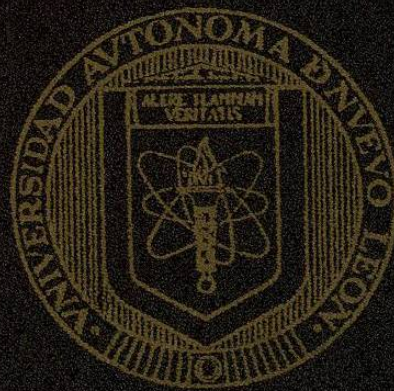


UNIVERSIDAD AUTONOMA DE NUEVO LEON

FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA Y ELECTRICA

DIVISION DE ESTUDIOS DE POST – GRADO



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

POR

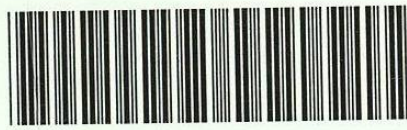
ING. RUMUALDO SERVIN CASTAÑEDA

**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.

ARMACI E RINACI ONI DI AMMIDIO
SISIDORODI, OSIDE
RSC
1999

TM
Z5853
.M2
FIME
1999
S4

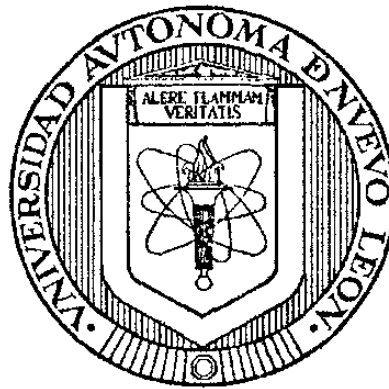


1020130057

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.

0135 49660

7H
ZS85
.M2
IME
1999
S4

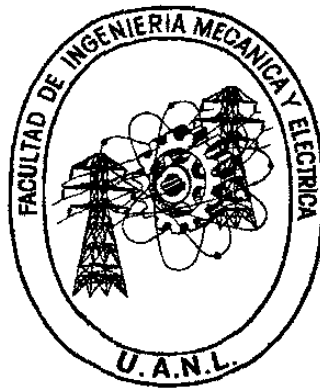


FONDO
TESIS

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**

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.

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

Fundición 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 alambra, 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
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
.	

5. – Caracterización de los rodillos	87
5.1. Clasificación de rodillos por tipo de molino	87
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
5.2. Ensayos realizados	90
5.2.1 Analisis químico	90
5.2.2 Ensayo de dureza	91
5.2.3 Metalografía	91
5.2.4 Ensayo de compresión	92
.	
6. - Resultados y Discusión.	93
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
.	
7. - Conclusiones y sugerencias para trabajos futuros.	108
.	
Bibliografía.	109
Figuras, tablas y gráficas.	112
Apéndices.	114
Glosario de términos.	119
Resumen autobiográfico.	123
.	

1. - INTRODUCCIÓN.

1.1 DESCRIPCION 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.

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 prepararán de acuerdo a los criterios establecidos por la ASTM (American Society for Testing Materials). Los resultados se representarán 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).

