

UNIVERSIDAD AUTONOMA DE NUEVO LEON  
FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA Y ELECTRICA  
DIVISION DE ESTUDIOS DE POSGRADO



CEMENTACION SOLIDA DE ACEROS

POR

JESUS SALVADOR LUNA ALVAREZ

TESIS

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

Ciudad Universitaria, San Nicolás de los Garza Nuevo León, Febrero 2005

UAM  
TESIS

CEMENTACION SOLIDA DE ACEROS

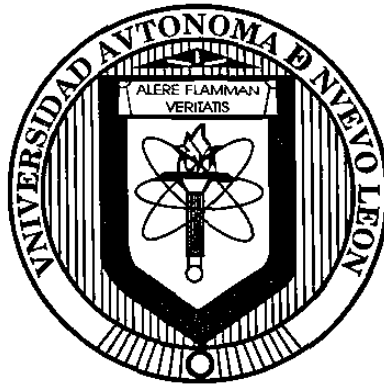
TM  
Z5853  
.M2  
FIME  
2005  
.L8



1020150661

~~9800~~

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA**  
**DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO**



**CEMENTACIÓN SOLIDA DE ACEROS**

**POR**

**JESÚS SALVADOR LUNA ALVAREZ**

**TESIS**

**EN OPCIÓN AL GRADO DE MAESTRO EN CIENCIAS DE LA  
INGENIERÍA MECÁNICA CON ESPECIALIDAD EN MATERIALES**

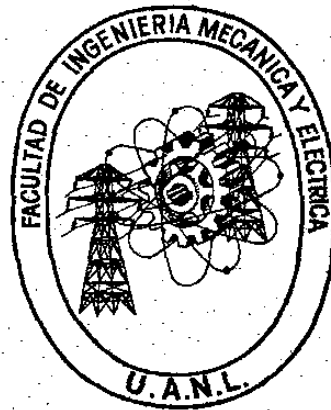
**Universidad Universitaria, San Nicolás de los Garza Nuevo León, Febrero 2005**

990851

TH  
Z5803  
.M2  
FIME  
2005  
.L8



UNIVERSIDAD AUTONOMA DE NUEVO LEON  
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA  
DIVISION DE ESTUDIOS DE POSGRADO



CEMENTACIÓN SÓLIDA DE ACEROS

POR

JESÚS SALVADOR LUNA ALVAREZ

TESIS

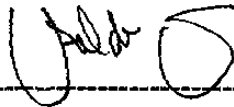
EN OPCION AL GRADO DE MAESTRO EN CIENCIAS DE LA  
INGENIERÍA MECÁNICA CON ESPECIALIDAD EN MATERIALES.

Ciudad Universitaria, San Nicolás de los Garza Nuevo León. Febrero 2005.

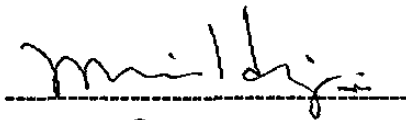
**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN  
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA  
DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO**

Los miembros del comité de tesis recomendamos que la tesis " Cementación Sólida de Aceros ", realizada por el alumno ing. Jesús Salvador Luna Alvarez matricula 1079845 sea aceptada para su defensa como opción al grado de Maestro en Ciencias de la Ingeniería Mecánica con especialidad en Materiales.

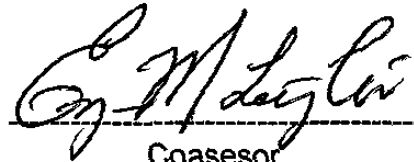
El Comité de tesis



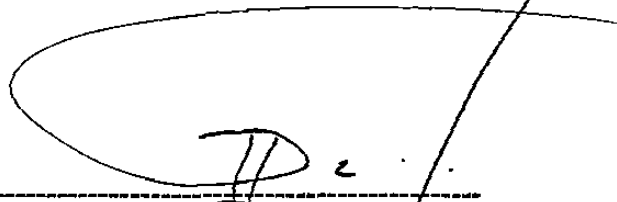
Asesor  
Dr. Ubaldo Ortiz Méndez



Coasesor  
Dr. Moisés Hinojosa Rivera



Coasesor  
Dr. Enrique López Cuellar



Vo. Bo.  
Dr. Guadalupe Alan Castillo Rodríguez  
División de Estudios de Postgrado



## DEDICATORIA

A DIOS por permitirme vivir y darme salud y dicha a lo largo de mi vida.

A mi esposa Cristy por darme el apoyo incondicional a lo largo de mi carrera Tanto en los momentos buenos como en los momentos difíciles y a mis tres hijos. Laura, Karla y Salvador, por ser lo más hermoso que dios me ha dado, y que juntos hemos seguido una trayectoria de armonía, amor y felicidad.

A mis queridos padres, quienes sembraron en mi la formación, la inquietud y la superación de ser alguien en la vida.

## **AGRADECIMIENTOS**

A la Universidad Autónoma de Coahuila por todo el apoyo brindado para la realización de esta maestría.

A la Universidad Autónoma de Nuevo León por todo el apoyo brindado a través de mis maestros de la Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica.

En especial al Dr. Ubaldo Ortiz Méndez por la asesoría en el presente trabajo de tesis que pongo a su consideración. Así como a los coasesores Drs. Moisés Hinojosa Rivera y Enrique López Cuellar.

A la corporación Mexicana de Investigación en Materiales (COMIMSA) por el apoyo brindado para la realización de esta maestría y al MC. José Arturo Reyes Valdés. Por su apoyo en la asesoría de esta tesis. También al Ing. Fernando René Ríos por su apoyo incondicional para la realización de las pruebas en campo e interpretación.

# PROLOGO

El presente trabajo ha sido realizado con el objeto de construir un soporte para futuras investigaciones en ingeniería de materiales ferrosos.

Este trabajo también va dirigido a estudiantes cuya licenciatura es cursada en el área de ingeniería de materiales, ya que se abordan conceptos interesantes de cementación sólida de aceros, por lo que se espera que el presente estudio contribuya hacia todos aquellos interesados en el tema. Así también que sea de utilidad a personal que labore en la industria realizando este tipo de tratamientos a los aceros.

La ingeniería de materiales es una más de las áreas de la ingeniería en las que se logra conjuntar la teoría y la práctica, los conocimientos pueden resultar más provechosos. Así pues, la cementación sólida como parte de la ingeniería busca obtener mejores propiedades mecánicas mediante el uso de un acero convencional logrando su máximo rendimiento posible.

Parte importante es la implementación del tratamiento termoquímico realizado a probetas de acero y el uso de dos cementantes como son el carbón vegetal y la rebaba de hierro gris, logrando un comparativo de propiedades mecánicas y estructurales en los aceros analizados.

Por otra parte se incluye información del proceso de cementado y el tipo de tratamiento que se efectúa después del mismo, logrando una estadística de los resultados del ensayo térmico realizado, arrojando datos de dureza, tensión, análisis químico y estructuras del acero estudiado.

# INDICE

Capítulo	Página
Síntesis.....	1
1.- Introducción.....	2
1.1.- Objetivo de la tesis.....	3
1.2.- Hipótesis.....	4
1.3.- Límites del estudio .....	4
1.4.- Justificación del trabajo de tesis .....	5
1.5.- Metodología .....	6
2.- Antecedentes y fundamentos .....	7
2.1.- Definición de tratamiento térmico .....	8
2.2.- Hornos para tratamientos térmicos .....	11
2.3.- Austenización .....	12
2.4.- Tratamiento térmico de recocido .....	13
2.5.- Tratamiento térmico de normalizado .....	14
2.6.- Tratamiento térmico de temple y revenido .....	16
2.6.1. Revenido de la martensita .....	17
2.7.- Defectos y fallas relacionadas con el tratamiento térmico.....	20
2.8.- Tratamiento térmico de relevado de esfuerzos.....	21
2.9.- Tratamientos térmicos superficiales.....	22

2.10.- Propiedades mecánicas de los materiales.....	25
2.10.1.- Ensayo de tensión.....	26
2.10.2.- Ensayo de dureza Brinell, Rockwell y Vickers.....	28
2.11.- Ensayo metalográfico y estructuras.....	34
2.12.- Difusión.....	44
2.13.- Proceso de cementación.....	46
2.13.1.- Cementación gaseosa .....	46
2.13.2.- Cementación líquida.....	49
2.13.3.- Cementación sólida.....	50
3.- Desarrollo Experimental.....	52
3.1.- Propiedades mecánicas del acero A.I.S.I.8620.....	52
3.2.-Características de los cementantes .....	55
3.3.- Características de las sales.....	57
3.4.- Horno utilizado para el tratamiento de cementado.....	58
3.5.- Preparación de caja metálica para cementar.....	59
3.6.- Realización y condiciones del tratamiento de cementación.....	60
4.- Resultados y Discusión .....	64
4.1.- Resultados obtenidos en el ensayo de tensión.....	64
4.2.- Resultados obtenidos en el análisis metalográfico.....	68
4.3.- Resultados de la profundidad de cementado.....	74
5.- Conclusiones y recomendaciones.....	82
6.- Índice de fotografías.....	86
7.- Referencias bibliográficas .....	88
8.- Resumen Autobiográfico.....	90

# SÍNTESIS

En el presente trabajo se reporta el estudio comparativo de un acero AISI 8620 que fue tratado térmicamente por cementación usando dos tipos de cementantes: carbón vegetal y rebaba de hierro gris adicionados en sal de carbonato de bario. El tratamiento térmico se realizó en un horno eléctrico de resistencias con doble cámara, una para el cementado y otra para el revenido. El cementado se efectuó a 930°C durante 12 horas, seguido de un revenido a 230°C durante 1 hora. Se realizó la caracterización microestructural y de propiedades mecánicas antes y después del tratamiento, se evaluó también la profundidad de cementado y se realizó el mapeo de microdureza Vickers. A partir de la microestructura original ferrítica con bandeado de perlita, para ambos casos se encontró martensita en la zona cementada, en la zona de transición se encontró perlita, bainita y martensita en la pieza cementada con carbón vegetal, en la cementada con hierro gris se encontró solo martensita y bainita en esta zona. En el núcleo se encontró martensita más ferrita en el cementado con carbón vegetal y una mezcla de ferrita y martensita para el cementado con rebaba de hierro gris. La profundidad de cementado fue de 1650  $\mu\text{m}$  para carbón vegetal y 1200  $\mu\text{m}$  para hierro gris, en ambos casos la dureza fue de 50 HRC. La resistencia máxima se obtuvo para la muestra cementada con rebaba de hierro que incrementó su resistencia un 83%, mientras que la muestra cementada con carbón vegetal incremento su resistencia un 47%.

# 1 INTRODUCCIÓN

La cementación sólida de aceros comprende transformaciones de fase y por lo tanto, el cambio de las propiedades del acero, que se consiguen mediante el calentamiento hasta una determinada temperatura durante cierto tiempo y un posterior enfriamiento. Existen varios tipos de tratamientos térmicos, como el recocido, normalizado, temple y revenido, que en forma distinta cambian la estructura y las propiedades de la aleación. Cada uno de ellos se recomienda en dependencia de las exigencias planteadas a los semiproductos (piezas fundidas, forjadas, laminadas) y a los productos terminados (engranes, flechas, dados, herramientas y aceros de alta resistencia).

El tratamiento térmico de cementación sólida es una operación muy importante en el ciclo tecnológico de preparación de muchas piezas sometidas a esfuerzos, desgaste, fricción y tenacidad. Solamente con ayuda del tratamiento térmico se pueden obtener altas propiedades mecánicas del acero que garantizan un trabajo normal de los elementos modernos de las máquinas y herramientas.

### **1.1.- Objetivo de la tesis.**

- El objetivo es conocer la diferencia entre el carbón vegetal y el hierro gris o es el saber que cambios se dan en las propiedades del acero al utilizar estos dos cementantes.
- Verificar experimentalmente la teoría de cementación sólida mediante el uso de cementantes como el carbón vegetal y el hierro.
- Determinar las propiedades mecánicas de dureza, tensión y estructura del acero para poder obtener una relación entre los dos cementantes
- Realizar el análisis basado en los resultados generados del tratamiento térmico de cementación sólida realizado a las muestras de acero estudiadas.



## **1.2.- Hipótesis.**

Es posible obtener una profundidad de cementado en un acero A.I.S.I. 8620 con el uso de carbón vegetal como cementante o también con rebaba de hierro gris, realizando los tratamientos térmicos por separado bajo las mismas condiciones de temperatura, tiempo, y enfriamiento, con esto se podría encontrar si existe una difusión del elemento carbono en el acero a cementar y realizar un análisis comparativo entre los dos cementantes utilizados, verificando las propiedades mecánicas obtenidas en el acero.

## **1.3.- Límites del estudio.**

El estudio se realiza de manera similar al tratamiento de cementado convencional, se utilizó un horno de pequeñas dimensiones, una caja metálica con su tapa y se maquinaron probetas para ensayo de tensión, del acero a estudiar.

Las pruebas realizadas solamente fueron para un acero A.I.S.I. 8620 sin embargo existen otros aceros que pueden ser utilizados para realizar el cementado, particularmente los aceros de bajo carbono.

Se utilizaron dos materiales cementantes, el carbón vegetal y rebaba de hierro gris con características bien definidas.

#### **1.4.- Justificación del trabajo de tesis.**

En la vida actual la automatización en la industria se ha incrementado y las exigencias en cuanto a calidad de un producto son mayores. La implementación de máquinas en cualquier industria se ha desarrollado, siendo de importancia las partes metálicas que las constituyen. Estas piezas metálicas en muchos de los casos tienen características mecánicas que limitan la adquisición de las mismas en el mercado cuando son requeridas, regularmente en tiempos largos y que pueden detener el funcionamiento de una máquina o hasta el proceso de un producto. Para evitar este inconveniente se puede recurrir a metales de bajo costo y fácil adquisición que mediante un tratamiento termoquímico como el de "Cementación Sólida" puede fabricarse una pieza metálica con características semejantes a la pieza original e inclusive con mejores características mecánicas.

En este trabajo se estudiarán dos tipos de cementantes, utilizando un acero como base para determinar cual de ellos proporciona mejores características mecánicas.

### 1.5.- Metodología.

- Documentar la teoría del tratamiento térmico de cementación sólida.
- Recolección de los fundamentos necesarios para el entendimiento del tratamiento de cementación sólida.
- Preparación de muestras de acero y de los materiales necesarios para realizar el tratamiento.
- Realizar análisis químico y propiedades mecánicas al acero a estudiar.
- *Efectuar tratamiento térmico de cementación sólida al acero con los cementantes, bajo las condiciones establecidas.*
- Caracterización microscópica del acero cementado.
- Realizar ensayos mecánicos a las muestras cementadas.
- Análisis y discusión.

## **2.- ANTECEDENTES Y FUNDAMENTOS.**

El microscopio fue empleado para la investigación de la estructura de los metales por Sorby (Inglaterra) sin embargo, la base de la metalografía científica fue fundada por el eminente metalúrgico ruso D.K.Chernov (1839 - 1921), que por sus trabajos fue llamado en la literatura padre de la metalografía. D.K.Chernov demostró que en el acero en estado sólido durante su calentamiento (enfriamiento) hasta determinadas temperaturas (posteriormente denominados puntos críticos) tienen lugar modificaciones estructurales conocidas actualmente como transformaciones de fases, que producen cambios considerables de sus propiedades.<sup>(17)</sup> Posteriormente, en 1878 D.K.Chernov expuso los fundamentos de la teoría moderna de la cristalización de los metales. Estos, aunado a algunos de sus trabajos posteriores crearon el fundamento de la metalografía moderna y del tratamiento térmico del acero.

Entre 1928, 1930 se empezó a darle gran importancia a la cinética de las transformaciones de fase, es decir, al estudio de las transformaciones de fase durante el proceso de solidificación. Esto permitió establecer el mecanismo de las transformaciones y elaborar la teoría y los problemas prácticos del tratamiento térmico del acero.

Un gran significado en el desarrollo del tratamiento térmico tuvieron los trabajos de Rothery y N.Mott. (Inglaterra), F.Zeits. (USA). En los últimos años crearon nuevos tipos de tratamientos térmicos y termoquímicos del acero estableciendo los fundamentos de éste.<sup>(2)</sup>

Para poder realizar el tratamiento térmico de cementación sólida y entender lo qué ocurre en ese proceso, es necesario comprender una variedad de conceptos, definiciones y fundamentos que se encuentran en el contorno de este tratamiento de cementación sólida. Esta teoría reafirmará en la persona interesada los conocimientos para una buena interpretación, para poder conducir y posiblemente ejecutar en campo este tratamiento térmico encontrando cambios en propiedades en el metal tratado.

## **2.1.- Definición de tratamiento térmico.**

Tratamiento térmico se puede definir como una combinación de operaciones de calentamiento y enfriamiento, de tiempos determinados aplicada a un metal o aleación en estado sólido en una forma tal que producirá propiedades deseadas. Todos los procesos básicos de tratamientos térmicos para aceros incluyen la transformación o descomposición de la austenita. La naturaleza y características morfológicas de estos productos de transformación determinan las propiedades físicas y mecánicas de cualquier acero.<sup>(11)</sup>

El primer paso en el tratamiento térmico del acero es calentar el material a una temperatura en o por encima del intervalo crítico para formar austenita. En la mayoría de los casos, la rapidez del calentamiento a la temperatura deseada es menos importante que otros factores como la geometría de la pieza, posición en el horno y condiciones de maquinado en el ciclo del tratamiento térmico. Los materiales altamente deformados producidos por trabajado en frío deben calentarse más lentamente que los que se hallan libres de esfuerzos para evitar

Formación de grietas originando posible fractura. Se debe considerar la diferencia de temperatura que tiene lugar dentro de las secciones gruesas y delgadas de artículos de sección transversal variable y, siempre que sea posible se debe tomar alguna medida para hacer más lento el calentamiento de las secciones más delgadas, de tal modo que sea posible minimizar el esfuerzo térmico y la distorsión. Por lo general se hará menos daño al acero al utilizar una rapidez del calentamiento tan lenta como sea posible.

La finalidad del tratamiento es la de conferir al metal las propiedades particulares adecuadas a su transformación posterior. El tratamiento térmico simple o complejo puede en general:

- a). Ser causa de modificaciones en la naturaleza de los componentes, manteniendo invariable la composición química media global. Dichos constituyentes pueden o no estar en equilibrio al final de la operación, por ejemplo transformaciones alotrópicas disolución en estado sólido o precipitados.
- b). Ocasionar modificaciones estructurales, de dimensión, de forma y de distribución de sus elementos sin modificar su naturaleza.
- c). Utilizar ciertas acciones químicas o fisicoquímicas para aumentar o reducir el contenido de algunos elementos en el metal, o incluso para modificar constituyentes estructurales mediante la influencia de un medio exterior ya sea sólido, líquido, gaseoso, y de mayor o menor presión de este medio (cementación, cromización).<sup>(5)</sup>
- d). Conferir propiedades particulares de las capas superficiales de la pieza tratada, como por ejemplo alta dureza mediante el temple superficial.
- e). Modificar la distribución y la intensidad de los esfuerzos internos.

Los factores que intervienen en el tratamiento térmico quedan definidos por su tipo y por la indicación de los ciclos térmicos experimentales por la pieza. Un tratamiento definido únicamente por la naturaleza de los ciclos empleados no siempre producirá los mismos efectos en un metal determinado. Por esto hay que tener en cuenta, aisladamente o en conjunto, factores como el efecto de la masa, el calentamiento, el tiempo de mantenimiento y el enfriamiento.

El efecto de masa: En cada caso particular las condiciones de los tratamientos deben fijarse no solo en función de las propiedades del metal, sino también de la forma y dimensiones de las piezas y de las características de los medios a utilizar en el calentamiento o en el enfriamiento (conductividad térmica, temperatura, agitación). Especialmente durante el enfriamiento, las variaciones instantáneas de la temperatura que determinan el resultado dependen de las condiciones del tratamiento. El efecto de masa puede dar lugar a que no se alcance localmente en la pieza la velocidad de enfriamiento necesaria para conseguir el resultado deseado.

