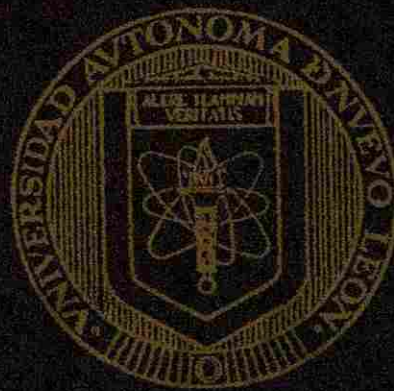


**UNIVERSIDAD AUTONOMA DE NUEVO LEON**

**FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA Y ELECTRICA**

**DIVISION DE ESTUDIOS DE POST - GRADO**



**CARACTERIZACION Y ANALISIS DE RODILLOS DE  
LAMINACION EN CALIENTE Y FRIO**

**POR**

**ING. RUMUALDO SERVIN CASTAÑEDA**

**TESIS  
EN OPCION AL GRADO DE MAESTRO EN CIENCIAS DE LA  
INGENIERIA MECANICA CON ESPECIALIDAD EN  
MATERIALES.**

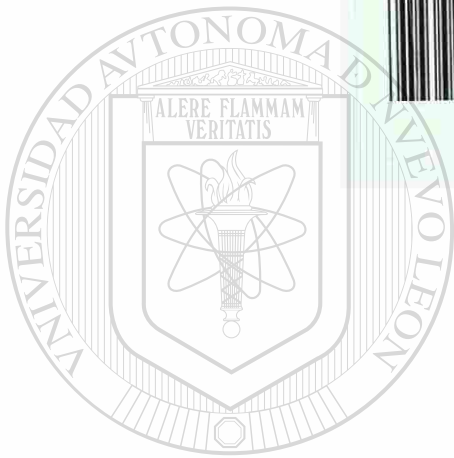
**SAN NICOLAS DE LOS GARZA N.L. A DICIEMBRE 1999.**

8858

AMERICAN  
UNIVERSITY  
LIBRARY  
WASHINGTON DC 20004

1999

TM  
Z5853  
.M2  
FIME  
1999  
S4



# UANL

---

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

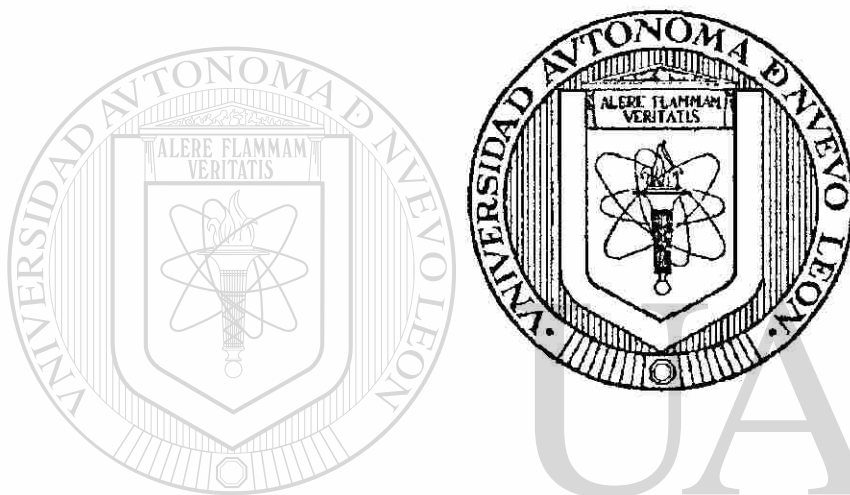


DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

**UNIVERSIDAD AUTONOMA DE NUEVO LEON**

**FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA Y ELECTRICA**

**DIVISION DE ESTUDIOS DE POST – GRADO**



---

**CARACTERIZACION Y ANALISIS DE RODILLOS DE  
LAMINACION EN CALIENTE Y FRIO**

**DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS  
POR**

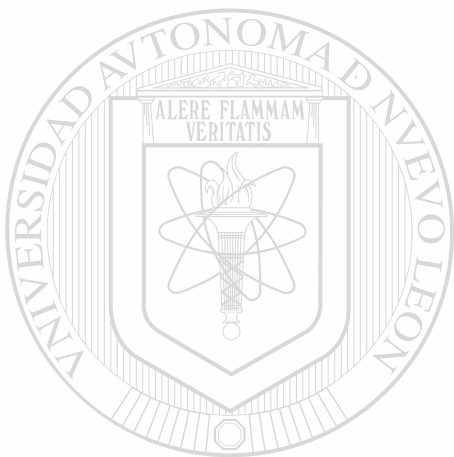
**ING. RUMUALDO SERVIN CASTAÑEDA**

**TESIS  
EN OPCION AL GRADO DE MAESTRO EN CIENCIAS DE LA  
INGENIERIA MECANICA CON ESPECIALIDAD EN  
MATERIALES.**

**SAN NICOLAS DE LOS GARZA N.L., A DICIEMBRE 1999.**

0135 49660

7H  
Z585  
.M2  
IME  
1999  
S4



# UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

®

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

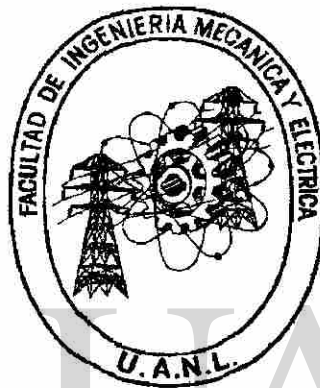
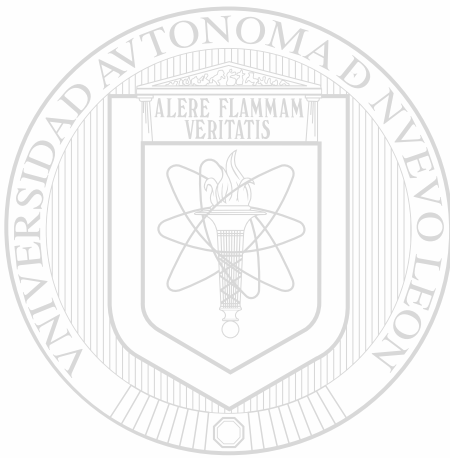


FONDO  
TESIS

**UNIVERSIDAD AUTONOMA DE NUEVO LEON**

**FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA Y ELECTRICA**

**DIVISION DE ESTUDIOS DE POST – GRADO**



---

**CARACTERIZACION Y ANALISIS DE RODILLOS DE  
LAMINACION EN CALIENTE Y FRIO**

**DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS  
POR**

**ING. RUMUALDO SERVIN CASTAÑEDA**

**TESIS  
EN OPCION AL GRADO DE MAESTRO EN CIENCIAS DE LA  
INGENIERIA MECANICA CON ESPECIALIDAD EN  
MATERIALES.**

**SAN NICOLAS DE LOS GARZA N.L, A DICIEMBRE 1999.**



# UANL

---

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN



DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

**Dedico este trabajo al pequeño ser que aun sin conocerle me motivo a superarme profesionalmente.**

**Mi querida hija Damaris Itzel**

## **AGRADECIMIENTOS.**

A la directiva del Grupo Industrial Monclova, en especial a la gerencia de Fundición Monclova, por brindarme su apoyo económico para realizar mis estudios.

A mis maestros que a lo largo de mis estudios me han dejado grandes enseñanzas.

A mi asesor, el Dr. Rafael Colás por su apoyo y dirección.

A mis coasesores por la revisión de este trabajo y sus valiosas contribuciones.

A mis compañeros de trabajo que colaboraron de diferentes maneras en la elaboración de este trabajo.

A mis excompañeros de trabajo que me apoyaron durante su estancia en esta empresa.

A mi esposa Tere por su comprensión y apoyo incondicional.

A mis padres y hermanos que me brindan cariño y confianza.

Pero sobre todo deseo agradecer a Dios que al darme la vida me dio todo.



## PROLOGO.

El norte de la República Mexicana se destaca principalmente por el creciente desarrollo de su industria, durante los últimos cincuenta años han tenido lugar desarrollos importantes la industria acerera en las operaciones de laminado, así como en los rodillos utilizados para la producción de acero. La laminación se encuentra actualmente en la tercera generación. Las antiguas laminadoras han tenido que modernizar su equipo para competir con las plantas que han sido diseñadas para trabajar con mayores velocidades y fuerzas de laminado, además de contar con un estricto control automático para mantener la calidad del acero que exige la industria en el fin del siglo, el desarrollo de los rodillos de laminación ha tenido que crecer juntamente con la modernización de la industria acerera, actualmente se fabrican rodillos que se flexionan, además de obtenerse mejores propiedades que le dan mayor rendimiento.

El proceso de laminación tiene una influencia importante sobre el rendimiento de los rodillos laminadores, los grados de rodillos y las técnicas de laminación continuarán desarrollándose para mejorar las propiedades y calidad del producto. Es mi deseo mantenerme actualizado en el desarrollo de la industria acerera, por esta razón escribí esta obra y la pongo a disposición del uso general; mucho agradeceré que los lectores me notifiquen cualquier error u omisión importante.

Ing. R. Servin

Fundación Monclova S.A.  
Presidente Carranza Int. A No. 150  
Frontera, Coahuila.  
Tel. (86) 34-00-44  
Ext. 748 y 749

## RESUMEN.

La presente tesis consiste de un estudio para caracterizar y analizar rodillos que se utilizan para laminar acero, partiendo de un lingote hasta obtener productos de uso comercial.

Para un mayor entendimiento del funcionamiento de los rodillos se describe brevemente la laminación en frío y caliente, los principios básicos y su equipo; los rodillos de laminación forman parte de este último, que es el tema central de este estudio. Se describe plenamente a los rodillos clasificándolos por su proceso de fabricación, aplicación en la industria y su estructura metalografica.

Se documenta detalladamente el proceso de fabricación y los diferentes ensayos aplicados para controlar los procesos de moldeo, fusión, tratamiento térmico y maquinado.

Se tomaron muestras de los rodillos que se utilizan en los molinos de varilla y alambón, lámina, placa y tira, perfiles pesados, tubos, laminación en frío; aplicándoles ensayos mecánicos de compresión, dureza, metalografía y análisis químico, para caracterizar el material; los datos que se obtuvieron se utilizaron para representar gráficamente sus características, comparándolas según su genero para cada uno de los materiales estudiados.

Se describen los criterios utilizados para la selección de un grado de material, apoyándose en la respuesta de los metales frente a fuerzas y cargas aplicadas durante el desarrollo de los ensayos. Se predice el funcionamiento de los rodillos basándose en las propiedades mecánicas obtenidas.

Este trabajo se desarrolló en las instalaciones de Fundición Monclova S.A, empresa de la industria metal mecánica dedicada a la fabricación de rodillos de laminación.

## INDICE.

Resumen .....	1
.	
1. – Introducción .....	4
1.1 Descripción del problema a resolver .....	4
1.2 Objetivo de la tesis .....	4
1.3 Justificación del trabajo de tesis .....	5
1.4 Metodología .....	5
1.5 Límites del estudio .....	6
1.6 Revisión bibliográfica .....	6
.	
2. – Antecedentes .....	7
2.1. Breve introducción a la laminación .....	8
2.1.1 Clasificación de molinos de laminación. ....	11
2.1.2 Composición de los molinos de laminación .....	14
2.1.3 Diferentes tipos de laminación .....	15
2.1.4 Requerimientos para que se efectúe la laminación .....	17
.	
3. - Rodillos de laminación. ....	19
<hr/>	
3.1 Introducción .....	20
3.2 Clasificación de los rodillos de laminación .....	22
3.3 Especificaciones de los rodillos de laminación .....	24
3.4 Inspección y pruebas aplicados a los rodillos de laminación .....	30
.	
4. - Procesos de fabricación de rodillos .....	62
4.1. Preparación de moldes .....	62
4.1.1 Preparación de molde para rodillos vaciados de acero .....	65
4.1.2 Preparación de moldes para rodillos vaciados de hierro .....	69
4.1.3 Rodillos de hierro doble vaciado .....	70
4.1.4 Rodillos forjados .....	71
4.2. Fusión .....	72
4.3. Tratamientos térmicos .....	77
4.4. Maquinado .....	84
.	

<b>5. – Caracterización de los rodillos</b> .....	<b>87</b>
<b>5.1. Clasificación de rodillos por tipo de molino</b> .....	<b>87</b>
5.1.1 Rodillos para molinos de varilla y alambón .....	88
5.1.2 Rodillos para molinos de lámina, placa y tira .....	88
5.1.3 Rodillos para molinos de perfiles pesados .....	89
5.1.4 Rodillos para molinos de tubos .....	89
5.1.5 Rodillos para molinos de laminación en frío .....	90
<b>5.2. Ensayos realizados</b> .....	<b>90</b>
5.2.1 Análisis químico .....	90
5.2.2 Ensayo de dureza .....	91
5.2.3 Metalografía .....	91
5.2.4 Ensayo de compresión .....	92
<b>6. - Resultados y Discusión.</b> .....	<b>93</b>
6.1 Rodillos para molinos de varilla y alambón .....	93
6.2 Rodillos para molinos de lámina, placa y tira .....	97
6.3 Rodillos para molinos de perfiles pesados .....	101
6.4 Rodillos para molinos de tubos .....	105
6.5 Rodillos para molinos de laminación en frío .....	105
<b>7. - Conclusiones y sugerencias para trabajos futuros.</b> .....	<b>108</b>
<hr/>	
<b>Bibliografía.</b> .....	<b>109</b>
<b>Figuras, tablas y gráficas.</b> .....	<b>112</b>
<b>Apéndices.</b> .....	<b>114</b>
<b>Glosario de términos.</b> .....	<b>119</b>
<b>Resumen autobiográfico.</b> .....	<b>123</b>

# 1. - INTRODUCCIÓN.

## 1.1 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA A RESOLVER.

Un rodillo es un cilindro de metal aleado utilizado como herramienta indispensable en el proceso de laminación. Esta herramienta puede causar problemas tales como atorones en el producto procesado causando demoras muy costosas e incluso pueden obtenerse productos de segunda calidad o pérdida total del mismo.

Este problema algunas veces es atribuible a rodillos mal diseñados o sencillamente el material que se ha seleccionado para su fabricación no es el adecuado para soportar las especificaciones requeridas para que se efectúe el proceso de laminación. Por esta razón se requiere pleno conocimiento de las características del material del rodillo como herramienta de operación, eliminando o disminuyendo al máximo este problema.

---

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

## 1.2 OBJETIVO DE LA TESIS.

En el presente análisis se estudiarán las condiciones de proceso que afectan las características de los rodillos o cilindros de laminación. Se estudiarán los principios básicos de la laminación para conocer donde y en que condiciones operan los rodillos antes mencionados.

Se describirá cual es el proceso de manufactura para los rodillos de laminación. Se observará como las estructuras cambian las características mecánicas; se comprenderá el comportamiento durante la vida útil de esta herramienta, se conocerá la estructura interna y propiedades de este material, seleccionando el más adecuado para cada aplicación.

### 1.3 JUSTIFICACION DEL TRABAJO DE TESIS.

Desde el comienzo de la civilización los materiales han sido utilizados por el hombre para mejorar su nivel de vida. Los productos de acero se pueden encontrar en todas partes, sólo basta mirar al entorno para apreciar ésto.

La producción de este material, su procesado hasta convertirlo en producto acabado, constituye una parte importante de la economía actual.

Más del 70% de los productos de acero se obtienen mediante el proceso de laminación. El rodillo es la principal herramienta en los molinos de laminación. La aplicación de grandes fuerzas sobre los rodillos de laminación, en combinación con otras variables como temperatura, homogeneidad, velocidad, dureza, enfriamiento, par de torsión, reducción, producen graves fallas en el proceso de producción de acero. Las demoras provocadas por fallas de los rodillos de laminación son muy costosas para la industria acerera, por tal motivo se considera de gran interés el desarrollo tecnológico de los rodillos de laminación.

### 1.4 METODOLOGIA.

Se estudiará la ruta de fabricación de diferentes tipos de rodillos empleados en la laminación de productos de acero. Se identificarán las variables claves que controlan o modifican la estructura de los rodillos. Se realizarán ensayos de dureza, análisis químico, metalografía y compresión para predecir el comportamiento de los rodillos durante su vida operativa. Las muestras se obtendrán de un extremo de cada rodillo cortándolas con disco abrasivo. Para cada uno de los ensayos se prepararan de acuerdo a los criterios establecidos por la ASTM (American Society for Testing Materials). Los resultados se representaran gráficamente para los ensayos de dureza, análisis químico, compresión y mediante una fotografía para la metalografía.

## 2. - ANTECEDENTES.

Hace miles de años el hombre primitivo comenzó a fabricar sus herramientas de trabajo y de caza con materiales compuestos de estaño y cobre (bronce), esta aleación se fundía y vaciaba en moldes que contenían la figura que deseaban. El hombre primitivo descubrió rápidamente que existía otro método para la fabricación de sus herramientas, que consistía en darle forma al producto vaciado por medio de deformación a base de martilleo, descubriendo que de esta forma se obtenían mejores propiedades que por el método de vaciado. Con la aplicación de esta aleación dio inicio la era de los metales, la cual fue conocida como "La edad del bronce". La edad de bronce inició en el año 3000 A.C y terminó cuando se le comenzó a dar aplicación al hierro en su estado natural en el año 1200 A.C. Con esta aplicación dio inicio lo que se conoció como "La edad de hierro", en la cual el hombre aprendió a extraer el mineral de hierro del mineral metálico, el cual se conocía en aquel tiempo solamente en meteoritos. A partir de entonces ha sido una preocupación constante la evolución en el proceso de producción de hierro así como los procesos de trabajado de metales.

El método que más aceptación ha tenido desde entonces se conoce como "Laminación", que consiste en hacer pasar a la pieza de metal entre dos rodillos, que giran en sentido contrario al otro, durante el cual se observan los fenómenos de reducción, alargamiento y ensanchamiento lateral de la pieza (12).

## 2.1. - BREVE INTRODUCCIÓN A LA LAMINACIÓN.

La metalurgia mecánica es la parte de la metalurgia que se ocupa, principalmente de la respuesta de los metales frente a las fuerzas o cargas que se les aplican en un momento dado. Los metales en la tecnología moderna tienen gran importancia económica, debido principalmente a la facilidad con que se les puede dar formas útiles. Existen centenares de procesos para trabajar los metales destinados a funciones específicas a los cuales la metalurgia mecánica los agrupa como procesos de conformación, que a su vez se clasifican en base a la forma en como se aplican las fuerzas de conformación, y son:

1. - Procesos de compresión directa.
2. - Procesos de compresión indirecta.
3. - Procesos de tracción.
4. - Procesos de plegado o flexión.
5. - Procesos de cizallamiento.

En los procesos de compresión directa, la fuerza se aplica a la superficie de la pieza de metal que se trabaja y éste fluye formando un ángulo recto con la dirección de la compresión. Los ejemplos más representativos de estos procesos son la forja y la laminación.

La definición de que el proceso de laminación es un proceso de conformación mediante compresión directa es incompleta, ya que la forja comparte las mismas características, por lo tanto se tendrá que definir la laminación como un proceso de conformación de los metales por compresión directa, efectuado al hacer pasar a la pieza de metal entre dos rodillos (cilindros), que giran uno en sentido contrario al otro, y durante el cual se deben de dar los fenómenos de reducción del espesor, alargamiento longitudinal y ensanchamiento lateral de la pieza que se trabaja.



Todas estas características se obtienen también en la forja, por ello se dice también que la laminación es un proceso de forja continua. La diferencia existe entonces en que el metal que se trabaja debe de pasar entre dos rodillos soportados en un molino para que exista la laminación (10).

De acuerdo a la definición de laminación se requieren por lo menos dos rodillos para que este proceso se efectúe, estos rodillos necesariamente deben de estar soportados o instalados en alguna especie de armazón con la suficiente resistencia para soportar las cargas del proceso, que suelen ser bastante grandes, en algunos casos hasta de miles de toneladas. Se sobreentiende que dicha armazón deberá de ser sumamente robusta y resistente, la cual funcionará en conjunto con los rodillos como si fuera de una sola pieza.

Este armazón recibe muchos nombres siendo los más comunes: castillo, estante o caja, cuando se encuentra instalada con sus rodillos montados, su transmisión y motor, sus herrajes y equipos auxiliares, entonces se le llama molino. Aunque mucha gente lo sigue nombrando como cuando se refiere a la armazón, es decir castillo o caja.

La gente dedicada a la laminación pronto se dio cuenta que para hacer mas rápido el proceso y sacarle más productividad a un molino, podía hacerse uso no sólo de dos rodillos sino de 3,4,5,6 o más instalados en un mismo castillo, que los podía hacer girar en un sentido y después de determinado tiempo hacia el otro sentido, que podía montar los rodillos tanto horizontales como verticales y hasta tener en un mismo castillo una combinación de ambos. También se dieron cuenta de que no necesariamente tenían que ser rodillos cilíndricos sino también cónicos o combinados. Todo esto dio lugar al diseño de un sin número de tipos de molinos (figura 1) (15).

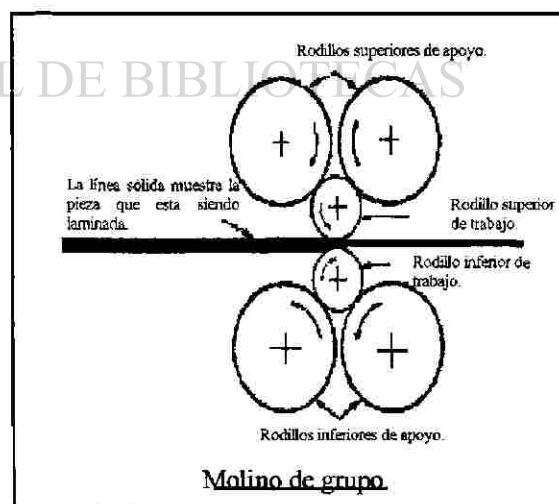
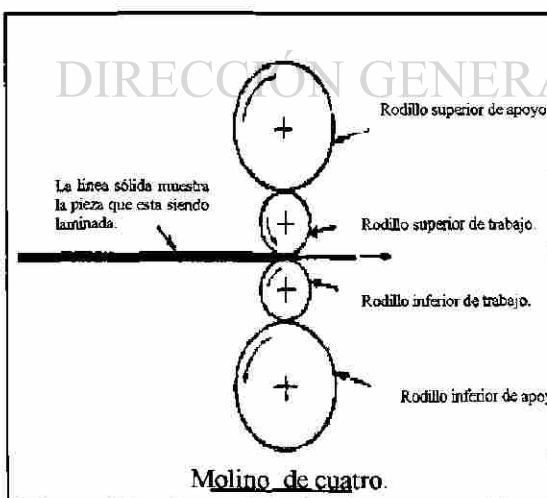
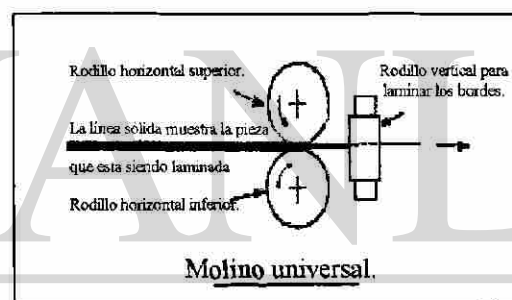
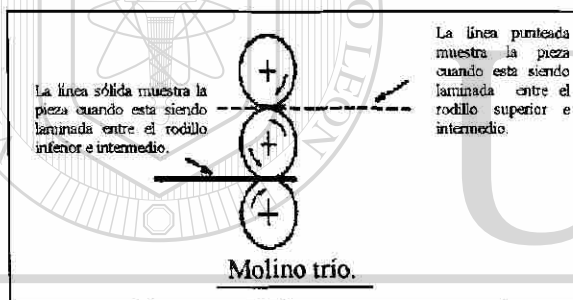
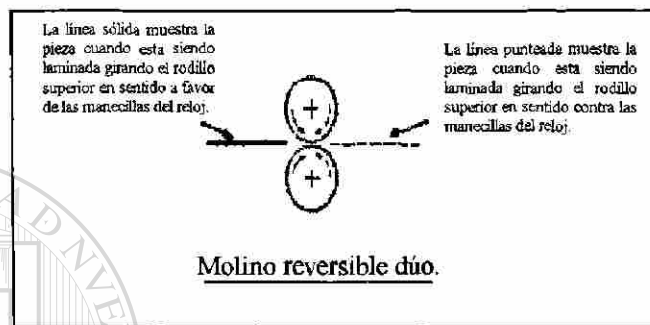
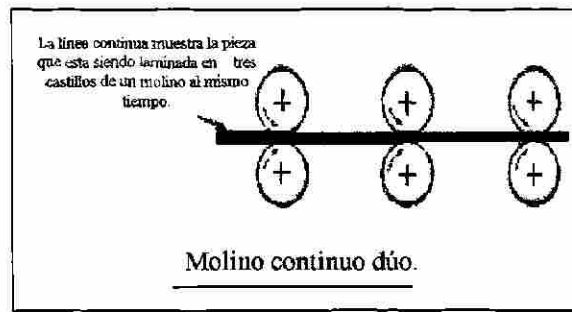
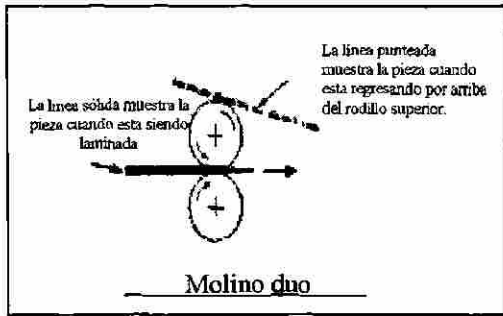


Figura 1. Arreglo de rodillos en molinos de laminación.  
 (Según; The Making, Shaping and Treating of Steel; United States Steel Corporation) (15)

### 2.1.1.- CLASIFICACIÓN DE LOS MOLINOS DE LAMINACIÓN.

En la actualidad existe un gran número de diseño de molinos de laminación, los cuales se podrían clasificar tomando en cuenta las siguientes consideraciones:

(a) Por su característica de diseño, principalmente el arreglo de sus rodillos, tales como molino dúo (dos rodillos), tríos (tres rodillos), cuartos (cuatro rodillos), de dos alturas (dos rodillos), de tres alturas (tres rodillos), etc.

(b) Por los productos que laminan como molino de tira, molino de barras, molino de alambón, molino de placa, etc.

(c) Por el diámetro de los rodillos que utilizan o por la longitud de la tabla, por ejemplo molino de 14", molino de 22", molino de 130".

Quando el molino tiene instalados rodillos verticales y horizontales, se le conoce como molino universal. En la tabla 1, se muestra una clasificación de los molinos más comunes en los recientes años (12).

Con el desarrollo de la laminación y la necesidad de mayor producción se vio la conveniencia de usar simultáneamente más de un molino y entonces nació el tren de laminación. Se le llama tren de laminación a un conjunto de molinos que trabajan sobre una barra o varias al mismo tiempo. Así como existen diversidad de molinos también hay una variedad de trenes que reciben sus nombres de acuerdo a la configuración o arreglo en que están sus molinos (figura 2). Un tren de laminación es un conjunto de por lo menos dos molinos que trabajan simultáneamente sobre una misma barra. En la actualidad no existen plantas laminadoras que trabajen con un tren de dos molinos, a excepción de algunos trenes para placa o templadores. Por lo general, actualmente, el mínimo necesario para una producción aceptable son 5 molinos y el máximo, no más de 26 (13).

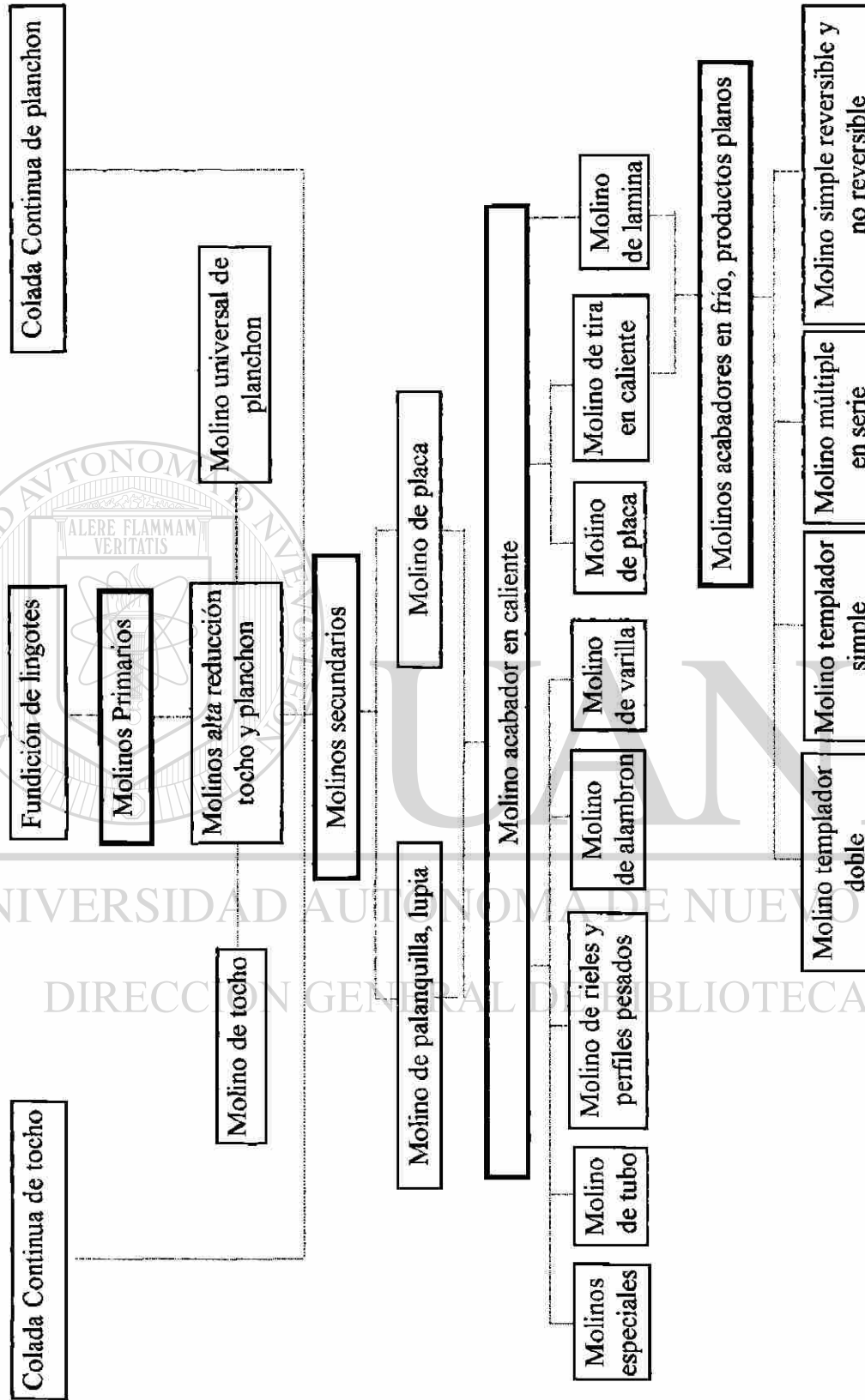
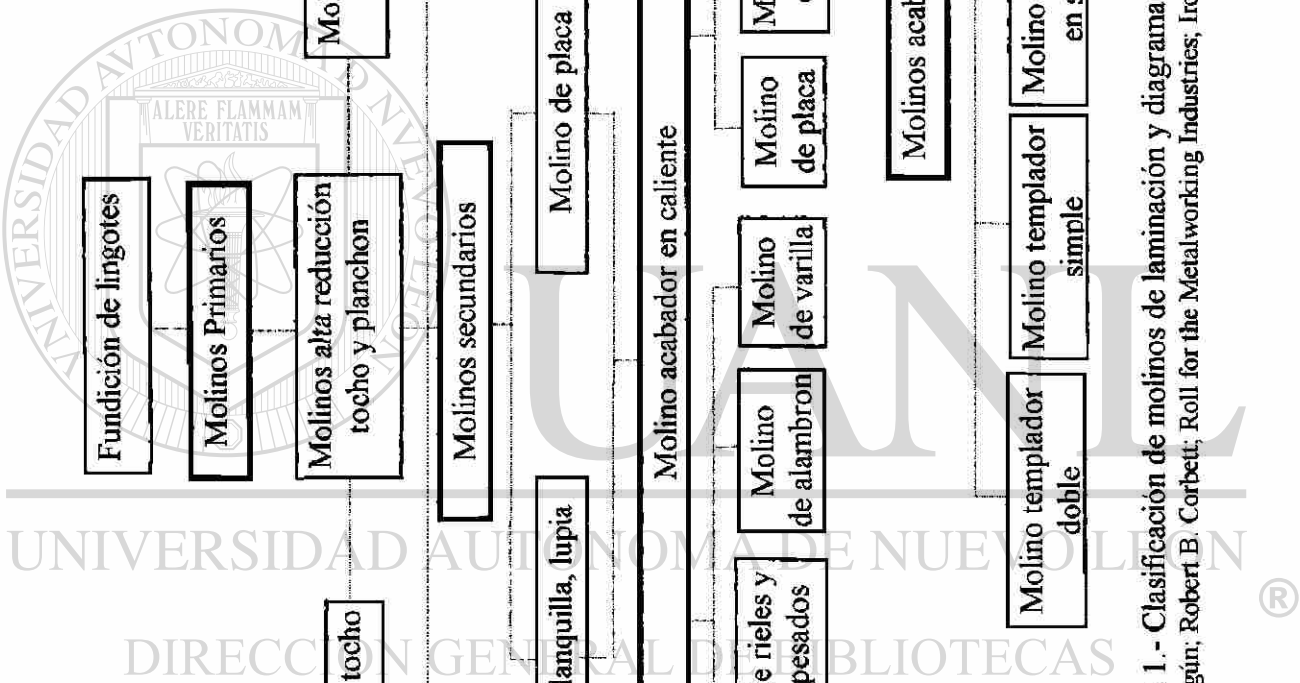


Tabla 1. - Clasificación de molinos de laminación y diagrama de flujo del acero.  
 (Según: Robert B. Corbett; Roll for the Metalworking Industries, Iron & Steel Society)



### 2.1.2. - CONSTRUCCIÓN DE UN MOLINO.

El molino considerado como una unidad de producción consta aparte de los rodillos y del castillo, de un gran número de piezas y mecanismos que lo configuran como un equipo bastante complejo. En la figura 3, se muestran las principales partes de un molino de laminación (15).