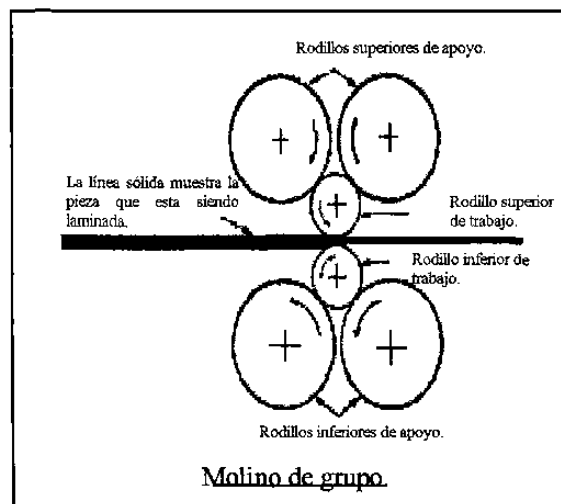
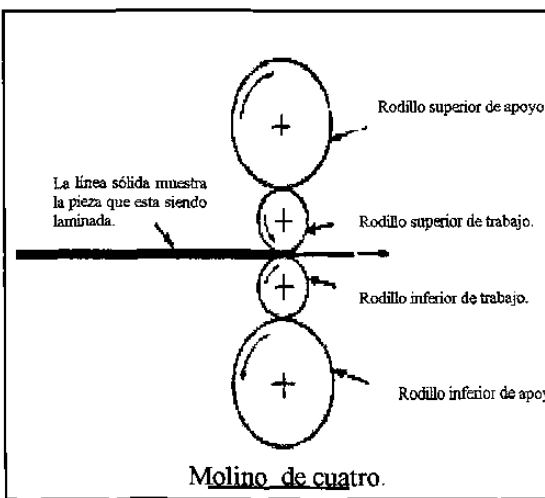
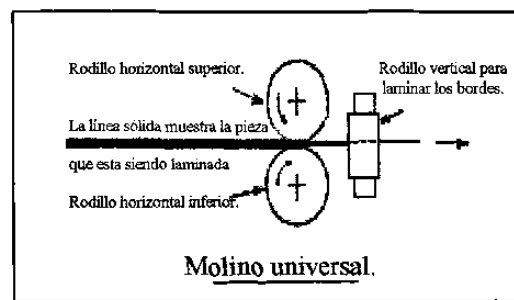
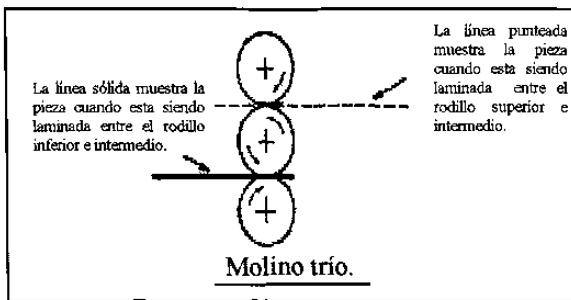
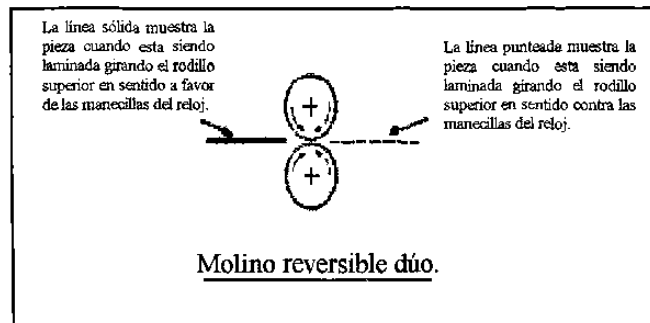
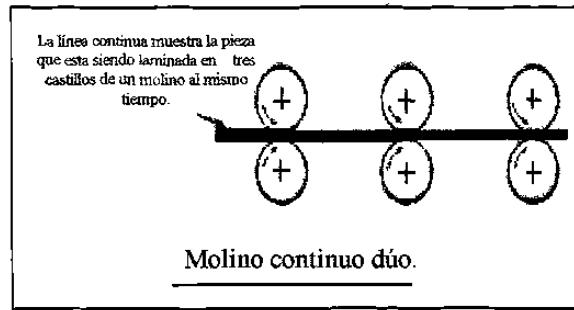
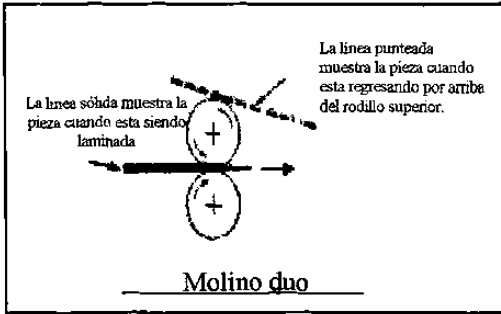


Figura 1. Arreglo de rodillos en molinos de laminación.
 (Según; The Making, Shaping and Treating of Steel; United States Steel Corporation) (15)

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 alambión, 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".

Cuando 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).

