

11126
19



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES
CUAUTITLAN

"METALOGRAFIA DE LOS ACEROS SIMPLES Y PREPARACION DE
PROBETAS PARA SU USO EN EL LABORATORIO DE TECNOLOGIA DE
MATERIALES"

T E S I S
QUE PARA OBTENER EL TITULO DE
INGENIERO MECANICO ELECTRICISTA
P R E S E N T A :
EDUARDO CARLOS DIAZ VASQUEZ

ASESOR M.I., FELIPE DIAZ DEL CASTILLO RODRIGUEZ

QUAUTITLAN IZCALLI, ESTADO DE MEXICO.

2003.

A



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.



FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES CUAUTITLAN
 UNIDAD DE LA ADMINISTRACION ESCOLAR
 DEPARTAMENTO DE EXAMENES PROFESIONALES

**TESIS CON
 FALLA DE ORIGEN**

ASUNTO: VOTOS APROBATORIOS

UNIDAD DE ESTUDIOS
 CUAUTITLAN

DR. JUAN ANTONIO MONTARAZ CRESPO
 DIRECTOR DE LA FES CUAUTITLAN
 P R E S E N T E

ATN: Q. Ma. del Carmen García Mijares
 Jefe del Departamento de Exámenes
 Profesionales de la FES Cuautitlán

Con base en el art. 28 del Reglamento General de Exámenes, nos permitimos comunicar a usted que revisamos la TESIS:

"Metalografía de los aceros simples y preparación de probetas
 para su uso en el laboratorio de tecnología de materiales"

que presenta el pasante: Eduardo Carlos Díaz Vázquez
 con número de cuenta: 9561003-0 para obtener el título de:
Ingeniero Mecánico Electricista

Considerando que dicho trabajo reúne los requisitos necesarios para ser discutido en el EXAMEN PROFESIONAL correspondiente, otorgamos nuestro VOTO APROBATORIO.

A T E N T A M E N T E
"POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU"

Cuautitlán Izcalli, Méx. a 17 de Diciembre de 2002.

PRESIDENTE	<u>Lic. Federico Vargas García</u>	
VOCAL	<u>M.E. Joaquín Flores Paredes</u>	
SECRETARIO	<u>M.I. Felipe Díaz del Castillo Rodríguez</u>	
PRIMER SUPLENTE	<u>Inq. David García Carreto</u>	
SEGUNDO SUPLENTE	<u>Inq. Jorge Cervantes Diez</u>	

AGRADECIMIENTOS

A ti Dios quien quiera que seas, por crear el universo, la tierra y al ser humano, entre ellos a mi.

A mis padres por apoyarme durante mis estudios, en especial a mi madre por brindarme incondicionalmente siempre todo su cariño y paciencia.

A mis compañeros y amigos con los que viví memorables momentos durante la etapa universitaria: Arturo Luz P., Luis A. Betanzos, Gerardo G., Paco, Edgar, Darío A., Alejandro B., Camilo Olvera, Gambo, Ulises, Juan C. López E., y a todos aquellos IME's que me brindaron su amistad; en especial a mi mejor amigo de la universidad Tomas Jiménez Reyes por su apoyo en todo momento.

A mi asesor Felipe Díaz del Castillo Rodríguez por sus enseñanzas y apoyo para el desarrollo de la presente tesis.

A la UNAM por brindarme la oportunidad de realizar mis estudios profesionales y a todos aquellos catedráticos de la FES Cuautitlán que contribuyeron a mi formación profesional.

Como testimonio de que un IME puede lograr las cosas difíciles; también los milagros, aunque éstos tarden un poco más.

ÍNDICE

	Páginas
Introducción	1
Objetivos	5

CAPÍTULO I ACEROS

1.1.-Aleaciones	6
1.2.-Principales estructuras cristalinas de materiales de ingeniería	10
1.3.-Diagrama de fases	21
1.3.1.-Diagrama de fases del sistema Fe-Fe ₃ C	22
1.4.-Constitución a nivel microscópico de los aceros simples al carbono	29
1.5.-Aceros y características dadas por los diferentes elementos de aleación	38
1.5.1.-Elementos de aleación que benefician al acero	39
1.5.2.-Elementos de aleación que perjudican al acero	41
1.6.-Clasificación de los aceros atendiendo a su contenido de carbono y a su composición química	42
1.6.1.-Aceros eutectoides	42
1.6.2.-Aceros hipoeutectoides	44
1.6.3.-Aceros hipereutectoides	45
1.6.4.-Clasificación de aceros de acuerdo a su composición química	46
1.7.-Designación y especificación de aceros al carbono y de baja aleación	54
1.7.1.-Sistema de designación de acuerdo a las normas AISI-SAE-NOM	55
1.8.-Tratamientos térmicos de los aceros	59
1.8.1.-Temple	62
1.8.2.-Revenido	65
1.8.3.-Recocido	67
1.8.4.-Normalizado	70
1.8.5.-Esferoidizado	70
1.8.6.-Austemplado	71
1.8.7.-Martemplado	71

CAPÍTULO 2
TÉCNICA DEL ESTUDIO METALGRÁFICO Y PREPARACIÓN DE PROBETAS
DE ACERO PARA SU ANÁLISIS METALGRÁFICO.

2.1.- Pasos a seguir para la realización de un análisis metalográfico.	73
--	----

CAPÍTULO 3
EXPERIMENTACIÓN

3.1.-Corte de las muestras de acero	85
3.2.-Aplicación de tratamientos térmicos de recocido y normalizado	85
3.3.-Montaje de las muestras de acero NOM-1075 en resina termofija	87
3.4.-Desbaste	88
3.5.-Pulido	90
3.6.-Ataque químico	91
3.7.-Microscopía óptica	93

CAPÍTULO 4
RESULTADOS

4.1.-Fotomicrografías	94
4.2.-Medición de dureza	104
CONCLUSIONES	110
BIBLIOGRAFÍA	112
APÉNDICE A	
Composición química de los aceros empleados	114

INTRODUCCIÓN

El Ingeniero de hoy no debe ni puede utilizar los materiales empíricamente; requiere un conocimiento de ellos que además de enseñarle "¿cómo utilizarlos?", le permita saber el "¿por qué?". Sin "ello", no solo no podría nunca realizar una obra técnicamente perfecta, ya que no habría de lograr más que casualmente aprovechar el máximo rendimiento de los materiales, sino que se expone a graves fracasos. La complejidad extraordinaria de sollicitaciones a las que se someten los materiales, junto con la enorme gama de aleaciones existentes, imposibilitan una utilización empírica y sólo el conocimiento científico de los materiales nos otorga una orientación para lograr la utilización racional.

El Ingeniero debe saber, ante todo, elegir un material adecuado y saber si existe en producción nacional o extranjera, para la obra a realizar, esto exige el conocimiento de las propiedades después de adquirir el material, para lo cual debe saber imponerle condiciones y saber comprobar si las cumple, con el fin de seleccionar las buenas de las malas calidades. Después tiene que manipular aquellos metales, dándoles los tratamientos mecánicos y térmicos que sean más convenientes a los mismos y a las condiciones de trabajo que se les exigen. Finalmente debe controlar su utilización para que los elementos fabricados se conserven con eficiencia el mayor tiempo posible. Difícil sería esta labor sin otros fundamentos que los conocimientos empíricos. No cabe otra solución que la de conocer el comportamiento de los metales científicamente por el conocimiento de su naturaleza íntima y de las leyes que ésta les impone, pues con ello, aunque no nos sea conocida concretamente una propiedad determinada, conoceremos la trama que liga a todos ellos y por tanto, el ingeniero que posea tales conocimientos fundamentales estará en condiciones de estudiar utilitariamente las diversas aleaciones industriales y desarrollar científicamente su labor, pues el mecanismo íntimo de los diversos fenómenos metálicos le será conocido y ello le permitirá ir con paso seguro del terreno, y generar todas las tareas que le sean exigidas dentro de su ámbito de desarrollo profesional.

La metalografía se llama a la ciencia que estudia las relaciones entre la composición, estructura y las propiedades de los metales y las aleaciones y las leyes de sus cambios bajo las sollicitaciones externas: calóricas, químicas, mecánicas, electromagnéticas y radiactivas. De todos los elementos conocidos hasta hoy día más de la mitad son metales.

Todos los metales y aleaciones metálicas son cuerpos cristalinos. Los átomos (iones) están distribuidos dentro uniforme y periódicamente a diferencia de los cuerpos amorfos, en los cuales los átomos están distribuidos en forma caótica. Los metales son materiales policristalinos, compuestos de una gran cantidad de cristales finos orientados en diferente forma unos con respecto a otros. Los metales puros tienen baja resistencia y en una serie de casos no garantizan las propiedades físico-químicas y de ingeniería requeridas. Por eso, prácticamente éstos se emplean muy raramente. Tienen un uso más amplio las aleaciones.

La estructura de los metales y aleaciones que es visible a simple vista o con aumentos no mayores de 30 veces, se denomina macroestructura. La estructura de los metales y aleaciones que se examinan con un aumento de 30 a 1500 veces con la ayuda de un microscopio se denomina microestructura. En la microestructura se aprecian el tamaño y la forma del grano, se descubren los defectos microscópicos, el carácter del tratamiento térmico y químico-térmico, la composición química del acero al carbono recocido, los elementos estructurales de la aleación, etc.

Se llaman componentes estructurales de la aleación las partes aisladas de la aleación, que al ser observadas al microscopio poseen igual estructura con las particularidades características propias de ellas. Los componentes estructurales pueden constar de una, dos o más fases. Es muy significativo, que entre la microestructura y muchas de las propiedades de la aleación existe una dependencia cualitativa.

La microscopía óptica de reflexión constituye la más efectiva manera de examinar la microestructura de los materiales. Esta herramienta utilizada desde el punto de vista metalográfico posee una poderosa base de raciocinio y diagnóstico. El análisis de las fotomicrografías es complejo aunque se realice a simple vista ya que se debe tener un conocimiento amplio de la gran cantidad de casos que se pueden presentar.

La presente tesis está enfocada a comprender el proceso de metalografía en forma práctica para que por medio de éste proceso se puedan identificar en forma visual utilizando un microscopio metalográfico los diferentes elementos que constituyen a los aceros al carbono NOM-1006, NOM-1018, NOM-1045, NOM-1060, NOM-1075, y NOM-10100. Además de preparar un conjunto de probetas de cada tipo de acero, las cuales puedan ser

utilizadas en el laboratorio de tecnología de materiales por los alumnos para constatar prácticamente los elementos de que están constituidos los aceros simples al carbono. Para poder ser visible su microestructura será necesario preparar una probeta de cada tipo de acero, cuya preparación consiste en cortar una muestra del acero que se ha de examinar y una de sus caras se alisa, pule y se ataca con un reactivo adecuado. Las muestras de hierro y acero generalmente se atacan con un reactivo compuesto de una solución de HNO_3 al 4% en alcohol etílico. La probeta preparada se estudia con el microscopio metalográfico, basado en el principio de luz reflejada. Previamente las probetas de cada tipo de acero serán sometidas a los tratamientos térmicos de recocido y normalizado con el fin de regenerar su microestructura y de esta manera sea más fácil su apreciación visual en el microscopio metalográfico. Para aplicar los tratamientos térmicos de recocido y normalizado será necesario entender y analizar el diagrama de fases del sistema hierro-carburo de hierro, y de esta forma, con la ayuda de éste diagrama, seleccionar las temperaturas correctas de calentamiento de acuerdo al contenido de carbono de cada tipo de acero. Además se visualizará la relación que existe entre la cantidad de las diferentes fases o microconstituyentes de los aceros y la propiedad mecánica de la dureza en cada uno de los aceros mencionados, utilizando para la medición de la dureza un durómetro.

Un estudio metalográfico revela la estructura policristalina de una fase o de una mezcla de fases. Los microconstituyentes pueden ser descritos en términos de número de fases, morfología y configuración de las mismas, ya que muchas propiedades son sensibles a la estructura, como por ejemplo las propiedades plásticas y magnéticas.

El microscopio metalográfico opera por reflexión de la luz y mediante el acoplamiento de una cámara fotográfica será posible tomar fotografías de la estructura representativa en cada tipo de acero. El conocimiento de la microestructura de un metal o aleación posibilita la predicción de sus propiedades mecánicas, en este caso la dureza de cada tipo de acero. Con todo este desarrollo práctico llevado a cabo en el laboratorio de tecnología de materiales, se cumplirán los objetivos del proceso de metalografía, que consisten en analizar mediante el microscopio metalográfico los microconstituyentes de los aceros simples al carbono, además de visualizar la relación que existe entre la cantidad de cada uno de ellos con la propiedad mecánica de dureza, punto medular del trabajo de tesis presentado.

En el capítulo uno de la presente tesis se da la base teórica respecto a la conformación de las aleaciones, estructuras en que cristalizan los metales así como la constitución microscópica de los aceros simples al carbono, además de su clasificación y designación de acuerdo a las normas del Instituto Americano del Hierro y del Acero AISI (American Iron and Steel Institute), de la Sociedad de Ingenieros Automotrices SAE (Society of Automotive Engineers) y de la Norma Oficial Mexicana NOM. También se da una explicación de los principales tratamientos térmicos aplicados en los aceros. En el capítulo dos se describen los pasos que involucran el proceso de la metalografía. Y en el capítulo tres se describe todo el desarrollo práctico llevado a cabo para analizar la microestructura de los aceros simples al carbono así como los tratamientos térmicos a que se sometieron las probetas de acero. Incluimos también las mediciones de dureza efectuadas para cada probeta de acero. En el capítulo cuatro se muestran los resultados obtenidos al ser analizada cada probeta en el microscopio metalográfico que incluyen sus respectivas fotomicrografías las cuales fueron tomadas a 600 aumentos, máxima resolución alcanzada por el microscopio con el que se cuenta en el laboratorio de tecnología de materiales y sus respectivos tratamientos térmicos a que fueron sometidas, así como las respectivas gráficas de dureza promedio. Posteriormente presentamos las conclusiones de las características de composición de las diferentes fases de los aceros estudiados, sobre la base de las fotomicrografías y las fases presentes.

OBJETIVO PRINCIPAL: Comprender y analizar el proceso de metalografía para distinguir en forma práctica los distintos microconstituyentes de los aceros simples al carbono.

OBJETIVO SECUNDARIO: Preparar un conjunto de probetas de acero con diferente contenido de carbono para su uso por los alumnos de ingeniería mecánica en el laboratorio de tecnología de materiales.

CAPÍTULO I ACEROS

1.1.-ALEACIONES.

Para entender lo que es el acero es indispensable en primer lugar tener conocimiento del concepto aleación. La aleación la podemos definir como la unión de un metal con otros metales o metaloides los cuales por lo menos en ciertas proporciones son miscibles en estado de fusión y de esta forma al solidificarse, queda conformado un todo homogéneo, con lo cual se mejoran las características generales de los mismos.

Cuando se comienzan a combinar materiales diferentes, al agregar de manera deliberada y controlada elementos aleantes a un metal se producen lo que se conocen como soluciones. En éstas soluciones puede existir tanto una solubilidad ilimitada así como una solubilidad limitada.

La solubilidad ilimitada ocurre cuando al mezclar dos elementos independientemente de la relación de cantidad correspondiente de cada uno de ellos, generan una sola fase.

La solubilidad limitada ocurre cuando solamente se pueden mezclar dos elementos en determinadas proporciones de tal forma que la combinación genere una sola fase. Entendiéndose por fase un material que posee en todas las partes la misma composición, estructura y propiedades en condiciones de equilibrio.

Las aleaciones se pueden llevar a cabo por las siguientes formas:

Soluciones sólidas. Es un tipo de aleación en la cual se forma una estructura de fase única cuando un elemento está disuelto en otro originando una composición uniforme. A nivel atómico los átomos de una sustancia sólida están dispuestos dentro de la red cristalina del otro elemento o sustancia. Al producir aleaciones en solución sólida, se origina un endurecimiento por solución sólida, que consiste en la adición controlada de elementos aleantes. Mediante los cuales se logra aumentar la resistencia de los materiales al introducir defectos puntuales en su estructura cristalina haciendo esto de una forma deliberada y controlada. Una solución sólida no es una mezcla, ya que las mezclas contienen más de un tipo de fase y sus componentes conservan sus propiedades individuales. Al contrario, los

componentes de una solución sólida se disuelven uno en el otro y no retienen sus características propias, conformando una sola fase.

El grado de endurecimiento por solución sólida depende de dos factores:

- 1) Incrementa cuando existe una diferencia relevante de dimensiones entre el átomo original o del metal base y el átomo agregado del elemento aleante, una diferencia mayor en los tamaños respectivos, genera una mayor distorsión de la red inicial provocando que el deslizamiento de la misma sea más difícil.
- 2) Incrementa conforme la cantidad añadida del elemento aleante se va intensificando.

En caso de añadir un elemento aleante que posea átomos demasiado grandes o demasiado pequeños en comparación con los átomos del metal base, se excede el límite de solubilidad, lo cual desencadenará un mecanismo de endurecimiento diferente conocido como *endurecimiento por dispersión*, el cual consiste en el incremento de la resistencia de un material al mezclar más de una fase controlando el tamaño, forma, cantidad y propiedades individuales de cada fase para obtener una excelente combinación de propiedades.

En el endurecimiento por solución sólida la solubilidad queda limitada debido a los siguientes factores:

- a) Cuando la diferencia del tamaño atómico excede el 15%.
- b) Cuando la estructura cristalina del elemento aleante es diferente a la del metal base.
- c) Cuando la valencia y la electronegatividad del elemento aleante son diferentes con respecto a los del metal base.

El endurecimiento por solución sólida además de incrementar la resistencia, la dureza y proporcionar a la aleación buenas propiedades a altas temperaturas, reduce la ductilidad y la conductividad eléctrica.

En una solución sólida el elemento base o solvente es metálico, y el elemento disuelto puede ser metálico o no metálico. Hay dos formas de soluciones sólidas las cuales describimos a continuación.

I.-Solución sólida sustitucional. En donde los átomos del elemento disuelto o soluto reemplazan en su celda unitaria a los átomos del elemento base o solvente. El átomo sustitucional permanece en la posición original, si éstos átomos poseen una dimensión mayor que los originales de la red, los átomos circundantes se comprimen; al contrario, si los átomos sustitucionales son más pequeños, los átomos circundantes quedan en tensión, esto se ilustra en la figura 1.1. En ambos casos se altera el arreglo perfecto de los átomos circundantes en la red.

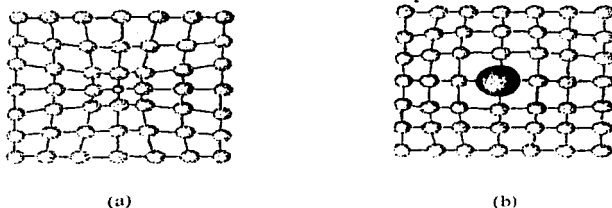


Figura 1.1.-Distorsión de la red debido a la introducción de (a) un átomo sustitucional pequeño, y (b) de un átomo sustitucional grande.

Para lograr una aleación por solución sólida sustitucional es imperativo satisfacer ciertas condiciones conocidas como reglas de Hume-Rothery para la solubilidad ilimitada, las cuales son las siguientes:

- a) El radio atómico de los elementos debe ser similar aproximadamente en un rango no mayor del 15%.
- b) Sus tipos de celdas cristalinas deben ser iguales.
- c) Los átomos de los elementos deberán poseer la misma valencia, ya que de lo contrario la diferencia de electrones de valencia propiciará la formación de compuestos en lugar de la formación de soluciones. Si poseen los elementos valencias diferentes, probablemente el elemento de menor valencia puede ser el elemento base.
- d) Los átomos de los elementos deben tener aproximadamente una misma electronegatividad, de lo contrario, si las electronegatividades difieren de manera significativa, es decir, si los elementos poseen una alta afinidad química entre sí es más factible que formen un compuesto a que formen una aleación.

II.-Solución sólida intersticial. En las estructuras cristalinas existen huecos o espacios entre los átomos o iones normales en los cuales los átomos del elemento disuelto se introducen en los espacios vacantes interatómicos de la estructura cristalina del metal base. Estos espacios son conocidos como sitios intersticiales. Los átomos que se introducen deben ser más pequeños que los del metal base.

Los átomos intersticiales, son mayores que los sitios intersticiales que ocupan y menores que los átomos localizados en los puntos de la red por lo que la red circundante se modifica apareciendo comprimida y distorsionada, tal como se puede apreciar en la figura 1.2.

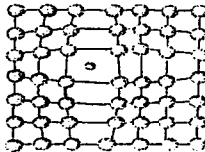


Figura 1.2.-Distorsión de la red debido a la introducción de un átomo intersticial.

La solubilidad de los átomos intersticiales siempre es limitada, ya que los átomos intersticiales son más pequeños que los átomos del metal base lo cual viola la primera ley de Hume-Rothery para la solubilidad ilimitada, la cual nos indica que el radio atómico de los elementos debe ser similar aproximadamente en un rango no mayor del 15%.

Como ejemplo de esta segunda forma de solución sólida intersticial y uno muy importante podemos citar al elemento carbono disuelto en la estructura cristalina del hierro para conformar la aleación de nuestro estudio que es el acero. Como resultado en las soluciones sólidas tenemos una aleación cuya estructura es generalmente mas dura y resistente que cualquiera de sus elementos por separado debido a que tanto la solución sólida sustitucional como la solución sólida intersticial, introducen campos de esfuerzos de compresión y de tensión que alteran la red adyacente

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

1.2.-PRINCIPALES ESTRUCTURAS CRISTALINAS DE MATERIALES DE INGENIERÍA.

Los metales son sustancias cristalinas cuyos elementos básicos son átomos que se disponen en sistemas estructurales repetitivos que se denominan redes cúbicas.

Nuestro propósito es analizar y comprender la microestructura de los aceros simples, lo que hace imperativo conocer de antemano las diversas estructuras cristalinas mediante las que se conforman los materiales usados en la ingeniería. Esta estructura cristalina o simplemente cristal se puede describir como un arreglo ordenado de los átomos casi siempre en forma geométrica precisa con un patrón regular repetible. Esto es muy importante debido a que éste ordenamiento atómico influye en gran manera para la determinación de la microestructura y también sobre el comportamiento de los materiales sólidos.

La importancia en la ingeniería de la estructura física de los materiales sólidos depende principalmente de la disposición de los átomos, iones o moléculas que constituyen el sólido y de las fuerzas de enlace entre ellos. Si los átomos o iones de un sólido se ordenan en una disposición que se repite en tres dimensiones, forman un sólido del que se dice tiene una *estructura cristalina* y nos referiremos a él como un *sólido cristalino* o *materia cristalina*. Ejemplos de materiales cristalinos son metales, aleaciones y algunos materiales cerámicos.

El ordenamiento atómico en sólidos cristalinos puede representarse asimilando los átomos a los puntos de intersección de una red de líneas en tres dimensiones. Tal red se llama retículo espacial o cristal, ésta se muestra en la figura 1.3 y puede ser descrita como una disposición de puntos tridimensional infinita.

Cada punto en la red espacial tiene idéntico entorno. En un cristal ideal, la agrupación de puntos reticulares alrededor de cualquier punto dado es idéntica con la agrupación entorno a cualquier otro punto reticular en la red cristalina. Cada red espacial puede ser descrita de este modo especificando las posiciones atómicas en una celda unidad que se repite, tal como la que se ha perfilado en la figura 1.3.

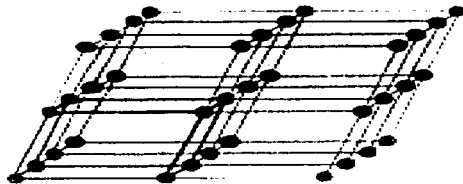


Figura 1.3.-Red cristalina.

El tamaño y la forma de la celda unidad puede describirse por tres vectores reticulares a , b y c conocidos como parámetros de red, los cuales se originan a partir de un vértice de la celda unidad, como se puede apreciar en la figura 1.4. Las longitudes axiales a , b y c , y los ángulos interaxiales α , β y γ ; son las constantes reticulares de la celda unidad.



TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Figura 1.4.-Celda unitaria de la red cristalina.

Algunos metales tienen más de una estructura cristalina, a dicho fenómeno le llamamos polimorfismo. Cuando éste fenómeno se lleva a cabo en un sólido elemental o en elementos puros se le denomina alotropía, el polimorfismo es un término más general. Las

transformaciones alotrópicas generan modificaciones de la densidad y otras propiedades físicas en un material. La caracterización cristalina está afectada por dos variables externas que son la presión y la temperatura. En la práctica suele variarse solamente la temperatura dejando la presión constante a una atmósfera.

La estructura cristalina de un material denota el tamaño, forma y organización periódica o repetible de los átomos dentro de la red.