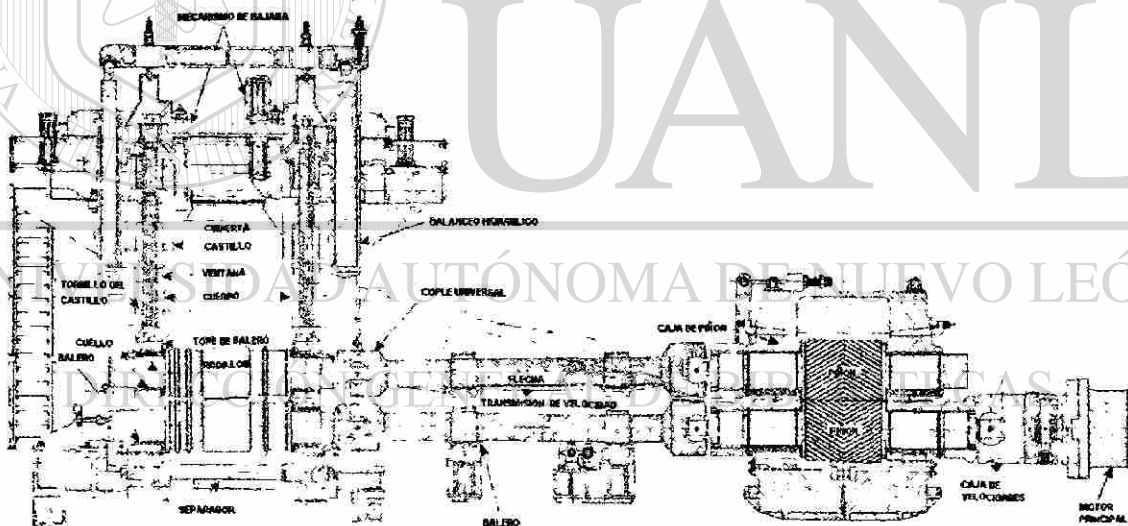


Figura 3. Partes principales de un molino de laminación.  
(Según; The Making, Shaping and Treating of Steel; United States Steel Corporation) (15).

### 2.1.3. - DIFERENTES TIPOS DE LAMINACIÓN.

La laminación de los metales como proceso de conformación se divide en varios tipos y etapas de acuerdo a determinadas circunstancias o condiciones, siendo las principales:

a). - La temperatura del acero

b). - La forma geométrica de la barra ( Se nombra barra a la pieza de acero que está siendo laminada independientemente de la forma o tamaño que tenga).

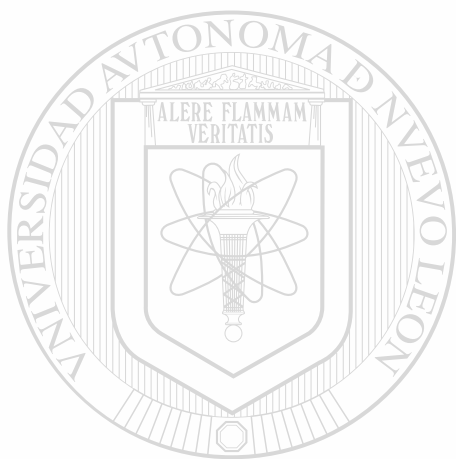
c). - La etapa del proceso.

a). - La temperatura del acero.- La laminación de acero se divide en laminación en caliente y en frío. La laminación en caliente se define como una deformación en condiciones tales de temperatura y velocidad de deformación que se producen simultáneamente la deformación y la restauración del grano. Por el contrario, la laminación en frío es realizada en condiciones tales que no es posible que se produzcan eficazmente los procesos de restauración. Generalmente la laminación en caliente se efectúa entre 1300 °C y 900 °C, mientras que la laminación en frío se efectúa entre 200 °C y la temperatura ambiente.

#### DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

b). - La forma geométrica de la barra. Por lo que respecta a la forma geométrica que mantiene la barra durante el proceso, la laminación se divide en plana y no plana. Laminación plana es cuando la barra mantiene una relación de espesor a ancho menor a 1, en cualquier etapa de la laminación. Laminación no plana, es cuando la forma de la sección transversal cambia en cada paso de la laminación, generalmente adoptando figuras geométricas planas. En la laminación de no planos se incluye lo que se conoce como laminación de formas, esto quiere decir que la sección en cada paso es diferente a cualquier figura geométrica plana.

c). - La etapa del proceso. Con relación a la etapa de proceso, la laminación se divide generalmente en desbaste, intermedia, y acabado. La laminación de desbaste consiste en reducir la materia prima rápidamente a una sección adecuada y manejable para los procesos siguientes. Generalmente esta laminación está separada de los siguientes procesos por una etapa de recalentamiento y de corte. Sobre todo cuando se parte de lingote. La laminación intermedia es un proceso que se efectúa antes de dar el acabado final, la reducción es mínima comparada con el desbaste. La laminación de acabado es la etapa del proceso donde se obtiene el producto terminado.



# UANL

---

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS



## 2.1.4. - REQUERIMIENTOS PARA QUE SE EFECTÚE LA LAMINACIÓN.

Anteriormente se mencionó que para que el proceso de conformación del metal pueda ser llamado laminación, se requiere que el metal se deforme al pasar entre dos rodillos, sin embargo, para que el metal se introduzca entre ellos se requieren varias condiciones sin las cuales el proceso no puede llevarse a cabo.

Un principio básico de la mecánica establece que cuando dos cuerpos en movimiento relativo son colocados en contacto, aparece una fuerza de fricción a lo largo de la tangente común en el punto de contacto. Esta fuerza considerada en uno de los cuerpos, actúa a lo largo de la tangente común y en dirección al movimiento relativo del otro cuerpo. Lo anterior se puede aplicar al caso en que una barra de acero es presentada frente a un par de rodillos girando a una velocidad  $U$ , si la barra se aproxima a los rodillos a una velocidad menor que la de los rodillos, entonces la fuerza de fricción que aparecerá al efectuarse el contacto tenderá a empujar la barra dentro del entrehierro de los rodillos. (Se llama entrehierro a la separación que existe entre un rodillo y otro). En el caso de que la barra se ponga en contacto con los rodillos a una velocidad mayor que la de éstos, entonces la fuerza de fricción tenderá a rechazar la barra y no entrará en el entrehierro. La primer condición para que se efectúe la laminación establece precisamente que la velocidad de la barra sea menor que la velocidad tangencial de los rodillos.

El ángulo formado por los centros de los rodillos y los puntos 1 y 2 de la figura 4, se le conoce como ángulo de mordida, la medida de este ángulo determinará también la aceptación o no de la barra entre los rodillos. En la práctica se establece que el ángulo máximo de mordida debe de ser de  $24^\circ$ , para que la barra sea aceptada, con ángulos mayores se comienza a tener problemas en la laminación (13).



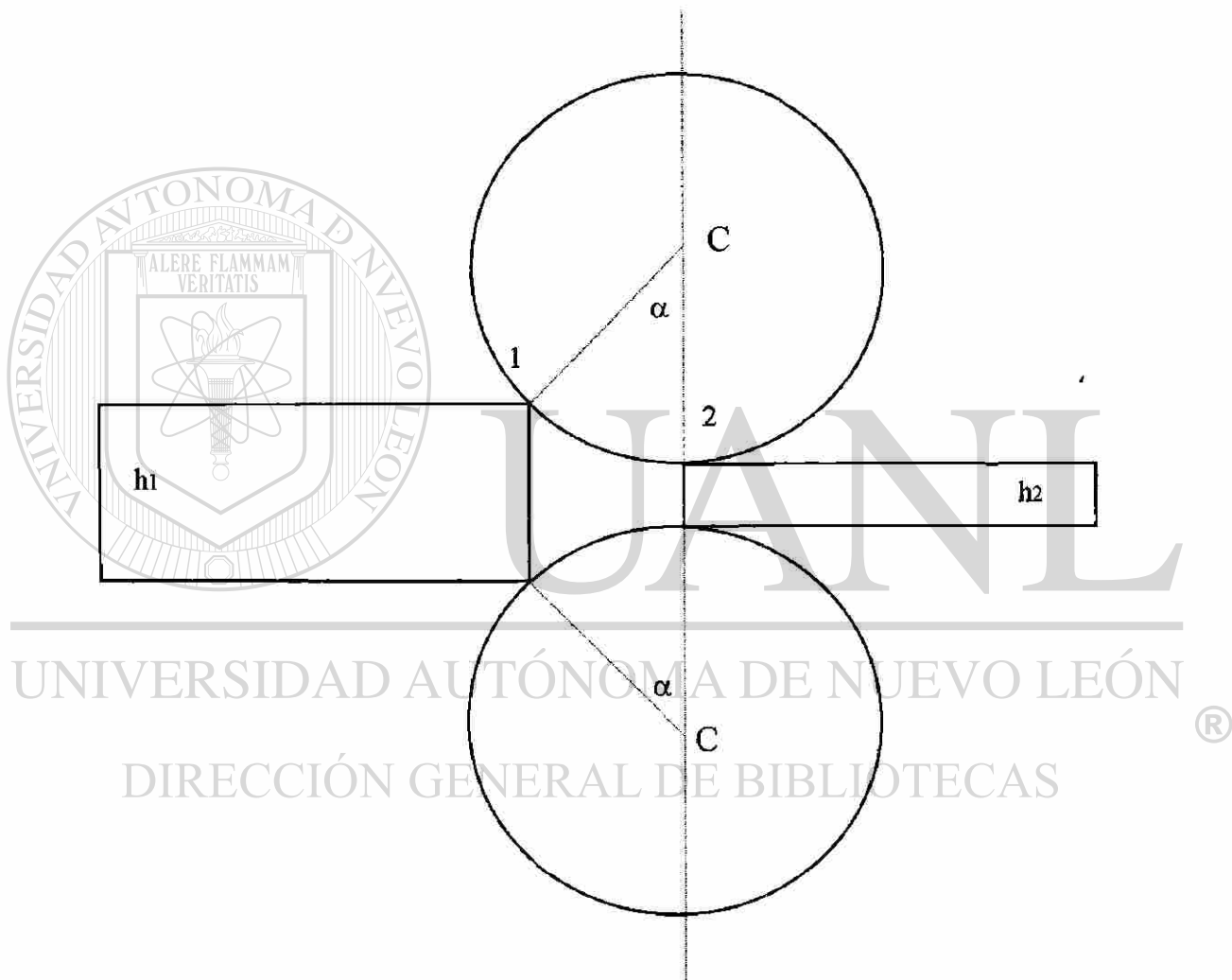


Figura 4. Condiciones de entrada en los rodillos de laminación.  
(Según; Roll Pass Design, de British Steel Corporation) (13).

### 3. - RODILLOS DE LAMINACIÓN.

No se tienen datos sobre quien o cuando se inicio el uso de rodillos para impartir un trabajo mecánico a los materiales. Es muy posible y es la creencia general que, los primeros intentos se hayan hecho para extraer el jugo de la caña de azúcar, ya que se tienen referencia que en el antiguo Egipto se usaban una especie de molinos con rodillos movidos a mano o con bueyes para tal efecto.

En 1449, Pietro Speciale de Silicia, construyó un molino trío con rodillos de madera engranados juntos, siendo el motriz el rodillo medio, para moler caña de azúcar.

En 1471, Rudolph de Nuremburg utilizo rodillos de hierro de 3.7 cm (1 1/2") de diámetro para laminar alambre de oro, pero el primer diseño plasmado ya en dibujos de un molino para trabajar metales fue realizado por Leonardo Da Vinci, en 1486, el cual incluía rodillos de apoyo, no se sabe sin embargo si se llegaría a construir.

En 1553, un Francés llamado Brulier, utilizó un molino con rodillos planos para producir láminas de oro y plata y no fue sino hasta el año de 1590 que un molino se utilizó para trabajar el hierro en caliente. Este molino fue construido por Godefroi de Bochs, en Dartford, Kent, Para laminar redondos a partir de pequeñas barras, según una patente de Bervis Bulmer.

En 1697 aparecieron los primeros rodillos de hierro templado (chilled roolls) y fueron usados por John Hanbury en Pontypool para laminar hojas de 1.10 m x 0.55m (48" x 24") para hojalata.

### 3.1. - INTRODUCCIÓN.

Al definir la laminación se dijo que el rodillo es la herramienta principal de este proceso. También se habló de que en la laminación se generan fuerzas muy grandes que actúan sobre los rodillos.

Teniendo esto en mente se puede decir que un rodillo de laminación es un cilindro de metal, generalmente aleado, que desde luego deberá de ser más duro que el material que se lamina para que pueda ser resistente al desgaste. El material deberá de ser homogéneo, es decir, sin discontinuidades (porosidades, grietas, inclusiones, etc.) para que resista los esfuerzos para los que fue diseñado. Deberá de soportar las temperaturas a las que será sometido durante el proceso, suponiendo desde luego un buen enfriamiento.

En la figura 5, Se muestra un rodillo convencional donde se identifican las partes principales, las cuales son el cuerpo o tabla que estará en contacto con el material que lamina, lleva en los extremos de la tabla los cuellos o espigas que se apoyan en los cojinetes, en el extremo de la espiga se le inserta un cople para proporcionar el par de torsión. Existen dos tipos de acoplamientos llamados de trébol y de paleta, el más común es el de tipo paleta.

El rodillo de laminación debe de ser considerado como una herramienta de precisión, debido a la actividad que desempeña, de no ser así se obtendrían productos laminados de segunda calidad o chatarra. Los rodillos en servicio son considerados como una viga apoyada en dos puntos con una carga actuando en cualquier punto de su cuerpo.

A los rodillos de laminación se le instalan en sus muñones chumaceras que les permiten girar lo más libremente posible, estas chumaceras con sus rodillos, se instalan a su vez en el castillo. Cuando los rodillos están nuevos, estas chumaceras quedan separadas una de la otra, a medida que se usa el juego de rodillos su diámetro va disminuyendo y la distancia entre chumaceras se va reduciendo. Cuando esta distancia se hace cero, es decir cuando las chumaceras se tocan, se dice que el diámetro de los rodillos ha llegado al diámetro de desecho o de chatarra.

La producción de acero depende en gran parte de los rodillos de laminación es por eso que el rodillo es considerado como una herramienta muy valiosa y de hecho es la principal e imprescindible herramienta de la industria acerera.

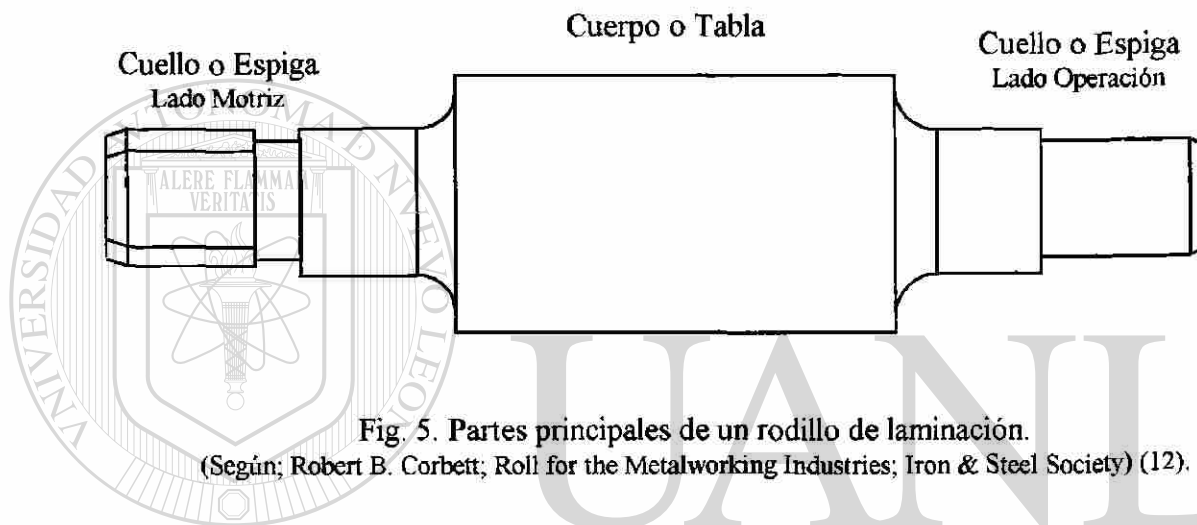


Fig. 5. Partes principales de un rodillo de laminación.

(Según; Robert B. Corbett, Roll for the Metalworking Industries; Iron & Steel Society) (12).

### 3.2. - CLASIFICACIÓN DE LOS RODILLOS DE LAMINACIÓN.

Los rodillos de laminación se clasifican considerando algunas especificaciones. La primera clasificación es por el molino de aplicación, tal como molino de trabajo para placa, alambrón, etc., para esta clasificación se debe de considerar la clasificación de molinos en la Tabla 1. Otra clasificación, es por el tipo de material y microestructura, como se muestra en la Tabla 2, la cual se divide en rodillos vaciados de acero y rodillos vaciado de hierro. El contenido de carbono en los rodillos vaciados de acero varía desde 0.40 a 2.50 %, los rodillos forjados pueden variar entre 0.50 y 1.50 %C y los aceros grafitados varían entre 1.50 y 2.50 %C. Los contenidos en los rodillos vaciados de hierro varían entre 2.50 y 3.60 %C. Otra clasificación de los rodillos, es por el proceso de producción, tal como se muestra en la Tabla 3, tales como los rodillos forjados, centrifugados, etc.(12).

#### Aceros

Fundición

Forjado

Normalizado y revenido

Templado y revenido

Grafitados

#### Hierro fundido

Blanco (sin grafito)

Granular o de temple indefinido (Algo de grafito)

Gris (Hojuelas de grafito)

Tratado (Inoculación)

Nodular (Esferoidal, Dúctil)

Compacto

Carburo (Carburo de tungsteno)

Tabla 2.- Clasificación de rodillos por el tipo de material y microestructura.  
(Según; Robert B. Corbett; Roll for the Metalworking Industries; Iron & Steel Society) (12).

---

**Fusión**

- Horno de arco eléctrico básico (acero)
  - Degasificado al vacío
  - Refusión con arco al vacío
  - Refusión por electro escoria
- Horno eléctrico de inducción ácido (hierro)

**Fundición****Molde**

- Arena
- Metal duro

**Vaciado**

- Vaciado simple
- Vaciado doble (compuesto)
  - Convencional o de derrame
- Centrifugo
  - Horizontal
  - Inclinado
  - Vertical

**Forjado**

- Forja recta
- Forja preformada

Metalurgia de polvos.

---

**Tabla 3.- Clasificación de rodillos por su proceso de producción.**  
 (Según; Robert B. Corbett; Roll for the Metalworking Industries; Iron & Steel Society) (12).

### 3.3. - ESPECIFICACIONES DE RODILLOS DE LAMINACIÓN.

Para establecer las especificaciones de operación de los rodillos en los molinos actuales se requiere de mucha experiencia y un entendimiento completo de los diseños y operación de los molinos, así como la calidad del material y el producto que se está laminando. Es difícil establecer un estándar en las especificaciones correctas de laminación, debido a la infinidad de variables que tienen lugar. El rendimiento de los rodillos varía ampliamente y depende de las condiciones de operación de los molinos.

Cuando se realizan estudios para determinar el rodillo adecuado para operaciones específicas es necesario considerar algunos factores de operación tales como:

- a) Castillo o castillos donde se usan los rodillos.
- b) Diseño de pases del rodillo.
- c) Porcentaje de reducción.
- d) Temperatura de laminación.
- e) Enfriamiento del rodillo.
- f) Temperatura del rodillo.
- g) Rendimiento del rodillo.

- a) Castillo o castillos donde se usan los rodillos.

Un tren de laminación es un conjunto de por lo menos dos molinos que trabajan simultáneamente sobre una misma barra. En la actualidad no existen plantas laminadoras que trabajen con un tren de dos molinos, a excepción de algunos trenes para placa o templadores. Por lo general, actualmente, el mínimo necesario para una producción aceptable son 5 molinos y el máximo, no más de 26. Por ello es lógico deducir que los rodillos para tantos molinos no podrán ser del mismo tipo de material y de igual dureza. Es lógico también, suponer que las condiciones de laminación no son las mismas a lo largo del tren. Si se recuerda que uno de los fenómenos que caracterizan a la laminación es que la longitud de la barra aumenta en cada paso, entonces es fácil suponer también que las velocidades de los rodillos deberán de ir aumentando en cada molino hacia el acabador, para desahogar el incremento de longitud.

b) Diseño de pases en el rodillo.

Para transformar un lingote de acero de varias toneladas de peso se requieren de varias etapas, a su vez cada etapa de laminación esta subdividida en otras etapas las cuales se les conoce con el nombre de "paso".

Se define "paso" a toda ocasión en que la barra sufre una deformación en toda su longitud al pasar entre dos rodillos, adquiriendo con ello una sección transversal distinta y menor a la anterior. Al conjunto de pasos que constituyen una de las etapas de la laminación se le conoce como secuencia de pasos. En una secuencia de pasos para la laminación de planos, todos los pasos son planos, es decir, se efectúan con rodillos lisos y en la etapa de desbaste se realizan una serie de volteos intercalados con los pasos planos, para trabajar los cantos de la sección y mantenerla en las dimensiones requeridas. En cambio, en la laminación de productos no planos, la barra se deforma en pasos constituidos por dos ranuras maquinadas una en cada rodillo, a estas ranuras se les llama calibre y pueden ser de una gran variedad de geometrías. El objeto de estos calibres es ir aproximando la materia prima, en una forma ordenada y eficaz al producto terminado.

La secuencia de pasos para laminar un producto dado debe de ser diseñada tomando en cuenta la materia prima, el producto terminado y todas las características principales del tren como: número de molinos, tamaño de rodillos, velocidades, capacidades de motores, temperatura, etc.

El diseño de cada paso de la forma que sea, implica tener en cuenta varias consideraciones por ejemplo: cantidad de reducción, elongación y ensanchamiento, ángulo de mordida, etc., porque directa o indirectamente influirán en el rendimiento de los rodillos.

El diseño de los pasos de una secuencia se realiza generalmente a partir del paso acabador hacia la materia prima, es decir en sentido contrario al flujo del proceso.



c) Porcentaje de reducción.

El fenómeno de reducción es una característica muy importante en el proceso de laminación, consiste en una disminución del área transversal de la barra en cada paso, esta reducción se realiza por medio de la fuerza aplicada a los rodillos, por lo que se supone que para reducciones mayores se necesitará más carga y cuando se aplican cargas mayores, se requieren rodillos más resistentes.

d) Temperatura de laminación.

La temperatura de proceso es uno de los parámetros principales que se deben de considerar para la asignación de un rodillo de laminación. Considerando un tren de laminación en caliente, es fácil deducir que si la temperatura de la barra en el primer paso es de 1200°C, en el último no podrá ser igual o mayor, necesariamente tendrá que ser mucho menor.

Por lo tanto es lógico pensar que los rodillos de desbaste no podrán ser del mismo material que los rodillos acabadores ya que no trabajan bajo las mismas temperaturas de operación (13).

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN



DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

e) Enfriamiento del rodillo.

La laminación es un proceso en el que están involucrados cuerpos en movimiento, como resultado de este movimiento se crean fricciones entre los rodillos y la barra. Estas fricciones significan producción de calor, la velocidad de laminación implica también generación de calor. La reducción produce fricción y a mayor reducción mayor fricción y mayor generación de calor, la elongación es un resultado de la reducción y está acompañada del deslizamiento del material de la barra contra el rodillo, generando a su vez otra cantidad de calor, igualmente sucede con el ensanchamiento. Así que por lo anterior se puede concluir que el enemigo número uno de los rodillos es la temperatura.

Todas esas temperaturas de que se hablan se desarrollan en una pequeña zona del rodillo a la cual se llamara arco de contacto o área de contacto de los rodillos con la pieza de trabajo. En esta pequeña zona la temperatura de la superficie del rodillo llega a elevarse en forma súbita a valores de hasta 500°C y en ocasiones hasta por arriba de los 1400°C, de manera que la barra queda soldada al rodillo por fusión, estos casos se dan cuando ocurren atorones en los molinos.

Estas temperaturas desde luego bajan la dureza superficial de los rodillos durante el paso de la barra por el arco de contacto, provocando lo que se pudiera llamar un recocido de la superficie. Por esta razón es tan importante el enfriamiento.

Anteriormente se dijo que la temperatura es el mayor enemigo de la vida de trabajo de los rodillos durante la laminación, sea esta caliente o fría, por razón de ser inherente al proceso, es decir, no se puede evitar y la única forma de minimizar sus efectos es con el enfriamiento. Desde que se demostró que el enfriamiento afecta positiva y grandemente la vida de trabajo de los rodillos, es natural que se hayan efectuado muchas investigaciones para encontrar la mejor forma de aplicar ese enfriamiento y extender al máximo la vida del rodillo.

El enfriamiento de los rodillos consiste en aplicar un refrigerante en todo el cuerpo del rodillo, el cual está distribuido en tres secciones compuestas por rociadores. Estas secciones deberán de formar un arreglo asimétrico. La separación de los rociadores en cada sección se recomienda que varíe entre 5 y 8 cm (2 y 3 pulgadas) para obtener máxima eficacia.

#### f) Temperatura del rodillo.

Las investigaciones más aceptables para disminuir los efectos de la temperatura son aquellas que se basan en las lecturas tomadas de la temperatura al momento que está pasando por el arco de contacto. Se comprende que es muy difícil hacer mediciones y comprobaciones de las condiciones, causas y efectos de lo que sucede en el arco de contacto cuando pasa la pieza de trabajo. Algunas de estas causas y efectos son imposibles de cuantificar y deben de ser estimadas.

La investigación que mejor describe el comportamiento de la temperatura en el arco de contacto, es la mostrada en la figura 6, que considera la primer revolución de trabajo de un par de rodillos laminando una pieza en caliente. El pequeño aumento de temperatura del punto 1 al punto 2, se debe al calor radiado por la barra al acercarse a los rodillos, el rápido aumento de temperatura del punto 2 al punto 3, ocurre cuando la pieza de trabajo entra en contacto con los rodillos, del punto 3 al punto 4, la pieza abandona el entrehierro de los rodillos y la temperatura de la superficie del rodillo decrece debido al calor conducido hacia las capas inmediatas debajo de la superficie elevando la temperatura de éstas. En el punto 4, la superficie caliente del rodillo se encuentra con el agua de enfriamiento que escurre hacia abajo, el agua hierve y en ese momento se tiene una violenta fluctuación de temperatura, después de este punto la temperatura desciende hasta alcanzar un mínimo debajo de la posición de los cabezales de enfriamiento en el punto 5. Después del punto 5 la temperatura de la superficie se incrementa ligeramente debido a la conducción de calor desde las capas debajo de la superficie, las cuales se encontraban a mayor temperatura.

El resultado de estas variaciones cíclicas de temperatura aplicadas repentinamente a la superficie es precisamente lo que se llama fatiga térmica, la cual produce el deterioro en la superficie del rodillo y, eventualmente, su ruptura.

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

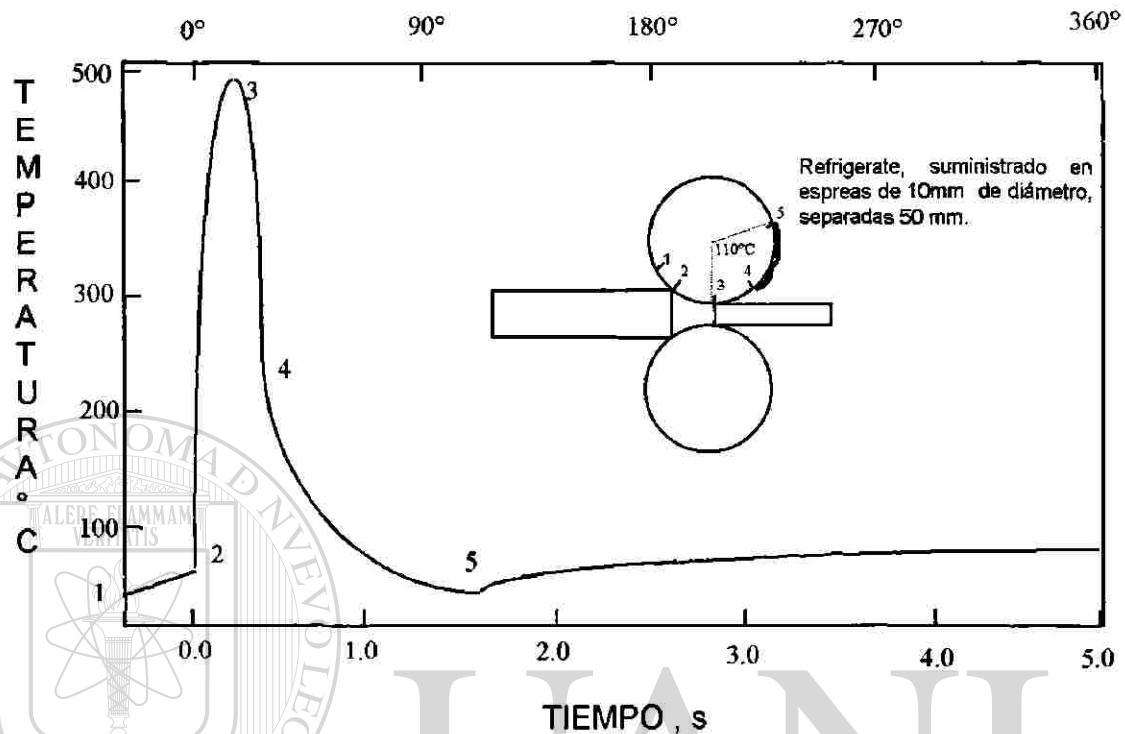


Figura 6. Condiciones de temperatura en la superficie del rodillo.  
(Según; William L. Roberts; Flat Processing of Steel; Marcel Dekker) (5).