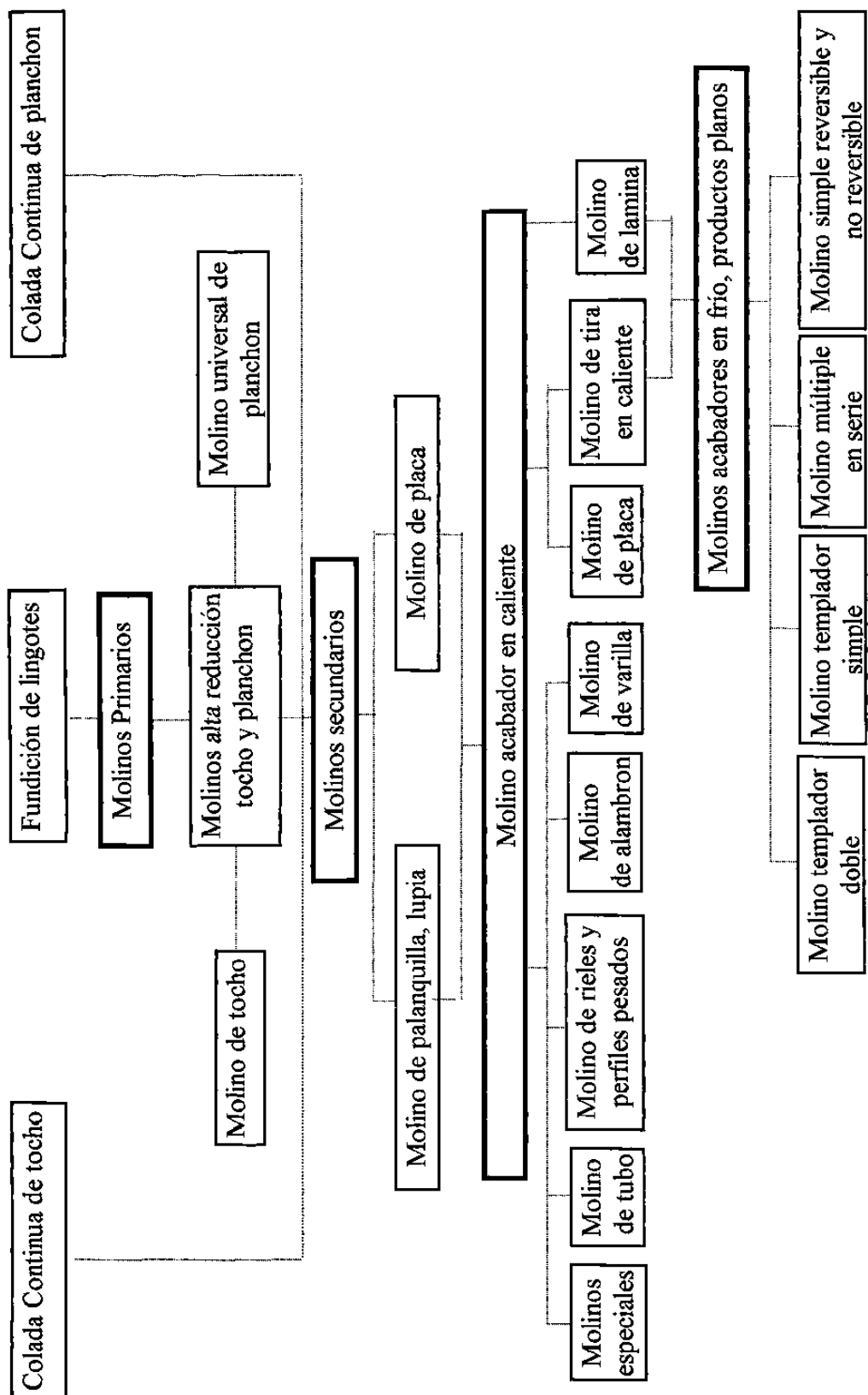


Tabla 1. - Clasificación de molinos de laminación y diagrama de flujo del acero.
 (Según; Robert B. Corbett; Roll for the Metalworking Industries; Iron & Steel Society)

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).

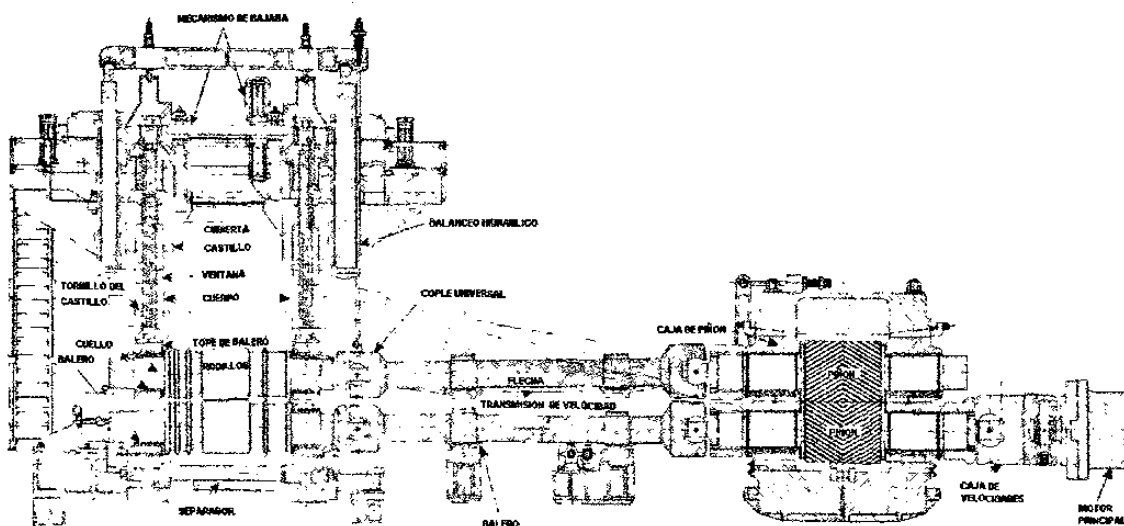


Figura 3. Partes principales de un molino de laminación.
(Según; The Making, Shaping and Treating of Steel; United States Steel Corporation) (15).

