Normalizado	Perlitas más carburos * y trazas de grafito.

TABLA 1 (Continuación) CLASIFICACION DE LOS CILINDROS LAMINADORES.

Material y Proceso	Grafito	Condición	Matriz en la superficie de trabajo del cilindro		
FUNDICION DE HIERRO	Ninguno	No aleado	Perlita		
		Baja aleación	Perlita fina		
		Aleada	Bainita		
	Laminar	Aleada (una colada o doble colada material compuesto)	Fundido en arena	Martensita	
			Fundido en molde metálico	Perlita	
				No aleado	Perlita
		Baja aleación		Perlita fina	
		Nodular	Sin carburo libre o con trazas de carburo en la superf.	Aleada	Bainita
				Baja aleación	Perlita
	Aleado y enfriado rápidamente (una colada)				Perlita fina
	Con gran cantidad de carburos en la superficie		Alta aleación y enfriado rápidamente (doble colada — material compuesto).		Bainita
			Enfriado rápidamente (doble colada — material compuesto)	Martensita	
			Sin carburo libre	Dependiendo de la composición y velocidad de enfriamiento y tratamiento térmico.	Ferrita + perlita
	Con gran cantidad de carburo	Dependiendo de la composición, velocidad de enfriamiento y tratamiento térmico.		Perlita fina	
				Bainita	
		Perlita fina			
		Bainita			
		Perlita fina			
		Bainita			
		Martensita			

◀ con composiciones comprendidas entre los siguientes valores:

%C	%Mn	%Si
0.55-0.65	0.60-0.90	0.30-0.60
%Cr.	%Mo	%V.
0.60-1.10	0.15-0.30	0.10

Los Cilindros Templados son utilizados en laminación en frío como cilindros de trabajo o como cilindros de apoyo.

El acero para este tipo de cilindros es fundido en horno eléctrico básico de arco o en horno eléctrico al vacío con electrodo consumible, para garantizar una alta pureza, de tal manera que se le pueda dar al producto las mejores condiciones de acabado superficial después del proceso de forja y tratamiento térmico.

La composición química es:

Diámetro del cilindro en pulgadas	% C	%Mn	%Si	%Cr.	%Mo.
4	0.9-1.1	0.4			
12	0.8-0.95	0.4			
12 a 32	0.8-0.9	0.4			
4	0.2	1.0-1.5			----
12	0.2	1.6-2.0			----
12 a 32	0.2	1.6-2.0	2.0-0.5		

Cuando el contenido de carbono es algo superior al eutectoide, la cementita como segunda fase distribuida en forma fina y dispersa después del endurecimiento mejora las condiciones de servicio del cilindro.

La forma y distribución del carbono depende de la temperatura inicial y final de forja y del tratamiento térmico previo al endurecimiento. Después de éste los cilindros son sometidos a un alivio de tensiones entre 100°C y 200°C.

Una calidad especial de cilindros forjados y templados para laminado

en caliente de flejes semiacabados en metales no ferrosos se puede fabricar con dureza entre 55 y 60 Shore D (para laminar metales ligeros) y entre 60 y 70 Shore D (para laminación de metales pesados); con composición siguiente:

$$\begin{aligned} \%C &= 0.70; \%Cr. = 1.7; \\ \%Mo &= 0.40 \text{ y } \%V = 0.10 \end{aligned}$$

C. Cilindros en acero forjado hipereutectoide:

Se producen en pequeños diámetros con contenidos de carbono por encima de 1.0%. Estos rodillos se utilizan en Trenes Cluster y Sendzimir.

2 – CILINDROS EN ACERO FUNDIDO

Tienen menor tenacidad y resistencia que los cilindros forjados. Su

principal ventaja frente a los cilindros forjados es su bajo costo de producción y se utilizan en laminado en frío como en caliente. Pueden ser clasificados de la misma manera que los cilindros en acero forjado.

