

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO
FACULTAD DE QUIMICA

107

EFFECTO DE LOS ELEMENTOS ALEANTES EN
ACEROS Y FUNDICIONES

T E S I S
QUE PARA OBTENER EL TITULO DE
INGENIERO QUIMICO METALURGICO
P R E S E N T A

MANUEL GUZMAN BUSTOS



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 esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

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

GLAS. Tesis
ADQ. 1977
FECHA Me
PROC. 200



QUIMICA

INDICE GENERAL.

	Página
Introducción -----	1
Aluminio -----	3
Azufre -----	11
Carbono -----	16
Cobre -----	22
Cromo -----	27
Fósforo -----	38
Hidrógeno -----	42
Manganeso -----	46
Molibdeno -----	52
Níquel -----	57
Nitrógeno -----	64
Oxígeno -----	69
Silicio -----	73
Titanio -----	77
Vanadio -----	83
Tungsteno o Wolframio -----	88
Conclusiones -----	92
Bibliografía -----	93

INTRODUCCION.

Actualmente es determinante la importancia que los elementos de aleación tienen en la industria metalúrgica, ya que del uso adecuado de ellos dependen fundamentalmente las propiedades mecánicas de los aceros y las fundiciones, en función de cuales, estos materiales son destinados a los usos específicos que de ellas se derivan y que nuestro mundo práctico requiere. Por tal motivo, el presente trabajo trata, sobre la influencia que en aceros y fundiciones ejercen los elementos aleantes de uso más común y difundido, tales como: Al, S, C, Cu, Cr, P, H, Mn, Mo, Ni, N, O, Si, Ti, V y W.

Entre las propiedades mas importantes que los aleantes imparten a los aceros se encuentran:

- 1).- Incrementan la templabilidad.
- 2).- Imparten una resistencia adecuada a temperatura ambiente.
- 3).- Confieren características mecánicas convenientes a altas y bajas temperaturas.
- 4).- Mejoran la resistencia a la corrosión, al calor y a la abrasión.
- 5).- Retardan el ablandamiento que se produce en el revenido.
- 6).- Influyen sobre otras propiedades especiales, tales como la permeabilidad magnética, resistencia, etc.

Los elementos de aleación en los aceros se pueden encontrar en formas muy diversas, según sea la composición y el tratamiento al que hayan sido sometidos. Acerca de su influencia podemos decir en forma general que su acción tiene dos tendencias preferenciales, a saber:

- a).- Tendencia a formar solución sólida con la ferrita o preferencia a formar carburos.
- b).- Tendencia a formar estructuras ferríticas o a favorecer la formación de estructuras austeníticas.

El estudio de la influencia de los aleantes en las fundiciones es más complicado que en los aceros. Sin embargo en forma general puede decirse que los elementos de aleación modifican la microestructura de las fundiciones y consecuentemente su dureza y resistencia; estos cambios se ven influenciados, además, por una variación en la templabilidad. Los aleantes modifican la situación al igual que en los aceros, de los puntos críticos, ejerciendo además una acción importante y compleja sobre la grafitización.

Las fundiciones aleadas en forma general se pueden clasificar en dos grupos:

- 1o.- Fundiciones de baja y media aleación, en las cuales el contenido de un aleante generalmente es inferior al 5%.
- 2o.- Fundiciones de alta aleación, las cuales abarcan todas las demás clases que no estén contempladas en el primer grupo, en este grupo se suelen clasificar a las fundiciones muy resistentes al calor y a la corrosión y cuya microestructura suele ser austenítica o ferrítica.

ALUMINIO.

Propiedades Físicas.- Símbolo Al, número atómico 13, peso atómico 26.98, densidad (a 20°C) 2.7 g/cm³, punto de fusión 660.2°C, punto de ebullición 2447°C. A la temperatura ambiente es un sólido blanco plateado; es blando, ligero, maleable, dúctil, tenaz y forjable a temperaturas entre 100 y 150°C; condiciones que pierde a altas temperaturas. A 600°C se vuelve granular. Posee una estructura cristalina cúbica de caras centradas, en todo el rango de temperaturas correspondientes al estado sólido.