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.

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.

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° , para que la barra sea aceptada, con ángulos mayores se comienza a tener problemas en la laminación (13).

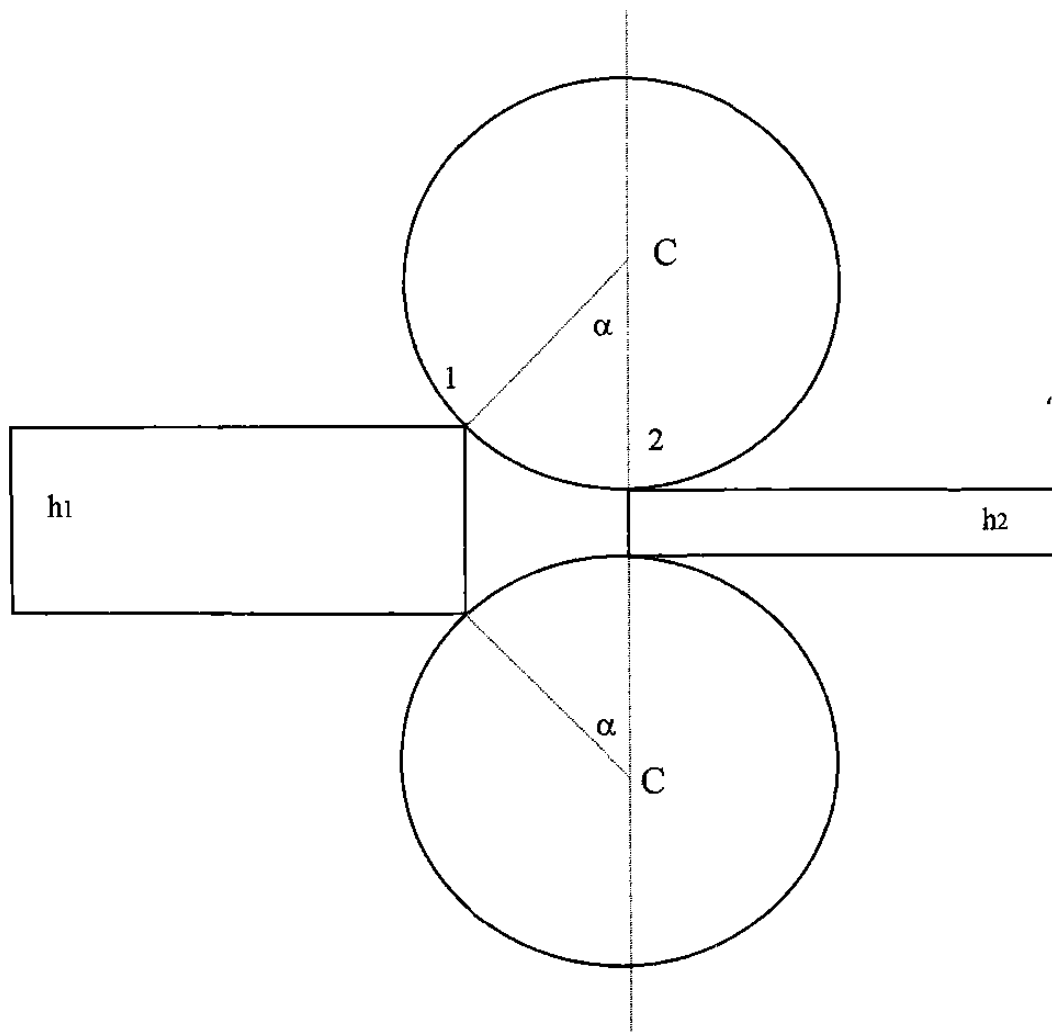


Figura 4. Condiciones de entrada en los rodillos de laminación.
(Según; Roll Pass Design; de British Steel Corporation) (13).

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 Boch, 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.

