

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 rectificada, 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).

**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).

## **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 de 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 ( $\text{Si}_8\text{O}_{20}\text{Al}_{14}(\text{OH})_4\text{OH}_2\text{O}$ ).

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 termino 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 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.

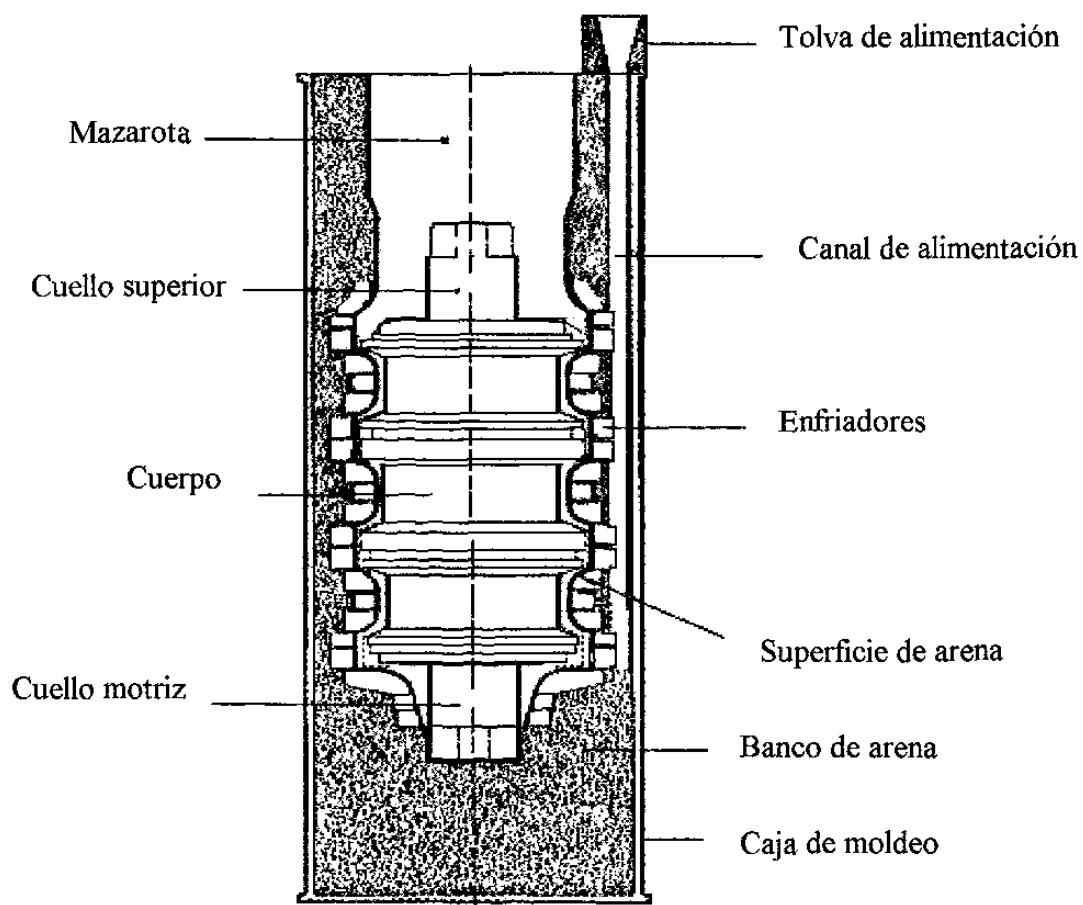


Figura 7. Preparación de moldes para rodillos de acero vaciado, con pasas.  
(Según; Robert B. Corbett; Roll for the Metalworking Industries; Iron & Steel Society) (12).

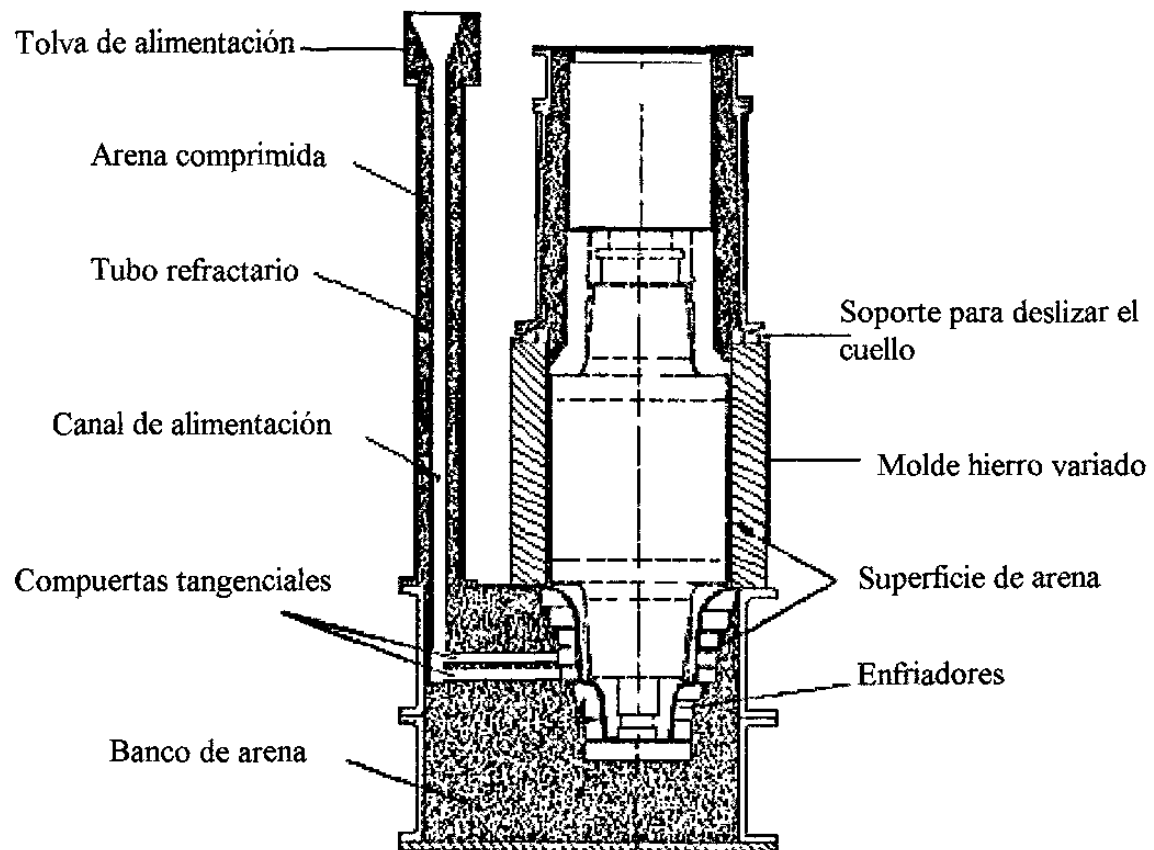


Figura 8. Preparación de moldes para rodillos vaciados, sin pasas.  
 (Según; Robert B. Corbett; Roll for the Metalworking Industries; Iron & Steel Society) (12).