El calentamiento: es la operación mediante la cual se eleva la temperatura de la pieza desde una temperatura inicial, hasta la temperatura adecuada para el tratamiento, como duración de calentamiento se tomara el tiempo transcurrido entre el principio del mismo y el momento en que se estime que se ha alcanzado la temperatura deseada en el núcleo o en la parte a tratar de la pieza. El precalentamiento es el calentamiento preliminar de la pieza hasta una temperatura inferior a la prevista para el tratamiento térmico a realizar. El precalentamiento se lleva a una velocidad tal que se obtenga en toda la pieza o

en la parte de la pieza a tratar, una distribución de temperatura que prepare o facilite el tratamiento posterior.

El tiempo de mantenimiento: Será el tiempo que debe permanecer la pieza a la temperatura de tratamiento, contando a partir del momento que define el final del calentamiento.

El enfriamiento: Es la disminución de temperatura en un intervalo de tiempo determinado.<sup>(1)</sup>

## **2.2.- Hornos para tratamientos térmicos.**

El calentamiento para una pieza metálica puede realizarse en diferentes tipos de hornos, estos pueden ser hornos eléctricos, de gas, de atmósfera controlada o de sales fundidas.

El horno eléctrico generalmente utilizan resistencias de carburo de silicio o resistencia de alambre metálico, generalmente son para piezas de poco volumen o tamaño, en ellos se debe tener la precaución de introducir cuidadosamente la pieza a ser tratada porque puede dañar la resistencia y dejar fuera de servicio el horno.

Los hornos de gas tienen la característica de tener distribuidos los quemadores en la cámara donde se realizan los tratamientos térmicos, existe una relación de aire-gas que sale del quemador originando la flama que inducirá el calor a la pieza para efectuar el tratamiento. Se puede tener hornos para pequeñas y grandes piezas. La limitante es que existe mayor decarburación en la pieza a tratar.



Por otra parte hay también hornos de radiación, estos están integrados por tubos de acero inoxidable que rodean la cámara del horno, radian el calor originado por la flama del quemador y en el interior de la cámara se puede inyectar un gas neutro como el argón o nitrógeno para mantener una atmósfera controlada y evitar que exista decarburación de la pieza. Es uno de los hornos que ofrece varias ventajas y es muy utilizado en los tratamientos térmicos para una variedad de tamaño de piezas.

Los hornos de sales fundidas son hornos eléctricos que tienen un recipiente o crisol donde se funden las sales por medio de calor obteniendo un baño líquido y cuando se tiene la temperatura deseada, la pieza se sumerge en la sal líquida permaneciendo un tiempo determinado y un posterior enfriamiento.

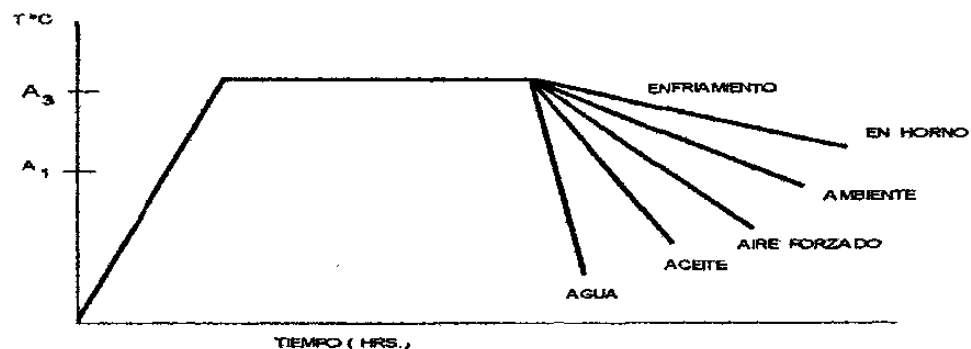
### **2.3.- Austenización.**

Casi todos los tratamientos principian con un proceso de austenización, el cual consiste en el calentamiento del acero a una velocidad moderada hasta una temperatura predeterminada, generalmente entre 25°C y 55°C por arriba de la Temperatura crítica superior  $A_3$ , manteniendo la pieza a esta temperatura por un periodo de tiempo posterior enfriamiento a una velocidad que varía según el tratamiento en cuestión, ver figura 1.

La austenización es completa cuando la estructura alcanzada es completamente austenítica y en estado de equilibrio.

La austenización se denomina parcial cuando además de la fase gama subsiste una proporción más o menos importante de fase alfa, que hubiera podido ser reducida si el tratamiento hubiera sido correcto.

La austenización se denomina incompleta cuando no se ha producido la disolución de carburos o de otros constituyentes por no haber conseguido el equilibrio o por no ser deseable dicha solución.<sup>(2)</sup>



La figura 1. Muestra el ciclo térmico de austenizado, con diferentes medios de enfriamiento.

#### 2.4.- Tratamiento térmico de recocido.

Es un término genérico empleado para designar varios tipos de tratamientos térmicos que consisten en un calentamiento a una velocidad moderada, hasta una temperatura a un período prefijado y un subsecuente enfriamiento a velocidades lentas. El propósito del *recocido* es el de reducir la dureza del material y producir una estructura que facilite las operaciones de manufactura subsecuentes tales como maquinado o laminado.

La Figura 2. Describe ciclos típicos de recocido. El resultado de un tratamiento de recocido es una disminución en resistencia con un consecuente aumento en la ductilidad y la resistencia al impacto.

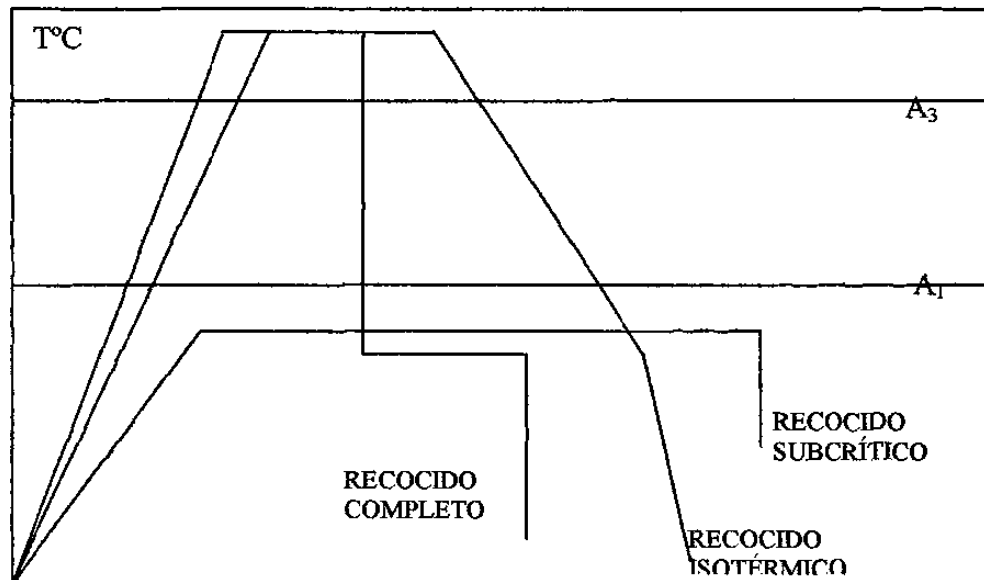


Figura 2. Ciclo térmico de recocido. Mostrando que se puede realizar a temperatura menor que A<sub>1</sub> (723°C) o por arriba de A<sub>3</sub> (800°C).

## 2.5.- Tratamiento térmico de normalizado.

El normalizado es un tratamiento térmico que consiste en el calentamiento del Acero a una velocidad moderada hasta una temperatura por arriba de la crítica Superior (A<sub>3</sub>), Fig.3 manteniéndolo a esta temperatura por un período determinado y posteriormente enfriándolo en aire tranquilo o ligeramente agitado, lo que da por resultado un tamaño de grano en la microestructura más fino que el inicial.

Generalmente el acero es calentado a una temperatura aproximada de 55°C

arriba de la crítica superior. Las temperaturas más comunes para aceros comerciales son entre 840°C y 900°C.

Los aceros de temple al aire se excluyen para este tratamiento dado que durante éste, se endurecerían formando bainita y/o martensita, lo cual no es el objetivo perseguido por el normalizado.

La velocidad de enfriamiento influye considerablemente en la cantidad de perlita y el tamaño y espaciamiento de las láminas; a velocidades de enfriamiento rápidas se forma más perlita en láminas muy finas, dando por resultado mayor resistencia y más dureza; por lo tanto, a velocidades lentas la perlita es más gruesa y la dureza es menor. Como la velocidad de enfriamiento en aire depende mucho de la masa de la pieza es frecuente el uso de ventiladores, principalmente cuando las piezas son de secciones gruesas. El propósito del normalizado varía considerablemente de acuerdo a los resultados que se pretendan. Puede tener como fin, no solamente el refinamiento de grano, sino también el aumento de tenacidad, homogenización de estructura o bien facilitar el maquinado o preparar la estructura para dar una mejor respuesta al temple.<sup>(1)</sup>

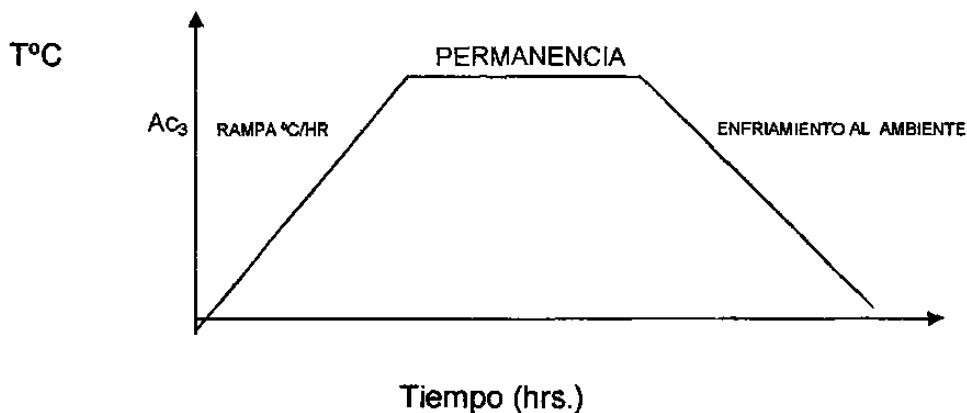


Figura 3. Ciclo térmico de normalizado.

## **2.6.- Tratamientos térmicos de temple y revenido.**

El temple de un acero se define como el enfriamiento rápido de la pieza a partir de una temperatura de austenitización adecuada. Este proceso involucra generalmente la inmersión de la pieza en agua, aceite o salmuera, sin embargo en algunas ocasiones se emplea aire forzado, como en el caso de algunos aceros grado herramienta o inoxidable.

Como resultado del proceso, las partes producidas pueden desarrollar una microestructura de temple en áreas críticas y propiedades mecánicas adecuadas para su uso final después del revenido, la efectividad del temple depende, por una parte de las características del medio de enfriamiento y por otra de la facilidad del acero para ser endurecido, de esta manera los resultados obtenidos pueden variar si cambia la composición química del acero o si varían las características del medio de temple, tales como: agitación, temperatura y fluido de temple.<sup>(3)</sup>

El diseño mecánico y el sistema de temple adecuado contribuyen en la gran medida a una operación exitosa, deben evitarse en general diseños intrincados con concentradores potenciales de esfuerzos con el fin de prevenir distorsión de la parte a templar y/o eventuales fisuras.

Es importante señalar que el temple y el revenido no son dos procesos separados, sino que son complementarios, es decir no existe revenido sin temple previo y tampoco es recomendable no aplicar el revenido a una pieza templada.

### **2.6.1 Revenido de la martensita:**

La estructura martensítica es la más dura y resistente que se puede obtener en un acero por tratamiento térmico de temple, pero es la más frágil y la que da lugar a considerables esfuerzos residuales en la pieza.

Esta fragilidad de la martensita suele ser un inconveniente para la mayoría de los usos, especialmente en construcciones mecánicas, donde la combinación de resistencia y tenacidad son críticas.

Por estas razones, la estructura martensítica debe transformarse en otras que permitan eliminar tensiones internas, ajustando la dureza y resistencia a los valores necesarios para lograr una tenacidad adecuada a los esfuerzos que va a soportar la pieza en uso. Este ajuste en propiedades mecánicas se logra aplicando el revenido. Este proceso es uno de los tratamientos térmicos más antiguos aplicado a los aceros, sin embargo solo en años recientes se ha alcanzado un entendimiento más completo de los fenómenos involucrados en él. En términos de su ciclo térmico, el revenido consiste en el calentamiento de la martensita a temperaturas inferiores a la crítica  $A_1$ , mantener a estas temperaturas por un período de tiempo adecuado y luego enfriar a temperatura ambiente.

Esencialmente la martensita es una solución sobre-saturada de carbono en hierro a la cual durante el revenido expulsa carbono en forma de carburos finamente dispersos. El resultado es una fina dispersión de carburos en una matriz de ferrita que no guarda mucha similitud con la estructura de martensita sin revenir. Durante el calentamiento de la martensita en estado de temple, el proceso de revenido tiene dos finalidades fundamentales que son la de liberar

tensiones internas surgidas después del temple y la de ajustar la dureza en el acero. Los parámetros del revenido son la temperatura y el Tiempo.

El revenido de la martensita involucra en esencia la difusión de los átomos de carbono que estaban en solución sólida homogéneamente sobre-saturada para concentrarse y formar con el hierro carburos que precipitan y luego crecen.

En consecuencia, esta transformación es función de la temperatura y del tiempo, siendo estos dos factores complementarios entre sí, ver figura 4.

El mismo efecto se puede lograr con altas temperaturas y tiempos cortos, que con temperaturas menores y tiempos mas largos. No obstante, el factor temperatura es preponderante, pequeños aumentos de ésta acortan ostensiblemente el tiempo.

Los parámetros temperatura - tiempo están relacionados por la siguiente fórmula empírica desarrollada por Hollomon y Jafe:<sup>(7)</sup>

$$H_d = KT (c + \log t) \quad (1)$$

Donde:

K = Constante que depende de las unidades en que se mide la temperatura.

Para grados Kelvin,  $K=0.00389$

T = Temperatura absoluta, °K

$c$  = Constante que depende del acero.

Para los aceros con 0.15-0.95%C;  $c = 19.5$

$t$  = Tiempo en horas

$Hd$  = Dureza convencional, medida en Rockwell C

Sustituyendo tenemos:

$$Hd = 0.00389 T (19.5 + \text{Log } t). \quad (2)$$

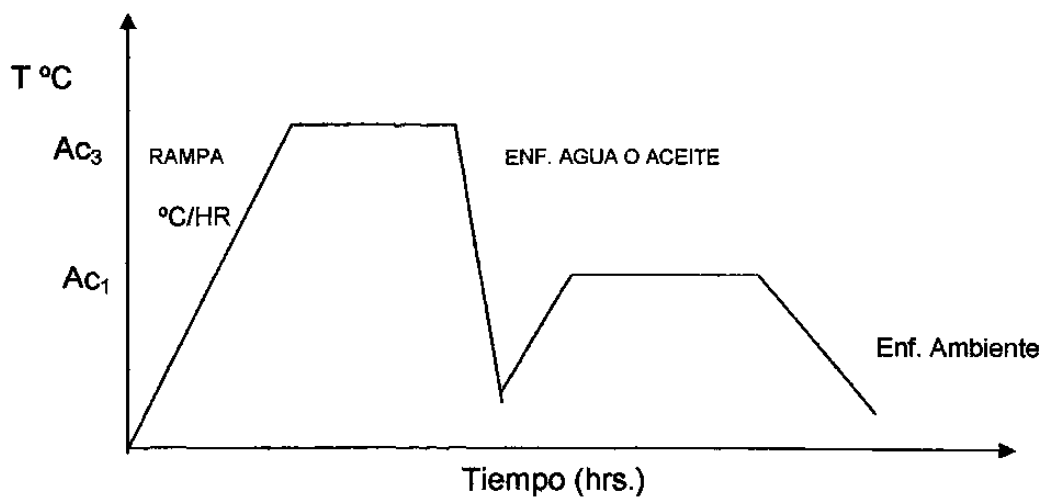


Figura 4. Ciclo térmico de temple y revenido



## **2.7.- Defectos y fallas relacionadas con el tratamiento térmico.**

En términos generales el temple y revenido es el tratamiento térmico que representa las condiciones más riesgosas en cuanto a la generación de fisuras, debido a que los cambios de volumen asociados a este fenómeno son del orden de un 3.4%, resultando en un estado de esfuerzos tal, que puede provocar la formación de fisuras en las piezas durante el enfriamiento.

Ahora bien, el riesgo de obtener fisuras durante el temple puede minimizarse esforzándose en efectuar un buen diseño del componente (radios generosos, evitar en lo posible diseños intrincados, etc.). Por otra parte la mayor responsabilidad de que una pieza se dañe durante el tratamiento térmico recae en el encargado de realizarlo, particularmente cuando se templen herramientas. Los riesgos de fisuras son grandes aún cuando el personal encargado del tratamiento térmico sea experimentado, su trabajo puede facilitarse si la forma de la pieza es adecuada para el tratamiento. Existen dos reglas simples que el diseñador de la pieza que va a ser sometida a tratamiento térmico debe tomar en cuenta:

- \* Radios generosos y cambios de sección ligeros.
- \* Una distribución del material lo más homogénea posible.

Las principales causas de grietas de temple son esfuerzos que se generan como resultado de diferencias de temperatura entre diferentes partes del material, y también los esfuerzos generados durante la transformación martensítica. Es extremadamente difícil evitar la generación de esfuerzos en el acero durante el temple en ángulos y esquinas agudas.

## 2.8.- Tratamiento térmico de relevado de esfuerzos.

El relevado de esfuerzos es un tratamiento térmico usado para remover esfuerzos que se generan en una estructura como consecuencia de un proceso de manufactura determinado, tal como: soldadura, maquinado, o vaciado.

