



UNIVERSIDAD NACIONAL  
AUTONOMA DE MEXICO

Facultad de Estudios Superiores  
"Cuautitlán"



**"LOS ACEROS EN LA INGENIERIA  
QUIMICA"**

**TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN**

**T E S I S**

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:

**INGENIERA QUIMICA**

**P R E S E N T A :**

**MARIA ELENA AGUILA MEZA**

**DIRECTOR DE TESIS: I.Q.M. RAFAEL SAMPERE MORALES**



Universidad Nacional  
Autónoma de México



## **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 está 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.

## I N D I C E

CAPITULO	PAGINA
I	Introducción.....1
II	Breve Historia de los aceros.....4
III	El diagrama de Hierro-Carburo de Hierro.....9
III.1	Estructuras presentes en los aceros.....12
III.2	Clasificación de los aceros de acuerdo a Norma.....16
IV	Clasificación de los aceros en función de su fabricación y contenido de carbono
IV.1	Por el proceso de fabricación.....19
IV.2	Por el contenido de carbono.....34
IV.3	Por el contenido de aleantes.....35
IV.4	Aceros aleados.....42
V	Tratamientos Térmicos de los aceros
V.1	Curvas T.T.T.....44
V.2	Curvas T.E.....51
V.3	Ensayo Jominy.....57
V.4	Tratamientos Térmicos Específicos.....65
VI	Diagramas de fase de los aceros más comunes
VI.1	Influencia del carbono en el Fe.....77
VI.2	Diagramas de fase Fe-Cr.....80

VI. 3	Diagrama de fase Fe-Ni.....	82
VI. 4	Diagramas ternarios.....	84
VII	<b>Ejemplo de aplicación en la Ingeniería Química</b>	
VII.1	Descripción.....	91
VII.2	Especificaciones de material.....	97
VII.2.1	Códigos aplicables	
	a)Aplicación del código ASME.....	99
	b)Aplicación del código ASTM.....	103
	c)Aplicación del código NACE.....	104
VII.3	Selección de material de acuerdo a las condiciones de equipo y diseño.....	109
VII.4	Criterio de selección.....	123
	Conclusiones.....	126
	Referencias.....	128
	Indice de referencias utilizadas por capítulo.....	130

## CAPITULO I

## INTRODUCCION

Actualmente en la Industria Química esta cobrando verdadera importancia la selección adecuada de materiales para la construcción de equipos que participan dentro de un proceso químico industrial. Dicha selección requiere toda una serie de factores a considerar; sería un error elegir un material tan sólo por el factor económico sin tomar en cuenta, por otra parte, la competencia técnica que dicho material pueda tener (entendiéndose con ello, que debe reunir ciertas propiedades: físicas, químicas, mecánicas, capacidad para ser soldado, maquinado, vida de servicio, resistencia a la corrosión, etc.

Es por ello, que día con día se requiere de personal profesional de larga experiencia y altamente especializado y es conveniente contar con un grupo de gente joven, en continua capacitación, para la renovación y sustitución de los cuadros en todos sus niveles. El personal subprofesional y el no técnico deben ser también de alta calificación, y todos deben ser imbuidos de la mentalidad especial que supone el trabajar con materiales que son fundamentales en las diferentes ramas de la industria.

Por otra parte, el profesional de Ingeniería Química desempeña un papel muy importante ante la difícil tarea de la selección de materiales apropiados, pues la industria metalúrgica ofrece actualmente una gran variedad de materiales entre metales y aleaciones, dentro del cual resulta difícil seleccionar el adecuado, para operar satisfactoriamente en cualesquiera situación bajo las que se operen los diversos equipos. De esta forma, resulta natural, dada la amplia gama de necesidades, que

al tratar de delimitar los materiales que se emplean en las diferentes piezas o equipos, no se encuentre una respuesta definida.

Es así, como el profesional de Ingeniería Química en su difícil labor de seleccionar materiales, debe tener en cuenta al acero como una de sus mejores opciones cuando trabaje en condiciones sumamente críticas de temperatura, presión, atmósferas altamente corrosivas, etc.

Sin embargo, hay que considerar que el acero tiene ciertas limitaciones que pueden vencerse mediante elementos de aleación, dichos elementos de aleación le proporcionan al acero una alta templabilidad, un mejoramiento en su resistencia a temperaturas comunes, así como también, en sus propiedades mecánicas, también le aumentan su resistencia al desgaste, y a la corrosión. De esta manera, el acero al poseer la cualidad de incrementar su resistencia, aunado a la abundancia de uno de los elementos que lo constituyen (el hierro), lo colocan en un lugar preeminente, constituyendo el material básico del siglo XX. Un 92% de todo el acero es simple acero al carbono, el resto es aleado: aleaciones de hierro con carbono y otros elementos como son manganeso, níquel, cromo, molibdeno y vanadio.<sup>(4)</sup>

El acero es un producto derivado de uno de los sectores fundamentales del desarrollo económico: la Industria Siderúrgica, constituye una de las bases sobre las cuales se asienta toda la economía industrial. Su importancia se refleja en el aumento experimentado en sus ventas alcanzadas al año, que superan con mucho a los obtenidos, por ejemplo en cerámica de estructura. Además de que el número de países productores se

ha incrementado: de 30 en 1938 a 75 en la actualidad. Este proceso de desarrollo es debido a la política actual de industrialización, que en líneas generales, coincide en establecer la implantación de una industria pesada como una de las condiciones de independencia económica.<sup>(3)</sup>

Siendo el acero un material imprescindible muchas veces en la industria química, es importante que el Ingeniero Químico conozca y tenga un panorama general acerca de sus propiedades y de sus aleaciones que pueda obtener, para lograr un mejor aprovechamiento.

**OBJETIVO:** De esta forma, el objetivo del presente trabajo es el de presentar de una manera breve, pero sustanciosa, un estudio acerca de los aceros en la Ingeniería Química, así como también pretende dar ciertos parámetros a considerar en la selección del tipo adecuado de acero.

## C A P I T U L O   I I

### BREVE HISTORIA DE LOS ACEROS

Uno de los materiales metálicos mayormente utilizado por el hombre ha sido el acero ya que es un material que, además de ser abundante y barato, posee ciertas características como son: alta resistencia, ductibilidad, elasticidad, tenacidad resistencia al calor, a las temperaturas bajas, y al desgaste; además de que los productos usados pueden ser reciclados dentro de un proceso de producción.<sup>(9)</sup>

Por todo ello, se comprende que los aceros son imprescindibles en la construcción de automóviles, edificios, ferrocarriles, y en un sin fin de cosas esenciales para nuestro bienestar.

Aproximadamente 2500 tipos diferentes de acero se utilizan en forma de chapas, tubos, soportes, barras, alambres, o cables. Muchos de los aceros hoy utilizados a gran escala han sido desarrollados sólo en los últimos decenios.<sup>(2)</sup>

El uso del acero es muy antiguo. Antes del descubrimiento de una técnica de fundición, la obtención del acero fue de carácter artesanal en hornos cavados en la tierra o en forjas que los herreros operaban manualmente con un rendimiento tan bajo que apenas servía para la elaboración de armas, herramientas y algunos otros bienes de uso inmediato.

El acero es una aleación de hierro con pequeñas cantidades de carbono. Este último influye considerablemente en las propiedades del hierro y, por ello al acero se le clasifica como una aleación hierro-carbono. Esta aleación contiene también, aunque en pequeñas proporciones otros elementos : manganeso y silicio



(que son benéficos) y fósforo y azúfre, que deben ser eliminados hasta donde sea posible durante el proceso de aceración.

Se ignora cómo y cuándo se obtuvo por primera vez el hierro, si bien lo más probable es que haya sido casualmente cuando alguien encendió una gran hoguera sobre terreno ferroso e hizo que, al arder la madera, se convirtiera en carbón y este, en estado incandescente, reaccionara con los óxidos de hierro. Así se produjeron partículas de hierro, duras y brillantes, que seguramente habrán despertado la atención a los hombres de la antigüedad. Ese hierro primitivo habría de resultar de mucha utilidad, pues sus descubridores buscaron la forma de obtenerlo, ya no por accidente, sino en forma sistemática. Y en las mayores cantidades posibles, para la fabricación de utensilios e implementos para el trabajo o para la guerra.

Se sabe que los egipcios lo conocían desde hace 5000 años. Las "fundiciones" egipcias no eran más que un montecillo de mineral de hierro y carbón recubierto de tierra. El aire se obtenía con fuelles de piel. Cuando el carbón se había quemado totalmente, se extraían las "lupas" o bolas de metal.

Entre los griegos el arte de fabricar y endurecer el acero estaba muy adelantado en los tiempos de la guerra de Troya (1200 años A.C.). Herodoto cuenta que los Cálibes descubrieron la forma de transformar el hierro en acero. Estos primitivos herreros extraían un metal frágil y quebradizo de las tierras ricas en mineral de las costas meridionales del Mar Negro. Pero después, recolectando las "lupas" hasta ponerlas al rojo vivo y golpeándolas antes de que se enfriaran, lograban obtener un metal maleable. La humanidad había llegado a la Edad de Hierro.

Así mismo, era conocido por los habitantes de la India, de Toledo (España), y en Japón por los Samurais, esto era principalmente porque empleaban armas fabricadas con acero para ser usados en las guerras.

Durante toda la Edad Media y el Renacimiento, el acero era producido en pequeñas cantidades por corporaciones de artesanos que guardaban en secreto el método de fabricación.

De esta manera, la mayor parte de los antiguos aceros se hacían por cementación, que consistía en la impregnación del hierro en una fragua con carbón vegetal, pieles de animales u otro material carbonoso. La masa metálica se trabajaba repetidas veces hasta que el artesano se sentía satisfecho por la calidad de su producto. Para la cementación se aprovechaba el hecho de que un producto ferroso de bajo contenido de carbón, como el hierro forjado al ser calentado al rojo en contacto con carbón vegetal u otro material carbonoso, absorbe carbón hasta llegar a un punto de saturación ligeramente inferior a 2%. Las barras de hierro, rodeadas de carbón vegetal y aisladas del aire, se calentaban y se mantenían al rojo por 7 ó 12 días. La cantidad de carbono absorbido variaba según el tiempo en que el metal estaba en contacto con el carbón y según la temperatura del metal. Con este acero cementado se hacían herramientas de borde duro y afilado y centro dúctil resistente al choque. Dicho proceso de cementación fue revivido en Bélgica en 1600 y también en Inglaterra durante los siglos XVIII y XIX.

El primer proceso de obtención industrial del acero fue ideado por el relojero Benjamín Huntsman en 1740. El proceso se llama Crisol porque consistía en cementar (es decir, enriquecer en contenido de carbono) el hierro con carbón vegetal y fundir

sucesivamente en un crisol el producto obtenido. Este procedimiento producía acero homogéneo exento de escorias y muy superior en calidad al producto del proceso de cementación. Fue el mejor acero por más de 150 años.

Aunque el proceso Crisol producía un acero de mayor calidad, que el de cementación, tenía un gran inconveniente: el costo de producción era bastante alto. De esta manera, ambos métodos fueron abandonados al introducirse los procedimientos modernos.

El proceso Bessemer ideado por Henry Bessemer (1856) consistía en obtener directamente acero mediante el afinamiento de la fundición, introduciendo una corriente de aire en un aparato, actualmente llamado convertidor. En él, el calor que mantiene líquida la colada lo suministra la reacción exotérmica de oxidación del silicio. En el mismo período se patentaba en América un proceso análogo, el de William Kelly. En 1877 el Inglés Sydney Gilchrist Thomás tuvo la idea de sustituir el revestimiento ácido de convertidor Bessemer por un revestimiento básico (dolomita), lo que permitía obtener escorias básicas; por consiguiente se podía convertir fundición fosforosa con aceros. Entre 1860 y 1865 en Francés Pierre Martín y los Alemanes William y Friedrich Siemens desarrollaron un tipo de horno alimentado por gas denominado posteriormente horno Martín-Siemens. Este tipo de horno permite obtener acero fundiendo en la solera grandes cantidades de chatarra de hierro y fundición o bien fundición y minerales. W. Siemens, entre 1878 y 1879 efectuó los primeros intentos de obtener acero a partir de chatarra de fundición de hierro en hornos de arco eléctrico. En 1878, E. Stassano instaló en Roma un horno de arco eléctrico para fabricar acero directamente del mineral, horno en que la colada era calentada por irradiación. Casi

simultáneamente, en 1900 P.T.L Heroult, en América iniciaba sus ensayos para obtener acero en un horno también de arco, siguiendo un procedimiento muy similar al Martin-Siemens. Los procesos Bessemer, Thomas, Martin-Siemens y más tarde los de acerería eléctrica inaugurarían la Edad del acero desplazando rápidamente a la madera como material estructural en las obras de ingeniería civil, y después al hierro fundido como materia prima de la construcción de barcos, cañones, etc.

De esta manera, siendo el acero un material de actualidad es necesario conocer más acerca de su metalurgia basada en los cambios que presenta éste en su estructura cristalina (alotropía). Estos cambios ocurren en forma reversible, es decir, por enfriamiento de las aleaciones desde el estado líquido, o bien por calentamiento desde el estado sólido hasta llegar al líquido; por ello, para visualizar mejor dichos cambios presentamos a continuación el Diagrama de hierro-carburo de hierro.

### C A P I T U L O   I I I

#### DIAGRAMA DE HIERRO-CARBURO DE HIERRO

El diagrama de hierro-carburo de hierro, en esencia expone la relación entre el contenido de carbono y la temperatura. Indicando también las características del sistema de "equilibrio" hierro y carburo de hierro, así como los cambios de fase que ocurren en el calentamiento y en el enfriamiento, además de indicar la naturaleza de los componentes que existen a cualquier temperatura (es importante hacer notar que este diagrama no es un verdadero diagrama de equilibrio, pues el equilibrio implica que no hay cambio de fase con el tiempo; sin embargo en este caso el compuesto carburo de hierro se descompondrá en hierro y carbono (grafito), aunque para ello, tardará bastante tiempo en suceder. En realidad el diagrama hierro-carburo de hierro puede considerarse como representativo de cambios de equilibrio, bajo condiciones de calentamiento y enfriamiento relativamente lentos.<sup>(5)</sup>

La fig. 3.1 que se muestra a continuación, es una porción del diagrama que describe los aceros de fabricación cuyo contenido de carbono no es superior al 2%, más allá de esta cifra, el metal se clasifica como hierro colado o fundición de hierro. Sin embargo, en condiciones de equilibrio, una composición dada, a una temperatura definida, contendrá los componentes que aparecen en el diagrama; pero como nuestro objetivo radica en la aplicación de los aceros se describirá tan sólo una parte del diagrama (hasta aceros con 2% de Carbono).

Estructuralmente el diagrama muestra 3 líneas horizontales que indican reacciones isotérmicas. Inicialmente, es importante ha-

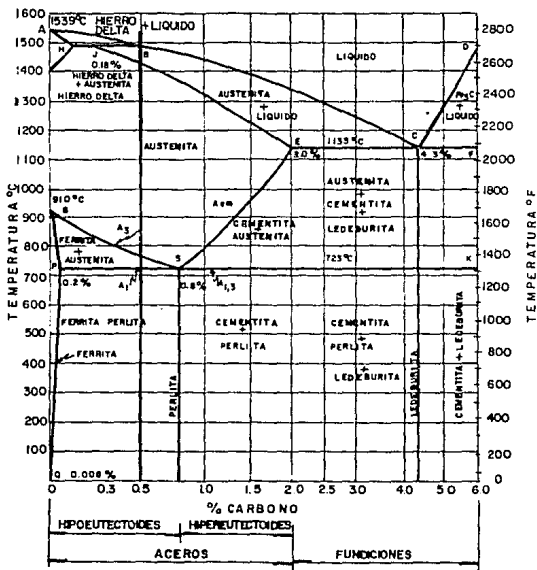


FIG 3.1 DIAGRAMA DE HIERRO-CARBURO DE HIERRO

## II

cer notar las estructuras (sólidas) estables presentes, es decir, la austenita (solución de carbono en Fe gamma), la ferrita (solución de C en Fe alfa), y la perlita (mezcla eutectoide de ferrita y cementita FeC). Las estructuras antes mencionadas, no son las únicas que se pueden presentar, se pueden obtener también estructuras metaestables, las que tienen características diferentes de las anteriores y se presentan cuando la velocidad de enfriamiento aumenta; estas nuevas estructuras son la martensita y la bainita. En los diagramas de enfriamiento continuo ya aparecen los campos que indican las transformaciones a estas estructuras; aunque por el momento, no entraran en nuestro análisis.

Con el objeto de lograr un mayor entendimiento del diagrama Fe-C se elegirá una aleación con 0.5% de C para explicar las zonas que integran dicho diagrama. De esta manera, comenzando con 0.5% de C a 1550°C, esta aleación se encuentra en forma líquida y empieza a solidificar a 1480°C aproximadamente y termina a 1430°C, es decir, que existe un intervalo de temperatura 50°C los que conviven el sólido y el líquido al mismo tiempo por debajo de 1430°C la aleación esta completamente solidificada y constituida de Fe gamma o austenita que puede disolver facilmente a 0.50% de C; Continuando con lo sucedido a la aleación FeC con 0.5% de C al descender la temperatura al 765°C se inicia la transformación de Fe gamma a Fe alfa o ferrita y por lo tanto la solubilidad del carbono en la matriz se ve modificada, en el intervalo de 27°C, coexisten la ferrita transformada y la austenita cada vez con mayor porcentaje de carbono hasta llegar a 0.80% de C, con lo cual a una sola temperatura, 738°C, la austenita se transforma a un constituyente llamado Perlita, el cual es un eutectoide formado de laminillas alternadas de ferrita y cementita o carburo de Hierro (Fe<sub>3</sub>C).<sup>(4)</sup>

### III.1 ESTRUCTURAS PRESENTES EN LOS ACEROS

A continuación se definirán las estructuras presentes en el diagrama Fe-Fe<sub>3</sub>C y otras que están presentes en los aceros.

**AUSTENITA:** Se le llama a la solución sólida de uno o más elementos en hierro cúbico centrado en la cara. Regularmente se le designa como solución sólida  $\gamma$ ; y presenta un empaquetamiento de átomos mucho mayor que la ferrita, que es cúbica centrada en el cuerpo (b.c.c.) con dos átomos por celda unitaria. Tanto en la austenita como en la ferrita los átomos de carbono se disuelven intersticialmente, es decir, en los espacios sin llenar de la estructura reticular. Según se sabe, el porcentaje de espacios sin llenar en la red f.c.c. (cúbica centrada en la cara) es del 25% y en la red b.c.c. (cúbica centrada en el cuerpo) es del 32%. De esta forma, podría sorprendernos el hecho de que la solubilidad del carbono en austenita es mucho mayor que en ferrita. Este comportamiento se puede explicar si consideramos la siguiente figura 3.2:

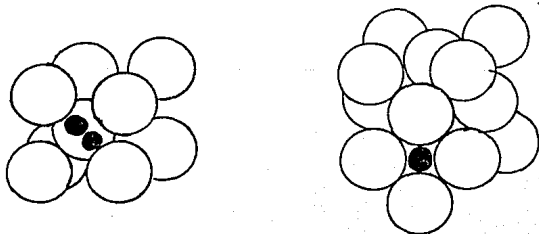


FIG. 3.2 INTERSTICIOS DE LAS ESTRUCTURAS B.C.C. (IZQUIERDA) Y F.C.C. (DERECHA). QUE CORRESPONDEN A LAS ESTRUCTURAS DE FERRITA Y AUSTENITA RESPECTIVAMENTE.



En esta figura a) muestra 2 de las 4 posibles posiciones para un átomo de carbono en la cara frontal de un cubo centrado en el cuerpo. La mayor esfera intersticial que precisamente ajustaría presenta un radio de  $0.36(10^{-8})$  cm y b) muestra una posible posición para un átomo de carbono en la cara frontal de un cubo centrado en la cara. La mayor esfera intersticial que ajustaría tiene un radio de  $0.52(10^{-8})$  cm; por lo tanto con esto se explica que la austenita tendrá mayor solubilidad para el átomo de carbono que la ferrita.

Las propiedades promedio de la austenita son:

Resistencia tensil: 150,000 lb/pulg<sup>2</sup>, elongación 10% en 2 pulgadas, dureza Rockwell C40 aproximadamente, tenacidad alta. Generalmente a temperatura ambiente no es estable, aunque bajo ciertas condiciones, es posible tener austenita a temperatura ambiente.

**LEDEBURITA:** Se le designa a la mezcla eutéctica de austenita y cementita, cuyo contenido de carbono es del 4.3% formándose a una temperatura de 2065°F.

**FERRITA:** Se le designa a la solución sólida  $\alpha$ . Es una solución sólida intersticial de una pequeña cantidad de carbón disuelto en hierro  $\alpha$  (b.c.c.). La máxima solubilidad que presenta es de 0.025% de C a una temperatura de 1333°F y disuelve tan solo 0.008% de C a temperatura ambiente. Comparativamente con las estructuras que se presentan en el diagrama, puede considerarse como la más suave. Las propiedades promedio que presentan son: resistencia tensil 40,000 lb/pulg<sup>2</sup>; elongación 40% en 2 pulgadas, dureza menor que la Rockwell O ó que la Rockwell B90.

En algunos diagramas de equilibrio hay dos regiones ferríticas separadas por una área austenítica. El área inferior es ferrita alfa, en tanto que la superior es ferrita delta. En

tanto que si no hay designación se supone que es ferrita alfa.