A. Cilindros en Acero Fundido Hipoeutectoide:

Se fabrican en horno eléctrico de arco con especial cuidado durante la fundición. Se pueden alcanzar propiedades muy próximas a las de los cilindros forjados. Debido a que los aceros fundidos tienen menor tenacidad que los aceros deformados plásticamente, los contenidos de carbono de estos cilindros son tan bajos como 0.40% y con una dureza del orden de 25 Shore D. La relación entre la resistencia, el 1% de alargamiento y el 1% de carbono es la siguiente:

% de Carbono	Resistencia a la Tracción en KSI	% de Alargamiento
0.4	65 – 70	4.0
0.8	90 – 100	6.0

B. Cilindros en Acero Fundido de Composición próxima al Eutectoide:

Se fabrican con proceso de fundición de doble colada, el cual produce una superficie con alta resistencia al desgaste y un núcleo tenaz.

Dependiendo del material y del tratamiento térmico se pueden alcanzar en la superficie durezas entre 50 y 83 Shore D y resistencias por encima de 215 KSI; mientras que el núcleo está formado por un acero bajamente aleado con carbón entre 0.25 y 0.33%, resistencia entre 85 y 100 KSI y con elongación de 15% a 20%. Durante el proceso de fabricación y el tratamiento térmico se deja un estado de tensión de compresión en la capa externa del cilindro,

el cual minimiza la formación de grietas en caliente.

Se clasifican en:

Los cilindros normalizados y tratados térmicamente con altas temperaturas del revenido los cuales se usan en el laminado de barras y productos similares. Se producen con resistencia entre 85 KSI – 105 KSI y elongación entre 2.5% – 5%.

Un adecuado tratamiento térmico imparte al material buena resistencia al agrietamiento en caliente y simultáneamente una excelente resistencia a la abrasión.

La composición química varía aproximadamente entre los siguientes límites dependiendo del diámetro del rodillo y de la dureza que debe estar entre 45 y 50 Shore D:

Tipo de cilindro

	%C	%Mn
Macizo	0.65-0.8	0.5-0.7
Macizo	0.8	0.7-0.9
Hueco	0.65-0.75	0.5-0.7
	%Si	%Cr.
Macizo	0.3-0.5	1.0-1.6
Macizo	0.4	0.5-1.0
Hueco	0.3-0.5	1.0-1.6
	%Mo	%Ni
Macizo	0.2-0.5	---
Macizo	0.4-0.7	---
Hueco	0.2-0.3	1.0-1.5

Los cilindros endurecidos se utilizan dentro del siguiente rango de composición:

%C	%Mn	%Si
0.8-1.2	1.4-2.5	0.3-0.5
%Cr	%Mo	
1.4-1.8	0.15-0.30	

Con % de Cr. por encima de 3 y cuidadoso tratamiento térmico se pueden producir cilindros macizos fundidos de gran tamaño aptos como cilindros de apoyo en la parte superior durante el laminado en frío.

Cuando se fabrican con proceso de una colada se obtienen durezas entre 50 y 62 Shore D.

Cuando se fabrican con colada doble se alcanzan durezas por encima de 80 Shore D en la capa externa.

Se utilizan como rodillos de apoyo en la parte superior en los trenes de laminado en frío DUO y cuarto reversibles.

C. Cilindros en Acero Fundido Hipereutectoide:

Existen dos tipos:

Cilindros en Acero Fundido Hipereutectoide Normalizado. Estos contienen inclusiones de carburo que hacen disminuir la resistencia

mecánica, pero que a su vez incrementan la resistencia al desgaste. Los contenidos de carbono varían entre 1.2% y 2.6%.

El proceso de fundición de estos aceros sobre todo en rodillos grandes es bastante difícil a causa del amplio rango de solidificación de estas aleaciones.

Se fabrican en moldes de arena recubiertos interiormente con una capa metálica para producir buen acabado en la superficie de trabajo del cilindro.

Sólo cuando los rodillos son de gran tamaño se pueden utilizar en estado fundido después de un alivio de tensiones; mientras que los cilindros medianos y pequeños requieren forzosamente de tratamientos térmicos especiales antes de su utilización.