#### **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.

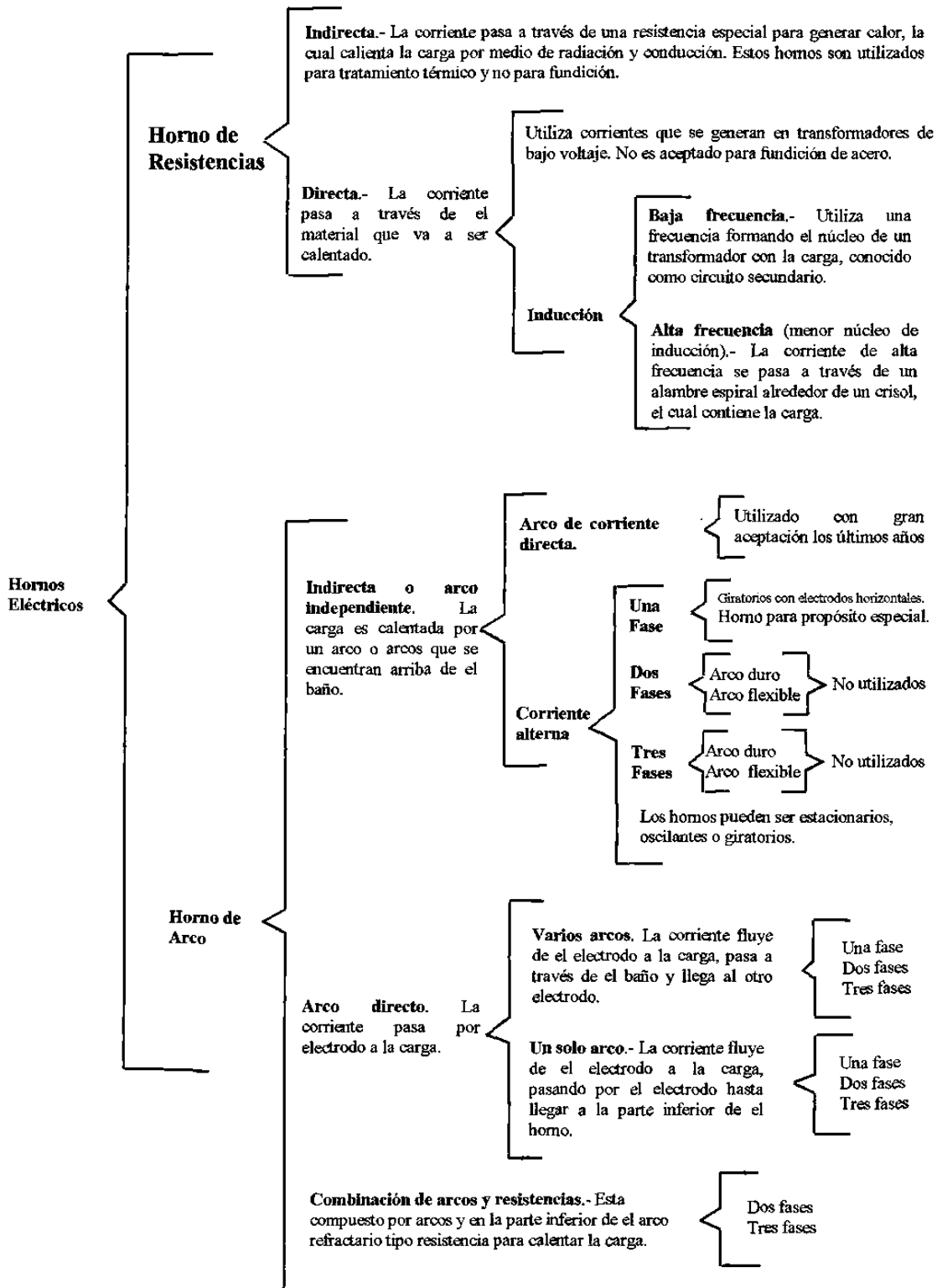


Figura 9. Clasificación de hornos eléctricos  
 (Según; The Making, Shaping and Treating of Steel; United States Steel Corporation) (15).

**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 continúa 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  $(\text{Btu plg})/(\text{°F Hr pie}^2)$ . 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 movable 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 al 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 de 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).

#### 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 maquina, 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 maquinas 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 alambrón
- 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 primer etapa de reducción la forman los castillos del numero 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 analizaran 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.

## **6. – RESULTADOS Y DISCUSION.**

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

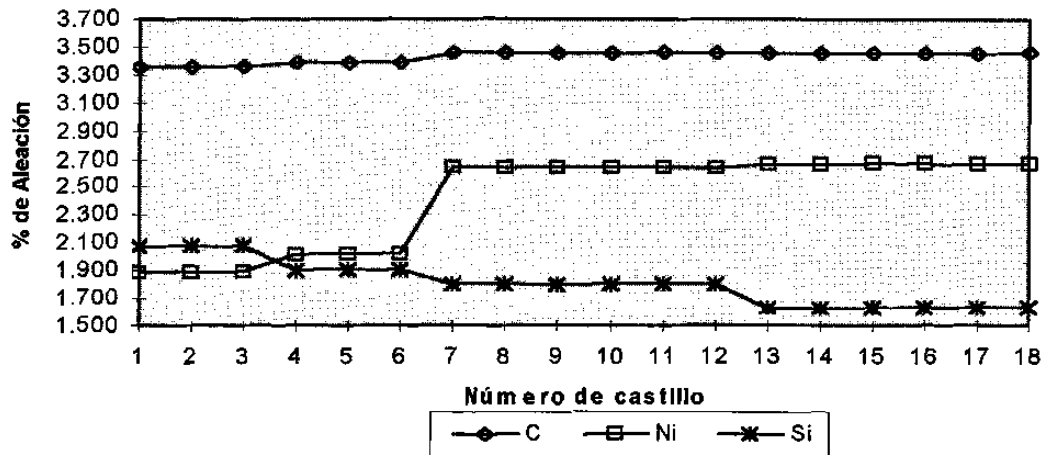
Los principales elementos encontrados en las cuatro muestras que forman los dieciocho castillos son el carbono, manganeso, silicio, cromo, níquel y molibdeno. Los porcentajes varían un poco como se muestra en las gráficas 1 y 2. El incremento de dureza exige mayores cantidades de estos elementos, el 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.