**PERLITA:** Es la mezcla eutectoide que contiene 0.8% de C y se forma a 1333°F a un enfriamiento muy lento. Se puede considerar que la perlita es un agregado laminar de ferrita y cementita que ha menudo se presenta en el acero y en el hierro fundido. Dentro de sus propiedades promedio se encuentra: su resistencia tensil 120,000 lb/pulg.<sup>2</sup>, elongación 20% en 2 pulgadas, dureza Rockwell C20, Rockwell B95-100 ó BHN 250-300. Se puede decir, que la perlita como se presenta como laminillas alternadas de Fe<sub>3</sub>C y de ferrita o solución de hierro alfa, su dureza y su resistencia no son muy altas, pues dependen del contenido de carbono en el acero, por una parte y por otra, dependen de la finura de la perlita, es decir, del tamaño de las laminillas y de su proximidad unas con otras. Entre más fina sea la perlita naturalmente va siendo más dura, su resistencia más alta pero su ductilidad va bajando.

La perlita muy fina en ocasiones ya no se puede resolver con el microscopio, es decir, ver separadas unas laminillas de otras. Esto ocasionó que los metalurgistas en un principio le dieran nombres diferentes, pensando que se trataba de otras estructuras y fueron conocidas como: sorbita, troostita y granulita con la mejoría en los instrumentos ópticos se comprobó que esos componentes estaban formados de perlita, quizá muy fina, pero estructura perlítica al fin.

**BAINITA:** Se llamó así en honor a Bain, es parecida a la martensita con la que frecuentemente se confunde, pero en la bainita el carbono ya no está disuelto sino que se ha

precipitado, es decir, fundamentalmente es ferrita pero con carburo de hierro precipitado en forma muy fina, tan fina, que con el microscopio metalográfico resulta muy difícil de resolver la microestructura y si se desea hacerlo hay que recurrir al microscopio electrónico trabajando a aumentos de 5000 diámetros en adelante.

La bainita inferior es más suave y tenaz que la martensita se le puede reconocer por la apariencia de una pluma de ave. En la bainita superior la precipitación de carburos es más completa (la transformación ocurre a más alta temperatura) y con mayor tamaño, en esta estructura los carburos son fácilmente reconocidos sobre una materia ferrítica, esta estructura es más suave y tenaz que la bainita inferior y aquella lo es de la martensita. Respecto a la perlita es más dura y de resistencia mayor, queda pues la bainita situada en medio de la perlita y la martensita.

**MARTENSITA:** La martensita es hierro alfa pero contiene carbono disuelto en tales cantidades que la solución está sobresaturada. La red cristalina del hierro alfa, como ya se mencionó es cúbica centrada en el cuerpo, los átomos de carbono que contiene en exceso se alojan dentro de la celda (como átomos intersticiales), de éste modo deforman la red y de cúbica cambia a tetragonal; por ello tiene propiedades muy particulares, un acero con esta estructura se vuelve durísimo, pero es muy frágil. La dureza depende del contenido de carbono en el acero.

La martensita vista al microscopio tiene forma acicular, es decir: de agujas, especies de punta de lanza o flecha que a veces tienen una enervadura al centro que asemeja una hoja, por lo general estas agujas se disponen triangularmente.

### III.2 CLASIFICACION DE LOS ACEROS DE ACUERDO A NORMA

La clasificación de los aceros es importante debido a que hay un extenso campo de aplicación de los diversos aceros de fabricación. En junio de 1912 la Society of Automotive Engineers, reconociendo dicha importancia, publicó una lista de valores de aleación basada en un sistema de índices numéricos que hizo posible la descripción de los aceros mediante especificaciones integradas por cuatro números ó dígitos. La primera cifra indicaba la clase; la segunda (a veces por designación arbitraria) indicaba el intervalo aproximado del elemento de aleación y los dos últimos guarismos significaban el contenido medio de carbono en centésimas por ciento.

El principio en que se funda este sistema ha sido empleado como base de los Aceros Standard, cuyos análisis y designaciones se publican bajo la conjunta inspección de la Society Of Automotive Engineers y del American Iron and Steel Institute. De esta manera, la aceptación de esos Aceros Standard y la eliminación de muchos aceros de composiciones especializadas ha mejorado las relaciones de compra, venta, ingeniería y metalurgia de la industria.<sup>(5)</sup>

Los números básicos para la serie de cuatro dígitos de los diversos grados de aceros al carbono y de aleación con porcentajes aproximados de elementos de identificación son:

- 10xx Aceros al carbono: Básicos de hogar abierto y Bessemer ácidos;
- 11xx Aceros al carbono: Básicos de hogar abierto y Bessemer ácidos, azufre alto, fósforo bajo
- 12xx Aceros al carbono: Básicos de hogar abierto, azufre alto, fósforo alto

- 13xx Manganeso 1.75
- 23xx Niquel 3.50 (serie eliminada en 1959)
- 25xx Niquel 5.00 (serie eliminada en 1959)
- 31xx Niquel 1.25 y cromo 0.60 (serie eliminada en 1964)
- 33xx Niquel 3.50 y cromo 1.50 (serie eliminada en 1964)
- 40xx Molibdeno 0.20 o 0.25
- 41xx Cromo 0.50, 0.80 o 0.95 y molibdeno 0.12, 0.20, o 0.30
- 43xx Niquel 1.83, cromo 0.50 o 0.80 y molibdeno 0.25
- 44xx Molibdeno 0.53
- 46xx Niquel 0.85 o 1.83 y molibdeno 0.20 o 0.25
- 47xx Niquel 1.05, cromo 0.45 y molibdeno 0.20 o 0.35
- 48xx Niquel 3.50 y molibdeno 0.25
- 50xx Cromo 0.40
- 51xx Cromo 0.80, 0.88, 0.93, 0.95, o 1.00
- 5xxxx Carbono 1.04 y cromo 1.03 o 1.45
- 61xx Cromo 0.60 o 0.95 y vanadio 0.13 o 0.15 mín.

- 86xx Níquel 0.55, cromo 0.50 y molibdeno 0.20
- 87xx Níquel 0.55, cromo 0.50 y molibdeno 0.25
- 88xx Níquel 0.55, cromo 0.50 y molibdeno 0.35
- 92xx Silicio 2.00
- 93xx Níquel 3.25, cromo 1.20 y molibdeno 0.12 (serie eliminada en 1959)
- 98xx Níquel 1.00, cromo 0.80 y molibdeno 0.25 (serie eliminada en 1964)
- 94Bxx Níquel 0.45, cromo 0.40, molibdeno 0.12 y boro 0.0005 mín.

En donde serie eliminada significa que la cantidad de toneladas esta por debajo de cierto mínimo para incluirse en la lista de grados standar.

NOTA: Esta clasificación de aceros de acuerdo a la S.A.E. (Society of Automotive Engineers), es de una manera muy general, en el capítulo 7 se trata otro tipo de clasificación que es más específica, enfocada al ejemplo de aplicación que se pondrá.

C A P I T U L O    I V  
CLASIFICACION DE LOS ACEROS DE ACUERDO A SU PROCESO DE  
FABRICACION

IV.1    POR EL PROCESO DE FABRICACION:

Por el proceso de fabricación los aceros se dividen de acuerdo a los siguientes procesos: Bessemer, de solera abierta y de horno eléctrico.

PRINCIPIOS DEL PROCESO BESSEMER:

El proceso Bessemer, el más sencillo de todos los utilizados para fabricar el acero, puede ser descrito muy brevemente. A través de arrabio fundido se inyecta aire, cuyo contenido de oxígeno quema el silicio, el manganeso y el carbono existentes en el hierro. Esta oxidación es la única fuente de calor en el proceso Bessemer. El metal fundido queda; por último, convertido en hierro relativamente puro. Por consiguiente, para fabricar el acero, se añaden a este hierro fundido el carbono, el manganeso, el silicio y otros elementos que se consideren necesarios, en cantidades que produzcan la composición y las propiedades físicas que debe tener el acero acabado. Para llevar a cabo este proceso es necesario invertir elevado capital. Además de los convertidores se necesita un mezclador en que se recoge el hierro fundido de alto horno, equipo de colada para formar lingotes de acero, deslingotadores para sacar los lingotes de las lingoteras y el molde del fondo para preparar el revestimiento.

El convertidor Bessemer (mostrado en la fig.4.1 ) es un gran

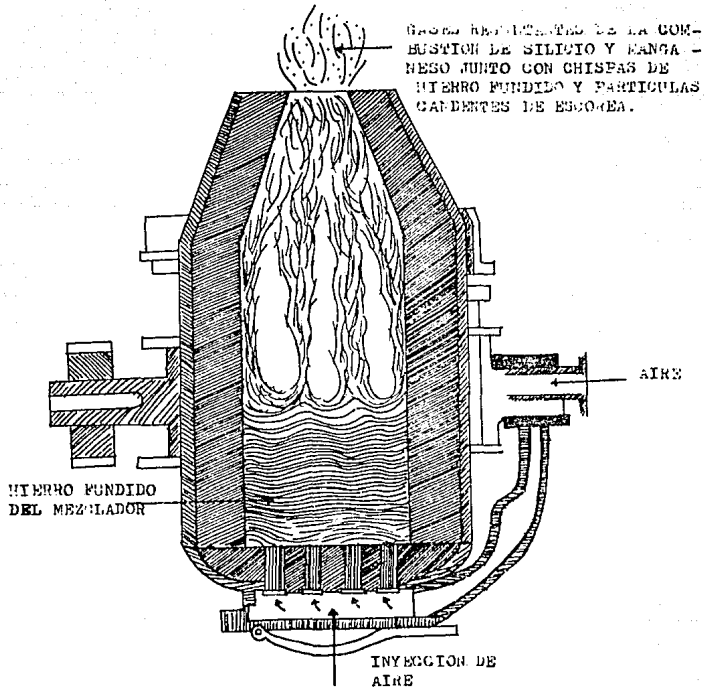


FIG. 4.I CONVERTIDOR BESSEMER



receptáculo piriforme, construido de plancha de acero y revestido interiormente de ladrillos silíceos refractarios; generalmente se monta por pares. Tiene dimensiones para 5-27 toneladas de capacidad. Esta plantado en ejes de acero que se apoyan sobre cojinetes y puede bascular para la carga y la colada. Uno de los ejes es hueco y sirve para la introducción del aire a la caja de viento, de doble fondo, situado debajo del convertidor. El fondo del convertidor o parte superior de la caja de viento tiene 200 o más agujeros de unos 13 mm de diámetro, por los que pasa el aire del convertidor. El fondo del convertidor es desmontable y frecuentemente hay que repararlo de la violenta erosión causada por la alta temperatura de reacción.

El arrabio del alto horno se recoge en el mezclador para reducir al mínimo las diferencias de composición de distintas coladas del horno y para mantener al hierro a temperatura razonablemente uniforme.

La operación comienza inclinando el convertidor hasta ponerlo horizontal y echando en él el hierro fundido del mezclador. Se abre el conducto del aire y se hace girar el convertidor hasta colocarlo en posición vertical. El aire a presión de 20 libras/pulg.<sup>2</sup> pasa através del hierro fundido y oxida el silicio, carbono, manganeso y algo de hierro. Los gases resultantes salen de la boca del convertidor en espectaculares llamas color rojo oscuro con humo pardo denso, que indican la combustión del silicio y del manganeso; al mismo tiempo salta una rociada de chispas del hierro fundido y partículas candentes de la escoria. Al cabo de algunos minutos, la mayor parte del silicio y del manganeso ha sido completamente quemada. La transformación de las cortas llamas rojas en largas

lenguas de brillante amarillo, que luego se vuelven blancas indican el comienzo de la eliminación del carbono. Pasados algunos minutos de violenta ebullición, las llamas se apagan rápidamente; este signo indica al operador que observa através de cristales especialmente coloreados que la refinación ha sido realizada; ya sólo se quemaría hierro si se mantuviera la corriente de aire. Se corta la entrada de viento suficiente para detener su acción y se inclina el convertidor para impedir que el hierro escurra por los orificios del fondo.

En este momento, el metal existente en el convertidor es hierro fundido con muy poco carbono, manganeso o silicio, pero con cantidad considerable de nitrógeno atrapado, más otros gases ocluidos, y óxido de hierro. Entonces se le da la calidad conveniente mediante la adición de carbono, manganeso y silicio como desoxidante y recarburadores. Con esto se elimina la mayor parte del gas ocluido, se corrige la tendencia a la fragilidad y se eleva al grado deseado el contenido de carbono, manganeso y silicio. Los citados elementos se añaden en forma de ferromanganeso o mezclas de éste y fundición especular (un ferromanganeso de grado bajo), ferrosilicio, antracita y arrabio; también aluminio si fuera necesario. Después que las adiciones han sido perfectamente mezcladas en el baño se vierte el acero fundido del convertidor en el cucharón de colada, desde el cual se hecha en las lingoteras. Estos pasan al deslingotador, y los lingotes extraídos de sus moldes van al foso de recalentamiento y al taller de laminación.

Las muestras para el análisis químico se toman a la mitad de la colada mediante una cuchara de acero que se interpone en el chorro de el cucharón de colada. Si se desprenden gases de acero en la cuchara se "apaga" el acero con aluminio. Entonces se

vierte el acero en un pequeño molde, se deja enfriar, se le estampa el número de la partida y se analiza. El resultado del análisis se acepta como representativo de la totalidad de la partida.

La escoria que flota en el acero fundido es principalmente el producto de la oxidación del silicio y del manganeso contenidos en el arrabio y atrapa cierta cantidad de gases eliminados del acero. Se retiene la escoria mediante una espumadera mientras el acero del convertidor se vacía en el cucharón de colada. Después de apartado el cucharón, se pone el convertidor boca abajo. La escoria cae en unas carretillas y es transportada al escorial. La escoria del proceso Bessemer puede ser agregada a la carga de los altos hornos, lo que permite la recuperación de una porción considerable del manganeso en ella existente.

El operador puede mantener la operación del convertidor bajo estrecho control térmico. Si la temperatura del metal es demasiado elevada, se disminuye inyectando vapor en el aire de la máquina soplante o agregando al metal fragmentos fríos de chatarra; si por el contrario, la temperatura es demasiado baja, se inclina el convertidor de modo que algunos orificios del fondo queden al descubierto para que la corriente de aire pase por encima del metal y queme el monóxido de carbono en el convertidor; así se aprovecha el calor emitido por la conversión en dióxido de carbono.

El proceso Bessemer básico (Proceso Thomas en Europa) se realiza en un convertidor de igual forma que el del proceso ácido. El revestimiento básico es una mezcla de dolomita calcinada y alquitrán que se apisona en las paredes del

convertidor caliente. Este forro se coloca para resistir la erosión de la escoria básica, pero no interviene en la química del proceso. El hierro fundido se carga con un octavo de su peso de cal, que se combina con la sílice del silicio oxidado por la corriente de aire y forma escoria básica. Cuanto mayor es la proporción de sílice y fósforo (elementos generadores de ácidos) mayor es la cantidad de cal necesaria.

La sílice se elimina muy rápidamente en el proceso Thomas mediante la escoria básica, pero la separación del manganeso es lenta y no tan completa como en el proceso ácido. El carbono desaparece después de eliminado el silicio. La separación del fósforo comienza una vez desaparecido el carbono y continúa en el período denominado "soplado posterior" durante el cual pasa a la escoria un fosfato cálcico de composición  $4CaO.P_2O_5$ . Parte del azufre entra en la escoria como sulfuro de calcio y parte es expulsado en forma de óxidos de azufre. La escoria del proceso Thomas es igual en peso a una cuarta parte del metal y como contiene 15% o más de ácido fosfórico, se aprovecha como fertilizante agrícola.

#### QUIMICA:

La planta Bessemer típica opera con arrabio que contiene aproximadamente 4% de carbono, 1% de manganeso, 1% de silicio, 0.1% de fósforo y 0.5% de azufre. Al final de la operación el metal contiene 0.02-0.10% de carbono, 0.02-0.06% de manganeso y 0.003-0.01% de silicio. El fósforo y el azufre han variado poco. Algo del nitrógeno del aire inyectado ha quedado ocluido en el metal fundido, que puede contener finalmente hasta 0.015% de nitrógeno.<sup>(4)</sup>

Al iniciarse la hornada, el oxígeno de la corriente de aire y parte del hierro se combinan para formar óxido de hierro, que se descompone por el manganeso y el silicio.



Los productos finales de estas tres reacciones se combinan para formar la escoria:



La tumultuosa ebullición del metal fundido mezcla íntimamente el hierro con la escoria. Los silicatos de ésta no tienen composición fija, sino que toman o ceden óxido de hierro según lo requieran las ligeras variaciones del equilibrio químico.

De dos maneras se oxida el carbono presente en el metal; o por el oxígeno de la corriente de aire, que forma monóxido de carbono, o por el óxido de hierro disuelto en el metal, con formación de dióxido de carbono. El monóxido de carbono se reduce por las fuertes concentraciones de silicio y de manganeso:



Después de eliminados el manganeso y el silicio, el carbono

es atacado por el óxido de hierro disuelto:



El recíproco funcionamiento de estas reacciones produce la refinación del hierro. Como son exotérmicas, excepto la (8) y la (9), la operación requiere suma pericia del operador para la regularización correcta de la temperatura, lo que principalmente se realiza mediante la observación visual del curso de la operación.

#### USOS DEL ACERO BESSEMER:

El acero Bessemer se labra fácilmente a máquina y se usa para tornillos, ciertas clases de alambre, planchas, hojalata, tubos para soldarse a tope y a solapa, pernos, tuercas, varillas, para el hormigón armado y en muchas calidades de acero dulce y de medio y alto carbono.<sup>(4)</sup>

#### PROCESO DE SOLERA ABIERTA

El principio en el que se basa este procedimiento puede ser descrito como sigue: El arrabio fundido se extiende en capa muy extensa y delgada en el fondo de un horno de reverbero y se cubre con escoria que contiene óxido de hierro, usualmente enriquecido con terrones de mineral de hierro. La purificación se verifica por oxidación de las impurezas, que en la mayor parte de los casos se diluyen mediante el empleo de grandes cantidades de chatarra de acero.

Generalmente se construyen filas de varios hornos de solera abierta. Cada horno es una estructura de ladrillos reforzada con acero y revestida en materiales refractorios. El hogar es una cuba rectangular, poco profunda en la cual se realiza la purificación.

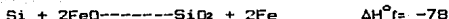
Las reacciones en el hogar abierto no son suficientemente exotérmicas para mantener la temperatura necesaria. Por consiguiente se necesita una fuente externa de calor. En los primeros hornos de esta clase se empleaba gas de agua producido en un gasógeno con hulla. A partir de 1900, el gas de agua fue reemplazado por combustibles más baratos y accesibles. El gas y el alquitrán de horno de coque y subproductos y combustóleo son hoy los combustibles más utilizados.

El horno de solera abierta funciona gracias al aire precalentado. En ambos extremos de cada horno están instalados los regeneradores de calor o cámaras de recuperación del calor de los gases de combustión. Son cámaras llenas de ladrillos refractorios escaqueados, por entre los cuales pasan los gases residuales antes de llegar a la chimenea y ceden su calor, que es transferido al aire entrante. Esto se realiza por un sistema de válvulas de mariposa que dejan pasar los gases del horno por una de las cámaras rellenas de ladrillos y con frecuentes intervalos invierten la corriente de gases a fin de que el aire entrante tenga calor suficiente y mantenga en el hogar la temperatura necesaria para la fusión.

## REACCIONES QUÍMICAS:

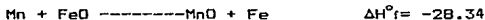
La eliminación del silicio, manganeso, fósforo y carbono se realiza por oxidación. El azufre se separa en parte por oxidación y en parte por reacción química con la escoria.

El silicio se oxida por la siguiente reacción:



Esta reacción es básica y casi completa. La hornada media de un horno de hogar abierto contiene menos de 0.010% de silicio en el momento de la colada.

El manganeso se oxida con rapidez ligeramente menor que el silicio y la reacción es la siguiente:



En el metal líquido queda más manganeso que silicio. El manganeso residual es más sensible a la oxidación del baño, a las condiciones de la escoria y a la temperatura.

Aumentan la cantidad de manganeso las condiciones siguientes: bajo contenido de oxígeno en el baño, temperatura elevada y escoria densa con poco oxígeno.

El fósforo es otro de los elementos que han de ser oxidados. Se diferencia del silicio y del manganeso en que rápidamente vuelve de la escoria al baño si las condiciones de la escoria no son adecuadas para retenerlo. La reacción de oxidación es:





La cantidad de fósforo retenida por el baño sigue muy de cerca la relación cal-sílice y el óxido de hierro de la escoria. En las escorias básicas de la relación cal-sílice 3:1, el fósforo residual de la hornada corriente es de 0.010 a 0.15%.

El carbono no se oxida rápidamente mientras el silicio y el manganeso no hayan sido eliminados en gran parte. La reacción es:

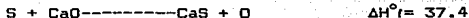


El carbono desciende rápidamente hasta 0.05% aproximadamente, y mediante grandes adiciones de mineral y nueva cocción puede ser finalmente reducido a 0.015% ó 0.02%.

El azufre es oxidado probablemente sólo en el período de fusión y cuando su contenido es extremadamente elevado, lo que explica la práctica seguida de cargar en último lugar la chatarra seguida de alto contenido de azufre para que se ponga en contacto directo con la llama y pierda parte de su azufre antes de agregar el arrabio. Prescindiendo del azufre que se absorbe de un combustible muy sulfuroso. La reacción sería:

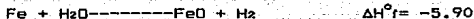


La eliminación del azufre del baño se realiza en la forma siguiente:



A veces, cierta cantidad de azufre queda retenida en la escoria como sulfato de calcio.

El hierro se oxida por los gases durante la fusión:



Después de quedar el baño cubierto por la escoria, el oxígeno transferido por ésta continúa oxidando el hierro.

Los elementos susceptibles de ser oxidados en el proceso básico de hogar abierto son el hierro, el carbono, el manganeso, el fósforo y el silicio, así como el cromo, vanadio, aluminio, titanio, wolframio, niobio y cinc procedentes del mineral de la chatarra o de otro mineral.

La oxidación de algunos elementos, particularmente del fósforo, se hace por reacciones reversibles.