Las composiciones más utilizadas son:

	Dureza del Cilindro		
	%C	%Mn	%Si
Blando	1.4-1.6	0.5-1.0	0.3-0.6
Medio duro	1.8-2.0	0.5-1.0	0.3-0.6
Duro	2.4-2.6	0.5-1.0	0.3-0.6
	%Cr	%Ni	
Blando	0.5-1.5	0.5-1.5	
Medio Duro	0.5-1.5	0.5-1.5	
Duro	0.5-1.5	0.5-1.5	

Las propiedades varían de la siguiente manera con el contenido de carbono

%C	Resistencia a la Tracción en KSI
1.2	85 - 90
2.6	34 - 40

% de Alargamiento
2.5 - 3.5
casi acero

Los rodillos con contenidos de carbono bajo se utilizan cuando se espera que las deformaciones del cilin-

dro sean grandes; mientras que los de alto carbono se emplean cuando los esfuerzos mecánicos son bajos pero se requieren productos laminados con buen acabado superficial.

Cilindros en Acero Grafítico. Estos aceros son generalmente aleados con Cromo, Molibdeno, Níquel y Silicio.

El grafito fino y disperso que se produce, sobre todo en la superficie, prolonga la vida del cilindro por el efecto que tiene como autolubrificante.

La precipitación del grafito en forma de esferoides incrementa considerablemente la resistencia a la tracción.

CILINDROS EN FUNDICION DE HIERRO

Se clasifican en: Cilindros sin grafito en la superficie de trabajo y en cilindros que contienen grafito libre en la superficie de trabajo.

1. Cilindros sin grafito en la superficie de trabajo:

Se fabrican con elementos aleantes que favorecen el blanqueo de la fundición tales como: Manganeso, Cromo y Molibdeno a los que se les adiciona Níquel con el fin de mejorar la tenacidad de la capa superficial. Las propiedades de estos cilindros pueden relacionarse en la Fig. 2. Se utilizan en el laminado en caliente de varillas y alambrones. Por un control tanto de la composición como de la velocidad en enfriamiento se pueden obtener cilindros con estructura de matriz: Perlítica, Bainítica o Martensítica.

2. Cilindros con grafito laminar en la superficie de trabajo:

Se producen con diferentes grados de dureza: desde 30 Shore D en los fundidos en arena y con sistema de una colada; hasta 85 Shore D en los cilindros en molde metálico con doble sistema de colada. En el proceso de doble colado se ▶