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

g) Rendimiento del rodillo.

En la laminación hay varios términos para describir el rendimiento de un rodillo, comúnmente se le conoce como la vida de un rodillo. Algunos laminadores aumentan el diámetro de sus rodillos para sacarles un poco más de vida, esto hace suponer que definen la vida del rodillo como la diferencia entre la medida del diámetro original y la medida del de desecho.

Cualquier termino que se utilice para describir el rendimiento de un rodillo implica desgaste en el material del rodillo. Las causas para que el rodillo se desgaste son múltiples y pueden atribuirse a la inestabilidad en las condiciones de laminación, como pueden ser variaciones en la temperatura de la pieza, variaciones en las reducciones, entrada de la pieza fuera de centro, enfriamiento ineficiente, paros, etc.(5).

### **3.4. - INSPECCIÓN Y PRUEBAS APLICADAS A RODILLOS DE LAMINACIÓN.**

Los ensayos o pruebas se utilizan para asegurar la producción de productos más confiables, seguros y económicos. Aumentar la confiabilidad mejora la imagen pública del fabricante, que conduce a mayores ventas y ganancias. Además de lo anterior, los fabricantes recurren a estas pruebas para mejorar y controlar los procesos de fabricación.

El uso de ensayos ha tenido mucho auge después de la segunda guerra mundial, las pruebas mecánicas y los ensayos no destructivos no eran muy imperiosos, debido a los grandes factores de seguridad introducidos en casi todos los productos que se fabricaban. En efecto, ocurrían fallas de los materiales estando en servicio, pero el papel de las imperfecciones de los materiales en tales fallas no estaban entonces totalmente reconocido; por tanto, poco esfuerzo concentrado se hacía para encontrar las causas de la falla. Durante e inmediatamente después de la segunda guerra mundial, la significancia de las imperfecciones en la vida útil de un producto adquirió mayor importancia. En el diseño de aviones, en la tecnología nuclear, en la exploración espacial y en la industria acerera, los altos riesgos y costos han impuesto que sea esencial una máxima confiabilidad. Al mismo tiempo, ha habido un desarrollo extensivo de todos los ensayos y métodos de inspección, tanto en trabajos industriales como científicos.

Para evaluar la calidad de los rodillos de laminación o prevenir posibles fallas, se realizan varias pruebas e inspecciones durante el proceso de fabricación, existe una amplia variedad de ensayos que garantizan la confiabilidad de los productos vaciados, entre los ensayos más comunes se pueden mencionar: análisis químico, metalografía, dureza, tensión, compresión, impacto, fatiga. Estas pruebas son estandarizadas y requieren de una probeta para su análisis. Existen sin embargo los ensayos o pruebas no destructivas, las cuales aunque no dan una medición directa de las propiedades mecánicas, son muy valiosas para localizar defectos en los materiales que podrían afectar el funcionamiento de una pieza cuando entra en servicio. Los ensayos o pruebas no destructivas que se aplican en la producción de rodillos son : inspección por partículas magnéticas, inspección por penetración fluorescente, inspección ultrasónica (7).

$$E=hc/\lambda \quad (\text{ecuación 1})$$

Donde:

E= Energía

h= Constante de Planck =  $6.626 \times 10^{-34}$  J seg.

C= Velocidad de la luz=  $2.998 \times 10^8$  m/seg.

$\lambda$ = Longitud de onda en centímetros

Si se expresa esta relación en términos sencillos de electronvoltios, se tiene:

$$E= \frac{1.24 \times 10^{-4}}{\lambda} \text{ eV} \quad (\text{ecuación 2})$$

Esta interrelación entre la energía y la longitud de onda es importante para lograr entender la emisión como la absorción de la luz. Estamos familiarizados con la emisión de luz amarilla cuando se somete la sal a la acción del fuego. El motivo por el cual ocurre este fenómeno es debido a que los electrones en el átomo pueden ocupar diferentes niveles de energía. Con esta analogía se puede también considerar el problema asociado de la emisión de longitudes de onda más cortas (rayos X) cuando un electrón cae a un nivel aún inferior. Si se bombardean átomos de sodio (iones) con electrones con la suficiente energía, se puede desalojar un electrón de la primera capa (k). Esto deja un hueco en el cual puede caer un electrón de la capa L, por ejemplo, la transición  $2p \rightarrow 1s$  da un fotón de longitud de onda de 11.91 Å o sea una longitud de onda de rayos X. Así como el color de la luz visible emitida por un salto determinado depende de los niveles particulares involucrados, así también la longitud de la onda de un rayo X depende del caso específico. El haz de electrones se barre a través de una microestructura dada. De cada región diminuta de la estructura se producen rayos X con longitudes de onda que dependen de los elementos que se hallan presentes. Por ejemplo, si se quiere tener una indicación de la cantidad de silicio que se encuentra en una región dada, se pone un filtro

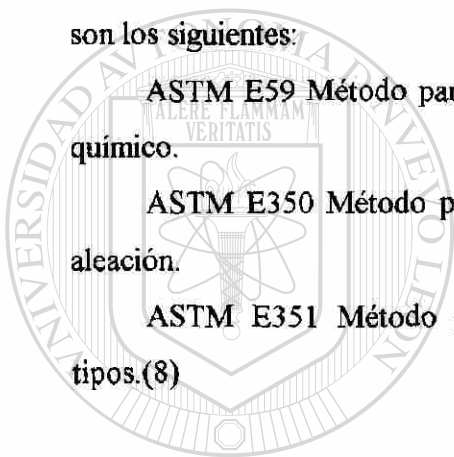
que sólo permita pasar los rayos de silicio de esta región. Luego se irradia la pantalla que muestra esta microestructura con estos rayos X mostrando puntos luminosos sólo en aquellas regiones en las cuales hay alta concentración de silicio. De manera semejante, las regiones con una alta concentración de aluminio permitiendo sólo el paso de los rayos X que son característicos del aluminio, se capturan en otra imagen (8).

Hoy en día existen aparatos en laboratorios que utilizan éstos principios desarrollados por el comité ASTM para realizar análisis químicos relacionados con la producción de rodillos. Los estándares que aplican en el análisis químico de los metales son los siguientes:

ASTM E59 Método para la prueba de hierros y aceros, determinación de análisis químico.

ASTM E350 Método para el análisis químico de aceros al carbón y aceros baja aleación.

ASTM E351 Método para el análisis químico de hierros fundidos. Todo los tipos.(8)



UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN



DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

**METALOGRAFIA.-** La metalografía estudia las características microestructurales de un metal o de una aleación. Sin duda, el microscopio es la herramienta más importante del metalurgista tanto desde el punto de vista científico como desde el técnico. Es posible determinar el tamaño de grano y el tamaño, forma y distribución de varias fases e inclusiones que tienen gran efecto sobre las propiedades mecánicas del metal. La microestructura revelará el tratamiento mecánico y térmico del metal y, bajo un conjunto de condiciones dadas, podrá predecirse su comportamiento esperado.

La experiencia ha demostrado que el éxito en el estudio microscópico depende en mucho del cuidado que se tenga para preparar la muestra. El microscopio más costoso no revelará la estructura de una muestra que haya sido preparada en forma deficiente. El procedimiento que se sigue en la preparación de una muestra es comparativamente sencillo y requiere de una técnica desarrollada sólo después de práctica constante. El último objetivo es obtener una superficie plana, sin rayaduras, semejantes a un espejo.

La selección de una muestra para estudio microscópico puede ser muy importante. Si lo que se va a investigar es una falla, se debe escoger la muestra más próxima al área de la falla y comparársele con una tomada de la sección normal o sana.

Si el material es suave, como metales o aleaciones no ferrosas y aceros no tratados térmicamente, la sección puede obtenerse por corte manual con una segueta. Si el material es duro, la sección puede obtenerse mediante un disco cortador abrasivo, el cual es un plato delgado fabricado de un abrasivo de tipo adecuado, que gira a alta velocidad. La muestra debe mantenerse fría durante la operación de corte.

Siempre que sea posible, la muestra debe ser de un tamaño fácil de manipular. Las muestras pueden esmerilarse burdamente sobre una lija de banda (rotatoria), manteniendo la muestra fría sumergiéndola frecuentemente en agua durante la operación de esmerilado. En todas las operaciones de esmerilado y pulido, la muestra debe moverse en sentido perpendicular a las rayaduras existentes.



Esto facilitará darse cuenta del momento en que las rayaduras más profundas hayan sido sustituidas por las menos profundas, características del abrasivo más fino. El esmerilado continúa hasta que la superficie quede plana y libre de mellas, rebabas, etc., y todas las rayaduras debidas al corte manual o al disco cortador.

Las muestras pequeñas o de forma incómoda deben montarse de alguna manera para facilitar el pulido intermedio y final. Los materiales plásticos sintéticos que se acoplan a la muestra en una prensa para montaje especial proporcionan las bases de un tamaño uniforme conveniente (generalmente de 2.5, 3, ó 4 cm de diámetro) para manipular las muestras en ulteriores operaciones de pulido. Estas bases, cuando se han hecho en forma adecuada, son muy resistentes a la acción de los reactivos de ataque que se emplean comúnmente. La resina termofijadora que más se emplea para montar muestras es la baquelita. Los polvos para moldear baquelita se fabrican en colores de este material, lo cual simplifica la identificación de las muestras montadas. La muestra y la cantidad correcta de polvo de baquelita, o una preforma de baquelita, se colocan en el cilindro de la prensa de montar. La temperatura aumenta gradualmente hasta 150°C y se aplica una presión de moldeo de unas 25579.028 KPa (4000 Lbs/pulg<sup>2</sup>) simultáneamente. Una vez que la baquelita está adherida y curada cuando se alcanza esta temperatura, la base con la muestra puede extraerse del dado de moldeo mientras está caliente.

La lucita es la resina termoplástica más común; es completamente transparente cuando se moldea en forma adecuada. Esta transparencia resulta útil cuando es necesario observar la sección exacta que se pule o cuando por cualquier otra razón se desea ver por completo la muestra en la base. Al contrario de los plásticos termofijados, las resinas termoplásticas no sufren cura a la temperatura de moldeo, sino que adquieren estabilidad al enfriarse. La muestra y la cantidad de polvo de lucita adecuadas se colocan en la prensa para montar y se someten a la misma temperatura y presión que para la baquelita (150 °C y 27579.028 KPa ). Una vez alcanzada esta temperatura, se quita la bobina de calentamiento y las aletas de enfriamiento se colocan alrededor del cilindro para enfriar la base hasta 75°C en unos 7 min. al tiempo que se mantienen la presión de moldeo.

Si se saca la base todavía caliente o si se deja enfriar lentamente en el cilindro de moldeo a la temperatura ambiente sin sacarla, se opacará. Después de montada, la muestra se pule sobre una serie de hojas de esmeril o lija con abrasivos más finos, sucesivamente. El primer papel es generalmente No. 1, luego 1/0, 2/0, 3/0 y finalmente 4/0.

Por lo general, las operaciones de pulido intermedio con lijas de esmeril se hacen en seco; sin embargo, en ciertos casos, como el de preparación de materiales suaves se puede usar un abrasivo de carburo de silicio. Comparado con el papel esmeril, el carburo de silicio tiene mayor rapidez de remoción y, como su acabado es a base de resina, se puede utilizar con un lubricante, el cual impide el sobrecalentamiento de la muestra, minimiza el daño cuando los metales son blandos y también proporciona una acción de enjuague para limpiar los productos removidos de la superficie de la muestra, de modo que el papel no se ensucie.

El tiempo utilizado y el éxito del pulido fino dependen en mucho del cuidado puesto durante los pasos de pulido previo. La última aproximación a una superficie plana libre de rayaduras se obtiene mediante una rueda giratoria húmeda cubierta con un paño especial cargado con partículas abrasivas cuidadosamente seleccionadas en su tamaño.

Existe gran disponibilidad de abrasivos para efectuar el último pulido. En tanto que muchos harán un trabajo satisfactorio, parece haber preferencia por la forma gamma del óxido de aluminio para pulir materiales ferrosos y de los basados en cobre, y óxido de cerio para pulir aluminio, magnesio y sus aleaciones. Otros abrasivos para pulido final que se emplean a menudo son la pasta de diamante, óxido de cromo y óxido de magnesio.

La selección de un paño para pulir depende del material que vaya a pulirse y el propósito del estudio metalográfico. Se pueden encontrar paños de lanilla o pelillo variable, desde aquellos que no tienen pelillo (como la seda) hasta aquellos de pelillo intermedio (como paño ancho, paño de billar y lonilla) además de aquellos de pelillo profundo (como el terciopelo). También se pueden encontrar paños sintéticos para pulir con fines de pulido general, de los cuales el Gamal y el Micropaño son los que se utilizan más ampliamente. Una muestra pulida en forma adecuada mostrará únicamente las inclusiones no metálicas; además, estará libre de rayaduras.

El propósito del ataque químico es hacer visibles las características estructurales del metal o aleación. El proceso debe ser tal que queden claramente diferenciadas las partes de la microestructura. Esto se logra mediante un reactivo apropiado que somete a la superficie pulida a una acción química.

En las aleaciones compuestas de dos o más fases, los componentes se revelan durante la acción química, al atacar preferencialmente, el reactivo a una o más de estas constituyentes debido a la diferencia en composición química de las fases. En las aleaciones uniformes de una sola fase o metales puros, se obtiene contraste y las fronteras de grano se hacen visibles debido a las diferencias en la rapidez a que los diversos granos son atacados por el reactivo. Esta diferencia en la rapidez de ataque está asociada principalmente con el ángulo que guardan las diferentes secciones de grano con el plano de la superficie pulida. Debido al ataque químico por el reactivo de ataque, las fronteras de grano aparecerán como valles en la superficie pulida. Al chocar con la orilla de estos valles, la luz del microscopio se reflejará fuera del microscopio, haciendo que las fronteras de grano aparezcan como líneas oscuras. La selección del reactivo de ataque está determinada por el metal o aleación y la estructura específica que se desea ver (7).

---

En el curso de los años el comité ASTM ha estandarizado métodos de modo que puedan compararse los resultados obtenidos por diferentes laboratorios en la preparación, pulido, ataque y evaluación de microestructuras, los estándares que aplican en la producción de rodillos son las siguientes:

ASTM E3 Método de preparación de probetas metalográficas.

ASTM E112 Método de prueba para determinar tamaño de grano promedio.

ASTM A247 Evaluación de microestructuras, grafito en hierro fundido (2).

**DUREZA.**- Es difícil definir la propiedad de "dureza", excepto en relación con la prueba empleada en particular para determinar su valor. Debe tenerse en cuenta que un número o valor de dureza no puede utilizarse directamente en trabajos de diseño, como se puede hacer con un valor de resistencia a la tensión, ya que los números de dureza no tienen significado intrínseco.

La dureza no es una propiedad fundamental de un material, sino que está relacionada con las propiedades elásticas y plásticas. El valor de dureza obtenido en una prueba determinada sirve sólo como comparación entre materiales o tratamientos. El procedimiento de prueba y la preparación de la muestra suelen ser sencillos y los resultados pueden utilizarse para estimar otras propiedades mecánicas. La prueba de dureza se utiliza ampliamente para inspección y control. El tratamiento térmico o el trabajo efectuado en una pieza metálica resulta generalmente en un cambio de dureza. Cuando se establece el valor resultante de la dureza de un tratamiento térmico a un material dado por el proceso determinado, esa estimación proporcionará un método rápido y sencillo (de inspección y control) para el material y proceso particulares. Las diversas pruebas de dureza se pueden dividir en tres categorías.

---

#### Dureza elástica.

Resistencia al corte o abrasión

Resistencia a la indentación.

### DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

**DUREZA ELÁSTICA.** Este tipo de dureza se mide mediante un escleroscopio, que es un dispositivo para medir la altura de rebote de un pequeño martillo con emboquillado de diamante, después de que cae por su propio peso desde una altura definida sobre la superficie de la pieza a prueba. El instrumento tiene por lo general un disco autoindicador tal que la altura de rebote se indica automáticamente. Cuando el martillo es elevado a su posición inicial, tiene cierta cantidad de energía potencial. Cuando es liberada, esta energía se convierte en energía cinética hasta que golpea la superficie de la pieza a prueba. Alguna energía se absorbe al formar la impresión, y el resto regresa al martillo al rebotar éste. La altura de rebote se indica por un número

sobre una escala arbitraria tal que cuanto mayor sea el rebote, mayor será el número y la pieza a prueba será más dura. Esta prueba es realmente una medida de la resiliencia del material, o sea, la energía que puede absorber en el intervalo elástico.

**RESISTENCIA A LA INDENTACION.** Esta prueba generalmente es realizada imprimiendo en la muestra, lo que está en reposo sobre una plataforma rígida, un marcador o indentador de geometría determinada, bajo una carga estática conocida que se aplique directamente o por medio de un sistema de palanca. Dependiendo del sistema de prueba, la dureza se expresa por un número inversamente proporcional a la profundidad de la indentación para una carga y marcador especificados, o proporcional a una carga media sobre el área de mella. Los métodos comunes para pruebas de dureza por indentación se describen enseguida.

**PRUEBA O ENSAYO DE DUREZA BRINELL.** El probador de dureza Brinell generalmente consta de una prensa hidráulica vertical de operación manual, diseñada para forzar un marcador de bola dentro de la muestra.

El procedimiento estándar requiere que la prueba se haga con una bola de 10 mm de diámetro bajo una carga de 3000 kg, para metales ferrosos a 500 kg. La bola bajo presión es presionada dentro de la muestra a prueba por lo menos durante 10 seg. El microscopio que contiene una escala ocular, generalmente graduada en décimos de milímetro, que permite estimaciones de hasta casi 0.05 mm.

El número de dureza Brinell (HB) es la razón de la carga en kilogramos al área en milímetros cuadrados de la impresión, y se calcula mediante la fórmula:

$$HB = \frac{L}{(\pi D/2)(D - (D^2 - d^2)^{1/2})} \quad (\text{ecuación 3})$$

Donde:

L= Carga de prueba, kg.

D= Diámetro de la bola, mm

d= Diámetro de la presión, mm.

Por lo general no se necesita hacer el cálculo, ya que hay tablas para convertir el diámetro de lo observado al número de dureza Brinell. El número de dureza Brinell seguido por el símbolo HB sin número sufijos indica condiciones de prueba estándar usando una bola de 10 mm de diámetro y una carga de 3000 kg, aplicada de 10 a 15 seg. Para otras condiciones, el número de dureza y el símbolo HB se complementan por números que indican las condiciones de prueba en el siguiente orden. Diámetro de la bola, carga y duración de la carga, por ejemplo, 75 HB 10/500/30 indica una dureza Brinell de 75 medida con una bola de 10 mm de diámetro y una carga de 500 kg aplicada por 30 seg.

El número de dureza Brinell cuando se usa la bola ordinaria está limitado a 500 HB aproximadamente. Conforme el material a prueba sea más duro hay tendencia a que el propio marcador se empiece a deformar y las lecturas no serán exactas. El límite superior de la escala puede aumentarse al usar una bola de carburo de tungsteno en vez de la bola de acero endurecido. En ese caso, es posible llegar a 650 HB aproximadamente.

---

**PRUEBA O ENSAYO DE DUREZA ROCKWELL.** En esta prueba de dureza se utiliza un instrumento de lectura directa basada en el principio de medición de profundidad diferencial. La prueba se lleva acabo al elevar la muestra lentamente contra el marcador hasta que se ha aplicado una carga determinada menor. Esto se indica en el disco medidor. Luego se aplica la carga mayor a través de un sistema de palanca de carga. Después de que la aguja del disco llega al reposo, se quita la carga mayor y con la carga menor todavía en acción, el número de dureza Rockwell es leído en el disco medidor. Como el orden de los números se invierte en el disco medidor, una impresión poco profunda en un material blando dará un número pequeño.

Hay dos máquinas Rockwell. El probador normal para secciones relativamente gruesas y el probador superficial para secciones delgadas. La carga menor es de 10 kg en el probador normal y de 3 kg en el probador superficial.

Pueden utilizarse diversos marcadores de muescas y cargas y cada combinación determina una escala Rockwell específica. Los marcadores de muescas incluyen bolas de acero duras de 1/16, 1/8, 1/4 y 1/2 de pulgada de diámetro y un penetrador cónico de diamante de 120°.

Las cargas mayores son de 60, 100 y 150 kg en el probador normal y de 15, 30 y 45 kg en el probador superficial.

Las escalas Rockwell empleadas más comúnmente son la B (marcador de bola de 1/16 de pulgada y 100 kg de carga) y la C (marcador de diamante y 150 kg de carga), ambas obtenidas con el probador normal. Debido a las muchas escalas Rockwell, el número de dureza debe especificarse mediante el símbolo HR seguido de la letra que designa la escala y precedido de los números de dureza, por ejemplo, 82 HRB significa una dureza de Rockwell de 82 medida en la escala B (bola de 1/16 de pulgada y 100 kg de carga).

El funcionamiento de la máquina debe ser verificado frecuentemente con bloques de prueba estándar proporcionados por el fabricante. La manija para quitar la carga mayor puede producir un error de varios puntos en el disco de indicación. Se debe tener cuidado de asentar firmemente el yunque y el marcador. Cualquier movimiento vertical en estos puntos resulta en un registro de una profundidad adicional en el medidor y, por tanto, en una lectura de dureza falsa.

## DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

**PRUEBA O ENSAYO DE DUREZA VICKERS.** En esta prueba, el instrumento utiliza un marcador piramidal de diamante de base cuadrada con un ángulo incluido de 136° entre las caras opuestas.

El intervalo de carga está generalmente entre 1y 120 kg. El probador de dureza Vickers funciona bajo el mismo principio que el probador Brinell, y los números se expresan en términos de carga y área de la impresión. Como resultado de la forma del marcador, la impresión sobre la superficie de la muestra será un cuadrado. La longitud de la diagonal del cuadrado es medida por medio de un microscopio equipado con un

micrómetro ocular que contiene fillos móviles. La distancia entre los fillos se indica en un contador calibrado en milésimas de milímetro. Por lo general, hay tablas para convertir la diagonal medida al número de dureza piramidal Vickers (HV) o por medio de la fórmula:

$$HV = \frac{1.854 L}{d^2} \quad (\text{ecuación 4})$$

Donde.

L = Carga aplicada, en kg

d = Longitud de la diagonal del cuadrado de la impresión, en mm.

Como resultado de la latitud en las cargas aplicadas, el probador Vickers es útil para medir la dureza de hojas muy delgadas, así como secciones pesadas.

**PRUEBA O ENSAYO DE MICRODUREZA (KNOOP).** Desafortunadamente, este término es engañoso ya que podría referirse a la prueba de pequeños valores de dureza cuando en realidad significa el uso de impresiones pequeñas. Las cargas de prueba están entre 1 y 1000 g. Hay dos tipos de marcadores empleados para la prueba de microdureza, la pirámide de diamante Vickers de base cuadrada de  $136^\circ$ , descrita anteriormente y el marcador Knoop de diamante alargado.

El marcador Knoop tiene forma piramidal que produce una impresión en forma de diamante, y tiene diagonales largas y cortas a una razón aproximada de 7:1. La forma piramidal empleada tiene incluidos ángulos longitudinales de  $172^\circ30'$  y ángulos transversales de  $130^\circ$ . La profundidad de impresión es como de 1/30 de su longitud. Como en la prueba Vickers, la diagonal más larga de la impresión es medida ópticamente con el ocular de un micrómetro de rosca. El número de dureza Knoop es el resultado de dividir la carga entre el área de la impresión. Por lo general se utilizan tablas para convertir la longitud diagonal media al número de dureza Knoop (HK), o mediante la fórmula siguiente: (7).



$$HK = \frac{14.229 L}{d^2} \quad \text{(ecuación 5)}$$

Donde:

L= Carga aplicada, en kg

d = Longitud de la diagonal mayor, en mm.

En el curso de los años el comité ASTM ha estandarizado métodos de modo que puedan compararse los resultados obtenidos por diferentes laboratorios en las pruebas de durezas aplicados en los materiales metálicos, de los cuales se pueden nombrar los siguientes:

E10 Dureza Brinell aplicado a materiales metálicos.

E18 Dureza Rockwell y dureza Rockwell superficial de materiales metálicos.

E92 Dureza Vickers de materiales metálicos.

E140 Tabla de conversión de durezas para metales.

E384 Microdurezas de materiales.

E448 Ensayo de dureza en escleroscopio para materiales metálicos (1).

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

**TENSIÓN.**- Después de la prueba de dureza, la prueba de tensión es la realizada más frecuentemente para determinar ciertas propiedades mecánicas. Una muestra o probeta preparada específicamente se coloca en las cabezas de la máquina de prueba y se somete a una carga axial por medio de un sistema de carga de palanca, mecánico o hidráulico. La fuerza se indica en un disco calibrado. Si se conoce el área transversal original de la muestra, puede calcularse el esfuerzo desarrollado a cualquier carga. La deformación o alargamiento se mide en una longitud establecida, generalmente 50 mm (2 pulgadas), por un disco medidor llamado extensómetro. Entonces, la deformación unitaria puede determinarse dividiendo el alargamiento medido entre la longitud original marcada en la probeta. En algunos casos, puede utilizarse un medidor electrónico para medir la deformación total. La gráfica esfuerzo-deformación muestra la relación entre esfuerzo unitario  $s$  y deformación unitaria  $\epsilon$ , encontrada experimentalmente. Las propiedades que se pueden determinar con una prueba de tensión se explican en seguida:

**LIMITE PROPORCIONAL.** Para muchos materiales estructurales se ha encontrado que la parte inicial de la gráfica esfuerzo-deformación puede ser aproximada por una recta, en este intervalo, el esfuerzo y la deformación son proporcionales entre sí, de manera que cualquier incremento en esfuerzo resultará de un aumento proporcional a la deformación. El esfuerzo en el límite del punto de proporcionalidad, se conoce precisamente como límite de proporcionalidad.

**LIMITE ELÁSTICO.** Si se retira una pequeña parte de la carga aplicada sobre la pieza a prueba, la aguja del extensómetro regresará a cero, indicando que la deformación producida por la carga es elástica. Si la carga se aumenta continuamente, se libera después de cada incremento y se revisa el extensómetro, entonces se alcanzará un punto en que la aguja no regresará a cero. Esto indica que ahora el material tiene una deformación permanente; por tanto, el límite elástico puede definirse como el esfuerzo mínimo al que ocurre la primera deformación permanente. Para la mayoría de los materiales estructurales, el límite elástico tiene casi el mismo valor numérico que el límite de proporcionalidad.

**PUNTO DE CEDENCIA O FLUENCIA.** Conforme la carga en la pieza a prueba aumenta más allá del límite elástico, se alcanza un esfuerzo al cual el material continúa deformándose sin que haya incremento de la carga. Este fenómeno ocurre sólo en ciertos tipos de aceros. El esfuerzo puede disminuir realmente por un momento, resultando en un punto de cedencia superior y en uno inferior. Como el punto de cedencia es relativamente fácil de determinar y la deformación permanente es pequeña hasta el punto de cedencia, constituye un valor muy importante de considerar en el diseño de muchas partes para maquinaria cuya utilidad se afectaría si ocurriera una gran deformación permanente. Esto es válido sólo para materiales que exhiban un punto de cedencia bien definido.

**RESISTENCIA DE CEDENCIA O FLUENCIA.** La mayoría de los materiales no ferrosos y los aceros de alta resistencia no tienen un punto de cedencia definido. Para estos materiales, la máxima resistencia útil corresponde a la resistencia de cedencia, que es el esfuerzo al cual un material exhibe una desviación limitante especificada de la proporcionalidad entre el esfuerzo y la deformación. Por lo general, este valor se determina por el método de la deformación permanente especificada, el cual consiste en trazar una línea paralela a la recta de proporcionalidad, el punto de intersección con el diagrama esfuerzo deformación indicará el punto de fluencia. El valor de la deformación permanente especificada está generalmente entre 0.10 y 0.20% de la longitud calibrada.

## DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

**RESISTENCIA LIMITE.** Conforme aumenta la carga aplicada sobre la pieza a prueba, el esfuerzo y la deformación se incrementaran hasta que se alcance carga máxima, la cual corresponde al punto más alto de la gráfica esfuerzo-deformación.

**RESISTENCIA A LA RUPTURA.** Es el punto en el cual el material falla debido a una disminución de área en la probeta, este punto está por debajo de la resistencia limite si se sigue considerando que el área permanece constante, si se gráfica el área real el punto de resistencia a la ruptura se encontrara por arriba de la resistencia limite.

**DUCTILIDAD.** La ductilidad de un material se determinará a partir de la cantidad de deformación que le es posible soportar hasta que se fractura. Esta se determina en una prueba de tensión mediante dos mediciones:

**ELONGACIÓN.** Se determina juntando, después de la fractura, las partes de la muestra y midiendo la distancia entre las marcas puestas en la muestra antes de la prueba.

$$\text{Elongación (por ciento)} = \frac{L_f - L_o}{L_o} \times 100 \quad (\text{ecuación 6})$$

Donde :

$L_f$  = Longitud de la medida final.

$L_o$  = Longitud de la medida original, generalmente 2 pulg.

Al reportar el porcentaje de elongación, debe especificarse la longitud de la medida original, ya que el porcentaje de elongación variará de acuerdo con la longitud original.

**REDUCCIÓN EN ÁREA.** Esta también se determina a partir de las mitades rotas de la muestra bajo la tensión, midiendo para ello el área transversal mínima y con la fórmula:

$$\text{Reducción en área (porcentaje)} = \frac{A_o - A_f}{A_o} \times 100 \quad (\text{ecuación 7})$$

Donde

$A_o$  = Área transversal original.

$A_f$  = Área transversal final.