Propiedades Químicas.- Su configuración electrónica externa es $3s^2 3p^1$, de lo cual se deriva que su valencia principal es +3. Arde en la atmósfera a unos 700°C, produciendo Al_2O_3 . Se combina con los halógenos, con el azufre, con el nitrógeno y el carbón (con éstos últimos a altas temperaturas). Es atacado fácilmente por el HCl, con lentitud por el H_2SO_4 y el HNO_3 lo vuelve pasivo. Amalgamado es atacado hasta por el H_2O . Actúa como un buen reductor.

Aluminio en el acero.

El aluminio es uno de los elementos que tienen gran tendencia a disolverse en la ferrita y en menor porcentaje en la austenita (36% y 1.1% respectivamente es su solubilidad sólida) aunque en éste caso aumenta al incrementarse los contenidos de carbono, como consecuencia de lo anterior resulta ser un excelente estabilizador de la fase ferrítica, en solución sólida provoca en ella un considerable endurecimiento, disuelto en austenita eleva levemente la templabilidad. El aluminio es uno de los elementos que no tiende a formar carburos, sino que por el contrario favorece la grafitización.

Los aceros con aluminio tienen, menor tamaño de grano,

debido a que en el baño de acero se forman pequeñísimas partículas de alúmina, las cuales actúan como centros de crystalización reduciendo así el tamaño de los cristales; esta es la razón por la cual se utiliza en el control del tamaño de grano de la fase austenítica ya que resulta ser el más eficaz. Una teoría reciente sobre el mecanismo de control en el tamaño de grano en los aceros mediante adiciones de aluminio es: Que mediante la formación de nitruro de aluminio, éste actúa como película en el contorno del grano, restringiendo así el crecimiento de los granos primarios de austenita. Los aceros al carbono comunes afinados en su grano por adición de aluminio presentan mayor resistencia al envejecimiento mecánico y una mejor resistencia al impacto; la estructura más uniforme en estos aceros permite una mejor maquinabilidad, aunque por otra parte su resistencia a la fluencia decrece.

El aluminio es un elemento desoxidante muy enérgico ya que se combina con el oxígeno del óxido de hierro soluble, formando así alúmina, es frecuente encontrarse en los aceros partículas de alúmina dispersas. La desoxidación con aluminio influye notablemente sobre el tamaño, tipo y distribución de las inclusiones de sulfuro, contribuyendo así a evitar sopladuras y segregaciones. Se ha descubierto que en aceros moldeados, la adición de aluminio en cantidades insuficientes para lograr por completo su desoxidación, favorece la formación de inclusiones de sulfuro globulares con un tamaño variable y sin distribución definida; dichas inclusiones han sido clasificadas como del tipo I. Los aceros que han sido totalmente desoxidados con aluminio, pero que no lo contiene en exceso, presentan inclusiones clasificadas como de tipo II, las cuales pueden adoptar la forma de pequeños glóbulos en hilera o de películas de tipo eutéctico que claramente delimitan los contornos primarios de grano. Cuando un

acero ha sido desoxidado totalmente con aluminio y contiene un exceso de éste, entonces, se formarán inclusiones de sulfuros masivas y distribuidas al azar, las cuales se clasifican como el tipo III. Las inclusiones del tipo II son las más dañinas ya que son las que proporcionan las cifras de menor ductilidad; la máxima ductilidad se encuentra en los aceros con inclusiones del tipo I. Contenidos de aluminio del orden de 0.015 a 0.025 favorecen la formación de inclusiones del tipo II, en cambio contenidos del orden de 0.10% favorecerán en forma predominante la formación de inclusiones del tipo III.