Como puede observarse la red está compuesta a su vez por subdivisiones reticulares y cada subdivisión es la unidad estructural representativa de toda la red, estas son llamadas celdas unitarias las cuales como ya dijimos conservan las características generales de toda la red. La estructura completa se genera mediante el agrupamiento repetido de celdas unitarias adyacentes cara a cara en el espacio tridimensional. Con este acoplamiento ordenado de celdas unitarias se conforma un cristal o grano, los cuales al estar orientados en diferentes direcciones conforman los límites de grano que en conjunto constituyen el material. Al agrupar las celdas unitarias determinados puntos de red son compartidos por más de una celda unitaria. Existen 14 tipos de celdas unitarias, también denominadas Redes de Bravais, se agrupan en siete sistemas cristalinos o estructuras cristalinas las cuales son las siguientes:

- | | |
|----------------------------|----------------------------|
| 1. -Estructura cúbica | 2.-Estructura tetragonal |
| a) Simple | a) Simple |
| b) Centrada en el cuerpo | b) Centrada en el cuerpo |
| c) Centrada en las caras | |
| 3 -Estructura hexagonal | 4.- Estructura romboédrica |
| 5 -Estructura ortorrómbica | 6.-Estructura monoclinica |
| a) Simple | a) Simple |
| b) Centrada en el cuerpo | b) Centrada en las bases |
| c) Centrada en las bases | |
| d) Centrada en las caras | 7.- Estructura triclinica |

La mayor parte de estos siete sistemas cristalinos presentan variaciones de la celda unidad básica. A. J. Bravais mostró que 14 celdas unidad estándar podían describir todas las estructuras reticulares posibles. Estas redes de Bravais se ilustran en la figura 1.5. Hay cuatro tipos básicos de celdas unidad: (1) Sencilla, (2) Centrada en el cuerpo, (3) Centrada en las caras, y (4) Centrada en la base.

En el sistema cúbico hay tres tipos de celdas unidad: cúbica sencilla, cúbica centrada en el cuerpo y cúbica centrada en las caras. En el sistema ortorrómbico están representados los cuatro tipos. En el sistema tetragonal hay sólo dos: sencilla y centrada en el cuerpo. La celda unidad tetragonal centrada en las caras parece que falta, pero se puede formar a partir de cuatro celdas unidad tetragonal centrada en el cuerpo. El sistema monoclinico tiene celdas unidad sencilla y centrada en la base, y los sistemas romboédrico, hexagonal y triclinico tienen sólo una celda unidad.

En la figura 1.5 se observa que los llamados puntos de red se localizan en las esquinas de las celdas unitarias y a su vez en algunos casos en las caras, bases o en el centro del cuerpo de la celda unitaria.

El agrupamiento periódico de las celdas unitarias mostradas genera la red espacial de puntos, puntos reticulares o también denominados puntos de red. Podemos considerar a las redes como los esqueletos en los que se basan gran número de estructuras atómicas cristalinas colocando los átomos o grupos de átomos en o cerca de los puntos reticulares. Lo más simple es centrar un átomo en cada punto reticular.

Algunas estructuras simples de los metales son de éste tipo, sin embargo existe un extenso ámbito de estructuras reales de los cristales y la mayoría tiene más de un átomo asociado con un punto reticular determinado.

Las dimensiones de las aristas y de los ángulos existentes entre ellas en la celda unitaria son conocidas como parámetros de red, constantes reticulares o parámetros reticulares y describen el tamaño y la forma de la celda unitaria. Usualmente la longitud se da en Angstroms. Con la finalidad de definir una celda unitaria es necesario especificar los tamaños relativos de los ejes cristalinos a , b y c y los ángulos que éstos forman entre sí. La mayoría de los metales cuenta con un átomo localizado en cada punto de red por lo que el número de átomos en cada celda unitaria es igual al número de puntos de red.

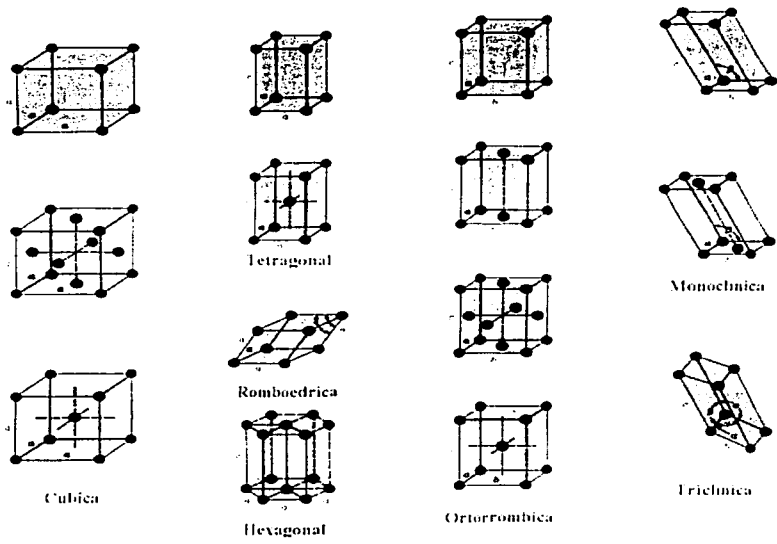


Figura 1.5.-Arreglo atómico de los materiales cristalinos representado por siete sistemas cristalinos generales que incluyen catorce redes específicas.

Los cristalógrafos han mostrado que son necesarias sólo siete tipos diferentes de celda unidad para crear todas las redes puntuales. Estos sistemas cristalinos se recogen en la tabla 1.1.

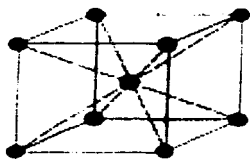
TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Tabla 1.1.-Sistemas cristalinos, longitudes axiales y ángulos interaxiales.

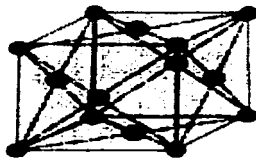
ESTRUCTURA	EJES O LONGITUDES AXIALES	ÁNGULOS INTERAXIALES
Cúbica	$a = b = c$	Todos los ángulos son de 90° $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$
Tetragonal	$a = b \neq c$	Todos los ángulos son de 90° $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$
Ortorrónica	$a \neq b \neq c$	Todos los ángulos son de 90° $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$
Hexagonal	$a = b \neq c$	Dos ángulos de 90° y uno de 120° $\alpha = \beta = 90^\circ, \gamma = 120^\circ$
Romboédrica	$a = b = c$	Todos los ángulos son iguales y ninguno es de 90° $\alpha = \beta = \gamma \neq 90^\circ$
Monoclínica	$a \neq b \neq c$	Dos ángulos de 90° , y un ángulo β diferente de 90° $\alpha = \gamma = 90^\circ \neq \beta$
Triclínica	$a \neq b \neq c$	Todos los ángulos son distintos y ninguno es de 90°

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

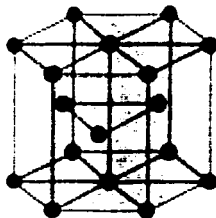
La mayoría de los metales elementales (alrededor del 90%) cristalizan en tres estructuras cristalinas densamente empaquetadas: cúbica centrada en el cuerpo (CC) (figura 1.6 a), cúbica centrada en las caras (CCC) (figura 1.6 b) y hexagonal compacta (HC) (figura 1.6 c). La estructura HC es una modificación más densa de la estructura cristalina hexagonal sencilla. En la estructura HC cristalizan algunos elementos de aleación empleados en los aceros. La mayor parte de los metales cristaliza en estas estructuras densamente empaquetadas debido a que se libera energía a medida que los átomos se aproximan y se enlazan cada vez más estrechamente entre sí. De este modo, dichas estructuras densamente empaquetadas se encuentra en disposiciones u ordenamientos de energía cada vez más baja y estable. En la estructura CC cristalizan metales tales como el hierro, titanio, tungsteno, molibdeno, niobio, vanadio y el cromo. En la estructura CCC cristalizan metales como el hierro, cobre, aluminio, plomo y níquel. Y en la estructura HC elementos como el titanio, magnesio, zinc, berilio, cobalto o el cadmio.



(a)



(b)



(c)

Figura 1.6.-Principales estructuras cristalinas metálicas.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

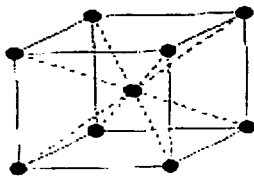
A continuación, en las figuras 1.7 y 1.9 mostramos las dos estructuras cristalinas en las que se encuentra el principal elemento de la aleación de nuestro estudio que es el hierro y también la mayoría de los metales elementales a temperatura ambiente:

1. -La estructura cúbica centrada en el cuerpo (CC) o también identificada por las siglas en inglés BCC (body centered cubic).
2. -La estructura cúbica centrada en las caras (CCC) o FCC (face centered cubic). También denominada cúbica de empaquetamiento compacto o por sus siglas en inglés CCP (cubic close packed).

1.-Estructura cristalina cúbica centrada en el cuerpo (CC)

En primer lugar, consideraremos la situación de los átomos en la celda unidad para la estructura cristalina CC mostrada en la figura 1.7 (a). En esta celda unidad las esferas sólidas representan los centros donde los átomos están localizados e indican claramente sus posiciones relativas. Si representamos los átomos en estas celdas como esferas rígidas, entonces la celda unidad presentará el aspecto mostrado en la figura 1.7 (b). En esta celda unidad podemos observar que el átomo central se encuentra rodeado por otros ocho vecinos más cercanos y se dice tiene un número de coordinación de 8.

Si aislamos una celda unidad sencilla de esferas rígidas, obtendremos el modelo mostrado en la figura 1.8. Cada una de estas celdas tiene el equivalente de dos átomos por celda unidad. Un átomo completo está localizado en el centro de la celda unidad, y un octavo de esfera está localizado en cada vértice de la celda unidad, haciendo el equivalente de otro átomo. De este modo, hay un total de 1 (en el centro) + $8 \times 1/8$ (en los vértices) = 2 átomos por celda unidad.



(a)



(b)

Figura 1.7.-Estructura cristalina CC, cúbica centrada en el cuerpo de metales.

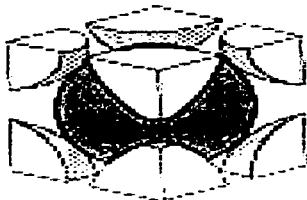


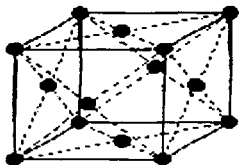
Figura 1.8.- Se muestra el empaquetado real de átomos o contenido real de átomos de la estructura CC.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

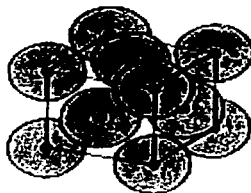
2.-Estructura cristalina cúbica centrada en las caras (CCC)

A continuación consideremos la celda reticular unitaria CCC de la figura 1.9 (a). En esta celda unidad hay un punto reticular en cada vértice del cubo y otro en el centro de cada cara del cubo. El modelo de esferas sólidas de la figura 1.9 (b) indica que los átomos de esta estructura están unidos del modo más compacto posible. El factor de empaquetamiento atómico es el área del espacio ocupada por los átomos, denominado por sus siglas en inglés como APF (Atomic Package Factor). El factor de empaquetamiento atómico de esta estructura CCC de empaquetamiento compacto es 0.74, que al compararla con el valor 0.68 para la estructura CC, indica que ésta no es compacta.

La celda CCC, según muestra la figura 1.10, tiene el equivalente a cuatro átomos por celda unidad. Los ocho octavos de átomo de los vértices cuentan por uno entero ($8 \times 1/8 = 1$) y los seis medios-átomos en las caras del cubo contribuyen con otros tres átomos más, haciendo un total de cuatro átomos por celda unidad.



(a)



(b)

Figura 1.9.-Estructura CCC, cúbica centrada en la cara de metales.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

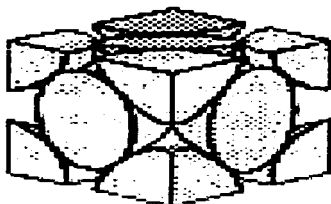


Figura 1.10.- Se muestra el empaquetado real de átomos o contenido real de átomos en la estructura CCC.

El factor de empaquetamiento atómico de 0.74 es el máximo posible para empaquetamientos de "átomos esféricos". Muchos metales como aluminio, cobre, plomo, níquel y hierro a elevadas temperaturas (912 a 1394 °C) cristalizan según la estructura CCC.

Como se puede observar en las figuras 1.8 y 1.10 en las estructuras cristalinas CC y CCC que son las estructuras en las que cristaliza el hierro a diferentes temperaturas, existen espacios entre los átomos (conocidos como sitios intersticiales); es ahí en donde los átomos de carbono se alojan o introducen al ser añadido en forma deliberada y controlada el carbono al hierro en diferentes concentraciones para conformar la aleación conocida como acero.

Ningún material de ingeniería común tiene una estructura cúbica simple, aunque se encuentra éste tipo de estructura en materiales cerámicos. Cabe mencionar que existen estructuras mucho más complejas en las que están asociados varios e incluso cientos de átomos en cada punto de red con lo que se conforman estructuras cristalinas muy complicadas como puede ser en los polímeros y en los cerámicos.

Muchos elementos y compuestos existen en más de una forma cristalina bajo diferentes condiciones de temperatura y presión. Este fenómeno es determinado como polimorfismo o alotropía. Muchos metales industrialmente importantes como el hierro, titanio y cobalto experimentan transformaciones alotrópicas a elevadas temperaturas a presión atmosférica.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

El hierro, como se mostró anteriormente, existe en ambas estructuras cristalinas CC y CCC, sobre un rango de temperatura que va desde la temperatura ambiente hasta su punto de fusión de los 1539 °C. El hierro alfa existe desde -273 a 912 °C y tiene la estructura cristalina CC. El hierro gamma o austenita tiene una estructura CCC y existe desde 912 hasta 1394 °C, que es el punto de fusión del hierro. La estructura cristalina del hierro delta es también CC pero con una constante de red mayor que la del hierro alfa.

1.3.-DIAGRAMA DE FASES.

Comenzaremos por definir lo que entendemos por fase. El concepto de fase se refiere a aquel material que posee la misma composición, estructura, y propiedades en todas sus regiones cuando se encuentra en condiciones de equilibrio.

Una fase se caracteriza por los siguientes factores:

- a) Posee un mismo arreglo atómico o estructura en toda la región del material.
- b) Posee aproximadamente una misma composición y propiedades.
- c) Cuenta con una interfase definida con respecto a cualquier otra fase adyacente.

Ahora bien, podemos definir el término *Diagrama de Fases* como una representación gráfica de las variables de estado asociadas con la microestructura del material la cual nos muestra las fases presentes y sus respectivas composiciones en una variedad de combinaciones de temperatura y composición química de la aleación.

Existen diagramas de fases de sustancias puras en los cuales se observan las fases y composiciones de un solo componente.

Si la aleación contiene solamente dos elementos presentes se puede esquematizar lo que denominamos como un Diagrama de Fases Binario, al cual pertenecen las aleaciones hierro-carbono. La temperatura y la presión son los parámetros variables de las aleaciones binarias. En la práctica la presión permanece en la mayoría de las aplicaciones a una presión de una atmósfera.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

También existen Diagramas de Fases Binarios Isomorfos en los cuales se observa que solamente se forma una fase sólida y además los dos componentes del sistema tienen una solubilidad sólida ilimitada.

Mediante los diagramas de fases se puede analizar el desarrollo en el acero de microestructuras durante el enfriamiento lento a partir del estado líquido o durante el calentamiento a partir de la temperatura ambiente. Estos diagramas nos permiten identificar las cantidades y las respectivas composiciones de las fases que son estables a las temperaturas requeridas.

1.3.1.- DIAGRAMA DE FASES DEL SISTEMA Fe- Fe₃C.

La información sobre el control de la microestructura o estructura de fases de la aleación Fe-Fe₃C o de cualquier otra aleación en particular, la encontramos recopilada en lo que denominamos diagrama de fases, diagrama de equilibrio o diagrama constitucional. Con este diagrama podemos predecir la transformación de las microestructuras. Las microestructuras son el resultado de las transformaciones de fases, transformaciones que ocurren al variar o modificar la temperatura.

El diagrama de fases o de equilibrio del sistema hierro-carbono es una condensación de los resultados de los exámenes microscópicos, térmicos y químicos de la aleación.

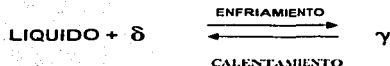
Este representa el diagrama de fases de mayor relevancia ya que es la principal base científica para la industria del hierro y el acero. Las áreas de mayor importancia en este diagrama están alrededor de las reacciones eutéctica y eutectoide ya que la reacción peritética carece de consecuencias prácticas.

Es muy importante comprender los diagramas de fases de las aleaciones debido a la estrecha relación entre estructura y propiedades mecánicas de la aleación. El comportamiento mecánico de una aleación depende de la microestructura, la cual está caracterizada por el número de fases y por la proporción y distribución de dichas fases. También depende del número de componentes de la aleación y de la concentración de cada uno de ellos así como del posible tratamiento térmico al cual fuese sometida la aleación.

El desarrollo de la microestructura de la aleación Fe-Fe₃C está relacionado con las características que se presentan en su diagrama de fases y éste nos aporta una información valiosa respecto a la fusión y la cristalización del acero a determinadas temperaturas. Como lo podemos observar en la figura 1.11.

Es importante reconocer determinadas reacciones generadas en el diagrama de fases en el cual se encuentran puntos invariantes que implican fases diferentes. En el diagrama aparecen tres líneas horizontales, las cuales indican reacciones isotérmicas.

- 1) **Reacción Peritética:** La parte del diagrama situada en el ángulo superior izquierdo de la figura se denomina *región delta*. En ella se reconocerá la horizontal correspondiente a la temperatura de 1493 °C como la típica línea de una reacción peritética. La ecuación de esta reacción puede escribirse en la forma.



Es una reacción invariante que implica tres fases en equilibrio. En esta reacción el calentamiento de una fase sólida la transforma en una fase sólida y en una fase líquida. Ocurre la reacción contraria al enfriar la combinación de una fase sólida y una fase líquida produciendo una segunda fase sólida.

La máxima solubilidad del carbono en el hierro delta (de red cúbica centrado en el cuerpo) es 0.10 % de C, mientras que el hierro gamma (de red cúbica centrado en las caras) disuelve al carbono en una proporción mucho mayor, un 2.11%. En cuanto a la importancia industrial de la región delta, se puede considerar despreciable, ya que no se efectúa ningún tratamiento térmico en este intervalo de temperaturas.

- 2) **Reacción Eutéctica:** La siguiente línea horizontal corresponde a una temperatura de 1148 °C, ésta temperatura es la de solidificación del eutéctico, la cual ocurre cuando una fase líquida subenfriada se transforma en dos fases sólidas a determinada temperatura. Si en su defecto efectuamos el calentamiento se genera la reacción opuesta. La reacción que en ella se desarrolla es:

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN



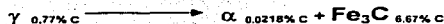
La mezcla eutéctica, por lo general, no se ve al microscopio, ya que a la temperatura ambiente la fase gamma no es estable y experimenta otra transformación durante el enfriamiento.

3) **Reacción Eutectoide:** La última línea horizontal, se presenta a los 727 °C, esta línea corresponde a la temperatura de formación del eutectoide, y al alcanzarse en un enfriamiento lento la fase gamma debe desaparecer. La ecuación de la reacción eutectoide que se desarrolla puede expresarse por:



Como se puede observar se genera cuando al enfriar una fase sólida (la fase gama) ésta se transforma en dos fases sólidas distintas, hierro alfa y carburo de hierro. Generamos la reacción inversa si efectuamos el calentamiento de la aleación. Esta reacción eutectoide conocida en el diagrama del sistema Fe- Fe₃C como **punto eutectoide** es muy importante para el tratamiento térmico de los aceros como se verá más adelante.

En el acero como resultado de ésta reacción se puede producir perlita o bainita, dependiendo del contenido de carbono pudiendo estar presentes ferrita o cementita primarias. Observando en el diagrama de la figura 1.11 el punto con 0.77% C y a una temperatura superior a partir de 727 °C se nota la existencia de la fase γ y cuando se enfría a 727 °C comienza la reacción eutectoide.



La cual genera dos fases durante la transformación que difieren en su composición y conforman una estructura laminar de ferrita y de cementita la cual se denomina perlita

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

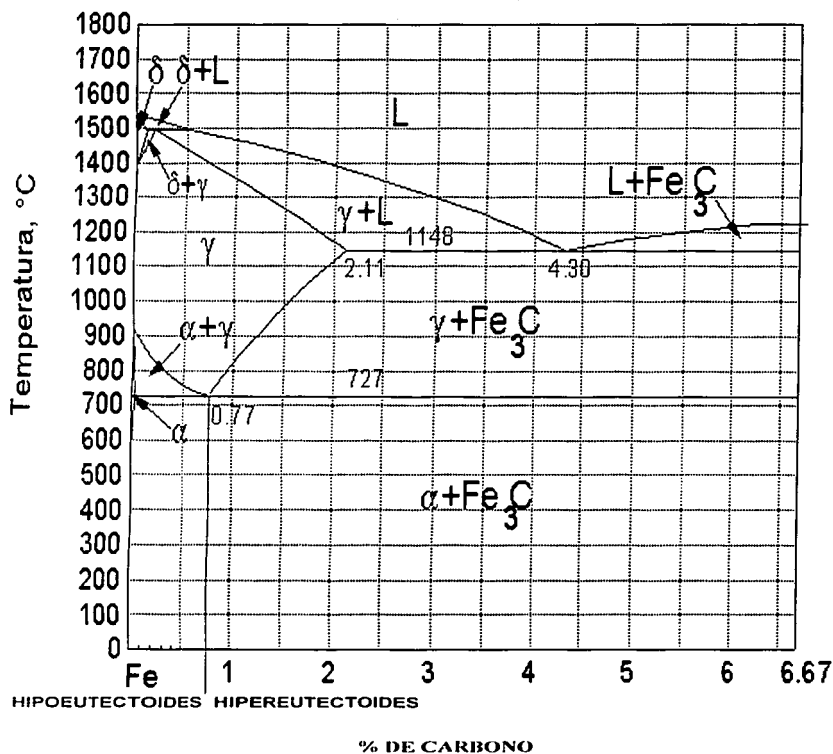


Figura 1.11.-Diagrama de fases del sistema Fe-Fe₃C.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

La ferrita ocupa el mayor porcentaje de composición dentro de la perlita. Observando detenidamente en un microscopio se puede ver que la fase de hierro alfa o ferrita rodea a las laminillas de cementita. La fase alfa es continua, blanda y dúctil, y la cementita que es la que está dispersa, es dura y frágil. La perlita se presenta en granos denominados colonias estando las capas o laminas orientadas en la misma dirección dentro de cada colonia variando la dirección de una colonia a otra. La ferrita aparece en forma de capas delgadas claras y la cementita como capas mucho más delgadas y oscuras.

Controlando adecuadamente tamaño, forma, cantidad y propiedades individuales de las fases se puede lograr una combinación excelente de propiedades que de como resultados un incremento en la resistencia mecánica de la aleación.

En la reacción eutectoide existen factores que ejercen influencia en las propiedades mecánicas del microconstituyente, éstas son:

- a) Composición de la aleación o cantidad de microconstituyente eutectoide.
- b) Tamaño de grano del sólido original, microconstituyente eutectoide y de cualquier microconstituyente primario.
- c) Espaciamiento interlaminar de la estructura dentro del microconstituyente eutectoide.
- d) Velocidad de enfriamiento durante la transformación de fase.
- e) Cantidad de subenfriamiento o temperatura a la cual se genera la transformación de fase.

En función del contenido de carbono suele dividirse el diagrama de hierro-carbono en dos partes: una que comprende las aleaciones con menos del 2.00% de carbono y que se llaman *aceros*, y otra integrada por las aleaciones con más de un 2.00% de carbono, las cuales se llaman *fundiciones*. A su vez, la región de los aceros se subdivide en otras dos: una formada por los aceros cuyo contenido en carbono es inferior al correspondiente a la composición eutectoide (0.77% C) los cuales se llaman *aceros hipoeutectoides*, y la otra compuesta por los aceros cuyo contenido se encuentra entre 0.77 y 2.00%, y que se conocen por *aceros hipereutectoides*.

Ahora vamos a analizar el diagrama Fe-Fe₃C con respecto a las transformaciones alotrópicas que presenta el hierro puro.