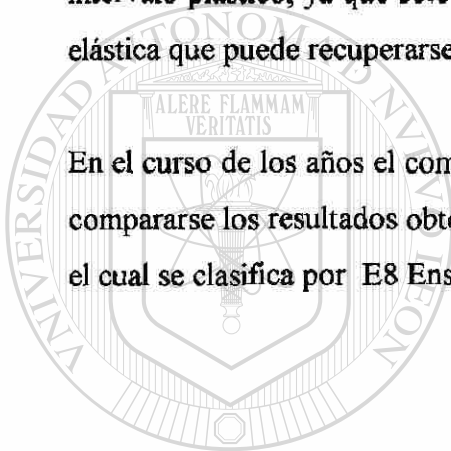
**MODULO DE ELASTICIDAD O MODULO DE YOUNG.** Considérese la porción recta de la curva esfuerzo-deformación. La ecuación de una línea recta es  $y=mx+b$ , donde "y" es el eje vertical (en este caso, esfuerzo) y "x" el eje horizontal (en este caso, deformación). La intersección de la recta con el eje "y" es "b", y en este caso es cero, ya que la recta pasa por el origen. La pendiente de la recta es "m". Cuando se despeja "m" de la ecuación, la dependiente es igual a  $y / x$ . De esta manera, se puede determinar la pendiente de la recta dibujando un triángulo rectángulo cualquiera y encontrando la tangente del ángulo  $\theta$ , que es igual a  $y/x$  o esfuerzo/deformación. La pendiente es realmente la constante de proporcionalidad entre esfuerzo y deformación cuando se está abajo del límite de proporcionalidad y se conoce como módulo de elasticidad o módulo de Young.

El módulo de elasticidad, indicación de la rigidez de un material, se mide en unidades de fuerza por unidades de área. El módulo de elasticidad es una propiedad muy útil de la Ingeniería.

**ESFUERZO DEFORMACIÓN VERDADERO.** La prueba convencional de tensión descrita antes dará valiosa información hasta aproximarse y llegar al punto de cedencia. Más allá de este punto, los valores de esfuerzo son ficticios, ya que el área transversal real se reducirá considerablemente. El esfuerzo verdadero se determina al dividir la carga entre el área transversal existente a esa intensidad de carga. La deformación real se determina al dividir el cambio en longitud entre la longitud inmediatamente precedente. El diagrama esfuerzo-deformación real da información útil concerniente al flujo plástico y la fractura de metales.

**RECUPERACIÓN (RESILENCIA) Y DUREZA.** Es posible dividir el diagrama esfuerzo-deformación en dos partes, la parte a la izquierda del límite elástico puede definirse como intervalo elástico y la de la derecha como intervalo plástico. El área bajo la curva en el intervalo elástico es una medida de la energía por unidad de volumen que puede absorber el material sin sufrir deformación permanente. Este valor se conoce como módulo de recuperación o resiliencia. La energía por unidad de volumen que puede absorber un material (el área bajo la totalidad del diagrama esfuerzo-deformación) hasta el punto de fractura se conoce como tenacidad. Esta es principalmente una propiedad del intervalo plástico, ya que sólo una pequeña parte de la energía total absorbida es energía elástica que puede recuperarse cuando se suprime el esfuerzo (7).

En el curso de los años el comité ASTM ha estandarizado métodos de modo que puedan compararse los resultados obtenidos por diferentes laboratorios en los ensayos de tensión, el cual se clasifica por E8 Ensayo de tensión en materiales metálicos (1).



UANL

---

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN



DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

**COMPRESIÓN.**- Teóricamente el ensayo de compresión es meramente lo contrario al ensayo de tensión, con respecto a la dirección o el sentido del esfuerzo aplicado. Las razones generales para la elección de uno u otro tipo de ensayo dependerán de los resultados esperados. Asimismo, los principios generales para el ensayo de tensión son los mismos para el de compresión. Existen, sin embargo, varias limitaciones especiales del ensayo de compresión a las cuales se debe de dirigir la atención.

1. - La dificultad de aplicar una carga verdaderamente concéntrica o axial.
2. - El carácter relativamente inestable de este tipo de carga en contraste con la carga tensil. Existe siempre una tendencia al establecimiento de esfuerzos flexionantes y a que el efecto de las irregularidades de alineación accidentales dentro de la probeta se acentúa a medida que la carga prosigue.
3. - La fricción entre los puentes de la maquina de ensayo o las placas de apoyo y la superficie de los extremos de la probeta debido a la expansión lateral de esta. Esto puede alterar considerablemente los resultados que se obtendrían si tal condición de ensayo no estuviera presente.
4. - Las áreas seccionales, relativamente mayores de la probeta para ensayo de compresión para obtener un grado apropiado de estabilidad de la pieza. Esto se traduce en la necesidad de una máquina de ensayo de capacidad relativamente grande o probetas tan pequeñas y, por lo tanto, tan cortas que resulta difícil obtener de ellas mediciones de deformación de precisión adecuada.

Para el esfuerzo uniforme de las probetas de compresión, una sección circular es preferible a otras formas. La selección de la relación entre la longitud y el diámetro de una probeta de compresión parece ser mas o menos un compromiso entre varias condiciones indeseables. A medida que la longitud de las probetas se aumenta, se presenta una tendencia creciente a la flexión de la pieza (pandeo normalmente llamada columna), con la consiguiente distribución no uniforme de esfuerzo sobre una sección recta. Se sugiere una relación entre altura y diámetro de 2 como un limite superior práctico. A medida que la longitud de la probeta disminuye, el efecto de la restricción friccional en los extremos se torna sumamente importante; así mismo, para las longitudes

menores de aproximadamente 1.5 veces el diámetro, los planos diagonales a lo largo de los cuales la falla se verificará en una probeta más larga interceptan la base, con el resultado de que la resistencia aparente se aumenta. Comúnmente se emplea una relación entre longitud y diámetro de 2 ó menor, aunque la relación entre altura y diámetro varíe para materiales diferentes. Para acomodar un compresometro con la precisión deseada, con frecuencia es necesario usar una probeta relativamente larga.

El tamaño real depende del tipo de material, del tipo de mediciones a realizar, y del aparato de ensayo disponible. Para materiales homogéneos para los cuales se requiere solamente la resistencia última, pueden usarse probetas pequeñas. El tamaño de las probetas de materiales heterogéneos debe ajustarse al tamaño de las partículas componentes o agregados.

Los extremos a los cuales se aplica la carga deben de ser planos y perpendiculares al eje de la probeta o, de hecho, convertidos así mediante el uso de cabeceo y dispositivos de montaje. Los tramos de calibración para mediciones de deformación deben preferiblemente ser más cortos que el largo de la probeta o cuando menos el largo de la probeta.

Las probetas para ensayo de compresión de materiales metálicos son recomendados por la ASTM E9. Las probetas cortas son para usarse con metales antifricción, las de longitud mediana para uso general y las de longitud larga para ensayos que determinan el módulo de elasticidad. Los extremos de las probetas de compresión deben de ser planas para no causar concentraciones de esfuerzos y deben de ser perpendiculares al eje de la pieza para no causar flexión debido a la carga excéntrica.

Las superficies de los extremos de las probetas metálicas pueden maquinarse planas y en ángulo recto con el eje. Las placas sencillas de apoyo o remate deben de llevar superficies maquinadas planas y paralelas. El material de la placa de apoyo deberá de ser fuerte y duro en relación con el de la probeta.

Usualmente un extremo de la probeta debe de apoyarse en un bloque o dado esféricamente asentado. El objetivo del bloque es contrarrestar el efecto de una pequeña falta de paralelismo entre el puente de la maquina y la cara extrema de la probeta, confiriendo a la probeta una distribución inicial de la carga tan pareja como sea posible.



Es deseable que el bloque de apoyo esféricamente asentado, este en el extremo superior de la probeta. Para que la resultante de las fuerzas aplicadas al extremo de la probeta no quede excéntrica con respecto a al eje de la probeta, es importante que el centro de la superficie esférica de este bloque permanezca en la cara plana que se apoya en la probeta, y que la probeta misma sea cuidadosamente centrada con respecto al centro de esta superficie esférica debido a la aumentada resistencia a la fricción a medida que la carga crece, el cojinete esféricamente asentado no puede confiarse en que se ajuste así mismo a la acción flexionante que pueda ocurrir durante el ensayo. En algunas condiciones de ensayo, el bloque de apoyo esféricamente asentado puede omitirse mientras que en otras, dos de tales bloques pueden requerirse. El bloque debe de tener un diámetro igual o mayor al de la probeta.

En los ensayos comerciales la única propiedad ordinariamente determinada es la resistencia a la compresión. Para aquellos materiales en los cuales no hay un fenómeno singular que marque la resistencia última, se toman límites de deformación arbitrarios como criterios de resistencia.

En los ensayos para determinar la resistencia a la cedencia de los metales en compresión, los criterios usuales pueden seguirse.

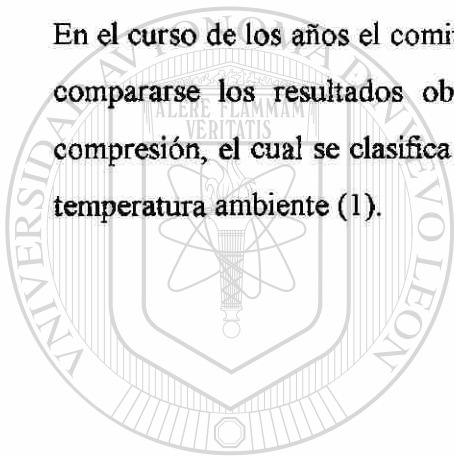
Las dimensiones deben determinarse con una precisión apropiada. Las precisiones recomendadas para mediciones transversal seccionales en la labor ordinaria son las siguientes : metales, hasta el  $25.4\mu\text{m}$  (0.001 plg) mas cercano; en las probetas cilíndricas las mediciones deben de hacerse sobre, cuando menos, dos diámetros mutuamente perpendiculares. Si se requieren pesos unitarios, las probetas deben de medirse ordinariamente con una precisión de aproximadamente 0.5%.

Debe de tenerse mucho cuidado para lograr el centrado y la alineación de la probeta y la de los bloques de apoyo en la maquina de ensayo. Para una labor cuidadosa se debe de realizar un esfuerzo para hacer coincidir los ejes de la probeta y de los bloques de apoyo con un eje que pase por los centros del puente y de la placa de base de las máquinas dentro de  $254\mu\text{m}$  (0.01 plg). Mientras se está bajando el puente de la máquina para establecer contacto con el bloque de apoyo esférico, es deseable hacer girar

lentamente a mano la parte superior del bloque en un plano horizontal para facilitar el asentamiento del bloque.

Al realizar ensayos con metales, los extremos de las probetas y las caras de los bloques de apoyo deben de limpiarse con acetona o cualquier otro solvente adecuado inmediatamente antes del ensayo para quitar la grasa y el aceite que pudieran influir en la restricción friccional de las superficies extremas. Para la máquina de engranes de tornillo, la velocidad de ensayo en compresión es todavía especificada en términos de la velocidad de marcha del puente movable (4).

En el curso de los años el comité ASTM ha estandarizado métodos de modo que puedan compararse los resultados obtenidos por diferentes laboratorios en los ensayos de compresión, el cual se clasifica por E9 Ensayo de compresión de materiales metálicos a temperatura ambiente (1).



# UANL

---

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS



**PRUEBA DE IMPACTO.-** Aunque la tenacidad de un material puede obtenerse calculando el área bajo del diagrama esfuerzo-deformación, la prueba de impacto indicará la tenacidad relativa. Por lo general, para las pruebas de impacto se utilizan muestras con muesca. Dos tipos de probetas se utilizan en las pruebas de impacto: Charpy e Izod.

La probeta Charpy se coloca en un tornillo de banco de manera semejante a una viga sencilla soportada en ambos extremos, en tanto que la muestra Izod se coloca en el tornillo de banco de modo que un extremo quede libre y sea, por tanto, una viga voladora. La máquina de impacto ordinaria tiene un péndulo oscilante de peso fijo, que es elevado a una altura estándar, dependiendo del tipo de muestra que se pretende probar. A una altura determinada, con referencia al tornillo de banco, el péndulo tiene una cantidad definida de energía potencial. Cuando el péndulo se libera, esta energía se convierte en energía cinética hasta que golpea a la muestra. La muestra Charpy se golpeará atrás de la muesca en V, en tanto que la muestra Izod, colocada con la muesca en V de cara al péndulo, se golpeará arriba de la muesca V, en cualquier caso, una parte de la energía del péndulo se utilizará para romper la muestra, provocando que el péndulo se eleve en el lado opuesto de la máquina a una altura menor que aquella con que inició su movimiento desde ese mismo lado de la máquina. El peso del péndulo multiplicado por la diferencia de alturas indicará la energía absorbida por la muestra, o sea la resistencia al impacto de la muestra con muesca.

De la descripción de la prueba, es obvio que la prueba de impacto a la cual se sujetó la barra mellada no da la tenacidad verdadera, sino su comportamiento en función de una muesca en particular: sin embargo, los resultados son útiles para propósitos de comparación. La prueba de la barra mellada se utiliza en la industrias aeronáutica y automotriz, que han encontrado, por experiencia, que la prueba de alta resistencia al impacto generalmente garantizará un servicio satisfactorio de las piezas que pueden experimentar cargas de choque o impacto (7).

En el curso de los años el comité ASTM ha estandarizado métodos de modo que puedan compararse los resultados obtenidos por diferentes laboratorios en el ensayo de impacto, el cual se clasifica por F23 Método estándar para la prueba de impacto en materiales metálicos (1).

**FATIGA.-** Estas son pruebas de tipo dinámico que determinan el comportamiento relativo de los materiales cuando se les somete a cargas repetidas o fluctuantes. Procura simular las condiciones de esfuerzo desarrolladas en las partes de una máquina por la vibración que producen las cargas cíclicas. La magnitud del esfuerzo puede establecerse con la máquina y el tipo de esfuerzo (tensión, compresión, doblamiento, o torsión) lo determinan la máquina y el tipo de muestra probada.

El esfuerzo al que se somete la muestra durante la prueba varía continuamente entre dos valores, de los cuales el máximo suele ser menor que el de la resistencia de cedencia del material. Los ciclos de esfuerzo se aplican hasta que se alcanza la falla de la muestra o un número de ciclos límite.

Entonces, tales resultados se gráficán en una escala semilogarítmica con el esfuerzo  $S$  como ordenada y el número de ciclo  $N$ , que produjeron la falla, como abscisa. El límite de fatiga de cualquier material está definido como el esfuerzo límite por abajo del cual el metal soportará un número indefinido de ciclos de esfuerzo sin fracturarse. En ese punto de la curva  $S$ - $N$ , la curva resulta paralela a la abscisa. Para el acero, esto ocurrirá a los  $10^7$  ciclos de esfuerzo aproximadamente; sin embargo, para algunas aleaciones no ferrosas, la curva no se hace horizontal, y el término límite de fatiga se refiere a menudo al esfuerzo correspondiente a algún número de ciclos. Las pruebas de fatiga se utilizan ampliamente para estudiar el comportamiento de los materiales no sólo para observarlos bajo distintos tipos e intensidades de carga fluctuantes, sino también para determinar el efecto de la corrosión, las condiciones de superficie, la temperatura, el tamaño y la concentración de esfuerzos (7).

En el curso de los años el comité ASTM ha estandarizado métodos de modo que puedan compararse los resultados obtenidos por diferentes laboratorios en las prácticas de fatiga de materiales, el cual se clasifica por E466 Práctica estándar para ensayos de fatiga en aplicación constante de amplitud axial en materiales metálicos (1).

## INSPECCIÓN POR PARTÍCULAS MAGNÉTICAS

(MAGNAFLUX).- Este es un método para detectar la presencia de fisuras, recubrimientos, rasgones, inclusiones y discontinuidades semejantes en materiales ferromagnéticos como el hierro y el acero. El método detectará discontinuidades de la superficie demasiado finas para apreciarse a simple vista y también detectará discontinuidades ligeramente por debajo de la superficie.

La inspección por partículas magnéticas puede realizarse en diversas formas. La pieza que va a inspeccionarse puede magnetizarse y luego cubrirse con finas partículas magnéticas (polvo de hierro); esto se conoce como método residual. O bien, la magnetización y aplicación de las partículas puede hacerse simultáneamente, lo cual se conoce como método continuo. Las partículas magnéticas pueden mantenerse en suspensión en un líquido que se vierte sobre la pieza, o la pieza puede sumergirse en la suspensión (método húmedo). En algunas aplicaciones, las partículas, en forma de polvo fino, se esparcen sobre la superficie de la pieza de trabajo (método seco). La presencia de una discontinuidad se revela por la formación y adherencia de un arreglo característico de las partículas sobre la discontinuidad en la superficie de la pieza de trabajo. Este arreglo recibe el nombre de indicación y adquiere la forma aproximada de la proyección superficial de la discontinuidad. El método magnaglo, ideado por la Magnaflux Corporation, es una variante de la prueba magnaflux. La suspensión vertida sobre la pieza de trabajo magnetizada contiene partículas magnéticas fluorescentes. Entonces, la pieza de trabajo se observa bajo luz negra, con la cual las indicaciones destacan más claramente.

Cuando la discontinuidad está abierta a la superficie, el campo magnético se fuga hacia la superficie y forma pequeños polos norte y sur que atraen a las partículas magnéticas. Cuando pequeñas discontinuidades están bajo la superficie, alguna parte del campo aún podrían desviarse a la superficie, pero la fuga es menor y se atraen menos partículas, con lo que la indicación obtenida es mucho más débil. Si la discontinuidad está muy lejos por debajo de la superficie, no habrá ninguna fuga del campo magnético y, en consecuencia, no se obtendrá alguna indicación. Es necesario emplear apropiadamente

métodos de magnetización, para asegurar que el campo magnético formado este perpendicular a la discontinuidad y lograr la indicación más clara.

Para obtener una magnetización longitudinal, el campo magnético puede producirse en una dirección paralela a lo largo del eje mayor de la pieza de trabajo colocando la pieza en una bobina excitada por una corriente eléctrica, de modo que el eje más largo de la pieza esté paralelo al eje de la bobina. Entonces la parte metálica se convierte en el núcleo de un electroimán y se magnetiza por inducción del campo magnético creado por la bobina. Cuando se tienen partes muy largas, se magnetizan parcialmente, moviendo la bobina a lo largo de la longitud de la pieza. En el caso de magnetización circular, fácilmente se produce un campo magnético transversal al eje mayor de la pieza de trabajo, pasando la corriente de magnetización a través de la pieza y recorriendo todo lo largo de su eje.

La corriente directa, alterna y alterna rectificada se emplean con fines de magnetización. La corriente directa es más sensible que la alterna para detectar discontinuidades no abiertas a la superficie y se emplea cuando la detección de este tipo de discontinuidad es el único fin de la prueba. Cuando la corriente alterna está rectificad, proporciona un campo magnético más penetrante.

La sensibilidad del método de inspección se ve afectada por muchos factores, incluyendo la concentración de la suspensión indicadora, el tiempo de contacto de la suspensión con la pieza, el tiempo permitido para que se formen las indicaciones, el tiempo que se mantiene activa la corriente de magnetización.

Todas las piezas que han sido magnetizadas para su inspección deben de someterse a un proceso de desmagnetización. Si estas piezas se ponen en servicio sin desmagnetizar atraerán limaduras, rebabas, polvos metálicos u otras partículas de acero que pueden provocar fallas en la operación de la maquinaria (7).

En el curso de los años el comité ASTM ha estandarizado métodos de modo que puedan compararse los resultados obtenidos por diferentes laboratorios en los análisis de materiales por partículas magnéticas. En la fabricación de rodillos se aplican los estándares siguientes:

E709 Práctica estándar para análisis de partículas magnéticas (2).

## INSPECCIÓN POR PENETRACIÓN FLUORESCENTE (ZYGLO).-

Este es un método de inspección sensible no destructivo con el que se pueden detectar pequeñas discontinuidades como fisuras, contracciones y porosidades que se encuentran en la superficie de la pieza. Aunque este ensayo puede aplicarse a materiales magnéticos como a no magnéticos, se usa principalmente en materiales no magnéticos. Se puede recurrir a varias técnicas penetrantes para revisar cualquier material homogéneo que no sea poroso.

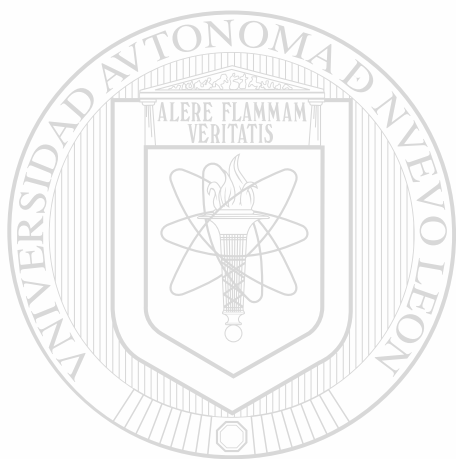
Las partes que van a analizarse se tratan primero con un trazador o colorante que es la sustancia que penetra en las fisuras. Por lo general, los trazadores son líquidos ligeros, de apariencia aceitosa que se aplican a la prueba por inmersión, rociado o con una brocha, o de alguna otra manera conveniente. El trazador es absorbido dentro de las fisuras y otras discontinuidades por una fuerte acción capilar. Después que el trazador ha tenido tiempo de filtrarse, los residuos restantes sobre la superficie se limpian o se lavan. Esto permite al trazador permanecer en todas las discontinuidades que afloran a la superficie. A continuación, la pieza que se está revisando se trata con un polvo seco o una suspensión de polvo en un líquido. Este polvo o revelador actúa como una esponja que atrae al trazador fuera del defecto y aumenta el tamaño del área de indicación. A fin de que el proceso de inspección sea eficaz, el trazador debe de ser observado fácilmente en el polvo revelador. Un método para facilitar la inspección es usar colores contrastantes para el trazador y el revelador. Una combinación muy común es utilizar un revelador blanco y un colorante rojo.

Otro método consiste en utilizar un trazador fluorescente, la aplicación de este trazador es igual, excepto que el líquido penetrante contiene un material que emite luz visible cuando se expone a una radiación ultravioleta. Las lámparas que emiten luz ultravioleta se llaman lámparas negras, por que la luz visible que podrían emitir normalmente es detenida por un filtro, haciéndola aparecer negra o púrpura oscuro. Cuando la pieza que va a ser analizada se observa bajo la luz negra, el defecto aparece como una marca fluorescente que brilla contra un fondo negro (7).

En el curso de los años el comité ASTM ha estandarizado métodos de modo que puedan compararse los resultados obtenidos por diferentes laboratorios en los análisis de materiales por líquidos penetrantes. En la fabricación de rodillos se aplican los estándares siguientes:

E1209 Método estándar para examinar líquidos penetrantes utilizando el proceso de lavado con agua.

E1210 Método estándar para examinar líquidos penetrantes utilizando el proceso de emulsión (2).



# UANL

---

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN



DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS



**INSPECCIÓN ULTRASÓNICA.**- Un método muy antiguo es utilizar ondas de sonido para determinar defectos. Si una pieza de metal es golpeada con un martillo, producirá ciertas notas audibles, las cuales pueden alterarse en resonancia y tono por la presencia de imperfecciones internas. Sin embargo, esta técnica de golpear con el martillo y escuchar el sonido correspondiente es útil sólo para detectar grandes defectos.

Un método más depurado consiste en utilizar ondas de sonido fuera del intervalo auditivo, con una frecuencia de 1 a 5 millones de Hz (ciclos por segundo), de aquí el término ultrasónico. El método ultrasónico es una prueba no destructiva, confiable y rápida que emplea ondas sonoras de alta frecuencia producidas electrónicamente que penetran metales, líquidos y muchos otros materiales a velocidades de varios miles de metros por segundo. Las ondas ultrasónicas para ensayos no destructivos generalmente las producen materiales piezoeléctricos, los cuales sufren un cambio en su dimensión física cuando se someten a un campo eléctrico. Esta conversión de energía eléctrica a energía mecánica se conoce como efecto piezoeléctrico. Si se aplica un campo eléctrico alterno a un cristal piezoeléctrico, el cristal se expandirá durante la primera mitad del ciclo y se contraerá cuando el campo eléctrico se invierta. Al variar la frecuencia del campo eléctrico alterno, se puede variar la frecuencia de la vibración mecánica (onda sonora) producida en el cristal. El cuarzo es un transductor ultrasónico ampliamente utilizado. Un transductor es un dispositivo que convierte una forma de energía a otra.

Los dos ensayos ultrasónicos más comunes son la transmisión continua y el eco - pulsos. La transmisión continua utiliza un transductor en cada lado del objeto que va a inspeccionarse. Si al cristal transmisor se le aplica un pulso eléctrico de frecuencia deseada, las ondas ultrasónicas producidas se desplazarán a través de la muestra hasta el otro lado. El transductor de recepción situado en el lado opuesto recibe las vibraciones y las convierte en una señal eléctrica que se puede amplificar y observar en el tubo de rayos catódicos de un osciloscopio, un medidor o algún otro indicador. Si la onda ultrasónica viaja a través de la muestra sin encontrar ninguna imperfección, la señal recibida será relativamente grande. Si hay imperfección en la trayectoria de la onda ultrasónica, parte de la energía se reflejara y la señal que recibirá el transductor de recepción se reducirá.

El método de eco-pulso utiliza sólo un transductor que sirve como transmisor y como receptor. Conforme la onda sonora penetra en el material sometido a prueba, parte de ella se refleja de vuelta al cristal, donde se convierte en un impulso eléctrico. Este impulso se amplía y hace visible, apareciendo como una indicación o señal sobre la pantalla del osciloscopio. Cuando la onda sonora alcanza el otro lado del material, se refleja de regreso al cristal y se ve como otra señal sobre la pantalla hacia la derecha de la primera señal. Si hay imperfección entre las superficies frontal y posterior del material, se delatará sobre la pantalla como una tercera señal entre las dos indicaciones correspondientes a las superficies frontal y posterior. Como las indicaciones en la pantalla del osciloscopio miden el tiempo transcurrido entre la reflexión del pulso desde las superficies frontal y posterior, la distancia entre indicaciones es una medida del espesor del material. Por tanto, la localización de un defecto puede determinarse con exactitud por la indicación que aparece sobre la pantalla.

En general, las superficies uniformes y lisas son más apropiadas para la prueba de pulsos de mayor frecuencia; por tanto permiten detectar defectos más pequeños. La transmisión adecuada de la onda ultrasónica tiene gran influencia en la confiabilidad de los resultados de la prueba. Para partes de mayor tamaño, una película de aceite asegura el contacto apropiado entre la unidad del cristal de búsqueda y la pieza a prueba. Las piezas más pequeñas pueden colocarse en un tanque con agua, aceite o glicerina. La unidad de cristal de búsqueda transmite ondas sonoras a través del medio y penetran el material que se examina. Un estrecho examen de la pantalla del osciloscopio de esta gráfica permitirá ver la presencia de tres señales. La señal de la izquierda indica el frente de la pieza, la de la derecha la parte posterior de la pieza y la señal más pequeña del centro indica una imperfección.

La inspección ultrasónica se utiliza para detectar y localizar defectos como cavidades de contracción (rechupes), vacíos o fisuras internas, porosidad y grandes inclusiones no metálicas (7).

En el curso de los años el comité ASTM ha estandarizado métodos de modo que puedan compararse los resultados obtenidos por diferentes laboratorios en los análisis de materiales por ultrasonido. En la fabricación de rodillos se aplican los estándares siguientes:

E317 Práctica estándar para evaluar las características del ultrasonido pulso-eco sin el uso de instrumentos electrónicos de medición.

E494 Práctica estándar para medir la velocidad del ultrasonido en materiales.

E797 Práctica estándar para medir espesores apoyándose en el manual de ultrasonido pulso-eco, método de contacto (2).



# UANL

---

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS



## 4. - PROCESO DE FABRICACIÓN DE RODILLOS.

### 4.1. - PREPARACIÓN DE MOLDES.

La fundición de metales es el proceso de fabricación de objetos que se lleva a cabo al verter líquido en un molde previamente preparado. Existen dos tipos de moldes para la colada de rodillos, los cuales son de arena y permanentes (moldes de metal). En los dos casos, la preparación del molde requiere de un modelo. El modelo de una pieza de fundición, es una réplica del rodillo original y se hace de madera por lo regular, combinándolos con materiales de aluminio, yeso, plástico. Se toma en cuenta la contracción que sufre el metal al solidificarse por lo que los modelos se hacen de una medida mayor.

Cuando los metales o sus aleaciones se solidifican y enfrían, sufren siempre una contracción de volumen. Los metales se contraen en tres etapas diferentes; pasan por una contracción líquida al enfriarse desde la temperatura de colado a la de solidificación, por una reducción en volumen al solidificar y por la contracción sólida al enfriarse la pieza hasta temperatura ambiente.

La contracción líquida en el acero es de 1.6% por cada 100°C y la contracción por solidificación es de 5.34%. De las contracciones tanto líquida como de solidificación, la segunda es la más importante. La última contracción (sólida) resulta en una fundición ligeramente más pequeña que la cavidad del molde y, por lo tanto, los modelos deben hacerse ligeramente más grandes que la pieza vaciada que se desea; a esta contracción se le llama "Contracción del modelista". La contracción sólida resulta también (si no es controlada con propiedad) en esfuerzos internos que pueden causar deformación o fractura en caliente.

Para la preparación de moldes es necesario elegir bien las arenas de moldeo para el proceso de vaciado de acero, se debe tomar en cuenta su preparación, mezcla y secado. Los principales requisitos de las arenas de moldeo son: características refractarias, cohesión, porosidad y permeabilidad. La arena ha de resistir el calor del metal fundido, por cuya razón es necesario que tenga una gran proporción de sílice con un mínimo de los ingredientes que aumenta la fusibilidad, tales como ciertos óxidos metálicos. Por lo tanto, para trabajar con fundiciones ligeras ordinarias se requiere una proporción de sílice próxima al 80%, para la fundición media el 85%; para la pesada del 90-93%. Sin embargo, en el caso de las piezas moldeadas de acero, las arenas que tienen un material de unión con punto de fusión relativamente bajo, como ocurre con ciertas arcillas naturales, tienden a producir una superficie metálica mucho más limpia que las arenas más refractarias.

La arena ha de formar un todo y mantener la forma una vez que ha sido compactada por golpeo con la maza y resistir la fluencia y presión del metal fundido. Algunos metales en estado líquido, tales como el acero, tienen una pronunciada acción excavadora sobre la arena.

El término arcilla se le nombra a un particular grupo de minerales, en el que el principal constituyente es el silicato aluminico hidratado, que varía desde el caolín a las arcillas refractarias duras y negras. La propiedad distintiva de la arcilla es su plasticidad que es transmitida de la masa de la arena en presencia de la humedad. En su actuación tiene una gran influencia, tanto la composición como la estructura. Las arcillas que se mezclan en las arenas de moldeo han de tener un diámetro menor de 20  $\mu\text{m}$ . Estas arcillas contienen dos ingredientes: un fango fino sin poder cohesivo y la verdadera arcilla, que es la que une los granos de arena.

Uno de los materiales de unión más empleados en el moldeo de rodillos de acero es la bentonita, que es una sustancia análoga a la arcilla, formada por la acción de los agentes atmosféricos sobre las cenizas volcánicas y compuestos de minerales de la familia de la montmorillonita ( $\text{Si}_8\text{O}_{20}\text{Al}_4(\text{OH})_4\text{OH}_2\text{O}$ ).

Para que las piezas no sean defectuosas es necesario que el aire del molde y los gases engendrados por el calor del metal salgan sin impedimento a través de las paredes

de la arena. El término porosidad se refiere al número de espacios que existe entre los granos de arena y está regido, principalmente, por el tamaño y forma de estos mismos granos, proporciones de los materiales de unión, la humedad presente y la densidad de la arena una vez comprimida.