Los esfuerzos residuales, en la mayoría de los casos provocan un riesgo de falla o una disminución en su vida útil, en los materiales propensos a fractura frágil disminuye su resistencia y en los no propensos la mayoría de las piezas que están sujetas a altas vibraciones, alta presión, secciones complicadas y espesores heterogéneos y solidificación requieren de un tratamiento térmico de relevado de esfuerzos. El tratamiento térmico para el relevado de esfuerzos consiste en el calentamiento uniforme a velocidad moderada hasta temperatura predeterminada inferior a las de transformación ( $A_1$ ) sosteniendo esta temperatura por un periodo de tiempo determinado y un posterior enfriamiento a una velocidad tal que no introduzca nuevos esfuerzos (enfriamiento en horno hasta temperatura menor de  $180^{\circ}\text{C}$ ) ver fig.5

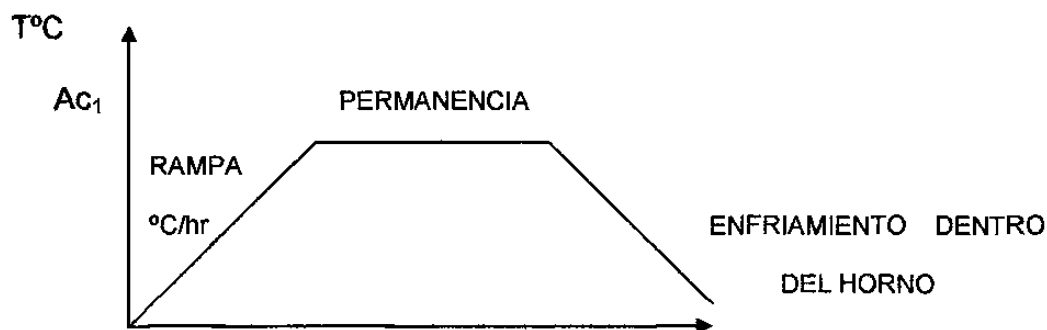


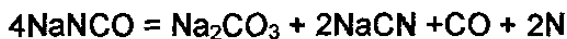
Figura 5. Ciclo térmico de relevado de esfuerzos

## **2.9.- Tratamientos térmicos superficiales.**

### **Cianuración y carbonitruración.**

Las superficies externas endurecidas que contienen carbón y nitrógeno se producen en baños líquidos de sal (cianuración) o mediante atmósferas gaseosas (carbonitruración). Las temperaturas utilizadas suelen ser inferiores a las empleadas en carburación, estando entre 760°C y 870°C. La exposición es por un tiempo más corto, y se producen partes externas más delgadas hasta de 0.25 mm para cianuración y hasta de 0.76 mm para carbonitruración. En la cianuración, la proporción de nitrógeno y carbono en la superficie dura externa producida por un baño de cianuro depende de la composición y de la temperatura del baño, siendo esta última la más importante. El contenido de nitrógeno es más alto en los baños que funcionan en el extremo inferior del intervalo de temperatura que en aquellos que operan en el extremo superior del intervalo. Generalmente, el contenido de carbono de la superficie endurecida es menor que el producido por carburación, variando desde 0.5% hasta 0.8%. La superficie endurecida también contiene hasta 0.5% de nitrógeno; por ende, las superficies endurecidas resistentes al corte por lima pueden obtenerse por templado, a pesar del relativamente bajo contenido de carbono. Se dispone de diversas mezclas de cianuros para el baño. Aunque se emplean los baños de más altas concentraciones de cianuro de sodio, la mezcla que más se utiliza está formada por 30% de cianuro de sodio, 40% de carbonato de sodio y 30% de cloruro de sodio. Esta mezcla tiene un punto de fusión de 615°C y se conserva estable, en condiciones de operación continua. Los agentes activos

de endurecimiento de los baños de cianuración, carbono y nitrógeno no se producen directamente del cianuro de sodio (NaCN). El cianuro fundido se descompone ante la presencia de aire en la superficie del baño, para producir cianuro de sodio (NaNCO), el cual a su vez se descompone como sigue:



El contenido de carbono de la superficie endurecida desarrollado en el baño de cianuro aumenta al incrementarse la concentración de cianuro del baño, proporcionando de este modo considerable flexibilidad. Un baño que opera a 843°C y contiene aproximadamente 3% de cianuro puede utilizarse para restablecer el carbono en los aceros descarburizados, mientras que un baño con 30% de cianuro a la misma temperatura desarrollará una capa dura de 0.12 mm en la superficie de un acero al 0.65% de carbono en 45 minutos. Este proceso es particularmente útil para partes que requieren una porción externa muy dura y delgada, como tornillos, engranes, tuercas y pernos.

La carbonitruración es un proceso de endurecimiento superficial en el cual un acero se calienta en una atmósfera gaseosa de tal composición que el carbono y el nitrógeno se absorben simultáneamente. Las atmósferas utilizadas en carbonitruración generalmente incluyen una mezcla de gas portador, gas enriquecedor y amoníaco. El gas portador suele ser una mezcla de nitrógeno, hidrógeno y monóxido de carbono producido en un generador endotérmico, como en el de carburización por gas. El gas portador se proporciona al horno bajo presión positiva a fin de prevenir infiltración de aire y actúa como una sustancia inerte para los gases activos (hidrocarburos y amoníaco), haciendo de

este modo que el proceso sea más fácil de controlar. El gas enriquecedor es generalmente propano o gas natural y constituye la principal fuente para el carbono añadido. El ( $\text{NH}_3$ ) se disocia para proporcionar el nitrógeno a la superficie del acero. Las temperaturas utilizadas pueden ser de  $843^\circ\text{C}$  durante un tiempo aproximado de 20 minutos, seguido de un templado en aceite.<sup>(1)</sup>

### **Nitruración.**

Este es un proceso para endurecimiento superficial de aceros aleados en una atmósfera constituida por una mezcla en proporciones adecuadas de gas amoníaco y amoníaco disociado. La efectividad del proceso depende de la formación de nitruros en el acero por la reacción de nitrógeno con ciertos elementos de aleación. Las piezas que se nitrurarán se colocan en un recipiente hermético a través del cual, se proporciona continuamente la atmósfera de nitruración, mientras que la temperatura se eleva y se mantiene entre  $496^\circ\text{C}$  y  $565^\circ\text{C}$ . El ciclo de nitruración es largo, de 20 a 60 horas, dependiendo de la profundidad de la superficie dura deseada. Una superficie endurecida por nitruración consta de dos zonas distintas. En la zona exterior, los elementos que forman el nitruro, incluyendo el hierro, se han convertido en nitruros comúnmente se conoce como capa blanca. En la zona por debajo de esta capa blanca, solo los nitruros aleados se han precipitado, y en el núcleo generalmente se mantiene la estructura típica de martensita.<sup>(1)</sup>

## **2.10.- Propiedades mecánicas de los materiales.**

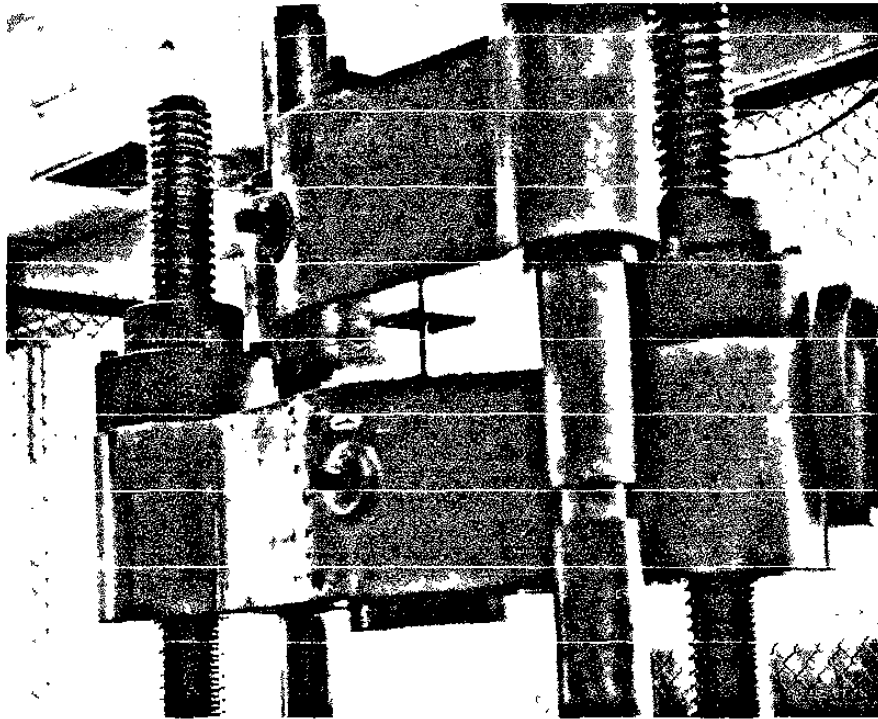
Los ensayos mecánicos dentro de la metalurgia mecánica tienen las siguientes finalidades: La primera es la de proporcionar información básica para el diseño, es decir, nos proporciona datos sobre la respuestas de los materiales bajo la acción de fuerzas exteriores.

La segunda finalidad es la de proporcionar información para la aceptación de especificaciones para fabricación de piezas, o bien, la verificación de especificaciones de materiales para su especificación. Los ensayos mecánicos están encaminados a proporcionar el máximo de información, o la más valiosa posible de la forma mas sencilla para su aplicación. En este trabajo Solamente se describirán los ensayos que se utilizaron para la realización de las pruebas necesarias para la tesis.

### **2.10.1.- Ensayo de tensión:**

El ensayo de tensión es ampliamente utilizado en la obtención de información básica para diseño y para la aceptación de especificaciones de materiales.

El ensayo consiste en aplicar a una probeta una fuerza de tensión creciente, y en medir la deformación obtenida, hasta la ruptura de la probeta. Un sistema de mordazas sujeta la muestra y ejerce una deformación sobre ella y un sistema dinamométrico mide la fuerza necesaria ver figura 6.



En la figura 6. Se puede observar la probeta sujeta por las mordazas de la máquina utilizada para ensayos de tensión. Shimadzu serie 5000 con capacidad de 100,000 Kgf.

Diagrama de Esfuerzo-Deformación.

El diagrama esfuerzo-deformación se obtiene relacionando el esfuerzo, definido como la fuerza aplicada a una probeta por unidad de superficie transversal inicial como lo indica la ecuación 3, con la deformación longitudinal en por ciento, lo cual viene dada por la ecuación 4.<sup>(9)</sup>

$$\text{Esfuerzo} = \frac{F}{A} = \frac{\text{Kg.}}{\text{mm}^2} \quad (3)$$

$$\text{Deformación } e = \frac{L - L_0}{L_0} \times 100 = \% \quad (4)$$

Un ejemplo de curva o diagrama de esfuerzo - deformación es el mostrado en la figura 7.

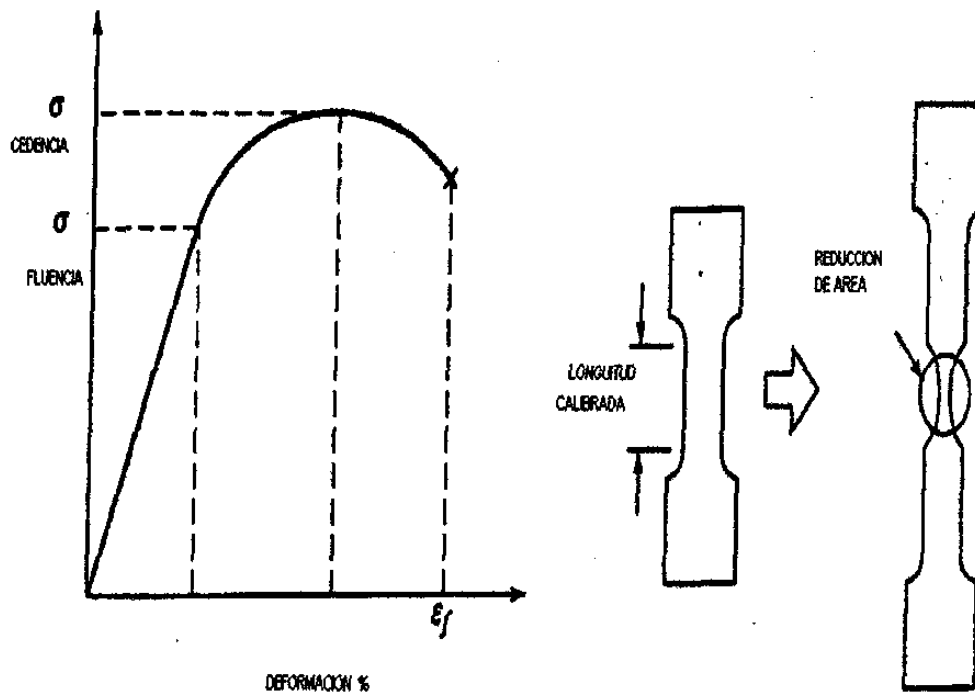


Figura 7. Grafico de esfuerzo - deformación

La configuración o geometría de la curva esfuerzo-deformación de un metal dependerá de su composición y tratamiento térmico.



### **2.10.2.- Ensayo de dureza.**

La dureza es una propiedad simple a medir en los aceros, que caracteriza la resistencia a la deformación. La facilidad de medición y su carácter semidestructivo justifican enormemente su empleo, en particular en el control de tratamientos térmicos, donde cualquier otro tipo de medición sobre la propia pieza es imposible.

EL carácter convencional de medición obliga a seguir modos de operación muy precisos para conservar la repetibilidad de valores, de donde surge la gran importancia del uso de las normas.

#### Clasificación de ensayos de dureza

Los ensayos de dureza pueden ser clasificados en cuatro grupos según el principio utilizado:

1. Ensayo esclerométricos o por ralladura.
2. Ensayos por rebote.
3. Ensayos por penetración
4. Métodos indirectos (ultrasonido y magnéticos)

Los ensayos que son de mayor importancia en la metalurgia mecánica son los ensayos por penetración, por lo que se comentará el principio.

### Ensayos de dureza por penetración.

Este tipo de ensayo se basa en medir la huella de un penetrador al aplicársele una carga fija. El penetrador puede ser piramidal o en esfera, según el tipo de ensayo.

Entre los ensayos principales se tienen:

- El ensayo Brinell, que utiliza esferas.
- El ensayo Rockwell, que utiliza esferas y diamante en cono.
- En ensayo Vickers, que utiliza diamante piramidal.
- Ensayos secundarios, que utilizan penetradores variados.

### **Ensayo de dureza Brinell.**

El probador de dureza Brinell generalmente consta de una pieza 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 3,000 Kg. para metales ferrosos y de 500 Kg. para metales no ferrosos. Para metales ferrosos la bola es presionada contra la muestra por lo menos durante 10 segundos; para metales no ferrosos el tiempo es de 30 segundos. El diámetro de la impresión producida se mide mediante un microscopio que contiene una escala ocular, generalmente graduada en décimos de milímetro, que permite estimaciones de hasta casi 0.05 mm.<sup>(9)</sup>

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

$$HB = \frac{L}{(\pi * D/2) (D - \sqrt{D^2 - d^2})} \quad (5)$$

Donde:

L = Carga de prueba, en kilogramos

D = Diámetro de la bola en milímetros

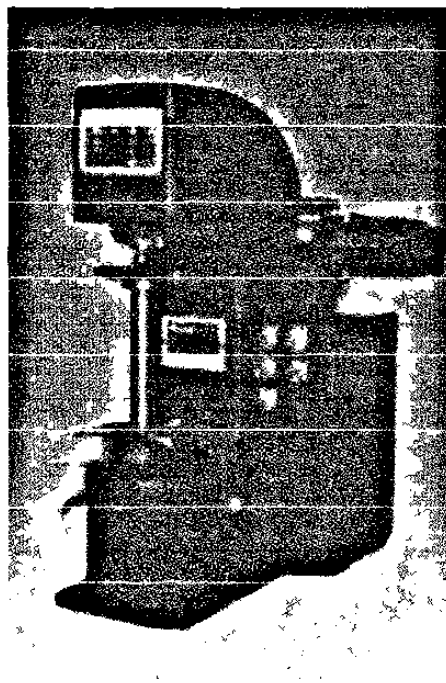
d = Diámetro de la impresión en milímetros.

Por lo general, no se necesita hacer cálculo ya que hay tablas para convertir el diámetro de la grabación observada al número de dureza Brinell.

En número de dureza Brinell seguido por el símbolo HB sin números sufijos indica condiciones de prueba estándar usando una bola de 10 mm de diámetro y una carga de 3,000 Kg., aplicada de 10 a 15 segundos. 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 bola; 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 segundos.

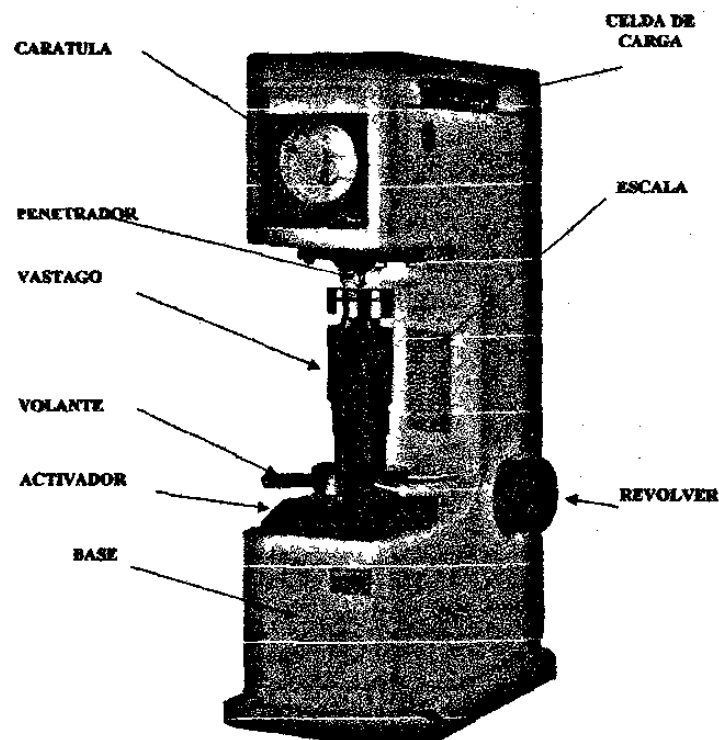
El número de dureza Brinell cuando se usa la bola ordinaria está limitado a 500 HB aproximadamente. Conforme el material a prueba sea mas duro hay tendencia a que el propio marcador se empiece a deformar y las lecturas no serán exactas. El límite superior de la escala puede aumentarse al usar una bola de carburo de tungsteno en vez de una bola de acero endurecido. En ese caso, es posible llegar a 650 HB aproximadamente, ver figura 8.



En la figura 8. Se puede observar un durómetro Brinell que es muy utilizado generalmente para evaluar dureza en un material metálico. Tiene celda de carga de 3000 Kg y 500Kg con penetrador de balón de acero de 10 mm y 5 mm.

## Ensayo de dureza Rockwell.

En esta prueba de dureza se utiliza un instrumento de lectura directa basado 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, llamada carga menor. Esto se indica en un disco medidor. Luego se aplica la carga mayor a través de un sistema de palanca. 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 se lee en el disco medidor<sup>(9)</sup>. Ver figura 9.

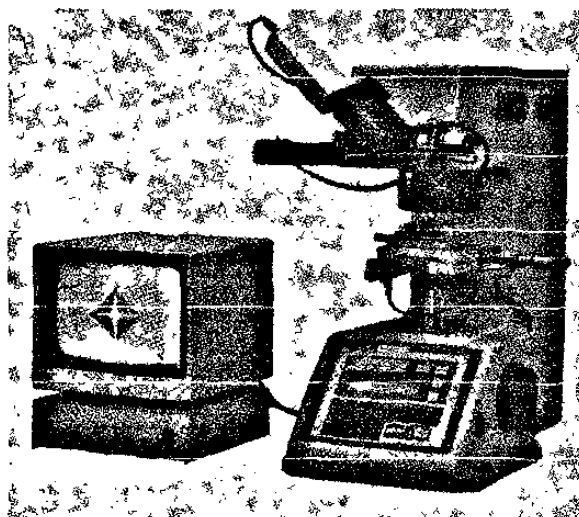


La figura 9. Muestra un durómetro Rockwell el cual utiliza penetrador de diamante y de bola de acero, cuenta con una escala para evaluar dureza en

HRc, HRb, 45N, 30N, 15N, 45T, 30T, 15T.

### **Ensayo de dureza Vickers.**

En esta prueba, el instrumento utiliza un marcador piramidal de diamante de base cuadrada con un ángulo de  $136^\circ$  entre las caras opuestas. El intervalo de carga esta generalmente entre 1 y 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 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 se mide por medio de un microscopio equipado con un micrómetro ocular que contiene fillos móviles. La distancia entre 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). Esta prueba es muy utilizada para piezas muy pequeñas, generalmente montadas en una probeta metalográfica, y se utiliza para realizar mapeos de dureza en el material,<sup>(9)</sup> ver figura 10.



En la figura 10. Muestra un Microdurómetro Vickers utilizado para obtener profundidad de cementado en aceros.

## **2.11.- Ensayo metalográfico y estructuras.**

Para efectuar un estudio metalográfico a una pieza, se requiere de una cuidadosa selección y preparación de la misma. La probeta deberá ser característica fiel del metal estudiado y servir para el fin a que se dirige tal estudio. La técnica de preparación de muestras es sencilla, pero requiere mucho cuidado en cada una de las etapas y sobre todo mucha limpieza. Las etapas para un ensayo metalográfico son: <sup>(13)</sup>

### **Toma de muestra:**

La muestra debe ser característica y representativa de las piezas a estudiar, debe escogerse la muestra del lugar que nos pueda dar mayor información o hacer interesante el estudio.

### **Corte de la muestra:**

Ya seleccionadas las muestras, se deberá tener precaución para seccionar la pieza a fin de no alterar sus propiedades y microestructura. Por ningún motivo se deberá sobrecalentar la muestra ya que el calentamiento puede alterar la estructura. Se debe tener en cuenta cómo se realizara el corte, ya sea longitudinal o transversalmente, según el caso del estudio.