Algunos elementos (cobre, níquel, molibdeno, cobalto, estaño y arsénico) por ser su afinidad por el oxígeno menor que la de hierro, no se oxidan y quedan en el metal.

La escoria del proceso básico de hogar abierto en una planta completa puede llevarse al alto horno para recuperar parte del manganeso, pero en otro caso se desecha como inútil, pues no sirve como fertilizante a causa de estar el fósforo en combinación insoluble por el uso de espato fluor como acondicionador de la escoria.

## PROCESO DE HORNO ELECTRICO

En 1880, sir William Siemens concibió la idea de utilizar la energía eléctrica como fuente de calor en los hornos metalúrgicos. Los diversos tipos de hornos eléctricos construidos para la producción de acero abarcan casi todos los sistemas empleados para servirse de la energía eléctrica. Es importante indicar aquí que la electricidad se utiliza solamente en calidad de fuente de calor y que no comunica propiedades especiales al producto.

De ordinario, el horno eléctrico trabaja con chatarra, pero existen otras variantes. El hierro de primera fusión puede ser parcialmente refinado en el hogar abierto o en el convertidor de Bessemer y luego se carga en el horno eléctrico para su refinación final. En otro método se toma el arrabio fundido en un cubilote, se translada a un convertidor y luego al horno eléctrico para su acabado. Según otra variante, el arrabio fundido en un cubilote se carga sobre un lecho de mineral de hierro en el horno eléctrico.

En el horno eléctrico ordinario, la chatarra, que constituye el grueso de la carga, se extiende con las piezas más gruesas en el fondo y más ligeras encima. Se agregan piedra caliza, mineral de hierro o escamas de laminación, y tal vez aleaciones ferrosas. Aplicada la corriente y fundida la chatarra en parte, formando charcos de metal en el fondo del horno, se añaden escamas de laminación o mineral de hierro. La caliza y el mineral se descomponen y eliminan los elementos oxidables, carbono, manganeso, fósforo y silicio, en forma de escoria, como en el proceso de hogar abierto. En los aceros corrientes sólo es necesario ajustar las condiciones de la escoria, de modo que

el acero tenga la temperatura y la composición deseadas. Entonces, se hace la colada. Este método se llama de la "escoria negra".

Los aceros de aleación y el acero inoxidable requieren mayor tratamiento. Después de fundida la chatarra y cubierta con la escoria fundida, se procede a analizar el acero. Si la refinación ha progresado lo suficiente, se inclina el horno ligeramente para rastrillar la escoria "negra" por completo a fin de separar del acero fundido el fósforo, la mayor parte del azufre y parte del manganeso, del silicio y del cromo de la carga inicial. El acero fundido se cubre entonces con una mezcla de cal, arena, coque y espato flúor. Esta mezcla se funde y forma una escoria reductora "blanca" que esencialmente consta de silicato de calcio con algo de carburo de calcio. El espato flúor da a la escoria el grado deseado de fluidez. Esta escoria "blanca" desoxida el acero tomando el oxígeno del óxido de hierro disuelto. En algunos casos se añaden otros desoxidantes, como el siliciuro de calcio, y el aluminio silicio, para acelerar la desoxidación. También pueden añadirse óxidos de ciertos elementos de aleación, como los del cromo, vanadio, wolframio y molibdeno, óxidos que son absorbidos por el metal fundido.

Además de su capacidad para eliminar el azufre del acero, el horno eléctrico básico tiene la propiedad de mantener el acero fundido por largo tiempo en atmósfera no oxidante, lo que permite regular exactamente la temperatura y ajustar con cuidado la composición.

A juzgar por la experiencia, el horno básico de arco eléctrico es el instrumento más eficaz para regular la

temperatura, el tiempo de reacción y la composición, factores esenciales en los procesos de manufactura del acero. Este tipo de horno produce acero de gran uniformidad dentro de los límites de composición muy estrechos.

Cuando se ha alcanzado el equilibrio de tiempo, temperatura y composición, se hacen las adiciones necesarias de ferroaleaciones, se sangra el horno, se recoge el acero en el cucharón y se lleva a la sección de lingotes o moldes.

El método del horno de arco eléctrico, por su costo más elevado que el del método Bessemer y el de solera abierta se emplea sólo para producir aceros para herramientas, aceros inoxidable y aceros de aleación especiales. No sería aplicable a la fabricación de aceros comunes en grandes cantidades mientras no se produzcan cambios importantes en el suministro de hierro viejo y en el costo de la energía eléctrica. En épocas de apuro, algunos consumidores de acero consideran justificada la prima que se paga por el acero al carbono fabricado en el horno eléctrico.

#### IV.2 POR EL CONTENIDO DE CARBONO:

Los aceros al carbono suelen contener cantidades pequeñas de Si, Mn y en ocasiones P y S; los dos primeros se agregan al metal durante su fabricación con el objeto de desoxidar el metal; el manganeso, además sirve para desulfurar; mientras que los últimos se consideran perjudiciales en general y a veces se añaden para obtener maquinabilidad.<sup>(4)</sup>

La acción del carbono sobre las propiedades de la aleación es muy sensible al porcentaje del elemento aleante. El carbono en una concentración relativamente pequeña, afecta las propiedades del acero de tal forma que con baja proporción es dúctil, maleable y de regular resistencia, pero al aumentarla se reducen las dos primeras propiedades y se aumenta la última; así mismo, aumenta la dureza y disminuye la tenacidad. Con el aumento de la dureza (se consigue por medio del temple), disminuye la soldabilidad.

De esta forma, como las características de los aceros al carbono son muy diversas se les clasifica de acuerdo con el contenido de dicho elemento en:

- Acero de bajo carbono (hasta 0.30% C)
- Acero de medio carbono (0.30-0.85% C)
- Acero de alto carbono (más de 0.85 C)

Aunque los valores límite de carbono para la clasificación anterior varían de autor en autor.

Las cantidades de manganeso varían de 0.30 a 0.60% en los aceros de bajo carbono; de 0.60 a 0.90% , en los de medio carbono y pueden tener hasta 1% algunos tipos de alto carbono.

El silicio debe estar presente en cantidad suficiente de acuerdo con el tipo de fusión. El fósforo y el azufre no debe exceder de 0.04 y 0.05% respectivamente, a menos que sean del tipo de aceros al carbono de maquinado rápido en lo que estos elementos se agregan específicamente para lograr un metal que bajo la herramienta de corte produzca una viruta fina y quebradiza.<sup>(5)</sup>

#### IV.3 POR EL CONTENIDO DE ALEANTES:

Los aceros son clasificados por el contenido de aleantes, que modifican profundamente las propiedades, estos elementos pueden ser: Si, Mn, Cr, Ni, Mo, W, etc.

Estos aceros dado que el porcentaje de aleantes puede ser muy variado se clasifican en :

- Aceros de baja aleación
- Aceros de alta aleación
- Aceros de media aleación

#### ACEROS DE BAJA ALEACION:

Son los aceros aleados que no rebasan el 10% de elementos de aleación. A su vez se clasifican de acuerdo con el elemento o grupo de elementos presentes. Por tanto, se han agrupado como sigue:

- Aceros al Ni
- " " Cr
- " " Mo
- " " Ni-Cr
- " " Cr-Mo
- " " Ni-Cr-Mo

- " " Ni-Mo
- " " Cr-V
- " " Si
- " " B

De cada uno de ellos hay una serie debido a la concentración del aleante presente.

#### ACEROS DE MEDIA ALEACION:

Dentro de este tipo de aceros los más importantes son los que contienen cromo y molibdeno que los hace apropiados para temperaturas más o menos elevadas y por ello se utilizan en calentadores e intercambiadores de calor por ejemplo. La selección de estas aleaciones para servicios a más de 752°C, se efectúa considerando diversos factores y experiencias previas. Entre estos factores se encuentran los requerimientos mecánicos y metalúrgicos generados por las condiciones de presión y temperatura de operación, así como por los diversos medios en los cuales puede surgir el deterioro y falla de cada aplicación particular. Los materiales fabricados en aceros de baja aleación cromo-molibdeno (0.5%-2.5% Cr a 0.5%-1% Mo) tienen mayores resistencias que aquellas de aceros al carbono, permitiéndose su empleo bajo esfuerzos más altos. La presencia de cromo hace al acero más resistente a las condiciones oxidantes o sulfurosas, por lo que se prefiere a los aceros aleados únicamente con molibdeno.<sup>(4)</sup>



**ACEROS DE ALTA ALEACION:**

Estos aceros tienen más del 10% de elementos de aleación en conjunto. Se clasifican en :

- Aceros Inoxidables
- Aceros Refractarios
- Aceros para herramienta

**ACEROS INOXIDABLES:**

Son aquellos aceros de alta aleación que contienen 12% de Cr, algunos tienen cantidades elevadas de Ni (8/22%) y cantidades bajas de Mo, V, Cb, Ti, etc.

Como su nombre lo indica los aceros inoxidables resisten la corrosión y la oxidación en muchos medios. El contenido de carbono en general se mantiene bajo.

El balance de elementos de aleación producen tres tipos diversos de estructuras que se emplean en aplicaciones específicas. De esta manera, metalúrgicamente hablando, pueden clasificarse por la microestructura que las constituye: ferrítica, austenítica, martensítica y mixta. A esta clasificación deben agregarse aquellos aceros que presentan la capacidad de endurecer por precipitación.

Dependiendo principalmente de los contenidos de cromo y níquel se presentan las microestructuras mencionadas. La estructura ferrítica es suave y relativamente blanda y dúctil a temperaturas elevadas. La estructura martensítica es inestable tanto como aquellas resultantes de una precipitación. La austenítica es resistente y relativamente tenaz, por ello las

aleaciones en este servicio se constituye sobre una matriz austenítica.

La base del estudio de los aceros inoxidable es sin duda el diagrama hierro-cromo, en el que se puede observar que la estructura predominante es la ferrita (figura 4.2), en tanto que la austenita se presenta sólo con contenidos de cromo inferiores a 12% y a temperaturas superiores a 831°C. Los aceros inoxidable que sólo tienen hierro y cromo forman el grupo ferrítico conteniendo como máximo de carbono 0.12% normalmente. El contenido de cromo se mantiene entre 16 y 18%.

En casos especiales se eleva el contenido de carbono hasta 0.20%, paralelamente a un incremento de cromo que llega hasta 27% para estabilizar la fase ferrítica y aumentar considerablemente la resistencia mecánica.

Cuando se eleva el contenido de carbono en los aceros ferríticos se produce un aumento en las posibilidades de la estructura austenítica, por lo que las aleaciones resultantes son tratables térmicamente por temple, del que se obtiene una microestructura martensítica. En estos aceros es normal encontrar contenidos de cromo del orden del 12% al 18% y de carbono de 0.15% hasta 1.20%.

En ambos grados, martensíticos y ferríticos, es notable la alta resistencia mecánica que poseen (especialmente en el primero), pero deja mucho que desear la resistencia a la fractura a bajas tensiones por lo que ocasionalmente se añaden pequeñas cantidades de níquel.

Este último produce un fuerte efecto austenizante, a tal

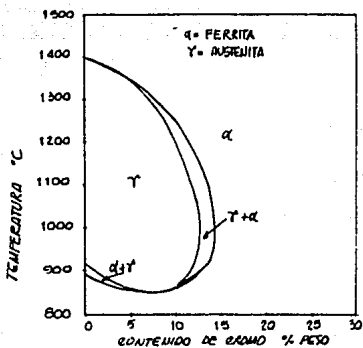


FIG. 4.2 MICROESTRUCTURAS PREDOMINANTES  
PARA EL ACERO INOXIDABLE CON  
MENOS DE 0.10% DE CARBONO

grado que en proporciones de 8% la fase austenítica se hace estable a temperatura ambiente.

Dentro de la clasificación AISI se encuentran los aceros que emplean manganeso y nitrógeno como sustitutos del níquel para obtener su efecto microestructural, dicho de otra manera: son aceros austeníticos.

La necesidad de mayor resistencia conduce a elevar los contenidos de carbono y a la adición de elementos especiales como aluminio, titanio y columbio, que precipitan con el tratamiento térmico de envejecimiento y endurecen la aleación en forma similar a como ocurre con las aleaciones base níquel y base aluminio. Cabe mencionar que a estos aceros se les denomina "endurecibles por precipitación" y que pueden poseer matrices martensíticas, semiausteníticas o austeníticas.<sup>(7)</sup>

#### CLASIFICACION DE LOS ACEROS INOXIDABLES:

Según the American Iron and Steel Institute el sistema consta de 3 números, los dos últimos números no tienen significado específico, pero el primero indica el grupo como sigue:

- |       |  |
|-------|--|
| 2 X X | Cromo-Níquel-Manganeso; no endurecibles, austeníticos no magnéticos. |
| 3 X X | Cromo-Níquel no endurecibles, austeníticos no magnéticos.            |

- 4 X X Cromo; endurecibles, martensíticos magnéticos.
- 4 X X Cromo; no endurecibles, ferríticos, magnéticos.
- 5 X X Cromo; bajo cromo, resistentes al calor.

#### ACEROS REFRACTARIOS:

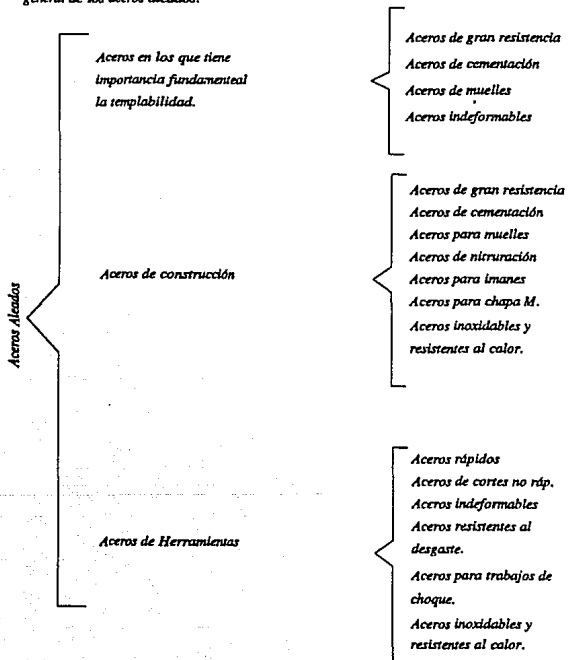
Los aceros refractarios son resistentes al calor sin perder sus propiedades mecánicas y de resistencia a la corrosión. Algunos de ellos son iguales en composición a los aceros inoxidable sobre todo los que se fabrican por piezas de trabajo en frío. Se fabrican generalmente en piezas coladas, tienen un porcentaje elevado de Carbono, así como de cromo (8/10% - 28/32%), N :(2% - 64/68%) y en algunos tipos cierta cantidad de otros elementos.<sup>(4)</sup>

#### ACEROS PARA HERRAMIENTA:

Son los aceros de alta aleación con los que se fabrican todo tipo de herramientas tales como: herramientas de mano, herramientas de corte, herramientas de formado de metales, etc. El contenido de aleantes es a base de Cr, V W, Mo y Co.

#### IV.4 ACEROS ALEADOS

A continuación señalaremos brevemente una clasificación general de los aceros aleados.



En esta tabla se señalan los aceros aledos de uso más frecuente clasificados en tres grupos. Se señalan los dos grupos clásicos de aceros de construcción y de herramientas, y además otro grupo en el que destaca la importancia de la templabilidad, y en él se incluyen los aceros de gran resistencia, muelles, cementación, etc. que aun perteneciendo a los otros dos grupos, interesa destacar por separado por la gran importancia que en ellos tiene la templabilidad.

En realidad lo que se desea con ello es señalar que uno de los efectos más importantes que ejercen los elementos de aleación en estos aceros, es facilitar el temple cuando se trata de piezas de gran espesor, perfiles complicados, etc.

## C A P I T U L O V

### TRATAMIENTOS TERMICOS DE LOS ACEROS

#### V.1 CURVAS T.T.T.

Fundamentalmente en los diagramas T.T.T. (que significan temperatura-tiempo-transformación, también llamados curvas S o de transformación isotérmica (T.I.)); se puede resumir la transformación de la austenita en un acero dado. Es decir, se emplean para predecir las estructuras metalográficas. Estos diagramas indican también, el tiempo necesario para que la austenita se transforme a una temperatura que se mantiene constante. De esta forma, la información que proporcionan los diagramas TTT, sólo es válida para reacciones isotérmicas pero no es cuantitativamente aplicable al temple y recocido ordinarios, porque en ellos el enfriamiento es continuo y las descomposiciones se producen en un intervalo de temperatura.

Cuando en el enfriamiento continuo las velocidades son superiores a unos  $140^{\circ}\text{C/s}$ , no se forma perlita y se asegura la transformación total en martensita al alcanzarse las temperaturas bajas. Con enfriamientos a velocidades inferiores a los  $34^{\circ}\text{C/s}$  toda la austenita tiene tiempo de descomponerse en perlita y no se origina martensita.<sup>(5)</sup>

Los pasos que generalmente se siguen para determinar un diagrama de transformación isotérmica son:

1. Preparar un gran número de muestras cortadas de la misma barra. Un método para manejar las pequeñas muestras durante el tratamiento térmico consiste en pasar un alambre por un agujero en la muestra, como se ve en la figura 5.1:





FIG. 5.1 MUESTRA TIPICA PARA DETERMINAR UN DIAGRAMA T-I.

2. Colocar las muestras en un horno o en un baño de sal fundida a la temperatura de austenización adecuada. Para un acero 1080 (eutectoide) esta temperatura es de aproximadamente de 142°F. Se deben dejar a la temperatura dada por un tiempo suficiente para que lleguen a ser austenita por completo.
3. Colocar las muestras en un baño de sal fundida que se mantenga a una temperatura constante subcritica (una temperatura por debajo de la línea  $A_{c1}$ ), por ejemplo 1300°C.
4. Después de variar el intervalo de tiempo en el baño de sal, cada muestra se temple en agua fría o en salmuera enfriada con hielo.
5. Después del enfriamiento, a cada muestra se le toma la dureza y se estudia microscópicamente.
6. Los pasos anteriores se repiten a diferentes temperaturas subcríticas hasta que se determinan suficientes puntos para graficar la curva en el diagrama.

Las curvas de reacción isotérmica (de Avrami) como la mostrada en la siguiente figura 5.2:

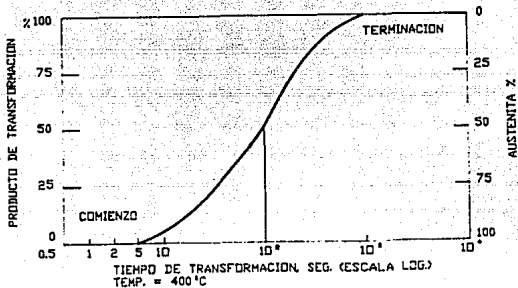


FIG. 52 CURVA DE TRANSFORMACION ISOTERMICA PARA AUSTENITA METAESTABLE A 400 °C

proporcionan los datos para construir un diagrama TTT. Ya que por ejemplo se pueden graficar dos puntos a una temperatura determinada (esta temperatura es la temperatura constante subcrítica a la cual se colocan las muestras en un baño de sal fundida) es decir, el tiempo para el principio y para el tiempo final de la transformación. El experimento completo se repite a diferentes temperaturas subcríticas hasta que se determinan suficientes puntos para dibujar una curva que muestre como ya se dijo el principio y el fin de la transformación, y una curva punteada entre ambas que muestre el 50% transformado.

Las principales muestras del diagrama T-I se dibujan como líneas gruesas para destacar que su localización exacta sobre la escala tiempo no es altamente precisa. A menudo, porciones de

estas se muestran como líneas punteadas para indicar un grado de incertidumbre mucho mayor. El tiempo se grafica sobre una escala logarítmica, de manera que periodos de 1 min. o menos, así como periodos de 1 día o de una semana, pueden fijarse en un espacio razonable y además permiten una escala abierta en la región de periodos cortos.

El diagrama TTT consta de dos áreas que corresponden a comportamientos distintos de la austenita enfriada instantánea a una temperatura en la que este material es metaestable. Arriba de la temperatura  $M_s$  la austenita experimenta una transformación reconstructiva (en el cual el proceso de crecimiento involucra la reorganización de la fase inicial (austenita) a una fase o fases completamente distintas (ferrita y  $Fe_3C$ ) a una o ambas de las fases estables, la ferrita y un carburo similar al  $Fe_3C$ ). Existen varias regiones de transformación como puede verse en la figura 5.3 presentada, pero una característica común es una curva de reacción isotérmica del tipo de Avrami. Abajo de la temperatura  $M_s$ , la austenita se transforma desplazativamente para formar martensita. La magnitud de la reacción aumenta con el subenfriamiento abajo de  $M_s$ , pero a una temperatura dada, la magnitud característica de la reacción se alcanza en unos 10-6 seg. Por ejemplo, cuando se enfría bruscamente la austenita de 850° a 300°C, se forma 50% de martensita durante el enfriamiento entre la temperatura  $M_s$  y 300°C. Si se mantiene entonces la probeta a esta temperatura, prácticamente no se formará martensita.<sup>(14)</sup>

Si el contenido de carbono de un acero no es el valor eutectoide 0.8 % C, puede ocurrir una reacción proeutectoide (anterior a la reacción eutectoide) cuando se enfría la austenita desde unos 900°C. En el acero de 0.4% de C de la fig.