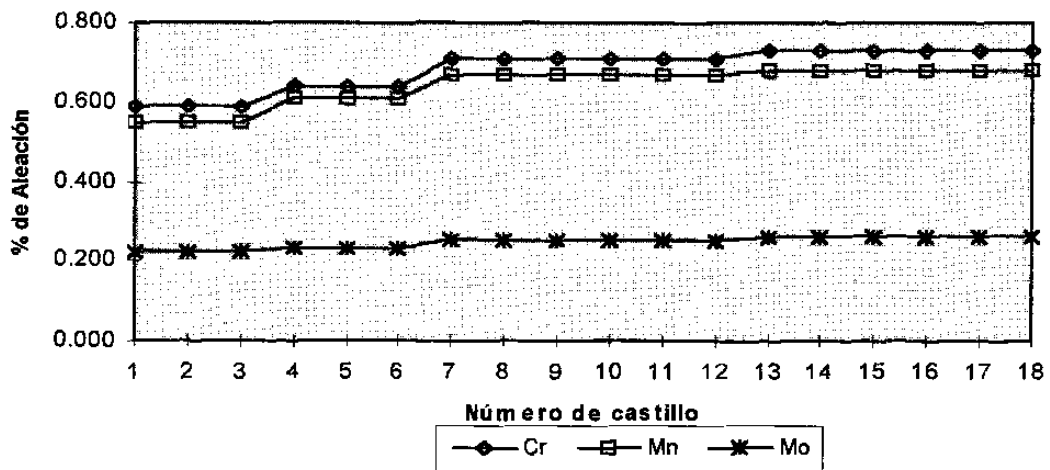
El esfuerzo máximo que se puede aplicar a la probeta para que permanezca en la región elástica sin que sufra deformación permanente es de 1000 MPa, cuando el esfuerzo de trabajo rebasa el límite de elasticidad se obtiene la región plástica la cual tiene una deformación unitaria de .05 mm/mm. Por los 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.

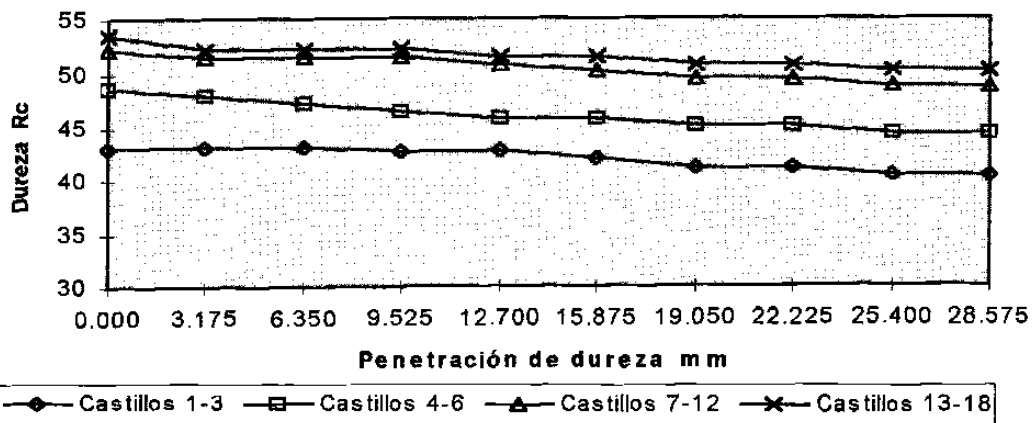
**Gráfica 1.- Análisis químico en rodillos para molinos de varilla y alambón.**



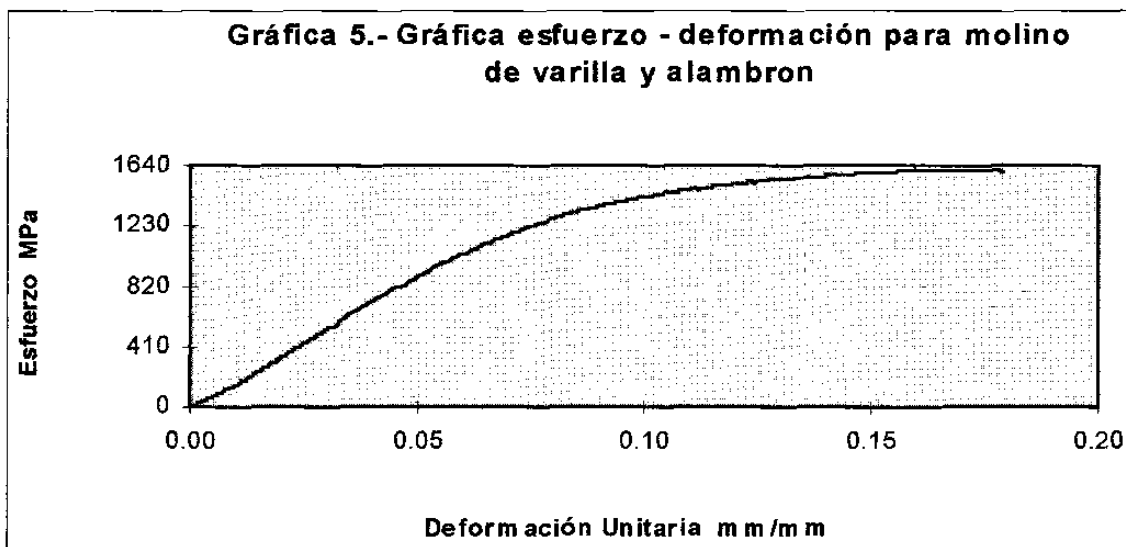
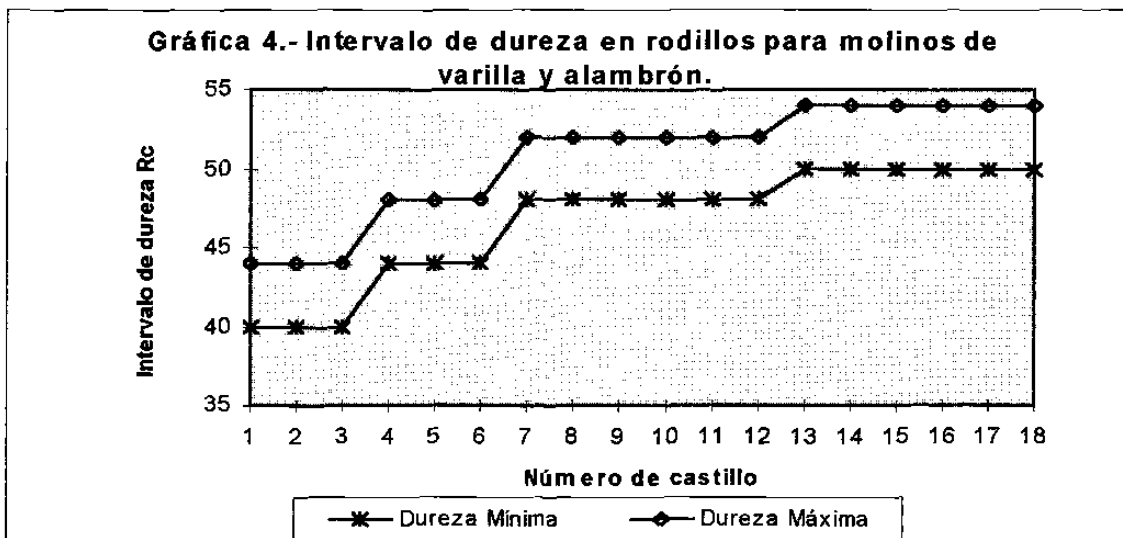
**Gráfica 2.- Análisis químico en rodillos para molinos de varilla y alambón.**