Cilindros para laminación

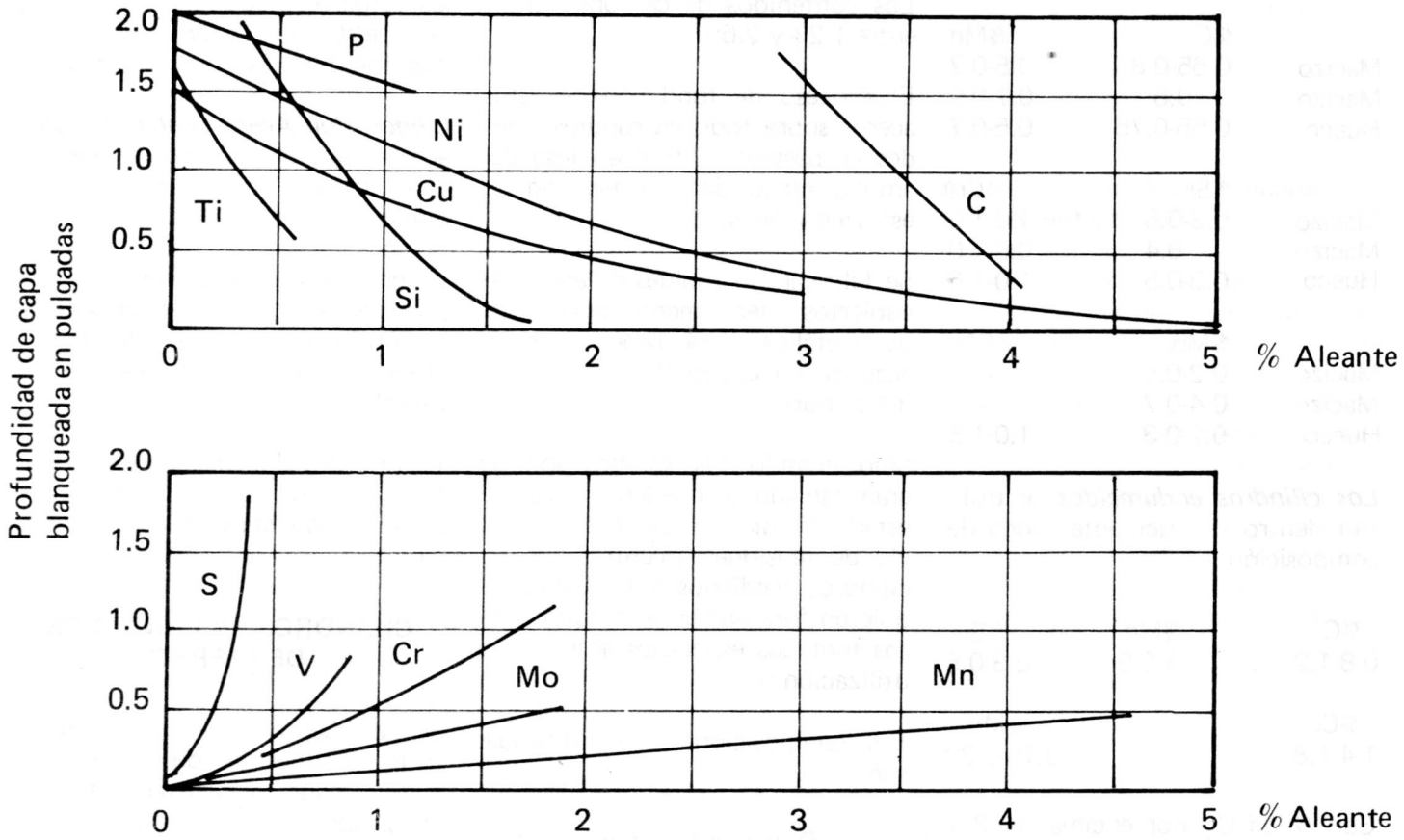


Fig. 1. Influencia de los aleantes en la capa cementada.