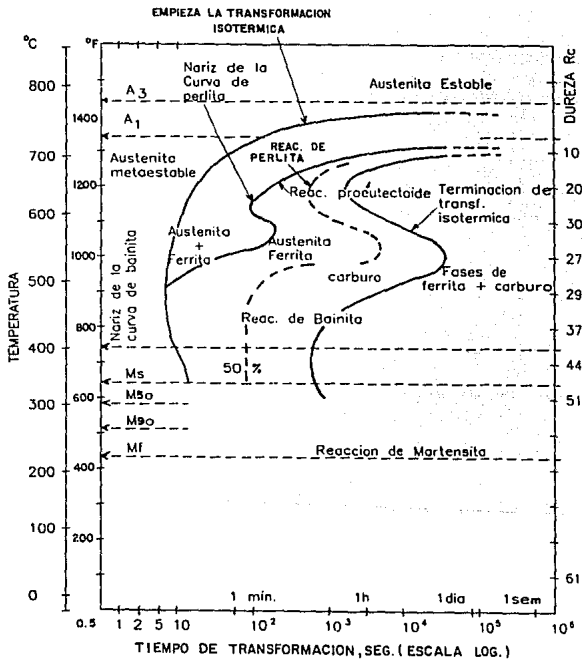


FIG.- 5.3 DIAGRAMA TIEMPO-TEMPERATURA TRANSFORMACION PARA UN ACERO 4140

5.3 la reacción proeutectoide produce la fase ferrita. Para contenidos de carbono mayores que el eutectoide (aceros hipoeutectoides) puede formarse cementita proeutectoide durante el enfriamiento lento como una capa frágil objetable en las fronteras originales del grano de austenita. Cuando las herramientas de acero al alto carbono (brocas, cuchillos, etc.) se enfrían bruscamente durante su tratamiento térmico se evita esta reacción proeutectoide. En el tratamiento térmico de los aceros hipoeutectoides (con menos carbono que el eutectoide), la ferrita proeutectoide puede formar una indeseable red de frontera si la rapidez de enfriamiento es demasiado lenta.

En la reacción de perlita (eutectoide), fig. 5.4 la nueva característica significativa es el crecimiento cooperativo de dos fases: un producto de alto carbono,  $Fe_3C$ , y la fase de ferrita de bajo carbono.

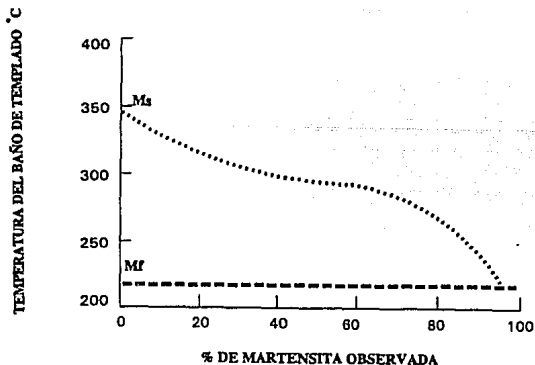


FIG. 5.4 GRÁFICA REPRESENTATIVA DEL % DE MARTENSITA VS TEMPLE DEL BAÑO DE T.

La disposición en laminillas de las dos fases en la morfología perlítica, permite una redistribución conveniente de carbono en la austenita, entre ferrita y el  $Fe_3C$ .

La transformación isotérmica de la austenita a temperaturas comprendidas en el intervalo de aproximadamente  $350^{\circ}$  a  $550^{\circ}C$  produce el microconstituyente bainita. Como sucede con la perlita, la bainita es una mezcla de ferrita y  $Fe_3C$ , pero en vez de haber crecimiento cooperativo de las dos fases, se inicia este por la formación de placas de ferrita en los aceros de contenido moderado de carbono. La fase  $Fe_3C$  se forma entonces paralelamente a las placas de ferrita en los aceros de contenido moderado de carbono, o bien dentro de éstas. Como lo indican los valores de dureza Rockwell (RC) en el diagrama TTT de la figura 5.3, la dureza de un acero dado aumenta a medida de que se forma el producto de transformación a temperaturas sucesivamente menores, en el orden: ferrita proeutectoide, perlita y bainita. Una causa importante en este comportamiento, además de la reducción del espaciamiento entre las regiones de carburo, es el incremento correspondiente de la densidad de las dislocaciones.<sup>(10)</sup>

## V.2 CURVAS T.E.

Las curvas T.E. llamadas también de enfriamiento continuo se parecen a las TTT, pero como su nombre lo indica, se refieren a la descomposición de la austenita en un enfriamiento continuo y no a temperatura constante (aunque la mayoría de los tratamientos térmicos incluyen la transformación a enfriamiento continuo. La curva de enfriamiento se determina experimentalmente colocando un termopar en un lugar definido a una muestra de acero y midiendo la variación de la temperatura con el tiempo.<sup>(5)</sup> De esta forma, aunque las curvas de Enfriamiento se parezcan a las curvas TTT, teóricamente, las curvas de rapidez de enfriamiento no deben sobreponerse en el diagrama T.I. como se muestra a continuación en la fig. 5.5:

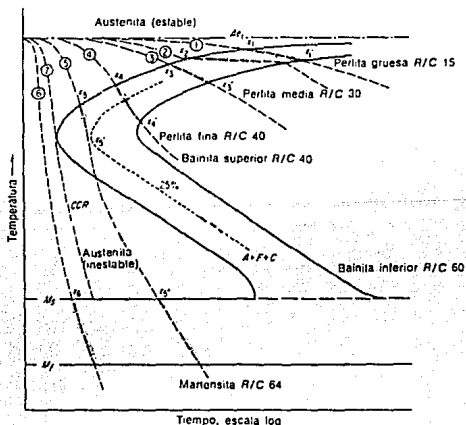


FIG. 5.5 CURVAS DE ENFRIAMIENTO CONTINUO SOBREPUESTAS EN UN DIAGRAMA HIPOTETICO T-I PARA UN ACERO EUTECTOIDE. LA PORCION HACHURADA INDICA LA TRANSFORMACION.

Las curvas de enfriamiento están numeradas del 1 al 7 y cada una representa diversas velocidades de enfriamiento.

La curva 1 tiene la más baja velocidad de enfriamiento, empieza su transformación en  $X_1$  y la completa en  $X_1'$ . Aunque el cambio de temperatura durante la transformación fue pequeño, el tiempo de transformación fue relativamente grande. La estructura del material transformado es perlita gruesa (material suave y dúctil) y ésta podrá retener su estructura a medida que sea enfriada de  $X_1'$  hasta la temperatura ambiente independiente de la velocidad de enfriamiento. La curva 1 es típica de un recocido convencional. La curva 2 es también un proceso de recocido. Sin embargo el material es primero enfriado más rápidamente hasta la temperatura seleccionada,  $X_2$  y permanece dentro del área de transformación con un pequeño cambio de temperatura. Como resultado de esto se obtiene algo de estructura perlítica fina distribuida uniformemente.

La curva 3 es típica de lo que se llama normalización la cual es realizada a una temperatura algo mayor que para un recocido (curva 1). La estructura resultante es una perlita media. La curva 4 tiene velocidad de enfriamiento mayor que la curva 3 produce una estructura perlítica fina.

- La curva 5 es de mucho interés porque resulta una microestructura mixta y tiene una pendiente de 25% con respecto a la línea A+F+C dentro de la región de transformación. En  $X_5$  empieza a transformarse la perlita fina y completa su transformación en  $X_5'$ . En este punto, sólo el 25% de la austenita inestable ha sido transformada a perlita fina. Queda un 75% a transformarse. Una inspección del punto  $X_5'$  abajo de la línea sombreada indica que la curva de enfriamiento son líneas de corte



(no mostradas en el diagrama) con menos de 25% de perlita.

Por lo tanto no se tendrá más transformación abajo del punto Xs' hasta que el enfriamiento llegue a Xs" en cuyo punto el 75% de la austenita empezará a convertirse en martensita completándose su cambio en la línea Mf. La estructura resultante consiste de 25% de perlita dentro de una matriz martensita de 75%.

La curva 6 representa un templado extremadamente rápido en la que se muestra que la microestructura total es martensítica. La curva 7 que es tangente a la "rodilla" de la curva de transformación, representa la velocidad de enfriamiento límite para producir estructura martensítica completa. Esta velocidad límite de enfriamiento es la velocidad crítica de enfriamiento. Es de importancia mencionar que las curvas de enfriamiento 4,5,6 y 7 generalmente se usan en el revenido para la relevación de esfuerzos internos.<sup>(6)</sup>

Del diagrama T-I, como ya se dijo, es posible derivar otro diagrama que muestra la transformación bajo enfriamiento continuo (Diagrama T-E). La siguiente fig-5.6 muestra el diagrama T-E para un acero eutectoide sobrepuesto en el diagrama T-I del que se derivó. La consideración del diagrama T-I en cuanto a su localización de las líneas del diagrama T-E muestra que la nariz se movió hacia abajo y a la derecha por enfriamiento continuo. La rapidez crítica de enfriamiento tangente a la nariz del diagrama T-E se muestra como 250°F/s. Esta rapidez es un poco más lenta que la indicada por el diagrama T-I; por lo tanto el uso de los intervalos de tiempo de la "nariz" isotérmicos para determinar las rapidezces de enfriamiento necesarias conducirá a algún error; sin embargo, el error estará del lado seguro

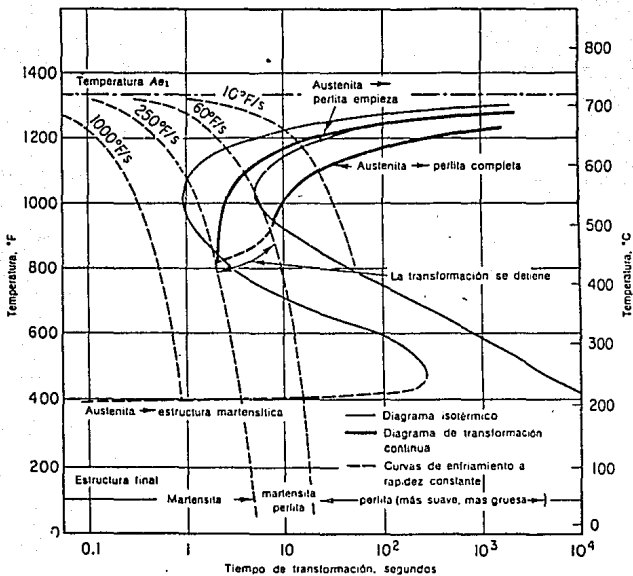


FIG. 5.6. DIAGRAMA DE TRANSFORMACION A ENFRIAMIENTO CONTINUO (T-t) DERIVADO DEL DIAGRAMA DE TRANSFORMACION ISO-TERMICA PARA UN ACERO AL CARBONO EUTECTOIDE.

indicando la rapidez de enfriamiento ligeramente mayor que la necesaria para formar solo martensita. Nótese la ausencia de una región austenita a bainita en el diagrama T-E. En este acero, el intervalo de bainita está "cubierto por la nariz sobresaliente de perlita, y la bainita no se forma en una cantidad apreciable a enfriamiento continuo ordinario. Esta situación suele ser diferente para aceros de aleación.

La siguiente fig.5.7 muestra el diagrama T-E para un acero de aleación triple. Este es un acero hipoeutectoide, de modo que existe un área adicional, austenita a ferrita, que no estaba presente en el acero eutectoide. En este acero de aleación, la zona perlítica está relativamente lejos hacia la derecha y no abarca la región de bainita. De este modo con rapidez de enfriamiento entre  $2100^{\circ}$  y  $54000^{\circ}$ F/hr, no es posible obtener grandes cantidades de bainita en la microestructura. Nótese que la rapidez de enfriamiento tangente a la "nariz superior" ( $2100^{\circ}$  F/hr) no es la crítica de enfriamiento. La rapidez de enfriamiento Tangente a la "nariz inferior" o "rodilla del diagrama ( $54000$  F/hr) tendría que excederse para formar sólo martensita. (5)

Los estudios isotérmicos han ayudado bastante a clasificar la microestructura de acero transformado durante un enfriamiento continuo, y con el diagrama T-I es posible ver en que etapa del ciclo de enfriamiento se forman las diferentes estructuras.

Nota: Los diagramas T-E no se encuentran disponibles para muchos aceros, incluso son difíciles de determinar con precisión las velocidades de enfriamiento. En lugar de esto, se usa la prueba Jominy (de la que más tarde se hablará) para comparar la templabilidad de los aceros.

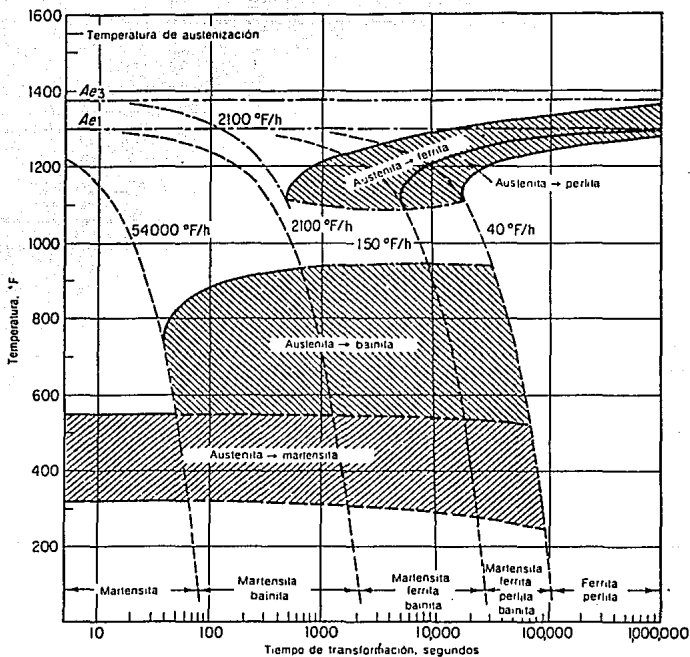


FIG. 5.7 DIAGRAMA T-E DE UN ACERO DE TRIPLE ALEACION (4340):  
 0.42% DE CARBONO, 0.78% DE MANGANESO, 1.79% DE NIQUEL  
 0.80% DE CROMO, 0.33% DE MOLIBDENO.

### V.3 PRUEBA O ENSAYO DE TEMPLABILIDAD POR ENFRIAMIENTO DE LA PUNTA O PRUEBA JOMINY

La templabilidad se puede definir como la característica de un acero que determina su profundidad y uniformidad de la dureza resultado del templado, o bien puede definirse como la capacidad de un acero de formar martensita en condiciones dadas de tratamiento térmico. Recordemos entonces que el enfriamiento brusco eficaz de la Austenita para producir martensita depende de tres factores: la composición del acero, el medio de enfriamiento (agua, aceite, etc.) y el tamaño de la pieza de acero (por ejemplo el diámetro de una barra redonda). Además de que la Austenita se transforma en martensita siempre que el enfriado sea lo suficientemente rápido para que la curva de enfriamiento pase a la izquierda de la "nariz" del diagrama.

Debemos saber sin embargo, que debido a que para cierto grado de acero de carbón o de aleación se puede tener variación en su composición química especificada, muchas barras del mismo diámetro y sujetas a tratamiento térmico idéntico tendrán diferentes valores de dureza tanto en sus superficies como en sus interiores. La ventaja del acero aleado radica en su gran capacidad de templado. Otros factores que afectan la templabilidad son las relaciones tamaño forma del componente y la condición de su superficie.

La prueba Jominy (fig. 5.8) es un procedimiento de laboratorio para medir la templabilidad de un acero. En la prueba los parámetros que afectan la profundidad de la dureza son constantes de un espécimen a otro. Debido a que la única variación en los especímenes es la composición química, la

(1) La muestra estándar se temple en un extremo

(2) La dureza se mide a lo largo del espécimen

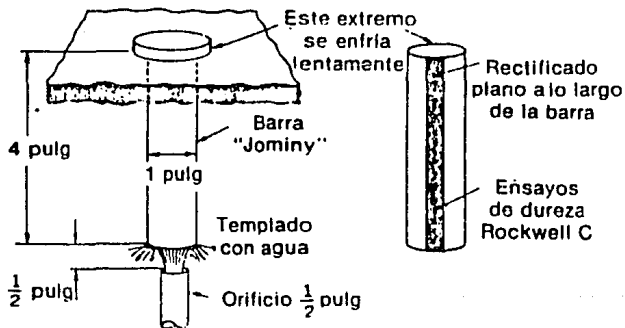


FIG. 5.8 PRUEBA JOMINY DE TEMPLABILIDAD

templabilidad solo puede ser indicada por la profundidad de endurecimiento. Se prepara una probeta estándar y se austeniza en la manera normal para el acero dado. Es decir, el espécimen de la prueba es una barra de 1 pulg. de diámetro y 4 pulg. de largo teniéndose un diámetro mayor en el extremo con el fin de poderlo colgar verticalmente en un sostén fijo. La barra es calentada hasta una temperatura adecuada de austenización en una atmósfera inerte (para evitar la formación de cascarillas) es sacada del horno y colgada verticalmente en un sosten fijo. Se le pasa una corriente de agua a  $75 \pm 5^{\circ}\text{F}$  en el extremo inferior del espécimen colgado. El diámetro de la tobera es 1/2 pulg. y la presión es tal que se puede desarrollar una columna de agua de 2 1/2 con la tobera en posición vertical. Cuando el aparato haya sido ensamblado, la parte inferior del espécimen queda 1/2 pulg. arriba de la tobera. Como resultado de esto, después del choque en el extremo inferior del espécimen, el agua que fluye forma una figura esférica.<sup>(9)</sup>

El enfriamiento brusco, se hace sólo en uno de los extremos de la probeta por medio de un chorro estándar de agua. Así la intensidad del enfriamiento variará a lo largo de la barra desde un máximo cerca del extremo enfriado ( $\sim 300^{\circ}\text{C/s}$ ) hasta un mínimo en el otro extremo ( $\sim 3^{\circ}\text{C/s}$ ).<sup>(10)</sup>

En correspondencia con este intervalo de intensidades de enfriamiento hay una intensa gama de formas de transformación de la austenita; por lo tanto, la martensita es el producto usual en el extremo enfriado bruscamente, pero la perlita y/o la bainita aumenta en cantidad hacia el extremo de la probeta que se enfría con lentitud. La medición de la dureza Rockwell C sobre una zona plana esmerilada a lo largo de toda la probeta enfriada, da una indicación fidedigna de la estructura.

Por lo tanto, un acero con buena templabilidad es aquel para el cual el valor de las durezas no bajan muy rápidamente con respecto a las distancias medidas en el extremo templado. Tal acero es llamado de endurecimiento profundo, y los que no forman parte de este grupo son los de endurecimiento no profundo.

Debido a que los resultados de la prueba Jominy han probado ser reales, resulta posible seleccionar un acero por templabilidad con parámetros igual que para el caso de composición química, tamaño de granos, etc. lo cual hace que esto último sea menos importante. La AISI y la SAE mancomunadamente han establecido bandas de templabilidad Jominy mínimas y máximas y han sido determinadas en cientos de tratamientos térmicos hecho para cada acero de diferentes grados. Los aceros que son especificados y comerciados sobre esta base son designados por la letra H. En la figura 5.9 se muestra al acero 4140H el cual puede comprarse sobre la base de banda de templabilidad. Los aceros H están garantizados para satisfacer la templabilidad mínima y máxima. Estos aceros con las posibles variaciones de templabilidad mínima y máxima no deben confundirse con los aceros que están definidos de acuerdo a los límites de su composición química. En la fig. 5.10 se muestra esta distinción para el acero 4140.

Para usar las curvas de la fig. 5.10, es necesario conocer la dureza en algún punto interno de alguna barra de acero en particular. Estas curvas también pueden usarse para determinar el contenido de carbón (usando la relación entre carbón y dureza) de un acero satisfactoriamente templado y revenido. Se disponen de series completas de gráficas para otros materiales diferentes a los mostrados en la fig. 5.10.



bI

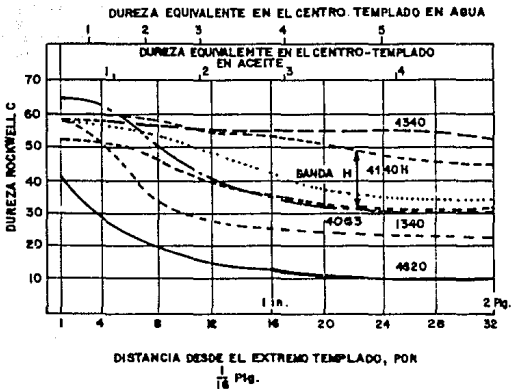


FIG- 5.9 BANDAS DE TEMPLABILIDAD DE UN ACERO 4140.

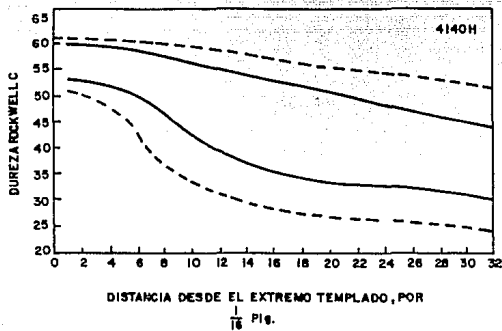
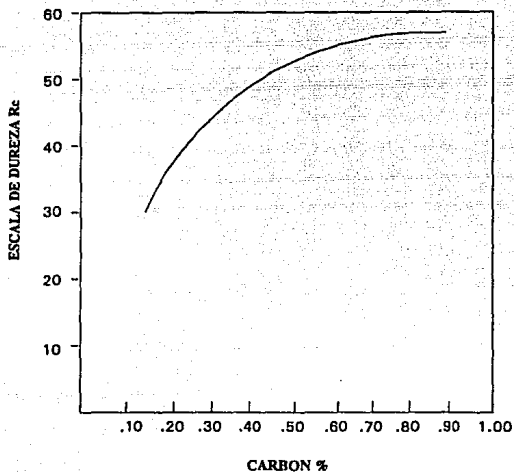


FIG.- 5.10 CURVA DE UN ACERO 4140H USADA PARA DETERMINAR EL CONTENIDO DE CARBON.