La permeabilidad de una arena es diferente de la porosidad, si bien esta íntimamente relacionada con ésta, y se relaciona con la facilidad con que escapan los gases a través de la arena. Las arenas que tienen granos de tamaño uniforme proporcionan un conjunto abierto o poroso, en tanto que las arenas con tamaño de grano variado tienden a producir una masa íntimamente empaquetada y menos porosa.

La proporción del material de unión presente influye en la permeabilidad. El exceso de aglutinante tiende a llenar los poros, que, por lo tanto, disminuye la permeabilidad, aunque pueda producir una arena fuerte con buenas cualidades cohesivas. Análogamente un exceso de humedad disminuye la permeabilidad de la arena, produciendo la saturación de ésta y, a la vez que llena los poros, tiende a desalojar el aglutinante.

El efecto del secado del molde es aumentar la permeabilidad ya que se hacen mayores los poros debido a la contracción de los granos de arena. Una proporción excesiva de sílice hace que la unión sea deficiente en tanto que un exceso de arcilla disminuye el carácter refractario y la porosidad, y es mayor la contracción de arena en el molde.

Los tres constituyentes principales de la arena son : el cuarzo, que forma los granos reales y que comunica la cualidad refractaria de la arcilla, el silicato aluminico, que lleva asociado oxido de hierro hidratado, que es el aglutinante de los granos de cuarzo, y los feldespatos, que contienen los óxidos básicos de calcio, manganeso y potasio, cuyo efecto es aumentar la fusibilidad de la arena para disminuir la porosidad (9).

#### 4.1.1.- PREPARACIÓN DE MOLDES PARA RODILLOS DE ACERO VACIADO.

Existen dos tipos diferentes de rodillos de acero vaciado, la preparación del molde varía para cada uno de ellos. Si la pieza que se va a vaciar se trata de un rodillo con pases se utiliza una sola caja de moldeo (templadera) dividida en dos partes, el canal de alimentación se instala en una de las mitades dentro de la misma caja de moldeo, la tolva de alimentación se coloca en la parte superior fuera del molde (figura 7). En el contorno de los pases se colocan enfriadores de hierro sujetos con la arena apisonada. La unión de las dos mitades se asegura con grapas a presión.

Si la pieza que se va a vaciar se trata de un rodillo plano se utilizan tres o más cajas de moldeo colocadas una sobre el otro completando la longitud del rodillo estando el alimentador fuera de las cajas de moldeo. En los dos casos con la ayuda del molde se forma el contorno del modelo apisonando la arena con martillos neumáticos, los cuales golpetean la arena hasta darle su forma compacta y dureza.

El alimentador llega al molde por el fondo y en sentido tangencial al cuello inferior, ya que el molde se vacía estando en forma vertical. El lado motriz se coloca en el molde inferior para asegurar la homogeneidad adecuada debido a la presión ferrostática que se tiene en la parte inferior del molde. En el contorno del cuello se colocan enfriadores para acelerar la solidificación del metal además de obtener mejores propiedades mecánicas (figura 8).

Las cajas de moldeo son de acero fundido, pudiendo ser también de acero estructural soldado, es recomendable vaciar acero de medio carbono dependiendo de las necesidades y recursos. Cuando se ha llevado a cabo la preparación del molde, éste es cerrado con grapas, con objeto de que no se vayan a separar las cajas con la presión ferrostática, después de selladas las uniones se aplica una capa de pintura a base de óxido de circonio, para después proceder al secado. Para llevar a cabo este proceso se colocan las cajas de moldeo en el interior de un horno de secado en donde se eleva la temperatura a valores que varían de 425 a 315 °C; con esta temperatura se asegura la evaporación del

agua la cual provocaría una explosión en el molde al recibir el metal en caso de que ésta existiera.

Estos hornos de secado de moldes son diseñados según sus capacidades por operar; los quemadores son de aire-gas con sopladores, los cuales homogeneizan las temperaturas en todas las zonas de la cámara del horno.

Una característica de estos hornos es que la las flamas no tocan a los moldes, sino que la cámara de combustión está en el exterior de la cámara de secado, estos hornos utilizan como combustible el gas natural y la circulación de los gases se efectúa por medios mecánicos, que en este caso será un ventilador que hará un tiro inducido.

Una vez seco el molde se dispone en forma vertical en las fosas de vaciado hasta donde se lleva la plataforma de vaciado. Como operación adecuada se debe decir que en ocasiones es conveniente tapar el molde después de vaciar el rodillo con una capa de polvos exotérmicos o introducir pequeños electrodos de grafito alta pureza, prensados fuertemente y de alta conductividad térmica, los cuales concentran calor por radiación de los arcos y la resistencia de la carga manteniendo fundida la mazarota, evitando la contracción del exterior al cambiar de estado líquido a sólido. El uso de estos electrodos proporcionan un mejor control en el enfriamiento del rodillo.



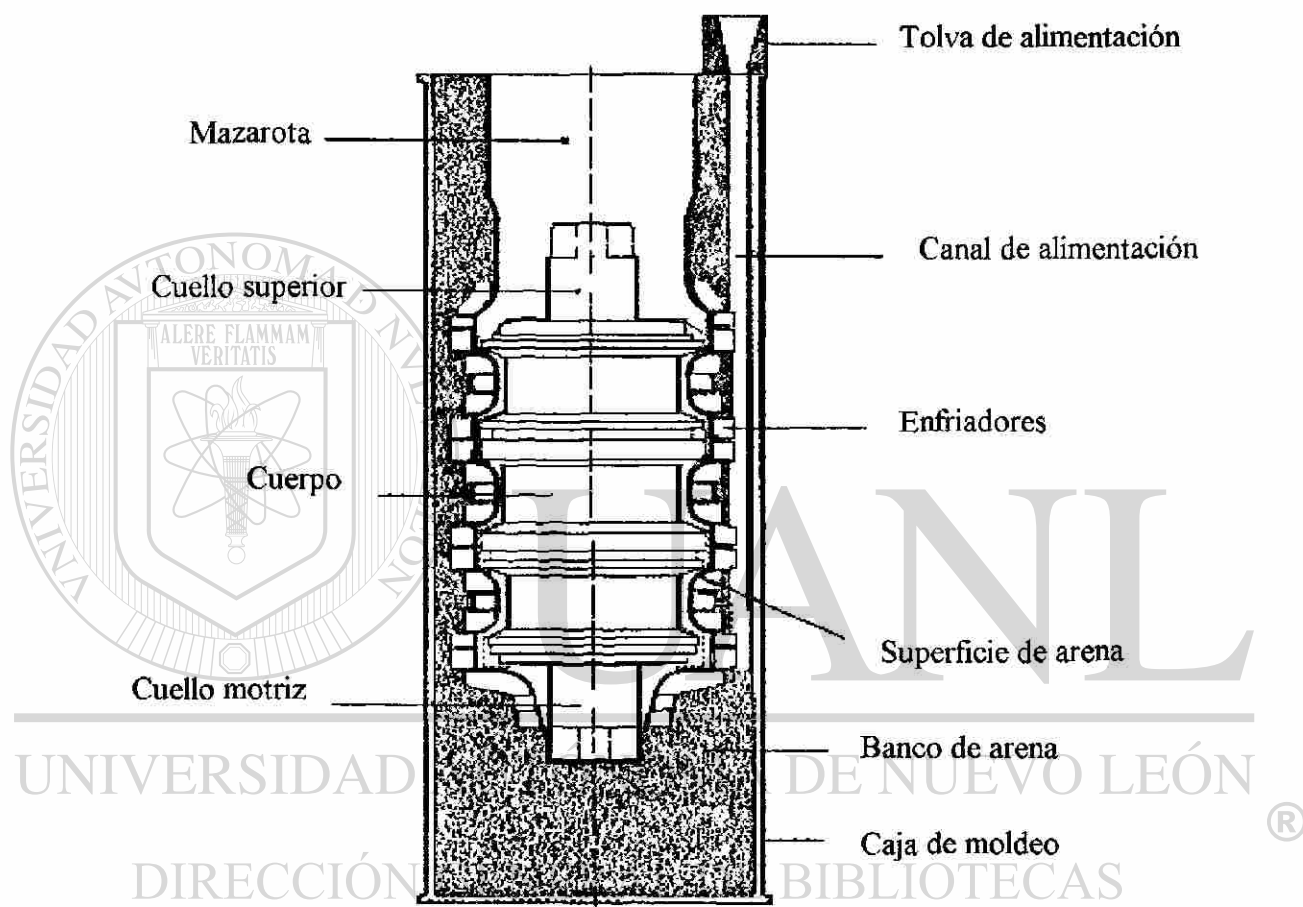


Figura 7. Preparación de moldes para rodillos de acero vaciado, con pasas.  
(Según; Robert B. Corbett; Roll for the Metalworking Industries; Iron & Steel Society) (12).

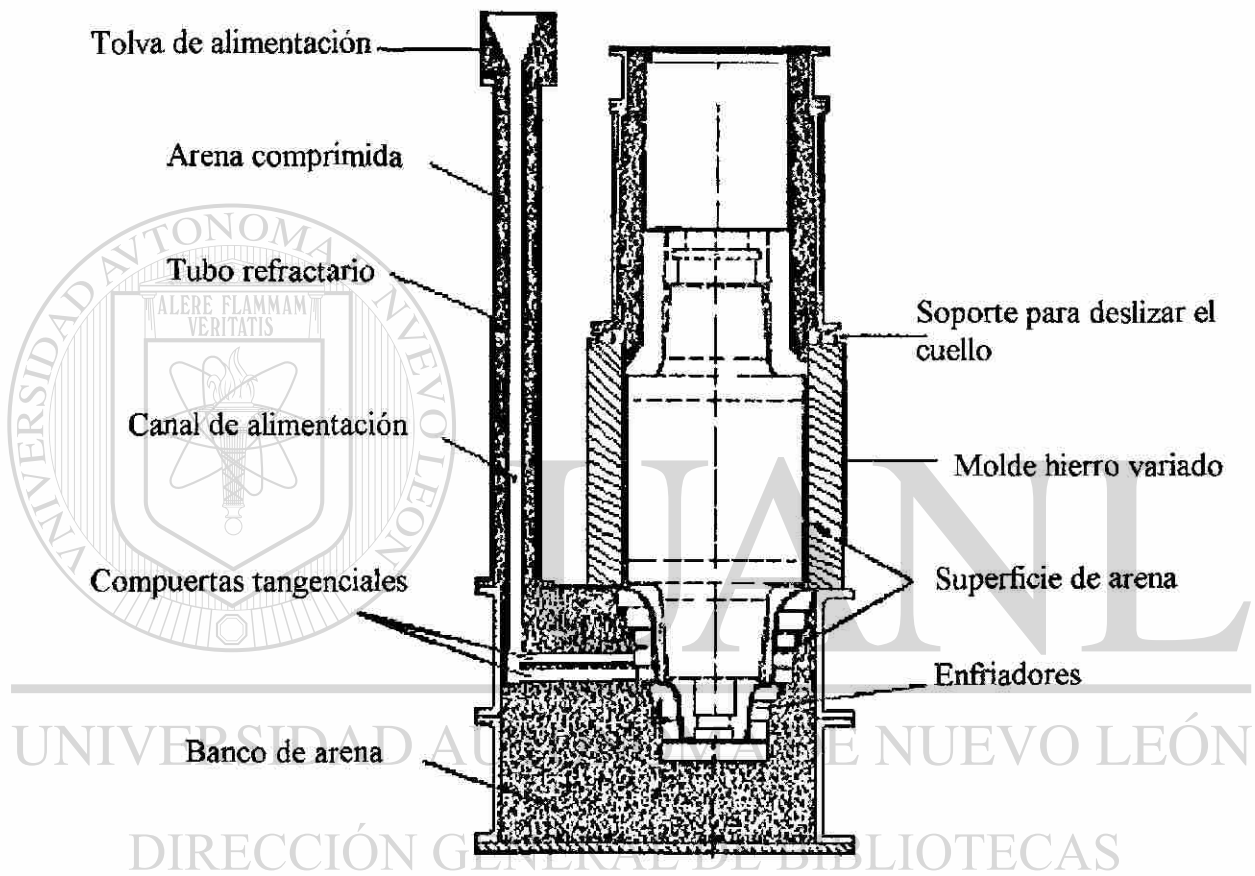


Figura 8. Preparación de moldes para rodillos vaciados, sin pasas.  
 (Según; Robert B. Corbett; Roll for the Metalworking Industries; Iron & Steel Society) (12).

#### **4.1.2.- PREPARACIÓN DE MOLDES PARA RODILLOS VACIADOS DE HIERRO.**

El colado en moldes de metal se destina prácticamente a metales con temperatura de fusión baja y moderada. Las piezas que pueden colarse en moldes de metal son más fuertes, tienen mejor apariencia en la superficie, pueden mantenerse a tolerancias más estrechas, pueden hacerse con secciones más delgadas y requieren menos maquinado que los colados equivalentes en arena.

En el proceso de fabricación de rodillos vaciados de hierro se utilizan moldes de arena y permanentes, los cuellos son fabricados en cajas de moldeo utilizando el procedimiento descrito en el moldeo de rodillos vaciados de acero. El cuerpo de los rodillos de hierro está compuesto por un molde permanente de acero fundido, el interior se maquina dejando acabado burdo para aplicar la capa de pintura a base de óxido de circonio, la unión de las cajas moldeadas se realiza con grapas para asegurarse que no se abrirá con la presión ferrostática. La alimentación llega al molde por el fondo en sentido tangencial al cuello inferior, ya que el molde se vacía estando colocado en forma vertical. Los procesos de secado de molde y el vaciado del rodillo son los mismos descritos en la sección anterior.

#### 4.1.3.- RODILLOS DE HIERRO DOBLE VACIADO.

Algunos tipos de rodillos son vaciados en dos etapas, la finalidad de este tipo de vaciado es obtener diferentes características mecánicas en el cuerpo del rodillo con respecto a las espigas. Para obtener estas características se utilizan el doble vaciado estático y el vaciado centrífugo. El doble vaciado estático consiste en vaciar en forma normal el rodillo y dejar un determinado tiempo para que el material solidifique en las paredes del molde, después, por medio de un doble vaciado auxiliado por la presión ferrostática se empuja al material que se encuentra en el centro del molde en estado líquido, de esta manera se obtienen rodillos con corazón suave y exterior duro. Se debe de tener cuidado de asegurar la fluidez del metal de la mazarota tal como se menciona con anterioridad (12). En el proceso de vaciado centrífugo los cuellos son moldeados en las cajas de moldeo descritas anteriormente. El cuerpo se obtiene colando el metal fundido en un molde giratorio. La fuerza centrífuga crea presiones que exceden la gravedad para empujar el metal dentro del molde. Por ejemplo, una aleación de hierro que gira a cerca de 2600 rpm está sujeta a una presión aproximada de 250 kPa ( 36 psi) aproximadamente a 100 mm ( 4 in) de diámetro y se incrementa a diámetros mayores. Esto es mejor que alimentar un colado estático con una columna de casi 9 m (30 ft). El colado centrífugo produce colados exactos de buena calidad y ahorra material. Los colados son densos y tienen una estructura de grano fino con propiedades físicas altas y uniformes y están menos sujetos a las variaciones direccionales que los colados estáticos. El metal fluye con facilidad dentro de las secciones delgadas y los colados salen con detalle fino en la superficie exterior. Después de un tiempo suficiente para que el metal solidifique se dispone el molde en forma vertical ensamblándolo con los cuellos en la fosa de vaciado. La tolva de alimentación para este caso específico se coloca en la parte superior del molde procurando que el canal de vaciado coincida con el centro de la pieza, el vaciado se realiza en forma vertical por la parte superior de la pieza para evitar que ocurra un deslave en el cuerpo del rodillo que se obtuvo por vaciado centrífugo. Se debe de tener cuidado de asegurar la fluidez del metal de la mazarota tal como se menciona con anterioridad (9).

#### 4.1.4.- RODILLOS FORJADOS.

Uno de los procesos primarios más comunes en el trabajado de metales, y el más antiguo es sin duda el proceso de forja. Los metales se trabajan a presión en este proceso por dos razones : (1) para desarrollar formas deseadas y (2) para mejorar las propiedades físicas. El proceso de fabricación de rodillos forjados parte con el vaciado de metal líquido en un lingote, para después forjar en caliente. Es importante que el lingote se caliente de manera uniforme por completo a la temperatura apropiada para la forja. El calentamiento se hace en hornos, de tamaño adecuados a las necesidades específicas, generalmente son hornos revestidos con refractario. Los rodillos son preformados en forja de dado abierto, las operaciones se llevan a cabo en dados planos o dados que tienen una geometría muy simple como puede ser forma de V, semirredondos o semiovais. El proceso de forja puede trabajar metal comprimiendo su sección transversal y haciéndolo mas largo, para ello requiere una prensa hidráulica vertical. En el forjado en prensa, la presión se sostiene en forma momentánea para penetrar plenamente el metal, los golpes deben de ser pesados para penetrar y amasar profundamente el metal, de manera uniforme y por completo. Los golpes ligeros afectan únicamente el metal cercano a la superficie. Con este proceso se preforma el rodillo lo más cercano posible a su geometría final. Para asegurar que no se obtuvieron defectos en el proceso de forjado, se maquina ligeramente el cuerpo para inspeccionar por ultrasonido y partículas magnéticas (12).

## 4.2. - FUSIÓN.

Proceso de fusión. Se le llama fusión a toda operación realizada a elevada temperatura, en la que se obtiene metal líquido. En el proceso de fusión se utilizan varios tipos de hornos, seleccionando el más económico, tomando en cuenta el tipo de material a obtener, capacidad de carga del combustible o energía eléctrica que se necesita (6).

Los hornos más comunes para la producción de rodillos de laminación son los hornos eléctricos, existe gran variedad de ellos, como se puede ver en la figura 9 (15).

En los últimos veinte años, el proceso de horno eléctrico ha avanzado enormemente y de ser un horno dedicado a la producción de aceros especiales o para fundición en ciclos intermitentes, se convirtió en una unidad de producción de acero en gran escala. Las razones del aumento de popularidad son:

1. Independencia del arrabio líquido, la carga natural para hornos eléctricos es la chatarra.

2. Su alta productividad.

3. El costo relativamente bajo.

4. Los hornos son siempre del tipo basculante y permiten la fácil extracción de la escoria.

5. El calor se concentra por inducción, radiación de los arcos y la resistencia de la carga; por lo que el control de la temperatura es sencillo y la eficiencia térmica alta, especialmente debido a que no existe aire de combustión que pase a través del horno siendo la electricidad la única fuente de calor. Las altas temperaturas se pueden obtener con facilidad, limitándolas sólo el desgaste del refractario.

6. Debido a la ausencia de aire, es posible obtener condiciones no oxidantes, realmente reductoras, lo que hace posible una desulfuración sumamente eficiente, sobre todo a altas temperaturas.

7. Como resultado de las posibilidades de refinación bajo escorias neutras o reductoras, la oxidación de las hornadas se puede mantener baja, asegurando un mínimo de pérdida por oxidación de las ferroaleaciones. Por la misma razón, se pueden agregar al horno grandes cantidades de ferroaleaciones mientras se mantiene el calentamiento y hace posible la producción de aceros de alta aleación.

8. Los hornos pueden detenerse o ponerse en marcha fácilmente sin dañar los refractarios comunes, lo que hace posible planear las operaciones para uno o dos turnos por día, paros de fin de semana, etc.

9. Debido a la ausencia de volúmenes excesivos de aire y de gases de combustión, la instalación para limpieza de polvo es relativamente compacta aunque necesaria, ya que se generan una cantidad regular de polvo sobre todo por la chatarra de baja calidad.

Sin embargo, se deben considerar las siguientes desventajas:

1. Existe gran dependencia de los precios de chatarra, ya que las operaciones normales requieren la carga de 100% de chatarra.

2. Existe la posibilidad de contaminar el acero con elementos residuales contenidos en la chatarra. Aunque se pueden tolerar ciertos contenidos inesperados de cobre, níquel o cromo.

3. Existe la tendencia hacia la absorción y retención del hidrógeno y nitrógeno. La atención cuidadosa para la eliminación de la humedad en cualquier fase de la aceración y el uso de suficiente oxígeno, pueden reducir el problema del hidrógeno y la rápida fusión, perjudicial para la vida del refractario, puede mantener al nitrógeno abajo de los límites inconvenientes.

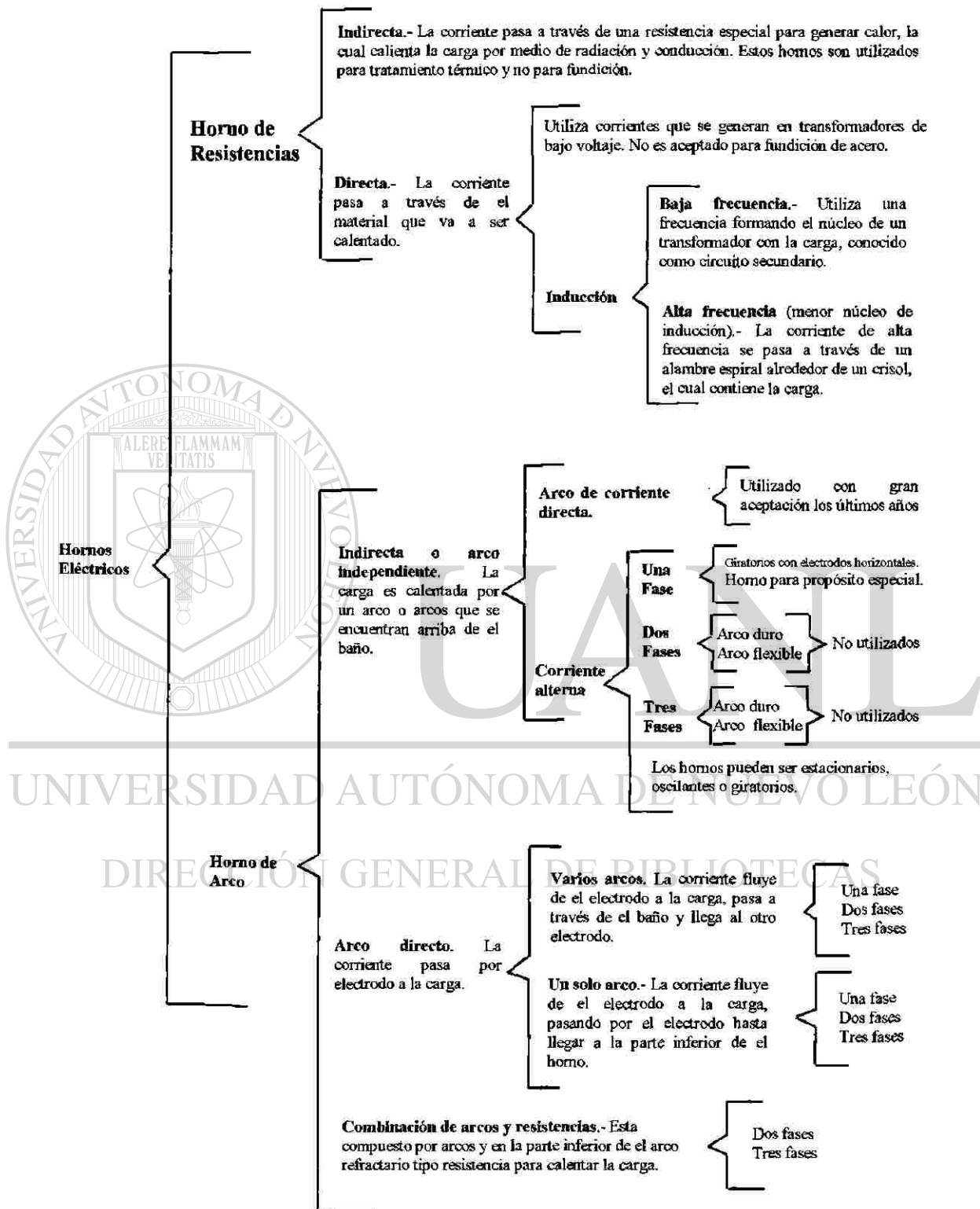


Figura 9. Clasificación de hornos eléctricos  
(Según; The Making, Shaping and Treating of Steel; United States Steel Corporation) (15).



**CLASIFICACIÓN DE CHATARRA.**- Puesto que la chatarra es la materia prima en la fusión mediante hornos eléctricos, existe la necesidad de clasificarla. Es común en instalaciones que cuentan con este tipo de hornos, el tener 20 a más depósitos separados de chatarra para lograr la utilización máxima de elementos aleantes no oxidables (níquel). La manera en que se carga la chatarra (secuencia) en las cestas de carga afecta la eficiencia del horno y la vida de los refractarios. La chatarra no aleada debe separarse en ligera y pesada. Se requiere un control constante de la calidad de la chatarra, ya que una carga errónea puede ocasionar una fusión completamente fuera de especificación si contiene elementos contaminantes.

**CONSTRUCCIÓN DE HORNOS ELÉCTRICOS.**- Las partes principales de un horno son la bóveda, crisol, puerta para descoriado, muestreo y adiciones de aleantes, canal de sangrado. Las bóvedas siempre son removibles para cargar el horno usando una cesta de descarga por el fondo, que se precarga fuera del horno con chatarra y fundentes, que se baja verticalmente.

Los hornos generalmente son basculantes, con un fondo convexo que descansa en una cuna accionada con potentes motores; con oscilación hacia adelante (vaciada) de aproximadamente 40° y una pequeña oscilación hacia atrás (descoriado y reparación) de casi 15°.

**REFRACTARIOS.**- El problema en los hornos eléctricos es el desgaste irregular de sus refractarios, el desgaste ocurre primero en los puntos calientes. El desgaste de la bóveda lo causa la erosión del polvo arrastrada hacia el sistema de escape y por las tensiones termomecánicas que ocasiona el enfriamiento repentino que ocurre cuando se desplaza la bóveda para la carga, seguida de un calentamiento rápido.

Los crisoles, que sirven para varios miles de hornadas, se construyen de ladrillos básicos impregnados con alquitrán, con o sin una capa apisonada de óxido de magnesio. Para la construcción de las paredes se emplean ladrillos de magnesio o de magnesia-cromo; también se usan tipos de alta alúmina. Las impurezas pueden promover pérdidas por descascarado que ocasiona absorción de óxido de hierro.

La secuencia en la preparación de la carga para un horno eléctrico consiste de una serie de pasos que se describen a continuación. La preparación del horno se facilita inclinando ligeramente el horno hacia atrás o hacia el frente. La operación de carga se lleva a cabo con una cesta, toda la bóveda se levanta completamente de sus soportes y luego se desplaza o se gira. Se lleva entonces sobre el horno la cesta precargada con chatarra y se descarga dentro del mismo. Son normales una o dos recargas después de fundir la carga inicial.

La primera carga debe contener chatarra ligera para que sirva como colchón al fondo, mientras que las partes pesadas deben colocarse cuidadosamente en el centro. La chatarra ligera y mediana se colocarán alrededor de las piezas pesadas para proteger las paredes y los bancos. Junto con la primera o segunda carga se puede poner trozos de lingoteras u otra chatarra de hierro, los cuales servirán para suministrar el carbono necesario para la fusión.

La fusión se inicia después de colocada la bóveda en su sitio, en esta etapa se usa por lo general un ajuste de mediana potencia, después de pocos minutos, la potencia se pone al máximo, cuando la chatarra se funde y pasa al estado líquido se extrae una muestra para analizarla químicamente, si el análisis químico está dentro de lo especificado se continua con el proceso, si no es así, se procede a realizar ajustes en el análisis mediante la adición de ferroaleaciones. Cuando la carga ha sido refinada, se sangra el horno en una olla de vaciado, se toma la temperatura del metal líquido y se extrae una segunda probeta para análisis químico. Cuando la carga líquida está dentro de las especificaciones de vaciado se retira la escoria por medio de un rastrillo de madera y se prepara para su vaciado en el molde preparado con anterioridad (11).

### 4.3. - TRATAMIENTOS TÉRMICOS.

El tratamiento térmico tiene por objeto mejorar las propiedades y características del acero, y consiste en calentar y mantener las piezas a temperaturas adecuadas durante cierto tiempo, enfriándolas después en condiciones convenientes. De esta forma se modifica su estructura del acero, se verifican transformaciones físicas. En todo tratamiento térmico hay que distinguir tres periodos fundamentales que son:

- a). - Velocidad de calentamiento.
- b). - Permanencia a temperatura.
- c). - Velocidad de enfriamiento.

- a). - Velocidad de calentamiento.

A la velocidad de calentamiento en muchas ocasiones no se le suele dar importancia, generando un grave error ya que tiene la suficiente importancia para dedicarle atención, como lo es en el caso de la producción de rodillos, que son piezas de gran sección. El calentamiento debe de ser lo más uniforme posible y debe de llegar hasta el corazón de la pieza. Debe de calentarse lentamente para que haya una menor diferencia de temperatura entre el interior y la periferia, pues en caso contrario se pueden crear fuertes tensiones internas que pueden dar lugar a grietas o fracturas. Estas tensiones se crean primero por la desigual dilatación de las zonas calientes y frías (periferia y centro), y luego por las contracciones que ocurren al pasar entre el acero las zonas críticas de transformación.

El paso de la zona crítica no es peligroso cuando todo el rodillo tiene la misma temperatura o las diferencias son muy pequeñas, como ocurre con los calentamientos lentos. En cambio, cuando la periferia alcanza la temperatura mucho antes que el centro, la zona periférica sufre contracción, mientras que el centro que no ha llegado a esa temperatura se está dilatando todavía, y el riesgo de agrietamiento es mayor, algunos de estos defectos aparecen después en el temple y revenido, atribuyéndose indebidamente a causas distintas a las que se originan.

Los factores que incluyen en esta etapa son generalmente la conductividad térmica, composición química y las dimensiones de la pieza. Es importante distinguir entre temperatura y calor, ya que la primera es un nivel de actividad térmica y el segundo término significa energía térmica. Para cualquier constituyente químico de algún material, el punto de fusión es un nivel importante de temperatura, ya que existe su punto de transición entre diferentes acomodamientos estructurales de los átomos dentro del material.

El paso del calor a través de sólidos se lleva a cabo por conducción térmica, los coeficientes se expresan en unidades tales como  $(\text{cal cm})/(\text{°C Seg cm}^2)$  o en  $(\text{Btu plg})/(\text{°FHr pie}^2)$ . Los cambios de acomodamiento atómico que acompañan la fusión y otros reacomodamientos motivados por variaciones de temperatura, producen discontinuidades en los valores de la conductividad térmica.

Las dimensiones de las piezas están en función tanto de la capacidad de un horno para calentar un rodillo y llevarlo a la temperatura deseada, tomando en cuenta su conductividad térmica, y su composición química. Por lo común, un horno de tratamiento térmico consta de una estructura parecida a una caja envolvente de acero y una puerta de acceso, revestimiento refractario, controles e indicadores de temperatura, pueden faltar algunas de estas características o ser diferentes en ciertos casos. Los hornos pueden clasificarse por las formas en que se manipula el trabajo o por los medios de calefacción, los hornos más comunes en la fabricación de rodillos son los siguientes:

El horno de llama directa quema el combustible en el espacio ocupado por la carga. Es de bajo costo y adecuado para todos los márgenes ordinarios de temperatura, este horno es apropiado para calefacción tosca, como para forja por ejemplo, pero puede servir en el tratamiento térmico, en particular a temperaturas más bajas.