En el eje vertical izquierdo tenemos la composición de hierro puro el cual presenta dos cambios alotrópicos antes de llegar al punto de fusión. En el caso del calentamiento del hierro partiendo desde la temperatura ambiente tenemos:

- a) A la temperatura ambiente el hierro tiene una forma estable llamada ferrita o hierro alfa el cual tiene la estructura CC (cúbica de cuerpo centrado).
- b) Cuando llega a $912\text{ }^{\circ}\text{C}$ la ferrita sufre el cambio alotrópico a la estructura austenita, también denominada hierro gamma, la cual posee una estructura CCC (cúbica de caras centradas). La austenita se mantiene hasta los $1394\text{ }^{\circ}\text{C}$.
- c) Cuando incrementamos la temperatura hasta $1394\text{ }^{\circ}\text{C}$ la austenita sufre la transformación a ferrita- δ , la cual posee una estructura cristalina CC.

Después de incrementar la temperatura más allá de los $1538\text{ }^{\circ}\text{C}$ se inicia la fusión del hierro- δ .

Durante el enfriamiento partiendo del punto de fusión ocurre la secuencia inversa que también describimos a continuación:

- a) Inmediatamente después de solidificar el hierro se transforma en ferrita- δ , manteniéndose desde 1538 hasta $1394\text{ }^{\circ}\text{C}$.
- b) Si se continúa disminuyendo la temperatura la ferrita- δ se transforma en austenita o hierro gamma, la cual se mantiene hasta los $912\text{ }^{\circ}\text{C}$.
- c) Y finalmente a un mayor enfriamiento, a una temperatura inferior a los $912\text{ }^{\circ}\text{C}$, la fase γ o austenita se transforma en ferrita o hierro α .

La ferrita, la austenita y la ferrita-delta son soluciones sólidas de átomos de carbono intersticiales en el hierro.

En el hierro con estructura CC el parámetro de red o longitud de los lados de la celda unitaria es de 0.2866 nm y en el hierro con estructura CCC el parámetro de red es de 0.3571 nm. Los átomos de carbono tienen un radio de 0.071 nm.

Como los huecos intersticiales son mayores en las redes CCC, entran menos átomos de carbono en las posiciones intersticiales del hierro CC que en los del hierro con estructura CCC. Debido a lo anterior se tiene una solubilidad máxima del carbono en la austenita de 2.11% en peso de Carbono a 1148 °C, la cual posee una estructura CCC. La fase gamma o austenita no es estable por debajo de los 727 °C. La austenita no es magnética.

En el hierro α que tiene una estructura CC la solubilidad máxima de carbono es de 0.0218 % de carbono en peso a los 727 °C. Esta pequeñísima proporción de carbono ejerce gran influencia en las propiedades mecánicas de la ferrita. Esta fase alfa o ferrita es magnética por debajo de los 768 °C y posee una densidad de 7.88 g/cm³.

Finalmente en el hierro- δ que también posee estructura CC la solubilidad máxima de carbono en esta fase es de 0.09% en peso a los 1495 °C. Cristalográficamente la ferrita- δ y la ferrita o hierro α son iguales, la diferencia radica en el rango de temperaturas en el cual se generan. La ferrita- δ es estable solamente a altas temperaturas y no tiene importancia técnica.

Ahora bien, si excedemos el límite de solubilidad del carbono en la fase alfa o ferrita más allá del 0.0218% C todo por debajo de la temperatura de 727 °C, se forma un compuesto estequiométrico denominado cementita o Fe₃C, ésta composición está comprendida en la región de fases α + Fe₃C del diagrama. También se observa que la cementita coexiste con la fase γ en los rangos de temperatura de 727 a 1148 °C.

Desde un enfoque mecánico la cementita es extremadamente dura y frágil incrementando con su presencia la resistencia de algunos aceros.

En forma estricta el diagrama de fases mostrado no está en equilibrio ya que la cementita no es un compuesto estable sino que es metaestable.

La adición de elementos de aleación al hierro influye en las temperaturas a que se producen las transformaciones alotrópicas. Entre estos elementos el más importante es el carbono.

El diagrama hierro-carbono, aún cuando teóricamente representa unas condiciones metaestables, se puede considerar que en condiciones de calentamiento y enfriamiento relativamente lentas representa cambios de equilibrio.

Los puntos críticos son las temperaturas a las que ocurren los cambios de fase, en el diagrama hierro-carbono mostrado se representa en condiciones o estados de equilibrio.

Debemos mencionar que prácticamente, existe un retraso en la obtención del equilibrio y los puntos críticos se localizan a temperaturas más bajas que las dadas durante el enfriamiento y a temperaturas más altas durante el calentamiento, es decir existe un desplazamiento en las líneas de temperaturas mostradas, ya que prácticamente es difícil aproximarse o realizar un calentamiento o enfriamiento infinitamente lentos. La diferencia es más relevante con la rapidez de enfriamiento o de calentamiento.

1.4.- CONSTITUCIÓN A NIVEL MICROSCÓPICO DE LOS ACEROS SIMPLES AL CARBONO.

Los microconstituyentes de aceros no aleados o simples al carbono son los siguientes:

- Ferrita.
- Cementita.
- Perlita.
- Austenita

Los constituyentes de que están formadas las aleaciones de acero son elementos simples o compuestos químicos que no están mezclados íntimamente, sino que forman masas microscópicas definidas perfectamente en su composición.

Los microconstituyentes están formados por metales puros como es el caso de la ferrita; compuestos químicos, por soluciones sólidas ya sea esta sustitucional en la cual los átomos del metal disuelto sustituyen a los átomos de los cristales en el metal disolvente, o intersticial en donde los átomos del metal añadido están intercalados parcialmente entre los átomos del metal base, como es el caso de la ferrita y de la austenita y por compuestos intermetálicos, como es el caso de la cementita, que son elementos intermedios entre los compuestos químicos y las soluciones sólidas.

Los microconstituyentes de los aceros simples al carbono ferrita, cementita, perlita, y la austenita, se describen a continuación.

FERRITA. También conocido como hierro alfa, es hierro casi puro. Es una solución sólida intersticial de átomos de carbono en una red cúbica centrada en el cuerpo de hierro. Admite hasta un 0.0218% de carbono en solución a la temperatura eutectoide. Es el constituyente más blando del acero. Su resistencia es de 28 Kg/mm² (2.7 MPa). Es ferromagnético hasta los 768 °C. A partir de esta temperatura hasta los 910 °C su comportamiento es paramagnético, por lo que antigua y equivocadamente se le creyó otra fase denominándosele entonces como hierro beta.

En los aceros aparece bajo formas muy diversas, a continuación se indican algunas:

- 1) Como elemento proeutectoide que acompaña a la perlita como se indica a continuación:
 - a) En aceros con menos de 55% de carbono se presenta en forma de cristales que están mezclados con los cristales de la perlita.
 - b) En aceros con concentraciones de 55 a 85% de carbono se presenta formando una matriz o red que limita los granos de perlita.
 - c) En forma de agujas, la cual es la típica estructura Widmastatten, ésta estructura acicular es producto de la precipitación de parte de la ferrita proeutectoide, dichas agujas se orientan hacia el interior de los granos en lugar de formarse en la matriz reticular o formar cristales independientes.

- 2) Otra forma de presentarse es como elemento eutectoide de la perlita, en la cual la ferrita forma láminas paralelas separadas alternativamente por láminas de cementita.

3) También aparece formando la matriz que rodea los glóbulos de cementita en la estructura de aceros globulizados.

4) Se presenta también cuando al efectuar el temple de los aceros hipoeutectoides la temperatura de calentamiento ha sido inferior que la temperatura crítica superior requerida para tal efecto, o en su defecto cuando el tiempo de calentamiento fue insuficiente o existieron interrupciones durante el enfriamiento. Entonces se presenta la ferrita mezclada con la martensita formando zonas irregulares de color blanco o formando agujas finas, cuando es observada al microscopio.

Como se pudo observar, la morfología y estructura granular de la ferrita es muy variada pudiéndose encontrar hasta 24 términos descriptivos de la misma. Sin embargo, son dos las morfologías que conviene destacar:

- 1) Morfología equiaxial y 2) Estructura de Widmanstätten. Ambas se muestran en la figura 1.12.

La morfología equiaxial corresponde a granos poligonales de ejes aproximadamente iguales, que resultan a veces atacados diferentemente en función de su orientación cristalográfica respecto a la superficie de observación. Este tipo de morfología es la que se pretende poder observar en la presente tesis como parte de la estructura de las probetas de acero con muy bajo contenido de carbono.

En la estructura de Widmanstätten un enfriamiento rápido desde altas temperaturas obliga a un crecimiento de la ferrita según ciertas direcciones preferenciales, resultando granos alargados en dichas direcciones del grano de austenita previo. Este tipo de estructura Widmanstätten, no son deseables ya que son más duras y frágiles, la nucleación inicial de ferrita se produce en los bordes de grano de la austenita, pero como se mencionó, el crecimiento se hace buscando planos donde los bordes de interfase se hacen coherentes y la fase crece en forma de agujas.



Figura (A) X 1000

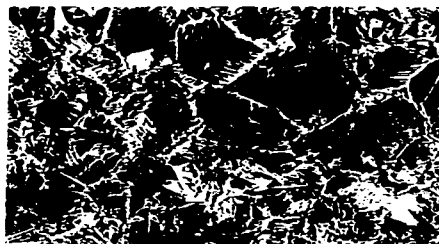


Figura (B) X 1000

Figura 1.12.- Ferrita, figura (A) morfología equiaxial y figura (B) estructura de Widmanstätten.

Propiedades principales:

- Prácticamente es hierro puro, cristaliza en el sistema cúbico de cuerpo centrado.
- La mínima solubilidad del carbono en la red cristalina del hierro alfa a temperatura ambiente es de 0.008%.
- La máxima solubilidad del carbono en hierro alfa a 727 °C es de 0.0218%.
- Es el constituyente más blando de los aceros con 90 unidades Brinell de dureza o 90 BHN, y es el más dúctil y maleable ya que puede tener un alargamiento del 35 al 40% de su longitud inicial sin romperse.
- Resistencia a la rotura de 28 Kg/mm²
- Es magnética por debajo de los 768 °C.

CEMENTITA. Es un compuesto químico formado por hierro y carbono denominado carburo de hierro (Fe_3C), el cual es un compuesto intersticial no estequiométrico. Contiene 6.67% de carbono y 93.33% de hierro, cristaliza en el sistema ortorrómbico formando un paralelepípedo ortorrómbico de gran tamaño con dimensiones aproximadas de 4.5X5.0X6.7 Ångstroms. Posee las características físicas de dureza y fragilidad más pronunciada de todos los microconstituyentes del acero ya que cuenta con una dureza de 700 BHN o 68 Rockwell-C, y también es el más frágil ya que se rompe sin deformación. Es magnética

solamente hasta la temperatura de los 218 °C después de la cual pierde el magnetismo, es decir, solamente es magnética a temperaturas menores de 218 °C.

Desde el punto de vista metalográfico, la cementita aparece de un color blanco brillante siempre que el acero es atacado con reactivos ácidos como el nital o el picral; se puede diferenciar la cementita de la ferrita, la cual también queda de color blanco al ser atacada con reactivos ácidos, tratándola con picrato sódico en caliente (baño María), el reactivo oscurece a la cementita dejando a la ferrita inalterable. Cabe mencionar que la perlita se colorea ligeramente.

Con lo anterior podemos observar que las propiedades físicas de la cementita con respecto de los de la ferrita son opuestas en su gran mayoría.

Podemos decir que los elementos anteriores, la ferrita y la cementita, son la base de los aceros en estado normal, por lo que estos poseerán propiedades mas parecidas a las de la ferrita o a las de la cementita de acuerdo a la cantidad de uno u otro elemento contenidas en un acero determinado.

También la morfología de la cementita es muy variada siendo destacables algunas estructuras típicas, las cuales se mencionan a continuación:

- 1) En los aceros, la cementita libre, no asociada con otras fases suele aparecer en los aceros hipereutectoides, como cementita secundaria, denominada también como cementita proeutectoide, formando una red continua enmarcando una estructura granular formada por colonias de perlita
- 2) Se encuentra como parte de la perlita, denominándosele cementita perlítica o eutectoide. Microscópicamente al ser observada forma capas de láminas paralelas separadas de manera alterna de otras láminas de ferrita. En este caso, las láminas de cementita se aprecian de un color negro y las de ferrita presentan una tonalidad blanca.
- 3) También aparece en forma de glóbulos o granos redondos dispersos sobre una matriz de ferrita, a ésta estructura se le denomina cementita globular o esferoidita. Es propia de aceros hipereutectoides sometidos a un tratamiento térmico de globulizado. La esferoidita proporciona excelentes características de maquinabilidad en aceros de alta concentración de carbono.

4) Se presenta rodeada de martensita en los aceros hipereutectoides templados cuando el tiempo de calentamiento no ha sido suficiente o cuando la temperatura ha sido inferior a la temperatura crítica superior requerida para determinado acero.

5) En los aceros con concentraciones de carbono menor a 0.25% aparece como consecuencia de una precipitación en estado sólido en las uniones de los granos a lo cual se le conoce como cementita terciaria, presenta una forma alargada vermicular.

PERLITA. Es un microconstituyente eutectoide laminar de dos fases conformado por capas alternas de hierro alfa (Ferrita α) y carburo de hierro (Fe_3C) o cementita, es decir, placas o laminillas de cementita en ferrita. Compuesto por 86.5% de ferrita y 13.5% de cementita. Proporcionalmente corresponde a una composición de 0.89% de carbono y 99.11% de hierro. Aparece en los aceros en el enfriamiento lento de la austenita, a temperaturas por debajo del punto de transformación eutectoide o de la temperatura crítica inferior, aproximadamente entre los 650 y 727 °C. La separación de las láminas depende de la velocidad de enfriamiento. La laminillas aparecen mas o menos separadas según la velocidad de enfriamiento, si el enfriamiento es bastante rápido las láminas se acercan mucho no llegándose a distinguir aún con grandes aumentos.

La perlita se clasifica de acuerdo a la distancia interlaminar de sus componentes de la siguiente manera:

a) Perlita gruesa : La cual se obtiene por un enfriamiento muy lento dentro del horno, teniendo una separación entre láminas de 400 μm y una dureza de 200 BHN.

b) Perlita normal : Ésta posee una distancia interlaminar de 350 μm y una dureza de 220 BHN.

c) Perlita Fina : La cual se obtiene por un enfriamiento muy rápido dentro del horno o al aire libre, teniendo una distancia interlaminar de 250 μm y una dureza de 300 BHN.

Propiedades físicas de la perlita:

- Dureza de 200 BHN.
- Ductilidad del 15%.

- Resistencia a la rotura de 80 Kg/mm²

A partir de esta estructura laminar se pueden generar otras dos estructuras diferentes denominadas Perlita Sorbítica, llamada también simplemente Sorbita y la Perlita Globular.

La Perlita Sorbítica es formada por un enfriamiento brusco de la perlita laminar dando origen a una estructura más borrosa al ser observada al microscopio.

La Perlita Globular se forma cuando se calienta la perlita laminar a una temperatura un poco inferior a la temperatura crítica inferior, que es de 727 °C, durante algún tiempo dando como resultado que la cementita adopte la forma de glóbulos incrustados en la masa de ferrita.

Con los tres microconstituyentes anteriores, la ferrita, la cementita y la perlita se puede conocer el estado de un acero que se encuentre a temperatura ambiente y en estado normal, es decir, que no haya sido sometido a algún tratamiento térmico.

Como puede observarse en la figura 1.13 (A), la perlita es un microconstituyente bifásico.

Cuando esta estructura laminar es muy fina (las láminas son muy delgadas) la perlita se ve al microscopio óptico como negra. Sin embargo ambas fases, ferrita y cementita, en condiciones normales de ataque son blancas. El color oscuro o negro en la cementita de la perlita lo producen el gran número de límites de grano existentes entre la matriz ferrítica y las láminas de cementita. Se comprende que cuanto más anchas sean las láminas (se habla entonces de perlita abierta o basta) la tonalidad se irá aclarando hasta poder distinguirse las distintas láminas, no por ello la perlita pierde su carácter de microconstituyente. También la cementita de la perlita aparece oscura por efecto de las sombras y de los relieves.

Otra forma en que puede aparecer esta fina mezcla de ferrita y cementita es la esferoidita, la cual se muestra en la figura 1.13 (B). El nombre no está aceptado universalmente y muchos metalurgistas denominan a esta estructura *cementita globular*. Cuando la transformación eutectoide se realiza lentamente o cuando tras la formación de perlita se da un tratamiento de esferoidización la cementita no aparece en forma laminar, sino en forma globular de menor contenido energético (menor relación superficie / volumen).



Figura (A) X 400



Figura (B) X 400

Figura 1.13.- Perlita (figura A x 400) fina mezcla interlaminar de ferrita y cementita; y partículas gruesas de cementita esferoidal en una matriz de ferrita conforman lo que se denomina como esferoidita (figura B x 400).

AUSTENITA. Es un microconstituyente formado por una solución sólida por inserción de átomos de carbono en hierro gamma (γ) cuya estructura cristalina es CCC, pudiendo contener hasta un 2.11% de carbono. La austenita empieza a formarse en los aceros simples al carbono a la temperatura de los 727 °C, que es el punto crítico inferior (A_1). A partir de la temperatura crítica superior A_3 o A_{cm} , dependiendo de la concentración de carbono del acero, es decir, si se trata de un acero hipoeutectoide o hipereutectoide, la masa total del acero se conforma de cristales de austenita, teniendo por lo tanto 100% γ . Generalmente es un constituyente inestable, pero es posible mantener la estructura a temperatura ambiente mediante un enfriamiento rápido en los aceros con una elevada concentración de carbono o de muy alta aleación.

La austenita puede aparecer a la temperatura ambiente por un enfriamiento rápido al aire en aceros de alta aleación como lo son los aceros inoxidable al cromo-níquel, por ejemplo el 18-8 o el 24-12 y en aceros con concentraciones de manganeso igual a 12% ya que es el componente fundamental de dichos aceros, a los que se les denomina aceros austeníticos. La austenita aparece en forma de cristales poliédricos semejantes a los de la

ferrita pero con la diferencia de que presentan una apariencia mucho más rectilínea en sus contornos y poseen los ángulos más pronunciados.

Las propiedades físicas de la austenita son las siguientes:

Dureza de 300 BHN.

No es magnética.

Tiene gran resistencia al desgaste.

Ductilidad del 30 al 60%.

Resistencia a la rotura de 88 a 105 Kg/ mm².

Es el mas denso de los constituyentes.

OTROS MICROCONSTITUYENTES.

Además de los microconstituyentes comentados, los aceros no aleados presentan en sus microestructuras otros elementos de interés. Entre los que se encuentran más comúnmente, destacan las impurezas, óxidos e inclusiones, resultado de la deficiente desoxidación y refinado de los mismos. Los óxidos se producen en la superficie de la pieza generalmente, aunque pueden existir ciertos procesos de oxidación interna que los hacen aparecer de color gris pálido a gris oscuro según el tiempo de pulido empleado. Entre las inclusiones destacan las de silicatos y las de sulfuros, principalmente de manganeso, que aparecen como granos alargados en la dirección de laminación, con coloraciones oscuras y gris paloma, respectivamente. La observación de estos microconstituyentes es conveniente realizarla previamente al ataque de la probeta metalográfica.

1.5.- ACEROS: COMPOSICIÓN Y CARACTERÍSTICAS DADAS POR LOS DIFERENTES ELEMENTOS ALEANTES.

Ahora podemos definir el acero como una aleación hierro-carbono forjable con un contenido de éste que fluctúa en el rango de 0.03 a 2.00% en peso. El contenido de carbono a nivel práctico no se eleva más allá del 1.40%. Como se puede observar es prácticamente el contenido de carbono lo que convierte al hierro en acero. Esta aleación contiene pequeñas cantidades de otros elementos aleantes tales como manganeso y silicio, además contiene concentraciones residuales de fósforo y azufre los cuales son considerados como impurezas resultantes de la refinación del acero durante su producción. El carbono es el constituyente más importante ya que tiene la habilidad de aumentar la dureza y la resistencia del acero. El comportamiento del hierro se ve afectada grandemente por su asociación con el carbono ya que la presencia de este en el hierro lo hace mas duro, mas fuerte, y más útil para el ingeniero. Por lo que pequeñas variaciones en la cantidad de carbono provocan grandes diferencias en las propiedades mecánicas del acero.

Se conviene en designar como aceros al carbono aquellos que están formados fundamentalmente por hierro y carbono limitando los contenidos de otros elementos como por ejemplo:

Mn	1.20% máx.	Fósforo	0.05%
Si	1.00% máx.	Azufre	0.05%
Ni	0.50% máx.		
Cr	0.25% máx.		
Mo	0.10% máx.		

A continuación detallamos características de los elementos aleantes esenciales que son el manganeso y el silicio, y los considerados como impurezas que son el fósforo y el azufre y su respectiva influencia en la aleación hierro-carbono.

Manganeso: El porcentaje contenido es de hasta 1.0%. Es un constituyente esencial, ya que en la fabricación del acero asegura la obtención de un lingote sin ampollas. Se combina con cualquier azufre presente, el cual de otra forma debilitaría el acero. Sirve para elevar la fuerza y rigidez en el acero. También aumenta su tendencia a quebrarse y

distorsionarse al templarse por enfriamiento, razón por la cual su contenido debe mantenerse por debajo del 0.5% en los aceros al carbono medio y alto.

Silicio: El porcentaje contenido es de hasta 0.3%. Es una impureza procedente del mineral. El silicio se limita al 0.1 o 0.2% en los aceros ya que de otra forma ocasionaría fallas en la cementita, provocando una debilidad en el acero. Si se limita la cantidad al porcentaje indicado entonces el silicio tendrá un escaso efecto directo en las propiedades mecánicas.

Azufre: El porcentaje contenido es de hasta 0.05%. Es una impureza procedente del coque utilizado en los altos hornos. Debilita en buena medida al acero ya que tiende a combinarse con el hierro y forma sulfuro ferroso. El azufre tiene una afinidad mayor con el manganeso, por lo cual también forma sulfuro de manganeso, pero este no debilita al acero. Por lo tanto, debe mantenerse por debajo del 0.05% la cantidad de azufre presente en el acero, además debe haber por lo menos cinco veces más manganeso que azufre.

Fósforo: El porcentaje contenido en el acero es hasta 0.05%. También es una impureza procedente del mineral. Debe eliminarse por refinación hasta donde sea posible y su presencia no debe exceder del 0.05%, ya que forma compuestos que dan fragilidad al acero.

Los aceros aleados son aquellos que además del carbono e impurezas contienen otros elementos de aleación voluntaria como cromo, níquel, molibdeno, vanadio, tungsteno, etc. Existen elementos que pueden beneficiar al acero y también elementos que lo perjudican. Los elementos que pueden beneficiar al acero son: aluminio, azufre, boro, zirconio, cobalto, cobre, cromo, fósforo, manganeso, molibdeno, niobio, níquel, nitrógeno, plomo, selenio, silicio, titanio, vanadio, wolframio. Y los elementos que perjudican al acero son antimonio, arsénico, estaño, hidrógeno y oxígeno.

1.5.1.- ELEMENTOS DE ALEACIÓN QUE BENEFICIAN AL ACERO.

Agruparemos los elementos de aleación con arreglo a sus propiedades y, en general, por orden de mayor influencia.

Elementos que aumentan la dureza de los aceros: El fósforo, níquel, silicio, aluminio, cobre, cobalto, se disuelven en la ferrita lo que endurece esta y por consiguiente el acero. El manganeso, wolframio, molibdeno, vanadio y titanio tienen tendencia a formar carburos.

pero en aceros de bajo contenido en carbono se disuelve en la ferrita endureciendo esta y el acero.

Elementos que endurecen el Acero y lo conservan a altas temperaturas: El titanio, vanadio, wolframio, cromo y manganeso forman carburos si el porcentaje de carbono del acero es suficiente. Estos carburos son muy duros y resistentes al desgaste, propiedades que conservan a altas temperaturas cercanas a los 500 °C. De estos carburos los más duros son los de cromo y vanadio. Los de molibdeno, wolframio y vanadio son más estables a altas temperaturas.

Elementos que modifican los puntos críticos: El níquel, manganeso y cobre tienden a bajar los puntos críticos. El cromo tiende a elevar los puntos críticos en aceros de alto contenido en carbono y a bajarlo en los de bajo contenido. Cuando se encuentran varios elementos aleados en el mismo acero, sus influencias se suman si son de mismo signo o se restan si son de signo contrario.

Elementos que influyen en el campo austenítico: El níquel y el manganeso tienden a ampliar el campo austenítico. En cambio, el cromo, silicio, molibdeno, aluminio y vanadio, disminuyen el campo austenítico y favorecen la formación de estructuras férricas.

Elementos que influyen en el tamaño del grano: El titanio, vanadio y aluminio limitan el crecimiento del grano de la austenita. El titanio y el vanadio formando carburos y el aluminio formando partículas de alúmina que constituyen centros de cristalización.