### **Montaje de la muestra:**

El propósito del montaje es facilitar el manejo durante el pulido de la muestra y preservar los bordes, estandarizar tamaños y en algunas ocasiones identificar bien las muestras. El montaje consiste en incrustar una pequeña muestra

dentro de un soporte que puede ser metálico, resina, plástico. El tamaño adecuado de probeta o muestra, debe ser de 2.5 cm. de diámetro y 1.5 cm. de altura al fin de hacerla manejable manualmente, ver figura 11.



En la figura 11. Se puede observar el montaje de muestras utilizando baquelita de color negro, lucita que es transparente y resina autofraguante.

#### **Desbaste de probetas:**

Durante el corte de la muestra y dependiendo del método usado, se produce una deformación plástica en la superficie, la cual deberá eliminarse. El desbaste consiste en eliminar la capa deformada en la superficie de la muestra mediante la acción abrasiva de materiales con gran dureza y bordes agudos. La técnica de desbaste se describe a continuación:

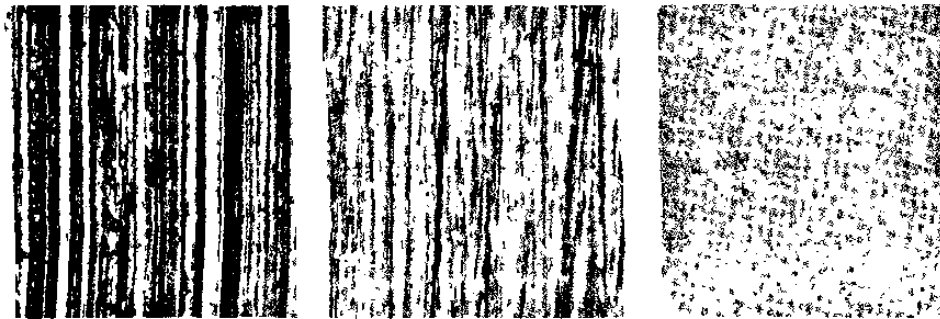
La superficie a pulir se presiona y se desliza sobre la superficie abrasiva ( por ejemplo lija 80). Deberá ser refrigerada todo el tiempo con chorro de agua, que servirá para arrastrar las partículas desprendidas del metal y abrasivo, además de enfriar la muestra para no sobrecalentarla. La muestra deberá moverse en una sola dirección, de manera que las partículas dejen rayas paralelas y de la misma profundidad. Se deberán eliminar las partículas en el chorro de agua para no contaminar el abrasivo más fino. La siguiente etapa es un abrasivo más fino (lija 120), desbastando ahora a 45° ó 90° respecto a la dirección de las



rayas paralelas, el nuevo rayado eliminará las anteriores. Se repiten todos los pasos anteriores hasta la última etapa del desbaste, utilizar lijas 240, 320, 400,600.

**Pulido de muestras:**

El objetivo del pulido es el de obtener una superficie plana y brillante (pulida a espejo), capaz de reflejar una cantidad de luz suficiente para poder observarla en el microscopio sin dificultad. El pulido se realiza en un material de superficie muy fina, para este caso se utiliza el paño. La finalidad de este paso es de seguir quitando material mediante el uso de polvos abrasivos de partículas muy finas. Estos se agregan sobre el paño y su importancia es tal, que su calidad depende de que al observar la muestra se obtenga una estructura real y sin ralladuras. Al igual que en el desbaste, el pulido se divide en tres etapas: grueso, intermedio y fino, según el tamaño del abrasivo usado. Normalmente se emplea alúmina de 1, 3 y 0.5 micras, en polvo diluido en agua destilada, o pasta de diamante de 1, 3 y 6 micras, ver figura 12.



La figura 12. Muestra las diferentes etapas de pulido de una probeta metalográfica a 50 x. Se observa que cuando la muestra es pulida en lijas de menor a mayor numero, va desapareciendo el rayado en la superficie.

**Ataque de muestras metalográficas:**

En general se revela la estructura de las aleaciones con un ataque diferencial o manchado de las diversas fases debido a su diferente composición química, con lo cual se tienen variadas velocidades de disolución. En aleaciones o metales monofásicos, la diferencia en velocidad de disolución no se atribuye a su composición química, sino a su orientación cristalográfica; unos granos son atacados con mayor o menor velocidad.

Antes del ataque, en la mayoría de las probetas es conveniente observarlas en el microscopio, en ocasiones los detalles son enmascarados por el ataque, así como los poros, grietas, defectos superficiales, etc. Para las inclusiones no metálicas, su evaluación se realiza sin ataque.

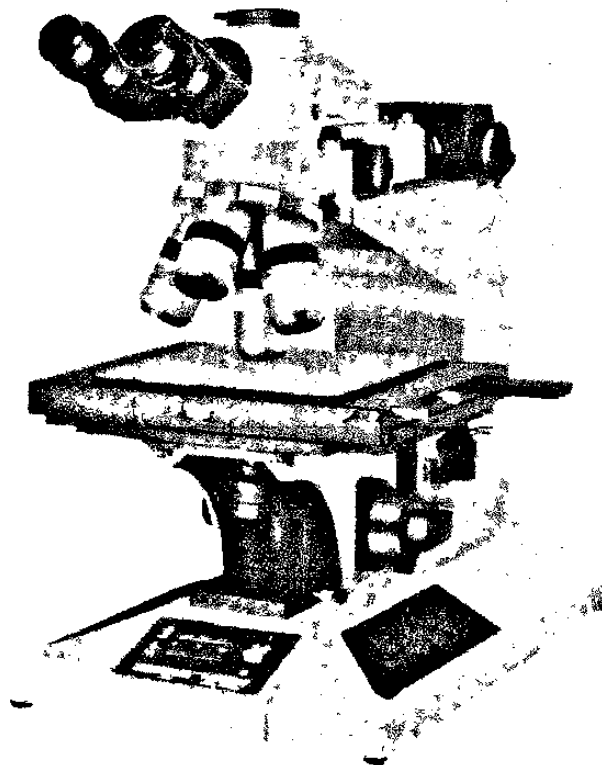
El ataque normalmente se efectúa de dos maneras: Inmersión o por frotación. En cualquier caso se recomienda seguir las indicaciones que se dan respecto a la temperatura y la concentración. El tiempo de ataque varía para cada muestra dependiendo de la magnificación a la que se va a observar, se debe recordar que la probeta deberá estar completamente libre de grasa y seca antes de atacar, con el fin de lograr un ataque bueno y uniforme. En caso de sobre atacar la muestra, se deberá pulir de nuevo, ya sea en el último e inclusive hasta el desbaste fino, dependiendo del daño provocado.

Los reactivos para llevar a cabo el ataque químico en la muestra metálica pueden ser de diferentes características lo cual depende del tipo de material, entre los más comunes se encuentran: El nital, picral y vilella, <sup>(13)</sup>

**Evaluación de la microestructura:**

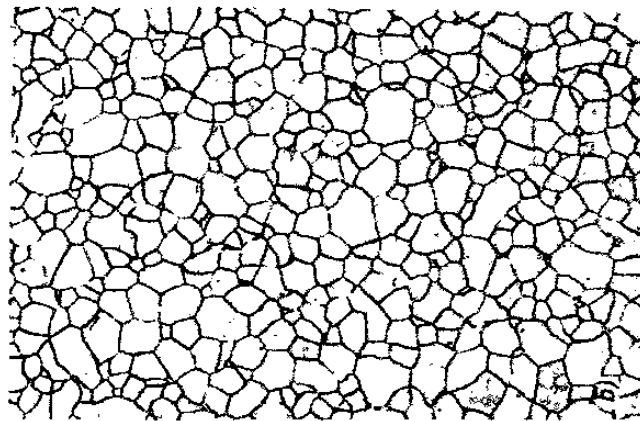
Para llevar a cabo la evaluación de una microestructura de un metal, es necesario contar con un microscopio óptico que reúna las características de magnificación o aumentos en sus respectivas lentes. Estas pueden ser de 100 x 500 x y de 1000 x .Debe poseer buena iluminación y un dispositivo para tomar la fotografía de la estructura a estudiar, ver figura 13.

A continuación se describen algunas propiedades y características principales de diversos constituyentes los cuales dan forma a la microestructura de los aceros.



La figura 13. Muestra un microscopio metalúrgico Finescope FS110 serie 378 con amplificación de 10 x – 4000 x. Con iluminación continua ajustable.

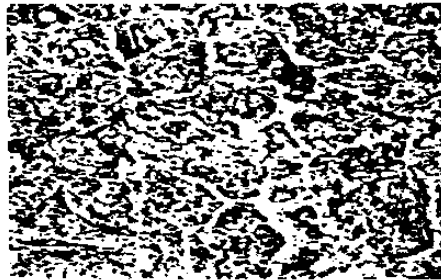
**Ferrita:** La ferrita o mejor conocida en el diagrama de hierro-carbono como hierro alfa, puede contener en solución pequeñas cantidades de otros elementos, como carbono, silicio, fósforo, y otros. Sus propiedades mecánicas son, aproximadamente: Resistencia a la tensión de 294 MPa, alargamiento 35% y dureza de 90 HB. La ferrita es la más suave de los constituyentes del acero, es dúctil, maleable y magnética. Para revelarla se ataca la muestra con un reactivo químico como el nital o algunas veces con vilellas, puede aparecer bajo formas diversas como elemento preutectoide acompañado a la perlita laminar,<sup>(1)</sup> ver figura 14.



En la figura 14. Se puede observar una estructura de ferrita con sus granos homogéneos con una magnificación de 100 x.

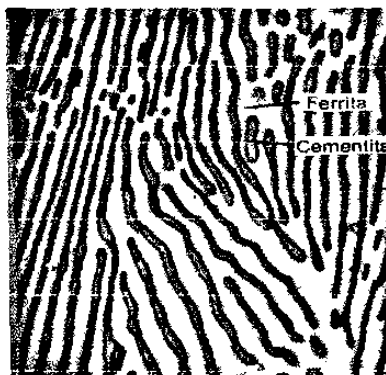
**Cementita:** La cementita es carburo de hierro ( $\text{Fe}_3\text{C}$ ), contiene aproximadamente 6.67% de carbono y 93.33% de hierro. Es el constituyente más duro y frágil del acero al carbono, su dureza supera los 68 HRC y cristaliza formando paralelepípedos ortorrómbicos de gran tamaño, no se revela o colorea con los reactivos usados comúnmente; aparece como blanco brillante

siempre que se ataca con reactivos ácidos. Debido a su gran dureza queda en relieve después de pulido, es magnética a temperatura ordinaria, lo pierde a  $218^{\circ}\text{C}$ ,<sup>(1)</sup> ver figura 15.



La figura 15. Muestra una estructura de cementita en una matriz de austenita la observación es, con una magnificación de 500 x.

**Perlita:** Es un constituyente eutectoide el cual se forma por capas alternadas de hierro alfa (ferrita) y carburo de hierro  $\text{Fe}_3\text{C}$  (cementita); su composición química es muy definida y contiene seis partes de hierro y una de carburos. Sus propiedades físicas son aproximadamente: resistencia = 783 MPa, la dureza fluctúa dependiendo de la separación de las laminillas, la perlita gruesa con separación ínter laminar de 400 micras tiene aproximadamente una dureza promedio de 200 HB y la perlita fina tiene 300HB, ver figura 16.



En la figura 16. Se observa láminas yuxtapuestas de cementita de color negro y ferrita de color blanco de una estructura de perlita a 500 x.

**Austenita:** Es una solución sólida de carbono en hierro gama, puede tener una solución desde 0 a 1.76% de carbono y es por lo tanto un constituyente de composición variable, todos los aceros se encuentran formados por cristales de austenita cuando se calientan a temperaturas superiores a las críticas. Sus propiedades físicas aproximadas serían: una resistencia de 85 a 105 Kg. / cm<sup>2</sup>, un alargamiento de 30 a 60% y una dureza de 300 HB. La austenita es poco magnética, blanda, dúctil y muy tenaz; tiene gran resistencia al desgaste y es el constituyente más denso de los aceros, <sup>(1)</sup> ver figura 17.



La figura 17. Muestra los cristales algunos con caras planas típico de la estructura de austenita.

**Martensita:** Es el constituyente típico de los aceros templados. Es admitida la teoría de formación por solución sólida, sobresaturada de carbono en hierro alfa. Esta estructura se obtiene por el enfriamiento rápido de los aceros, desde alta temperatura; el contenido de carbono suele variar generalmente desde pequeñas trazas hasta 1%, presenta un aspecto marcadamente acicular, formando agujas en zigzag con ángulos de 60°. Cuando la martensita aparecen sobre un fondo blanco (austenita), la observación a grandes aumentos es clara. Las propiedades físicas varían con la composición, aumentando la dureza,

resistencia y tenacidad con el contenido de carbono hasta un máximo para 0.90%. Después de los carburos y de la cementita, es el constituyente mas duro de los aceros, tiene una resistencia de 170 a 250 Kg. / mm<sup>2</sup>, una dureza de 50 a 68 HRc, un alargamiento de 2.5 a 5% y es magnético,<sup>(1)</sup> ver figura 18.



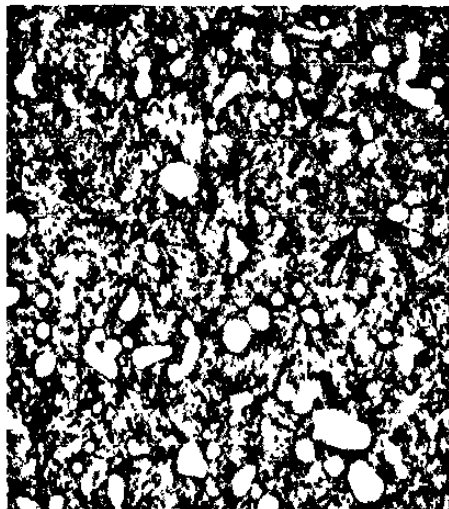
La figura 18. Muestra una estructura de martensita a 500 x. Se observa una ramificación de agujas sin revenido, en la matriz de ferrita.

**Bainita:** Se presentan dos tipos de estructuras; la bainita superior de aspecto arborescente, formada a 500 – 550°C. La bainita inferior se forma a temperaturas menores de 250 – 400°C, este tipo de bainita tiene aspecto acicular y es bastante parecida a la martensita. La bainita superior está formada por una matriz ferrítica, conteniendo carburos, la bainita inferior está formada por agujas alargadas de ferrita, las cuales contienen delgadas placas de carburos; éstas son pequeñas placas paralelas entre sí y su dirección forma un ángulo de 60° con respecto al eje de las agujas de ferrita,<sup>(1)</sup> Ver figura 19.



En la figura 19. Se muestra una estructura de bainita a 500 x formada por carburos de color negro y ferrita de color blanco.

**Carburos:** Son cuerpos muy duros formados por combinación de algunos elementos con el carbono y principalmente se presentan en los aceros rápidos, aceros indeformables de alto cromo. El molibdeno, tungsteno, vanadio y cromo, son altos formadores de carburos, ver figura 20.



En la figura 20. Se puede observar la estructura de un acero presentando carburos de cromo a 500 x.



## 2.12.- Difusión.

La difusión es esencialmente un fenómeno de naturaleza estadística, que resulta del movimiento al azar de los átomos. Mientras la trayectoria de un átomo individual puede ser en zigzag e impredecible, cuando un gran número de átomos hacen tales movimientos pueden producir un flujo sistemático. La difusión en soluciones sólidas sustitucionales pueden tener lugar por el mecanismo de vacancias, el mecanismo intersticial y el mecanismo de intercambio de átomos. La evidencia experimental indica que el movimiento de vacancias es el mecanismo principal de difusión en metales. La rapidez de difusión es mucho más grande en una aleación enfriada con rapidez que para la misma aleación enfriada lentamente. La diferencia se debe al mayor número de vacancias que se retienen en la aleación por el enfriamiento rápido. La migración de vacancias también requiere de una menor energía de activación cuando se compara con los otros dos mecanismos. La rapidez de difusión de un metal en otro se especifica por el coeficiente de difusión, el cual se expresa en unidades de centímetros cuadrados por segundo. Aunque el coeficiente de difusión es una función de diversas variables, una muy importante es la temperatura. Como regla general, se puede establecer que el coeficiente de difusión se duplica por cada 20 grados centígrados de aumento en la temperatura. Esto no es sorprendente, ya que todos los átomos vibran constantemente respecto a sus posiciones de equilibrio en la red y la amplitud de vibración aumenta al elevarse la temperatura. La energía asociada con estas vibraciones térmicas, frecuentemente conocidas como energía térmica, es

suficiente para hacer que un átomo salga, mediante un salto, de su posición de equilibrio bajo condiciones adecuadas.<sup>(5)</sup> Por lo tanto, la temperatura es, obviamente, un factor importante para determinar si es posible que ocurra el salto o difusión. Una aleación tiene la energía libre más baja cuando está en una condición homogénea, y ésta es la fuerza causante de la difusión.

La velocidad a la cual se difunden los átomos en un material se puede medir mediante el flujo  $J$ , que se define como el número de átomos que pasa a través de un plano de superficie unitaria por unidad de tiempo. La primera ley de Fick determina el flujo neto de átomos:  $J = -D \Delta C / \Delta X$  donde  $J$  es el flujo de átomos (átomos/cm<sup>2</sup>. s),  $D$  es la difusividad o coeficiente de difusión (cm<sup>2</sup>/s), y  $\Delta C$ ,  $\Delta X$  es el gradiente de concentración (átomos/cm<sup>3</sup>. cm). Durante la difusión varios factores afectan el flujo de átomos. El gradiente de concentración muestra la forma en que la composición del material varía con la distancia;  $\Delta C$  es la diferencia en concentración a lo largo de una distancia  $\Delta X$ . El gradiente de concentración puede crearse al poner en contacto dos materiales de composición distinta cuando un gas o un líquido entra en contacto con un material sólido, cuando se producen estructuras fuera de equilibrio en un material debido al procesamiento y por toda una serie de causas. El flujo a una temperatura en particular es constante sólo si también es constante el gradiente de concentración, esto es, las composiciones a cada lado del plano se conservan sin modificación. Por lo que también el flujo cambia. A menudo encontramos que el flujo es inicialmente alto y después se reduce gradualmente, conforme disminuye el gradiente de concentración por difusión.

### **2.13.- Proceso de Cementación.**

La carburización o cementación es un proceso que se ha venido empleando desde hace mucho tiempo, para producir una capa superficial dura y resistente, principalmente en aceros. La cementación es un proceso en el cual el acero en estado austenítico es puesto en contacto con una atmósfera de potencial de carbono, de manera que induzca la absorción de carbono en la superficie y por difusión, se genere un gradiente de concentración entre la superficie y el interior del metal.

Como lo indica la definición, existen dos factores que controlan el proceso: la absorción de carbono en la superficie y la velocidad de difusión hacia el metal.

El proceso de cementación se efectúa a temperaturas del orden de 850-950°C, pudiéndose realizar a temperaturas mayores o menores, dependiendo de la factibilidad y propósitos del proceso.

A continuación se describen los métodos de cementación gaseosa, cementación líquida y cementación sólida.

#### **2.13.1.- Cementación gaseosa.**

Durante el proceso de cementación gaseosa se absorbe carbono libre hacia la capa superficial del acero, el cual posee un porcentaje de carbono relativamente bajo, del orden de 0.2% en peso.

El carbono libre generado de una fuente gaseosa por medio de reacciones químicas que no involucran directamente al metal, pero que pueden ser catalizadas por su presencia, es absorbido por el acero.

La absorción de carbono hacia la superficie genera un gradiente de

concentración y los átomos de carbono se difunden hacia el interior de la pieza. Teóricamente la capa superficial del metal puede tener el potencial de carbono de la atmósfera a la temperatura de operación, pero no puede exceder la solubilidad límite de carbono en el metal.