**Gráfica 3.- Penetración de dureza en rodillos para molinos de varilla y alambón.**







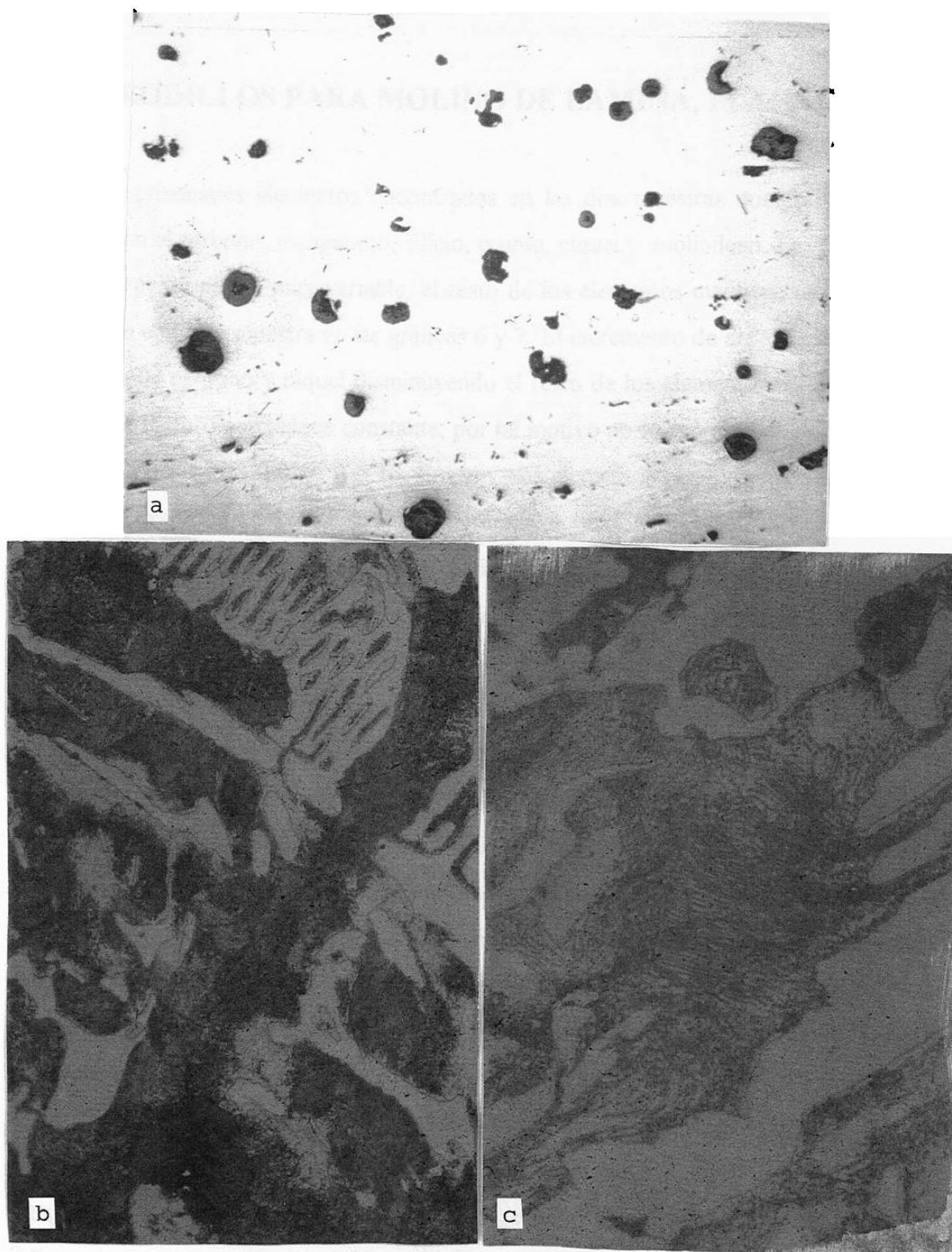


Figura 10. - Microestructura de un hierro fundido. a) Hierro nodular sin atacar químicamente, 100X. b) Matriz perlita atacada químicamente en 5% de nital, 500X. c) Matriz perlita atacada químicamente en 5% de nital, 1000X. (Cortesía de Fundición Monclova S.A)