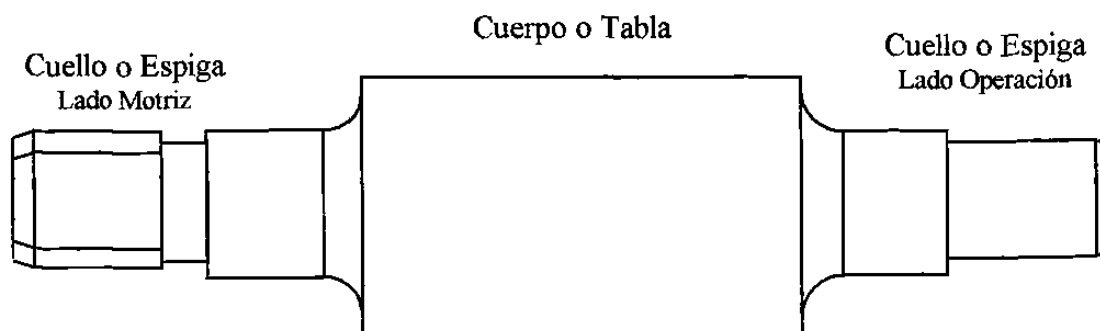


Fig. 5. Partes principales de un rodillo de laminación.
(Según; Robert B. Corbett, Roll for the Metalworking Industries; Iron & Steel Society) (12).

3.2. - CLASIFICACIÓN DE LOS RODILLOS DE LAMINACIÓN.

Los rodillos de laminación se clasifican considerando algunas especificaciones. La primer 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).

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.

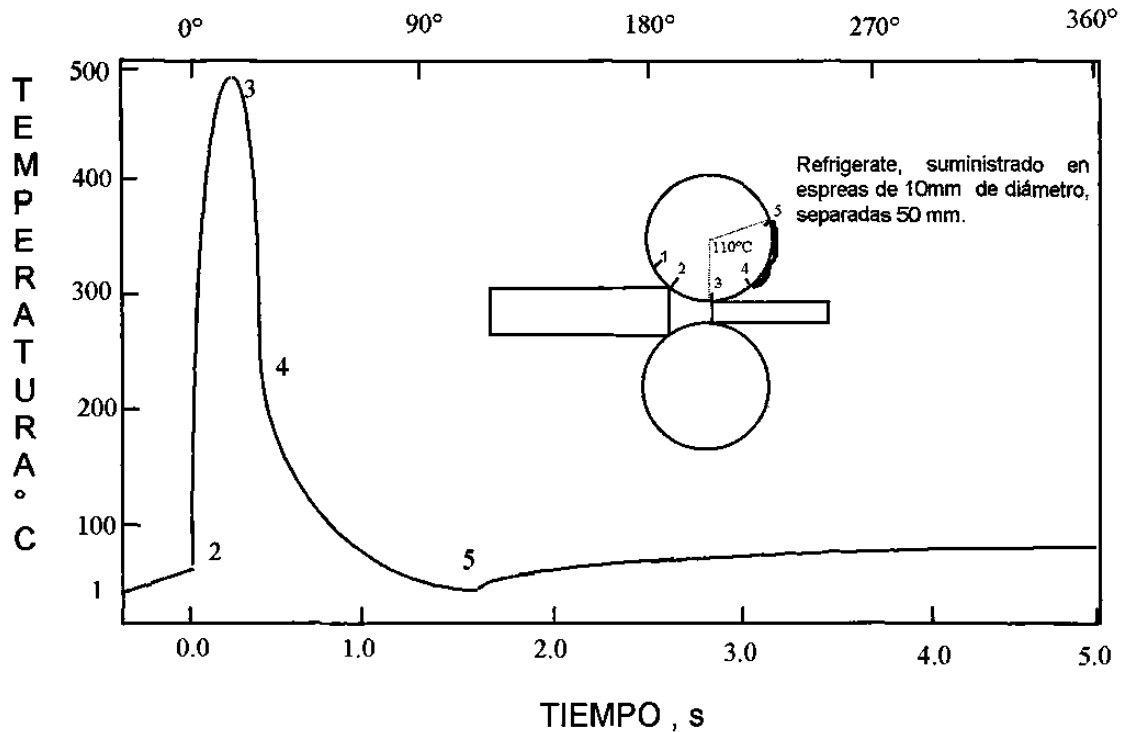


Figura 6. Condiciones de temperatura en la superficie del rodillo.
(Según; William L. Roberts; Flat Processing of Steel; Marcel Dekker) (5).

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 = 6.626×10^{-34} J seg.

C= Velocidad de la luz= 2.998×10^8 m/seg.

λ = 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)

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/pulg²) 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.

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 a cabo 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.

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°, 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°30' y ángulos transversales de 130°. 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).

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 ϵ , 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.

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 θ , 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).

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).

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 E23 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 practicas 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