El aluminio tiende a combinarse fácilmente con el nitrógeno en el acero para formar nitruro de aluminio, debido a su gran afinidad por este elemento se suele agregar a los aceros de nitruración en porcentajes que fluctúan alrededor de 1% estos aceros contienen también cromo (0.90 a 1.6%) y Mo(0.20%) cuando se requiere tener una capa superficial con una dureza máxima. Si en una nitruración no se agregasen aleantes como el aluminio y el cromo, se formarían en la superficie nitruros de hierro (Fe_2N y Fe_4N), los cuales son comparativamente blandos frente a la dureza alcanzada por los nitruros de aluminio y cromo; aunque las capas formadas por éstos es muy delgada, del orden de 0.1mm de espesor, su dureza es aproximadamente de 1000 a 1100 Vickers. Es conveniente aclarar que no por el hecho de utilizar aleantes como el aluminio, se evita completamente la formación de nitruros de hierro, sin embargo en caso de formarse éstos, lo hacen en la superficie y en capas muy frágiles que pueden eliminarse de las piezas con un ligero rectificado.

El aluminio se emplea junto con el níquel y el cobalto en la fabricación de aceros para imanes, estas aleaciones tienen tal dureza que no pueden ser mecanizadas más que con

piedra de esmeril, los imanes fabricados con estos materiales se obtienen generalmente por fusión o sinterización. Los aceros utilizados para la fabricación de imanes comunes obtienen sus propiedades magnéticas como consecuencia de las tensiones internas suscitadas por la transformación en martensita, en las aleaciones donde interviene el aluminio el endurecimiento magnético se produce mediante un proceso de precipitación. La composición de este grupo de aleaciones es muy variable y contienen del 6 al 12% de Al, del 14 al 28% de Ni y de cero a 35% de Co, a este grupo pertenecen las aleaciones "AlNiCo" y "Ticonal", algunas de éstas aleaciones contienen además cobre o titanio; por ejemplo la aleación para imanes permanentes "AlNi" contiene alrededor de 13% de Al, 24% de Ni y 3.5% de Cu, ésta se enfría a una velocidad crítica desde la temperatura de disolución y durante el enfriamiento alrededor de 1200 a 800°C, se precipita una fase no magnética finamente dispersa, las tensiones suscitadas durante el enfriamiento y la distribución del precipitado disperso crean condiciones favorables a la magnetización; cuando se desea a este material con propiedades magnéticas direccionales el enfriamiento desde la temperatura de disolución se hace en presencia de un campo magnético el cual actúa cuando la alea-ción se enfría.

El aluminio suele añadirse junto con titanio a ciertas aleaciones a base de níquel ya que al estudiar los fenómenos de endurecimiento por precipitación se observa que el alumi-nio y el titanio son los principales endurecedores. Estos elementos forman con el níquel compuestos intermetálicos ($NiAl$ y Ni_3Ti), los cuales en la segunda parte de los trata-mientos térmicos precipitan aumentando con ello y en forma considerable la dureza y resistencia del material a tempera-tura ambiente y sobre todo a altas temperaturas, tal es el

caso de las aleaciones conocidas como "Nicomac" las cuales deben a estos efectos su templabilidad. El endurecimiento de estas aleaciones se obtiene por precipitación a una temperatura aproximada de 700 a 850^oC, a estas aleaciones previamente se les ha dado un tratamiento de disolución buscando con ello una mejor distribución de las fases intermetálicas y de los carburos en el seno del material. Tras un tratamiento térmico completo, estas aleaciones poseen una favorable relación resistencia-peso, excelentes propiedades de resistencia a la rotura a elevadas temperaturas y extraordinaria resistencia a la fluencia, encontrando por ello una amplia aplicación en la fabricación de motores con una demanda térmica máxima.

En un acero al cromo-molibdeno como el "Nitralloy" y que posee un contenido aproximado del 3.5% de Ni y 1% de Al, en este caso el aluminio se emplea tanto para promover el endurecimiento por precipitación como para fines de nitruración ya que con ello se logra en este caso la usual capa exterior dura, mientras que en el núcleo a causa del proceso de precipitación la resistencia a la tracción se incrementa en aproximadamente 30 Kg/mm².

En aceros con un 18% de Cr y un 8% Ni, adiciones del orden del 1% de Al producen un endurecimiento por precipitación llegandose en ocasiones a alcanzar resistencias a la tracción del orden de 160 Kg/mm²; sin embargo en estos casos cuando el cromo está presente en porcentajes elevados favorece la formación de ferrita delta cuya presencia es perjudicial porque disminuye las características mecánicas del material, para evitar este efecto se recomienda adicionar adecuadas cantidades de manganeso o mas níquel ya que éstos elementos inhiben la formación de esta fase y favorecen la formación de austenita. Los materiales endurecidos por precipitación tienen

también la ventaja sobre los endurecidos normalmente de que el mecanismo de precipitación es relativamente insensible a los efectos de volumen y se puede lograr sin mucha dificultad un endurecimiento uniforme en toda la sección.