Elementos que influyen en la templabilidad: El manganeso, el molibdeno y en menor proporción el cromo, silicio y níquel aumentan la templabilidad de los aceros. El cobalto disminuye la templabilidad.

Elementos que influyen en el revenido: El cromo, molibdeno y el wolframio dificultan el ablandamiento de los aceros en el revenido.

Elementos que influyen en la resistencia a la corrosión: El cromo favorece la resistencia a la corrosión de los aceros, y el molibdeno y el wolframio la resistencia a la oxidación.

1.5.2.- ELEMENTOS DE ALEACIÓN QUE PERJUDICAN AL ACERO.

Antimonio : Produce aumento de la fragilidad a partir de 0.5%.

Arsénico : Con porcentajes a partir de 0.8% aumenta los fenómenos de envejecimiento y a partir del 0.25% disminuye la soldabilidad.

Estaño: Aumenta la fragilidad del acero en caliente, siendo su actuación parecida al fósforo pero cuatro veces mas intensa.

Hidrógeno. Se le atribuye la aparición de grietas en la forja. Un método efectivo para eliminar el hidrógeno es calentar el acero a alta temperatura durante un tiempo suficiente.

Oxígeno. La presencia de oxígeno en los aceros aleados es muy perniciosa empleándose aluminio y silicio para desoxidarlos. Los aceros que contienen pequeñas cantidades de oxígeno en forma de óxido de hierro son mas fáciles de trabajar en corte y perforado que los aceros totalmente desoxidados.

Una de las principales características de los aceros es el grado de resistencia. Los aceros simples al carbono por medio de un tratamiento térmico adecuado se les pueden aumentar sus características mecánicas, siempre utilizando medios de enfriamiento energicos como el agua lo que aumenta el riesgo de malformaciones y grietas. La adición de elementos de aleación aumenta la templabilidad de los aceros y por consiguiente el temple penetra mas en las piezas gruesas, mejorando en estas las características mecánicas extraordinariamente con respecto a las de los aceros al carbono. Además, las disminuciones de las velocidades críticas que provocan algunos elementos de aleación permiten medios de enfriamiento menos bruscos que el agua, como por ejemplo el aceite, disminuyendo las deformaciones y riesgo de grietas.

Ventajas e inconvenientes de los aceros Aleados.

Las ventajas de los aceros aleados sobre los aceros al carbono se pueden resumir en tres

- Posibilidad de templar el núcleo en piezas de gran sección.
- Posibilidad de emplear en lugar de temple al agua, temple al aceite o al aire

- Mayor margen de temperatura para el calentamiento en los tratamientos térmicos y menor peligro de sobre calentamiento.

Los inconvenientes de los aceros aleados son los siguientes:

- Mayor dificultad en su elaboración y eliminación de defectos (inclusión, etc.)
- Precio mas elevado.
- Mayor dificultad para su aprovechamiento.

1.6.- CLASIFICACIÓN DE LOS ACEROS DE ACUERDO A SU CONTENIDO DE CARBONO Y A SU COMPOSICIÓN QUÍMICA.

Como se observó anteriormente, la perlita en los aceros es de gran importancia, llegando incluso a clasificarse a los aceros de acuerdo a la proporción de perlita que contienen, al producir una perlita más fina, se incrementa la resistencia de la aleación; por lo que se clasifican de la siguiente forma:

- A) Aceros eutectoides
- B) Aceros hipoeutectoides
- C) Aceros hipereutectoides

1.6.1.- ACEROS EUTECTOIDES.

Son aleaciones Fe-Fe₃C con un contenido de carbono de 0.77% en peso (nominalmente 0.80%).

En la figura 1.14 se observa que a una temperatura superior a 727 °C (punto a en la figura 1.14), en un acero de composición eutectoide, existe la solución sólida de carbono en hierro gamma o austenita al 100%, disminuyendo la temperatura de este acero por debajo del punto eutectoide (punto b en la figura 1.14) se genera la fase de carburo de hierro o cementita y la fase hierro alfa o ferrita, las cuales constituyen el microconstituyente denominado perlita. A la temperatura eutectoide la solubilidad máxima del carbono en el hierro alfa es de 0.0218%, siendo la solubilidad mínima a la temperatura normal ambiente de 0.006% de carbono en peso en el hierro alfa. Al cruzar el punto eutectoide la austenita se transforma totalmente en perlita, por lo que éstos aceros a temperatura ambiente están constituidos solamente por colonias de perlita, existiendo una estructura 100% perlítica.

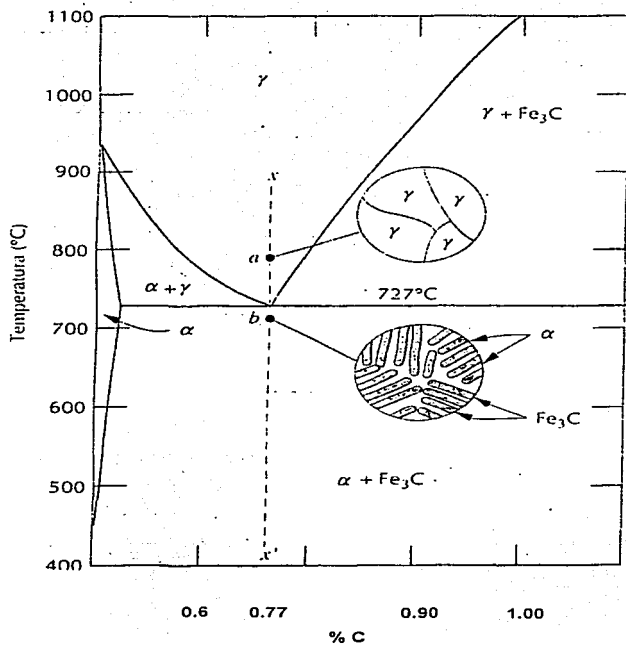


Figura 1.14.-Transformación de fases de un acero eutectoide durante el enfriamiento.

1.6.2 -- ACEROS HIPOEUTECTOIDES.

Las aleaciones Fe-Fe₃C con contenido de carbono en el rango de 0.0218% y 0.77%, el cual se encuentra del lado izquierdo del punto eutectoide se denominan aleaciones hipoeutectoides o aceros hipoeutectoides. En estos el microconstituyente primario o proeutectoide es la ferrita.

En la figura 1.15 se muestra un acero hipoeutectoide y la caracterización de sus diferentes transformaciones de fases al variar la temperatura y a una presión constante de una atmósfera, la describimos a continuación:

- 1) Al incrementar la temperatura más allá de los 727 °C en un acero hipoeutectoide existe en la microestructura solamente austenita. La microestructura consta solamente de granos de fase γ .
- 2) Al decrecer la temperatura o enfriar un acero hipoeutectoide por debajo de los 750 °C se genera la nucleación de la ferrita. Las partículas de ferrita se generan en los límites de los granos de la fase γ y van creciendo conforme disminuye la temperatura hasta llegar a 727 °C. Quedando rodeada la austenita sobrante por una matriz de ferrita y enriquecida ligeramente con carbono.
- 3) Diminuyendo la temperatura por debajo de los 727 °C toda la austenita sobrante se transforma en perlita debido a la reacción eutectoide. La fase α prácticamente no cambia al cruzar la temperatura eutectoide, permaneciendo como una matriz continua rodeando las colonias de perlita. La ferrita presente en el acero hipoeutectoide procede del enfriamiento a través de la región $\alpha + \gamma$ y de la reacción eutectoide. Lo cual se puede observar en el diagrama de la figura 1.15.

Como estructura final después del enfriamiento por debajo de los 727 °C en los aceros hipoeutectoides obtenemos una estructura que contiene dos fases α y Fe₃C las cuales están organizadas como dos microconstituyentes que son la ferrita y la perlita primarias.

Como propiedades características de esta estructura podemos mencionar la resistencia que provoca en la aleación debido al endurecimiento por dispersión generado en

la perlita y también la ductilidad en la aleación debido a la presencia de ferrita primaria continua en la estructura.

1.6.3.- ACEROS HIPEREUTECTOIDES.

Las aleaciones de Fe-Fe₃C con contenido de carbono en el rango de 0.77 a 2.00% en peso les denominamos aleaciones hipereutectoides o aceros hipereutectoides y éstas se encuentran al lado derecho del punto eutectoide en el diagrama hierro-carburo de hierro. El microconstituyente primario o proeutectoide es la cementita o Fe₃C. Se originan transformaciones y microestructuras análogas a las anteriores mencionadas en el punto 1.6.2. También la cementita se genera en los bordes de grano de la austenita. De acuerdo con el diagrama de la figura 1.15 las transformaciones de fases son las siguientes:

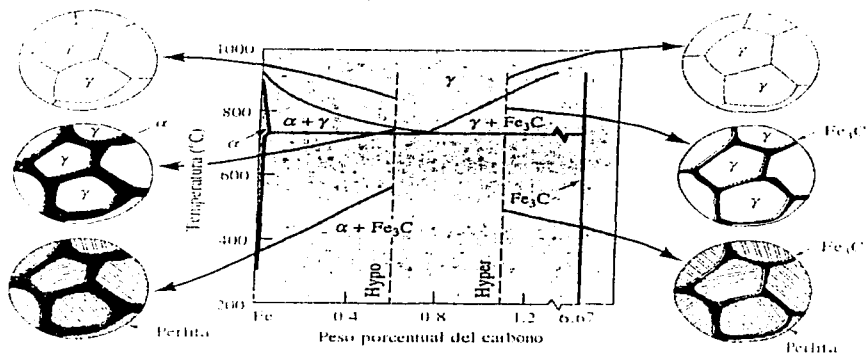


Figura 1.15.-Comparación de la evolución durante el enfriamiento de la microestructura de los aceros hipoeutectoides e hipereutectoides.

- 1) En los aceros hipereutectoides al calentarlos a una temperatura superior a los 850 °C solamente existe la fase γ .
- 2) Enfriando el acero a través de la región $\gamma + \text{Fe}_3\text{C}$ (entre las líneas A_{cm} y A_1) la fase cementita se genera paulatinamente en los bordes de los granos de la austenita, la fase cementita en estas condiciones se denomina cementita proeutectoide y continúa creciendo hasta llegar al punto eutectoide.
- 3) Cruzando el punto eutectoide se genera la transformación en perlita de toda la austenita remanente de composición eutectoide. La fase cementita prácticamente no cambia cruzando el punto eutectoide y permanece como una matriz de cementita dura y frágil que rodea las colonias de perlita.

Como microestructura final se obtiene una microestructura consistente en dos fases α y Fe_3C constituidos como dos microconstituyentes que son la cementita y la perlita. La fase Fe_3C es dura y frágil y en la microestructura tiene una forma continua en forma de matriz lo cual provoca que el acero sea también frágil. Esta microestructura se puede mejorar mediante la aplicación de algún tratamiento térmico a los aceros hipereutectoides y así mejorar sus propiedades mecánicas.

1.6.4.-CLASIFICACION DE LOS ACEROS ATENDIENDO A SU COMPOSICIÓN QUÍMICA.

Existe una gran variedad de grupos o forma de clasificar a los aceros, lo cual se puede hacer tomando en cuenta diversos factores como son el tipo y contenido porcentual de carbono, tal como se observó anteriormente, así como debido a su composición química. Por lo tanto, también se clasifican los aceros en el ámbito industrial de acuerdo a su composición química en las categorías siguientes:

- 1) Aceros simples al carbono
- 2) Aceros de baja aleación
- 3) Aceros de baja aleación–alta resistencia
- 4) Aceros inoxidables
- 5) Aceros para herramienta

1) ACEROS SIMPLES AL CARBONO.

El grupo de los aceros simples al carbono se puede clasificar según el contenido de carbono: bajo, alto y medio carbono. en cada grupo existen subclases que se forman de acuerdo a la concentración de carbono como se describe a continuación.

I.-Aceros al bajo carbono (contenido de carbono menor al 0.30 %)

*Aceros con porcentaje de carbono de 0.10% a 0.15%. Denominado acero muy dulce.

*Aceros con porcentaje de carbono de 0.15% a 0.30%. Denominado acero dulce.

II.-Aceros al medio carbono (contenido de carbono de 0.30% al 0.70%)

*Aceros con porcentaje de carbono en el rango de 0.30% a 0.50%.

*Aceros con porcentaje de carbono en el rango de 0.50% a 0.70%.

III.-Aceros al alto carbono (contenido de carbono de 0.70% a 2.00%)

*Aceros con porcentaje de carbono en el rango de 0.80% a 1.00%.

*Aceros con porcentaje de carbono en el rango de 1.00% a 1.20%.

*Aceros con porcentaje de carbono en el rango de 1.20% a 2.00%.

2) ACEROS DE BAJA ALEACIÓN.

Son aleaciones Fe-Fe₃C a las cuales se les adicionan otros elementos aleantes en forma deliberada, controlada y en determinadas proporciones que en conjunto totalizan como máximo un 5% en peso. Las aleaciones provocan en los aceros de baja aleación propiedades mecánicas tales como resistencia, dureza, tenacidad y combinaciones de estas propiedades; las cuales desde luego son superiores a las que se obtienen en los aceros simples al carbono. Los elementos aleantes que se añaden a la aleación ya sea en forma individual aunque por lo general es en combinación son el cromo, manganeso, molibdeno, níquel, y el vanadio, los cuales forman soluciones sólidas con el hierro y con el carbono forman compuestos metálicos denominados también como carburos.

Estos aceros de baja aleación no son soldables fácilmente en especial cuando están en los niveles de medio y alto carbono.

Los efectos que provocan los elementos aleantes en los aceros de baja aleación son los siguientes:

Cromo: Mejora en forma significativa la resistencia a la corrosión, mecánica, al desgaste, así como la dureza en caliente. Además de incrementar la templabilidad.

Manganeso: Mejora la templabilidad cuando el acero es sometido a un tratamiento térmico, además de mejorar la resistencia y la dureza.

Molibdeno: Este elemento forma carburos para incrementar la resistencia al desgaste, incrementa la resistencia en caliente, la tenacidad, además de la resistencia a la termofluencia. Sirve también para mejorar la templabilidad.

Níquel: Mejora la dureza y la tenacidad. Adicionado significativamente mejora la resistencia a la corrosión. También incrementa la templabilidad aunque no tanto como los otros elementos aleantes.

Vanadio: Durante los diferentes procesos que se realicen en el acero a temperaturas elevadas o durante el tratamiento térmico inhibe el crecimiento de los granos, provocando una mejor resistencia y tenacidad en el acero. Forma carburos que incrementan la resistencia al desgaste.

3) ACEROS HSLA (HIGH STRENGTH LOW ALLOW)

Son aceros estructurales de alta resistencia y baja aleación, algunas veces referidos como aceros microaleados, de hecho son una categoría especial de los aceros al bajo carbono.

Son aceros de baja aleación, solamente con un 3% del total de elementos aleantes como manganeso, cobre, níquel y cromo; y bajo contenido de carbono, entre 0.10% y 0.30% de carbono; los cuales mejoran la relación de resistencia en comparación con los aceros simples al carbono y que son más soldables que los aceros de baja aleación. Son denominados con las siglas HSLA (High Strength Low Allow) lo cual se traduce como Aceros de Baja Aleación Alta Resistencia. Como puede observarse debido a su bajo contenido de carbono no es posible realizar un tratamiento térmico en este tipo de aceros.

4) ACEROS INOXIDABLES

Las principales causas de la corrosión se pueden resumir en corrosión atmosférica, ácidos, alcalis y oxidación debida a altas temperaturas. En este sentido existen los llamados aceros inoxidable y los aceros refractarios resistentes a la oxidación en caliente y los empleados en la construcción de válvulas de automóviles, que deben resistir la corrosión de los productos de combustión de la gasolina, antide-tonantes y la oxidación a elevadas temperaturas.

Son aceros de alta aleación que exhiben una alta resistencia a la corrosión y a la oxidación, además de combinar resistencia y ductilidad. Son aleaciones de base hierro, cuya composición química es de un 12% de cromo como mínimo, bajo contenido de carbono y porcentajes variables de níquel, molibdeno, titanio, vanadio, etc. El principal elemento de aleación es un elemento alfégeno, el cromo, con un contenido arriba del 12%, el cual forma una delgada película impermeable de óxido de cromo (Cr_2O_3) la cual protege a la superficie de la corrosión. También se añade níquel, que es un elemento gammágeno, en ciertos aceros inoxidable para incrementar la resistencia a la corrosión. Formando una capa que permite pasar a través de sí misma la luz pero no agentes corrosivos como agua y oxígeno, si se rompe por causas mecánicas, se vuelve a regenerar automáticamente. El carbono refuerza y endurece el acero pero cuando incrementamos su contenido se reduce la protección contra la corrosión ya que el carbono junto con el cromo forma carburo de cromo ($Cr_{23}C_6$) el cual reduce la cantidad de cromo libre en la aleación.

Los aceros inoxidable se clasifican en los siguientes grupos:

1) **Aceros Inoxidables Austeníticos**. Contiene dos elementos aleantes importantes, el cromo con una concentración del 16 al 25% y níquel con concentraciones de 6 a 22%, así como concentraciones de carbono entre 0.03 y 0.25%. El níquel aumenta la región austenítica en el diagrama de fases hierro-carbono y la hace estable a temperatura ambiente. Carece de puntos de transformación ferrita-austenita. Siendo su microestructura austenítica en todo momento. Se usan principalmente para fabricar equipos de procesos químicos y alimenticios y partes de maquinaria que requieren alta resistencia a la corrosión. El alto contenido de níquel y de cromo los hace altamente costosos.

Sus propiedades importantes son:

- Son los más resistentes a la corrosión de los tres grupos .
- Son muy dúctiles.
- No son tratables térmicamente ya que la austenita no se transforma en martensita.
- Poseen una soldabilidad satisfactoria si están estabilizados con el titanio o el niobio.
- Endurecen por trabajo en frío.
- No son magnéticos en estado recocido, pero pueden adquirir cierto magnetismo por deformación en frío.

En los aceros inoxidable austeníticos existen dos subgrupos:

1) Aceros austeníticos al cromo níquel: El cual es el más importante por su amplia utilización en diversos campos. Son aleaciones hierro-carbono-cromo-níquel con adición de otros elementos tales como molibdeno, titanio, niobio, etc., los cuales permiten obtener determinadas características. Contienen concentraciones de carbono entre 0.03 y 0.25%, concentraciones de cromo entre 17 y 26% y de níquel entre 7 y 22%.

2) Aceros inoxidable austeníticos al cromo-manganeso-níquel: Son aleaciones hierro-carbono-cromo-manganeso-níquel. Aproximadamente representan un 5% de todos los aceros inoxidable austeníticos.

El más clásico de los aceros austeníticos es el 18-8, es decir 18% de Cr y 8 % de Ni, y de 0.15 a 0.18 % de C. Tiene una resistencia de 60 a 66 Kg/mm², límite elástico 21-28 Kg/mm², alargamientos 60% y resiliencia 32 a 35 Kg/cm². Es muy dúctil y apto para la embutición. Tras el laminado en frío se obtienen resistencias de 160Kg/mm².

Existen las siguientes variantes de acero inoxidable 18-8:

- 18-8 con contenido de 0.08% de carbono. Empleado para fabricaciones soldadas y piezas de trabajo a temperaturas de 400 a 500 °C.
- 18-8 con 1 a 2% de Mo resiste mejor la corrosión de ácidos como el acético y fosfórico. También es mas elevada su resistencia en caliente.
- 18-8 con titanio y niobio. Con 1% de carbono. Para piezas soldadas y trabajos entre 500 y 650 °C.
- 18-8 con 2.5% de Si. Resiste hasta temperaturas de 950 °C. Se emplea en parrillas.

- El 25-12 (25% Cr y 12% Ni). Para trabajos a temperaturas de 1100 °C. Pero debe evitarse su utilización a temperaturas de 500 °C ya que es su zona frágil.
- El 20-25. Resiste muy bien la oxidación a altas temperaturas y la corrosión a ácidos y alcálisis. No es atacado por el SO₃ y si por el SO₂.
- 12-12. Es un acero muy dúctil, por lo que se emplea en embutición.
- Cr-Mn. 10 a 13% Cr, 17 a 19% de Mn y 0.14% de carbono. Es soldable y resistente a altas temperaturas. Se emplea en fabricación de colectores de escape y piezas similares.

II) Aceros Inoxidables Ferríticos: Estos aceros no cambian de estructura ferrítica ni al calentarlos ni al enfriarlos, aunque se endurecen un poco al enfriarlos rápidamente. Son aleaciones de hierro-cromo y carbono con concentraciones de cromo del 11 al 30%. Se les adiciona ocasionalmente elementos como el molibdeno con concentraciones máximas de 4%. La concentración de carbono es de 0.08 al 0.20% y no contienen níquel. Carecen de puntos de transformación ferrita-austenita, por lo que su microestructura es de fase ferrítica a temperatura ambiente, aunque en dicha fase se pueden encontrar carburos precipitados. Por lo tanto, como no tienen puntos de transformación no son viables de mejorar sus características mecánicas aplicando tratamientos térmicos. Aunque dichas características se pueden mejorar ligeramente al aplicárseles trabajos de deformación en frío como el trefilado o laminación los cuales son capaces de producir acritud. La gama de utilización comprende desde utensilios de cocina hasta componentes de motores de propulsión a chorro. Son relativamente económicos.

Sus propiedades importantes son las siguientes:

- Son magnéticos.
- Poseen menor ductilidad que los austeníticos
- Decrece su resistencia a la corrosión en comparación con los austeníticos.
- En condición recocida desarrollan su máxima ductilidad, plasticidad y resistencia a la corrosión y a la oxidación.

Existen dos tipos principalmente:

- a) Los de contenido en Cr del 16% y 0.1% de C, de gran resistencia a la oxidación atmosférica y al ataque del ácido nítrico, por lo que se utilizan en piezas decorativas de edificios y fabricación de aparatos expuestos al ácido nítrico.
- b) Los de contenido del 27% de Cr y 0.1% de C, muy resistente a la corrosión a temperaturas de hasta 1000 °C aún en presencia de gases sulfurosos.

La resistencia de estos aceros es de aproximadamente 65 Kg/mm² pero son muy frágiles no superando su resiliencia los 5 Kg/cm².

III) Aceros Inoxidables Martensíticos: Básicamente son aceros al cromo. Contienen concentraciones de cromo desde un 4 hasta un 18% y concentraciones de carbono del 0.15 al 1.20%, como la concentración de carbono es más elevada que en los ferríticos, esto permite fortalecerlos mediante tratamientos térmicos. Algunos contienen elementos de aleación como el níquel con una concentración no mayor del 2.5%, así como manganeso del 0.30 al 1.0%. Presentan una microestructura austenítica la cual al enfriarse rápidamente se transforma en martensita. Se utilizan ampliamente en instrumentos quirúrgicos y cuchillería de alta calidad.

Sus propiedades importantes son las siguientes:

- Fuertes y resistentes a la fatiga
- Son menos resistentes a la corrosión que los austeníticos y los ferríticos.
- Se pueden endurecer por medio de temple y revenido.
- Son magnéticos

Existen cuatro tipos de Aceros Inoxidables Martensíticos:

- El hierro Inoxidable (Extra suave) con contenido en carbono de menos de 0.08% y Cromo 13%.
- Acero de Cuchillería: 0.3% de C y 12 a 14% de cromo, tras el temple y revenido adquiere cualidades similares a un acero de 0.6% de C (resistencia de aproximadamente 100 Kg/mm², alargamiento de 11% y resiliencia de 11Kg/cm²).
- Aceros Inoxidables Martensíticos Duros. Contienen 13% de Cr y de 0.6 a 1% de C. Algunas veces con 0.5% de Mo. Estos aceros después del temple y revenido quedan con una dureza de 58 a 60 Rockwell-C.

- **Aceros Martensíticos al Cromo-Níquel.** Contienen del 12 al 16% de Cr y del 1.5 a 3% de Ni. Estos aceros bien templados tienen buena resistencia al agua de mar y no sufren corrosión galvánica en contacto con bronce y latones por lo que se utiliza en barcos, para ejes, etc.

Además de los anteriores existen otros tipos de aceros inoxidables los cuales se mencionan a continuación:

Aceros Inoxidables Endurecibles por Precipitación: Son aleaciones hierro-cromo-níquel, la composición típica es de 17% de cromo y 7% de níquel. Contienen concentraciones de cromo del 12.25 al 18.0% y una baja concentración de carbono en un rango del 0.05 al 0.09%, además cuenta con adiciones pequeñas de aluminio, cobre, manganeso, titanio y molibdeno. La característica distintiva entre el grupo de aceros inoxidables radica como su propio nombre lo indica, en el hecho de que se pueden fortalecer con el tratamiento térmico denominado endurecimiento por precipitación. Por sus propiedades mecánicas son aleaciones utilizadas en el ámbito aeroespacial.