**FIG. 5.11 GRAFICA REPRESENTATIVA DE LOS DIFERENTES PORCENTAJES DE FORMACION DE MARTENSITA**

También hay gráficas de dureza Rockwell contra contenido de carbón para diferentes porcentajes de formación de martensita. La fig. 5.11 es representativa de dichas gráficas y quizá sea la de mayor utilidad. Esta podrá ser usada para diseñadores inexpertos para hacer la selección de un acero de suficiente dureza después del templado y revenido con el fin de lograr propiedades óptimas de cedencia. (9)

#### V.4 TRATAMIENTOS TERMICOS ESPECIFICOS

Los tratamientos térmicos son procesos que modifican las propiedades mecánicas de los metales por un cambio adecuado de su estructura metalúrgica. Los tratamientos térmicos no son iguales para todos los metales y con frecuencia las operaciones que se aplican a uno de ellos para endurecerlo, a otro metal lo suaviza. De esta manera, un tratamiento térmico pudiera ser para darle más resistencia y endurecimiento a un metal, relevando esfuerzos internos o sólo para endurecimiento de su superficie o para mejorar su maquinabilidad por esferoidización.<sup>(4)</sup>

Los tratamientos térmicos clásicos que se aplican a los aceros son:

- Recocido
- Normalizado
- Temple
- Revenido
- Austemple
- Martemple
- Nitrurado

En otros metales como por ejemplo aleaciones Cu-Cr, Cu-Be, Aceros inoxidable endurecibles, Au-Cu, etc. se les da tratamientos térmicos de:

- Recocido de precipitación
- Homogeneización
- Recocido de envejecimiento

El principio teórico de estas técnicas se debe a los metalurgistas Norteamericanos Davenport y Bain, las cuales revelaron que el procedimiento clásico del enfriamiento continuo para el temple del acero, desde su temperatura de transformación hasta la temperatura ambiente producía en el acero templado una serie de grietas microscópicas, visibles solamente a un número de aumentos superior a 1.000, muy perjudiciales para sus características mecánicas. Deteniendo el enfriamiento a una temperatura conveniente y dejando al acero transformarse a esa temperatura (temple isotérmico) obtenían una estructura que para una misma dureza y una misma resistencia presentaban un alargamiento y una resistencia muy superiores a los que se obtenían por el método habitual de temple seguido de revenido. A partir de entonces la experiencia industrial ha permitido mejorar estas técnicas hasta conseguir aceros con características mecánicas óptimas, mínimo de deformaciones, supresión de grietas, disminución de las tensiones internas y eliminación de las grietas de rectificado en los aceros cementados y con la posibilidad de acabar con las piezas antes del tratamiento térmico reduciendo al mínimo las costosas operaciones de rectificado.

La parte más importante del diagrama hierro-carbono para el tratamiento térmico es la que involucra la transformación de la austenita de la región por abajo de la temperatura crítica inferior (fig.3.1) La transformación de la austenita con enfriamiento lento, principia en la línea de temperatura crítica superior  $A_1$  o  $A_{cm}$  (realmente la transformación tal vez empiece a alguna temperatura menor), en esta línea el hierro gama es transformado a alfa con una cantidad pequeña de carbón intersticial (que es ferrita). A medida que la temperatura continua bajando a través de la región de la transformación, se

precipita más carbón fuera de la solución formando cementita ( $Fe_3C$ ) porque el hierro alfa no puede retener tanto carbón como el hierro gamma.

A medida de que transcurre el enfriamiento la línea crítica inferior produce un acero hipoeutectoide (perlita y ferrita) y un acero hipereutectoide (perlita y cementita) o un acero eutectoide (perlita). El acero que eventualmente se produzca dependerá sólo del contenido de carbón.

Sin embargo, si la velocidad de enfriamiento es tal que la temperatura de transformación ( $A_1$  o  $A_{1.9}$ ) es mucho menor que la de transformación de equilibrio hará que se reduzca fuertemente el tiempo necesario para que el carbón se propague fuera de la solución. Como resultado de esto el hierro gamma en realidad no puede transformarse a hierro alfa porque el carbón permanece en la solución. En consecuencia se formará una solución sólida supersaturada de carbón.

Esta estructura es llamada martensita (también conocida como martensita fresca). La estructura de la martensita tiene un arreglo al azar de especie de agujas blancas y es muy dura e inestable. Es importante notar que el cambio de austenita a martensita involucra un aumento de volumen.

Resulta obvio que la velocidad a la cual toma lugar la transformación de la austenita a martensita es muy significativa por prevenir la formación de constituyentes suaves. Entonces para un acero de composición química fija y tamaño conocido de grano de austenita (osea temperatura de la austenita), hay una velocidad de enfriamiento que transforma

toda la austenita a martensita. Esta es la llamada velocidad crítica de enfriamiento. Si por alguna razón se suspende el enfriamiento durante la transformación entonces no podrá continuar la transformación. La temperatura a la cual la martensita empieza por primera vez a formarse se le designa como  $M_s$ . La temperatura a la cual se ha formado completamente la martensita se le designa como  $M_f$ . Sin embargo para una aleación cualquiera, la velocidad de enfriamiento no, tendrá efecto sobre la temperatura  $M_s$  o en el impedimento de la formación de martensita como ya se dijo anteriormente, es un agente que contribuye a la dureza del acero. El límite hasta el cual un acero puede ser endurecido dependerá solo del contenido de carbono, por ejemplo: Los aceros de alto contenido de carbón son templables, pero debido a la distorsión, alabeo o agrietamiento que resulta de un enfriamiento rápido su uso se limita a casos especiales.<sup>(5)</sup>

A continuación se describirán algunos de los tratamientos térmicos más utilizados:

#### RECOCIDO:

Es un proceso que involucra calentamiento y enfriamiento que se usa para inducir ablandamiento, es decir, es un proceso que consiste en caletar el acero a la temperatura adecuada y luego enfriar lentamente a lo largo del intervalo de transformación preferentemente en el horno o en cualquier otro material que sea buen aislante al calor.

Este término también se usa para cubrir tratamientos en los que se intente refinar el grano, eliminar esfuerzos, alterar propiedades físicas o mecánicas, producir una microestructura definida, mejorar las propiedades eléctricas y magnéticas, mejorar el maquinado y eliminar gases.



**NORMALIZADO:**

Es un proceso de ablandamiento, que se lleva a cabo calentando el acero aproximadamente  $100^{\circ}\text{F}$  por encima de la temperatura crítica superior ( $A_{\text{c1}}$  ó  $A_{\text{cm}}$ )<sup>(5)</sup> seguida por un enfriamiento en aire quieto hasta la temperatura ambiente. El propósito de la normalización es producir un acero más duro y más fuerte que el obtenido por recocido total, de manera que para algunas aplicaciones la normalización puede ser un tratamiento térmico final. Por lo tanto, para aceros hipereutectoides es necesario calentar por la línea  $A_{\text{cm}}$  a fin de disolver la red de cementita. La normalización también puede emplearse para mejorar la maquinabilidad, modificar y refinar las estructuras dendríticas de piezas de fundición, y refinar el grano y homogeneizar la microestructura para mejorar la respuesta en las operaciones de endurecimiento. El incremento en la rapidez de enfriamiento por aire cuando se compara con el enfriamiento por horno afecta en varias formas la transformación de la austenita y de la microestructura resultante. Como ya no se enfría en condiciones de equilibrio, el diagrama hierro-carburo de hierro no puede utilizarse para predecir las proporciones de ferrita y perlita proeutectoide o cementita y perlita proeutectoide que existirán a temperatura ambiente. Hay menos tiempo para la formación de la constituyente proeutectoide; en consecuencia habrá menos ferrita proeutectoide en los aceros normalizados hipoeutectoides y menos cementita proeutectoide en los aceros hipereutectoides en comparación con los aceros recocidos.

Para los aceros hipereutectoides, la normalización reducirá la continuidad de la red de cementita proeutectoide, y en algunos casos puede eliminarse por completo. Como la presencia de la red de cementita redujo la resistencia de los aceros recocidos

hipereutectoides, los aceros normalizados deben mostrar un aumento en resistencia.

Aparte de influir la cantidad de constituyente proeutectoide que formará, la mayor rapidez de enfriamiento en la normalización también afectará la temperatura de transformación de la austenita y la fineza de la perlita. En general, mientras más rápido sea el enfriamiento menor será la temperatura de transformación de la austenita y más fina será la perlita.

La siguiente figura 5.12 muestra la diferencia en espaciamiento de las placas de cementita en la perlita entre recocido y normalización. La ferrita es más suave en tanto que la cementita es más dura.

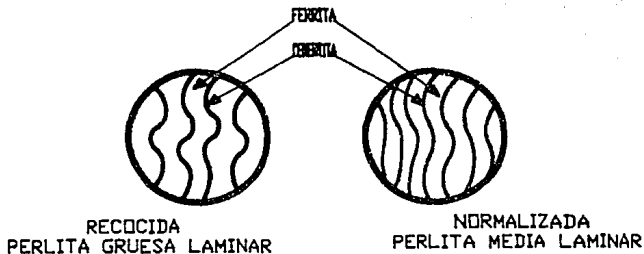


FIG. 5.12 DIFERENCIA EN ESPACIAMIENTO DE LAS PLACAS DE CEMENTITA EN LA PERLITA ENTRE RECOCIDO Y NORMALIZADO

En el caso de perlita normalizada media, las placas de cementita más próximas entre sí tienden a endurecer la ferrita de modo de que no cederá tan fácilmente, aumentando así la dureza. Si la perlita recocida gruesa tiene una dureza Rockwell C 10 aproximada, entonces la perlita normalizada media será Rockwell C 20 aproximadamente. El enfriamiento fuera del equilibrio también cambia el punto eutectoide hacia un contenido de carbono más bajo en los aceros hipoeutectoides y hacia un contenido de de carbono más alto en aceros hipereutectoides. El efecto neto es que la normalización produce una estructura de perlita más fina y más abundante que la obtenida por recocido, lo cual resulta en un acero más duro y más fuerte.

Sin embargo, hemos de saber que aunque el recocido, y la normalización pueden emplearse para mejorar la maquinabilidad, el proceso que se utilice dependerá del contenido de carbono.

#### REVENIDO:

Para comprender la razón para recalentar (revenir) el acero templado, se considerará brevemente la naturaleza de la martensita. Cuando se enfría hierro desde su condición austenítica (FCC), se transforma a la condición ferrítica (BCC) y es relativamente blando. Sin embargo, si la austenita contiene una cantidad consistente de carbono, la fase estable a la temperatura ordinaria no es sólo ferrita (con baja solubilidad para el carbono sino es una mezcla de ferrita y  $Fe_3C$ . Por lo tanto, cuando la austenita rica en carbono se enfría con la suficiente rapidez para que no pueda ocurrir una transformación reconstructiva a perlita o bainita, la austenita experimenta una transformación desplazativa a martensita, al pasar a la temperatura por el intervalo comprendido entre  $M_s$  y  $M_f$ . En esencia cada

átomo de hierro de la estructura reticular FCC intenta desplazarse una fracción del desplazamiento reticular hasta la posición correspondiente a la estructura BCC. Los átomos de carbono interfieren, empero, y por lo tanto, la estructura de la martensita (tetragonal centrada en el cuerpo es ligeramente distinta a la BCC. Los átomos de carbono atrapados en la martensita explica la dureza de ésta, pero también hacen que sea frágil. Es decir, este aumento en ductilidad generalmente se obtiene a costa de la dureza o de la resistencia.

En general, el objetivo que se persigue con el tratamiento térmico de revenido es disminuir la fragilidad de la martensita y eliminar también cualesquier esfuerzos internos producidos por la contracción térmica desigual que ocurre durante el enfriamiento brusco.

#### AUSTEMPER:

Es un proceso de endurecimiento donde la microestructura resultante es dura y tenaz (bainita) y no se tiene la necesidad del revenido. En este proceso el acero es enfriado arriba de la línea  $A_{c3}$  mediante un templado rápido en un baño de sal fundida hasta una temperatura justo arriba de  $M_s$ . Mientras se permanezca en el baño el acero, es isotérmicamente transformado en bainita, después de lo cual, se le deja enfriar en aire. La bainita resultante es desde luego dura, pero no tan tenaz como la martensita. El proceso por lo general, se aplica para piezas pequeñas.

## MARTEMPER:

En el martemper, el acero es templado (por lo regular, en un baño de sal fundida) a una temperatura ligeramente mayor a  $M_s$ . Este permanece en el baño, hasta que todas las secciones transversales del acero estén a la temperatura del baño. Después se saca el acero del baño, se le deja enfriar en aire hasta que se forme la martensita, y después es revenida como se muestra en la fig. 5.13:

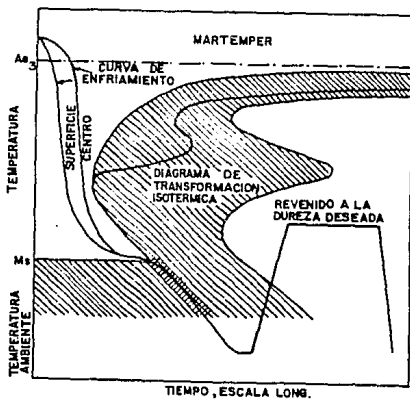


Fig. 5.13 TRATAMIENTO TERMICO DE MARTEMPER

La finalidad del martemper es prevenir la distorsión y cualquier tendencia a producir agrietamiento por templado. Las piezas grandes de acero que deban templarse a durezas altas

están propensas a quedar con estas características indeseables. Si la velocidad del templado no es lo suficientemente rápida, pudiera no pasar por completo " la rodilla", con el resultado de tener algo de bainita en la estructura final. Sin embargo, la distorsión y tendencia a agrietarse serán grandemente minimizadas.

#### TEMPLADO O TEMPLE:

Es un enfriamiento rápido de un metal que está a temperatura elevada mediante el rociado de un medio adecuado para efectuar el templado hasta el incremento de la dureza propuesta. Es decir, en este proceso, se calienta este metal para convertirlo en austenita y luego enfriarlo bruscamente para cambiarlo a la dura (aunque frágil) martensita. Si sólo ciertas partes de la pieza van a ser endurecidas entonces debe usarse un templado diferencial.

#### ESFEROIDIZACION:

Es un proceso de calentamiento o enfriamiento que produce un carburo de forma globular o esférico. La esferoidización para aceros de bajo carbón se efectúa con objeto de obtener ciertos requisitos de resistencia antes de un subsecuente tratamiento térmico. Los aceros de alto carbón son esferoidizados para mejorar la maquinabilidad, especialmente en operación de cortado continuo, tales como en tornos y en máquinas para hacer roscas. Los aceros de herramienta también pueden ser esferoidizados. Esto se hace calentándolo hasta una temperatura ligeramente superior a una temperatura crítica manteniéndolo en

esta temperatura mediante un período de tiempo y después se le deja enfriar en el horno. La esferoidización tiende también a mejorar la resistencia a la abrasión y esto es deseable cuando el material va a ser fuertemente trabajado en frío (por ejemplo, extrusión, flexión, estirado o acortado).

#### NITRURACION:

Es un proceso en el cual las piezas ya maquinadas y tratadas térmicamente son colocadas en una atmósfera de nitrógeno (gas amoníaco) dentro de una caja hermética al aire y calentada, de 950-1000°F. Después de un período de exposición al amoníaco se le deja enfriar lentamente al acero. La superficie es endurecida por el nitruro de hierro, el cual es formado al soltarse el nitrógeno y combinarse con el hierro. Como resultado de lo anterior, no se requiere del templado y por lo mismo los aceros nitrurados no están propensos a torcerse. La nitruración se aplica a ciertos aceros de aleación que contienen elementos tales como aluminio, cromo, molibdeno o vanadio. Estos aceros aleados nitruran mejor que los aceros al carbón. Acero Nitralloy es el nombre que se le da a un grupo especial de aceros (Por ejemplo, Nitralloy N, es un producto de la Nitralloy Corporation). Las propiedades del núcleo de la pieza a la que se le va a dar el tratamiento térmico previo no resultan afectadas por las temperaturas dadas hasta menos de 950°C. Los aceros Nitralloy son maquinables tanto para el caso de tratamiento térmico como de un estado de recocido. Antes de la nitruración, la pieza debe ser recocida para relevar los esfuerzos debidos a la laminación, forja ó maquinado. Las pie-

zas que no requieran de tratamiento térmico dederan maquinarse hasta las dimensiones requeridas.

La nitruración produce una superficie extremadamente dura y es excelente para resistir el desgaste. El proceso tiene efectos benéficos sobre el esfuerzo de fatiga de la pieza tratada.

La nitruración tiene algunas desventajas: el costo elevado del material, el procedimiento es más crítico que para otros, el recocido de las piezas antes de la nitruración y la limitación de maquinado a sólo esmerilado.

Algunas aplicaciones típicas para nitruración son camisas interiores de cilindros y bombas, engranes, espigas, pernos de pistones, ejes de bombas, asientos de válvulas, rodillos para estirado de alambre, etc.<sup>(9)</sup>



## CAPITULO VI

## DIAGRAMAS DE FASE DE LOS ACEROS MAS COMUNES

## VI.1 INFLUENCIA DEL CARBONO EN EL Fe

La temperatura a la que tienen lugar los cambios alotrópicos en el hierro esta influida por elementos de aleación de los cuales el más importante es el carbono. Sabemos, sin embargo, que el efecto más importante de las aleaciones es el cambio de la austenita; siendo así posible clasificar todas las aleaciones con base al efecto que tienen de contraer o expandir la región  $\gamma$ . Aunque el carbono es considerado como un elemento intersticial que no produce regiones austeníticas o familias completamente abiertas, tiene la capacidad de expandir la región  $\gamma$  tal como se muestra en la figura 6.1:

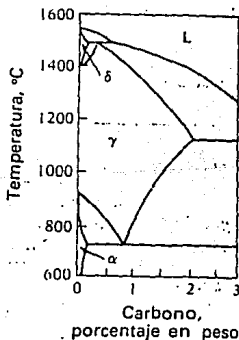


FIG. 6.1 ESTRUCTURA DEL DIAGRAMA DE LA INFLUENCIA DEL CARBONO EN EL HIERRO.

Como ya se dijo, el contenido de carbono de un acero determina también la temperatura necesaria para producir la fase austenítica (para su conversión subsecuente en martensita). Un acero de 0.4 %C, por ejemplo, contendría sólo alrededor de 50% de austenita si se calentara apenas arriba de 733°C. Para obtener 100% de austenita durante un tiempo convenientemente corto de calentamiento (1 hr por pulgada de espesor), debe alcanzarse temperatura de unos 830°C. Tratándose de aceros al alto carbono, en cambio la austenitización puede lograrse a temperaturas ligeramente superiores a la eutectoide. Estas temperaturas bajas tienen la ventaja de mantener un pequeño grano de austenita (necesario para obtener buena resistencia al impacto), y también reducir la posibilidad de alabeo o agrietamiento durante el enfriamiento brusco del templado.<sup>(8)</sup>

Un resumen de los efectos de varios elementos se dan en la figura 6.2. Es interesante observar que todos los elementos del grupo B y el manganeso expanden la región  $\gamma$ , mientras que los otros elementos de transición la contraen.

	1		2		3		4		5		6		7		8		
	a	b	a	b	a	b	a	b	a	b	a	b	a	b	a	b	
1													1 H			2 He	
2	3 Li ▲		4 Be ●		5 B ○		6 C □		7 N □		8 O ▲?		9 F			10 Ne	
3	11 Na ▲		12 Mg ▲		13 Al ●		14 Si ●		15 P ●		16 S ▲		17 Cl			18 Ar	
4	19 K ▲		20 Ca ▲		21 Sc		22 Ti ●		23 V ●		24 Cr		25 Mn ■		26 Fe	27 Co ■	28 Ni ■
		29 Cu □		30 Zn □?		31 Ga		32 Ge ●		33 As ●		34 Se		35 Br			36 Kr
5	37 Rb ▲		38 Sr ▲		39 Yt		40 Zr ○		41 Nb ●		42 Mo ●		43 Tc		44 Ru ■	45 Rh ■	46 Pd ■
		47 Ag ▲		48 Cd ▲		49 In		50 Sn ●		51 Sb ●		52 Te		53 I			54 Xe
6	55 Cs ▲		56 Ba		58 Ce ○		72 Hf		73 Ta ●		74 W ●		75 Re		76 Os ■	77 Ir ■	78 Pt ■
		79 Au □		80 Hg ▲		81 Tl ▲		82 Pb ▲		83 Bi ▲		84 Po		85 At			86 Rn
7	87 Fr		88 Ra ▲		89 Ac		90 Th		91 Pa		92 U						

- Abre la región y □ Expande la región y ▲ Disoluble  
● Cierra la región y ○ Contrae la región y

FIG. 6.2 TABLA PERIÓDICA QUE MUESTRA LOS EFECTOS DE VARIOS ELEMENTOS EN LA REGIÓN γ DEL HIERRO.

## VI.2 DIAGRAMA DE FASE Fe-Cr

El cromo es un elemento de aleación menos costoso que el níquel y forma carburos simples ( $Cr_7C_3, Cr_4C$ ) o carburos complejos  $\{(FeCr)_nC\}$ . Estos carburos tienen alta dureza y buena resistencia al deterioro. El cromo es soluble hasta el 13% en hierro  $\gamma$  y tiene solubilidad ilimitada en ferrita  $\alpha$ . En los aceros de bajo carbono, el cromo tiende a entrar en la solución, incrementando de esta manera la resistencia y la tenacidad de la ferrita. Cuando el cromo esta presente en cantidades que exceden al 5%, las propiedades a altas temperaturas y la resistencia a la corrosión del acero se ven ampliamente mejoradas.

El efecto que hace el cromo sobre el campo de la austenita es el de reducirla, tal como se muestra en la siguiente figura 6.3:

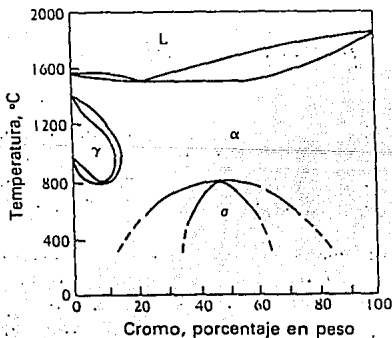


FIG. 6.3 INFLUENCIA DEL CROMO EN EL HIERRO.