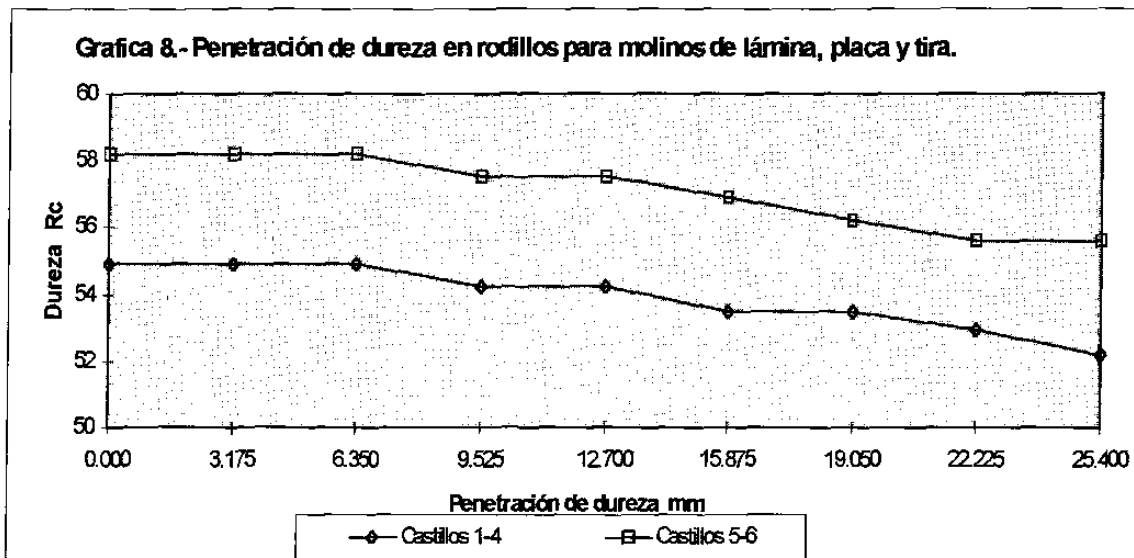
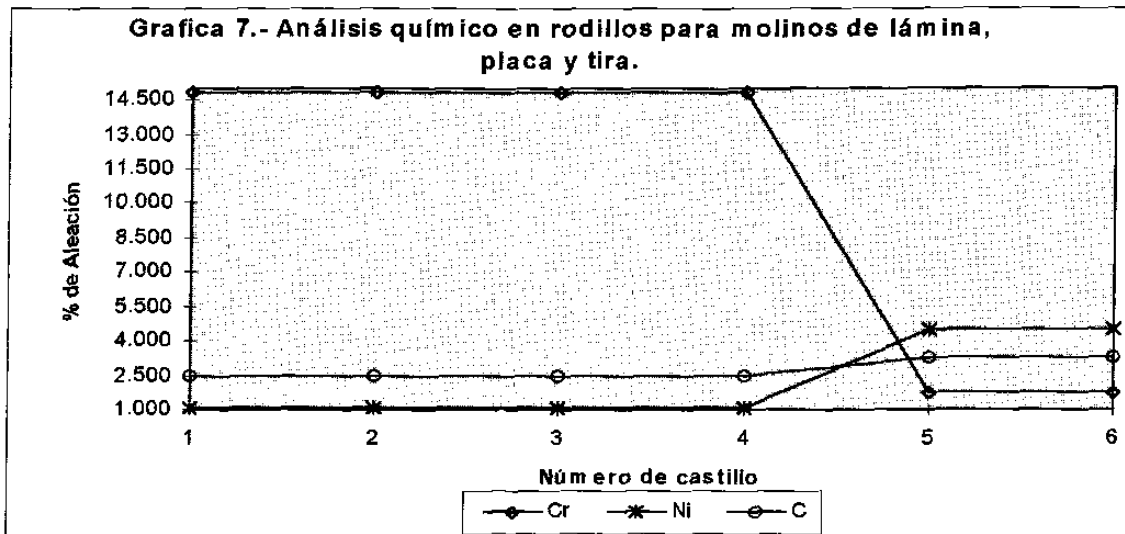
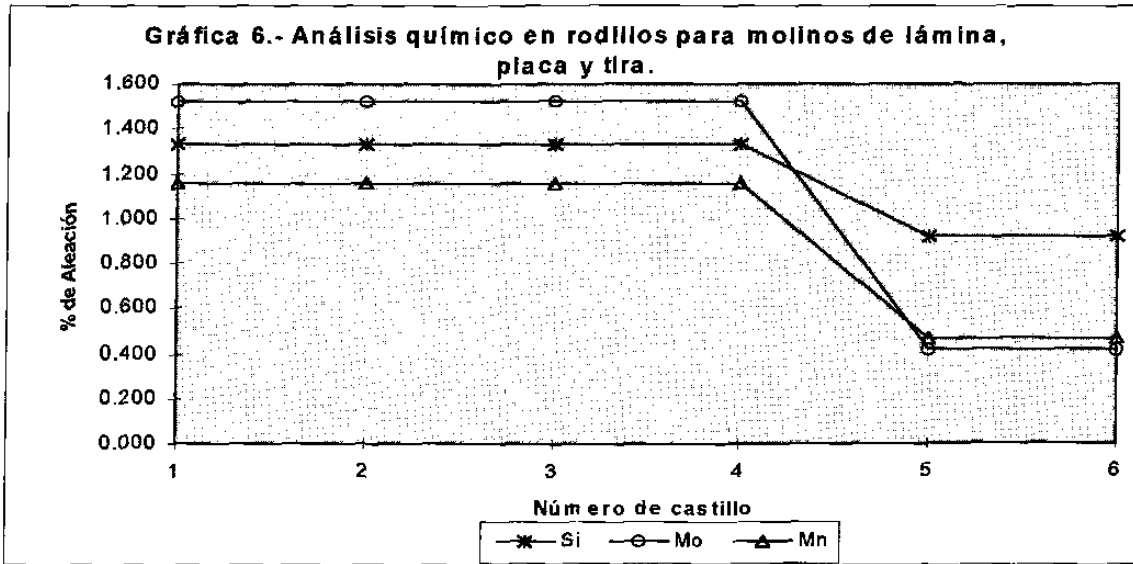
## **6.2. – RODILLOS PARA MOLINO DE LAMINA, PLACA Y TIRA.**

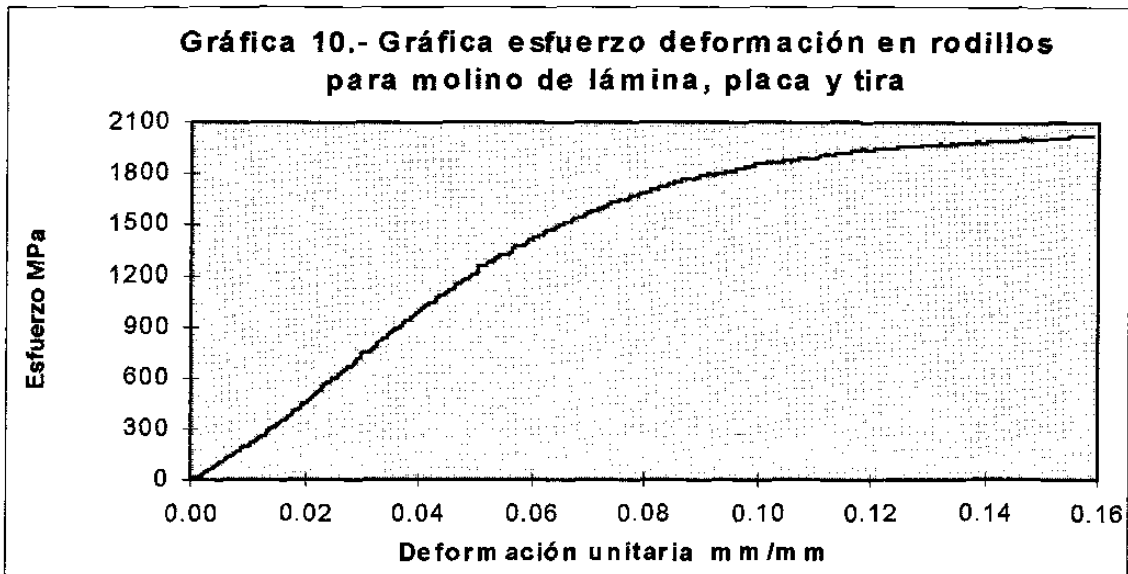
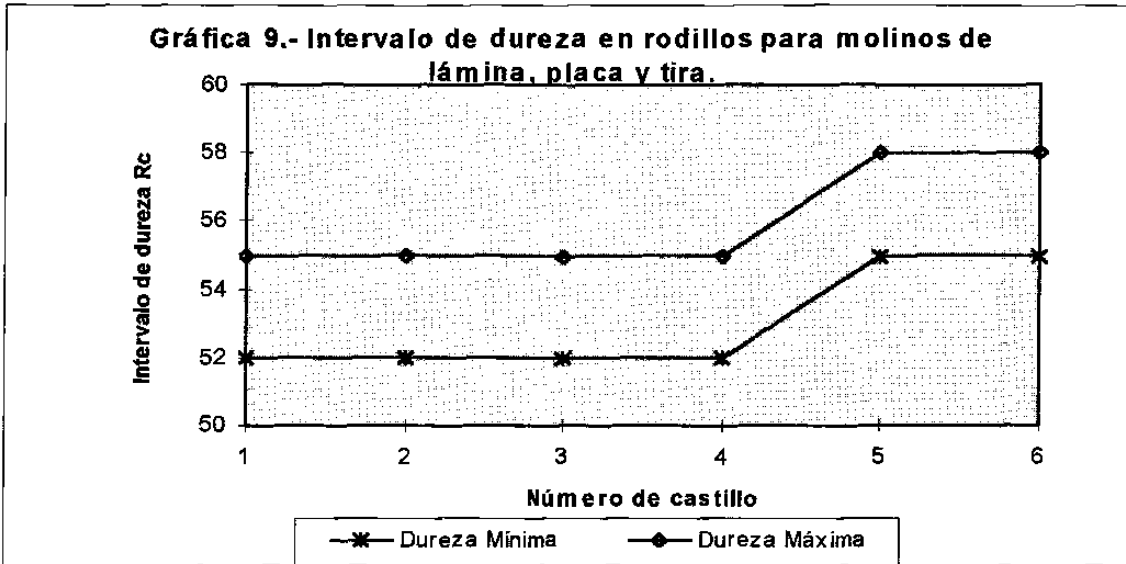
Los principales elementos encontrados en las dos muestras que forman los seis castillos son el carbono, manganeso, silicio, cromo, níquel y molibdeno. La variación del contenido de cromo es muy variable, el resto de los elementos mantiene una estabilidad ascendente como se muestra en las gráficas 6 y 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.