Sus propiedades importantes son:

- Resistencia a la corrosión a temperaturas elevadas.
- Resistencia mecánica a temperaturas elevadas.
- Endurecen por hipertemple y envejecimiento.

Aceros Inoxidables Dúplex Su estructura consiste en una mezcla de austenita y ferrita en proporciones aproximadamente equivalentes. Contienen concentraciones de carbono del 0.030 al 0.10%, de cromo del 18 al 30%, de níquel del 3.0 al 6.0% así como manganeso del 1.50 al 2.0% y molibdeno del 1.0 al 3.0%. Encuentran aplicaciones en intercambiadores de calor, bombas y plantas de tratamiento de aguas negras.

Sus propiedades importantes son:

- Resistencia a la corrosión similar a los austeníticos.
- Mejorada resistencia al agrietamiento por corrosión debido al esfuerzo.
- La tenacidad es superior a la de los aceros ferríticos.
- Conformabilidad y soldabilidad, propiedades que no se obtienen en los demás aceros inoxidables

5) ACEROS PARA HERRAMIENTAS.

Son aceros al alto carbono y con altos niveles de elementos de aleación. Las razones principales de éste alto contenido de elementos aleantes radica en la obtención de las siguientes propiedades una vez que son tratados térmicamente.

- a) Templabilidad mejorada.
- b) Reducción de la distorsión durante el tratamiento térmico.
- c) Dureza en caliente.
- d) Formación de carburos metálicos duros para resistencia a la abrasión
- e) Tenacidad mejorada.

Fueron generalmente diseñados para el ámbito industrial en donde se requiere una combinación de gran resistencia, dureza, tenacidad y resistencia a altas temperaturas para usarse por ejemplo en herramientas de corte, dados y moldes para fundición a presión y para conformación

1.7.- DESIGNACIÓN Y ESPECIFICACIÓN DE ACEROS AL CARBONO Y DE BAJA ALEACIÓN .

Como la microestructura del acero determina la mayoría de sus propiedades y aquella está determinada por el tratamiento y la composición química; uno de los sistemas más generalizados en la nomenclatura de los aceros es el que está basado en su composición química.

Un sistema de clasificación y designación de aceros, entrega una identificación específica para cada grado, tipo o clase de acero, mediante una simbología bien establecida.

La mayor parte de los sistemas de designación de aceros están basados en la composición química, quedando las propiedades mecánicas como segundo atributo más importante. Una especificación se entiende como una declaración escrita de los atributos que debe poseer y de las restricciones y condiciones que debe cumplir un producto para satisfacer una aplicación determinada. Una especificación estándar es un documento público que describe un producto aceptable para muchos usuarios y que puede ser cumplida por muchos productores. los que pueden invocarla en sus contratos.

El sistema de designación de aceros más universalizado es el desarrollado por el Instituto Americano del Hierro y del Acero (AISI) en conjunto con la Sociedad de Ingenieros Automotrices (SAE), el cual presenta la ventaja de tener un cierto grado de sistematicidad. Por otra parte el conjunto de especificaciones estándar más ampliamente usado es el de la Sociedad Americana de Ensayo de Materiales (ASTM), y en nuestro país fué aceptado como Norma Oficial Mexicana (NOM).

1.7.1.-SISTEMA DE DESIGNACIÓN AISI/SAE/NOM.

Este sistema está basado en cuatro dígitos XXXX, los primeros dos números se refieren a los dos elementos de aleación más importantes de los cuales el primero designa la combinación principal de elementos aleantes, el segundo define los rangos de composición específicos y los dos o tres últimos dígitos dan la cantidad de carbono presente en la aleación en centésimas de porcentaje en peso. Los contenidos porcentuales de las aleaciones están también expresados en porcentajes de peso. Los numerales nos indican el tipo de acero.

Un acero 1040 AISI es un acero con 0.4%C; un acero 4340 AISI, es un acero aleado que contiene 0.4% de carbono, el 43 indica la presencia de otros elementos aleantes.

Las convenciones para el primer dígito son:

- 1 - Manganeso
- 2 - Niquel
- 3 - Niquel-cromo, principal aleante el níquel.
- 4 - Molibdeno
- 5 - Cromo
- 6 - Cromo-vanadio, principal aleante el cromo
- 8 - Niquel-cromo-molibdeno, principal aleante el molibdeno
- 9 - Niquel-cromo-molibdeno, principal aleante el níquel.

No hay aceros numerados 7XXX porque estos aceros resistentes al calor prácticamente no se fabrican.

Se observa entonces que si el primer número es 1 se sabe que es un acero al carbono; si el dígito siguiente es el 0, o sea que la designación es 10XX, se trata de un acero

ordinario al carbono A continuación se muestra la designación de los aceros de acuerdo a las normas AIS-SAE y NOM.

NUMERALES, DÍGITOS Y TIPO DE ACERO	CONTENIDO NOMINAL DE ALEACIÓN
---------------------------------------	-------------------------------

ACEROS AL CARBONO

10XXX	Al carbono no aleado (Mn 1 00% máx.)
11XX	Resulfurizado
12XX	Resulfurizado y Refosforizado

ACEROS AL MANGANESO	% de Mn
13XX	1.75

ACEROS AL NIQUEL	% de Ni
23XX	3.50
25XX	5.00

ACEROS AL NIQUEL-CROMO	% de Ni	% de Cr
31XX	1.25	0.65 y 0.80
32XX	1.75	1.07
33XX	3.50	1.50 y 1.57
34XX	3.00	0.77

ACEROS AL MOLIBDENO	% de Mo
40XX	0.20 y 0.25
44XX	0.40 y 0.52

ACEROS AL NIQUEL-CROMO- MOLIBDENO	% de Ni	% de Cr	% de Mo
43XX	1.82	0.50 y 0.80	0.25
43BVXX	1.82	0.50	0.12 y 0.25 V 0.03 min
47XX	1.05	0.45	0.20 y 0.35
81XX	0.30	0.40	0.12
86XX	0.55	0.50	0.20
87XX	0.55	0.50	0.25
88XX	0.55	0.50	0.35
93XX	3.25	1.20	0.12
94XX	0.45	0.40	0.12
97XX	0.55	0.20	0.20
98XX	1.00	0.80	0.25

ACEROS AL NIQUEL-MOLIBDENO	% de Ni	% de Mo
46XX	0.85 y 1.82	0.20 y 0.25
48XX	3.50	0.25

ACEROS AL CROMO	% de Cr
50XX	0.27, 0.40, 0.50 y 0.65
51XX	0.80, 0.87, 0.92, 0.95, 1.00 y 1.05
50XXX	0.50 ; 1.00% C min.
51XXX	1.02 ; 1.00% C min.
52XXX	1.45 ; 1.00% C min.

ACEROS AL CROMO-VANADIO	% de Cr	% de V
61XX	0.60 , 0.80 y 0.95	0.10 y 0.15 min.

ACEROS AL TUNGSTENO-CROMO	% de W	% de Cr
72XX	1.75	0.75

ACEROS AL SILICIO- MANGANESO	% de Si	% de Mn
92XX	1.40 y 2.00	0.65, 0.82 y 0.85 0.00% y 0.65% de Cr

ACEROS DE ALTA RESISTENCIA Y BAJA ALEACIÓN

92XX Existen varios grados designados por SAE.

ACEROS AL BORO.

XXBXX La letra B denota al Boro.

ACEROS PLOMADOS.

XXLXX La letra L denota acero plomado.

1.8.- TRATAMIENTOS TERMICOS DE LOS ACEROS.

Un tratamiento térmico es una combinación de operaciones de calentamientos y enfriamientos, controlando cuidadosamente la velocidad de calentamiento, la temperatura de calentamiento, el tiempo de permanencia a determinada temperatura, la velocidad de enfriamiento así como el régimen de enfriamiento del material. Todas estas operaciones se realizan en un material o en una aleación en estado sólido con el fin de obtener determinadas propiedades físicas.

El objetivo del tratamiento térmico es mejorar las propiedades y características de los aceros modificando la estructura microscópica mediante la cual se verifican transformaciones físicas. Los tratamientos térmicos están diseñados para conseguir una distribución óptima de dos o más fases en la microestructura. Los factores temperatura, tiempo, y régimen de enfriamiento están predeterminados acorde a la composición química del acero, forma y tamaño de la pieza así como las características deseadas al finalizar el tratamiento térmico. Para conocer a que temperatura debe calentarse el metal para someterlo a un tratamiento térmico es recomendable contar con los diagramas de fases. En este tipo de diagramas se especifican las temperaturas en las que suceden los cambios de fase ó cambios de estructura cristalina, dependiendo del porcentaje de los materiales diluidos en la aleación.

A continuación en la figura 1.16 se muestra la porción eutectoide del diagrama de fases del sistema Fe-Fe₃C. La porción eutectoide es la zona de relevante importancia para el tratamiento térmico de los aceros. En ésta zona se pueden apreciar las líneas de solubilidad A₁ la cual indica la temperatura a la cual inicia la formación de ferrita al enfriarse la austenita; la línea A_{CM} que nos muestra la temperatura a la cual comienza a formarse el Fe-Fe₃C o cementita también al enfriarse la austenita, y por último la isoterma A₁ (727 °C) que es la temperatura eutectoide. Las líneas A₃ y A_{CM} se conocen como temperaturas críticas superiores. A₃ para los aceros hipoeutectoides y A_{CM} para los aceros hipereutectoides. La línea A₁ es conocida como la temperatura crítica inferior.

Microscópicamente la finalidad de la aplicación de tratamientos térmicos a los aceros es producir la formación de una mezcla de cementita y ferrita que den como resultado microconstituyentes con una adecuada combinación de propiedades. Son tres los microconstituyentes que se pretenden obtener, siendo éstos la perlita, la cual como

observamos anteriormente es una mezcla laminar de ferrita y de cementita; la bainita formada en los aceros mediante la transformación de la austenita isotérmicamente a temperaturas relativamente bajas y que también es un microconstituyente bifásico de ferrita y cementita en donde la cementita es más redonda que en la perlita. El tercer microconstituyente es la martensita revenida, la cual se forma al recalentar la martensita después de su formación, es una mezcla de cementita muy fina y redonda en una matriz de ferrita.

Con el fin de obtener las propiedades mecánicas óptimas en el acero al ser tratado térmicamente se debe tener cuidado en ciertos parámetros importantes como la velocidad de calentamiento, la temperatura máxima de calentamiento, el tiempo de permanencia a la temperatura elegida y la velocidad de enfriamiento.

Para efectuar el tratamiento térmico a un acero en primer lugar es necesario calentar la pieza de acero a una temperatura arriba de la temperatura crítica superior (en el diagrama de la figura 1.16 por arriba de la línea A_3 y A_{cm} , de acuerdo a la composición porcentual de carbono en la aleación) hasta hacerlo completamente austenítico. La velocidad de calentamiento debe ser lenta con el fin de evitar excesivos esfuerzos térmicos y de transformación. La temperatura máxima es determinada por la composición química del acero. En los aceros hipoeutectoides se elige una temperatura un poco por arriba de la temperatura crítica superior (línea A_3 de la figura 1.16) y en los aceros hipereutectoides se emplea una temperatura comprendida en el rango de los límites de la temperatura crítica superior (línea A_{cm}) y la temperatura crítica inferior (727°C o A_1). Se debe evitar el calentamiento a elevadas temperaturas ya que ello provoca el incremento en tamaño del grano.

La variable tiempo que debe permanecer el acero a una determinada temperatura máxima está en función de la obtención de una temperatura uniforme en toda la pieza debiendo tener cuidado de no prolongar mucho tiempo determinada temperatura ya que ello también provocaría un inconveniente incremento en las dimensiones del grano, así como la formación de escamas o la descarburización de la superficie. *En la práctica se toma como base 60 minutos de permanencia del acero dentro del horno una vez alcanzada la temperatura máxima por cada 25 mm de espesor de la sección transversal de la pieza de acero.* Una vez que se tiene una temperatura uniforme en toda la pieza de acero la velocidad

de enfriamiento está en función de la estructura final deseada. La velocidad lenta de enfriamiento como por ejemplo dentro del horno o al aire libre genera una estructura perlítica más blanda; y la velocidad rápida de enfriamiento como por ejemplo un enfriamiento brusco por inmersión provoca la formación de una estructura martensítica dura.

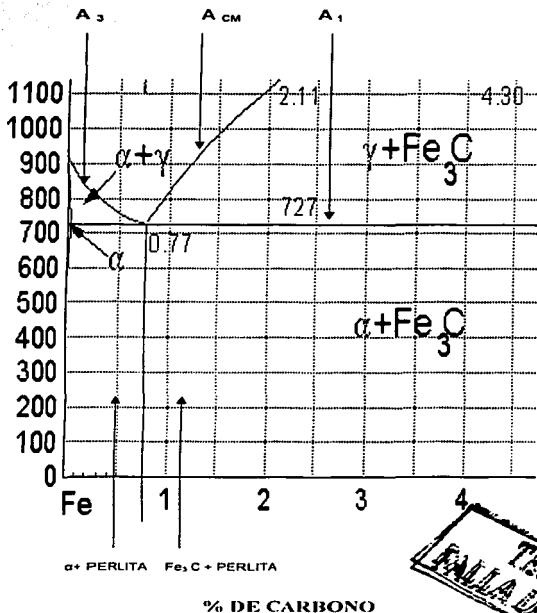


Figura 1.16.- Zona eutéctica del diagrama de fases del sistema Fe- Fe₃C.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

A continuación detallamos los tratamientos térmicos usuales en los aceros.

1.8.1.- TEMPLE.

El proceso de temple del acero consiste en el calentamiento del metal de manera uniforme a la temperatura correcta, ligeramente arriba de la temperatura crítica superior, hasta llegar a la temperatura de austenitización enfriándolo posteriormente en forma rápida de acuerdo a la composición y dimensiones de la pieza en un régimen de enfriamiento de agua, aceite, aire o en una cámara refrigerada. La velocidad de enfriamiento debe ser tan rápida de tal forma que se suprima la transformación de ferrita y perlita, tampoco debe existir la transformación de una estructura bainítica. Se obtiene al final del enfriamiento una estructura denominada martensita. Puede aparecer una estructura mixta a base de austenita y martensita que posteriormente se transforma en la estructura denominada como cementita secundaria. Cuando se calienta el acero la perlita se combina con la ferrita, lo que produce una estructura de grano fino llamada austenita. Cuando se enfría la austenita de manera brusca con agua, aceite o aire, se transforma en martensita, material que es muy duro y frágil.

La temperatura hasta la que hay que calentar el acero se rige por el contenido de carbono en el acero. En aceros hipoeutectoides se calienta el acero de 30 a 50 °C por arriba de la temperatura crítica superior (línea A_3 en la figura 1.16) para que toda la masa se transforme en austenita. En los aceros hipereutectoides es suficiente la transformación de la porción de perlita, es decir un calentamiento superior a la temperatura crítica inferior (línea A_1) e inferior a la línea A_{cm} ya que en dicho intervalo existirá austenita y cementita y al efectuar un enfriamiento rápido la austenita se convierte en martensita quedando sin transformarse la cementita, o sea que al finalizar el temple la constitución en el acero estaría conformada por martensita y cementita la cual como se observó anteriormente también posee una gran dureza y gran resistencia al desgaste. Además el hecho de la disolución de la cementita, es decir, calentar el acero por arriba de la línea A_{cm} implica altas temperaturas y en consecuencia el riesgo de la formación de un grano grueso y de la disolución de núcleos que aumenta en el temple la cantidad de austenita residual. Es por esta razón que los aceros hipereutectoides se templean a temperaturas constantes entre los 750 a 780 °C, independientemente del contenido de carbono.

La templabilidad de un acero es la propiedad que determina la profundidad y distribución de la dureza producida por temple, es decir, la facilidad para formar martensita dificultando la aparición de productos de transformación y depende de los siguientes factores:

- La composición química del acero.
- Del tamaño del grano austenítico.
- De la estructura del acero antes del temple.

La templabilidad en los aceros se ve afectada por los siguientes factores:

1.-El tamaño de grano de la austenita: Un grano muy fino tiene mucha área de borde de grano que facilita la nucleación de ferrita y perlita, disminuyendo la templabilidad del acero. Por otra parte, un grano grande de austenita no es deseable por que reduce la ductilidad final del acero y aumenta la tendencia al agrietamiento en el temple, así pues, no es buena práctica hacer crecer el grano de la austenita.

2.-El aumento del contenido de carbono: Un incremento del contenido de carbono en un acero aumenta fuertemente su dureza y su templabilidad. Sin embargo, un alto porcentaje de carbono no siempre es deseable, por eso, una alternativa para aumentar la dureza de un acero de bajo carbono es añadir elementos de aleación.

3.-Elementos de aleación: Ninguno de los factores anteriores se usa específicamente para aumentar la templabilidad, esto se logra principalmente mediante la adición de elementos de aleación al acero, exceptuando al cobalto.

El punto medular del temple está en la velocidad de enfriamiento, conocida como velocidad crítica de temple, lapso de enfriamiento que debe ser lo más mínima posible, durante el cual toda la austenita se transforme en martensita. Un enfriamiento con una velocidad demasiado rápida, superando la velocidad crítica, aunque siempre produce martensita, tiene el riesgo de generar en la pieza templada diferencias de contracción debido a que en la pieza de acero pueden existir puntos externos o superficiales fríos y puntos internos de la pieza con una temperatura superior con lo cual se provocarían en el elemento templado defectos como deformaciones o grietas. La velocidad exacta de enfriamiento es ligeramente mayor a la velocidad crítica de temple, variando según el tipo de acero a

templar. A continuación se indican algunas velocidades críticas de temple para los siguientes aceros al carbono.

Acero al carbono con 0.5% de carbono: 350 °C/s

Acero al carbono con 0.8% de carbono: 250 °C/s

Aceros especiales: Es del orden de 30 °C/s

En la tabla 1.2 se muestran los medios de inmersión y la temperatura de los mismos así como determinadas características requeridas para realizar el temple:

Tabla 1.2.-Régimenes de inmersión y características necesarias para el templado.

Régimen de inmersión	Tempertura (°C) y características necesarias.
Agua	Suficiente de 20 °C.
Aceites	Requieren un punto de inflamación superior a 180°C. Deben poseer la mínima volatilidad con la finalidad de un desprendimiento menor de gases.
Plomo fundido	La temperatura oscila entre 400 y 600 °C. Se utiliza para templar herramientas de aceros especiales que requieren poca velocidad de enfriamiento.
Mercurio	Requerido para templar elementos delicados como instrumentos quirúrgicos.
Sales fundidas	Se alcanzan temperaturas de 150 a 1300°C al mezclar cantidades variables de cloruros, nitratos, carbonatos, etc.

Ahora ejemplificamos en la tabla 1.3 algunas de las aplicaciones efectuadas en aceros al carbono de los anteriores regímenes de enfriamiento:

Tabla 1.3.-Aplicaciones de los regímenes de enfriamiento.

Régimen de enfriamiento	Aplicaciones
Agua	Aceros al carbono. Elementos con un diámetro o espesor mayor a 10 mm. Así como aceros de baja aleación con un diámetro o espesor mayor a 25 mm.
Aceite	Aceros al carbono. Piezas con un diámetro o espesor de 5 a 10 mm.
Plomo	Aceros especiales para muelles, cuerdas de piano y herramientas.
Salas	Aceros rápidos y de herramientas.

1.8.2.-REVENIDO.

Es la operación que sigue al posterior templado de un acero. Se pretende la eliminación parcial del temple. Después de que se ha templado el acero, éste es muy frágil lo que impide su manejo ya que se puede romper con el mínimo golpe debido a la tensión interior generada por el proceso de endurecimiento, es por ello que para contrarrestar la fragilidad en el acero, se efectúa el tratamiento térmico denominado revenido, el cual lo hace más tenaz y menos quebradizo aunque pierde un poco de dureza. La estructura martensítica obtenida por temple es muy dura y frágil. Mediante el revenido es posible aumentar significativamente su resistencia al impacto, aun cuando se disminuye la dureza.

Se realiza recalentando el acero a una temperatura inferior a la temperatura crítica inferior de 727 °C, seguido de un régimen de enfriamiento deseado. Si se calienta la

martensita en un acero por debajo de la temperatura eutectoide se precipitan fases α y Fe_3C estables, con lo que se descompone la martensita provocando que la resistencia mecánica y la dureza en el acero se vea disminuida, incrementando por el contrario, su ductilidad y resistencia al impacto. La temperatura del revenido oscila entre los 100 °C para una pequeña transformación de la martensita hasta casi 700 °C para una gran transformación de la martensita.

El revenido consiste en calentar una pieza templada a temperaturas menores que la de austenitización, sin sobrepasar la temperatura crítica inferior, para posteriormente enfriarla al aire. En ningún caso la temperatura debe llegar hasta la zona de austenitización porque se destruiría toda la martensita y por ende todas las características generadas por el temple.

El objetivo es disminuir la dureza de la martensita para de esta forma disminuir la dureza y la resistencia de los aceros templados así como eliminar las tensiones creadas durante el temple además de mejorar la tenacidad. Todo esto deja al acero con la dureza requerida.

A continuación en la tabla 1.4 mostramos algunas características y temperaturas para revenir diferentes tipos de aceros previamente templados.

Tabla 1.4.-Temperaturas para revenir aceros templados.

Color	°F	°C	Tipos de aceros
Paja claro	430	220	Herramientas como brocas, machuelos
Paja mediano	460	240	Punzones dados y fresas
Paja oscuro	490	255	Cizallas y martillos
Morado	520	270	Árboles y cinceles para madera
Azul oscuro	570	300	Cuchillos y cinceles para acero
Azul claro	600	320	Destornilladores y resortes

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

1.8.3.- RECOCIDO.

Es un tratamiento térmico realizado en los aceros que produce una perlita blanda y gruesa conteniendo Fe_3C laminar, se realiza mediante austenización del acero, es decir elevando la temperatura hasta la cual se forme austenita homogénea, y finalmente se enfría lentamente en el horno cerrado o pueden ser extraídos del mismo y enfriados en algún medio que prolongue el tiempo de enfriamiento en relación con el enfriamiento no restringido que se efectuaría al aire libre, como puede ser envuelto en ceniza, cal, asbesto o vermiculita. El objetivo es disminuir la dureza, aumentar la ductilidad y también mejorar la maquinabilidad en los aceros al alto carbono. También se utiliza para regenerar la estructura, es decir, refinar el tamaño de grano y hacer uniforme la estructura en todo el acero, relevar esfuerzos o eliminar tensiones internas, eliminar gases, modificar las propiedades magnéticas y eléctricas.

Para recocer se efectúa el austenizado en los aceros hipoeutectoides aproximadamente $55\text{ }^{\circ}\text{C}$ por arriba de A_1 para producir 100% austenita. En los aceros hipereutectoides se realiza la austenización aproximadamente $55\text{ }^{\circ}\text{C}$ por arriba de A_1 lo cual produce la formación de γ y Fe_3C , con este proceso se impide la formación de Fe_3C en los límites intergranulares que se formaría a partir de un enfriamiento lento a partir de la región 100% austenítica.

Existen tres tipos de recocidos empleados industrialmente los cuales mencionamos enseguida:

- 1) Recocido de austenización completa o de regeneración.
- 2) Recocidos globulares de austenización incompleta.
- 3) Recocidos subcríticos.

1.a) Recocido de austenización completa o de regeneración: En el cual el acero se calienta a una temperatura un poco más elevada de la temperatura crítica superior dependiendo del contenido de carbono durante un periodo adecuado de tiempo, aproximadamente $850\text{ }^{\circ}\text{C}$, enfriando posteriormente muy lentamente dentro del horno con lo cual se produce una perlita gruesa. Esto provoca una disminución en la dureza del acero y una regeneración de su estructura. Como se mencionó anteriormente, la temperatura de

recocido es de 55 °C por arriba de la temperatura crítica superior y el tiempo de permanencia a una determinada temperatura es de 1 hora por cada 25 mm de espesor de la pieza.

Debemos mencionar que los aceros con poco contenido de carbono por ejemplo de 0.1 a 0.2%, necesitan una velocidad de enfriamiento mayor y no muy lenta, con el fin de obtener en su estructura microscópica un grano de ferrita fino, razón por la cual son enfriados al aire libre y no dentro del horno.

Este tipo de recocido es el que se lleva a cabo en los aceros estudiados en la presente tesis, por lo cual en la siguiente tabla se muestran las temperaturas y forma de enfriamiento para realizar el recocido de regeneración en aceros al carbono atendiendo a su contenido porcentual de carbono presente.

Tabla 1.5.-Temperaturas para realizar el recocido de regeneración y forma de enfriar los aceros al carbono.