En la mayoría de los casos el potencial de carbono de la atmósfera se controla para alcanzar un contenido de carbono determinado en la superficie del acero. Las velocidades relativas de absorción de la difusión del carbono varían dependiendo de diferentes factores.<sup>(6)</sup>

Por ejemplo: se ha estimado que ocurren hasta 180 reacciones químicas de manera simultánea en una atmósfera de cementación, de estas solo algunas son importantes y una sola reacción determina la velocidad a la cual se adiciona el carbono a la superficie del metal a ser cementado. El carbono es añadido rápidamente al principio del proceso cuando existen diferencias notables entre el potencial de carbono de la atmósfera y el contenido de carbono en la superficie. A medida que el porcentaje de carbono en la capa superficial se incrementa, la velocidad a la cual éste es absorbido, disminuye.

Al principio la cantidad de carbono que se difunde desde la superficie hacia el centro de la pieza es pequeña, excepto para ciclos de carburizado muy largos la velocidad de absorción de carbono predomina sobre la velocidad de difusión del carbono en acero, siendo de esta manera la velocidad de absorción de carbono el factor que controla la mayoría de los procesos de carburizado.

Las propiedades finales de una pieza cementada se desarrollan mediante un tratamiento térmico apropiado, usualmente temple y revenido.

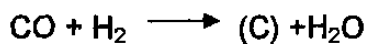
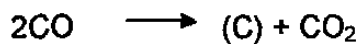
El proceso completo de cementación gaseosa puede dividirse en cuatro etapas:

1. Reacciones en la fase gaseosa
2. Transporte en la fase gaseosa
3. Reacciones en la interfase gas-metal
4. Difusión hacia dentro del metal

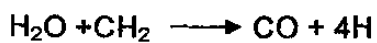
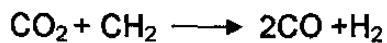
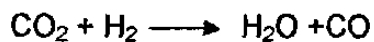
Naturalmente que la interacción entre una superficie de acero y mezclas gaseosas multicomponentes es compleja, involucrando reacciones de oxidación, reducción, carburización y decarburización.

Algunas de las reacciones a ser consideradas son:

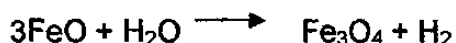
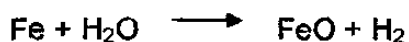
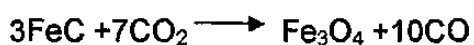
Reacciones Carburización - Decarburización.



Reacciones de Control de la Atmósfera



### Reacciones de Oxidación - Reducción



#### 2.13.2.- Cementación líquida.

La cementación del acero en un agente cementante líquido se realiza en baños de sales de diferentes composiciones a temperaturas comprendidas entre 820 y 930°C. Las mezclas de sales empleadas para esta finalidad suelen llamarse sales para cementar y es frecuente clasificarlas, aunque erróneamente, en sales para cementación superficial y cementación profunda. Estas designaciones inducen a error y es más correcto dividir las en sales *activadas* y *no activadas*. Todavía no están totalmente explicadas las reacciones que tienen lugar en un baño de sales, no es por ello de extrañar que discrepen las teorías expuestas por los diferentes científicos. Es sabido que el cianuro sódico se descompone térmicamente de acuerdo con la reacción:<sup>(6)</sup>



También se sabe que a 600°C el cianuro sódico reacciona con el polvo de hierro.



o también mediante la reacción:



El estudio de estas reacciones se realiza en ausencia de oxígeno. En la práctica no se realizan las cementaciones al abrigo del aire, y en los baños no activados se oxida primero el cianuro sódico a cianato.

De acuerdo a las reacciones anteriores la cementación líquida es un método de endurecimiento del acero, donde la sal de cianuro de sodio fundida introduce carbono y algunas veces nitrógeno hacia el acero. La cementación líquida puede efectuarse en hornos del tipo baño de sales, los cuales pueden ser calentados internamente o externamente. Cuando la pieza es inmersa en el baño de sales fundidas permanece un tiempo determinado y posteriormente se somete a un temple y revenido

### 2.13.3.- Cementación sólida.

La cementación sólida o cementación en caja es un proceso en el que el monóxido de carbono derivado de un compuesto sólido se descompone en la superficie del metal en carbono o dióxido de carbono, el carbono formado es absorbido hacia el metal por difusión.

Las reacciones que se llevan a cabo en la cementación son:



Donde (C) Fe, representa el carbono disuelto en la austenita.

El dióxido de carbono formado reacciona inmediatamente con el material cementante fresco para producir monóxido de carbono.

La reacción descrita se ve favorecida por activadores tales como carbonato de bario y carbonato de sodio, los cuales son parte del compuesto cementante. La cementación sólida se efectúa en un recipiente metálico cerrado (comúnmente acero inoxidable o un acero aleado) el cuál contiene la pieza a cementar rodeada del compuesto.<sup>(1)</sup>

Los compuestos cementantes más comunes contienen del 10 al 20 % de carbonatos de metales alcalinos, aglomerados con carbón o coke.

El tamaño de partícula del compuesto cementante es variable, sin embargo es común encontrar tamaños desde 6-8 mallas. Las temperaturas empleadas en el proceso oscilan entre 815-955°C.

**Las ventajas del proceso son:**

No requiere una atmósfera preparada, el proceso es económico, se aplica para engranes, piñones, cuñas o materiales expuestos a desgaste, se obtiene buena profundidad de cementado de hasta 3 mm y puede realizarse el temple en forma directa.

**Las desventajas:** Es un proceso por lotes, requiere tiempo excesivo durante el calentamiento, no se presta para alta producción y no es practico para metales delgados.



### 3.- DESARROLLO EXPERIMENTAL

A continuación se describe la forma de cómo se realizó el tratamiento de cementación sólida para un acero A.I.S.I. 8620 mediante el uso de dos cementantes como lo es el carbón vegetal y rebaba de hierro gris que fueron utilizadas para dicho estudio. Además se dan las características principales de los materiales empleados en este trabajo.

#### 3.1.- Propiedades mecánicas del acero A.I.S.I. 8620.

Se considero este tipo de acero ya que es factible para ser tratado mediante cementación sólida. Siendo su análisis químico bajo la norma AISI 8620.

<b>%C</b>	<b>%Mn</b>	<b>%P</b>	<b>%S</b>
0.18 – 0.23	0.70 – 0.90	0.035	0.040

<b>%Si</b>	<b>%Ni</b>	<b>%Cr</b>	<b>%Mo</b>
0.15 – 0.30	0.40 – 0.70	0.40 – 0.60	0.15 – 0.25

El acero en condición de normalizado tiene Las siguientes propiedades mecánicas bajo la norma AISI 8620.

Resistencia a la tensión. 633 MPa.

Limite de cedencia. 385 MPa.

Alargamiento (%). 26

Reducción de Área (%). 59

Dureza. 183 HBN.

## **Análisis inicial de las propiedades químicas y mecánicas del acero A.I.S.I. 8620. A estudiar.**

Se adquirió una barra redonda de 3/4". Esta barra fue maquinada para la obtención de las probetas para el ensayo de tensión, igualmente se preparo una muestra para corroborar el análisis químico de este acero y se obtuvieron muestras para dureza y análisis metalográfico.

Los resultados obtenidos del análisis químico son los siguientes:

<b>%C</b>	<b>%S</b>	<b>%Mn</b>	<b>%P</b>	<b>%Si</b>	<b>% Cr</b>	<b>% Ni</b>	<b>% Mo</b>	<b>% Cu</b>
0.18	0.027	0.86	0.007	0.26	0.48	0.41	0.20	0.12

La vía de análisis del %C y % S. Fue realizado por combustión y detección infrarroja y el resto de los elementos por espectrometría de rayos x.

Datos tomados a la probeta al momento de realizar el ensayo de tensión.

Diámetro = 12.74 mm, longitud calibrada = 50.8 mm, Área = 122.47 mm<sup>2</sup>.

Las propiedades mecánicas obtenidas de la muestra estudiada son:

Carga máxima. 9120 Kgf

Resistencia a la tensión. 700 MPa.

Limite de cedencia. 695 MPa.

Alargamiento (%). 13

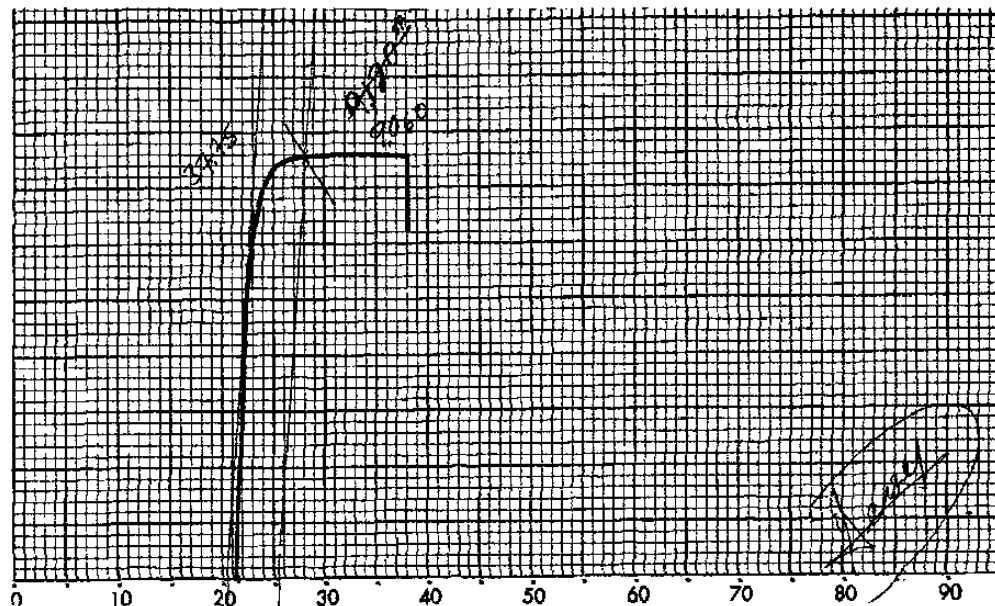
Reducción de Área (%). 49

Dureza. 197 HBN.

De acuerdo al análisis obtenido y comparándolo con lo que especifica la norma.

Si corresponde a un acero A.I.S.I. 8620 en condición de normalizado.

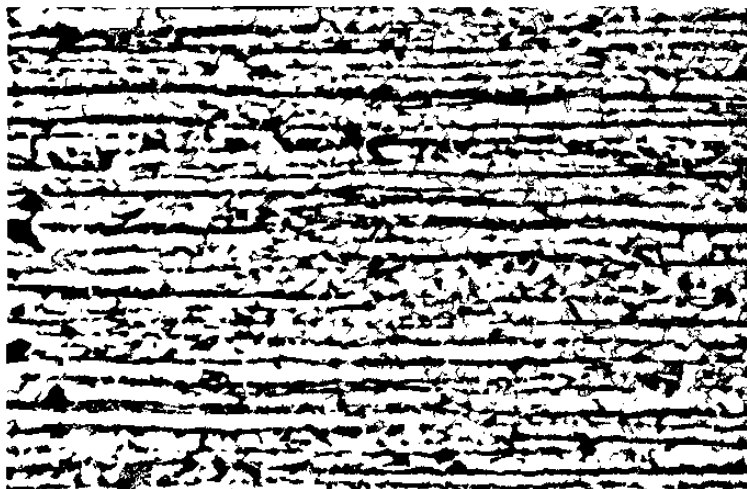
En la grafica 1 se muestran los resultados de un ensayo de tensión del acero utilizado para este trabajo.



Gráfica 1. Ensayo de tensión acero AISI 8620.

### **Análisis metalográfico del acero A.I.S.I. 8620. Estudiado.**

La microestructura revela granos equiaxiales de ferrita con bandeado de perlita, el tamaño de grano ferrítico es de  $9 - 9 \frac{1}{2}$ . Ver figura 21.



La figura 21. Muestra la estructura de perlitita del acero AISI 8620.

### 3.2.- Características de los cementantes:

Para realizar la cementación sólida se utilizaron dos cementantes, por separado. Estos son de gran importancia para la aportación del carbono mediante difusión hacia el interior del acero. En el cual se lograra modificar sustancialmente sus propiedades mecánicas. El primer cementante, fue el carbón vegetal, el cual se obtuvo a partir de madera de mezquite. Recibió una trituration hasta pequeños trozos e incluso hasta tener polvo, ver figura 22.



En la figura 22. Se puede observar como el carbón es triturado para ser utilizado en la cementación del acero a estudiar.

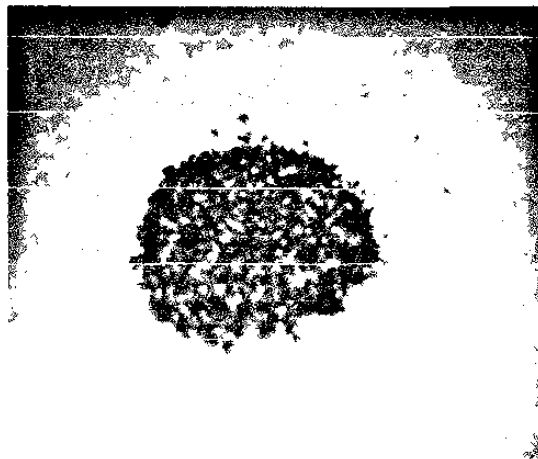
El resultado del análisis granulométrico del carbón es el siguiente:

Numero de malla	Abertura (mm)	Retenido (grs.)
4	3.92	25
6	3.36	149
8	2.80	23
10	2.24	28
16	1.24	92
30	0.59	42
Finos	-	136

Respecto al análisis obtenido, se considera que existe una variedad importante de tamaño de partículas de carbón, lo cual darán facilidad al desprendimiento homogéneo del carbono en forma de gas.

Para el análisis granulométrico se utilizo una muestra representativa de carbón vegetal que fue de 500 grs. La cantidad total utilizada en la prueba fue de 3 Kg.

El otro cementante utilizado fue rebaba de hierro gris, ver figura 23.



La figura 23. Muestra la granulometría de rebaba de hierro que se utilizo para realizar el cementado del acero a estudiar.

El análisis químico obtenido por combustión y detección infrarroja en el hierro gris utilizado, es el siguiente:

<b>%C</b>	<b>%Si</b>	<b>%S</b>	<b>%Mn</b>
3.2	1.6	0.04	0.60

La granulometría realizada a esta rebaba de hierro gris fue la siguiente:

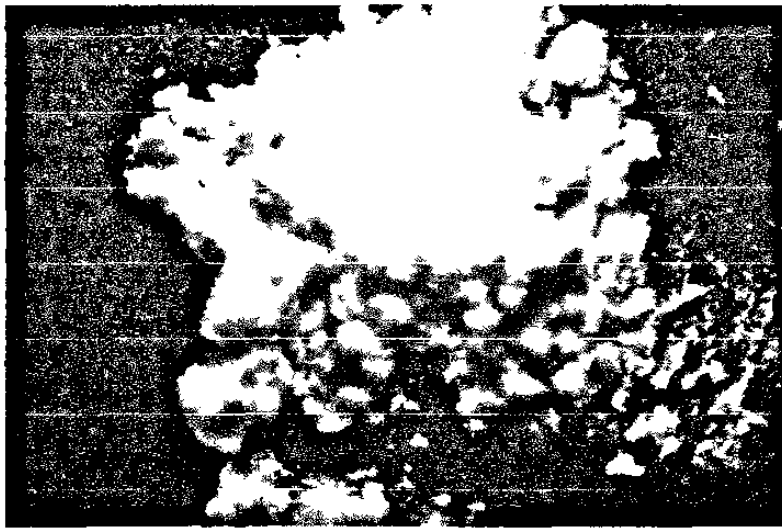
Numero de malla.	Abertura (mm)	Retenido (grs.)
4	3.92	0
6	3.36	2
8	2.80	16
10	2.24	58
16	1.24	267
30	0.59	102
Finos	-	84

Por lo tanto en base al análisis granulométrico se detecta que contiene en su mayoría partículas muy pequeñas que ayudarán en forma eficiente al calentamiento de las mismas facilitando la difusión de carbono hacia el acero. La muestra para el análisis granulométrico fue de 530grs. Y la cantidad total para la prueba de cementación fue de 8 Kg.

### 3.3.- Características de las sales.

Las sales que pueden mezclarse con el material cementante son: Carbonato de bario, carbonato de potasio, carbonato de sodio o carbonato de calcio. La función principal de estos compuestos es energizar, facilitando o activando el dióxido de carbono con carbono para formar monóxido de carbono que es el gas necesario para llevar dicha difusión del carbono en el acero, y se puede lograr hasta 1.2% de C, en la superficie del material.<sup>(3)</sup>

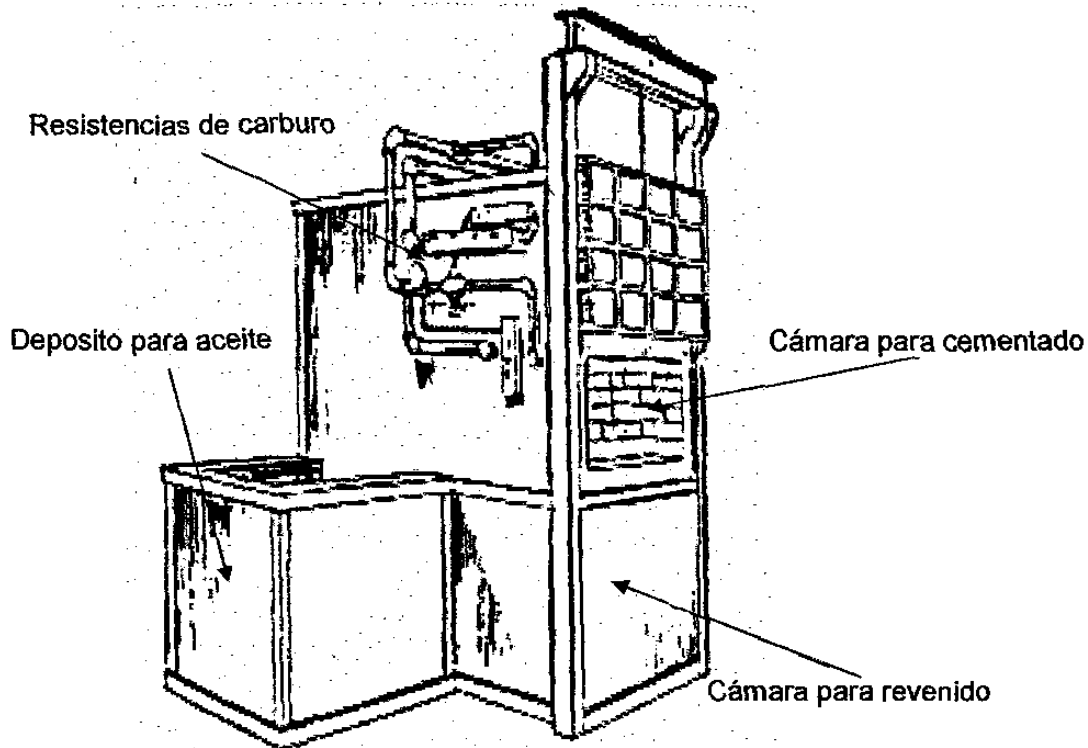
En la prueba de cementación realizada, se utilizó carbonato de bario agregando la cantidad de 10% con respecto a la cantidad de cementante utilizado en la prueba. La mezcla posteriormente fue homogenizada, ver figura 24.



En la figura 24. Se observa el polvo de carbonato de bario que se uso.

### **3.4.- Horno utilizado para el tratamiento de cementado.**

El tratamiento térmico se realizó en un horno eléctrico de resistencia de doble cámara, una de ellas se usa para al cementado y la otra para el revenido. El horno ésta provisto de 8 resistencias de carburo de silicio en forma de barra. Esta revestido con ladrillo refractario de tipo aislante y de resistencia a altas temperaturas, la máxima temperatura que alcanza es de 1200°C. Ver figura 25.