Los aceros al cromo de la serie 51xx contienen entre 0.15 y 0.64% de carbono y de 0.70 a 1.15% de cromo. Los aceros aleados de bajo carbono de esta serie generalmente se carburizan. La presencia del cromo aumenta la resistencia al desgaste de la superficie endurecida, pero la tenacidad en la parte interna no es tan alta como la de los aceros al níquel. Al medio carbono, estos aceros son endurecibles en aceite y se utilizan para resortes tornillos para motores, pernos, ejes etc. Un acero aleado (52100) al alto carbono (1%) y al alto cromo (1.5%) se caracteriza por la gran dureza y resistencia al desgaste. Este acero se utiliza ampliamente para cojinetes de bolas y rodillos y para maquinaria de trituración. Un tipo especial de acero al cromo con 1% de carbono y de 2 a 4% de cromo tiene excelentes propiedades magnéticas y se emplea para imanes permanentes. (6)

Los aceros al alto cromo que contienen más del 10% de cromo son notables por su alta resistencia a la corrosión.

## VI.3 DIAGRAMA DE FASE FE-NI

El níquel es uno de los más viejos y el más fundamental de los elementos de aleación de los aceros. Tiene ilimitada solubilidad en hierro gamma ( $\gamma$ ) y es altamente soluble en ferrita, contribuyendo a la resistencia y tenacidad de esta fase. Además, disminuye las temperaturas críticas del acero, amplía el intervalo de temperatura para un tratamiento térmico exitoso, retarda la descomposición de la austenita y no forma carburos que pueden resolverse con dificultad durante la austenización.

La estructura del diagrama 6.4 que puede verse a continuación:

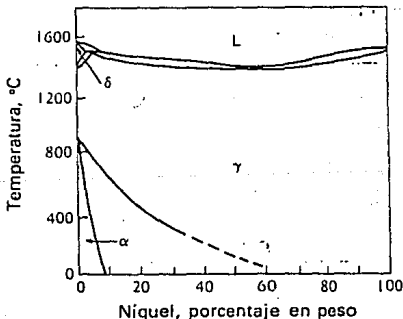


FIG. 6.4 INFLUENCIA DEL NIQUEL EN EL HIERRO.

Asimismo, reduce el contenido de carbono del eutectoide; por lo tanto, la estructura de los aceros no endurecidos al níquel contiene mayor porcentaje de perlita que los aceros al carbono tratados de manera similar. Como la perlita se forma a una temperatura menor, es más fina y tenaz que la de los aceros no aleados. Estos factores permiten obtener ciertos niveles de resistencia con inferiores contenidos de carbono, incrementando de esta manera la tenacidad, la plasticidad y la resistencia a la fatiga. Los aceros al níquel son altamente adecuados para aceros estructurales de gran resistencia, los cuales se utilizan en la condición de laminado o para grandes forjas no adaptables al templado. Los aceros al 3.5% de níquel (serie 23xx) con bajo contenido de carbono se emplean extensivamente para carburizar engranes de transmisión, tornillos de bielas, pernos y seguros (chavetas). Los aceros al 5% de níquel (serie 25xx) proporcionan mayor tenacidad y se utilizan para aplicaciones de trabajo pesado, como en granes para camiones y autobuses, levas y cigueñales. El níquel tiene sólo un ligero efecto sobre la templabilidad, pero es relevante en su capacidad para mejorar la tenacidad sobre todo a bajas temperaturas.

Aunque los aceros al níquel de la serie 2xxx se han eliminado de la clasificación AISI-SAE de aceros aleados estándar no significa que no se manufacturen. Eliminar la clasificación simplemente significa que el tonelaje producido está por debajo de cierto mínimo. Los aceros de esta serie se han reemplazado ampliamente en muchas aplicaciones por los aceros más económicos, de triple aleación, de la serie 86xx.

## VI.4 DIAGRAMAS TERNARIOS

Los diagramas binarios en comparación con los ternarios poseen solamente dos componentes. De esta manera haciendo una comparación con los grados de libertad de un diagrama binario y uno ternario tendremos los siguiente:

$$F=C-P+2=4-P \quad \text{S.BINARIO}$$

$$F=C-P+2=5-P \quad \text{S.TERNARIO}$$

Donde:

C= Num. de especies químicas

F= Num. de grados de libertad

P= Num. de fases en un sistema

Los diagramas ternarios para representarse necesitan un tipo de gráfica como la que viene a continuación (fig.6.5):

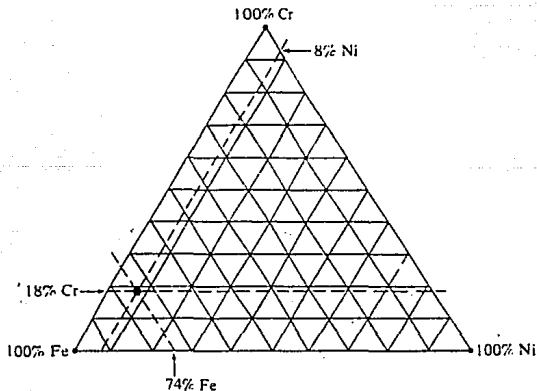


FIG. 6.5 LOCALIZACION DE UN PUNTO EN EL DIAGRAMA TERNARIO HIERRO-NIQUEL-CROMO.



La manera más fácil de visualizar la red mostrada es como si fuese un triángulo equilátero. Primeramente consideremos la representación de la composición a  $T = \text{cte}$  y luego la dimensión adicional para cuando la  $T = \text{variable}$ . El punto en la esquina del hierro es 100% hierro. Cualquier punto en la línea del 90% de hierro contiene esa cantidad de hierro.

Ahora pongamos un ejemplo, colocándolo en el diagrama ternario. Supongamos un acero inoxidable de 18% de Cr, 8% níquel y 74% de hierro, llamado 18/8. Se podrá observar en la figura que la línea de 74% de hierro esta representada al igual que la composición que debe estar en algún sitio a lo largo de esta línea.

Luego se puede ver que la esquina del cromo representa 100% cromo. Si nos alejamos para encontrar la línea de 18% de cromo. El punto donde se intersecta la línea de 74% de hierro es 18% de cromo y 74% de hierro. No se requiere dibujar la línea de 8% de níquel, excepto a manera de verificación porque el porcentaje de níquel se determina por la diferencia de 100% (esto es,  $\% \text{Ni} = 100 - 74\% \text{Fe} - 18\% \text{Cr}$ ).

Por lo tanto, como regla general para encontrar la composición de una aleación de tres elementos utilizando un gráfico triangular, se localizan las líneas apropiadas de isocomposición para cada elemento, que comienza a partir de la esquina de triángulo correspondiente a ese elemento.

En el caso de que se quiera representar la temperatura en un diagrama ternario, se utilizan las condiciones de  $P = \text{cte}$  y  $T = \text{variable}$ . En la siguiente figura 6.6 se muestra un diagrama completo de tres componentes con tales condiciones:

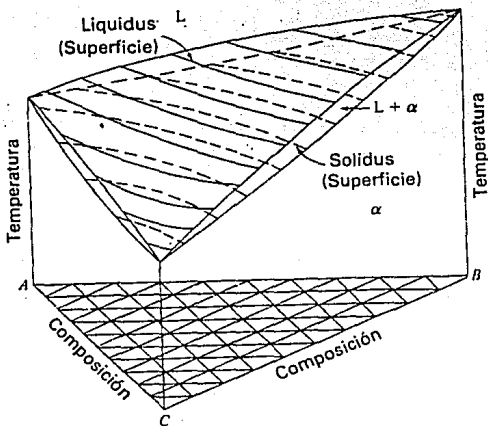


FIG. 5.6 DIAGRAMA ESPACIAL TEMPERATURA-COMPOSICIÓN DE UN SISTEMA TERNARIO ISOMORFO.

Como se puede observar aquí hay una superficie de líquido y de sólido, en algunos casos la determinación de líquido puede ser un problema de investigación bastante caro. Se podrá notar que el líquido deja de ser una línea como en el caso de un sistema de dos componentes y se convierte en una superficie cuando están presentes tres componentes. Esto sucede porque la adición de otro componente aumenta en 1 el grado de libertad y esto sucede tanto con óxidos como con metales. Por ejemplo, una aleación de 51% bismuto, 40% plomo, 9% cadmio se derrite en agua caliente (212°F, 100°C) mientras que sus puntos de fusión individuales son más altos.<sup>(8)</sup>

A continuación se presenta la constitución de tres diagramas ternarios de los sistemas las cuales se consideran sistemas importantes por la utilización práctica que tienen:

Fig. 6.7 Fe-C-Cr

Fig. 6.8 Fe-Cr-Mn

Fig. 6.9 Fe-C-Ni

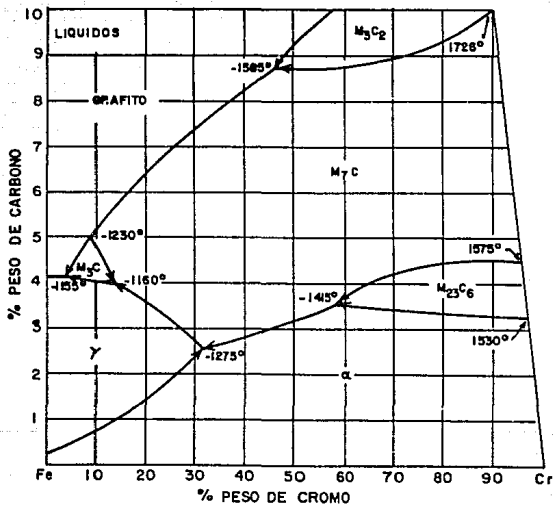


FIG- 6.7 DIAGRAMA TERNARIO FE-C-CR

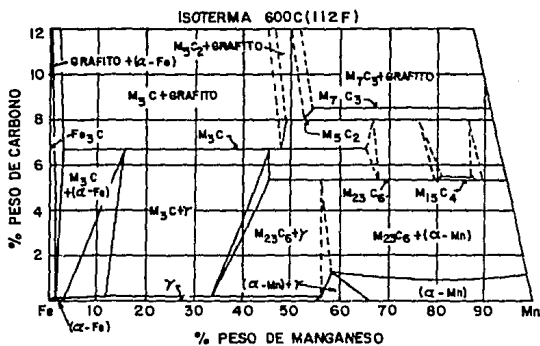


FIG.- 6.8 DIAGRAMA TERNARIO FE-C-MN

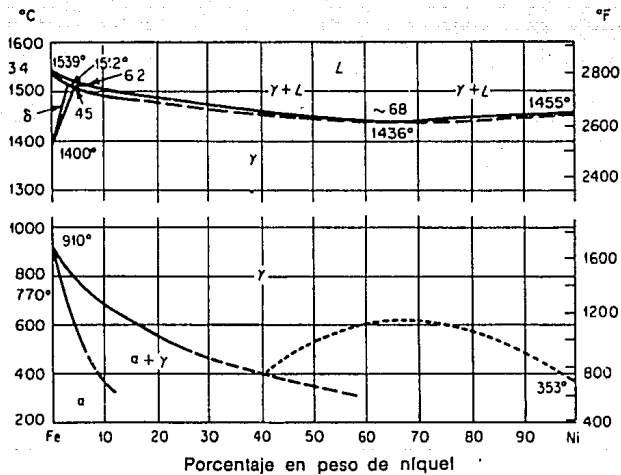


FIG. 6.9 DIAGRAMA TERNARIO FE-C-NI

## C A P I T U L O   V I I

### EJEMPLO DE APLICACION EN LA INGENIERIA QUIMICA

Un ejemplo de la aplicación de los aceros se da en un equipo de separación de alta eficiencia del cual se obtendrán las corrientes de gas y de líquido, dichas corrientes serán medidas para determinar la RGA (Relación gas-Aceite) de cada pozo de la plataforma de perforación de la zona de Campeche. El cual es un proyecto que se desarrolla actualmente en la República Mexicana.

#### VII.1 DESCRIPCION:

La operación de separación se efectuará mediante la utilización de una placa de choque y el efecto de los cambios múltiples de dirección y choque a través de placas coalescedoras tipo "Vane" en un recipiente horizontal, de donde el gas amargo y el líquido separados serán enviados a medición.

El equipo deberá ser montado en patín e incluir toda la instrumentación, válvulas de control, y en general, todos los internos, accesorios y conexiones requeridas, en forma tal que una vez instalados y acoplado se tenga una operación satisfactoria del mismo. El diagrama del equipo y la estructura de las placas coalescedoras se muestran a continuación en las figuras 7.1 y 7.2 respectivamente.

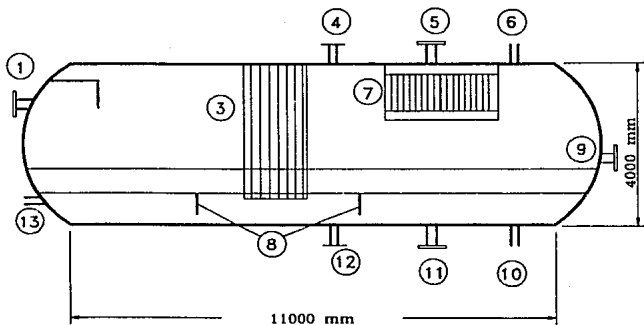


FIG.-7.I SEPARADOR GAS-LIQUIDO

- |                                |                            |
|--------------------------------|----------------------------|
| 1.- ALIMENTACION DE LA MEZCLA. | 7.- ELEMENTO TIPO VANE.    |
| 2.- PLACA DE CHOQUE.           | 8.- ROMPEOLAS.             |
| 3.- ELEMENTO TIPO VANE.        | 9.- REGISTRO DE HOMBRE.    |
| 4.- VENTEO.                    | 10.- INSTRUMENTO DE NIVEL. |
| 5.- SALIDA DE GAS.             | 11.- SALIDA DE LIQUIDO.    |
| 6.- INSTRUMENTO DE NIVEL.      | 12.- DRENE.                |
|                                | 13.- CONEXION DE SERVICIO. |



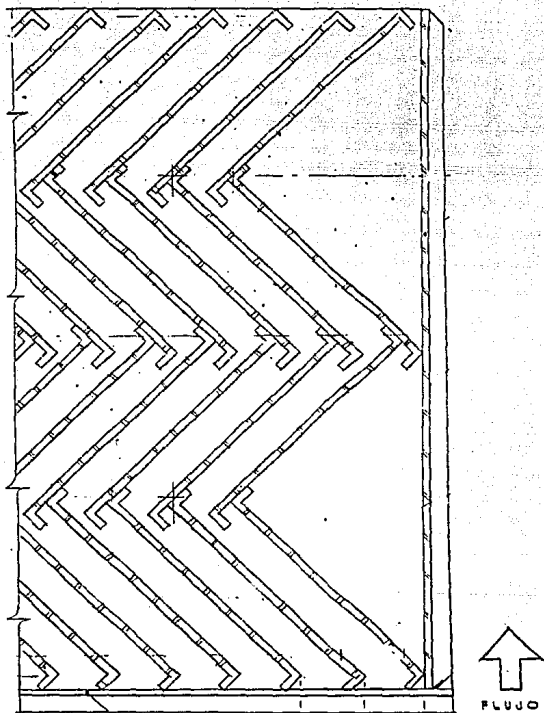


FIG. 7.2 ESTRUCTURA DE LAS PLACAS  
TIPO VANE

## VII.1 DESCRIPCION

## I.0 GENERALIDADES

SERVICIO	Separador de prueba
POSICION DE RECIPIENTE	Horizontal

## II. CONDICIONES DE ALIMENTACION:

MEZCLA GAS/LIQUIDO, KG/HR.	75483
TEMPERATURA, °C	98.5
PRESION KG/CM <sup>2</sup> MAN.	28.1

## III. ESPECIFICACION DE LOS PRODUCTOS:

-GAS

FLUJO A PYT, m <sup>3</sup> /seg.	0.11
-----------------------------------	------

DENSIDAD A PYT, GR/CM <sup>3</sup>	0.0210
------------------------------------	--------

-LIQUIDO:

FLUJO A PYT, L.P.M.	1345
---------------------	------

DENSIDAD A PYT, GR/CM <sup>3</sup> NDR/MAX	0.8343/0.8661
--	---------------

TEMPERATURA, °C	98.5
-----------------	------

PRESION KG/CM <sup>2</sup> MAN.	28.1
---------------------------------	------

## V. CARACTERISTICAS DE LA MEZCLA ALIMENTADA AL SEPARADOR DE PRUEBA:

COMPONENTE	% MOL
Agua	4.066
Acido Sulfhidrico	0.214
Bióxido de Carbono	1.413
Nitrógeno	0.262
Metano	42.809
Etano	11.069

Propano	4.344
i-Butano	0.475
n-Butano	1.359
i-Pentano	1.163
n-Pentano	0.000
n-Hexano	32.826
Total	100.00

#### VI. INFORMACION BASICA DE PROCESO

TIPO DE INTERNOS	Vane
MAXIMO ARRASTRE DE LIQUIDO	0.1 Gal/MMPCS
CAIDA DE PRESION KG/CM <sup>2</sup> MAX.	0.2
EFICIENCIA DE SEPARACION	
GARANTIZADA	100%

#### VII. ANALISIS DEL EQUIPO DE PROCESO

POSICION	Horizontal
DIAMETRO INTERNO MM	2134
LONGITUD T-T MM	4267
TEMPERATURA DISEÑO °C	153 (307.4 °F)
PRESION DE DISEÑO, KG/CM <sup>2</sup> MAN	35
NIVEL DE LIQUIDO MAX/MIN. MM	1067/152
TIPO DE CABEZAS	Hemisféricas
RADIOGRAFIADO	100%
RELEVADO DE ESFUERZOS	SI
RECUBRIMIENTO INTERNO	NO
ESPOSOR ADICIONAL POR CORR, MM	3.2
CODIGOS APLICABLES	ASME, ASTM, NACE
TIPO DE INTERNOS	VANES, PLACA DE CHOQUE Y ROMPEOLAS

## AISLAMIENTO

SI PARA PROTECCION  
DEL PERSONAL

## MATERIALES DE CONSTRUCCION

CUERPO/CABEZAS

AC. CARBON

FALDON

AC. CARBON

PATIN

AC. CARBON

VALVULAS Y ACCESORIOS

AC. CARBON

## MATERIALES DE INTERNOS

PLACA DE CHOQUE

AC. CARBON

PLACAS P/ ELIMINACION ARRASTRE

VANES

AC. INOXIDABLE

## DIMENSIONES EQUIPO PAQUETE

LARGO,MM

11000

ANCHO,MM

4267

ALTURA,MM

4000

## VII.2 ESPECIFICACIONES DE MATERIALES

La clasificación de los aceros es muy variada y para cada uso, existe un tipo de acero adecuado. Además existen varios sistemas de referencia para clasificar los materiales, los cuales en algunos casos representan equivalencias que hay que tomar en cuenta para su identificación en el mercado.

La clasificación AISI (American Iron and Steel Institute) usa una clave de cuatro números que denota sucesivamente: el principal elemento de aleación excluyendo el hierro, el porcentaje aproximado del mismo y con los últimos dos números, el contenido del elemento principal en centésimas por ciento.

La clasificación AISI para aceros inoxidable acostumbra solamente tres números: el primero indica el grupo y los dos últimos el tipo de acero.

La clasificación AISI es común en la especificación de materiales de construcción de tuberías, válvulas, accesorios y equipo de bombeo y transporte de gases.

La ASTM (American Society for Testing and Materials) clasifica los aceros con un número, anteponiendo la letra "A". El significado del número, es una determinada composición, además de toda una serie de limitaciones y pruebas que el material debe observar y aprobar ( especificación ).

Por último y directamente asociado con la fabricación de recipientes, encontramos la clasificación del ASME (American Society of Mechanical Engineers), la cual antepone dos letras a

cada identificación (SA-), siendo por lo demás, semejante a la clasificación ASTM.

En otros países existen otras clasificaciones que es necesario tener presentes. Por ejemplo: en Inglaterra existe la clasificación de la British Steel, que antepone las siglas BS- a un número de identificación de cuatro cifras. Por otra parte en Francia, Alemania, Italia, y Suecia poseen sus propias clasificaciones ligadas a sus respectivos códigos, además de algunos países asiáticos como la U.R.S.S. y el Japón.

De esta manera, siendo el ASME, el código directamente asociado con la fabricación de recipientes, las especificaciones de materiales que se darán serán en base a éste código, y por supuesto al código ASTM, la cual su clasificación, como ya se dijo, es semejante a la del código ASME. No obstante, para este caso concreto también se aplicara otro código, el NACE, (National Association of Corrosion Engineers) del que más tarde se hablará.

## VII.2.1 CODIGOS APLICABLES

### A) APLICACION DEL CODIGO A. S. M. E.

Una de las partes principales que intervienen en un diseño, es la correcta selección y aplicación de códigos y normas como es bien conocido en nuestro país, es usado ampliamente el código A.S.M.E. para todo lo relacionado con calderas y recipientes a presión, en el caso de estos últimos, la Sección VIII, División I es la más usual; ahora bien, existe dentro de la misma Sección VIII una segunda División que habla de las reglas para diferentes alternativas para recipientes a presión; esta última segunda División es menos usual que la primera debido a su rigurosidad.

Las reglas en la División I de esta sección del código, cubre requisitos mínimos de diseño, fabricación, inspección y certificación de recipientes a presión, aparte de aquellas que están cubiertas por la sección I (Calderas de Potencia), sección III (Componentes de Plantas Nucleares) y sección IV Calderas de Calefacción).