La resistividad y la resistencia a la oxidación de altas temperaturas de las aleaciones cromo-hierro utilizadas en la fabricación de resistencias eléctricas mejora notablemente cuando se les adiciona aluminio, por ejemplo una aleación que contenga 20% Cr y 5% Al y lo demás de hierro tiene una resistencia eléctrica del orden de 20% mayor que la de una aleación corriente de hierro-cromo. Otra serie similar de aleaciones la constituyen los materiales "Kantal" que se usan en la elaboración de resistencias y que además tienen como aleante al cobalto, la composición de estos materiales es aproximadamente 25% Cr, 5% Al y 3% Co. Tomando en cuenta todas las consideraciones analizadas, no es difícil que en la actualidad se estén utilizando una gran variedad de aceros con contenidos de aluminio muy variables.

Aluminio en la Fundición

La fabricación y el empleo de fundiciones con aluminio es de uso reciente y todavía su empleo es muy limitado debido a su difícil fabricación. Porcentajes del orden del 2% se pueden aliar con el hierro colado si se usan adiciones de metal sólido, cuando se trate de porcentajes mayores es mejor realizar las adiciones mezclando los dos metales en fusión, la viscosa película de óxido adherida a la superficie del hierro conteniendo aluminio líquido tiende a pasar al metal y de no adoptarse precauciones específicas en la fundición, pueden presentarse dificultades en la colada que redundarán posteriormente en un decremento de las propiedades mecánicas del material; en cantidades de hasta el 4%, el aluminio favorece la grafitización. Con contenidos del orden del 4 al 10% el alu-

minio hace desaparecer el grafito en las fundiciones y hace que aparezca la matriz, formada por ferrita y carburos complejos, los cuales predominan de preferencia en contenidos que varían del 10 al 18% de Al. Las fundiciones con un contenido de aluminio del orden del 7% manifiestan por lo general buena resistencia al calor y pueden utilizarse hasta 950°C, se maquinan bastante bien, su resistencia a la tracción es del orden de 18 Kg/mm² y pueden alcanzar durezas del orden de los 300 Brinell. Cuando el porcentaje de aluminio se incrementa en los rangos del 18 al 24% se produce nuevamente la grafitización la cual aumenta progresivamente a medida que lo hace el contenido de aluminio, cuando se alcanzan contenidos del orden del 24% todo el carbono tiende a estabilizarse hasta que con porcentajes del orden del 29% ya no queda grafito. Las fundiciones con mas de 8% de aluminio presentan buena resistencia al aumento de volumen y a la oxidación, pueden ser utilizadas a mas altas temperaturas que las aleaciones con un contenido menor, son difíciles de maquinar, su resistencia a la tracción es del orden de 13 Kg/mm² y su dureza suele variar entre 250 y 500 Brinell.

Con un creciente contenido de aluminio y particularmente sobre el 3%, la formación de cascarilla disminuye progresivamente, porcentajes de éste orden afectan muy poco al crecimiento, pero a partir de estos valores disminuye progresivamente a medida que el contenido de aluminio aumenta, alcanzando un probable mínimo entre contenidos del 8 al 20%, límites en los cuales hay presente poco o ningún grafito. Una aleación denominada "Cralfer" dotada de excelente resistencia al crecimiento y la oxidación a temperaturas hasta de 1000°C, contiene aproximadamente de 7 a 7.5% de Al y 0.75% de Cr.

Las fundiciones a nitrurar suelen contener de 1 a 1.5% de Al con adiciones pequeñas de cromo y molibdeno debido a

que son los principales causantes de endurecimientos superficiales. El aluminio también está contenido en el ferrosilicio y en otras aleaciones inoculantes que contienen silicio, para conseguir una conveniente inoculación es importante que estas aleaciones contengan aluminio en un 1% o más.