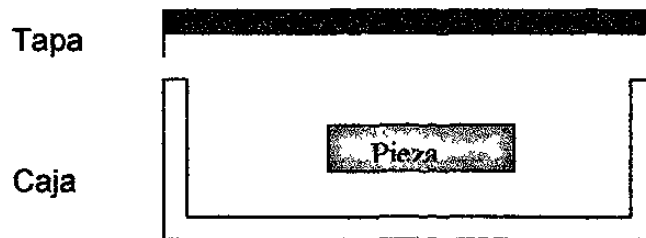
La figura 25. Muestra un horno de resistencias de carburo de silicio, el cual tiene una cámara superior para realizar tratamientos térmicos de temple o de cementación y otra cámara inferior para el tratamiento de revenido, a un lado se encuentra el recipiente que contiene aceite para temple.

### 3.5.- Preparación de caja metálica para el cementado.

Se diseñó una caja metálica de placa de acero de 63 mm de espesor cuyas medidas son: largo 30 cm. ancho 20 cm. y altura 18 cm. Con su respectiva tapa. Posteriormente dentro de la caja se agregó una cama de la mezcla de cementante de carbón vegetal, añadiendo además la sal de carbonato de bario. Luego se colocaron las muestras de acero A.I.S.I. 8620, una probeta para el ensayo de tensión y una muestra como testigo, la cual se utilizó para el ensayo



metalográfico y ensayo de dureza. Una vez colocadas dentro de la caja, se le agregó mas mezcla hasta dejar completamente llena la caja. Enseguida se colocó la tapa sobre la caja y con arcilla refractaria se cubrieron los contornos de la tapa para evitar que exista entrada o salida de oxígeno durante el calentamiento. De la misma manera que fue preparada la caja, se realizó otro estudio pero ahora utilizando como cementante rebaba de hierro gris mezclada con carbonato de bario. Una vez preparada la caja con las muestras ha estudiar, ésta fue puesta dentro del horno para su tratamiento. Ver figura 26.



La figura 26. Muestra la caja metálica con su tapa. En el interior se coloca el cementante, la sal y la muestra que será cementada posteriormente.

### **3.6.- Realización y condiciones del tratamiento de cementación.**

La cementación sólida para el acero A.I.S.I. 8620, mediante el uso de carbón vegetal como cementante, se procedió de la siguiente manera:

\* La probeta de acero y el testigo, rodeados de carbón y carbonato de bario contenidos en la caja metálica completamente sellada, se colocaron dentro de la cámara del horno, se cerró la puerta, y el control se indicó a 930°C,

iniciándose el calentamiento. El horno alcanzó la temperatura de 930°C en un tiempo de 4.0 hrs. En ese momento se inició el conteo tomando como base 12 horas de permanencia. Una vez transcurrido el tiempo, se sacó la caja, se retiró la tapa y se procedió a sacar las muestras llevándolas a temple con aceite tipo quench-s. El enfriamiento fue con agitación manual y en forma continua, hasta temperatura de 30°C. Posteriormente las probetas se colocaron en la otra cámara que dispone el horno, para darle el revenido a una temperatura de 230°C, por un tiempo de una hora y un enfriamiento al ambiente. Una vez concluido el tratamiento las muestras pasaron a ser analizadas a los ensayos de tensión, metalográfico y mapeo de dureza.

El ciclo térmico de cementado utilizado está esquematizado en la figura 27.

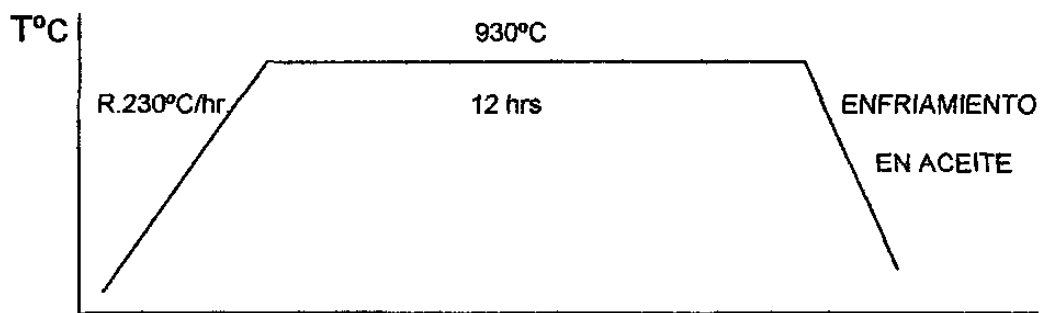


Figura 27. Ciclo térmico de cementado.

El ciclo térmico de revenido se ilustra en la figura 28.

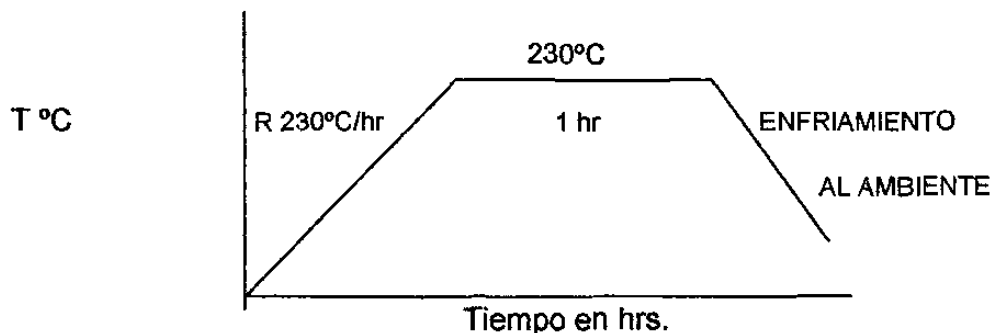


Figura 28. Ciclo térmico de revenido.

La cementación sólida para el acero A.I.S.I. 8620 mediante el uso de rebaba de hierro gris como cementante, se procedió de la siguiente manera:

\* La probeta de acero y el testigo, rodeados de rebaba de hierro gris y carbonato de bario fueron contenidos en la caja metálica completamente sellada. La caja se colocó dentro de la cámara del horno, se cerró la puerta y en el control de temperatura se indicó 930°C, iniciándose el calentamiento. El horno alcanzó la temperatura de 930°C en un tiempo de 4.0 hrs. En ese momento se inicio el conteo tomando como base 12 hrs. de permanencia. Una vez transcurrido el tiempo, se sacó la caja, se retiró la tapa y se procedió a sacar las muestras llevándolas a temple utilizando aceite tipo quench-s. El enfriamiento fue con agitación manual y en forma continua, hasta temperatura de 30°C. Posteriormente las probetas se colocaron en la otra cámara que dispone el horno para darle el revenido a una temperatura de 230°C por un

tiempo de una hora y un enfriamiento al ambiente. Una vez concluido el tratamiento las muestras pasaron a ser analizadas a los Ensayo de tensión, ensayo metalográfico y mapeo de dureza.

El ciclo térmico de cementado utilizado está esquematizado en la figura 29.

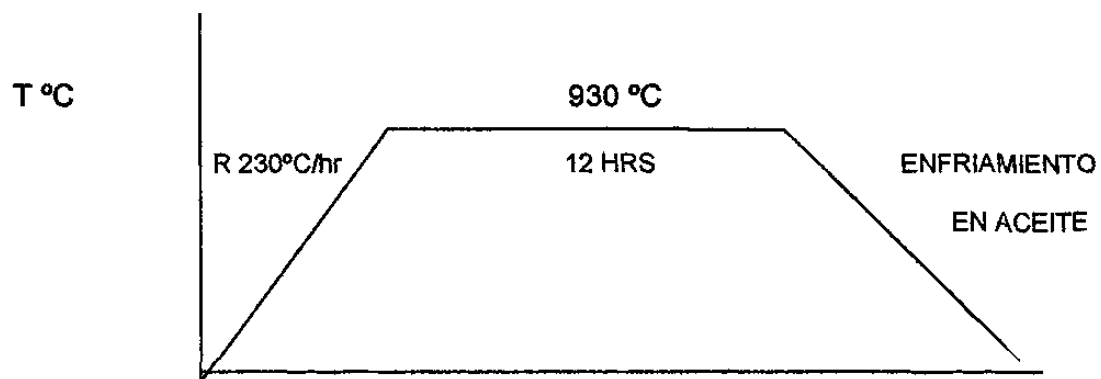


Figura 29. Ciclo térmico de cementado.

El ciclo térmico para el revenido se ilustra en la figura 30.

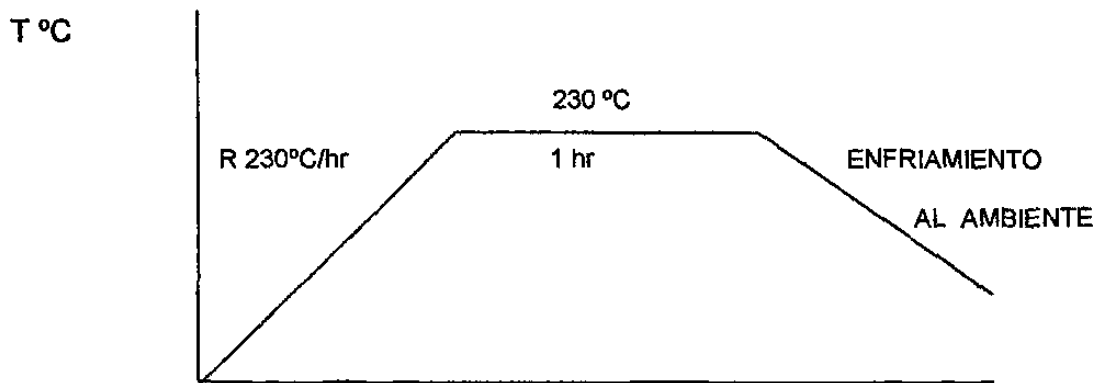


Figura 30. Ciclo térmico de revenido.

## **4.- Resultados y discusión.**

### **4.1.- Resultados obtenidos en el ensayo de tensión.**

La probeta de acero cementada con carbón vegetal fue ensayada en una máquina para tensión, con las siguientes características:

Datos tomados ala probeta al momento de realizar el ensayo de tensión.

Diámetro. 12.50 mm

Longitud calibrada. 50.80 mm

Área. 122.71 mm<sup>2</sup>

**Los resultados obtenidos son:**

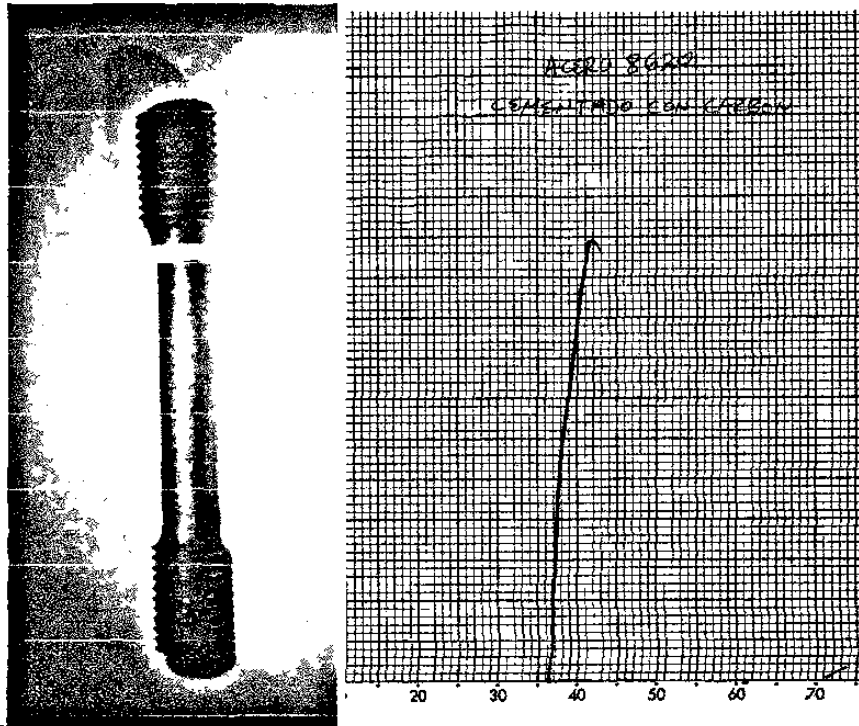
Carga máxima. 12947 Kg-f

Carga de fluencia. Falta de fluencia.

Esfuerzo máximo. 1033 MPa.

Alargamiento. Fuera de puntos

En la grafica 2. Se muestra los resultados de un ensayo de tensión del acero utilizado para este trabajo.



Grafica 2. Ensayo de tensión, utilizando como cementante carbón vegetal.

La probeta de acero cementada con rebaba de hierro fue ensayada en una maquina para tensión .Teniendo la probeta las siguientes características:

Datos tomados ala probeta al momento de realizar el ensayo de tensión.

Diámetro. 12.74 mm

Longitud calibrada. 50.80 mm

Área. 127.47 mm<sup>2</sup>

**Los resultados obtenidos son:**

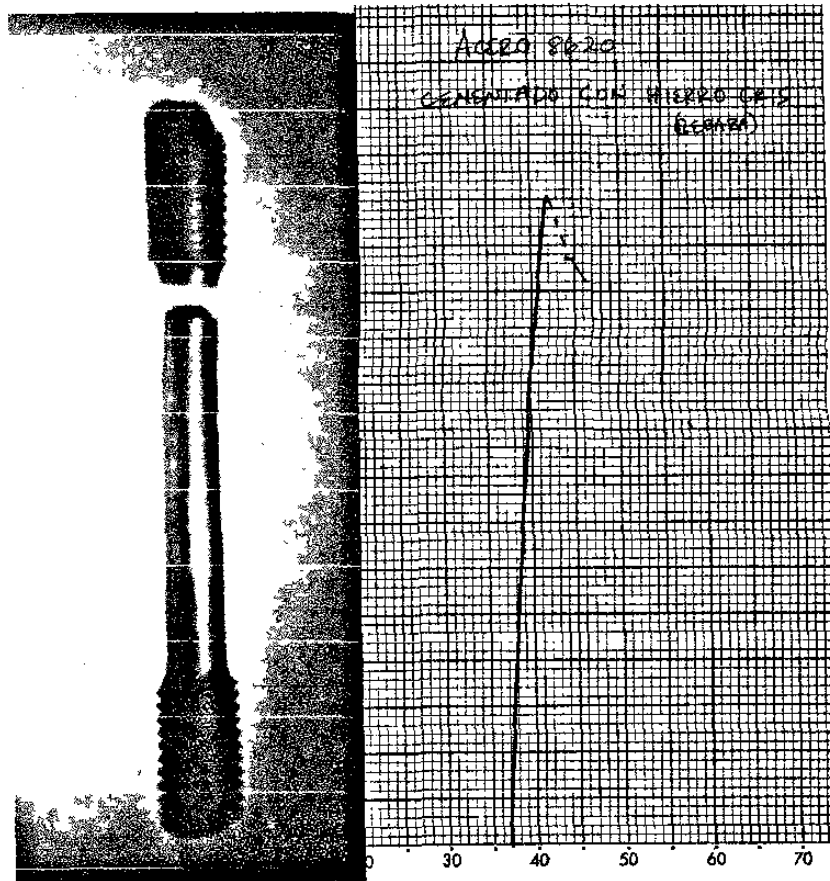
Carga máxima. 16710 Kg-f

Carga de fluencia. Falta de fluencia.

Esfuerzo máximo. 1284 MPa.

Alargamiento. Fuera de puntos.

En la grafica 3. Se muestran los resultados de un ensayo de tensión del acero utilizado para este trabajo.



Grafica 3. Ensayo de tensión, utilizando como cementante rebaba de hierro.

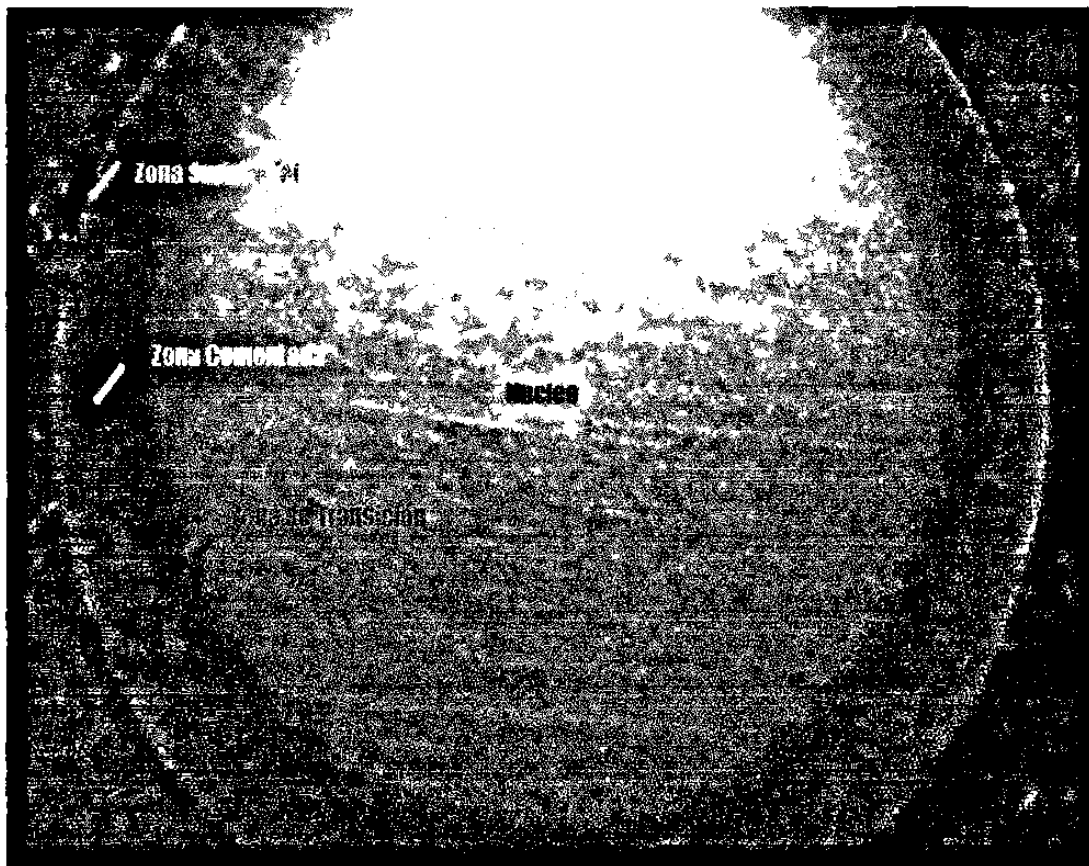
Las condiciones de temperatura, tiempo y enfriamiento fueron las mismas durante el tratamiento de cementación mediante carbón vegetal y rebaba de hierro gris. La curva de esfuerzo-deformación de las probetas cementadas con carbón vegetal y rebaba de hierro gris presentaron una *linealidad inicial* con poco desplazamiento durante la deformación y con tendencia a un mínimo de alargamiento, las probetas presentaron alta tenacidad ocasionando que no se lograra registrar la carga de fluencia y la zona de la fractura quedo fuera de la longitud calibrada por lo que fue imposible determinar el porcentaje de alargamiento en la muestra. Definitivamente el alargamiento mostrado resulto ser mínimo ya que la fractura de la probeta aunque presenta poca ductilidad no muestra cambios significativos en su diámetro.

La carga máxima que presentó la muestra que fue cementada con rebaba de hierro gris fue de 16710 Kgf y la cementada con carbón vegetal fue de 12947 Kgf. Estos valores nos indican una importante diferencia entre las dos muestras estudiadas.



#### 4.2.- Resultados obtenidos en el análisis metalográfico

Se puede observar en la figura 31. Una de las probetas metalográficas que se utilizaron para realizar la profundidad de cementado con carbón vegetal como también de la misma forma el cementado con rebaba de hierro gris. En esta figura muestra las distintas zonas analizadas metalográficamente.



La figura 31. Muestra la zona superficial, zona cementada, zona de transición y el núcleo de donde se tomaron las microestructuras del acero estudiado.

La microestructura de la probeta cementada con carbón vegetal se muestra en las figuras 32 a 35.