La División I de la sección VIII, está dividida en 3 sub-secciones. La sub-sección A, que consta de las partes UG que cubre los requisitos generales aplicables a todos los recipientes a presión. La sub-sección B que cubre los requisitos específicos aplicables a los diferentes métodos usados en la fabricación de recipientes a presión, consta de las partes UW, UR, UF, Y UB relacionados con los métodos de soldadura, remachado y forjado respectivamente. La sub-sección C, cubre los requisitos específicos aplicables a las diferentes clases de materiales usados en la construcción de recipientes a presión. Consta de las

partes UCS, UNF, UHA, UXI, UCL, UCD y UHT relacionados con aceros al carbón y de baja aleación, materiales no ferrosos, aceros de alta aleación, hierro fundido materiales de recubrimiento, hierro dúctil y aceros ferríticos tratados térmicamente, respectivamente.

Las reglas que componen esta División de la sección VIII del código han sido llevadas a la práctica en el diseño y construcción de recipientes para servicio de presiones que no excedan de  $210 \text{ kg/cm}^2$  (3000 Psig).<sup>(15)</sup> Para presiones mayores es indispensable además de cubrir estas reglas hacer modificaciones congruentes con el tipo de recipientes, como el uso de la División 2. De esta manera, algunos de los pasos más notables para la mayor integridad e inherente seguridad en la División 2, pueden ser encontrados en las reglas que gobiernan la selección y prueba de materiales. Aunque estos pasos son comparativamente sencillos para describir, son bastante significativos; tanto que para muchos servicios comunes, ingenieros especialistas en materiales son de la opinión que sólo refinamientos mínimos en diseño y fabricación son necesarios para afirmar la seguridad adecuada en la faceta de mayores esfuerzos permisibles. La capacidad de los materiales para resistir servicio severo, es afectada por una consideración inicial en la selección de materiales que pueden ser usados bajo las reglas de la División 2, lo cual es un aspecto importante que contribuye a la seguridad.

Materiales que no especifiquen su máximo contenido de carbono, no son aceptados en la División 2.

Algunos de los detalles de diseño en la División I, los cuales pueden elevar los esfuerzos, no son permitidos en la División 2.



El propósito fundamental de las partes AM y AD de la División 2, es hacer posible la producción de recipientes de menor espesor que el permitido por las reglas de la División I y al mismo tiempo garantizar por lo menos un excelente grado de seguridad en servicio.

La División 2 de conformidad con la práctica moderna del código distingue en forma más definitiva que la División I entre inspección y examen por una parte y entre examen y prueba por otra.

La División 2 más claramente que la División I pone de manifiesto que exámenes serán llevados a cabo por el fabricante.

Cuando el inspector no tiene testimonio de un examen llevado a cabo, la División 2 exige que el fabricante certifique al inspector que el examen ha sido realizado y que los requisitos han sido cumplidos.

Los procedimientos especiales de inspección permitidos a ser usados bajo las reglas de la División I, en el caso de producción múltiple, en la fabricación de recipientes a presión no son permitidos bajo las reglas de la División 2.

Basándonos en lo anteriormente expuesto, en nuestro país la División 2 ha sido poco difundida principalmente por lo rígido que son sus procedimientos de fabricación aunque es importante mencionar que en algunos casos si se ha utilizado esta parte del código.

De esta manera para nuestro ejemplo específico dadas las

condiciones de diseño y de acuerdo al objetivo de esta tesis que es la selección adecuada de materiales para recipientes sometidos a presión; se utilizará la División I de la sección VIII del código ASME, que es en específico la sub-sección C, que cubre como ya se dijo, los requisitos específicos aplicados a las diferentes clases de materiales usados en la construcción de recipientes a presión (partes UCS y UHA relacionados con aceros al carbón y de baja aleación y aceros de alta aleación).

**B) APLICACION DEL CODIGO A. S. T. M.**

El ASTM (fundado en 1898) es una organización científica y tecnológica formada para el desarrollo de normas, sus características, requerimientos de materiales, productos, sistemas y servicios.

La sociedad opera através de 140 comités técnicos principales y con 2040 subcomités. Estos comités funcionan en especialidades específicas bajo regulaciones que aseguran una representación balanceada entre productores, usuarios de interés general y consumidores participantes.

La sociedad tiene por completo 30,000 miembros dentro de los cuales 19,150 sirven como expertos técnicos de comités; en total la sociedad cuenta con 91,390 unidades de participación.

**PROPOSITO Y USO DE LAS NORMAS DEL ASTM**

Las normas del ASTM representan un punto de vista común de las partes concernientes a estipulaciones con respecto a productores, usuarios de interés general y consumidores participantes, como ya se dijo anteriormente; intenta de ésta manera ayudar a la industria, agencias gubernamentales y al público en general.

Las normas del ASTM se reúnen en cada volumen siguiendo un orden alfanumérico, teniendo cada volumen una tabla de contenidos y una lista por materia, categorizando las normas acordadas.

El uso del ASTM es puramente voluntario, y la existencia de las normas del ASTM, excluye cualquier manufactura, maquinado

maquinado, compra de productos, uso de productos o procesos, que no esten de conformidad con estas normas. Además de que el uso de las normas del ASTM son expresamente sugeridas y queda bajo nuestra responsabilidad el quebrantarlas.

**C) APLICACION DEL CODIGO N. A. C. E**

El código NACE (National Association of Corrosion Engineers) se aplica en este caso, ya que en él, se exponen los requerimientos, recomendaciones prácticas y métodos de prueba de materiales cuando se manejan agentes corrosivos en éste caso el H<sub>2</sub>S, ya que, éste es un compuesto que puede producir corrosión, que en específico se traduce en una ruptura o agrietamiento por sulfuro (Sulfide Stress Cracking que se abrevia SSC). De esta manera, en dicho código se encuentran las normas que abarcan los requerimientos de material metálico para resistir al SSC cuando se esté manejando hidrocarburos con H<sub>2</sub>S. Las normas del código NACE son aplicables a todos los componentes de equipo que estén expuestos a medio ambientes amargos (entendiéndose como medio ambiente amargo a aquel que contiene H<sub>2</sub>S y agua).

El SSC es causado por interacciones complejas de parámetros que incluyen:

1. Composición química del metal, tratamientos térmicos y microestructura.
2. PH
3. Concentración de sulfuro de hidrógeno y presión total
4. Esfuerzo de tensión total
5. Temperatura
6. Tiempo

Los materiales seleccionados para resistir a SSC o al medio

ambiente pueden ser especificados si el gas está siendo manejado a 65 psia de presión total o mayor si la presión parcial de  $H_2S$  en el gas es mayor que 0.05 psia. Los sistemas operando abajo de 65 psia de presión total o abajo de 0.05 psia de presión parcial están fuera del alcance de esta norma. Para determinar la presión parcial se multiplica la fracción mol (% mol-100) de  $H_2S$  en el gas, por la presión total del sistema. La figura 7.3 proporciona una forma conveniente de determinar si la presión parcial de  $H_2S$  en medio amargo excede de 0.05 psia o bien pueda caer dentro de la región de agrietamiento por sulfuro.

Ahora bien, cuando se estén manejando dos o tres fases éste código también se aplica y se utiliza la figura 7.3 para saber si a las condiciones que se manejan (en cuanto al % mol de  $H_2S$  y de presión total) se cae dentro de la región de SSC; en caso de que se caiga dentro de esta zona en cualquiera de los casos de tratarse de sistemas amargos (fig.7.3) o sistemas amargos multifases (fig.7.4) se usarán los materiales aceptados que ilustran las tablas aquí expuestas para materiales tanto ferrosos como aceros inoxidable que están expuestos directamente para ambientes amargos.

Es así, como de acuerdo a las condiciones de nuestro ejemplo específico se tiene que hacer referencia a éste código debido a la presencia de  $H_2S$ . Ahora bien, sabiendo las condiciones que tenemos de % en mol de  $H_2S$  y presión total, y considerando que se cuentan con 3 fases (gas, agua, crudo), se usará la fig.7.4 que es para sistemas multifases, y se verificará si en base a

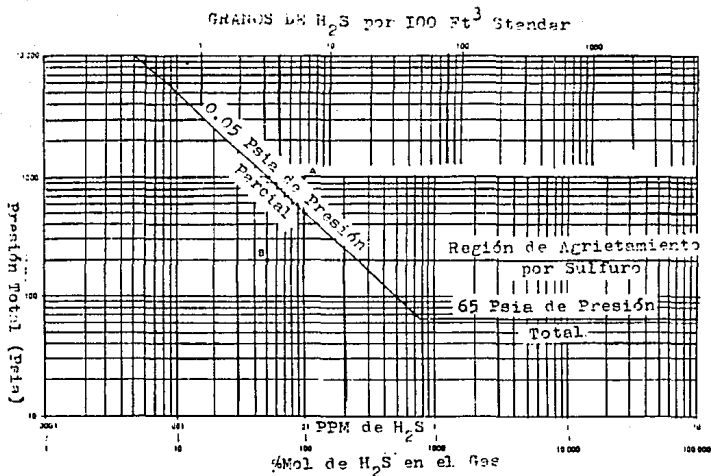


FIG. 7.3 SISTEMAS DE GAS AMARGO

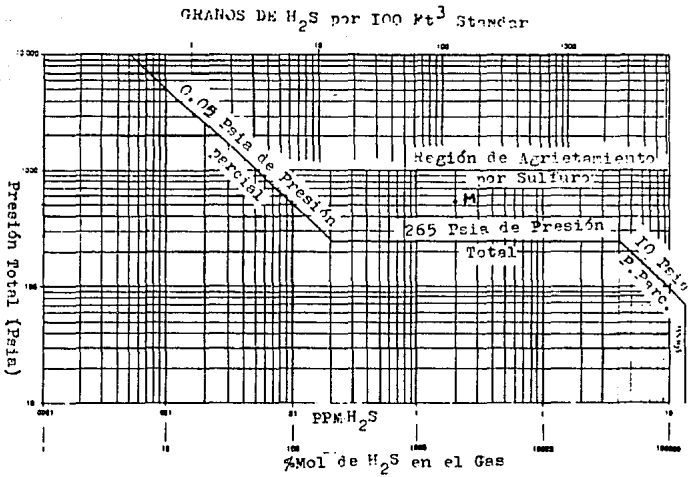


FIG. 7.4 SISTEMAS AMARGOS MULTIFASES

dichas condiciones se cae dentro de la zona de agrietamiento por sulfuro.

Tenemos por lo tanto que los datos son los siguientes:

$$\begin{aligned} P_{\text{diseno}} &= 35 \text{ kg/cm}^2 \\ &= 512.16 \text{ Ib/in}^2 = 512.16 \text{ Psia} \end{aligned}$$

El % Mol de  $\text{H}_2\text{S}$  en el gas que es:

$$\% \text{Mol}_{\text{H}_2\text{S}} = 0.214$$

Es así como, sabiendo estos datos, podremos localizar en base a estas coordenadas un punto en la figura 7.4, este punto lo llamaremos M, tal como se puede observar en dicha figura. De esta forma en base al cálculo realizado se verificó que de acuerdo a las condiciones que tenemos estamos dentro de la zona de agrietamiento por sulfuro (SSC) y para seleccionar nuestro material estaremos sujetos a que cuando se elija alguno de ellos, esté aceptado por el código NACE para asegurarnos de que haya una mejor eficiencia y resistencia tomando en cuenta la probabilidad de corrosión que pueda existir, por la presencia de  $\text{H}_2\text{S}$ .



### VII.3 SELECCION DE MATERIALES SE ACUERDO A LAS CONDICIONES DE EQUIPO Y DISEÑO

En el diseño de recipientes usados en procesos para refinación de petróleo intervienen básicamente dos aspectos: el aspecto estructural, relacionado con las propiedades mecánicas y metalúrgicas de los materiales de que consta el recipiente y el aspecto referente a las características químicas del fluido que se opera. Estos aspectos relacionados con la selección de materiales son considerados de la siguiente manera:

Las dimensiones geométricas, la presión interior y el esfuerzo permisible del material determinan los espesores de las envolventes del recipiente. Las dimensiones y la presión interior son valores establecidos por las condiciones del proceso que se realizará en el recipiente, mientras que para el esfuerzo permisible se recurre a códigos aplicables. Los códigos recomiendan esfuerzos permisibles para diferentes aleaciones bajo condiciones específicas de temperatura y factores numéricos para compensar deficiencias de fabricación; estos esfuerzos permisibles varían según códigos norteamericanos, europeos o japoneses con respecto a factores de seguridad. Puesto que la Industria Petrolera en México para recipientes a presión aplica el Código para Calderas y Recipientes a presión no sometidos a fuego directo del A.S.M.E., los esfuerzos estipulados por este código, son los empleados en el diseño. Se considera que al optar por estos esfuerzos se está dentro de la seguridad si se toma en cuenta que los valores de dichos esfuerzos son conservadores con respecto a otros códigos y además es una forma de compensar posibles deficiencias de tipo técnico en la fabricación de acero y construcción de recipientes en México. En

estas condiciones se tiene que los esfuerzos permisibles por el código A.S.M.E., para temperaturas comprendidas de  $-20$  a  $650^{\circ}\text{F}$  ( $-29$  a  $343^{\circ}\text{C}$ ) es  $1/4$  de la mínima resistencia a la tensión garantizada a temperatura ambiente y por encima de  $650^{\circ}\text{F}$  ( $343^{\circ}\text{C}$ ) los esfuerzos permisibles corresponden al esfuerzo de ruptura considerando un lapso de tiempo de 100,000 horas ó el esfuerzo que causa una fluencia plástica (creep) de 1% durante 100,000 horas, tomándose el menor de los dos para el diseño; sin embargo, debido a que las pruebas de laboratorio son obtenidas con valores extrapolados e incrementando la temperatura y/o cargas para reducir el periodo de tiempo y considerando que las condiciones reales de proceso difieren de las condiciones de prueba, son aplicados factores de seguridad para compensar estas diferencias; por lo que los esfuerzos permisibles fijados por el código A.S.M.E. , son revisados y modificados a medida que se tienen más conocimientos de los esfuerzos reales.<sup>(15)</sup>

En las paredes del recipiente y partes internas de éste, como son: platos, tuberías, baffles y deflectores, en contacto con fluidos, se originan reacciones químicas que forman compuestos, y cuando ocurren pérdida de metal, el componente formado se refiere como producto de la corrosión y la superficie del metal, se dice que ha sido corroído; por lo que la vida de un recipiente es función de la velocidad de ataque de la corrosión en los materiales del recipiente y una manera de predecir su duración se basa en datos experimentales de corrosión; sin embargo, puesto que las condiciones reales de servicio son difíciles de reproducir en pruebas de laboratorio, los resultados de estas pruebas solamente se toman como guía y los valores reales se obtienen de la observación de recipientes empleados en procesos similares de plantas ya instaladas,

### III

compensándose la pérdida de material por corrosión con sobreespesores considerando una duración de 15 años aproximadamente en base a que en este lapso la inversión puede recuperarse.

Otras limitaciones para la selección del material es el precio y la disponibilidad del material. En la construcción deberá asegurarse que el material que se recibe sea conforme al pedido, tanto en sus características físicas como químicas.

Además en casos críticos será conveniente verificar la sanidad del mismo. Si se trata de láminas deberá comprobarse la ausencia de defectos perjudiciales como laminaciones, inclusiones de escoria hendiduras y grietas. En piezas forjadas la ausencia de rechupes, poros, rajaduras e inclusiones. En piezas fundidas, hendiduras, reventadas y grietas por absorción de hidrógeno.

El diseñador, también en este caso, recurrirá a un código o norma para decidir la aceptabilidad de defectos, el rango de composición química y de propiedades mecánicas de los materiales que se emplearán.

Según las posibilidades y preferencias, el diseñador escogerá el proceso de soldadura, preverá en cada situación particular las posiciones y secuencia en que se depositarán las soldaduras, el número de cordones y la secuencia de depósito de los mismos.

La sanidad y resistencia de la soldadura depende de factores cuyos efectos no son fácilmente determinables analíticamente, de manera que deberá prever una evaluación y comprobación de las

características de la soldadura, en otras palabras deberá efectuarse la calificación de los procedimientos que se emplearán.

Dicha soldadura deberá ser aplicada por soldadores con máquinas soldadoras, capaces de efectuar soldaduras sanas en las posiciones que se presenten y con el proceso de soldar escogido. Se deberá comprobar esta capacidad de los soldadores como lo requiere la Asociación de Ingenieros Mecánicos (A.S.M.E.) en la sección IX de su código.

**ACEROS AL CARBON:**

El acero al carbono es el metal más común, económico y el más versátil usado en aplicaciones para refinación de Petróleo, debido a sus propiedades mecánicas; principalmente por su ductilidad, la cual permite operaciones de formado en frío y porque en su mayoría se sueldan con relativa facilidad. Estas características han hecho extensivo su empleo en la construcción de recipientes para diversas condiciones de presión y temperatura; sin embargo, debido a que con temperaturas superiores a 650°F (343°C), los esfuerzos permisibles disminuyen considerablemente y al combinarse con presiones internas altas, daría como resultado espesores de placa a las que para el formado en frío, habría necesidad de relevar esfuerzos intermedios durante el rolado para formar la sección cilíndrica y la formación de cabezas, debido a que el material es sometido a deformaciones permanentes que originan esfuerzos en proporción directa al radio de curvatura y el espesor; así mismo, realizar precalentamientos en las uniones por soldar además de relevar esfuerzos o efectuar tratamientos térmicos posteriores a la soldadura, lo cual haría antieconómico su uso.

Además de lo anterior, debe considerarse que a temperaturas elevadas, ocurren cambios en la microestructura y estos cambios metalúrgicos modifican las propiedades mecánicas, ya que la microestructura de los aceros al carbono, está formada por una mezcla de ferrita y carburo de hierro (cementita) y puesto que la cementita no es una forma estable del carbono, tiende a volverse inestable cuando el acero es calentado a temperatura por encima de 850°F(454°C), disociándose la cementita en hierro y carbono en forma de grafito y cuando ocurre ésto se dice que

el acero grafitiza y ambas fases de la grafitización son extremadamente frágiles y reducen severamente la ductilidad del acero. Por este motivo el empleo de los aceros al carbono se limita a aplicaciones que no excedan los 750°F (399°C). De acuerdo con los datos experimentales, la susceptibilidad a la grafitización, se contraresta desoxidando (killed) los aceros, característica que se considera conveniente con los aceros al carbono, ya que si bien, en las condiciones no se alcancen las temperaturas de grafitización, al aplicarse la soldadura, la inestabilidad de la cementita ocurre durante la transformación de la austenita, debido a que la austenita es una solución de carburo de hierro (cementita) y hierro gamma.

Comparando la resistencia o los esfuerzos permisibles establecidos por el código A.S.M.E. para aceros al carbono, en el rango de temperaturas de -20 a 650°F (-29 a 343°C) se tienen variaciones en valores debido a diferencias cuantitativas en su composición química y como el acero al carbono es una aleación formada por hierro, carbono y silicio además de azufre y fósforo; siendo indeseables estos dos últimos elementos, se consideran como impurezas. Puesto que el silicio es agregado a la aleación por su gran afinidad por el oxígeno, propiedad que contribuye a desoxidar al acero (killed) y evitar la excesiva porosidad intergranular causada por el oxígeno atrapado al solidificar la fundición, por lo tanto únicamente el carbono y el manganeso son elementos que se relacionan con la resistencia del acero y ésta depende en consecuencia de la proporción de estos elementos en la aleación, finalmente el trabajo mecánico de laminación o forja y los procesos térmicos en la fabricación del acero, determinan características metalúrgicas y éstas a su vez, las propiedades mecánicas del acero.

**ACEROS DE BAJA ALEACION:**

En los aceros al carbono, la dureza, resistencia a la tensión y a la cedencia, se incrementan en proporción al contenido de carbono, del mismo modo que aumenta su fragilidad y son más fáciles de soldar, se reduce: su ductilidad y resistencia al impacto (tenacidad); por estos motivos el contenido de carbono es limitado y por lo tanto, su resistencia es limitada también; sin embargo, en condiciones de alta temperatura hasta 1100°F (593°C) y temperaturas de -320°F (-196°C) inclusive, se requiere de aceros que sean resistentes y además tengan propiedades mecánicas adecuadas; ésto se logra con aceros a base de elementos de aleación que son: cromo, níquel y molibdeno principalmente y las aleaciones reciben el nombre de aceros aleados y se consideran como aceros de baja aleación cuando su contenido de cromo o níquel es inferior a 10%.

A diferencia de los aceros al carbono que basan su resistencia y propiedades mecánicas en la metalurgia del hierro-carbono; en los aceros aleados dichas propiedades se obtienen de la combinación hierro-carbono y los elementos de aleación en conjunto; es decir, se conjugan las características y efectos de los elementos entre sí y en esta forma se tiene que una propiedad del molibdeno es la de impartir resistencia al creep en el acero aleándolo en proporción de 0.5% que es la composición nominal en los aceros al carbono-molibdeno y aleaciones para alta temperatura. No obstante, debe considerarse que los aceros al carbono-molibdeno son propensos a la grafitización expuestos a temperaturas de 850°F (454°C) y mayores; ésto hace que su aplicación se limite a recipientes en procesos que no rebasen los 850°F .

El cromo es un constituyente esencial en aceros para condiciones de alta temperatura debido a su propiedad difundir y acumularse en la superficie del metal, formando un compuesto no metálico y refractario, característica que elimina la grafitización aleado en proporción a partir de 0.7% de cromo en el acero. Este efecto y la aportación del molibdeno relacionado con el creep, se combinan en los aceros al cromo-molibdeno en las cuales, consecuentemente no existe el problema de grafitización y la resistencia al creep, permite su empleo con temperaturas superiores a 850°F (454°C). De la combinación cromo-molibdeno se deriva una variedad de aleaciones que de acuerdo a la definición de baja aleación, contienen un máximo de 9% de cromo; tal es el caso del acero 9% Cr. -1% Mo que pueden emplearse hasta 1100°F (593°C).