En las fundiciones maleables, adiciones de aluminio del orden de 0.02% favorecen la nodulización y es probable que a causa de combinarse con el nitrógeno facilita el tratamiento de maleabilización. El aluminio en porcentajes menores del 0.1% se considera que puede ser la causa de la porosidad que se da en las piezas de hierro y que es conocida con el nombre de "pinholes".

AZUFRE

Propiedades Físicas.- Símbolo S, número atómico 16, peso atómico 32.07, densidad (a 20°C) 2.06 g/cm³, punto de fusión 119°C, punto de ebullición 444.6°C. A la temperatura ambiente es un sólido de color amarillo, su variedad estable presenta una estructura cristalina ortorrómbica, es mal conductor del calor y la electricidad, por frotamiento se electriza negativamente; se vuelve casi incoloro a -50°C y oscurece al calentarlo.

Propiedades químicas.- Su configuración electrónica externa es 3s² 3p⁴ y debido a ella puede presentar las siguientes valencias: +2, +4, +6 y -2. Se combina directamente con la mayoría de los elementos a la temperatura ordinaria o por calentamiento, es insoluble en agua y soluble en CS₂; no lo ataca el HCl y es oxidado tanto por el H₂SO₄ como por el HNO₃.

Azufre en el acero.

Es uno de los elementos que más que considerarse un aleante es una impureza ya que en casi todos los aspectos su presencia es perjudicial, la cual proviene generalmente de las materias primas y que en los procesos de fabricación del acero se intenta reducir al máximo durante la fusión.

La mayor parte de los aceros contienen menos de un 0.05% de S; los aceros aleados para construcción suelen contener de 0.025 a 0.030% como máximo, algunos aceros especiales utilizados en aeronáutica tienen prescrito contenidos del 0.15% o incluso menores. Sin embargo puede adicionarse en porcentajes del orden del 0.5% tanto a los aceros al carbono como a los aleados con objeto de facilitar su maquinado, ya que las inclusiones de sulfuro doble de hierro y manganeso permiten romper la continuidad de la estructura y la viruta en lugar de salir en forma de espirales largas, se rompe en pequeños trozos por las bandas de inclusiones; aceros de este tipo

pueden resultar de difícil conformabilidad, debe contemplarse también que elevados contenidos de azufre favorecen la corrosión, la cual puede contrarrestarse con adiciones de molibdeno.

El azufre se presenta casi siempre formando inclusiones no metálicas o combinado con el manganeso formando sulfuro de manganeso (MnS), en otros casos como sulfuro de hierro (FeS), esto último ocurre cuando el contenido de manganeso no llega a ser por lo menos cinco veces mayor que el contenido de azufre. El sulfuro de hierro se separa del baño en forma de mezcla eutéctica de hierro-sulfuro de hierro y oxígeno, la cual tiene un punto de fusión inferior al del hierro, permanece líquida después de solidificado el acero; el exámen metalográfico revela que esta fase de sulfuro de hierro se haya en forma de redícula (sólida, frágil y de color amarillo) en los contornos de los granos primarios del acero; a temperaturas de trabajo en caliente, ésta película eutéctica se funde destruyendo con ello la cohesión intergranular resultando así un acero frágil en caliente; lo que puede observarse en los aceros de este tipo en los procesos de forja o laminación, durante los cuales manifiestan poca consistencia y en ocasiones llegan a agrietarse por iniciarse la fusión del sulfuro de hierro. El sulfuro de manganeso tiene una temperatura de fusión muy elevada por lo que no da lugar a la fragilidad en caliente; cuando precipita lo hace en forma de inclusiones globulares muy dispersas y lo hace cuando el acero es todavía líquido. Los sulfuros de manganeso y hierro son mutuamente solubles, dando con ello lugar a la formación de soluciones sólidas y mezclas eutécticas con sus óxidos; aparecen en el acero en forma de glóbulos grisáceos que se alargan generalmente en los procesos de laminación. Los componentes eutécticos formados tanto por el sul-

furo de hierro como el de manganeso poseen puntos de fusión mas bajos al del acero, circunstancia que hace que éstos se concentren siempre en la última parte de acero, que solidifique, produciendo con ello una notable segregación de núcleos en los lingotes esta segregación es mayor en los lingotes de aceros efervescentes que en los de aceros calmados.