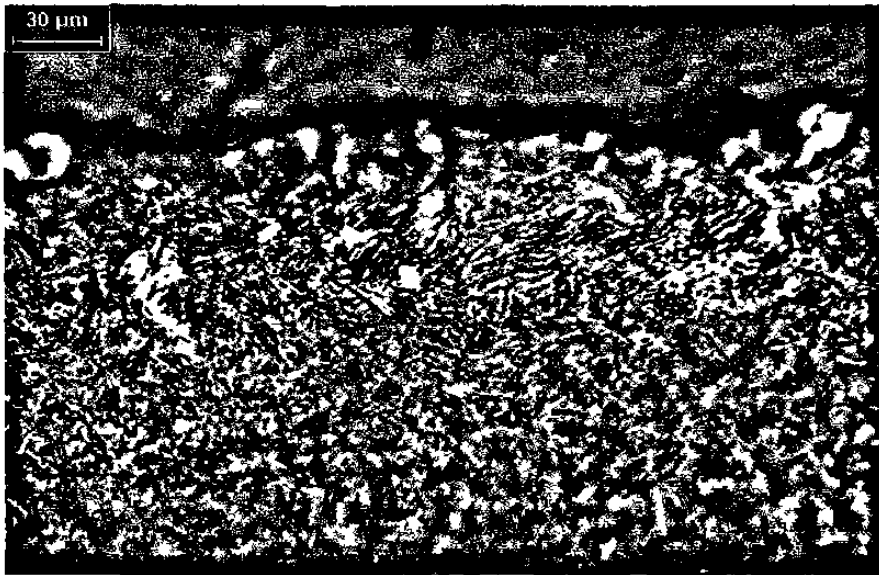


Figura 32. Zona superficial: Presenta una zona decarburada más martensita.200x

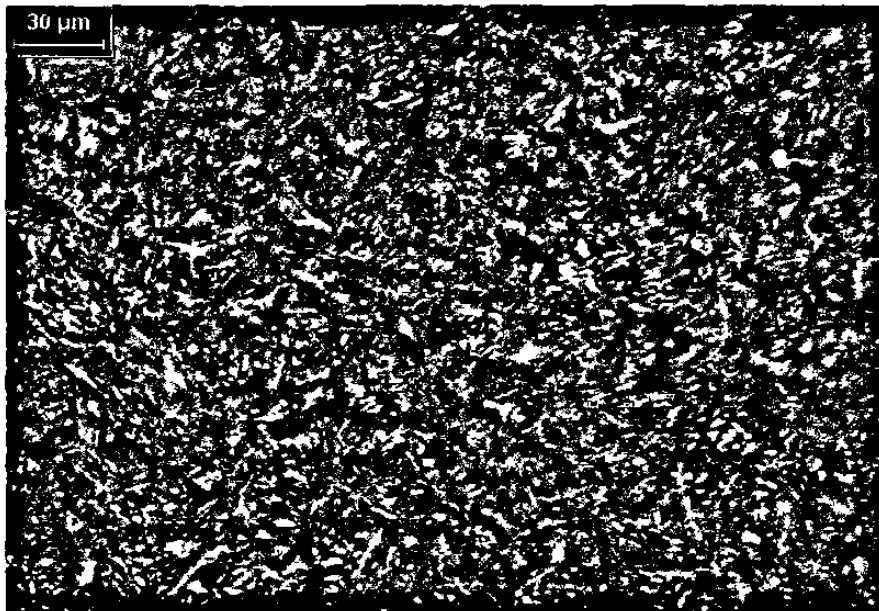


Figura 33. Zona cementada: Presenta estructura de martensita 200x.

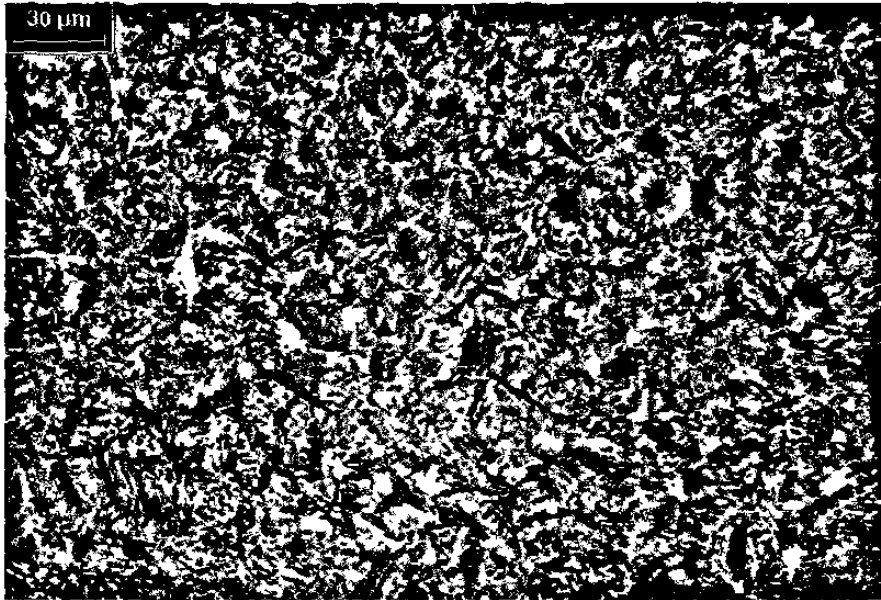


Figura 34. Zona de transición: Presenta perlita, bainita y martensita 200x.

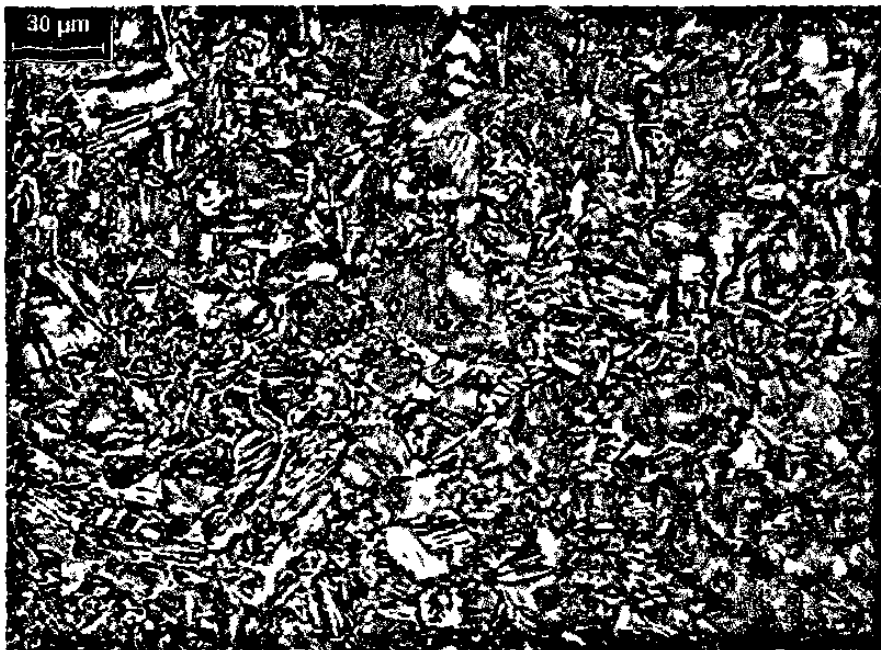


Figura 35. Zona del núcleo: Presenta una estructura de martensita más ferrita. 200x.

La microestructura de la probeta cementada con rebaba de hierro puede ser observada en las figuras 36, 37, 38, 39.

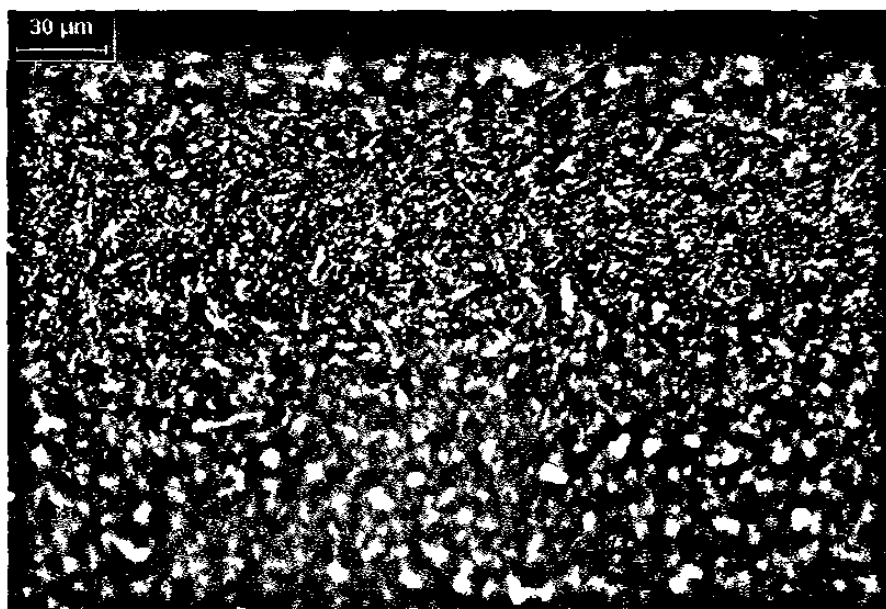


Figura 36. Zona superficial: Presenta una decarburación y martensita. 200x.

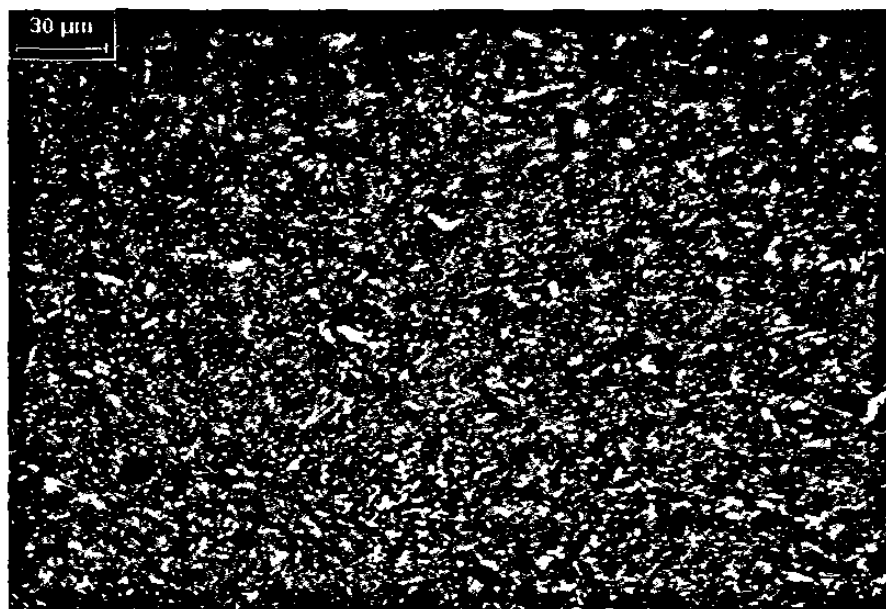


Figura 37. Zona cementada: Presenta una estructura de martensita. 200x.

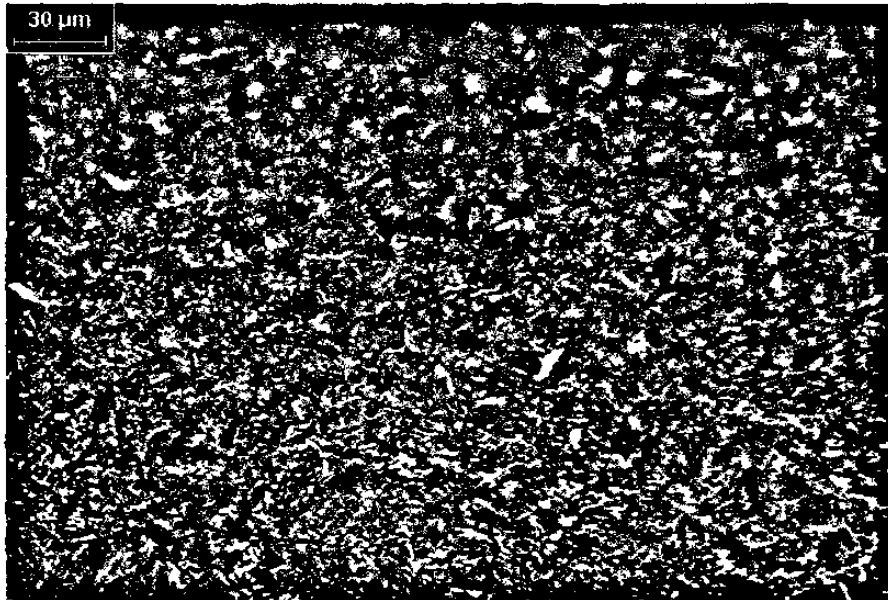


Figura 38. Zona de transición: Presenta una estructura de martensita fina más bainita. 200x.

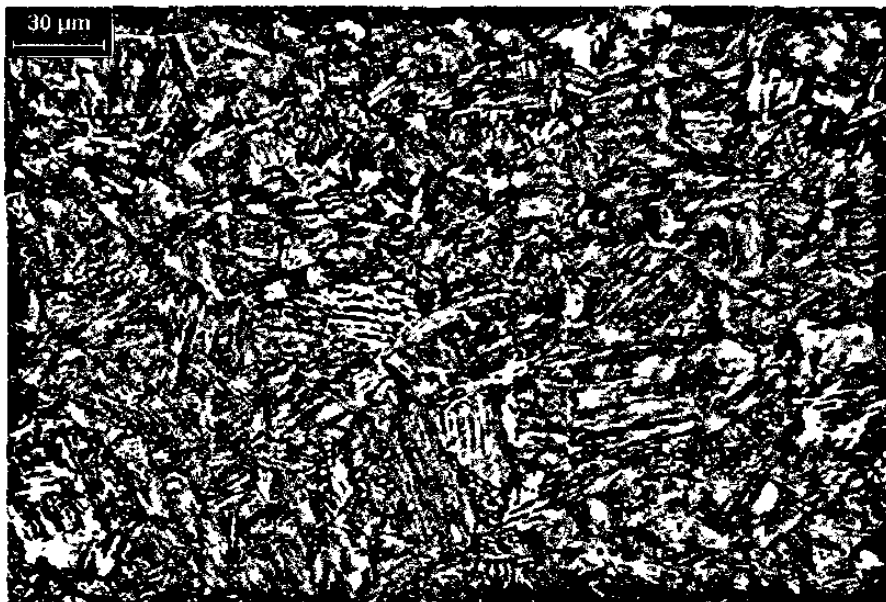


Figura 39. Zona del núcleo: Presenta una estructura de martensita más ferrita. 200x.

La microestructura obtenida en la cementación con carbón vegetal y rebaba de hierro gris presentaron en la superficie una capa descarburizada lo cual sería una fuente de fallas, en particular con fatiga y desgaste, esto podría minimizarse mediante el maquinado superficial en la pieza, dejándola en las tolerancias especificadas.

En la zona cementada, las dos probetas presentaron una alta concentración de carbón. Dando origen a la formación de martensita. Para el caso de la pieza cementada con carbón vegetal, la martensita formada no es tan homogénea como en la formada con la rebaba de hierro gris, como se puede observar en las figuras. 33 y 37

En la zona de transición existe una diferencia muy marcada en cuánto a la estructura obtenida en las dos probetas. En la pieza cementada con carbón vegetal se presentaron 3 constituyentes en esta área siendo perlita, bainita y martensita, y en la probeta cementada con rebaba de hierro gris presento una estructura de martensita fina y bainita que es ideal para las propiedades mecánicas deseadas, ver figura 34 y 38.

En el núcleo, las muestras cementadas con carbón vegetal y rebaba de hierro gris presentaron una estructura de martensita más ferrita, ver figura 35 y 39.

### 4.3.- Profundidad de cementado.

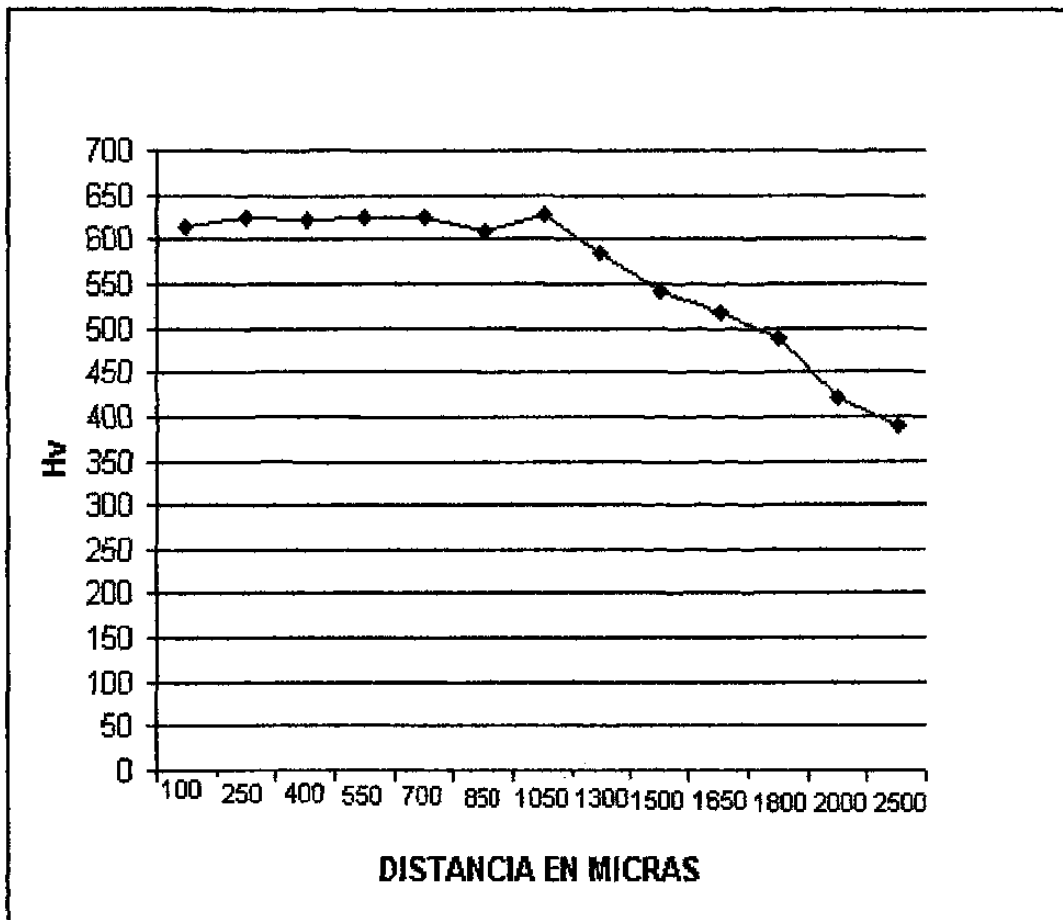
Para conocer la profundidad de cementado en las probetas metalográficas después del tratamiento térmico, se utilizó el durómetro Vickers para llevar a cabo un mapeo de microdureza en las probetas bajo la Norma A.S.T.M E-384. En la figura 40. Se ilustra las probetas analizadas.



En la figura 40. Se puede observar las dos probetas metalográficas que fueron cementadas con carbón y rebaba de hierro gris.

El mapeo de microdureza realizado a la probeta cementada con carbón vegetal, dio los resultados siguientes ver figura 41.

Distancia en micras	Hv <sub>500</sub>	HRc
100	614	56
250	625	57
400	621	56
550	625	57
700	625	57
850	608	56
1050	627	57
1300	585	54
1500	543	52
1650 *	517	50
1800	488	48
2000	420	42
2500	390	39



La figura 41. Muestra la grafica obtenida de profundidad de cementado con carbón vegetal en el acero estudiado.



La figura 42 muestra imágenes correspondientes al mapeo de microdureza de la probeta cementada con carbón vegetal.