Porcentaje de carbono	Temperatura máxima de recocido (°C)	Forma de enfriamiento
0.1 a 0.2	875 a 925	Al aire
0.2 a 0.3	850 a 900	Dentro del horno con las puertas abiertas
0.3 a 0.4	850 a 875	
0.4 a 0.5	825 a 855	Dentro del horno con las puertas cerradas.
0.5 a 0.6	800 a 830	
0.6 a 0.7	760 a 800	
0.7 a 1.76	750 a 775	

1.b) Recocido de austenitización incompleta o recocido globular de austenitización incompleta (conocido también como esferoidización): Consiste en un calentamiento prolongado a una temperatura intermedia entre la temperatura crítica inferior y la temperatura crítica superior, seguido de un posterior enfriamiento lento. Este tratamiento térmico se realiza en aceros al carbono o aceros aleados con más de 0.50% de carbono con

la finalidad de disminuir su dureza y darles mayor maquinabilidad. Se detalla más ampliamente en un apartado posterior bajo el término de esferoidización.

1.c) Recocido subcrítico: Consiste en el calentamiento del acero por debajo de los 727 °C con un enfriamiento posterior al aire. La velocidad de enfriamiento no tiene mucha importancia. El objetivo es eliminar tensiones y aumentar la ductilidad en el acero. Existen tres tipos de recocidos subcríticos: a) De ablandamiento, b) Contra acritud y c) Globular.

1.c.1.-Recocido subcrítico de ablandamiento: Se realiza calentando el acero a una temperatura lo más elevada posible pero menor a la temperatura crítica inferior, es decir hasta unos 700 o 720 °C, enfriando el acero posteriormente lentamente al aire.

Objetivo: Disminuir la dureza en el acero lo suficiente para poder maquinarlo. Cabe mencionar que en aceros para herramientas y aceros de alta aleación la dureza obtenida con éste tratamiento no permite el mecanizado.

1.c.2.-Recocido subcrítico contra acritud: Consiste en calentar el acero a temperaturas comprendidas entre 600 y 700 °C y por último se enfría al aire.

Objetivo: Aumentar la ductilidad en aceros con menos de 0.40% C estirados en frío, esto es debido a que al calentarlos se destruye la cristalización alargada de la ferrita, generando entonces cristales poliédricos más dúctiles que los anteriores lo cual permite estirar o laminar el material sin dificultad. Logra que los granos de ferrita y perlita deformados y distorsionados recobren su estado normal con lo cual cesan los efectos negativos de la acritud, de esta forma se aumenta la tenacidad del acero.

1.c.3.-Recocido subcrítico globular: Consiste en el calentamiento del acero a una temperatura inferior pero muy próxima a la temperatura crítica inferior de los 727 °C y un posterior enfriamiento lento dentro del horno.

Objetivo: Obtener una estructura globular de muy baja dureza en los aceros al carbono y de baja aleación, parecida a la que se obtiene en el recocido globular de austenitización incompleta.

DOBLE RECOCIDO: Consiste en realizar un recocido de regeneración y enseguida un recocido subcrítico con el objetivo de obtener durezas muy bajas.

1.8.4.- NORMALIZADO.

Se lleva a cabo al austenitizar por calentamiento lento a aproximadamente 55 °C arriba de la temperatura A_3 para los aceros hipoeutectoides y 55 °C arriba de la temperatura A_{cm} para los aceros hipereutectoides, dependiendo del porcentaje de carbono contenido en las aleaciones, permitiendo tiempo para la formación de la austenita y posteriormente se enfría el acero en aire estático o aire tranquilo a la temperatura ordinaria, esta operación de un enfriamiento más rápido produce una estructura de perlita fina lo cual proporciona una mayor resistencia mecánica en la estructura. En los aceros hipoeutectoides es muy importante la temperatura ya que a temperaturas de recocido demasiado altas se forma no solamente un grano grueso sino también una mayor cristalización de ferrita en los límites intergranulares. En los aceros hipereutectoides el normalizado se realiza calentando el acero arriba de la temperatura A_{cm} , con el fin de disolver toda la cementita durante la austenización y así evitar la formación de el carburo de hierro en los bordes de los granos.

Este tratamiento se emplea casi exclusivamente para los aceros al carbono empleados para construcción o aceros de baja aleación. También se emplea en piezas que han sido trabajadas en caliente, en frío o que han sufrido enfriamientos o sobrecalentamientos irregulares y para destruir defectos de un tratamiento anterior realizado de forma incorrecta, además de eliminar tensiones internas y dar uniformidad al tamaño de grano.

1.8.5.- ESFEROIDIZADO O ESFEROIDIZACIÓN.

Es un tratamiento del acero que provoca la formación redondeada o globular del carburo, es decir, provoca que el carburo de hierro, se forme en esferas o nódulos pequeños en una matriz de ferrita.

El objetivo que se persigue es obtener la mínima dureza y la máxima ductilidad en el acero para facilitar la maquinabilidad en aceros al alto carbono, pretratar el acero endurecido y de esta forma ayudarlo a obtener una mayor uniformidad estructural después del enfriamiento súbito. Existen tres métodos de esferoidización, los cuales son los siguientes:

1.- Realizando el calentamiento prolongado por debajo de los 727 °C y posteriormente un enfriamiento relativamente lento.

2.- En piezas pequeñas de acero al alto carbono realizando un calentamiento prolongado alternando temperaturas dentro y ligeramente por debajo del intervalo crítico de temperaturas. También se le denomina como recocido globular oscilante.

3.- Efectuando el calentamiento en el rango de temperaturas de 750 a 800 °C en aceros al carbono y para herramientas, usando temperaturas más altas para aceros especiales o aleados para herramientas. Se mantienen de 1 a 4 horas y posteriormente se enfrían lentamente dentro del horno. También es conocido como recocido globular de austenitización incompleta.

1.8.6.- AUSTEMPLADO.

Consiste en la transformación isotérmica de la austenita en la zona de 250 a 600 °C . Se lleva a cabo calentando el acero a una temperatura ligeramente arriba de la temperatura crítica superior realizando después un enfriamiento rápido en un baño de plomo o sales fundidas a temperaturas en el intervalo de 250 y 600 °C con una permanencia a esta temperatura del acero dentro del baño el tiempo suficiente para la transformación completa de la austenita en otros microconstituyentes a temperatura constante. El resultado de este tratamiento isotérmico consiste en la formación de bainita.

1.8.7.- MARTEMLADO.

Se realiza calentando el acero a una temperatura a un nivel un poco arriba de la temperatura crítica superior hasta austenitarlo, para posteriormente proceder a enfriarlo súbitamente en un baño de sales caliente que tenga temperaturas en el rango de 200 y 400 °C. Manteniendo el acero en el baño un tiempo cuidadosamente controlado y suficiente para que adquiera una temperatura uniforme en todo el cuerpo pero extrayéndolo antes de que en el acero se inicie la transformación de la austenita, es decir, antes de que se inicie la formación de bainita. Posteriormente se enfría al aire. Verificándose así la transformación total del acero al mismo tiempo, con lo cual se obtiene martensita dura, la cual es la misma que se puede obtener con el enfriamiento desde la alta temperatura, pero con la excepción de que se evitan las dilataciones que ocurren en los temple ordinarios, en donde se presentan en tiempos diferentes las transformaciones de las distintas zonas de la pieza de acero. Se eliminan además los altos esfuerzos térmicos o de enfriamiento súbito que originan grietas y el alabeo en el acero.

CAPÍTULO 2

TÉCNICA DEL ESTUDIO METALOGRAFÍCO Y DE LA PREPARACIÓN DE PROBETAS DE ACERO PARA SU RESPECTIVO ANÁLISIS.

La microscopía óptica de reflexión constituye la más efectiva manera de examinar la microestructura de los materiales. Esta herramienta utilizada desde el punto de vista de la metalurgia física, provee una poderosa base de raciocinio y diagnóstico.

La técnica consiste en la selección y corte de una muestra representativa, preparación de la superficie de la muestra, ataque químico y observación microscópica. Mediante el corte, desbaste y pulido se obtiene una superficie plana altamente reflectiva, libre de imperfecciones físicas. El revelado de los microconstituyentes se obtiene a través de una disolución cinéticamente selectiva de cada fase presente, modificando así sus condiciones de reflectividad a la luz.

Un estudio metalográfico revela la estructura policristalina de una fase o de una mezcla de fases. Los microconstituyentes pueden ser descritos en términos de número de fases, morfología y configuración de las mismas.

El tipo de microconstituyente y la forma en que éstos se presentan son un reflejo de la historia del material y establecen una relación con sus propiedades mecánicas. El análisis de las superficies permite determinar los tratamientos térmicos experimentados por el material, detectar una posible falla o verificar si presenta deformaciones.

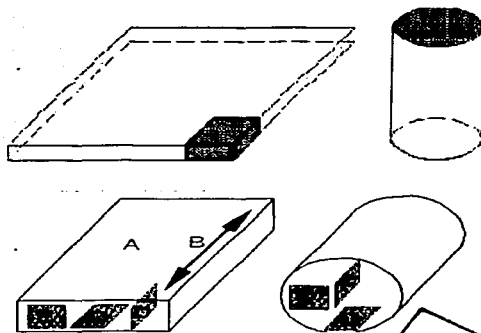
La metalografía estudia, mediante el microscopio, las características de la estructura del metal o aleación. Las técnicas metalográficas se han desarrollado precisamente para identificar las fases presentes en los metales y en sus aleaciones, y para explicar el mecanismo de su formación. Estas fases que constituyen el agregado metálico son, generalmente, de tamaño microscópico y, para su observación y estudio, es preciso preparar debidamente la probeta. Una superficie metálica en la que se van a observar unas fases microscópicas ha de ser plana y estar pulida. Plana, porque la pequeña profundidad de foco de los sistemas ópticos de observación a grandes aumentos no permitiría enfocar la imagen simultáneamente en planos situados a distintos niveles; estar debidamente pulida para que sólo pueda aparecer en ella detalles propios de su estructura, y no circunstancias ajenas a ella que puedan enmascararla.

2.1.- PASOS PARA REALIZAR UN ANÁLISIS METALGRÁFICO.

1) MUESTREO Y CORTE TRANSVERSAL: La elección de la muestra que se va a estudiar al microscopio es una operación delicada y muy importante. Si lo que se trata de estudiar es una falla del material, la muestra debe tomarse de una zona lo más próxima posible al punto en que se ha producido la falla para compararla con otra obtenida en una sección normal. La muestra debe extraerse de forma que sea representativa e identificar de alguna forma la orientación de la fabricación del material, tratando en todo momento de evitar calentamientos fuertes de la probeta. La muestra se toma haciendo cortes con sierras manuales si el material es suave o con un disco cortador abrasivo si el material es muy duro, se debe lubricar continuamente para facilitar el corte y evitar el recalentamiento de la muestra. Siendo el tamaño recomendado de las probetas, aproximadamente, de 20X20X15 mm. La muestra no debe ser muy grande por que se dificulta el proceso de pulido y se recomienda hacer un corte en cada dirección (transversal y longitudinal) especialmente para muestras de acero y aleaciones de cobre y aluminio, para poder determinar por medio del grado de orientación de los granos, si el material ha sufrido algún tratamiento o si esta en estado bruto.

Generalmente se corta uno o varios trozos pequeños del metal que se pretende estudiar. La ubicación de estas muestras y la forma en que se corten afectarán los resultados y su posible interpretación. Como ejemplo podemos citar una varilla de acero estirada en frío, la cual puede cortarse en tal forma que quede expuesta una sección transversal o longitudinal, y ambas secciones variarán notablemente en su aspecto. En el caso del acero y también de algunas otras aleaciones, es necesario evitar el calentamiento de la muestra al hacer el corte. Si el acero se ha enfriado por inmersión en agua, el calor producido al realizar el corte puede ser suficiente para templarlo y alterar el estado de la superficie, que más tarde deberá pulirse y atacarse con ácido. Es conveniente efectuar los cortes utilizando un medio refrigerante o en su defecto hacerlo lentamente, con el fin de que el calor generado sobre la pieza no desemboque en una alteración estructural.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN



A: Superficie de laminación.

B: Dirección de laminación.

C: Sección longitudinal paralela a la superficie de laminación.

D: Sección longitudinal perpendicular a la superficie de laminación.

E: Sección transversal.

F: Sección longitudinal radial.

G: Sección longitudinal transversal.

Figura 2.1.- Extracción e identificación de la orientación de una muestra para su análisis metalográfico.

2) MONTAJE: Para que el manejo de la muestra sea mas sencillo, seguro y además que al pulir no se pierda nada de las fronteras de la pieza, se acostumbra montarlas en resinas epóxicas acrílicas o baquelita, que son materiales de alta dureza y muy buena resistencia mecánica y a la corrosión. Este montaje se puede hacer en frío o en caliente.

Estos materiales plásticos se acoplan a la muestra en una prensa de montar especial, la muestra y la cantidad correcta de polvo de la resina o baquelita o la preforma de baquelita se ponen en el cilindro de la prensa de montar, la temperatura se aumenta gradualmente hasta 150 °C y se aplica una presión de moldeo (aproximadamente 4000 lb/pulg²) simultáneamente. Cuando la muestra esta totalmente adherida y la resina curada se extrae mientras esté caliente.

La lucita es la resina termoplástica mas común; es completamente transparente cuando se moldea en forma adecuada. Esta transparencia resulta útil cuando es necesario observar la sección exacta que se pule o cuando por cualquier razón se desea ver por completo la muestra en la base. Al contrario de los plásticos termofijos, las resinas termoplásticas no sufren cura a la temperatura de moldeo sino que adquieren estabilidad al enfriarse. La muestra y la cantidad de polvo de lucita adecuadas se ponen en la prensa para montar y se someten a la misma temperatura y presión que para la baquelita. Una vez alcanzada esta temperatura se quita la bobina de calentamiento y las aletas de enfriamiento se colocan alrededor del cilindro para enfriar la base hasta 75 °C en unos 7 minutos al tiempo que se mantiene la presión de moldeo. Si se saca la base todavía caliente o si se deja enfriar lentamente en el cilindro de moldeo sin sacarla se opocará.

Las muestras pequeñas pueden montarse en forma conveniente para prepararlas metalográficamente en un dispositivo de sujeción hecho en el laboratorio.

Ahora bien, si la probeta que va a examinarse es lo suficientemente grande para que se pueda sujetar bien con la mano, no será necesario montarla. Sin embargo la mayoría de las veces la probeta es demasiado pequeña para que pueda sostenerse en forma, por ejemplo un tramo de varilla, alambre o lámina, mientras se esmerila o pule, por lo que en este caso será necesario montarla como ya explicamos utilizando para ello baquelita.

Como se puede observar en la figura 2.2, el montaje o empastillado consiste en embutir la probeta en algún producto como la baquelita (resina termoendurecible), lucita (resina termoplástica), etc., de forma que el conjunto sea manejable manualmente o adecuado para insertarlos en los alojamientos de los dispositivos de preparación.

Se realiza la preparación metalográfica manual cuando se trata de muestras pequeñas que son difíciles de manejar o sujetar o, también, cuando se pretende observar la superficie o borde de la probeta (recubrimientos, cementación, etc). Se añade para ello,

además, granalla de acero, como se puede observar en la figura 2.2, con el fin evitar el relieve en la zona próxima a los bordes.

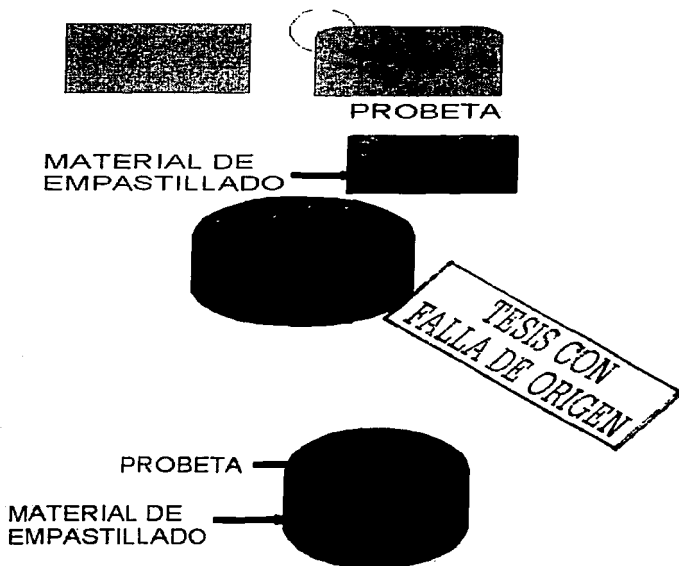


Figura 2.2.-Montaje de la probeta de acero en algún producto como la baquellita, lucita, etc., de forma que el conjunto sea manejable manualmente o adecuado para insertarlos en los alojamientos de los dispositivos de preparación.

Por otra parte, se biselan las aristas mediante desbaste en la lijadora de cinta, para evitar cortes y agarres de la probeta en los papeles y paños de pulido.

3-A) DESBASTE BURDO O TOSCO: La muestra debe ser de un tamaño fácil de manipular, mientras sea posible. Una muestra blanda se puede aplanar si se mueve lentamente hacia arriba y abajo a través de una superficie de una lima plana poco áspera. La muestra dura o blanda puede desbastarse burdamente sobre una lija de banda rotatoria, manteniendo la muestra fría sumergiéndola frecuentemente en agua o aceite, en caso de que el material a estudiar sea muy propenso a oxidarse; durante la operación de esmerilado. En todas las operaciones de desbaste, la muestra debe moverse en sentido perpendicular a las rayaduras existentes. El desbaste continúa hasta que la superficie quede plana y libre de huellas, imperfecciones y todas las rayaduras debidas al corte manual o al disco cortador no sean visibles.

El desbaste grueso se logra mejor en un esmeril húmedo de banco o en una acabadora de superficies de bandas húmedas. El objetivo del desbaste es obtener una superficie plana, libre de toda huella de marca de herramientas, y en las que todas las marcas del desbaste sigan la misma dirección. Se puede desbastar en seco a condición de que se tenga cuidado de no producir cambios estructurales por el sobrecalentamiento de la muestra. Después la muestra se lava y se seca antes de pasar de una etapa de operación de desbaste a la siguiente.

3-B) DESBASTE INTERMEDIO: Después de montada la muestra, ésta se desbasta sobre una serie de hojas de lija con abrasivos mas finos sucesivamente. Por lo general las operaciones de desbaste intermedio con lijas de esmeril se hacen en seco, sin embargo, en casos, como el de preparación de materiales suaves, se puede usar un abrasivo de carburo de silicio, el cual tiene mayor velocidad de remoción y se puede usar con un lubricante, el cual impide el sobrecalentamiento de la muestra, minimiza el daño cuando los metales son blandos y también proporciona una acción de enjuague para limpiar los productos removidos de la superficie de la muestra para que el papel no se ensucie.

Los hierros grises, nodulares y maleables no deben ser sometidos al pulido intermedio, sino pasar directamente al pulido para evitar que se arranque el grafito.

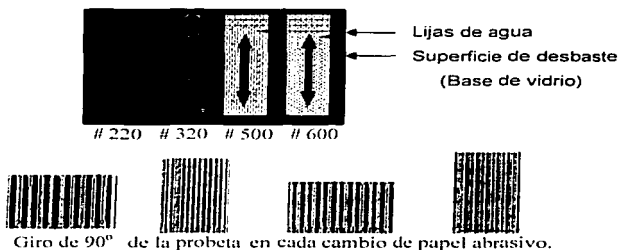


Figura 2.3.-Procedimiento de desbaste continuo mediante hojas abrasivas.

Como se mencionó el desbaste intermedio o mediano se efectúa usando lijas de grano cada vez más fino. La lija se sostiene sobre una superficie plana y dura, que puede ser acero o vidrio, y la muestra se talla sin seguir un movimiento oscilatorio, sobre el papel de lija. Cuando se termina de pulir con un tipo de lija, las marcas deben estar todas en la misma dirección, como se observa en la parte inferior de la figura 2.3. Una vez obtenido un rayado uniforme sobre un determinado papel, se debe girar la probeta 90° para facilitar el control visual del nuevo desbaste. Tal como se muestra en la figura 2.3. Cada fase será completada cuando desaparezcan todas las rayas producidas por el paso del papel abrasivo anterior. Antes de proseguir con la siguiente lija más fina, debemos lavar y secar con cuidado tanto las manos como la muestra. Ahora, debemos desplazar la muestra de tal forma que las rayas hechas por las distintas lijas formen ángulos rectos con las marcas de la inmediatamente anterior. De ésta forma podemos observar con mayor claridad si se han eliminado las rayas más gruesas que se realizaron en la operación anterior.

Mediante el desbaste se consigue poner al descubierto la superficie del material, eliminando todo lo que pudiera obstaculizar su examen, a la vez que se obtiene una superficie plana con pequeña rugosidad.

El desbaste puede hacerse manualmente, o mediante aparatos que se denominan desbastadoras o lijadoras. Suele hacerse en húmedo, para evitar los calentamientos que pueden modificar la estructura de la probeta. El desbaste manual se realiza en cajas de

desbaste donde se colocan ordenados, de izquierda a derecha, de mayor a menor rugosidad, los papeles abrasivos (véase la figura 2.3). Los papeles abrasivos pueden ser de carburo de silicio (SiC) o de corindón. Existen en el comercio papeles de SiC designados por números 60, 120, 180, 220, 320, 500, 1000, 2400, y 4000. Este número se corresponde en modo inverso con el tamaño de partícula del abrasivo, es decir, mayor número menor tamaño de la partícula de abrasivo, y viceversa.

4) PULIDO FINO: La última aproximación a una superficie plana libre de rayaduras se obtiene mediante una rueda giratoria húmeda cubierta con un paño cargado con partículas abrasivas seleccionadas en su tamaño. Existen muchos abrasivos, prefiriéndose el óxido de aluminio gamma para pulir metales ferrosos, los basados en cobre u óxido de cerio para pulir aluminio, magnesio y sus aleaciones. Otros abrasivos son la pasta de diamante, óxido de cromo y óxido de magnesio.

La selección del paño para pulir depende del material que se va a pulir y el propósito del estudio metalográfico.

En nuestro caso como se van a pulir probetas de acero simple al carbono, el pulido fino se basa en el uso de la rueda cubierta con un paño de tela de mesa de billar, cargada con una suspensión de alúmina. Periódicamente se deben aplicar unas gotas de detergente en solución y agua con el fin de mejorar la acción cortante y la limpieza. Al principio, la muestra se sostiene en una posición sobre la rueda, sin hacerla girar, hasta que se haya eliminado la mayoría de las marcas anteriores. Posteriormente se puede girar lentamente en sentido contrario al de la rotación de la rueda hasta que solamente podamos observar las marcas de la alúmina. La rotación de la muestra reduce a un mínimo el peligro de formación de ranuras, por las que se extraen del metal partículas precipitadas.

Se procede a hacer el pulido después de lavar con sumo cuidado tanto las manos como la muestra, a fin de evitar cualquier contaminación de la rueda de pulido. A esta rueda cubierta de tela se le aplica una suspensión de alúmina. La muestra se hace girar con lentitud en sentido contrario al de la rotación de la rueda y se pule hasta que desaparecen las marcas dejadas por la alúmina anterior.

Realizando perfectamente los pasos descritos anteriormente, éste pulido no debe requerir más de dos minutos. Los resultados del pulido pueden mejorarse si la última etapa del pulido se efectúa en una rueda de baja velocidad.

LIMPIEZA

Las probetas deben ser limpiadas después de cada paso. El método más empleado es mantener la probeta bajo un chorro de agua y frotarla con un algodón. La limpieza ultrasónica es más efectiva (10 a 30 s), aunque en ocasiones puede dañar la pieza.

Después de la limpieza se enjuagan con un chorro de alcohol y se secan rápidamente bajo un chorro de aire caliente.

4-A) PULIDO ELECTROLÍTICO: Es una alternativa de mejora al pulido total pudiendo reemplazar al fino pero muy difícilmente al pulido intermedio. Se realiza colocando la muestra sobre el orificio de la superficie de un tanque que contiene la solución electrolítica previamente seleccionada, haciendo las veces de ánodo. Como cátodo se emplea un material inerte como platino, aleación de níquel, cromo, etc. Dentro del tanque hay una aспа que contienen en constante agitación al líquido para que circule permanentemente por la superficie atacándola y puliéndola a la vez.

Es preferible para metales puros y para aleaciones compuestas por soluciones sólidas, como es el caso de la aleación hierro-carbono.

La diferencia de potencial o voltaje se aplica gradualmente en forma creciente, entonces la intensidad de corriente se eleva hasta un punto máximo. Enseguida aunque se continúe aumentando el voltaje, la intensidad de corriente cae hasta alcanzar un valor constante, este periodo en el cual el amperaje es constante representa la zona de pulimiento del metal. Finalmente la intensidad se eleva nuevamente en forma brusca, con lo cual concluye la operación. Deben controlarse el tiempo, el amperaje, el voltaje y la velocidad de rotación del electrodo para obtener un pulido satisfactorio. Muchas veces después de terminado este pulido la muestra queda con el ataque químico deseado para la observación en el microscopio.