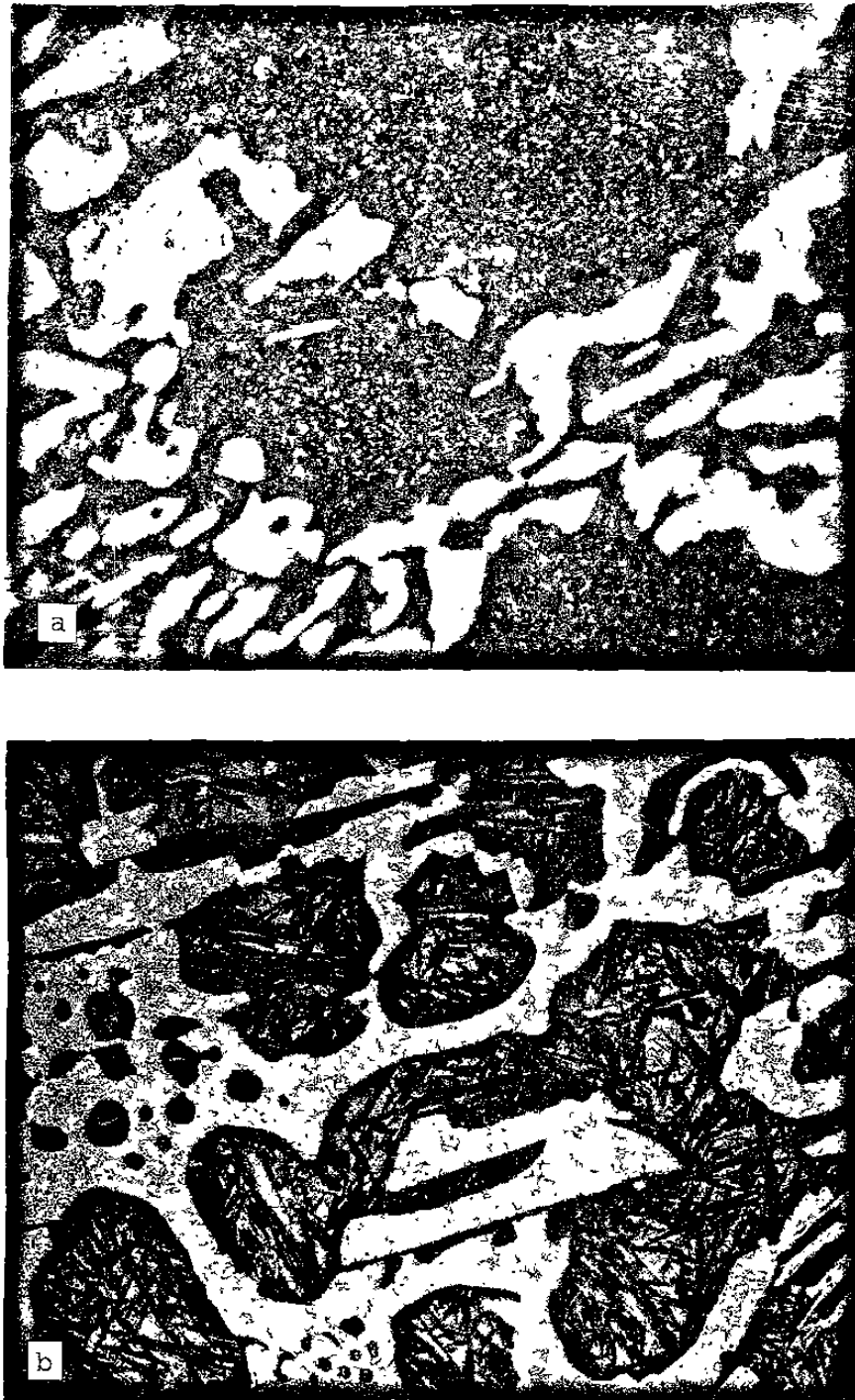


Figura 11. - Microestructura de un hierro blanco. A) Carburos esféricos y precipitados en matriz martensita, atacado químicamente en 5% de nital, 1000X. b) Matriz martensita revenida, con algo de austenita revenida, atacado químicamente en 5% de nital, 500X. (Cortesía de Fundición Monclova S.A)