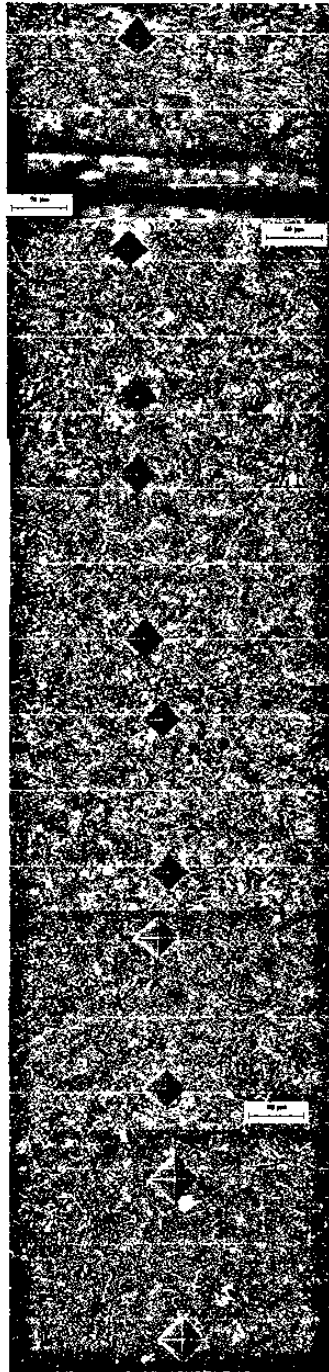


Figura 42. Mapeo de microdureza de la pieza cementada con carbón vegetal.

En la figura 43 se muestra el mapeo de profundidad de cementado de la probeta cementada con carbón vegetal.

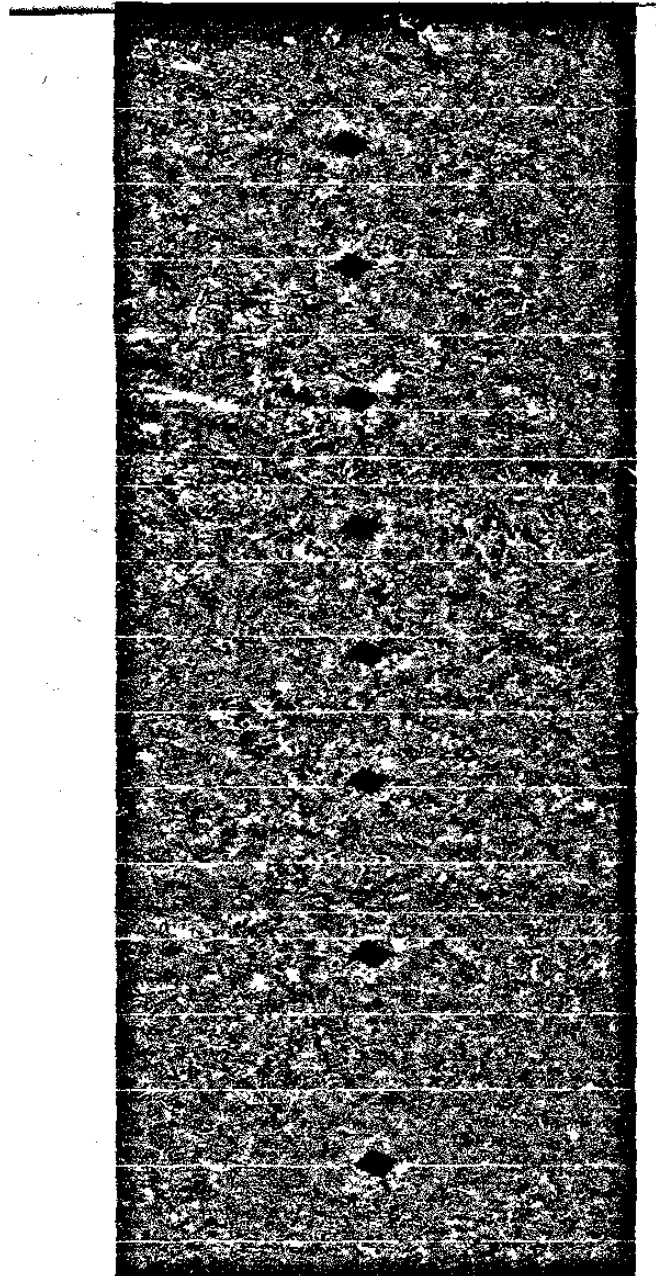
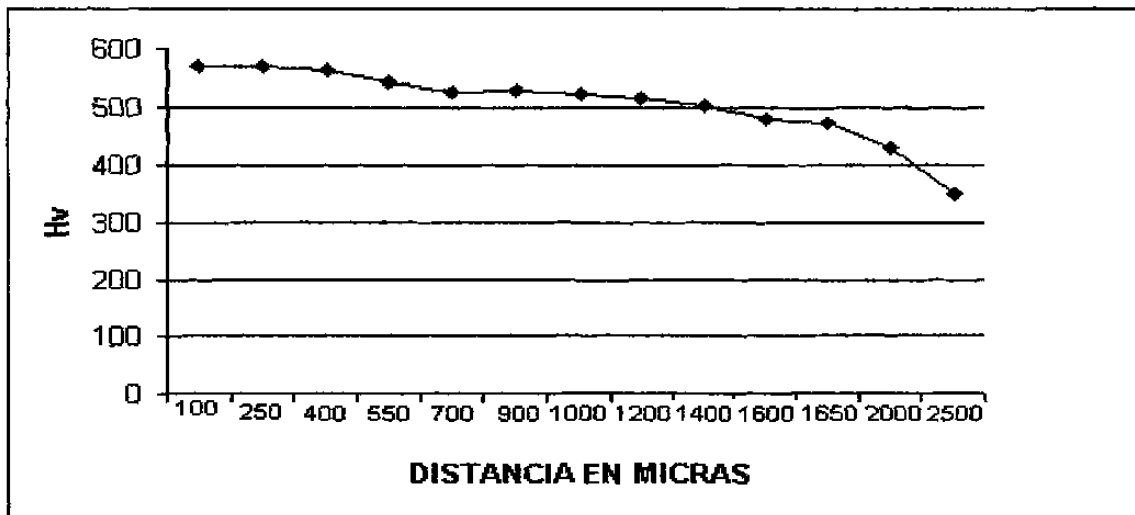


Figura 43. Mapeo de profundidad de cementado (blanco y negro).

El mapeo de microdureza realizado a la probeta cementada con rebaba de hierro gris, dio los resultados siguientes ver, figura 44.

Distancia en micras	Hv <sub>500</sub>	HRC
100	569	53
250	569	53
400	565	53
550	542	52
700	527	51
900	529	51
1000	523	51
1200 *	516	50
1400	504	49
1600	479	48
1650	473	47
2000	430	43
2500	350	35

La figura 44. Muestra la profundidad de cementado con hierro gris.



La figura 45 muestra las imágenes correspondientes al mapeo de microdureza de la probeta cementada con rebaba de hierro.

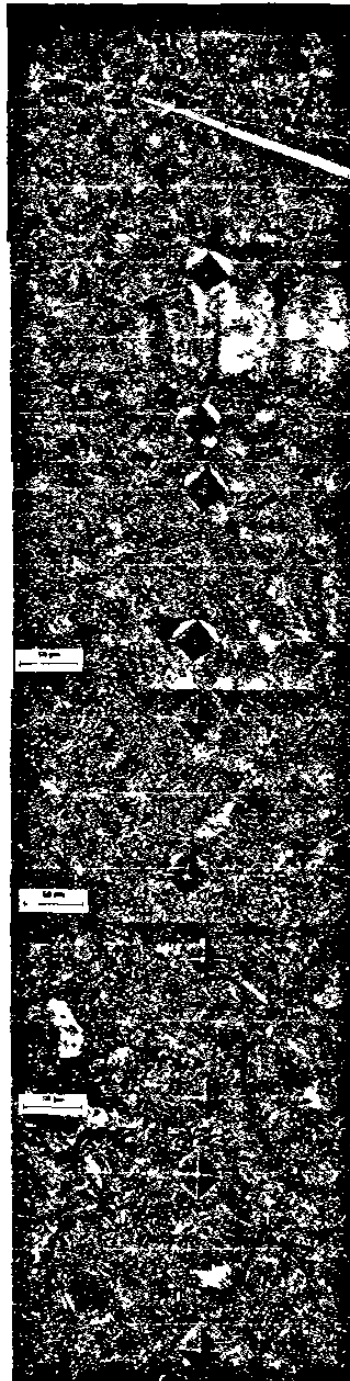


Figura 45. Mapeo de microdureza de la pieza cementada con rebaba de hierro.

En la figura 46 se muestra el mapeo de profundidad de cementado de la probeta cementada con rebaba de hierro.

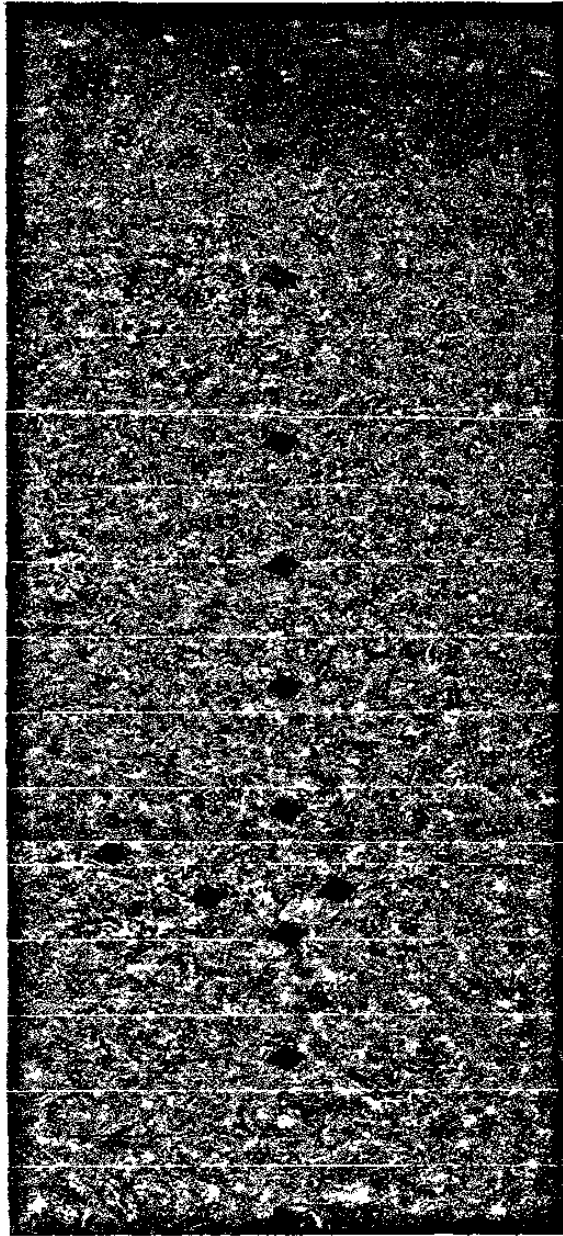


Figura 46. Mapeo de profundidad de cementado (blanco y negro).

El objetivo de realizar pruebas de cementado en determinadas piezas es el de obtener una superficie dura con resultado de la formación de una fase de martensita proporcionando un incremento en la resistencia al desgaste, en tanto que el acero conserva un núcleo blando que le confiera buena tenacidad.

El resultado de este trabajo muestra que el contenido de carbono de la superficie cambió con el tiempo, aumentando rápidamente al principio y después con más lentitud en periodos mas prolongados. Para la muestra cementada con carbón vegetal se obtuvo mayor profundidad de cementado siendo de 1650 micrómetros, y la profundidad en la muestra que utilizo hierro gris fue menor, logrando una superficie cementada de 1200 micrómetros. Se debe considerar que no debemos de seguir la eficiencia del cementado solamente por su profundidad, sino que hay que tomar en cuenta también que tipo de estructuras están presentes en la pieza cementada así como sus propiedades mecánicas.

## 5. Conclusiones y Recomendaciones

### Conclusiones.

- Las estructuras obtenidas en el tratamiento térmico de cementado para este tipo de acero, para el caso donde se utilizó carbón vegetal se observó que en la zona superficial se presentó una zona decarburada y martensita, en la zona cementada presentó en su totalidad una estructura de martensita, en la zona de transición se encontró perlita, bainita y martensita. Finalmente, en el núcleo presento martensita mas ferrita.
- Para el caso donde se utilizó rebaba de hierro la observación estructural fue la siguiente. En la zona superficial presentó una decarburación y martensita, en la zona cementada se encontró martensita, en la zona de transición había martensita y bainita, y en el núcleo presentó una estructura de ferrita y martensita. Como se puede apreciar, existe diferencia en la zona de transición, para los dos casos, una presenta perlita en zona de transición y la otra no presenta. En el núcleo presenta solamente martensita y ferrita. Esto será reflejado en las propiedades mecánicas que se obtuvieron en las probetas.
- Se observó que la probeta que fue cementada con carbón vegetal alcanzó una profundidad de cementado de 1650 micrómetros con una

dureza de 50 HRc y la otra probeta cementada con rebaba de hierro alcanzo una profundidad de cementado de 1200 micrómetros con una dureza de 50 HRc, estos valores se consideran buenos, lográndose más profundidad en la probeta cementada con carbón respecto a la cementada con rebaba de hierro.

- En cuanto a resistencia a la tensión, la muestra de acero estudiada antes de realizar las dos pruebas con los cementantes alcanzó un esfuerzo máximo de 700 MPa. La muestra que posteriormente fue cementada con carbón vegetal obtuvo un esfuerzo máximo de 1033 MPa. Con este valor de resistencia a la tensión se logro un incremento de 333 MPa. Siendo un 47% de incremento en sus propiedades mecánicas.
  
- Para la muestra cementada con rebaba de hierro, el esfuerzo máximo fue de 1284 MPa. Esto nos indica que aumento 584 MPa. Lo que representa un 83% de incremento en sus propiedades mecánicas, con estos valores se concluye que la probeta que fue cementada con rebaba de hierro arroja valores más satisfactorios, dando margen a su aplicación para la sustitución de una pieza metálica, reposición, implementación o mejora.
  
- Si realizamos un análisis comparativo con cuatro aceros de uso convencional en la industria, se observa que la muestra cementada con rebaba de hierro gris tiene una resistencia a la tensión más alta que los siguientes aceros:



Acero AISI 4140 Resistencia a la tensión máxima 1184 MPa.

Acero AISI 1090 Resistencia a la tensión máxima 978 MPa.

Acero AISI 9840 Resistencia a la tensión 1101 MPa.

Acero AISI Tipo P6 Resistencia a la tensión 1136 MPa.

- Para realizar pruebas en campo usando un acero AISI 8620. Cementado con rebaba de hierro gris, mediante el proceso de cementación sólida se obtendría mejores resultados en cuanto a resistencia al desgaste y alta tenacidad que serían favorables para un equipo o componente que está en funcionamiento en una máquina.

### Recomendaciones.

- Para el proceso de cementación sólida en caja se puede utilizar otro acero como el AISI 1020 considerando que sus propiedades pueden ser un poco menor que las adquiridas con el acero utilizado en este estudio.
- Para el caso donde se utilice carbón vegetal como cementante se recomienda utilizar una caja metálica de mayor volumen para eficientar la difusión del carbono.
- Para el cementado en caja de aceros, se recomiendan temperaturas de 945°C durante un tiempo de permanencia de 10 hrs, seguido por un enfriamiento en forma directa con aceite de alta velocidad de enfriamiento, y un revenido de 250°C por un tiempo de 2 hrs. por pulgada de espesor de la muestra. Con un posterior enfriamiento al ambiente. Estas condiciones de temperatura y enfriamiento serian favorables para obtener resultados en sus propiedades mecánicas más estables en cuanto a: Esfuerzo de cedencia, % de alargamiento, y % De reducción de área.
- Antes de cualquier cementado de piezas de acero se recomienda que el material este en condición de normalizado, ya que por sus cristales que están en forma homogénea facilitan el proceso de difusión de carbono hacia la superficie del mismo.

## 6.-INDICE DE FOTOGRAFIAS

Descripción de fotografía	Página
Maquina para ensayo de tensión.....	26
Durometro brinell.....	31
Durometro rockwell.....	32
Microdurometro Vickers.....	33
Montaje de probetas metalográficas.....	35
Pulido de muestras.....	36
Microscopio Electrónico.....	38
Estructura de ferrita.....	39
Estructura de cementita.....	40
Estructura de perlita.....	40
Estructura de austenita .....	41
Estructura de martensita.....	42
Estructura de bainita.....	43
Estructura de carburos.....	43
Estructura del acero AISI 8620.Normalizada.....	54
Cementante carbón vegetal.....	55
Cementante de hierro gris.....	56
Sal de carbonato de bario.....	58
Horno para cementación sólida.....	59

	87
Probeta de tensión cementada con carbón.....	65
Probeta de tensión cementada con hierro.....	66
Probeta que indica la zona analizada.....	68
Estructuras del cementado con carbón .....	69
Probetas del cementado con rebaba de hierro gris.....	71
Mapeo de microdureza.....	76

## 7.- REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

<b>Autor</b>	<b>Texto</b>	<b>Editorial</b>	<b>Año</b>
1.- Sydney H. Avner	Introducción a la metalurgia Física.	McGraw-Hill	1990
2.- Yu, M, Lajtin	Metalografía y tratamiento Térmico de los aceros.	MIR. Moscú	1977
3.- B.A.Kolachev	Tecnología de tratamiento de. Metales y aleaciones no ferrosos	MIR. Moscú	1980
4.- James P. Schaffer	The science and design of Engineering materials.	McGraw-Hill	1999
5.- Philip D. Harvey	Engineering properties of steel.	ASM	1982
6.- J. Apraiz B	Tratamientos térmicos de Los aceros	Dossat	1981
7.- J. Luis Carvajal	Tratamientos térmicos	NE	1990
8.- Joseph. E. Shigley	Diseño en Ingeniería Mecánica.	McGraw-Hill	1990

9.- Donald R. Askeland	Ciencia e Ingeniería de los materiales.	Thomson	2002
10.- American Society for Metals.	Metals handbook	N/E	1976
11.- John Wiley	Steel and its heat Treatment.	N/E	1976
12.- Williams R.S.	Principles of Metallography	Graw Hill	1980
13.- I.M.I.S	Metalografía	N/E	1986
14.- Crossman M.A	Elements of Hardenability	ASM	1980
15.- Dion, J.L	Foundrym Soc.	AFS	1986
16.- Sergio Cuevas	Moldeo y fundición	AFS	1989
17.- Pierre Julián T.	La Metalurgia	Barcelona	1969

## 8.- RESUMEN AUTOBIOGRÁFICO

Jesús Salvador Luna Alvarez nació en Saltillo Coah. México. El 15 de marzo de 1963. Obtuvo el grado de Ingeniero Metalúrgico en el Tecnológico de Saltillo en diciembre de 1986. En 1994 realizó la especialización en fundición en el Tecnológico de Saltillo terminando en el año 1995. Inicia la Maestría en Ingeniería Mecánica Con Especialidad En Materiales en FIME (UANL) en el año de 1998 concluyendo en el año 2000.

En 1987 ingresó al Instituto Mexicano de Investigaciones Siderúrgicas (IMIS), como Asistente-Investigador en el área de Aseguramiento de Calidad de Materias Primas, fundición, colada continua y laboratorio metalúrgico. En 1992 el instituto cambia de razón social a Corporación Mexicana de Investigación en Materiales (COMIMSA), donde Jesús Salvador Luna Alvarez obtiene el puesto de jefe de Tratamientos Térmicos y Pruebas Mecánicas. En 1994 pasa a formar parte del Centro de Formación Cifunsa, como Capacitador externo en el área de Procesos y Calidad. En 1997 prestó sus servicios a una empresa de fabricación de vestiduras para el ramo de la industria automotriz (LEAR). En 1998 pasa a formar parte como Académico y Jefe del laboratorio de Metrología de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Coahuila. Actualmente labora como catedrático y presta sus servicios como agente capacitador y brinda asesorías en la industria metal mecánica.

Small, illegible text fragment, possibly a page number or reference mark.