El horno de llama indirecta tiene una cámara de calefacción y una mufla que separa el espacio de combustión del espacio de trabajo. El límite superior aproximado de temperatura para este horno es de  $1100\text{°C}$  ( $2000\text{°F}$ ). Las ventajas de su uso es que reduce la escamación y la contaminación por el combustible.

Un horno de recirculación es de llama indirecta pero los gases de combustión calientes se canalizan de modo que la calefacción sea uniforme. Con más frecuencia se aplica abajo de 700°C (1300 °F) como se acostumbra en las estufas para revenido, aumento de la tenacidad y alivio de esfuerzos.

Un horno con fondo corredizo, tiene un hogar movible como una carretilla plana que se rueda fuera para cargar y descargar. Por lo común, la carga se apila sobre calzas y espaciadores de aleación resistente el calor o refractarios para facilitar la circulación de gases y calentar los materiales de manera uniforme.

b). - Permanencia a temperatura.

La temperatura máxima que se debe alcanzar se indica en las especificaciones de cada tratamiento, y dentro de ello los fabricantes precisan la más conveniente para cada clase de metal o aleación, a veces en márgenes muy estrechos. De ningún modo debe sobrepasarse la temperatura indicada pues se corre el riesgo de aumentar innecesariamente el tamaño de grano de los constituyentes. Si la elevación de la temperatura es muy exagerada, cercana al punto de fusión, quedan los metales con una estructura grosera y frágil, debido a la fusión de las impurezas que rodean los granos que, al solidificarse quedan en forma de delgadas capas de vidrio sin cohesión con los granos.

Este metal se dice que se ha quemado y es imposible regenerarlo por tratamiento térmico. Se calcula que es suficiente una permanencia de uno o dos minutos por cada milímetro de espesor de la pieza, para conseguir la austenización completa en el acero.

c). - Velocidad de enfriamiento.

Esta en función de la secuencia en el tiempo de varios cambios de temperatura del acero y de su composición química. Velocidades de enfriamiento críticas, temperaturas y tiempos de la transformación de la austenita, son características para cada acero, dependiendo de su composición química, tamaño de grano austenítico. Estos factores cinéticos no se ven en un diagrama de fase por lo tanto se usan los diagramas de transformación isotérmica o continua.

La presencia de los elementos de aleación modifican tanto las microestructuras de equilibrio como la característica de transformación. Los tratamientos térmicos utilizados en la producción de rodillos son los siguientes.

- a). - Recocido simple ( Relevado de esfuerzos)
- b). - Recocido de esferoidización (Globulización)
- c). - Recocido doble.
- d). - Normalizado.
- e). - Temple al aire y revenido.
- f). - Templado al agua por inducción y revenido.
- g). - Revenido.

a). - Recocido simple (Relevado de esfuerzos).

Los rodillos son calentados a razón de 3°C a 20°C por hora, dependiendo de su tamaño y sus composiciones químicas; a una temperatura alta capaz de romper la estructura cristalina de vaciado (400 a 450 °C). El rodillo se mantiene a la temperatura máxima de tratamiento, por un mínimo de una hora por cada 25 mm (una pulgada) de diámetro, una vez alcanzada la temperatura uniforme es enfriado en el horno por debajo de los 100°C antes de ser retirado del mismo. El tiempo requerido para un ciclo completo de recocido es aproximadamente una semana, entonces se obtiene un rodillo libre de esfuerzos internos y muy suave, pero adecuado para usarse en aplicaciones donde la resistencia es más importante que la dureza.

b). - Recocido de esferoidización ( Globulización).

Los rodillos son calentados a razón de 3°C a 40°C por hora, dependiendo de su tamaño y sus composiciones químicas; hasta alcanzar una temperatura en la cual se transforma completamente la estructura de laminillas de carburo a globular (700 a 820°C), se mantiene a está temperatura por un mínimo de una hora por cada 25 mm (una pulgada) de diámetro, se baja ligeramente la temperatura (100°C) y se mantiene a está

temperatura media hora por pulgada de diámetro para dar tiempo a que se complete el ciclo de esferoidizado, una vez terminado el ciclo es enfriado en el horno a 150°C y finalmente retirado para enfriarse totalmente en aire quieto. El tiempo requerido para un ciclo completo de esferoidización es aproximadamente una semana, incrementándose conforme aumenta el diámetro de la pieza. La estructura esferoidizada es muy suave y dúctil, en estas condiciones se obtiene el máximo grado de maquinabilidad.

c). - Recocido doble.

El rodillo es calentado a la misma velocidad que el recocido simple, pero a una temperatura mayor (500 a 550°C), se mantiene a esa temperatura el mismo tiempo que el recocido simple y después es enfriado lentamente hasta obtener la temperatura del recocido simple, se mantiene en esa temperatura como si fuera un recocido simple y después se enfría en el horno a la misma velocidad que fue calentado. El primer calentamiento rompe la estructura cristalina de vaciado y el segundo refina la estructura de grano. Este tratamiento requiere en promedio dos semanas y se obtienen los rodillos más suaves, con fineza de grano, la estructura granular es capaz de resistir fracturas en los trabajos más pesados.

d). - Normalizado.

El rodillo es calentado a razón de 3°C a 20°C por hora, dependiendo de su tamaño y sus composiciones químicas a una temperatura de 750 a 800°C; después es retirado del horno y enfriado al aire libre. El normalizado aumenta la resistencia y dureza del rodillo, pero también se aumenta su fragilidad.

e). - Temple y revenido.

Algunos rodillos son especificados para cierto grado de dureza, que se obtienen solo mediante un tratamiento térmico especial. Cuando se necesitan rodillos de alta dureza, primero es recocido, calentado luego a una temperatura adecuada a su composición y tamaño (800 a 950°C) manteniendo a esa temperatura adecuada por un tiempo dado, según sea su tamaño (una hora por cada 25 mm de diámetro). El rodillo entonces es retirado del horno y el cuerpo del mismo es templado en un medio apropiado, protegiendo sus cuellos del enfriamiento. La severidad del temple depende de la dureza deseada en el cuerpo del rodillo, puede ser aire o agua (14).

f). - Templado al agua por inducción y revenido.

Endurecimiento por inducción. La calefacción por inducción se hace pasando una corriente alterna de alta frecuencia a través de una bobina enfriada por agua o inductora alrededor de la pieza de trabajo o sobre una superficie. El campo magnético cíclico que se genera induce corrientes alternas que calientan la pieza de trabajo. La profundidad de penetración de la corriente es  $\delta = 1.98 (\rho/\mu f)^{1/2}$ , donde  $\rho$  es la resistividad,  $\mu$  es la permeabilidad magnética ( $\mu = 1$  para materiales no magnéticos) y  $f$  es la frecuencia en Hz. Mientras más baja sea la frecuencia, más profunda será la penetración y viceversa. En la realidad, la corriente no es uniforme en su profundidad completa sino cae en forma exponencial desde la superficie y calienta el metal como corresponde. La histéresis magnética se añade a este efecto en los materiales magnéticos. El acero es menos magnético a temperaturas altas y se libra del sobrecalentamiento.

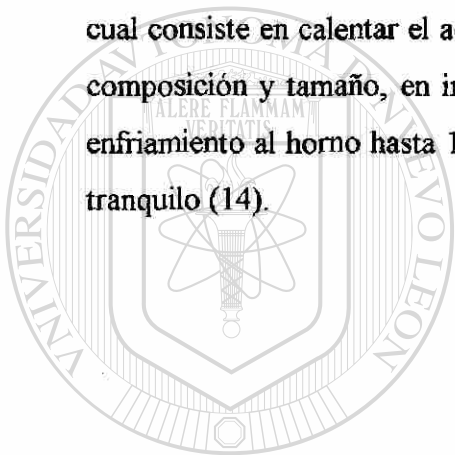
Puede endurecerse una pieza después de la calefacción por inducción (850 a 900°C) dejándola caer en un medio de enfriamiento rápido, generalmente agua con turbulencias. Puede calentarse con rapidez un área pequeña en una pieza grande y enfriarla bruscamente en forma efectiva por la masa de la pieza que elimina el calor. La profundidad de endurecimiento depende de qué tan profundamente esté austenizado el acero. Esto depende de la entrada de potencia, del tiempo, la pérdida de calor y la frecuencia de la inducción de endurecimiento. Ya que el acero no es magnético a las



temperaturas austeníticas, algunas veces es económico calentarlo con bajas frecuencias a menores temperaturas, seguidas por altas frecuencias a temperaturas más altas. Los conjuntos de motor generador son las fuentes usuales para frecuencias hasta de 10 kHz y potencias hasta 2500 kW (9).

f). - Revenido.

La formación de martensita origina grandes tensiones residuales en el acero; por tanto, el endurecimiento o temple debe ser seguido por un tratamiento de revenido, el cual consiste en calentar el acero a una temperatura de 600 a 750°C dependiendo de su composición y tamaño, en intervalos de tiempo de 3 a 40°C por hora, seguidos de un enfriamiento al horno hasta 150°C y finalmente retirado para enfriarse totalmente al aire tranquilo (14).



# UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN



DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

#### 4.4. - MAQUINADO.

El proceso de maquinado es la última operación en la fabricación de rodillos, consiste en obtener el contorno final del rodillo, apoyándose en máquinas herramienta para realizar esta operación. Las máquinas herramienta sirven a un propósito común, cortar y formar materiales, actualmente existen algunas máquinas modernas con las que se pueden obtener, en forma automática, tolerancias en sus acabados hasta de  $2.5 \mu\text{m}$  (0.0001 in). En la producción de rodillos las máquinas más utilizadas son tornos, fresadoras y rectificadoras.

El torno es una máquina herramienta que se construye sobre una bancada de construcción masiva y rígida para resistir la deflexión y la vibración. En la parte superior de la bancada a la izquierda está el cabezal que lleva una flecha o árbol que gira, la pieza de trabajo se impulsa por la flecha del cabezal. Los tornos actuales tienen motores individuales, de impulsión por lo general de velocidad constante, la impulsión del motor a la flecha pasa a través de varias combinaciones de engranes que se cambian mediante palancas o diales en el exterior del cabezal para cambiar la velocidad de la flecha. El contrapunto está en el otro extremo de la bancada desde el cabezal. Su flecha no gira pero puede moverse unos pocos milímetros a los lados y fijarse como se desee, el contrapunto entero puede moverse y fijarse en cualquier posición a lo largo de la bancada donde puede servir mejor a su propósito.

Entre el cabezal y el contrapunto está el carro que tiene varias partes que sirven para soportar, mover y controlar la herramienta cortante. El dispositivo más común para fijar una herramienta o sostén de herramienta en un torno es un simple poste porta herramienta. La operación de torneado representa el 50% del maquinado de rodillos, el proceso es sencillo, consiste en rebajar el material en diámetros exteriores de la pieza mientras se encuentra en rotación, creando un contorno circular utilizando una herramienta fija que se mueve en el carro sobre los ejes longitudinal y transversal. En estas máquinas se realizan actividades tales como, centros provisionales muertos, centros

originales muertos, preparación para inspección por ultrasonido, extracción de muestras para ensayos mecánicos y metalográficos, desbaste de espigas (semiacabado) dejando material excedente para dar el acabado final en rectificadoras. Existen tornos automatizados de control numérico, con los cuales se obtienen velocidades de maquinado muy superiores.

Las herramientas de maquinado en los inicios del siglo XX consistían en piezas sólidas de acero alta velocidad, estas piezas se fijaban directamente en el portaherramienta de la maquina, una vez que se deterioraba el filo, con la ayuda de un esmeril, se volvía a afilar. Hoy en día, las herramientas de maquinado que predominan son los insertos de carburo con recubrimiento, fabricadas por metalurgia de polvos, las cuales se sujetan en portaherramientas de acero, cuando su filo se acaba se quita, se gira para utilizarse otro filo y se vuelve a insertar en su posición, de allí viene el calificativo de inserto. Existen una gran variedad de geometrías y grados en el mercado y son aplicables para todo tipo de maquinado en el que se genera un arranque de viruta.

Las superficies planas o curvadas, interiores o exteriores, de casi todas las formas y tamaños pueden maquinarse por fresado. Esta maquina está formada por una mesa de trabajo sobre la cual se coloca la pieza de trabajo, perpendicularmente se encuentran los cabezales que sostienen los husillos donde gira la herramienta cortante comúnmente llamada piña o fresa, la cual consiste en un cuerpo rotatorio circular con arreglo de dientes múltiples. Esta máquina está diseñada para generar superficies planas o con cierto contorno curvilíneo, como los son los planos de acoplamiento en los cilindros de laminación, otras operaciones adicionales que se pueden realizar en esta maquina es el taladrado. La operación de fresado consiste en acercar la pieza sujeta en la mesa de trabajo en dirección a la herramienta que se encuentra girando, la operación de fresado no requiere de acabados ultrafinos por lo que se puede dar el acabado final en esta etapa. Los insertos de corte tienen las mismas características que los utilizados en el torneado, la única diferencia es el diseño de sus geometrías.

Los acabados finos que se requieren en los diámetros de espigas y cuerpo se obtienen en maquinas rectificadoras cilíndricas, este tipo de maquinas pueden maquinar piezas rectas, cilíndricas, partes redondas con perfiles curvos. Una rectificadora cilíndrica

simple consiste en un cabezal en el que gira una rueda de rectificado, la cual está montada en el carro transversal o en el soporte compuesto de un torno. La operación consiste en sostener la pieza de trabajo entre dos centros muertos, impulsada por un perro de arrastre colocado en el plato del cabezal de la máquina, los centros están sostenidos en el cabezal y en el contrapunto. El cabezal y el contrapunto están soportados en la bancada. La pieza de trabajo gira en sentido contrario a la rueda de rectificado, la cual se encuentra soportada en una flecha girando sobre cojinetes de ajuste muy estrecho para evitar la vibración.

Existen rectificadoras sin precisión y con precisión, las primeras se utilizan generalmente para remover material de desbaste, sin importar el acabado superficial, las rectificadoras de precisión requieren de un montaje especial para evitar las vibraciones terrestres. En la actualidad se han desarrollado máquinas rectificadoras muy sofisticadas para el maquinado de coronas en los cilindros de laminación, el control está gobernado por un programa de control numérico que tiene márgenes de error de  $1.25 \mu\text{m}$  (0.00005 in). Estas máquinas cuentan además con detector de grietas o fisuras.

La última etapa en la producción de rodillos es la preparación para embarque, la cual requiere trato especial considerando que los rodillos son herramientas de operación muy costosas y de extremada precisión. Esta etapa consiste en cubrir completamente la pieza de grasa o un líquido equivalente para evitar la oxidación, recubiertos con hule o cartón autoadherible, en algunas ocasiones forrado de maderas atravesadas a lo largo de la pieza, las cuales son sujetadas por medio del flejado (9).

## **5. – CARACTERIZACION DE LOS RODILLOS.**

### **5.1. – CLASIFICACION DE RODILLOS POR TIPO DE MOLINO**

Como se mencionó anteriormente, existen gran variedad de molinos de laminación, los cuales están formados por castillos y éstos, a su vez, utilizan diferentes tipos de rodillos lo cual da lugar al diseño de un sin número de tipos de molinos. Los molinos de laminación se diseñan de acuerdo al producto que se va a laminar considerando sus geometrías y las especificaciones del material a laminar; es por eso que todos los molinos con sus respectivos rodillos que se analizan en este trabajo son diferentes, para este estudio los molinos con sus rodillos se clasifican de la manera siguiente:

Rodillos para molinos de varilla y alambón

Rodillos para molinos de placa, lámina y tira

Rodillos para molinos de perfiles pesados

Rodillos para molinos de tubos

Rodillos para molinos de laminación en frío

### **5.1.1. – RODILLOS PARA MOLINOS DE VARILLA Y ALAMBRON**

Este molino normalmente cuenta con 18 castillos, que utilizan dos rodillos cada uno. Este molino divide su proceso de producción en cuatro etapas de reducción, de las cuales cada etapa está formada por varios castillos que utilizan rodillos con características muy semejantes.

La primera etapa de reducción la forman los castillos del número 1 al 3. La segunda etapa de los castillos 4 al 6. La tercera etapa de los castillos 7 al 12 y la cuarta etapa de acabado de los castillos 13 al 18.

El material que se va a laminar en este molino consiste de una palanquilla que proviene del proceso de colada continua, por tal motivo la etapa de desbaste primaria y reducción secundaria no se considerará en este estudio. Para algunas plantas que no cuentan con el sistema de colada continua deberán de considerarse estaciones que realicen la operación de desbaste hasta obtenerse la palanquilla.

### **5.1.2. – RODILLOS PARA MOLINOS DE LAMINA, PLACA Y TIRA.**

Este molino normalmente cuenta con 6 castillos, que utilizan cuatro rodillos, dos son de trabajo y los otros dos de apoyo, de los cuales solamente se analizarán los rodillos de trabajo. Este molino divide su proceso de producción en seis etapas de reducción, un castillo por etapa. En este proceso se utilizan rodillos de laminación muy similares en los castillos 1 al 3 y de igual manera en los castillos 4 al 6.

El material que se va a laminar en este molino consiste de un planchón que se obtiene del proceso de colada continua, por tal motivo la etapa de desbaste primaria y reducción secundaria no se considera en este estudio. Para algunas plantas que no cuentan con el sistema de colada continua deberán de considerarse estaciones que realicen la operación de desbaste hasta obtenerse el planchón.

### 5.1.3. – RODILLOS PARA MOLINOS DE PERFILES PESADOS.

Este molino normalmente cuenta con 2 castillos, que utilizan dos o tres rodillos cada uno dependiendo del diseño del molino. Este molino divide su proceso de producción en dos etapas. La primer etapa de desbaste la forma el castillo número 1, el cual recibe la pieza de trabajo en forma de lingote, el rodillo de laminación tiene maquinado en el cuerpo varios calibres para ir reduciendo el lingote a una geometría que permita su fácil maniobra en la etapa de acabado. La segunda etapa la forma el castillo 2, el cual esta calibrado con la geometría del perfil deseado, esta etapa es la de acabado.

Para las dos etapas los castillos deberán de ser reversibles para que la pieza de trabajo pueda regresar por otro calibre y de esta manera ir aproximándose a su geometría deseada.

### 5.1.4. – RODILLOS PARA MOLINOS DE TUBOS

Este molino normalmente cuenta con 6 castillos, que utilizan dos rodillos. Este molino divide su proceso de producción en tres etapas de reducción; la primer etapa se le llama de desbaste y como su nombre lo indica se realiza en un castillo desbastador, en el segundo castillo se le da la forma exterior al tubo, ya que antes de que entre a este castillo se le aplica el proceso de extruido a la pieza de trabajo para obtener el diámetro interior, en los castillos restantes se le da el acabado final al tubo.

El material que se utiliza en este molino consiste de una barra, por lo cual es necesario una etapa de desbaste, además de aprovechar esta etapa para preformar el exterior del tubo.

### **5.1.5. – RODILLOS PARA MOLINOS DE LAMINACION EN FRIO**

Existen varios tipos de este molino los hay de 3, 5 y 6 castillos, para el análisis se utilizará el de 5 castillos, que tiene dos rodillos de apoyo y dos de trabajo. En el análisis se estudiarán solamente los rodillos de trabajo, los cinco castillos utilizan el mismo tipo de rodillo por lo que las propiedades son idénticas.

El material que se trabaja en este molino es la lámina que se produce por laminación en caliente, en este proceso se obtienen mejores propiedades y menores espesores.

### **5.2. – ENSAYOS REALIZADOS.**

Con el propósito de caracterizar el material de que están hechos los rodillos se realizaron los ensayos de análisis químico, dureza, metalografía y compresión.

Las muestras se obtuvieron marcando tres ranuras perpendiculares entre sí con disco de corte en el extremo del cuerpo del rodillo y después desprendidas por golpe. Estas muestras se obtuvieron de rodillos que ya se habían vaciado y tratado térmicamente, a los cuales se les realizaron ensayos y pruebas no destructivas durante el proceso de fabricación para asegurar la calidad del producto.

#### **5.2.1. – ANALISIS QUIMICO.**

Para determinar los porcentajes de los elementos químicos que contiene la aleación se utilizó el espectrógrafo que utiliza el principio descrito en la sección 3.4. La muestra se pulió asegurándose que quedara libre de grasa y otros contaminantes.



### 5.2.2. – ENSAYO DE DUREZA.

Para determinar la dureza o resistencia a la indentación se utilizó la misma muestra pulida nuevamente a un acabado espejo asegurándose que se asiente completamente en la plataforma del durómetro.

Se utilizó el durómetro Rockwell para secciones relativamente gruesas que corresponde a la escala "C", imprimiendo en la muestra que se encuentra en reposo sobre la plataforma del durómetro un indentador de diamante y una carga de 150 Kg.

Para determinar la caída de dureza se identificó el extremo radial de la muestra y se tomaron medidas a cada 3.175 mm (1/8").

### 5.2.3. – METALOGRAFIA.

La muestra que se obtuvo de los rodillos es preparada de manera que se obtenga una superficie plana, sin ralladuras, semejante a un espejo. Para obtener estas condiciones de esmerilado la muestra se pule en una lija de banda rotatoria de grano burdo en el cual se borran todas las marcas debidas al disco abrasivo con que se cortó. Después se pule en hojas de esmeril de varios tamaños de grano empezando desde el numero 1, después el 1/0, 2/0, 3/0 y finalmente el 4/0. El pulido espejo se obtiene frotando la muestra en una rueda giratoria humedecida de óxido de aluminio cubierta con paño de billar.

Para hacer visibles las características estructurales del material se ataca con una solución de 5% de ácido nítrico disuelto en alcohol etílico (Nital 5%).

### 5.2.2. – ENSAYO DE DUREZA.

Para determinar la dureza o resistencia a la indentación se utilizó la misma muestra pulida nuevamente a un acabado espejo asegurándose que se asiente completamente en la plataforma del durómetro.

Se utilizó el durómetro Rockwell para secciones relativamente gruesas que corresponde a la escala "C", imprimiendo en la muestra que se encuentra en reposo sobre la plataforma del durómetro un indentador de diamante y una carga de 150 Kg.

Para determinar la caída de dureza se identificó el extremo radial de la muestra y se tomaron medidas a cada 3.175 mm (1/8").

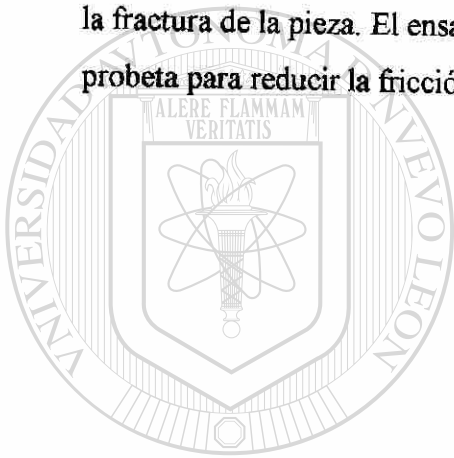
### 5.2.3. – METALOGRAFIA.

La muestra que se obtuvo de los rodillos es preparada de manera que se obtenga una superficie plana, sin ralladuras, semejante a un espejo. Para obtener estas condiciones de esmerilado la muestra se pule en una lija de banda rotatoria de grano burdo en el cual se borran todas las marcas debidas al disco abrasivo con que se cortó. Después se pule en hojas de esmeril de varios tamaños de grano empezando desde el numero 1, después el 1/0, 2/0, 3/0 y finalmente el 4/0. El pulido espejo se obtiene frotando la muestra en una rueda giratoria humedecida de óxido de aluminio cubierta con paño de billar.

Para hacer visibles las características estructurales del material se ataca con una solución de 5% de ácido nítrico disuelto en alcohol etílico (Nital 5%).

#### 5.2.4. – ENSAYO DE COMPRESION.

Se maquinó la muestra para obtener probetas redondas de 10 mm de alto por 7 mm de diámetro. El ensayo se desarrolló en una maquina de compresión aplicando cargas de hasta 8000 Kg a una velocidad de 1 mm/min ó hasta que se alcanzara el punto máximo a la fractura de la pieza. El ensayo se efectuó aplicando teflón entre las placas de apoyo y la probeta para reducir la fricción.



# UANL

---

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN



DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

## 6. – RESULTADOS Y DISCUSION.

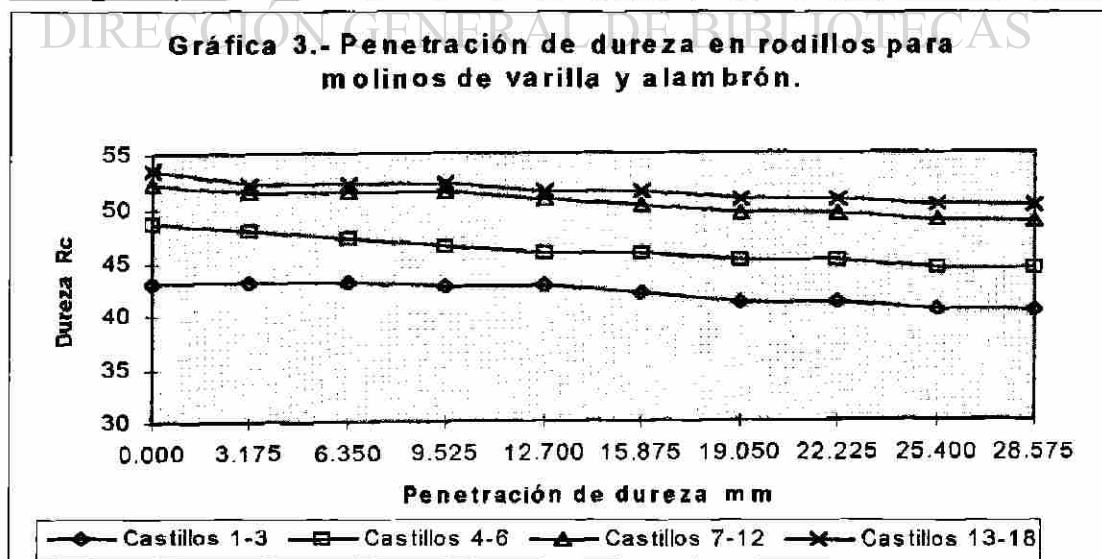
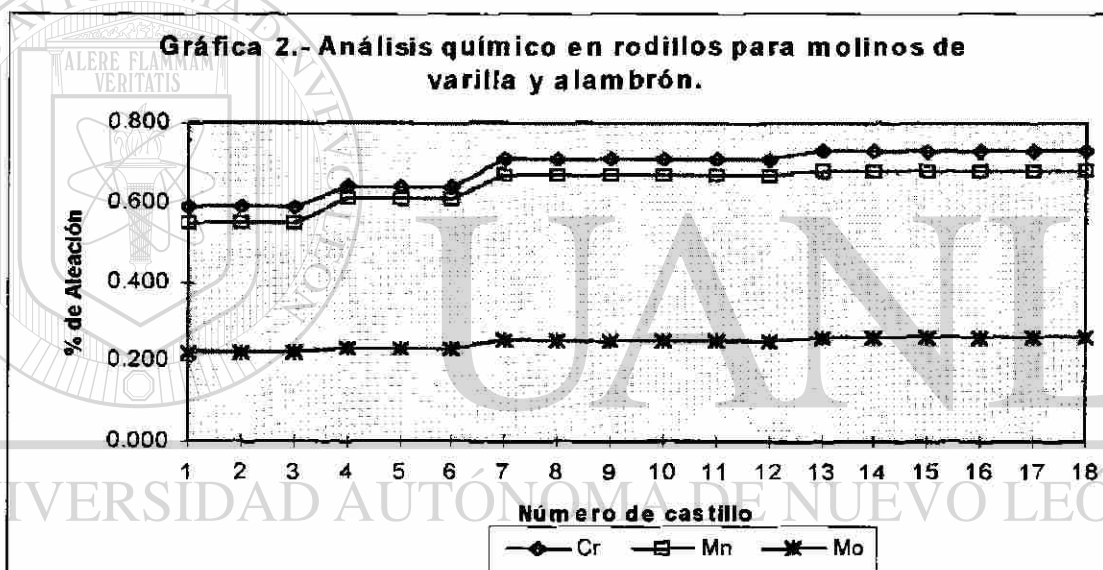
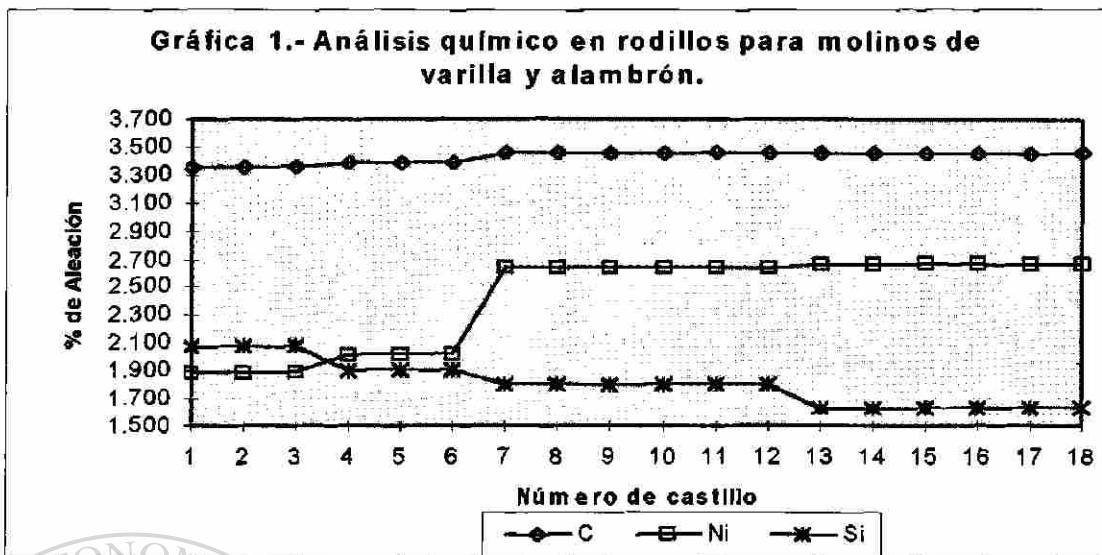
### 6.1. – RODILLOS PARA MOLINO DE VARILLA Y ALAMBRON.