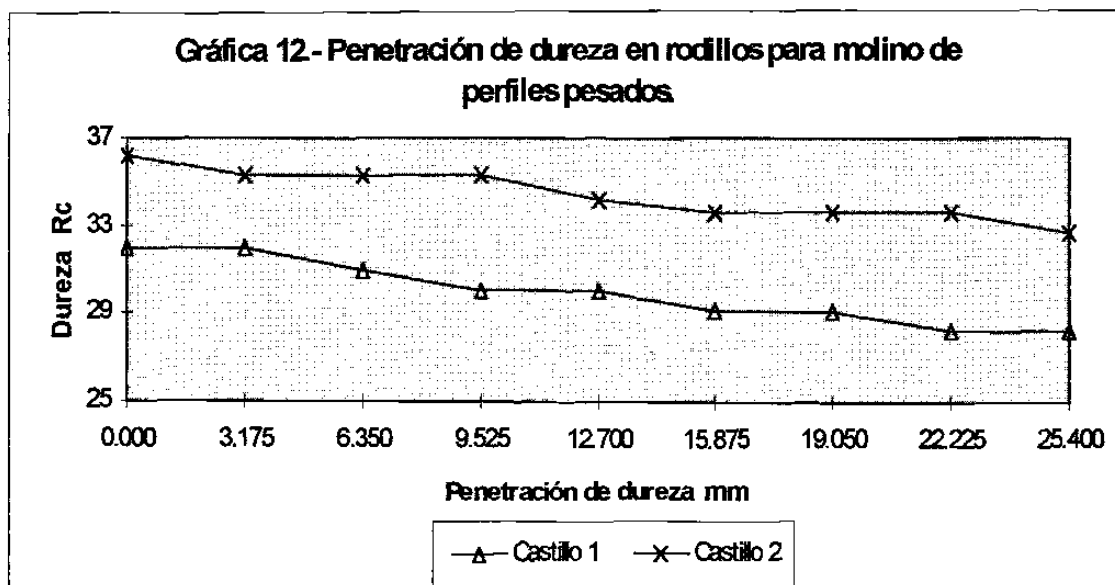
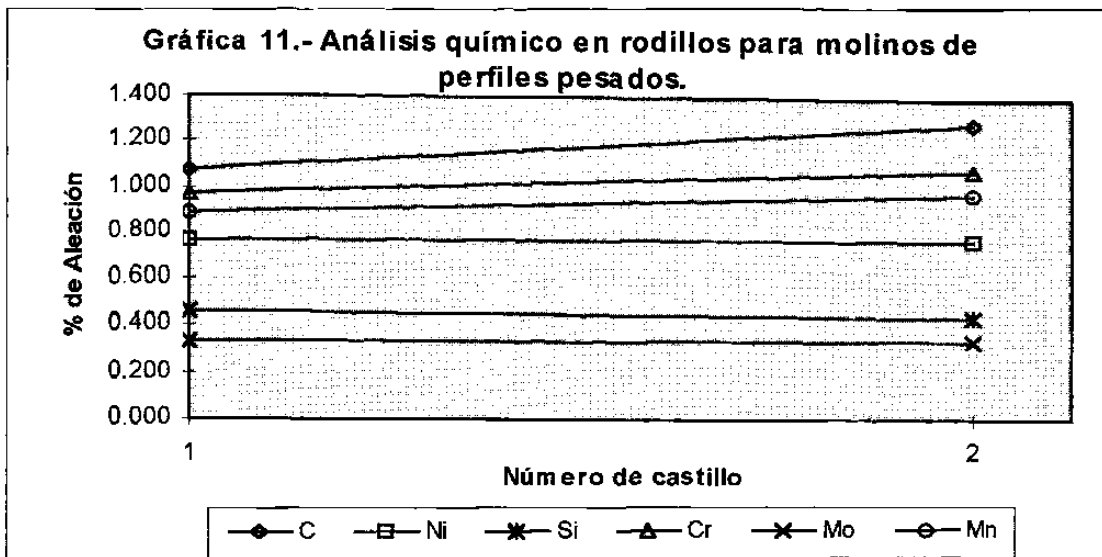
### **6.3. – RODILLOS PARA MOLINO DE PERFILES PESADOS.**

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.

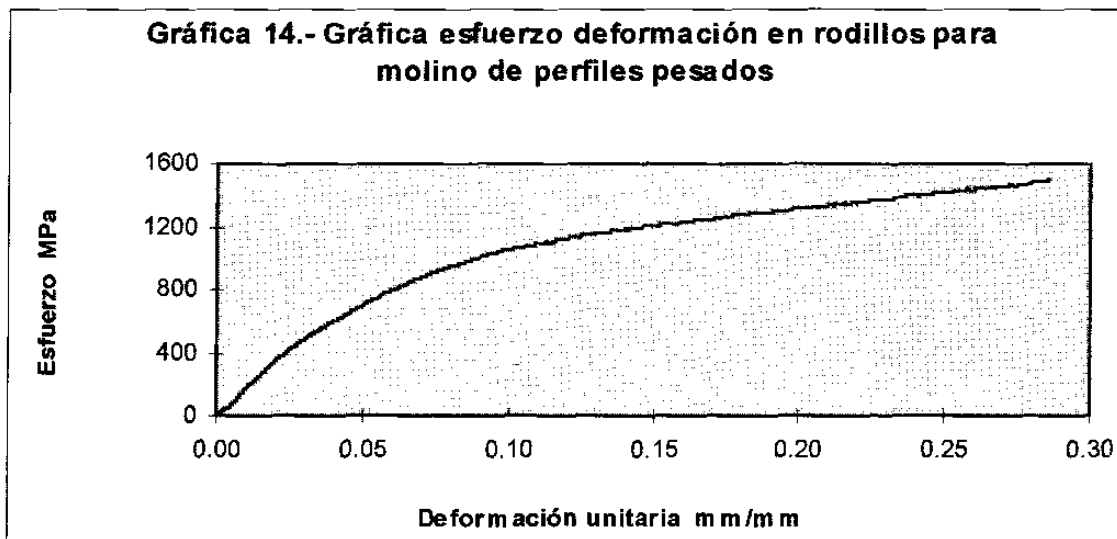
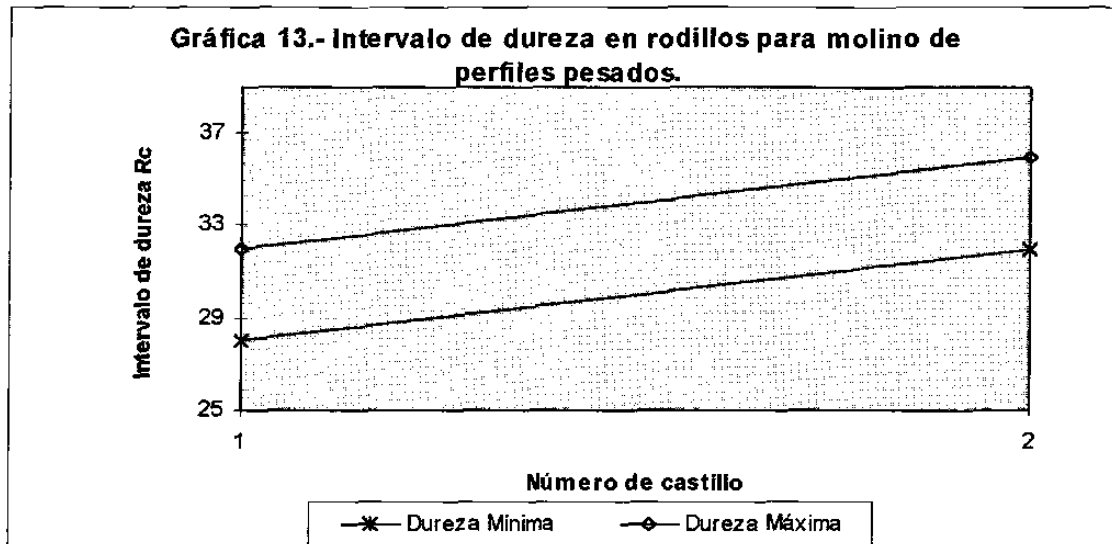
Debido al tratamiento térmico de esferoidizado se obtienen durezas muy homogéneas, sin embargo existe una pequeña diferencia de dureza debido a la velocidad de enfriamiento descrita en los dos casos anteriores, este fenómeno lo representa la gráfica 12, el intervalo de dureza en los dos castillos se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