#### ACEROS DE ALTA ALEACION:

Se ha establecido que el cromo incrementa la resistencia del acero a altas temperaturas, debido a su característica refractaria; por otra parte el cromo imparte resistencia a la oxidación, por su afinidad hacia el oxígeno con el que forma una película superficial de óxido de cromo que protege a la aleación de la oxidación posterior. Esta influencia decromo se muestra en la siguiente figura(7.5). En esta figura se observa que con un contenido de cromo mayor de 10%, un grado remarcable de resistencia a la oxidación, es logrado en el acero. Ahora, como también fué establecido en los servicios criogénicos que la tenacidad del acero es aportada por el níquel, además de las propiedades mecánicas y metalúrgicas que imparte el acero; se deduce entonces que el cromo y el níquel son elementos de



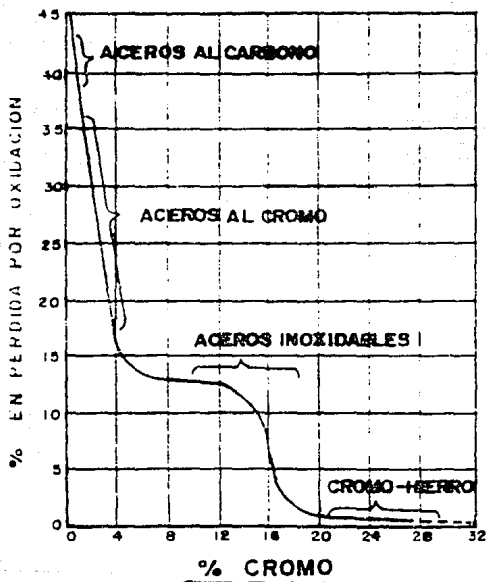


FIG. 7.5 INFLUENCIA DEL CROMO EN EL ACERO

aleación básicos para las condiciones de temperatura y/o corrosión extremas. Con respecto a la proporción en los aceros se tiene que si el contenido ya sea de cromo o níquel, es mayor de acuerdo a la figura (7.5) en los aceros inoxidables.

Siendo el cromo el elementos de aleación, que caracteriza a los aceros inoxidables, en base a este elemento, se establecen dos grupos de aceros inoxidables que son: martensíticos y los aceros ferríticos; otro grupo lo constituyen los aceros austeníticos a base de cromo y níquel.

#### ACEROS INOXIDABLES MARTENSITICOS:

Los aceros martensíticos o aceros endurecibles, basan su resistencia mecánica y resistencia a la corrosión, exclusivamente en el contenido de cromo en su composición química (11.5 a 18%). El cromo es un elemento "gammaéno", origina la estructura austenítica y a la vez eleva el nivel de temperatura de su transformación, por lo que la descomposición de la austenita, da lugar al constituyente metaestable martensítico, estructura cristalina característica de este tipo de aceros.

La transformación de la austenita en martensita ocurre ya sea porque en el servicio se alcance la temperatura de transformación de la austenita o bien, durante el enfriamiento de la soldadura en su aplicación; en ésta última, aún cuando el metal de aportación contenga elementos de aleación que reduzcan la dureza en el metal depositado, la zona afectada por el calor se torna martensítica y como esta estructura es frágil y

propensa al agrietamiento, además de ser carente de ductilidad, la ejecución de juntas soldadas requieren controles estrictos a fin de lograr soldaduras sanas sin agrietamientos, siendo ésta la razón principal por la cual no es conveniente el empleo de aceros martensíticos con placas macizas o piezas forjadas en la construcción de recipientes o partes de recipientes sometidos a presión interior; no obstante, en recipientes como son torres de vacío, torres cokizadoras y unidades fraccionadoras de fluidos catalíticos, los aceros inoxidable martensíticos tipo 12% Cr, tienen una amplia aplicación como recubrimientos sobrepuestos (lining) o como placas integrales (clad); en ambos casos, un metal base de acero al carbono o de baja aleación, es el que resiste los esfuerzos debido a la presión interior y el acero inoxidable está en contacto directo con el fluido; sin embargo, la zona endurecida en la soldadura no puede ser eliminada y para prevenir la falla de ésta por ataque de la corrosión, al menos debe de relevarse de esfuerzos y esto aunado con los problemas en el soldeo, son factores determinantes al seleccionar un acero inoxidable martensítico.

#### ACEROS INOXIDABLES FERRITICOS:

El inconveniente del agrietamiento de los aceros martensíticos, pueden evitarse reduciendo los elementos "gammágenos", (el carbono en este caso) o sea haciendo predominar el carácter "alfageno" del cromo. En estas condiciones, el acero será ferrítico, no endurecible por no sufrir transformaciones su estructura ferrítica; sin embargo, al aplicar calor por soldadura, los granos cristalinos tienden a aumentar de tamaño y dado que no pueden ser regenerados por

enfriamiento debido a la ausencia de puntos de transformación, los granos de ferrita permanecen bastos haciendo frágil al metal soldado y reduciendo su ductilidad y tenacidad. Solo es posible el enfriamiento del grano, aplicando trabajo mecánico y lo más factible en el caso de construcción de recipientes, sería el martillado, pero con este método se lograría muy poco al respecto y la aplicación de un trabajo mecánico más severo causaría esfuerzos internos que a la larga propician en la estructura ferrítica. la aparición de una fase conocida como fase sigma ( $\sigma$ ), un compuesto intermetálico de cromo-níquel duro y extremadamente frágil a temperatura ambiente que se forma cuando el acero ferrítico es expuesto prolongadamente a temperaturas en el rango de 1100 y 1700°F (593 y 927°C), y dado que los aceros ferríticos comparativamente no tienen mayor resistencia a alta temperatura que los aceros al cromo-molibdeno con un contenido menor de 10% de cromo, su aplicación es adecuada entonces para condiciones de temperatura hasta 1100°F (593°C) y al igual que los aceros martensíticos en forma de lining y clad porque su coeficiente de expansión térmica es solamente un poco más bajo que el de los aceros al carbono y los de baja aleación.

#### ACEROS INOXIDABLES AUSTENITICOS:

En aplicaciones de temperatura superiores a 1200°F (649°C) solamente los aceros inoxidable austeníticos tienen suficiente resistencia mecánica y resistencia a medios corrosivos para ser usables. Su contenido mínimo de 17% de cromo, le imparte resistencia a la corrosión y un mínimo de 8% de níquel, estabiliza la estructura austenítica. La resistencia superior a

alta temperatura de los aceros austeníticos comparada con los aceros al cromo-molibdeno a partir de 950°F (510°C) y la resistencia relativamente baja de los aceros ferríticos a temperaturas superiores de 1100°F (593°C), justifican el empleo de los aceros austeníticos particularmente en recipientes que procesan mezclas corrosivas de H<sub>2</sub> y H<sub>2</sub>S; pero debido a que su dilatación térmica es más alta que en los aceros al carbono, o los de baja aleación, necesariamente los recipientes deben de construirse en su totalidad con el mismo tipo de acero y no en forma de lining o clad, porque la diferencia de dilataciones daría lugar a esfuerzos de tipo térmico que definitivamente son más significativos que los esfuerzos producidos por la presión interior. Finalmente, en términos generales, el decremento de la resistencia a la oxidación de los aceros austeníticos tipo 18-8 como ordinariamente se les conoce, los hace inadecuados a temperaturas por encima de 1500 y 1600°F (816 y 871°C); para estos casos se recurre a tipos de acero tales como el 25% Cr, 0% Ni, ó el 32% Ni, -20% Cr (Incoloy).

La siguiente tabla 7.1 es una guía general en la selección de aceros para el diseño de recipientes y constituye una base para que el diseñador pueda elegir el tipo y condición de acero desde el punto de vista metalúrgico. Esta tabla además, es una recopilación de los materiales normalmente utilizados en recipientes y también, son los materiales que son más accesibles en cuanto al costo y disponibilidad en el mercado.

LISTA DE MATERIALES ( TABLA 7.1 )

TEMPERATURA DE DISEÑO OF	-320 A -150	-150 A -50	-50 A -50	-50 A -40	-40 A +60	+60 A +650	+650 A +750	+750 A +850	+850 A +1100	+1100 A +1500	
CASCARON, CABEZAS, R.	SA-353	SA-2030.S5	SA-2030.S5	SA-516-65.S5	SA-516-70.S5	SA-285-C	SA-515-70	SA-204-B	SA-307-11CL2	SA-242-TP304	
PARA CUELLO DE BOLS.Y PLANTILLAS DE REFUERZO	SA-553-TP1	SA-203E.S5	SA-203A.S5	SA-203-B.S5	SA-516-65.S5	SA-515-70		SA-204-C	SA-307-11CL1		
PLACA	IDEM AL CASCARON Y CABEZAS										
BRIDAS O FALDON	IDEM AL CASCARON Y CABEZAS										
FORJA	SA-102-F304	SA-350-LF3	SA-350-LF3	SA-350-LF2	SA-350LF2	SA-105	SA-105	SA-102-F1	SA-102-F11	SA-102-F304	
				SA-350-LF1				SA-102-F2	SA-102-F12		
1.2 <sub>1</sub> DE L.M	IDEM AL CASCARON Y CABEZAS										
SILLETAS O FALDON HASTA L.M.	SA-203-C					SA-203-C	IDEM AL CASCARON Y CABEZAS				
	SA-203-C										
RECUBRIMIENTO: CASCARON, CABES, BOLS, REG, LINDING	SA-240- TIPO 405 Y SA-240 - TIPO 410										
CASCARON Y CABES, CLAD	METAL BASE IDEM AL CASCARON Y CABEZAS, RECUBRIMIENTO SA-263 TIPO 405 Y SA-263 TIPO 410										
BOQUILLAS BRIDAS FORJADAS Y COPLES	IDEM A LAS BRIDAS CIEGAS DE FORJA										
ARCOS APOYO PLATOS Y SOPORTES DE BAJANTES	IDEM AL CASCARON Y CABEZAS										
PERFILES ESTRUCTURALES EN GENERAL	TODO PERFIL QUE SE SUELDE AL CASCARON, CABEZAS Y FALDON SERA IDENTICO AL MATERIAL DE ESTOS					SA - 36	SA - 36	IDEM AL CASCARON Y CABEZAS			
R DE BRIDAS INT, HAMP, COLECTORES Y MISCELANEOS						SA - 36	SA-517-70				
REJILLAS	ACERO INOXIDABLE O ALUMINIO NOTA (1)					ACERO AL CARBON		AC. AL CARBON, O AC. INOX.			
TUBERIA INTERIOR	SA-333-8	SA-333-3	SA-333-7	SA-333-6	SA-333-6	SA-53-B	SA-53-B	SA-335-PI	SA-335-PII	SA-312-TP304	
CONEXIONES SOLDABLES	SA-420MPL6	SA-420MPL3	SA-420MPL3	SA-420MPL6	SA-420MPL6	SA-234MFB	SA-234MFB	SA-234MFI	SA-234MFI	SA-403MFP304	
ESPARAGOS EXTERIORES	SA-320-B8	SA-320-L7					SA-193-07		SA-193-B8		
TUERCAS EXTERIORES	SA-194-4							SA-194-2H		SA-194-B	
DRILLERIA INTERIOR	SA-320-B8	SA-193-B6 Y SA-194-6			SA-307 GR.B		SA-193-B6 Y SA-194-6		SA-193-B8, 194-B		
BRQUES INTERIORES	ASBESTO COMPRIMIDO							NOTA (1)			
BRQUES EXTERIORES	FLEXITALLIC "CG O EQUIVALENTE										
MILLAS	ACERO INOXIDABLE							TIPO 304			
CUELLO DE BOQUILLAS	IDEM A LA TUBERIA							INTERIOR			
PLATOS	DE ACUERDO AL PROCESO										

NOTA (1) : ESTOS MATERIALES NO SE ANALIZARAN EN ESTE TRABAJO.

#### VII.4 CRITERIO DE SELECCION

Ya se han comentado en el punto VII.3 muchos de los factores que son considerados para la selección de materiales que, como ya se dijo, no es una tarea fácil y requiere de la consideración de toda una serie de parámetros donde algunos de ellos se determinan en base a la experiencia personal del encargado de dicha tarea. Con el fin de dar una idea al respecto, es necesario mencionar los factores básicos para dicha selección y estos son los mismos utilizados en el ejemplo de aplicación expuesto en este trabajo.

Los factores básicos están relacionados con el aspecto constructivo o el metalúrgico frente a las condiciones de trabajo caracterizados principalmente por la temperatura, presión, ambiente corrosivo, pero también habrá que considerar otros que aunque secundarios puedan modificar la selección hecha en base a los primeros, entre ellos se puede mencionar, el económico, el de disponibilidad en el mercado y por último, la influencia o intervención en el proceso.

De esta manera, en la tabla 7.2 se tienen las especificaciones de materiales en base a éstos factores.

## ESPECIFICACIONES DE MATERIAL

*(TABLA 7.2)*

PARTE DE EQUIPO	DESIGNACION DEL CODIGO ASME	DESIGNACION DEL CODIGO ASTM	MATERIAL ACEPTADO POR CODIGO NACE
CASCARON, CABEZAS Y PLANTILLAS DE REFUERZO	SA-516-70	A-516-70	SI
BRIDAS CIEGAS	SA-105	A-105	•
SILLETAS	SA-283-C	A-283	•
BOQUILLAS Y BRIDAS FORJADAS	SA-105	A-105	•
PLACA PARA CUELLO DE BOQUILLAS	SA-516-70	A-516-70	•
COPLES	SA-106	A-106	•
PERFILES ESTRUCTURALES EN GRAL	SA-36	A-36	•
ESPARRAGOS EXTS.	SA-193-B7	A-193	•
TUERCAS EXTS.	SA-194-2H	A-194	•
EMPAQUES EXTS.	VER NOTA		
ELEMENTO TIPO VANE	SA-240 TIPO 316	A-240 TIPO 316	•
PINTURA EXTERIOR	VER NOTA		
TUBO PARA CUELLO DE BOQUILLAS	SA-106-B	A-106	•
CONEXIONES SOLDABLES	SA-234-WPB	A-234	•



## ESPECIFICACIONES DE MATERIAL

(TABLA 7.2)

PARTE DE EQUIPO	DESIGNACION DEL CODIGO ASME	DESIGNACION DEL CODIGO ASTM	MATERIAL ACEPTADO POR CODIGO NACE
PINTURA INTERIOR	VER NOTA		
CONDICION DE EXPOSICION EXTERIOR	AMB. MARINO		
SOPORTE DE INTERNOS	SA-516-70	A-285	SI
PLACAS DE MAMP. COLECTS. Y MISC.	SA-516-70	A-516-70	.
TUBERIA INTERIOR	SA-53-B	A-53	.
TORNILLERIA INTERIOR	SA-193-B6	A-193	.

NOTA: En esta trabajo no se analizarán este tipo de materiales.

## CONCLUSIONES

La diversidad de materiales existentes constituye todo un universo; el acero por su parte es uno de los materiales más antiguo. Desde hace más de 3000 años con mayor o menor habilidad pero casi siempre por vía empírica, se vienen reuniendo nuevos conocimientos y obteniendo cada vez propiedades mejores. Con ello se contribuye a que el acero continúe siendo un material siempre de actualidad. Tan actual, que México participa en forma activa en el concierto siderúrgico mundial, ya que tiene un desarrollo industrial autosuficiente en la producción del acero, pues logra cubrir por completo dicha demanda. Reconocidos sus aceros en el exterior, nuestro país compite satisfactoriamente con naciones altamente desarrolladas en un mercado que por exceso de producción y la contracción de la demanda exige mejor calidad. No obstante, que es claramente perceptible el influjo de otros materiales como el aluminio o los plásticos que se abren paso en el mercado, el acero sigue siendo un material imprescindible en muchas ocasiones debido a sus múltiples propiedades de alta resistencia, ductilidad, elasticidad, tenacidad, etc. Y es en base a esto a que el acero tiene un papel muy importante en lo referente a que sirve como material de construcción de equipos que participan dentro de un proceso químico industrial.

De esta manera, viendo que el acero es un material fundamental en las diferentes ramas de la industria, se hace necesario que el profesional de Ingeniería Química conozca sus propiedades y las aleaciones que pueda sufrir, para que, de esta forma, pueda tener un mejor aprovechamiento del mismo; así como también que tenga un

panorama general acerca de los muy variados sistemas de referencia para una correcta selección (en este caso los códigos y normas, como es bien conocido en nuestro país) y de esta manera saber la muy variada clasificación que tienen los mismos, así como los parámetros que se toman en cuenta en cada uno de dichos códigos.

Por otra parte, en el ejemplo cualitativo que se planteó se trata de esbozar de una manera general toda una serie de factores a considerar para el tipo de acero adecuado, no obstante, éste ejemplo no se debe ver de una manera rígida y única, ya que, éste es un caso concreto y cualquier condición que cambie en el mismo repercutirá en la selección del tipo de acero.

## REFERENCIAS

- 1.- SALVAT, JUAN, ET AL, DICCIONARIO ENCICLOPEDICO UNIVERSAL, TOMO 1, ED. HISPANO-AMERICANA, BARCELONA, 1975.
- 2.- REVISTA UNIVERSITAS, "NUEVOS DESARROLLOS EN LA INVESTIGACION DEL ACERO", VOL. XXVI, No.3, MARZO 1989.
- 3.- REVISTA DE INFORMACION CIENTIFICA Y TECNOLOGICA, "LA SIDERURGIA EN MEXICO", VOL. 8, NUM.120, SEP.1986.
- 4.- IMP (INSTITUTO MEXICANO DEL PETROLEO), MEMORIAS DEL SEGUNDO SEMINARIO DE INGENIERIA MECANICA PETROLERA, TOMOS 2 Y 3, 1979.
- 5.- AVNER, H., SYDNEY, INTRODUCCION A LA METALURGIA FISICA, 2 EDICION, ED. MC. GRAW HILL, 1981.
- 6.- MARK'S, MANUAL DEL INGENIERO MECANICO, OCTAVA EDICION, VOL. 1, ED. MC.GRAW HILL, 1984.
- 7.- GUTIERREZ, J., ABEL, GUTIERREZ, J., CARLOS, SELECCION DE MATERIALES, TESIS PROFESIONAL, 1988.
- 8.- FLIN, A., RICHARD, TROJAN, K., PAUL, MATERIALES DE INGENIERIA Y SUS APLICACIONES, 3 EDICION, ED. MC GRAW HILL, 1989.
- 9.- DR., DEUTSCHMAN, AARON, J., MICHELS, W., ET AL, DISEÑO DE MAQUINAS TEORIA Y PRACTICA, ED. CECSA. 1989.
- 10.- KEYSER, CARL, A., CIENCIA DE LOS MATERIALES PARA INGENIERIA, 1'REIMPRESION, ED. LIMUSA, 1975.
- 11.- LAWRENCE, H., VAN, MATERIALES PARA INGENIERIA, 2'REIMPRESION, ED. CONTINENTAL, 1985.
- 12.- ASKELAND, R., DONALD, LA CIENCIA E INGENIERIA DE LOS MATERIALES, ED. IBEROAMERICANA, 1985.
- 13.- GUY, A., G., FUNDAMENTOS DE CIENCIA DE LOS MATERIALES, 1'EDICION, ED. MC GRAW HILL, 1981.

- 14.- METALS HANDBOOK, METALLOGRAPHY, STRUCTURES AND PHASE DIAGRAMS, VOL.8, METALS PARK, OHIO, 1973.
- 15.- CODIGO A.S.M.E. (THE AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS) SECCION VIII, PARTE A, DIV. 1, ULTIMA EDICION.
- 16.- CODIGO A.S.T.M. (AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS) SECCION I, 1990.
- 17.- CODIGO N.A.C.E. (NATIONAL ASSOCIATION OF CORROSION ENGINEERS) SECCION 1, 1984.
- 18.- JUAREZ, L., MANUEL, S., DISEÑO Y FABRICACION DE RECIPIENTES A PRESION Y ANALISIS COMPARATIVO EN EL DISEÑO DE LA DIVISION 1 Y DIVISION 2 DEL CODIGO A.S.M.E., SECCION VIII, TESIS PROFESIONAL, 1978.
- 19.- SAAVEDRA, ABREGO, F., NATALIO, ACEROS Y SOLDADURA APLICADA A RECIPIENTES NO SOMETIDOS A FUEGO DIRECTO, TESIS PROFESIONAL, 1978.

## INDICE DE REFERENCIAS UTILIZADAS POR CAPITULO

CAPITULO		REFERENCIAS
I	Introducción	(1, 2, 3,)
II	Breve Historia de los aceros	(4, 5, 8)
III	El diagrama de Hierro-Carburo de Hierro	(4, 5, 8)
III.1	Estructuras presentes en los aceros	(5, 4)
III.2	Clasificación de los aceros de acuerdo a Norma	(5)
IV	Clasificación de los aceros en función de su fabricación y contenido de carbono	
IV.1	Por el proceso de fabricación	(1, 8)
IV.2	Por el contenido de carbono	(5, 4)
IV.3	Por el contenido de aleantes	(7)
IV.4	Aceros aleados	(8)
V	Tratamientos Térmicos de los aceros	
V.1	Curvas T.T.T.	(5, 8)
V.2	Curvas T.E.	(5, 9)
V.3	Ensayo Jominy	(5, 9)
V.4	Tratamientos Térmicos Específicos	(10, 11, 12, 13)
VI	Diagramas de fase de los aceros más comunes	(8)
VI.1	Influencia del carbono en el Fe	
VI.2	Diagramas de fase Fe-Cr	

- VI. 3 Diagrama de fase Fe-Ni
- VI. 4 Diagramas ternarios
  
- VII Ejemplo de aplicación en la Ingeniería Química
  - VII.1 Descripción
  - VII.2 Especificaciones de material
    - VII.2.1 Códigos aplicables
      - a)Aplicación del código ASME (15,18)
      - b)Aplicación del código ASTM (16)
      - c)Aplicación del código NACE (17)
  - VII.3 Selección de material de acuerdo a las condiciones de equipo y diseño. (19)
  - VII.4 Criterio de Selección