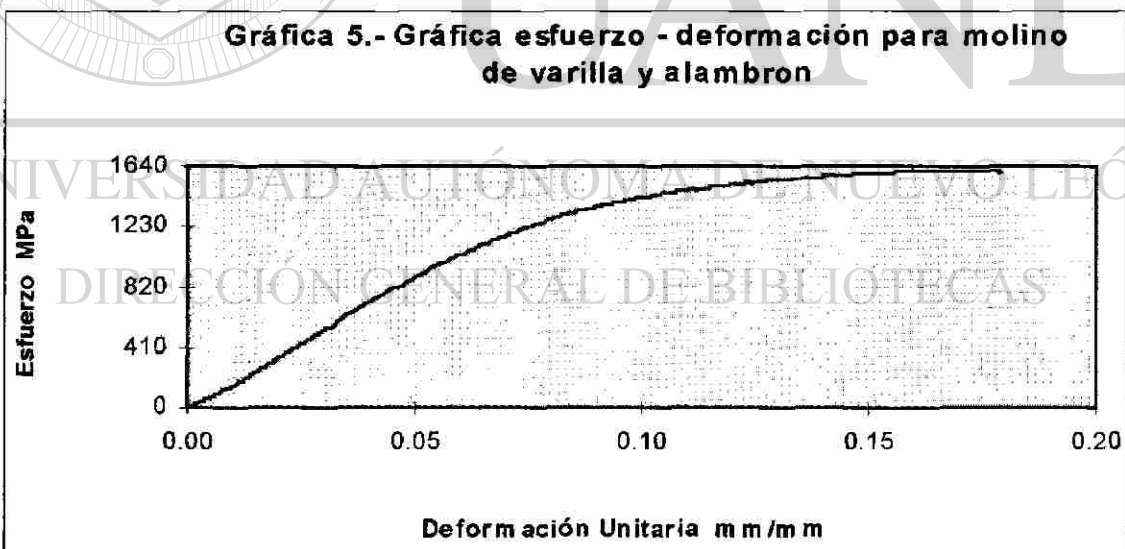
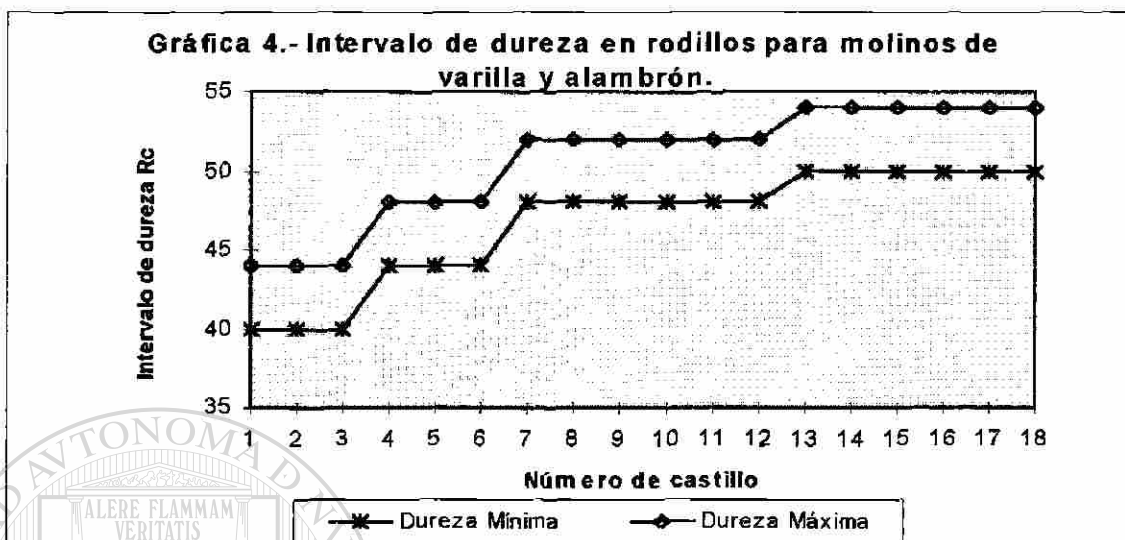
Los principales elementos encontrados en las cuatro muestras que forman los dieciocho castillos son el carbono, manganeso, silicio, cromo, níquel y molibdeno. Los porcentajes varían un poco como se muestra en las gráficas 1 y 2. El incremento de dureza exige mayores cantidades de estos elementos, el único que disminuye es el silicio. El contenido de azufre y de fósforo permanece constante, por tal motivo no se representan en las gráficas, sus porcentajes son S 0.02 y P 0.10. Existen más elementos residuales como Cu, Al, y Mg que se desprecian debido a sus bajos porcentajes.

En la superficie del cuerpo del rodillo, debido al contacto con el molde, la rapidez de enfriamiento incrementa la nucleación obteniéndose el tamaño de grano más fino, este fenómeno trae como consecuencia mayores durezas en la superficie; conforme avanza la solidificación el grano crece ligeramente y la dureza disminuye como se puede ver en la gráfica 3. El intervalo de dureza en los dieciocho castillos se puede ver en la gráfica 4.

El esfuerzo máximo que se puede aplicar a la probeta para que permanezca en la región elástica sin que sufra deformación permanente es de 1000 MPa, cuando el esfuerzo de trabajo rebasa el límite de elasticidad se obtiene la región plástica la cual tiene una deformación unitaria de .05 mm/mm. Por los datos representados en la gráfica 5, se puede decir que el hierro nodular de que están fabricados este tipo de rodillo pertenecen al grupo de materiales frágiles.

Este molino está formado por rodillos aleados de hierro nodular, en la figura 10a, se pueden ver los carburos esferoidales precipitados en la matriz perlítica con pequeñas cantidades de cementita que se revelan en las figuras 10b y 10c.





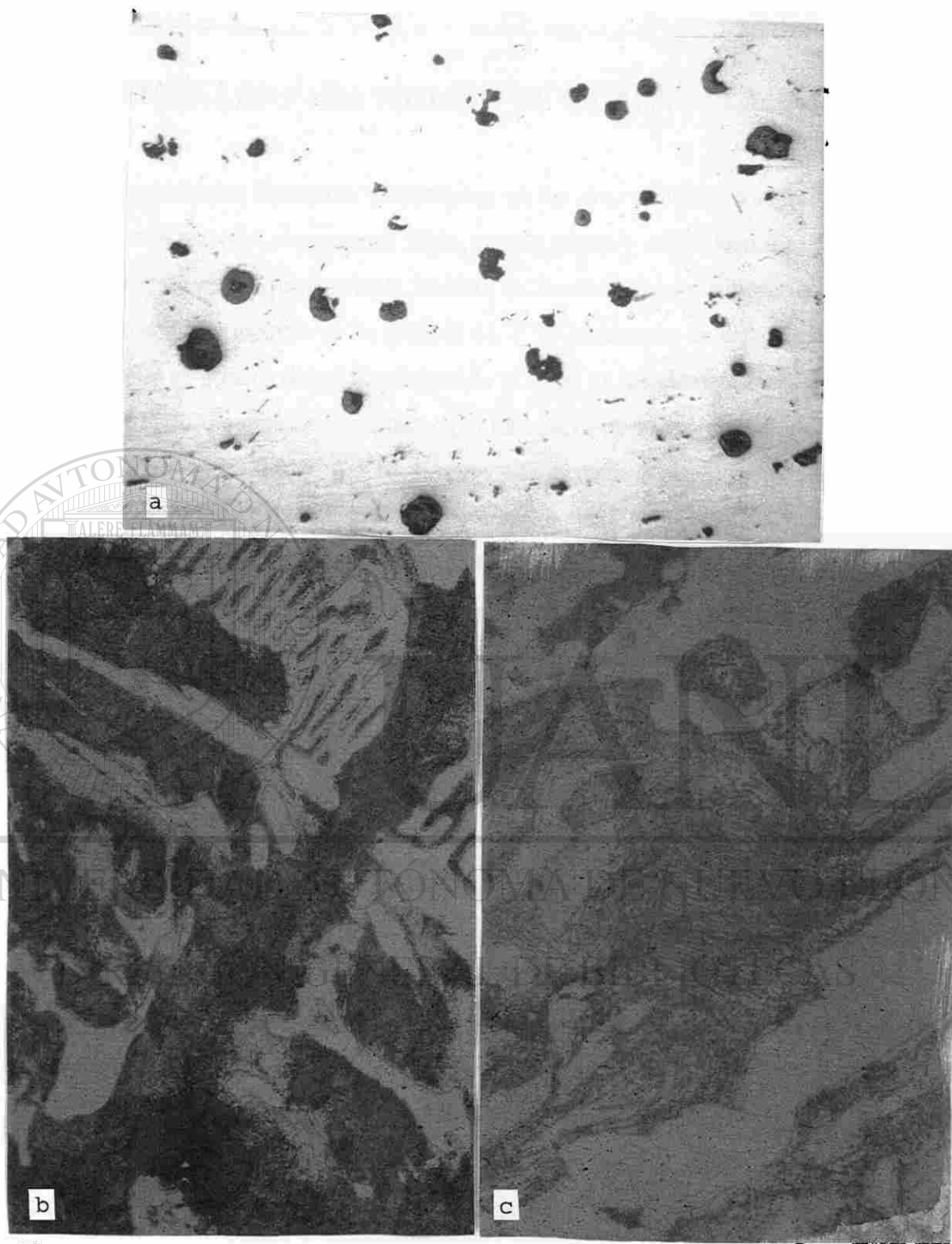


Figura 10. - Microestructura de un hierro fundido. a) Hierro nodular sin atacar químicamente, 100X. b) Matriz perlita atacada químicamente en 5% de nital, 500X. c) Matriz perlita atacada químicamente en 5% de nital, 1000X. (Cortesía de Fundación Monclova S.A)

## 6.2. – RODILLOS PARA MOLINO DE LAMINA, PLACA Y TIRA.

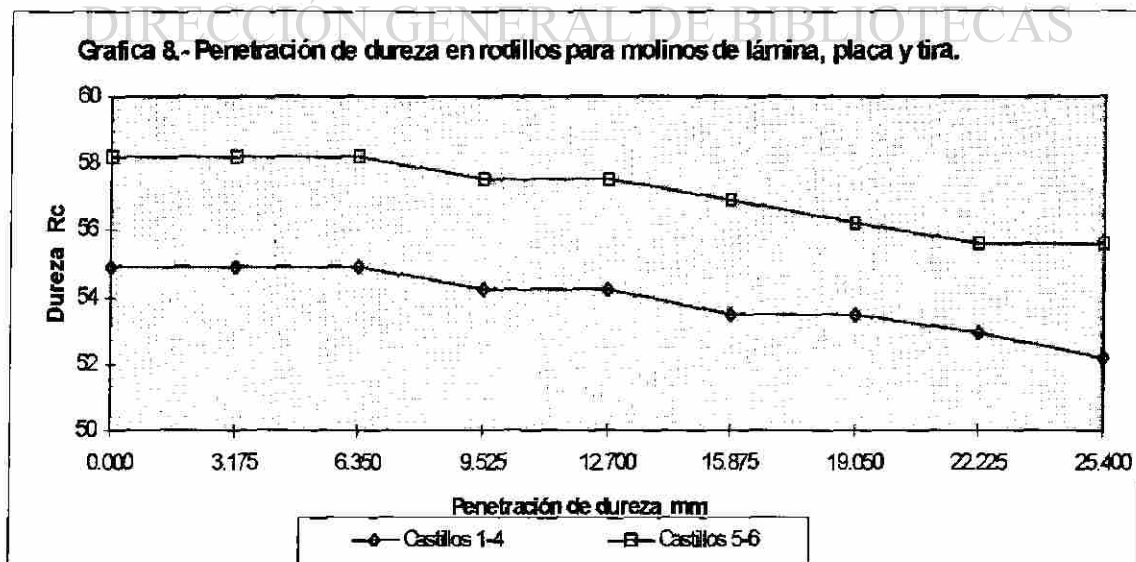
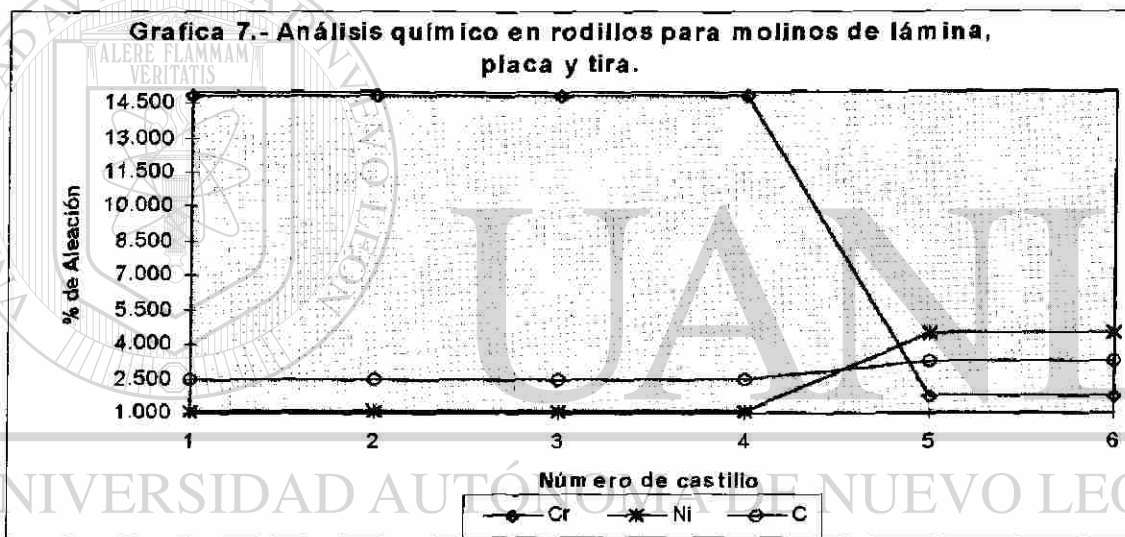
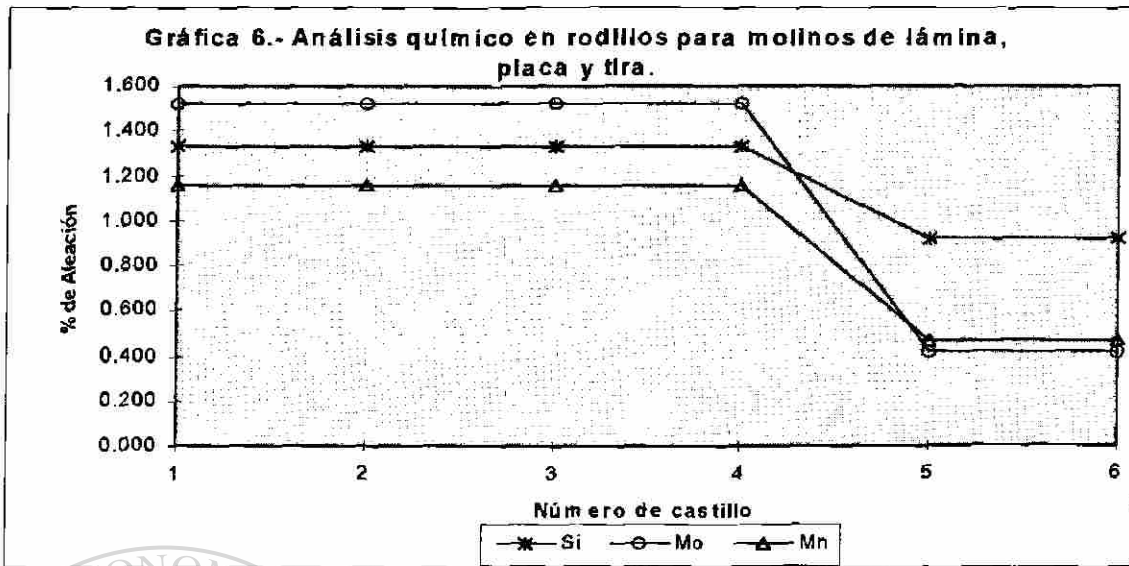
Los principales elementos encontrados en las dos muestras que forman los seis castillos son el carbono, manganeso, silicio, cromo, níquel y molibdeno. La variación del contenido de cromo es muy variable, el resto de los elementos mantiene una estabilidad ascendente como se muestra en las gráficas 6 y 7. El incremento de dureza exige mayores cantidades de carbono y níquel disminuyendo el resto de los elementos. El contenido de azufre y de fósforo permanece constante, por tal motivo no se representan en las gráficas, sus porcentajes son S 0.05 y P 0.10. Existen más elementos residuales como Cu, Al, y Mg que se desprecian debido a sus bajos porcentajes.

En la superficie del cuerpo del rodillo, debido al contacto con el molde, y al proceso de vaciado centrifugo, la rapidez de enfriamiento incrementa la nucleación obteniéndose el tamaño de grano muy fino, este fenómeno trae como consecuencia mayores durezas en la superficie; conforme avanza la solidificación el grano crece ligeramente y la dureza disminuye como se puede ver en la gráfica 8. El intervalo de dureza en los seis castillos se puede ver en la gráfica 9.

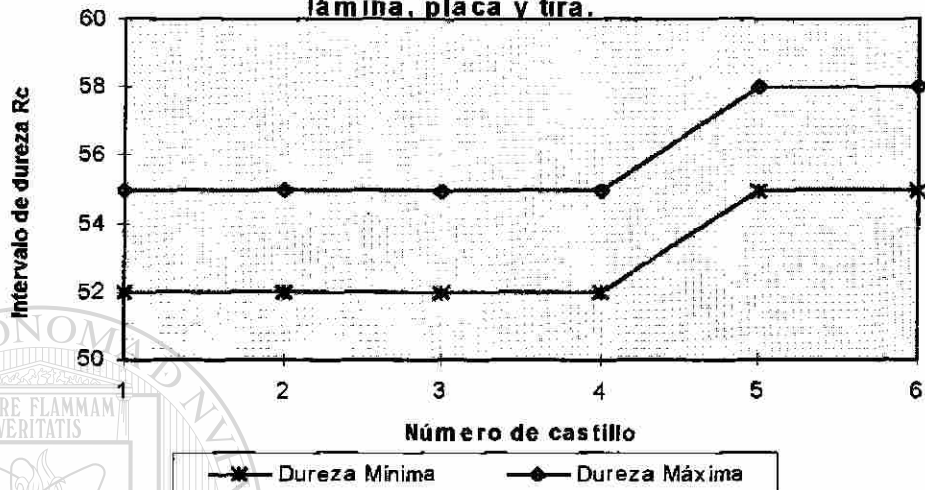
El esfuerzo máximo que se puede aplicar a la probeta para que permanezca en la región elástica sin que sufra deformación permanente es de 1400 MPa, cuando el esfuerzo de trabajo rebasa el límite de elasticidad se obtiene la región plástica la cual tiene una deformación unitaria de .06 mm/mm. Por los datos representados en la gráfica 10, se puede decir que el hierro fundido blanco de que están fabricados este tipo de rodillo pertenecen al grupo de materiales frágiles.

Este molino está formado por rodillos aleados de hierro blanco, en la figura 11a, se pueden ver los carburos esferoidales precipitados en la matriz martensítica revenida con pequeñas cantidades de cementita, este tipo de estructura la tienen los rodillos de los primeros cuatro castillos, en los castillos acabadores se tiene una estructura de martensita revenida con algo de austenita retenida (figura 11b), la cual es indeseable para las operaciones de laminado.

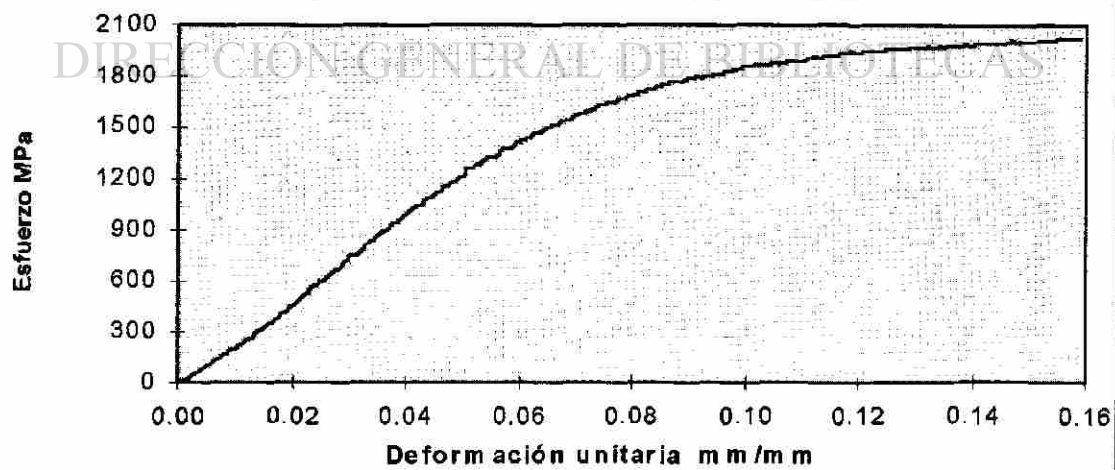




**Gráfica 9.- Intervalo de dureza en rodillos para molinos de lámina, placa y tira.**



**Gráfica 10.- Gráfica esfuerzo deformación en rodillos para molino de lámina, placa y tira**



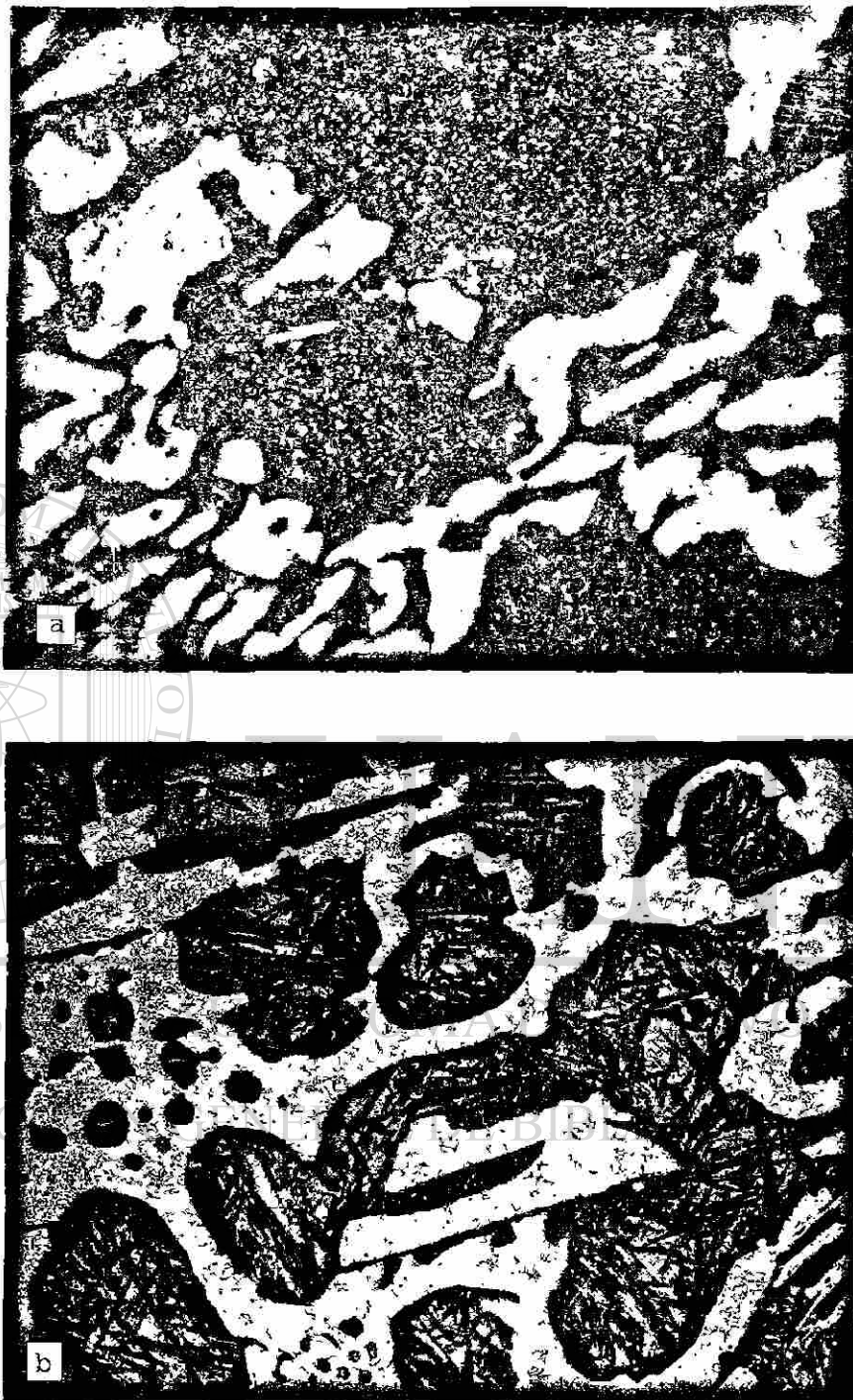


Figura 11. - Microestructura de un hierro blanco. A) Carburos esferoidales y precipitados en matriz martensita, atacado químicamente en 5% de nital, 1000X. b) Matriz martensita revenida, con algo de austenita revenida, atacado químicamente en 5% de nital, 500X. (Cortesía de Fundición Monclova S.A)

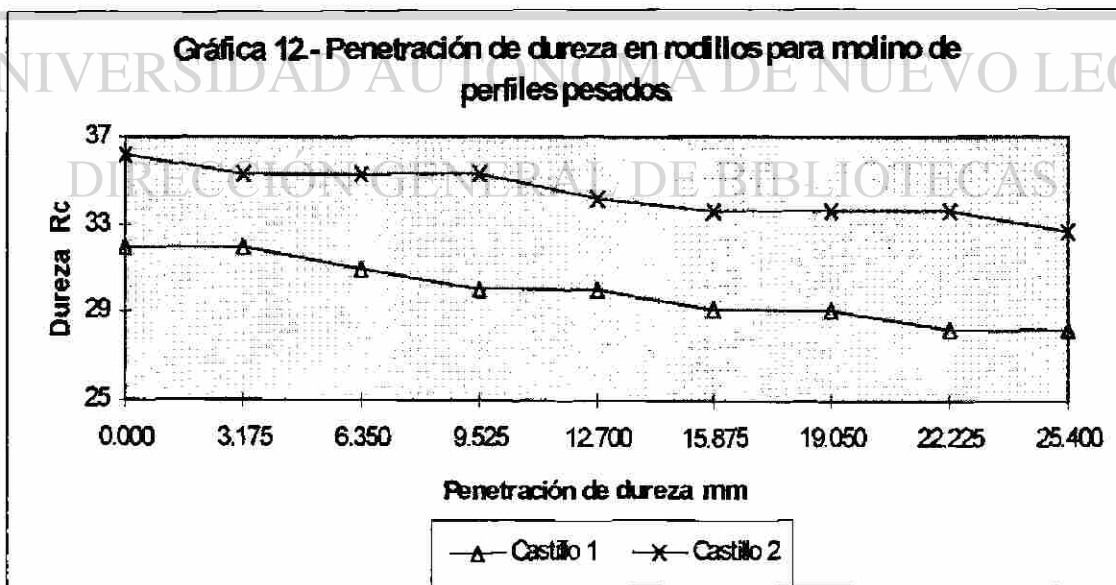
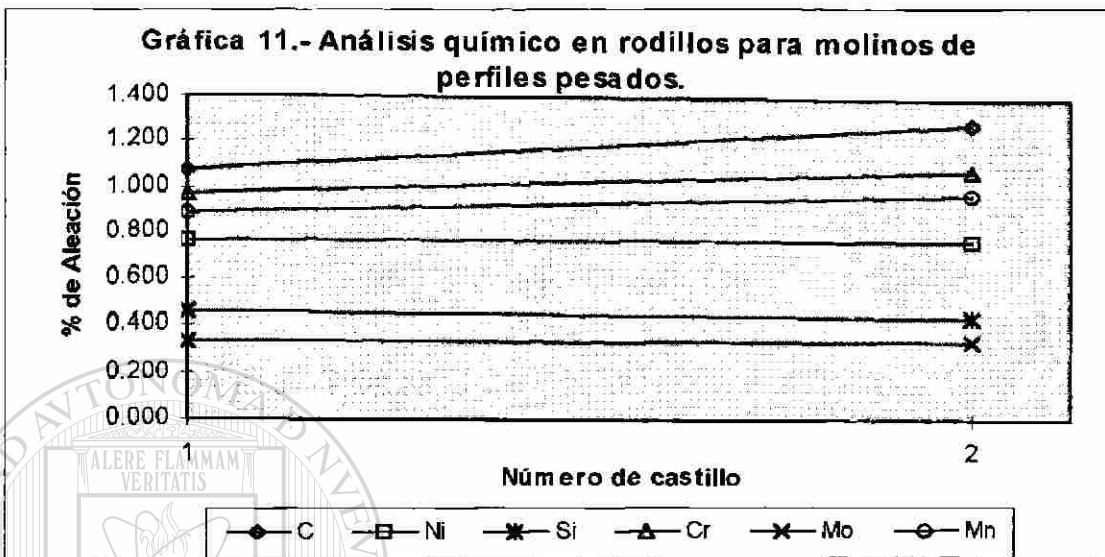
### 6.3. – RODILLOS PARA MOLINO DE PERFILES PESADOS.

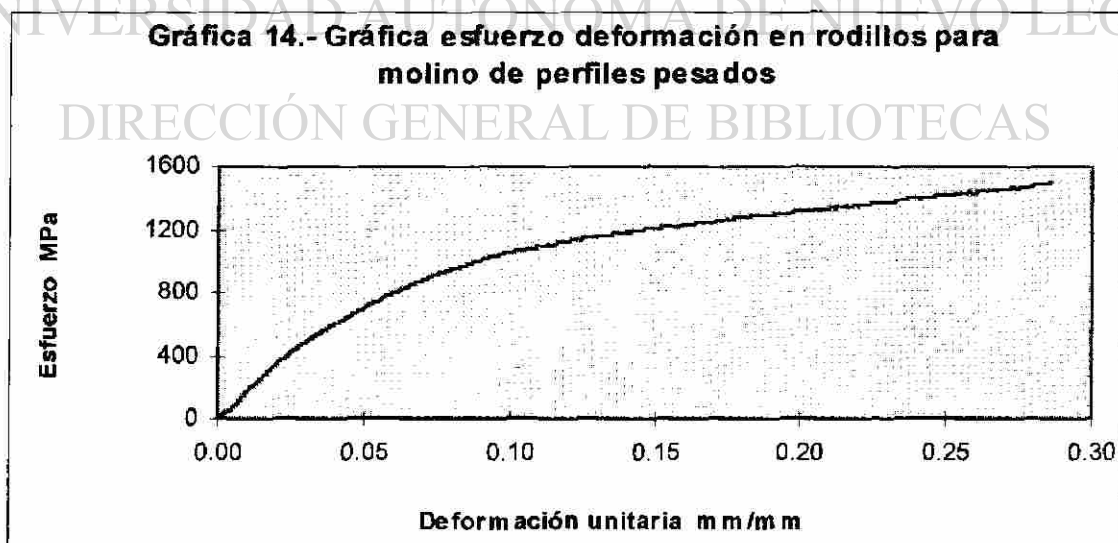
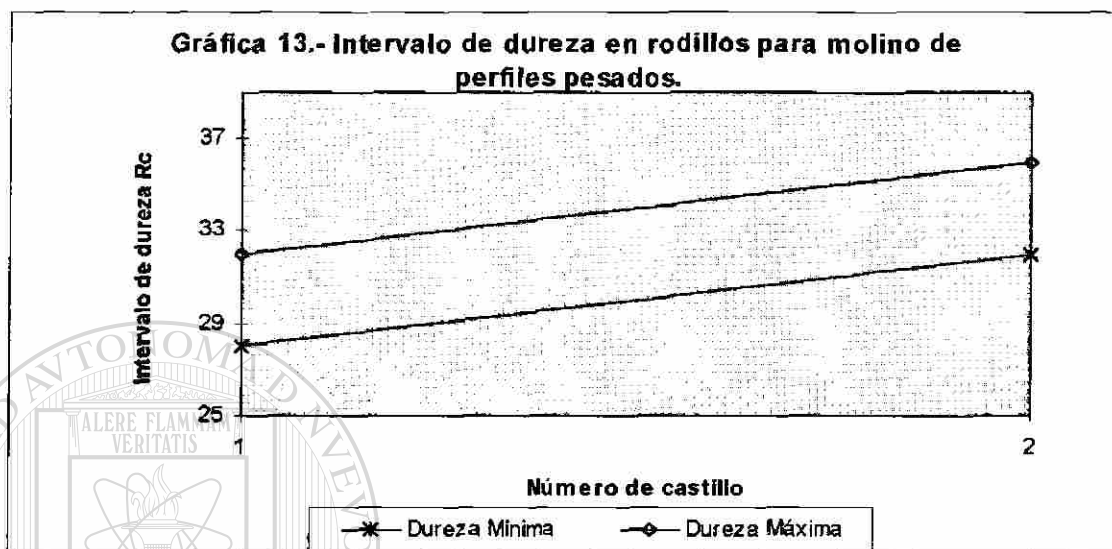
Los principales elementos encontrados en las dos muestras que forman los dos castillos son el carbono, manganeso, silicio, cromo, níquel y molibdeno. La variación de los elementos que componen la aleación es muy estable incrementándose ligeramente en el castillo acabador como se puede ver en la gráfica 11. El contenido de azufre y de fósforo permanece constante, por tal motivo no se representan en las gráficas sus porcentajes, que son S 0.06 y P 0.06. Existen más elementos residuales como Cu, Al, y Mg que se desprecian debido a sus bajos porcentajes.