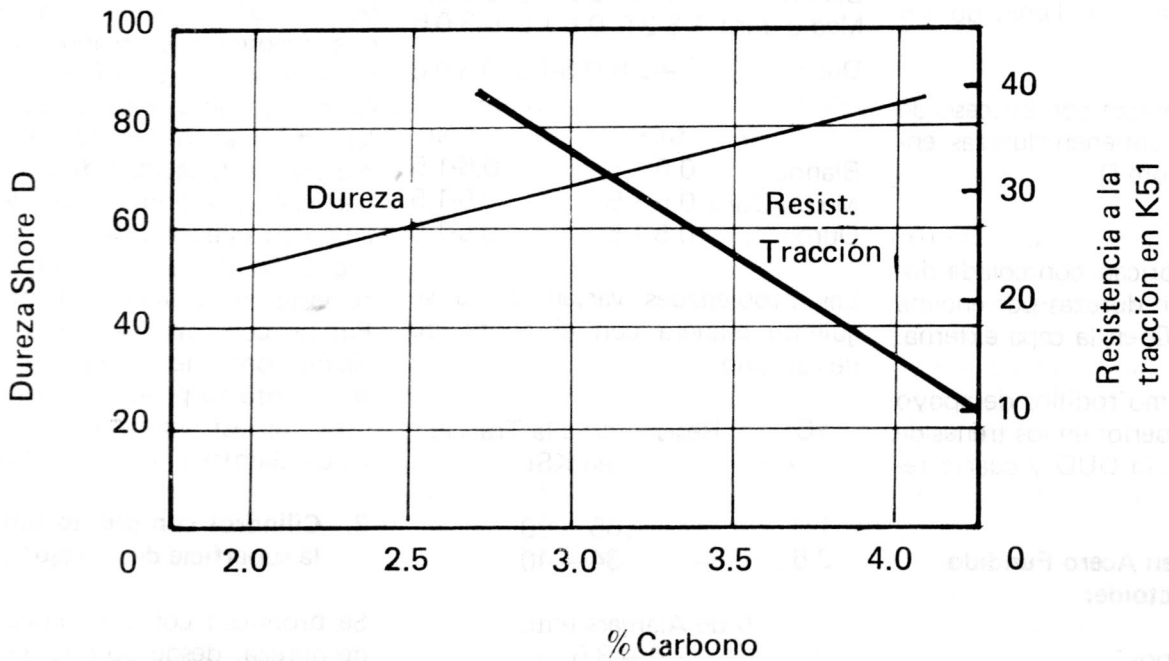


Fig. 2. Efecto del %C en la dureza superficial y en la resistencia del núcleo de los cilindros de laminación en fundición sin grafito en la superficie.

utilizan dos baños uno con aleantes y otro con escasez de aleantes. Primero se llena el molde con el primer baño y se deja un espesor de ciento para producir un espesor de capa deseado del orden de 2 a 4 pulgadas; luego se cuela el segundo baño (pobre en aleantes) que por arrastre desplaza el líquido remanente de la primera colada. Al final se obtiene un material compuesto, de alta dureza superficial y blando en el núcleo.

La escogencia del cilindro más adecuado se hace teniendo en cuenta los siguientes lineamientos generales:

- Si los esfuerzos mecánicos son demasiado elevados los cilindros deben tener bajo contenido de carbono y deben ser forjados.
- Cuando los esfuerzos mecánicos son moderados se puede utilizar acero o hierro fundido nodular.
- Con esfuerzos bajos se puede uti-

lizar cualquier tipo de cilindro incluyendo los fabricados en fundición gris.

RESULTADOS

Los cálculos y resultados obtenidos para el cilindro de 170 mm. de diámetro que se fabricó en hierro nodular fueron los siguientes:

1-- PARAMETROS DE DISEÑO

- Carga crítica de laminación = 152.024.0 libras
- Diámetro del cilindro = 11.0 pulgadas
- Longitud de la tabla = 27.5 pulgadas
- Dureza en estado normalizado = 240 Brinell
- Carbono equivalente = 4.1

2 – SISTEMA DE COLADA

- Colada vertical, por el fondo, tangencial con eliminador de escoria centrífugo.

– Moldeo en arena con enfriador metálico en la tabla del cilindro.

– Espesor del enfriador para producir una estructura perlítica con nódulos finos de grafito de profundidad 2.5 pulgadas = 1.4 pulgadas.

- Volumen del cilindro = 4.700 pulgadas cúbicas
- Tiempo de colada = 53 seg.
- Volumen de mazarota = 789 pulgadas cúbicas
- Altura de bebedero = 76 pulgadas
- Altura de la balsa (con trampa para escoria) = 13.6 pulgadas
- Perfil del bebedero = 1.5

3 – FUSION

- En horno eléctrico de arco.
- Esferoidizante: Magnesio – Coke
- Sistema de esferoidización: Reactor Mag–COK
- Inoculante: Ferrosilicio del 75 75 % ■

BIBLIOGRAFIA

- Climax Molybdenum Company, *Rolling - Mill Rolls*.
- Dieter G. E., *Metalurgia Mecánica*.
- Heine - Rosenthal, *Principles of Metals Casting*.
- Trinks W., *Fundamentos de la Laminación (Interciencia 1964)*.
- Holzmuller, A. y Kucharcik, L., *Atlas de Sistemas de Colada y Alimentación para Fundiciones*.
- Richard Flinn, *Introduction of Metals Casting*
- Climax Molybdenum Company, *The uses of Molybdenum in Nodular Irons (1964)*.
- United States Steel (U.S.S.), *The Making, Shaping and Treating of Steel*.
- H. Fonseca P. y J. E. Venezuela B. Universidad Nal., *Diseño de cilindros en Fundición Nodular para laminación en Caliente*.