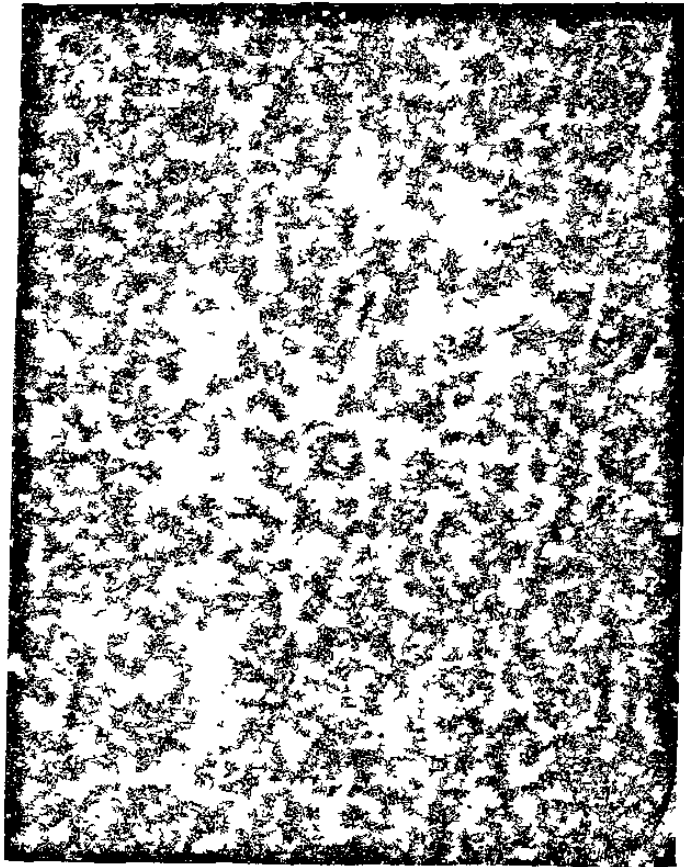


Figura 12. - Microestructura de un acero vaciado, carburos esferoidales y finos precipitados en matriz perlítica, atacado químicamente en 5% de nital, 500X. (Cortesía de Fundición Monclova S.A)

#### **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 alambrón.

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

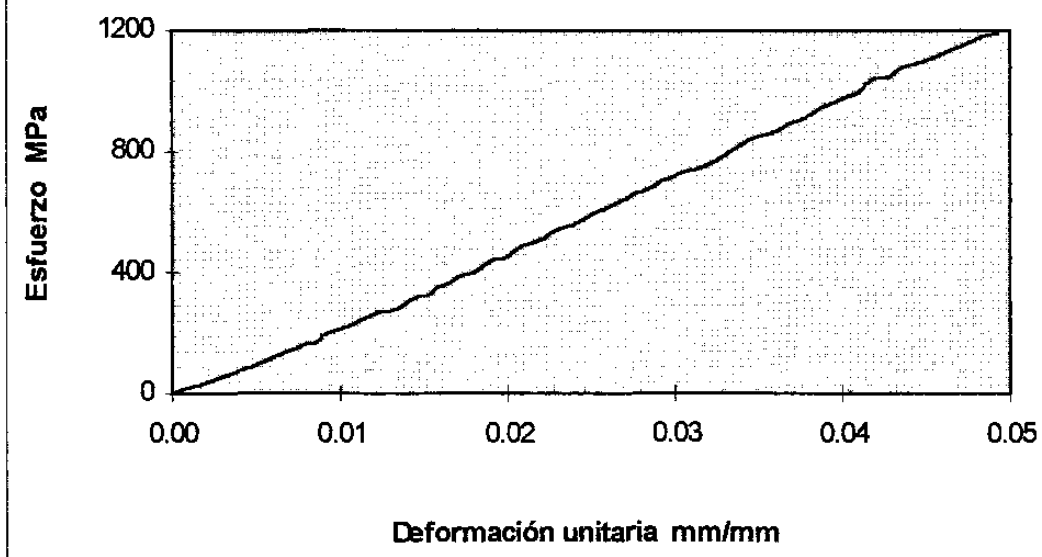
Este molino varia considerablemente en su diseño, hay molinos que utilizan tres, cuatro o cinco castillos, el diseño depende del espesor que se vaya a laminar; el grado de material utilizado en todos los castillos es el mismo. La dureza requerida para este tipo de molino es de 60 a 61 °Rc. Para obtener 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



(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

## 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
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 alambrón .....	94
Gráfica 2. – Análisis químico en rodillos para molinos de varilla y alambrón .....	94
Gráfica 3. – Penetración de dureza en rodillos para molinos de varilla y alambrón ...	94
Gráfica 4. – Intervalo de dureza en rodillos para molinos de varilla y alambrón .....	95
Gráfica 5. – Gráfica esf. – def. en rodillos para molinos de varilla y alambrón .....	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/pie <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 atómica	$u$	$1.661 \times 10^{-24} \text{ g}$
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 vacío	$\epsilon_0$	$8.854 \times 10^{-12} \text{ C}^2/(\text{Nm}^2)$
Permeabilidad del vacío	$\mu_0$	$4\pi \times 10^{-7} \text{ T m/A}$
Magnetón de Bohr	$\mu_B$	$9.274 \times 10^{-24} \text{ A m}^2$
Constante de Faraday	$F$	$9.6485 \times 10^4 \text{ C/mol}$
Aceleración de la gravedad	$g$	$9.806 \text{ m/s}^2$
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	$\xi$	$\Xi$
Gamma	$\gamma$	$\Gamma$	Omicron	$\omicron$	O
Delta	$\delta$	$\Delta$	Pi	$\pi$	$\Pi$
Epsilon	$\epsilon$	E	Rho	$\rho$	P
Dseta	$\zeta$	Z	Sigma	$\sigma$	$\Sigma$
Eta	$\eta$	H	Tau	$\tau$	T
Zeta	$\theta$	$\Theta$	Ypsilon	$\upsilon$	Y
Iota	$\iota$	I	Phi	$\phi$	$\Phi$
Kappa	$\kappa$	K	Ji	$\chi$	X
Lambda	$\lambda$	$\Lambda$	Psi	$\psi$	$\Psi$
Mu	$\mu$	M	Omega	$\omega$	$\Omega$

## Prefijos en el SI de unidades

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	598	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 so 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 específica, 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.

## 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.