El pulido de una probeta metalográfica tiene por objeto eliminar las rayas producidas en la operación de desbaste y obtener una superficie especular. Se pueden emplear diversos tipos de abrasivos: polvo de diamante (10, 1, 0.5 y 0.25 micras), alúmina (5, 1, 0.5, 0.1 y 0.05 micras), óxido de magnesio, etc. En cuanto a los paños de pulido, los hay de tela de billar, nylon, seda, algodón, etc.

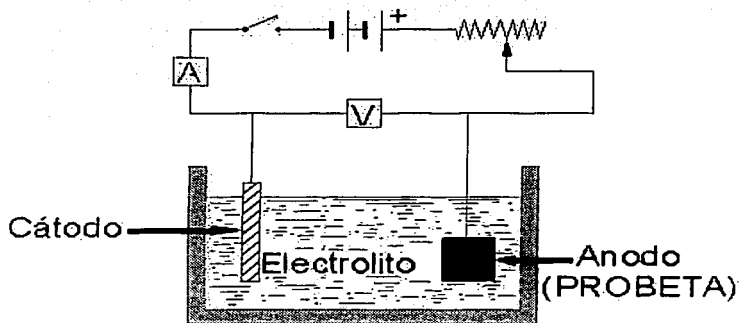


Figura 2.4.- El pulido electroquímico se realiza mediante un proceso de disolución anódica del metal, tal como lo mostramos en la presente figura. Se tienen que fijar las condiciones de tensión y densidad de corriente para conseguir el efecto buscado.

5) ATAQUE: Una superficie pulida revela ya una serie de hechos interesantes, como pueden ser grietas, inclusiones, fases (si su forma y color las hacen diferenciables), poros, etc. Pero, normalmente, la probeta hay que atacarla para "revelar" la microestructura (fases, límites de grano, impurezas, zonas deformadas, etc). El ataque puede realizarse mediante diferentes formas, a saber: óptico, químico, electroquímico y físico.

Ataque óptico: campo claro, campo oscuro, luz polarizada, contraste de fase y contraste por interferencia.

Ataque químico: para la gran mayoría de los materiales metálicos éste el método más empleado. Puede realizarse por **frotamiento** (empleando un algodón impregnado en el reactivo que se pasa sucesivamente por la superficie pulida) o mediante **inmersión** de la muestra en el reactivo. Inmediatamente después del ataque la probeta debe ser lavada con agua y secada con un chorro de alcohol y aire caliente.

Ataque electrolítico: Está basado en los procesos redox. Consiste en colocar la probeta como ánodo sujeta y suspendida por un hilo de platino dentro de una solución electrolítica y conectando el hilo conductor mediante pinzas al polo positivo de una batería. El cátodo empleado es de un elemento inerte como puede ser el platino, cromo o algún otro. Se emplea una intensidad de corriente de 0.01 A por cm^2 y el tiempo necesario es menor a 120 segundos. Los electrolitos preferibles para llevar a cabo tal acción son el nitrato amónico, ácidos muy diluidos o amoníaco para cobres y latones, el tiosulfato sódico para bronces y ácido sulfúrico diluido adicionado con peróxido de hidrógeno para aleaciones de níquel.

Debemos mencionar que éste ataque químico es empleado también como una secuencia del pulido electrolítico. Esto se lleva a cabo sin efectuar el cambio del electrolito y reduciendo el amperaje.

Ataque físico: Con esta denominación se recogen los realizados por bombardeo iónico (argón), ataque térmico y la deposición de capas de interferencia. Mediante el calentamiento a altas temperaturas en una atmósfera de gas inerte o en vacío es posible analizar los límites intergranulares y el tamaño de grano de diversos metales; como por ejemplo calentando una aleación con alta concentración de níquel previamente pulida a una temperatura de 1000 °C dentro de una atmósfera de hidrógeno. Así también calentando un acero en una atmósfera de argón o en vacío hasta la zona de austenitización se manifiestan los límites intergranulares de la austenita.

5-A) ATAQUE QUÍMICO: Mediante este se hacen visibles las características estructurales del metal o aleación y se diferencian claramente las partes de la microestructura.

El reactivo de ataque, cualquiera que sea, actúa por disolución gradual del metal partiendo desde la superficie hasta las capas interiores. La velocidad de disolución varía de acuerdo a las características estructurales del metal o aleación. En metales puros el ataque es lento, atacándose con más rapidez los límites intergranulares que el grano en sí. Revelándose gradualmente el conjunto de cristales poliédricos denominados granos.

En las aleaciones cuando un elemento es electropositivo con respecto a otro se produce una acción electroquímica, dando lugar a una velocidad de disolución mayor en

dicho componente que en el otro, corroyéndose con mayor rapidez el elemento electropositivo. Con esto se realiza un ataque en menor tiempo.

En las aleaciones compuestas de dos o más fases, las componentes se revelan cuando el reactivo ataca a uno o mas de estos constituyentes debido a la diferencia en composición química de las fases. En las aleaciones uniformes se obtiene contraste y las fronteras de grano se hacen visibles debido a las diferencias en la rapidez a que los granos son atacados por el reactivo. La diferencia en la rapidez de ataque depende del ángulo entre las secciones de grano con el plano de la superficie pulida. Las fronteras de grano aparecerán como valles en la superficie pulida. Al chocar con la orilla de estos valles, la luz del microscopio se refleja fuera del microscopio, haciendo que las fronteras de grano aparezcan como líneas oscuras.

Un reactivo común para atacar el acero es el nital, que consiste en 2% de ácido nítrico disuelto en alcohol etílico. El nital se vierte en un recipiente y la muestra, lavada y secada previamente, se frota suavemente con una estopa de algodón impregnada de nital.

Por lo común son suficientes de tres a cinco segundos para que el ataque químico sea adecuado. Inmediatamente después se lava la muestra con agua corriente, se enjuaga con alcohol y se seca mediante un chorro de aire.

Para otros metales y aleaciones se usan diferentes reactivos. También es recomendable técnicas de inmersión, en lugar del frotado para ciertos metales y aleaciones.

CAPÍTULO 3 EXPERIMENTACIÓN

Para abocarse al desarrollo experimental metalográfico fue necesario contar con aceros simples al carbono, para lo cual se investigó en el mercado de aceros lográndose obtener aceros NOM-1006, NOM-1018, NOM-1045, y NOM-10100 en barras redondas de 3/4" (19 mm) y acero NOM-1060 también en barra redonda de 5/8" (16 mm) de diámetro. El acero NOM-1075 no se logró encontrar disponible en barra por lo que se compró en perfil para fleje de 1/16" (1.58 mm) de espesor.

Para llevar a cabo el desarrollo experimental se necesitó el siguiente equipo y material:

- a) Cortadora de metales provista de disco abrasivo y líquido refrigerante.
- b) Pulidora mecánica.
- c) Horno eléctrico (Thermolyne 2000 Furnace SYBRON / Thermolyne)
- d) Microscopio metalográfico.
- e) Durómetro.
- f) Encapsuladora.
- g) Cristalizador.
- h) Alúmina (tamaño de partícula de 1 micra)
- i) Reactivo químico conocido comúnmente como nital: solución de 100ml de C_2H_5OH (alcohol etílico 96° G.L.) y 2 ml de HNO_3 (ácido nítrico)
- j) Alcohol etílico 96° G.L.
- k) Agua potable.
- l) Papel abrasivo o lijas de agua números 220, 320, 400, 500 y 600.
- m) Paño de lana.
- n) Guantes.
- o) Pinzas y demás elementos secundarios.

Todos estos elementos los encontramos disponibles en el laboratorio de tecnología de materiales donde se realizó la presente tesis.

3.1.-CORTE DE LAS MUESTRAS DE ACERO.

Para manipular fácilmente las probetas, las dimensiones recomendadas indican entre 6 y 25 mm de diámetro para secciones redondas y de 6 a 25 mm por lado para secciones cuadradas. Contamos con barras redondas con un diámetro de 19 mm de aceros NOM-1018, NOM-1045 y NOM-10100 y con una barra redonda de acero NOM-1060 con 5/8 (16 mm) de diámetro. Dichas barras de acero se cortaron en longitudes de 30 mm con un disco abrasivo de alta velocidad. Durante el proceso de corte la pieza se baña en forma constante con fluido de corte para disminuir el calor intenso en la zona de corte producido por la acción cortante del disco abrasivo, el cual pudiera alterar la estructura del acero. Las muestras de acero NOM-1075 que procedía de una sección para fleje contaban con un espesor de 1/16" (1.58 mm), éstas se cortaron en secciones cuadradas de 3/4" (19 mm) por lado en forma lenta con una segueta sujetando la placa sobre un tornillo de banco. Se aplicó lubricante a intervalos cortos para evitar el calentamiento de la muestra. Se cortaron cuatro muestras de cada tipo de acero para efectuar en dos de ellas el tratamiento térmico de recocido y en otras dos el normalizado y posteriormente tomar dos de cada una para su respectiva medición de dureza y tomar otras dos para su respectivo análisis en el microscopio metalográfico.

3.2.-APLICACIÓN DE LOS TRATAMIENTOS TÉRMICOS DE RECOCIDO Y NORMALIZADO.

Habiendo cortado todas las muestras de acero se sometieron a los tratamientos térmicos de recocido y de normalizado. Las temperaturas utilizadas para los tratamientos térmicos y que se aplicaron a las distintas muestras de acero se indican en la tabla 3.1. Se efectuó el tratamiento térmico de recocido en dos probetas de cada tipo de acero, dos de acero NOM-1006, dos de acero NOM-1018, dos de acero NOM-1045, dos de acero NOM-1060, dos de acero NOM-1075 y dos de acero NOM-10100. Así también se efectuó el tratamiento térmico de normalizado en otras dos probetas de cada tipo de acero. En cada caso, una se utilizó para la microscopía óptica y otra para efectuar la medición de dureza. Como son seis probetas de aceros con diferente concentración de carbono, se utilizaron en total 24 probetas.

Para realizar los tratamientos térmicos de recocido y normalizado se comenzó con las probetas de acero NOM-10100, NOM-1075 y NOM-1060. De acuerdo a su contenido de

carbono, analizando el diagrama hierro-carbono y recordando que en los aceros hipoeutectoides es suficiente calentarlos aproximadamente unos 30 a 50 °C por arriba de la temperatura crítica superior (línea A_3) del diagrama hierro-carbono para producir 100% austenita y que en los aceros hipereutectoides es suficiente calentarlos de 30 a 50 °C por arriba de su temperatura crítica inferior; se estimó la temperatura de 820 °C y un tiempo de permanencia a dicha temperatura de 40 minutos. El tiempo se estimó en base a la regla que dicta: *60 minutos por cada 25 mm de espesor de la pieza*. Los pasos que se siguieron se describen a continuación:

a) Primeramente se introdujeron en el horno eléctrico cuatro probetas de acero NOM-10100, cuatro de acero NOM-1075 y cuatro de acero NOM-1060 teniendo cuidado de dejar un espacio suficiente entre las probetas para poder sustraer las probetas que se iban a normalizar. Se cerró el horno, se encendió y se reguló la perilla a 820 °C.

b) A los 35 minutos de haber encendido el horno, la luz indicadora mostró que el horno había alcanzado la temperatura elegida. A partir de ese momento se cuantificaron 40 minutos.

c) Un vez alcanzado el intervalo de tiempo de los 40 minutos. Se abrió el horno y con mucho cuidado, con guantes y pinzas se procedió a sustraer dos probetas de cada tipo de acero previamente colocadas para tal acción, dos de acero NOM-10100, dos de acero NOM-1075 y dos de acero NOM-1060. Haciendo esto de forma rápida para evitar el enfriamiento interno del horno. Enseguida se cerró y apagó el horno. Las probetas sustraídas se colocaron sobre la mesa y se dejaron enfriar al aire libre a temperatura ambiente para que se efectuara el normalizado.

d) Las seis probetas restantes, dos de cada clase de acero, dos de acero NOM-10100, dos de acero NOM-1075 y otra dos de acero NOM-1060 se dejaron enfriar en el interior del horno con la puerta cerrada para que se efectuara un recocido total en ellas.

El mismo procedimiento se llevó a cabo con cuatro probetas de acero NOM-1045, cuatro de acero NOM-1018 y cuatro de acero NOM-1006, pero con la excepción de que de acuerdo a su concentración de carbono y atendiendo al diagrama hierro-carbono, se eligió

una temperatura superior siendo ésta de 900 °C, igualmente durante un tiempo de permanencia a ésta temperatura de 40 minutos.

Tabla 3.1.Tratamientos térmicos efectuados en las diferentes probetas de acero.

Acero	Tratamiento Térmico	Temperatura °C	Tiempo (minutos)	Tratamiento Térmico	Temperatura °C	Tiempo (minutos)
NOM-1006	Recocido	900	40	Normalizado	900	40
NOM-1018	Recocido	900	40	Normalizado	900	40
NOM-1045	Recocido	900	40	Normalizado	900	40
NOM-1060	Recocido	820	40	Normalizado	820	40
NOM-1075	Recocido	820	40	Normalizado	820	40
NOM-10100	Recocido	820	40	Normalizado	820	40

3.3.-MONTAJE DE LAS MUESTRAS DE ACERO NOM- 1075 EN RESINA TERMOFIJA.

Dadas las dimensiones de las muestras de acero NOM-1075, para evitar problemas de manipulación en las operaciones siguientes, se encapsularon en baquelita, la cual es una resina termofija sintética que cuando endurece forma una masa dura y compacta la cual puede ser pulida y atacada sin problema alguno, además de que mantiene el contacto siempre en todo momento con la muestra. Este montaje se llevó a cabo una vez realizados los tratamientos térmicos de recocido y normalizado que se realizaron previamente en las muestras de acero.

El montaje se llevó a cabo en una prensa especial marca Buchler tal y como se describe a continuación:

- a) Primero se tomó la muestra de acero NOM-1075 y se colocó en el interior del cilindro de la prensa de montaje. Enseguida se colocó una cantidad adecuada de baquelita en polvo, vertiéndola sobre la muestra, para cada muestra se agregaron cinco cucharadas de baquelita en polvo. Se colocó el calefactor alrededor del cilindro.
- b) A continuación se tapó el cilindro y se aplicó una presión de 5000 Lb/Plg.² al conjunto de la muestra y baquelita, manteniendo ésta presión en forma constante.
- c) Manteniendo la presión, se encendió la bobina de calentamiento y se esperó un intervalo de tiempo hasta que la baquelita se fundiera, aproximadamente un lapso de 10 minutos. La bobina de calentamiento posee un foco rojo que nos indica el fin de la fusión de la baquelita. La temperatura alcanzada es aproximadamente de 150 °C. Al alcanzarse la fusión de la baquelita, se vuelve a aplicar una presión de 5000 Lb/Plg.², manteniendo dicha presión de moldeo.
- d) Enseguida se apagó y se retiró el calefactor del cilindro y se procedió a colocar los disipadores de calor alrededor del cilindro, uno sobre otro invirtiéndolos de posición en forma alternada cada 4 o 5 minutos, con el fin de propiciar un enfriamiento más rápido. El tiempo de espera fue de aproximadamente 10 minutos.
- e) Una vez enfriada, adherida y solidificada la baquelita, se retiró la presión aplicada y también los disipadores de calor. Finalmente se procedió a extraer del dado de moldeo la pequeña placa de acero montada en la baquelita ya solidificada.

Las muestras quedaron montadas en una superficie redonda de baquelita sólida de ½" (13 mm) de espesor por 1 ¼" (32 mm) de diámetro. Se montaron 4 muestras de acero NOM-1075.

3.4.- DESBASTE.

Una vez cortadas y montadas las muestras de acero requeridas, se procedió a desbastar todas y cada una de ellas empleando papeles abrasivos o lijas de agua del número 220, 320, 400, 500 y 600 utilizándolas en forma sucesiva desde el número menor

hasta acabar con la lija de número mayor. Cada aumento de número en la lija, indica una constitución de grano mucho más fino que el anterior.

Se cortaron longitudinalmente las hojas abrasivas con un ancho de 40 mm con el fin de abarcar toda el área de la superficie de las probetas.

El desbaste se llevó a cabo sobre una superficie plana de vidrio con dimensiones de 100 mm de largo X 30 mm de ancho y 6 mm de espesor.

El procedimiento que se describe a continuación fue el mismo para todas las probetas.

- a) Se colocó la lija del número 220 sobre la superficie plana de vidrio y se agregó agua sobre ésta. Se tomó la probeta de acero con la cara a examinar, hacia abajo sobre la lija. Imprimiendo a continuación un movimiento firme hacia delante y hacia atrás manteniendo la probeta en una sola dirección hasta que se formó sobre la cara que se desbastaba un conjunto de rayas paralelas, uniformes y orientadas en una sola dirección sobre una superficie plana. La presión de trabajo fue tal que no se permitió el calentamiento de la probeta, además de que durante el pulido se agregó agua a intervalos cortos de tiempo sobre la superficie de trabajo para evitar calentamientos y mantener limpia la superficie.
- b) Una vez que se tuvo en la probeta una superficie plana con un sistema de rayas paralelas y en una sola dirección, se procedió a lavar la probeta y la superficie de vidrio con abundante agua, así como también las manos con el fin de eliminar las partículas de la lija empleada anteriormente.
- c) Se procedió entonces a colocar sobre la superficie de trabajo la lija del número 320. Se giró la probeta 90° y se continuó puliendo de tal forma que se formara un nuevo sistema de rayas sobre la superficie de la cara desbastada, pero ahora encontrándose en forma perpendicular, es decir formando un ángulo recto en relación con las rayas del sistema primario. Se continuó desbastando hasta hacer desaparecer el sistema de rayas primarias quedando en su lugar un nuevo sistema de rayas paralelas, pero ahora más finas que las anteriores. Durante esta etapa también se agregó agua a intervalos cortos sobre la superficie de desbaste.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

- d) Después de tener el segundo sistema de rayas paralelas orientadas en una sola dirección correspondiente al desbaste ejecutado con la lija de número 320, se volvió a lavar la probeta, superficie de trabajo y las manos con abundante agua. Repitiéndose enseguida la operación indicada en el inciso (c) pero girando previamente la probeta otros 90° con respecto de la posición anterior y utilizando la lija del número siguiente, en este caso la del número 400. Al finalizar el nuevo desbaste, nos quedó un nuevo sistema de rayas paralelas orientadas en una sola dirección pero ahora más finas.
- e) Se continuaron ejecutando las operaciones indicadas en los incisos (b) y (c) con las lijas restantes, números 500 y 600. Girando 90° la probeta en cada cambio de lija.

Se tuvo cuidado de no cambiar de lija hasta que todas las rayas del nuevo sistema hicieron desaparecer por completo el sistema de rayas anterior y hasta que las nuevas rayas cada vez más finas conforme se avanzaba hacia un número de grano más fino, estuvieron en una sola dirección y sobre una superficie plana. Cabe hacer notar que conforme se avanzó hacia una lija de grano cada vez más fino el tiempo de desbaste aumentó gradualmente.

3.5.- PULIDO.

Una vez ejecutada la operación de desbaste, las probetas estuvieron listas para el acabado final. El pulido se ejecutó en una pulidora mecánica provista con un disco giratorio de alta velocidad localizada en el laboratorio de tecnología de materiales. La presión ejercida fue ligeramente menor que la aplicada en el desbaste de tal forma que se hicieran desaparecer las rayas del último papel abrasivo. Además de que la probeta se desplazó en la dirección del radio desde el borde hasta el centro del disco. A continuación se mencionan los pasos efectuados para tal efecto.

- a) Para ejecutar el pulido se colocó un paño de lana sobre el disco giratorio. El paño se estiró sobre la superficie del disco y se sujetó con un aro metálico que acopla perfectamente sobre la circunferencia del disco.

- b) Después se empapó con agua toda la superficie del paño colocada sobre el disco y enseguida se impregnó con una solución acuosa de alúmina con un tamaño de partícula de $1\ \mu\text{m}$ (1 micra)
- c) Se encendió el motor, el disco comenzó a girar y entonces se apoyó la probeta suavemente sobre el disco para ejecutar el pulido, moviendo constantemente la probeta desde el borde del disco hacia el centro del mismo. Debemos mencionar que por la inercia del movimiento del disco la probeta tiende a moverse en círculo en dirección opuesta al giro del disco. De ésta manera se logró un pulido de la probeta en todas direcciones y así se evitaron arrastres entre fases microestructurales de distinta dureza las cuales pudieran desvirtuar la superficie de la microestructura.
- d) La probeta se mantuvo puliendo sobre la superficie del disco moviéndola y alimentando constantemente la superficie con un poco de agua, la suficiente para mantener el paño húmedo. Durante el procedimiento se checó continuamente la apariencia de la superficie de la probeta con el microscopio metalográfico para observar los detalles y avances de la operación.
- e) De esta forma se eliminaron por completo en la cara de las probetas las rayas del último papel abrasivo empleado en la operación de desbaste que fue el número 600, obteniendo al final un pulido uniforme y con un acabado espejo sobre la superficie.

Una vez obtenido un acabado espejo en la cara pulida de la probeta, esta se lavó bajo un chorro de agua, enjuagándose enseguida con alcohol y secándose con una corriente de aire. A continuación se observó al microscopio con pocos aumentos para inspeccionar la operación de pulido y constatar que la superficie estaba libre de rayas o marcas y decidir si se encontraba lista para el posterior ataque químico.

3.6.-ATAQUE QUÍMICO.

El reactivo de ataque para revelar la microestructura de las probetas previamente pulidas fue una solución de ácido nítrico en alcohol etílico comúnmente conocida como nital. La solución que se utilizó estaba disponible en el laboratorio, preparada con 100 ml de $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$ (alcohol etílico 96°) y 2 ml de HNO_3 (ácido nítrico)

El procedimiento de ataque en las probetas de acero NOM-1006, NOM-1018, NOM-1045, NOM-1060 y NOM-10100 se realizó por inmersión de cada probeta dentro del reactivo contenido en el cristalizador, moviendo constantemente la probeta de un lado a otro. El tiempo que se mantuvo inmersa cada probeta debió controlarse para evitar un sobreataque o un ataque deficiente. Siendo distinto para cada tipo de acero

Debemos mencionar que la metalografía es una sinergis de arte y ciencia, por lo que no existe documentación alguna sobre tiempos exactos de ataque, los cuales fueron determinados en base a la experiencia del asesor de la presente tesis, siguiendo la regla siguiente para poder obtener una correcta superficie de observación: *"El tiempo de ataque de la probeta dentro del reactivo decrece conforme aumenta el contenido de carbono"*.

Durante la operación de ataque químico hubo determinadas probetas como por ejemplo las NOM-1060 y NOM-1045 recocidas en las que existió un ataque deficiente ya que al ser observadas al microscopio se apreciaban algunas zonas borrosas en donde no se distinguían las fases presentes o en su defecto también hubo un sobreataque en cuyo caso las zonas a observar se apreciaban en cierta forma quemadas y con una apariencia oscura, por lo que no era posible apreciar las fases presentes. Entonces hubo necesidad de ejecutar un repulido y posteriormente volver a atacarlas químicamente durante un tiempo adecuado ya sea mayor o menor que el tiempo dado anteriormente.

En la tabla 3.2 se muestran los tipos de acero de las probetas y sus respectivos tiempos de ataque químico en segundos llevado a cabo en cada una de ellas para una correcta disposición de la microestructura al ser observadas al microscopio.

Las probetas de acero NOM-1075 se atacaron mediante frotación con un algodón impregnado con nital.

Después del ataque químico inmediatamente se bañó la probeta bajo un chorro de agua, seguido de un baño de alcohol etílico y a continuación se secó con una corriente de aire; finalizando el secado frotando la cara de la probeta atacada, con un algodón seco.

Tabla 3.2. Tipos de acero y respectivos tiempos de ataque químico.

Probeta de acero tipo	Tiempo de ataque con nital (segundos)
NOM-1006	10
NOM-1018	10
NOM-1045	5
NOM-1060	6
NOM-1075	18
NOM-10100	5

3.7.-MICROSCOPIA ÓPTICA.

Una vez estando la probeta totalmente seca, se colocó en la platina del microscopio metalográfico y se procedió a observar e identificar cada una de las estructuras características de las diferentes fases existentes en las caras atacadas de las probetas de los diferentes aceros que se tenían, de acuerdo a su composición química con una resolución de 600 aumentos. Las características que se pudieron apreciar en las probetas se mencionan a continuación en el capítulo cuatro.

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**

CAPÍTULO 4 RESULTADOS

4.1.- FOTOMICROGRAFÍAS.