Debido al tratamiento térmico de esferoidizado se obtienen durezas muy homogéneas, sin embargo existe una pequeña diferencia de dureza debido a la velocidad de enfriamiento descrita en los dos casos anteriores, este fenómeno lo representa la gráfica 12, el intervalo de dureza en los dos castillos se puede ver en la gráfica 13.

El esfuerzo máximo que se puede aplicar a la probeta para que permanezca en la región elástica sin que sufra deformación permanente es de 800 MPa, cuando el esfuerzo de trabajo rebasa el límite de elasticidad se obtiene la región plástica la cual tiene una deformación unitaria de .065 mm/mm. Por los datos representados en la gráfica 14, se puede decir que el acero vaciado de que están fabricados este tipo de rodillos pertenecen al grupo de materiales frágiles.

Este molino esta formado por rodillos de acero vaciado en el cual se puede ver una estructura de matriz perlítica con carburos esféroidales y finos precipitados (figura 12). Para los dos castillos que forman este molino se utiliza la misma estructura, variando solamente la cantidad de precipitados y su tamaño.





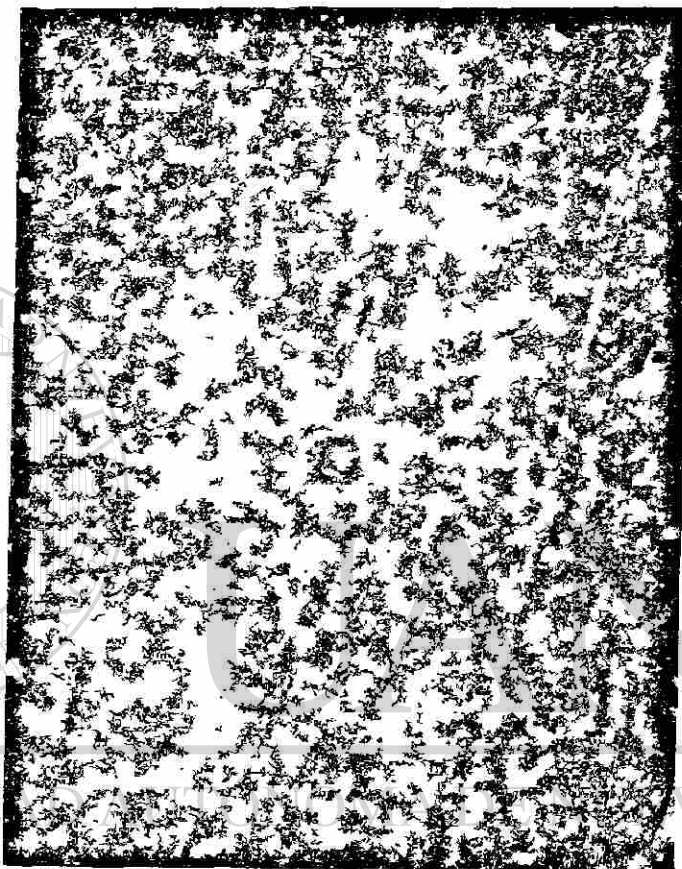


Figura 12. - Microestructura de un acero vaciado, carburos esféroidales y finos precipitados en matriz perlítica, atacado químicamente en 5% de nital, 500X. (Cortesía de Fundición Monclova S.A)

#### 6.4. – RODILLOS PARA MOLINO DE TUBOS.

Este molino esta formado por dos castillos desbastadores los cuales utilizan grados de rodillos como los que se describieron para el molino de perfiles pesados. En los castillos acabadores, conocidos algunas veces también como jaulas se utilizan rodillos de hierro nodular como los que se estudiaron en el molino de varilla y alambón.

#### 6.5. – RODILLOS PARA MOLINOS DE LAMINACION EN FRIO.

Este molino varia considerablemente en su diseño, hay molinos que utilizan tres, cuatro o cinco castillos, el diseño depende del espesor que se vaya a laminar, el grado de material utilizado en todos los castillos es el mismo. La dureza requerida para este tipo de molino es de 60 a 61 °Rc. Para obtener esta dureza se requiere de una aleación que contenga C 0.92%, Mn 0.42%, Si 0.60%, S 0.020%, P 0.020%, Cr 3.00%, Ni 0.40%, Mo 0.25%. La dureza obtenida por medio de temple es muy homogénea debido a la estructura martensitica que se obtiene (figura 13).

Para los materiales frágiles es muy difícil determinar el limite elástico, por el esfuerzo aplicado de 1200 MPa, y la deformación unitaria de 0.05 mm/mm obtenida con este esfuerzo se puede decir que el material de este rodillo es muy frágil, como se puede ver en la gráfica 15, la deformación es muy pequeña por que el material absorbe muy poca energía.



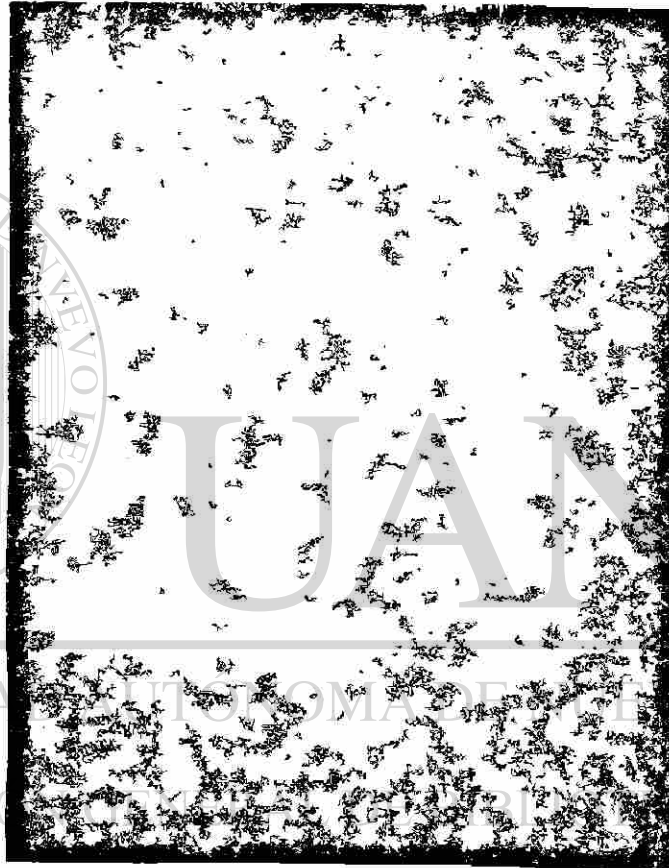
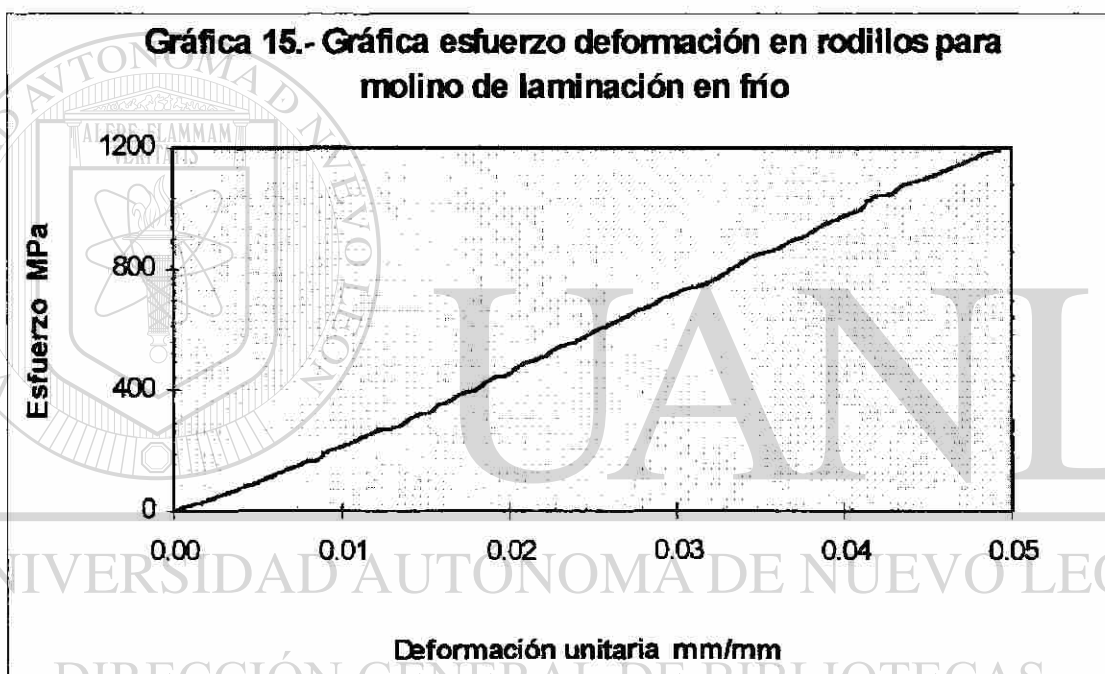


Figura 13. - Microestructura de un acero forjado, matriz martensita fina, atacado químicamente en 5% de nital, 1000X. (Cortesía de Fundición Monclova S.A)

**Gráfica 15.- Gráfica esfuerzo deformación en rodillos para molino de laminación en frío**



## **7. – CONCLUSIONES Y SUGERENCIAS PARA TRABAJOS FUTUROS.**

Los castillos de inicio que forman la etapa de desbaste requieren de rodillos con durezas menores al resto del molino. La dureza se va incrementando lentamente conforme avanza el proceso hasta obtener los rodillos de máxima dureza en los castillos acabadores. La dureza depende de la estructura metalográfica por lo cual en los castillos de desbaste se requieren de estructuras suaves y en los castillos acabadores estructuras que proporcionan mayor dureza. Los elementos químicos que forman la aleación determinan la estructura metalográfica auxiliándose con un tratamiento térmico adecuado.

La capacidad de los materiales para absorber energía y deformarse plásticamente es muy variable para cada tipo de molino y esta en función de la dureza, conforme aumenta su dureza disminuye su tenacidad, lo que hace que el rodillo se comporte como un material frágil resistente al desgaste.

Para la laminación en frío se requieren rodillos más duros con alta resistencia a la compresión debido a que el material que se deforma contiene mayor energía interna por su baja temperatura.

Para investigaciones futuras se sugiere se realice un estudio en el que se analice la fatiga que sufren los rodillos de laminación conforme se van sometiendo a los esfuerzos a altas temperaturas en los procesos de laminación.

Realizar análisis cuantitativos para establecer el efecto de los nódulos en los hierros y los precipitados de los aceros en función al rendimiento de los rodillos, para de esta manera especificar la vida útil.

**BIBLIOGRAFIA.**

(1) Annual book of ASTM Standards, Vol. 03.01 "Steel products"

ASTM, PA. USA 1991

(2) Annual book of ASTM Standards, Vol. 03.03 "Steel products"

ASTM, PA. USA 1991

(3) Annual book of ASTM Standards, Vol. 03.05 "Steel products"

ASTM, PA. USA 1991

(4) Ensayo e inspección de los materiales en ingeniería, Tercera edición

Harmer E. Davis, George Earl Troxel, Clement T. Wiskocil

---

Editorial CECSA

1964 México D.F.

(5) Flat Processing of Steel

William L. Roberts

Marcel Dekker, Inc.

1988, U.S.A

(6) Fundamentos de Metalurgia Extractiva

Terkel Rosenquist

Ed. Limusa

1987, México.

**(7) Introducción a la Metalurgia Física Avanzada**

Sydney H. Avner Segunda Edición

Mg Graw-Hill

1994, Mexico

**(8) Materiales de Ingeniería y sus Aplicaciones**

Richard A. Flinn, Paul K. Trojan

De. Mc Graw Hill

1985, México.

**(9) Materiales y Procesos de Manufactura Para Ingenieros, Tercera Edición**

Lawrence E. Doyle

De. Prentice Hall

1988, México.

**(10) Mechanical Metallurgy, Second Edition**

George E. Dieter

Ed. Mc Graw Hill

1988, México.

**(11) Producción Siderúrgica, Primera Edición**

A.T. Peters

Ed. Limusa

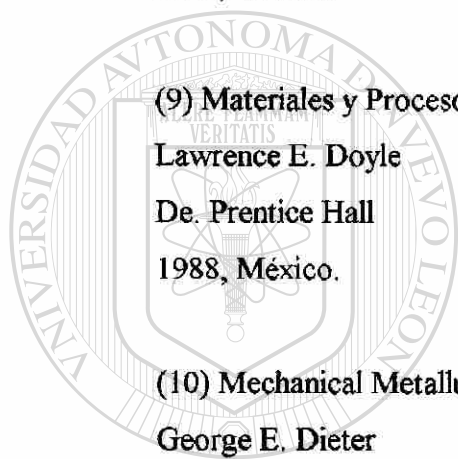
1993, México

**(12) Rool for the Metalworking Industries**

Robert B. Corbett

Iron & Steel Society

1990, U.S.A



UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN



DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

**(13) Roll Pass Design**

De. British Steel Corporation, Sheffield, England

1979, Great Britain.

**(14) Steel and its Heat Treatment, Befors Handbook**

Karl-Erik Thelning

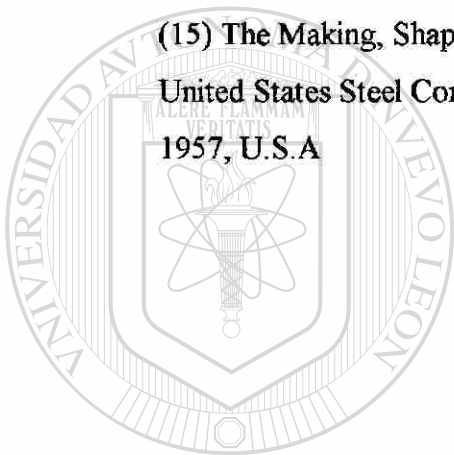
De. Cox & Wyman

Inglaterra, 1975.

**(15) The Making, Shaping and Treating of Steel, Seventh Edition**

United States Steel Corporation

1957, U.S.A



# UANL

---

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS



## FIGURAS, TABLAS Y GRAFICAS.

Figura 1. - Arreglo de rodillos en molinos de laminación .....	10
Figura 2. - Tipos de trenes con arreglos de molinos .....	13
Figura 3. - Partes principales de un molino de laminación .....	14
Figura 4. - Condiciones de entrada en los molinos de laminación .....	18
Figura 5. - Partes principales de un molino de laminación .....	21
Figura 6. - Condiciones de temperatura en la superficie del rodillo .....	29
Figura 7. - Preparación de moldes para rodillos de acero vaciado, con pases .....	67
Figura 8. - Preparación de moldes para rodillos vaciados, sin pases .....	68
Figura 9. - Clasificación de hornos eléctricos .....	74
Figura 10. - Microestructura de un hierro fundido .....	96
Figura 11. - Microestructura de un hierro blanco .....	100
Figura 12. - Microestructura de un acero vaciado .....	104
Figura 13. - Microestructura de un acero forjado .....	106

## DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

Tabla 1. - Clasificación de molinos de laminación y diagrama de flujo del acero .....	12
Tabla 2. - Clasificación de rodillos por el tipo de material y microestructura .....	22
Tabla 3. - Clasificación de rodillos por su proceso de producción .....	23

Gráfica 1. – Análisis químico en rodillos para molinos de varilla y alambón .....	94
Gráfica 2. – Análisis químico en rodillos para molinos de varilla y alambón .....	94
Gráfica 3. – Penetración de dureza en rodillos para molinos de varilla y alambón ...	94
Gráfica 4. – Intervalo de dureza en rodillos para molinos de varilla y alambón .....	95
Gráfica 5. – Gráfica esf. – def. en rodillos para molinos de varilla y alambón .....	95
Gráfica 6. – Análisis químico en rodillos para molinos de lámina, placa y tira .....	98
Gráfica 7. – Análisis químico en rodillos para molinos de lámina, placa y tira .....	98
Gráfica 8. – Penetración de dureza en rodillos para molinos de lámina, placa y tira ...	98
Gráfica 9. – Intervalo de dureza en rodillos para molinos de lámina, placa y tira .....	99
Gráfica 10. – Gráfica esf. – def. en rodillos para molinos de lámina, placa y tira .....	99
Gráfica 11. – Análisis químico en rodillos para molinos perfiles pesados .....	102
Gráfica 12. – Penetración de dureza en rodillos para molinos perfiles pesados .....	102
Gráfica 13. – Intervalo de dureza en rodillos para molinos de perfiles pesados .....	103
Gráfica 14. – Gráfica esf. – def. en rodillos para molinos perfiles pesados .....	103
Gráfica 15. – Gráfica esf. – def. en rodillos para molinos de laminación en frío .....	107



# APÉNDICE I

## Magnitudes físicas y sus unidades.

Magnitud	Símbolo	Unidad	Abreviación
Longitud		Pulgada	pulg
		Metro	m
Longitud de onda	$\lambda$	Metro	m
Masa	m	Kilogramo	kg
Tiempo	t	Segundo	s
Temperatura	T	Grados celsius	°C
		Grados Fahrenheit	°F
		Kelvin	K
Frecuencia	$\nu$	Hertz	Hz ( $s^{-1}$ )
Fuerza	F	Newton	N ( $kg\ m\ s^{-2}$ )
Esfuerzo :			
Tensión	$\sigma$	Pascal	Pa ( $Nm^{-2}$ )
Cortante	$\tau$	Libras/Pulgada <sup>2</sup>	lb/pulg <sup>2</sup> ó psi
Energía, trabajo, cantidad de calor		Julio	J ( $N\ m$ )
Potencia		Watio	W ( $J\ s^{-1}$ )
Flujo de corriente	i	Amperio	A
Carga eléctrica	q	Colombio	C ( $A\ s$ )
Diferencia de potencial, fuerza electromotriz	V,E	Voltio	V
Resistencia eléctrica	R	Ohmio	$\Omega$ ( $V\ A^{-1}$ )
Inducción magnética	B	Tesla	T ( $V\ s\ m^{-2}$ )

## APÉNDICE II

### Factores de conversión.

<b>Longitud :</b>	1 pulg = 2.54 cm = 25.4 mm 1m = 39.37 pulg 1 Å = 10 <sup>-10</sup> m
<b>Masa :</b>	1 lbm (peso - masa) = 453.6 g = 0.4536 kg 1 kg = 2.204 lbm
<b>Fuerza:</b>	1N = 0.2248 lbf (fuerza - peso) 1 lbf = 4.44 N
<b>Presión :</b>	1 Pa = 1 N/m <sup>2</sup> 1 Pa = 0.145 x 10 <sup>-3</sup> lbf/pulg <sup>2</sup> 1 lbf/pulg <sup>2</sup> = 6.89 x 10 <sup>3</sup> Pa
<b>Energía :</b>	1 J = 1 N m 1 cal = 4.18 J 1 eV = 1.60 x 10 <sup>-19</sup> J
<b>Potencia :</b>	1 W = 1 J/s
<b>Temperatura :</b>	°C = K -273 K = °C +273 °C = (°F - 32)/1.8
<b>Flujo :</b>	1 A = 1 C/s
<b>Densidad :</b>	1g/cm <sup>3</sup> = 62.4lbm/pe <sup>3</sup>

$$\ln x = 2.303 \log_{10} x$$

## APENDICE III

### Constantes

Magnitud	Símbolo	Valor
Numero de Avogadro	$N_A$	$6.023 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$
Unidad de masa atomica	$u$	$1.661 \times 10^{-24} \text{ g}$
Masa del electrón	$m_e$	$9.110 \times 10^{-28} \text{ g}$
Carga del electrón	$e$	$1.602 \times 10^{-19} \text{ C}$
Constante de Planck	$h$	$6.626 \times 10^{-34} \text{ J s}$
Velocidad de la luz	$c$	$2.998 \times 10^8 \text{ m/s}$
Constante de los gases	$R$	$1.987 \text{ cal}/(\text{mol K}); 8.314 \text{ J}/(\text{mol K})$
Constante de Boltzmann	$k$	$8.620 \times 10^{-5} \text{ eV/K}$
Permitividad del vacio	$\epsilon_0$	$8.854 \times 10^{-12} \text{ C}^2/(\text{Nm}^2)$
Permeabilidad del vacio	$\mu_0$	$4\pi \times 10^{-7} \text{ T m/A}$
Magnetón de Bohr	$\mu_B$	$9.274 \times 10^{-24} \text{ A m}^2$
Constante de Faraday	$F$	$9.6485 \times 10^4 \text{ C/mol}$
Aceleracion de la gravedad	$g$	$9.806 \text{ m/s}$
Densidad del agua		$1 \text{ g/cm}^3 = 1 \text{ Mg/m}^3$

## APENDICE IV

### Alfabeto griego.

Nombre	Minuscula	Mayuscula	Nombre	Minuscula	Mayuscula
Alfa	$\alpha$	A	Nu	$\nu$	N
Beta	$\beta$	B	Xi	$\xi$	Ξ
Gamma	$\gamma$	Γ	Omicron	$\omicron$	Ο
Delta	$\delta$	Δ	Pi	$\pi$	Π
Epsilon	$\epsilon$	Ε	Rho	$\rho$	Ρ
Dseta	$\zeta$	Z	Sigma	$\sigma$	Σ
Eta	$\eta$	H	Tau	$\tau$	Τ
Zeta	$\theta$	Θ	Ypsilon	$\upsilon$	Υ
Iota	$\iota$	I	Phi	$\phi$	Φ
Kappa	$\kappa$	K	Ji	$\chi$	Χ
Lambda	$\lambda$	Λ	Psi	$\psi$	Ψ
Mu	$\mu$	M	Omega	$\omega$	Ω

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

### Prefijos en el SI de unidades

DIRECCION GENERAL DE BIBLIOTECAS

Múltiplo	Prefijo	Simbolo
$10^{-12}$	pico	p
$10^{-9}$	nano	n
$10^{-6}$	micro	$\mu$
$10^{-3}$	mili	m
$10^{-2}$	centi	c
$10^{-1}$	deci	d
$10^1$	deca	da
$10^2$	hecto	h
$10^3$	kilo	k
$10^6$	mega	M
$10^9$	giga	G
$10^{12}$	tera	T

## APENDICE V

### Equivalencia de durezas para rodillos forjados y de acero.

Durezas aproximadas para rodillos con diámetros mayores de 152.4 mm

Shore Modelo C HS <sub>C</sub>	Shore Modelo C HFRS <sub>C</sub>	Brinell BHN	Diamond Pyramid DPH	Rockwell C HR <sub>C</sub>	Equotip HR <sub>C</sub>
100.0	105.0		940	68.0	890
98.5	103.5		919	67.4	884
97.0	102.0		899	66.9	878
95.7	100.7		879	66.3	872
94.4	99.4		860	65.7	866
93.2	98.2	739	841	65.0	860
92.2	97.2	729	823	64.4	854
91.0	96.0	719	805	63.8	848
89.8	94.8	708	788	63.2	842
88.6	93.6	698	771	62.6	836
87.4	92.4	688	755	62.0	830
86.2	91.2	677	738	61.4	824
85.0	90.0	664	723	60.7	818
83.8	88.8	656	708	60.1	812
82.8	87.8	644	693	59.5	806
81.4	86.4	630	678	58.8	800
80.2	85.2	619	664	58.2	794
79.3	84.2	605	650	57.5	788
78.2	83.0	593	636	56.9	782
77.1	81.8	581	623	56.2	776
76.0	80.6	570	610	55.6	770
74.9	79.4	558	596	54.9	764
73.8	78.2	546	586	54.2	758
72.6	77.0	534	574	53.5	752
71.7	76.0	524	562	52.9	746
70.7	75.0	515	550	52.2	740
69.0	73.8	504	539	51.5	734
68.3	72.5	493	528	50.8	728
67.4	71.5	483	517	50.1	722
66.3	70.4	474	507	49.4	716
65.3	69.3	463	497	48.6	710
64.5	68.5	454	487	47.9	704
63.8	67.3	445	477	47.2	698
63.3	66.3	436	467	46.4	692
62.1	65.5	429	458	45.7	686
60.9	64.3	421	448	45.0	680
60.1	63.4	411	439	44.2	674
58.8	62.1	405	430	43.4	668
57.7	60.9	397	421	42.7	662
57.0	60.2	389	413	41.9	656
56.2	59.3	382	404	41.1	650
55.2	58.3	373	396	40.3	644
54.0	57.0	367	388	39.5	638
53.2	56.2	359	380	38.7	632
52.2	55.2	352	372	37.9	626
51.4	54.3	344	364	37.0	620
50.4	53.2	338	357	36.2	614
49.2	51.9	330	349	35.3	608
48.2	50.8	321	342	34.2	602
47.7	50.2	316	334	33.6	596
46.9	49.3	308	327	32.7	590
46.2	46.5	300	320	31.9	584
45.5	47.7	294	313	31.0	578
44.5	46.6	286	306	30.0	572
43.6	45.6	280	299	29.1	566
43.0	44.9	273	293	28.2	560

## GLOSARIO DE TERMINOS.

**Abrasivo.-** Sustancia empleada para esmerilar, incluye materiales naturales como gránete, esmeril, corindon, y diamante.

**Alimentador.-** Conducto que transporta el metal en estado liquido hasta depositarse en el molde.

**Barra.-** Terminología utilizada para describir una pieza de acero que se esta laminando.

**Calibre.-** Ranuras maquinadas en el cuerpo del rodillo, en el cual se le dará la forma deseada a la barra.

**Castillo.-** Armazón de una sola pieza que soporta las cargas del proceso de laminación aplicadas a los rodillos. Conocido también como estante o caja.

**Chumaceras.-** Dispositivo mecánico que sirve de armadura a los baleros, en esta parte se ensambla la espiga del rodillo.

**Enfriadores.-** Placas de hierro fundido las cuales se colocan insertadas en la arena del molde para proporcionar una pequeña aceleración en la solidificación. Además de obtener mejores propiedades mecánicas.

**Entrehierro.-** Separación que existe entre los dos molinos de trabajo.

**Escleroscopio.-** Instrumento comúnmente empleado para medir la dureza de los rodillos.

**Espiga motriz.-** Parte del rodillo donde se le aplica el torque para hacerlo girar. Cuando se vacía el rodillo esta espiga es la que se encuentra en la parte inferior del molde.

**Espiga cope.-** Es la parte del rodillo que se encuentra libre completamente, esta espiga es la que se encuentra en la parte superior del molde al momento de ser vaciado.

**Forja.-** Deformación plástica de un metal, mediante la aplicación de fuerzas de compresión.

**Homogenizar.-** Conservar a alta temperatura para eliminar o disminuir la segregación química por difusión.

**Horno de inducción.-** Horno eléctrico de corriente alterna en el que el conductor primario esta embobinado y genera por inducción electromagnética una corriente secundaria que produce calor dentro de la carga de metal.

**Inclusiones.-** Materiales no metálicos en una matriz sólida metálica.

**Indentador.-** Penetrador de forma especifica, utilizado en un probador de dureza para metales.

**Inserto.-** Herramienta obtenida por metalurgia de polvos, se utiliza para cortar metal empotrándola en un porta herramienta.

**Inspección no destructiva.-** Inspección mediante métodos que no destruyen la pieza para determinar su conveniencia de uso.

**Laminación.-** Proceso de conformación de los metales por compresión directa, efectuado al hacer pasar a la pieza de metal entre dos rodillos.

**Metalografía.**- Ciencia que estudia la constitución y estructura de los metales.

**Microestructura.**- Estructura de metales pulidos y atacados químicamente, revelados por un microscopio.

**Molde permanente.**- Molde de metal, de dos o más piezas que se utiliza repetidamente para producir muchas piezas de la misma forma.

**Molino.**- Equipo mecánico que consta del castillo, rodillos, transmisión, motor, herrajes y equipos auxiliares.

**Paleta.**- Es la parte que forma el extremo del rodillo; en esta sección se sujeta el cople que induce el torque al rodillo.

**Paso.**- Es el nombre que se le asigna al proceso de laminado en cada castillo.

**Rechupe.**- Finos orificios o poros dentro de un metal.

**Rodillo.**- Cilindro de metal aleado, se instala en el castillo para desempeñar su función de conformado.

**Tabla.**- Nombre con el cual se le conoce también al cuerpo del rodillo, este término describe la capacidad máxima que tiene un molino para laminar.

**Templadera.**- Caja de moldeo que ejerce un efecto templante a las piezas vaciadas.

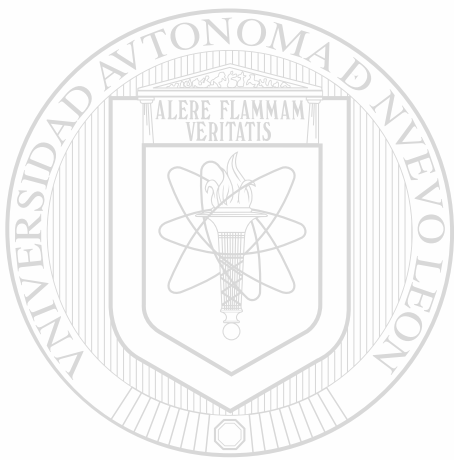
**Torque.**- Fuerza aplicada por un mecanismo en sentido circular para hacer girar al rodillo.



**Tolva.-** Deposito donde se almacena el metal liquido al momento de estar vaciando.

**Tratamiento térmico.-** Calentar y enfriar un metal o aleación sólida en tal forma que se obtengan las condiciones o propiedades deseadas.

**Tren.-** Conjunto de varios molinos que trabajan simultáneamente.



# UANL

---

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN



DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

## RESUMEN AUTOBIOGRAFICO.

La tesis "Caracterización y análisis de rodillos de laminación en caliente y frío", realizada por el Ing. Rumualdo Servin Castañeda, es un estudio desarrollado para obtener el grado de maestro en ciencias de la ingeniería mecánica con especialidad de materiales.

El autor de la presente nació el 7 de Febrero de 1971, en el poblado de San Felipe, Guanajuato. Hijo del Sr. Antonio Servin Barrientos y la Sra. Virginia Castañeda Cabrera; obtuvo el título de Ingeniero mecánico eléctrico especialidad eléctrica electrónica (Cédula 1896649) otorgado por la Universidad Autónoma de Coahuila (UA de C), después de haber aprobado el plan de estudios en la Escuela de Ingeniería Mecánica y Eléctrica (EIME) en la ciudad de Monclova, Coahuila.

Actualmente se desempeña como empleado de operación en Fundición Monclova, S.A; empresa de la rama metal mecánica, ubicada en presidente Carranza interior A No.150, Frontera, Coahuila.

El autor.



---

Ing. Rumualdo Servin Castañeda

Frontera, Coahuila. Diciembre 1999.