A continuación mostramos las fotomicrografías tomadas a las probetas de los distintos aceros analizados, las cuales fueron tomadas con un aumento de 600X. Se indica el tipo de acero así como el respectivo tratamiento térmico a que fue sometido.

Probetas de acero NOM-1006: Como se puede apreciar en las fotomicrografías presentadas en las figuras 4.1 y 4.2, tanto en la probeta de acero recocido como en la de acero normalizado, se puede apreciar una pequeña cantidad del microconstituyente denominado perlita, presentándose como colonias de perlita en un porcentaje aproximado de 6% sobre una matriz conformada por cristales de la fase ferrita. El microconstituyente perlítico se observa en el microscopio y en la fotomicrografía de un color oscuro o negro y la fase ferrita en forma de granos en un color blanco o claro.

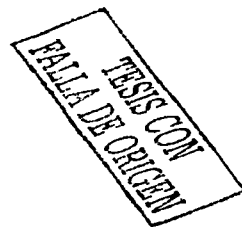
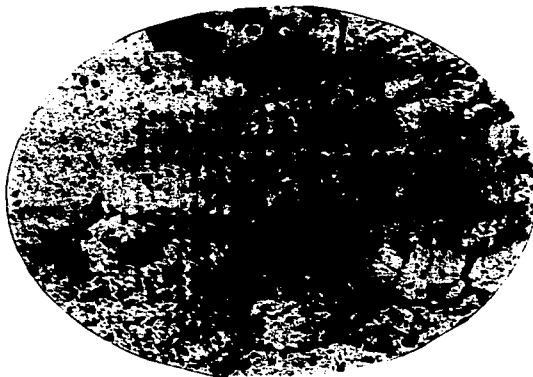


Figura 4.1.- Fotomicrografía del acero NOM-1006, recocido a 900 °C. 600X.

Se aprecia sobre la fotomicrografía una tonalidad amarillenta la cual es debida a la luz proveniente del foco incandescente del microscopio metalográfico. Además se pueden observar claramente los límites de grano en ambos casos tanto en el acero recocido como en el acero normalizado, siendo más notables en la fotomicrografía del acero normalizado ya que como se explicó anteriormente una de las finalidades de este tratamiento térmico es el refinamiento de grano.

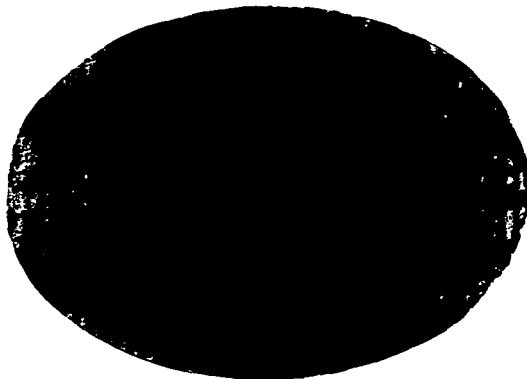


Figura 4.2.- Fotomicrografía del acero NOM-1006, normalizado a 900 °C. 600X.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Probetas de acero NOM-1018: Aquí se nota un aumento en el contenido de perlita tanto en el acero recocido como en el normalizado. De acuerdo a las fotomicrografías presentadas en las figuras 4.3 y 4.4, se observa también que el límite intergranular es más apreciable en el acero sometido al tratamiento térmico de normalizado que en el acero sometido al tratamiento térmico de recocido. Aparentemente se observa una mayor cantidad de perlita sobre una matriz de ferrita en las fotomicrografías del acero recocido que en el acero normalizado, mostradas en las figuras 4.3 y 4.4; pero esto es debido al área en que fue tomada la fotomicrografía. Nuevamente la fase ferrita se aprecia en una coloración blanca y la perlita perlita en una tonalidad oscura, con una concentración de aproximadamente 18% de colonias de perlita

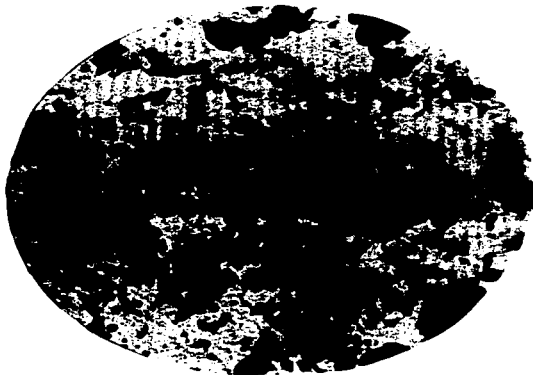


Figura 4.3.- Fotomicrografía del acero NOM-1018, recocido a 900 °C. 600X.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

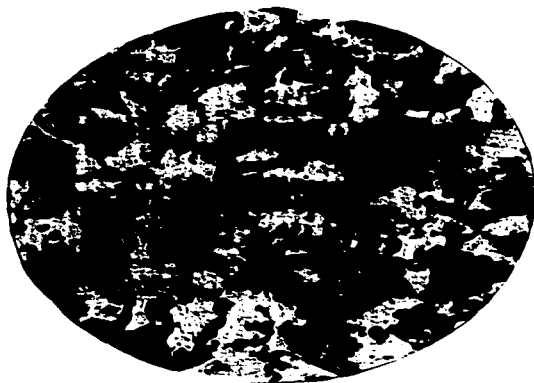


Figura 4.4.- Fotomicrografía del acero NOM-1018, normalizado a 900 °C. 600X.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Probeta de acero NOM-1045 : La microestructura de éste acero como se puede apreciar en las fotomicrografías presentadas en las figuras 4.5 y 4.6, consiste aproximadamente en un 50 % de granos de ferrita y un 50 % de colonias de perlita. Igualmente la perlita aparece en una tonalidad oscura y la fase ferrita en una tonalidad clara.

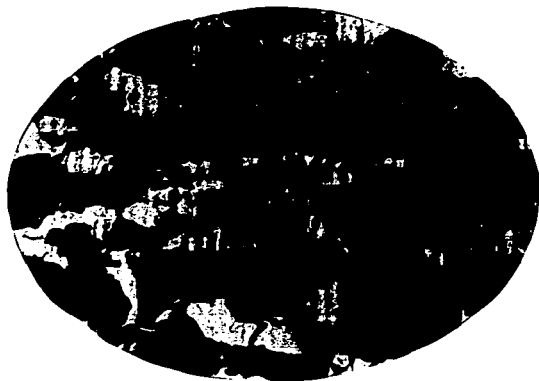


Figura 4.5.- Fotomicrografía del acero NOM-1045, recocido a 900 °C. 600 X.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

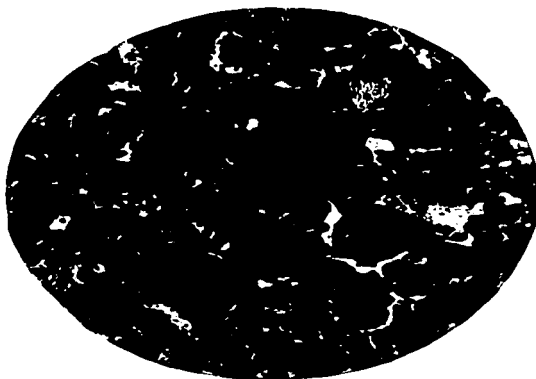


Figura 4.6.- Fotomicrografía del acero NOM-1045, normalizado a 900 °C. 600X.

Probetas de acero NOM-1060 : En éste acero se observa un considerable aumento del microconstituyente perlítico. Tal como puede apreciarse en las fotomicrografías de las figuras 4.7 y 4.8, es más apreciable la alternación de la capas de ferrita y cementita que componen a la perlita en el acero recocido que en el acero normalizado debido a que en éste acero el ataque químico no fue tan efectivo. En ambos aceros el contenido de perlita es aproximadamente de un 60 % y un 40% de la fase ferrita la cual nuevamente se vuelve a presentar en una coloración clara y la perlita se presenta en una coloración oscura.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

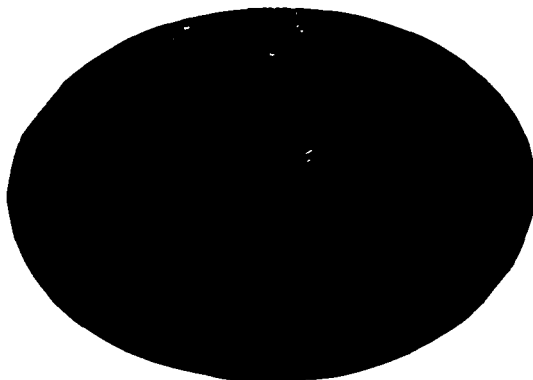


Figura 4.7.- Fotomicrografía del acero NOM-1060, recocido a 820 °C. 600X.

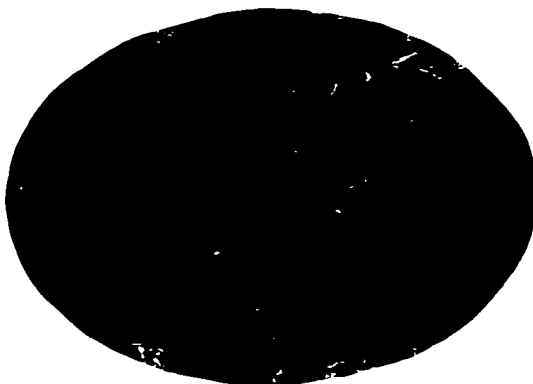


Figura 4.8.- Fotomicrografía del acero NOM-1060, normalizado a 820 °C. 600X.

Probetas de acero NOM-1075: Como se puede apreciar en la fotomicrografía de la figura 4.9, aquí aumenta mucho mas el contenido del microconstituyente denominado perlita, apareciendo de igual forma en una tonalidad oscura. En la probeta de acero NOM-1075 recocido la perlita abarca aproximadamente un 70-80 % del área y la ferrita, que se presenta en una tonalidad blanca abarca aproximadamente un 30 %. En la fotomicrografía del acero NOM-1075 normalizado mostrada en la figura 4.10 no se aprecia claramente la perlita ya que los carburos perliticos se globalizaron o esferoidizaron y solamente se puede apreciar carburo de hierro sobre una matriz de fase ferrita.

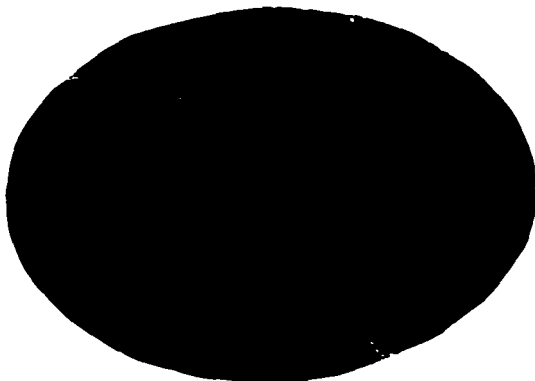


Figura 4.9.- Fotomicrografía del acero NOM-1075, recocido a 820 °C. 600X.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

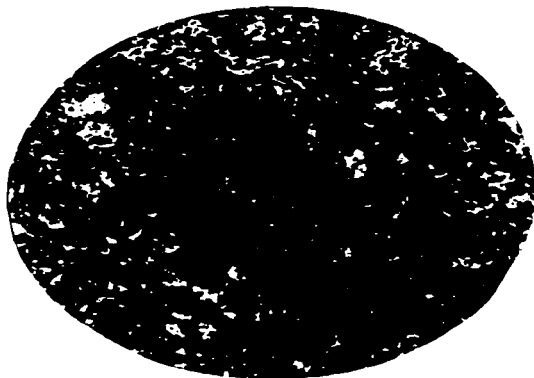


Figura 4.10.- Fotomicrografía del acero NOM-1075, normalizado a 820 °C. 600X.

Probetas de acero NOM-10100 : Este es un acero hipereutectoide, por lo que al ser observada al microscopio debió presentar colonias de perlita rodeadas por una matriz de carburo de hierro, aproximadamente un 4% de cementita y el resto de perlita, por la coloración que tomaría la probeta debido al ataque químico efectuado con nital al 2% se debió apreciar una retícula blanca de carburo de hierro como matriz, la cual rodearía granos de una tonalidad oscura los cuales serían la perlita.

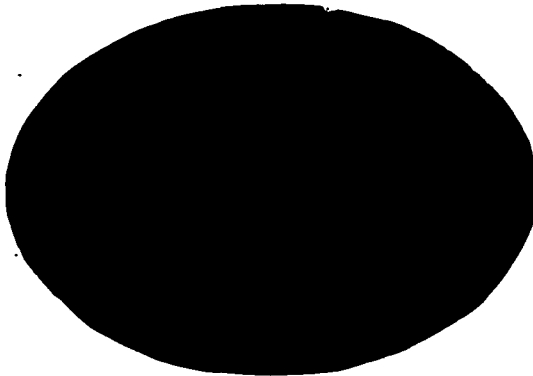


Figura 4.11.- Fotomicrografía del acero NOM-10100, recocido a 820 °C. 600X.

Pero en este caso en las probetas de acero NOM-10100 sometidas al tratamiento térmico de recocido y normalizado, el carburo de hierro se globulizó y por lo tanto en las fotomicrografías presentadas en las figuras 4.11 y 4.12 se observan glóbulos de carburo de hierro sobre un fondo o matriz de ferrita. Esto es debido a que tomando en cuenta la composición química del acero NOM-10100 la cual indica un contenido de vanadio de 0,20% y como sabemos, el vanadio tiene una tendencia muy fuerte a formar carburos, lo cual posiblemente provocó en la aleación la globulización del carburo, es por ello las fotomicrografías presentadas en las figuras 4.11 y 4.12.

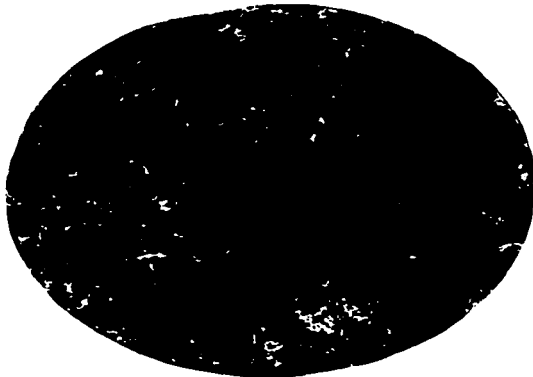


Figura 4.12.- Fotomicrografía del acero NOM-10100, normalizado a 820 °C. 600X.

4.2.- MEDICIÓN DE DUREZA.

Una vez analizadas las características microestructurales de las probetas de acero en el microscopio metalográfico y poder distinguir los microconstituyentes y fases de que estaban conformadas y el porcentaje de cada una, todo a una temperatura ambiente de aproximadamente 20 °C y una presión de una atmósfera, se procedió a efectuar las mediciones de dureza en cada una de las probetas.

La prueba de dureza se efectuó en la escala Rockwell-B utilizando para ello un penetrador de bola de 1/16 plg. Se realizaron cinco mediciones para cada probeta con la finalidad de asegurar un valor confiable y las cuales se resumen en la tabla 4.1.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Tabla 4.1.-Lecturas y promedio de la dureza en las mediciones efectuadas a las probetas de acero.(R = Recocido, N = Normalizado)

Probeta de Acero	Lectura No 1	Lectura No 2	Lectura No 3	Lectura No 4	Lectura No 5	Dureza Promedio
NOM-1006 R	33.00	36.00	36.00	35.00	38.00	35.60
NOM-1006 N	50.00	52.00	50.00	51.00	53.00	51.20
NOM-1018 R	73.00	71.00	72.00	73.00	71.00	72.00
NOM-1018 N	77.00	77.00	77.50	79.00	78.00	72.70
NOM-1045 R	88.50	89.00	91.00	88.00	89.00	89.10
NOM-1045 N	95.00	95.00	95.00	95.50	95.50	95.20
NOM-1060 R	89.50	94.00	90.50	93.00	90.00	91.40
NOM-1060 N	98.00	99.00	100.50	100.50	101.00	99.80
NOM-1075 R	80.00	81.00	82.00	83.00	81.00	81.40
NOM-1075 N	102.00	99.00	102.50	101.50	104.00	101.80
NOM-10100 R	85.00	87.00	87.50	85.00	88.00	86.50
NOM-10100 N	89.50	91.50	90.00	91.00	91.00	90.60

Ahora se muestra en la tabla 4.2 y 4.3 el promedio de las mediciones de dureza en la escala Rockwell-B y el respectivo tratamiento térmico a que fue sometida cada probeta de acero con el fin de visualizar mejor la relación de dureza, porcentaje de carbono y tratamiento térmico sufrido por cada tipo de acero.

Tabla 4.2.-Dureza promedio de las probetas de acero acorde a su concentración de carbono y tratamiento térmico aplicado.

Probeta de Acero	Tratamiento Térmico Aplicado	Dureza Rockwell-B Promedio
NOM-1006	Recocido	35.60
NOM-1018	Recocido	72.00
NOM-1045	Recocido	89.10
NOM-1060	Recocido	91.40
NOM-1075	Recocido	81.40
NOM-10100	Recocido	86.50

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**

Tabla 4.3.-Dureza promedio de las probetas de acero acorde a su concentración de carbono y tratamiento térmico aplicado.

Probeta de Acero	Tratamiento Térmico Aplicado	Dureza Rockwell-B Promedio
NOM-1006	Normalizado	51.20
NOM-1018	Normalizado	77.70
NOM-1045	Normalizado	95.20
NOM-1060	Normalizado	99.80
NOM-1075	Normalizado	101.80
NOM-10100	Normalizado	90.60

Enseguida, en las figuras 4.13 y 4.14 de las siguientes páginas, se muestran las gráficas generadas por el contenido porcentual de carbono contra la respectiva dureza, tanto para el acero normalizado como para el acero recocido

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**

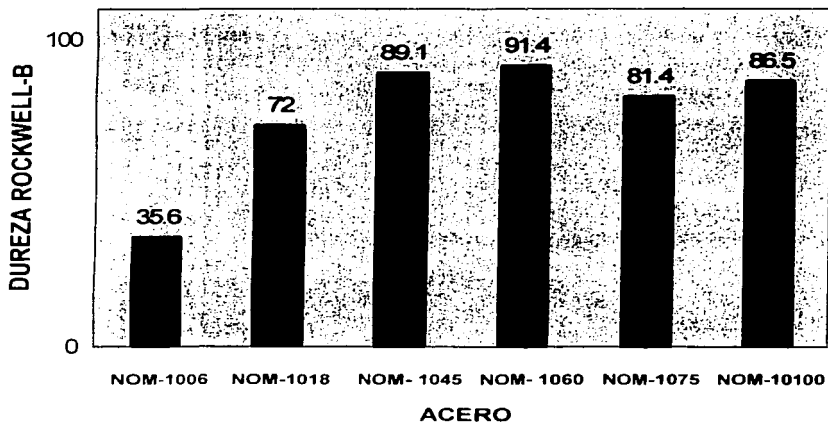


Figura 4.13.-Gráfica de la dureza promedio de las probetas de acero sometidas al tratamiento térmico de recocido.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

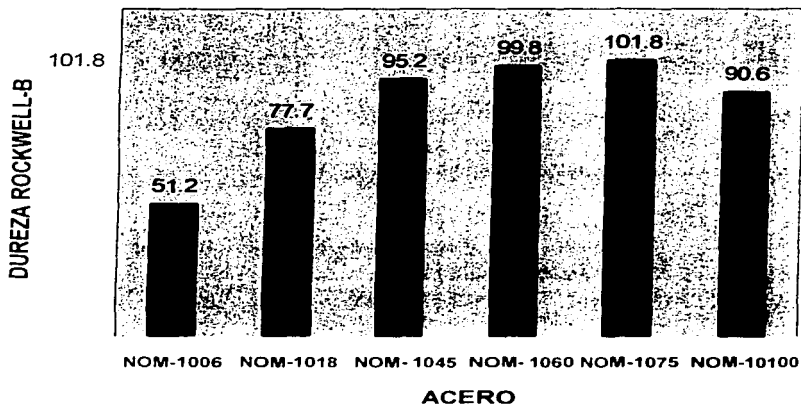


Figura 4.14.- Gráfica de la dureza promedio de las probetas de acero sometidas al tratamiento térmico de normalizado.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

CONCLUSIONES

En base al desarrollo experimental realizado (metalografía y medición de dureza) se puede concluir lo siguiente:

- a) Para lograr el correcto revelado de los microconstituyentes y fases presentes en los aceros simples al carbono después de un ataque químico, es imperativo un correcto tiempo de ataque sobre las probetas. El tiempo de ataque químico con nital al 2% requerido para una adecuada conformación microestructural y lograr una correcta apreciación visual disminuye en forma gradual conforme aumenta el contenido porcentual de carbono, es decir, debemos seguir la regla siguiente: *"a mayor contenido de carbono es recomendable un menor tiempo de ataque químico"*. El tiempo calculado es cuestión de práctica por lo que no existen tiempos exactos documentados para realizar una efectiva revelación microestructural, es por ello que podemos decir que la metalografía es una sinergia de arte y ciencia.
- b) En los aceros simples al carbono, a temperatura ambiente y a una presión atmosférica existen solamente dos fases presentes siendo éstas la ferrita y la cementita o carburo de hierro. Encontrándose un microconstituyente denominado perlita agrupado en colonias orientadas en diferentes direcciones, ya sea rodeado por una matriz de ferrita en los aceros hipoeutectoides o por una matriz de carburo de hierro en los aceros hipereutectoides.
- c) Ejerce gran influencia el contenido de carbono en los aceros, ya que éste elemento determina qué porcentaje de perlita existe en determinado acero, por lo que el microconstituyente perlítico aumenta gradualmente y en forma proporcional en base al aumento de la concentración de carbono en el acero.
- d) En aceros hipoeutectoides, la ferrita disminuye gradualmente en base al aumento del contenido de carbono en el acero.
- e) En los aceros hipereutectoides, la fase cementita aumenta gradualmente conforme aumenta la concentración de carbono, disminuyendo así el porcentaje y tamaño de las colonias de perlita en éstos aceros.

f) El contenido de carbono en los aceros simples al carbono determina el porcentaje de perlita presente en los aceros a temperatura ambiente y por consecuencia la dureza de los mismos.

g) En los aceros NOM-1075 y NOM-10100 la cementita se globulizó tanto en los aceros sobre los que se aplicó el tratamiento térmico de recocido como en los que fueron sometidos al tratamiento térmico de normalizado, lo que conduce a una reducción en la dureza de éstos aceros.

BIBLIOGRAFÍA

- 1) Ciencia e ingeniería de los materiales. Donald R. Askeland. Internacional Thomson Editores. México, 2001.
- 2) Procesos de manufactura versión S.I. B.H. Amstead, Ph. F. Ostwald, M.L. Begeman. Ed. CECSA. México, 1996.
- 3) Metalografía tomo I. A.P. Guliáev. Ed. MIR Moscú. URSS, 1983.
- 4) Metalografía y tratamientos térmicos de los metales. Yu M. Lajtin. Ed. MIR. URSS, 1983
- 5) Ingeniería metalúrgica tomo 1. Raymond A. Higgins. Ed.CECSA. México. 1980.
- 6) Endurecimiento, revenido y tratamientos térmicos. Tubal Cain. Ed. G. Gill S.A de C.V. España, 1995.
- 7) Tratamientos térmicos de los aceros, Manual del ingeniero Vol. XII. Hans Studeman. Urmo S.A. Ediciones. España, 1982.
- 8) Manual del ingeniero mecánico Tomo I. Donald R. Kibbey, Harry D. Moore Ed Orientación S.A de C.V. México, 1990.
- 9) Tratamiento térmico de los metales. Pere Moléra Solá. Marcombo Boixareu Editores. España, 1994.
- 10) Tecnología mecánica procesos y materiales. R. L. Timings. Ed. Alfaomega España, 1994.
- 11) Materiales de ingeniería y sus aplicaciones. Richard A. Flinn, Paul K. Trojan. Mc. Graw Hill. México, 1982.
- 12) Ciencia de materiales para ingeniería. James F. Shackelford. Prentice Hall Hispanoamericana S.A. México, 1995.

13) **Materiales para ingeniería.** Lawrence H. Van Vlack. **Compañía Editorial Continental S.A. de C.V México, 1999.**

14) **Metallography Priciples and Practice.** George F. Vander Voort. **Mc Graw Hill Bort Company. U.S.A. 1984.**

APÉNDICE A

Composición química de los aceros empleados.

ACERO	% C	% Si	% Mn	% V	% P	% S
NOM-1006	0.06-0.08	00.25	0.25-0.40		0.040	0.050
NOM-1018	0.18	0.25	0.75		0.040	0.050
NOM-1045	0.45	0.25	0.75		0.040	0.050
NOM-1060	0.60	0.25	0.75		0.040	0.050
NOM-1075	0.75	00.25	0.65		0.040	0.050
NOM-10100	1.00	0.25	0.25	0.20	0.040	0.050