La solubilidad sólida del azufre en el hierro no ha sido determinada con exactitud, se considera que aproximadamente un 0.25% es soluble en austenita a unos 940°C, estos porcentajes disminuyen a medida que la temperatura aumenta; la solubilidad en ferrita es probablemente menor.

En la soldadura con arco eléctrico la presencia de sulfuros es muy perjudicial, si se soldan aceros de fácil mecanización con contenido de azufre del orden de 0.15% por este procedimiento, en el cordón de soldadura cuando el electrodo usado es de acero sin aleación aparecen en él poros y grietas, el límite hasta el cual no se esperan dificultades es cuando el material base tiene un contenido del orden del 0.05% y en depósito se llega a acumular aproximadamente un 0.03% de azufre. Cuando los aceros tienen altos contenidos de azufre pueden soldarse satisfactoriamente con el empleo de electrodos revestidos con bajo contenido de hidrógeno, lógicamente una elección adecuada de la relación cal-ácido silícico del revestimiento conduce a una fijación del azufre, permitiéndose así una buena soldadura; el bajo contenido de hidrógeno en estos casos es el que contribuye a evitar la formación en el cordón de soldadura de grietas y poros.

Azufre en la fundición.

Su presencia en las fundiciones al igual que en los aceros es siempre perjudicial, por que obstaculiza la grafitización, hace a la fundición dura y frágil y provoca graves defectos en las piezas tales como: Rechupes, sopladuras y rotu-

ras. El azufre de las fundiciones proviene del arrabio (hierro de primera fusión) procedente del alto horno, en donde es absorbido como FeS o como azufre producto de la reducción de sulfatos y sulfuros. La fusión en cubilote favorece el aumento del contenido de azufre el cual es captado del coque; sin embargo la fusión en cubilote básico tiende a reducir el contenido de azufre en la fundición.

La influencia del azufre en las fundiciones es verdaderamente sensible en ausencia de manganeso, se presenta en estos casos como sulfuro de hierro el cual precipita durante la solidificación en forma de inclusiones de color gris oscuro; el sulfuro de hierro favorece la formación de cementita debido a lo cual las fundiciones tienden a blanquearse, este efecto puede ser contrarrestado suceptiblemente adicionando manganeso a la fundición. En ocasiones el azufre si se encuentra contenido en cantidades importantes en forma de FeS y sin que exista suficiente cantidad de manganeso, puede dar lugar al fenómeno conocido como " temple invertido " el cual consiste en segregación de azufre en forma de FeS en las zonas centrales próximas a la mazarotas o rechupes, lo cual tiende a blanquear en esos puntos a la fundición; ocurriendo entonces un endurecimiento mayor en la zona central que en la periferia.

El azufre tiene una gran afinidad con el manganeso, al combinarse forma sulfuro de manganeso, compuesto que no tiene ninguna influencia en la formación del grafito y la cementita; para contrarrestar los efectos del azufre presente como sulfuro de hierro y asegurar la formación del sulfuro de manganeso, el contenido de éste deberá ser lo suficientemente elevado como para satisfacer la siguiente relación empírica: $\%Mn=1.7\% \times S= 0.3\%$ por lo menos esta cantidad de manganeso está presente normalmente en todas las piezas de fundición

gris. La solubilidad del MnS en el hierro colado es limitada, propiciando así que fundiciones con contenidos elevados de azufre y manganeso puedan contener inclusiones de sulfuro de manganeso, un exceso puede provocar a temperaturas de colada bajas la formación de sopladuras.

A medida que se incrementan las adiciones de azufre a la fundiciones la dureza de estas también aumenta, particularmente si el azufre rebasa contenidos del orden del 0.18%; sin embargo contenidos superiores al 0.20% van en detrimento de la maquinabilidad del hierro colado.

CARBONO.

Propiedades Físicas.- Símbolo C, número atómico 6, peso atómico 12.01, densidad (a 20°C) de la variedad alotrópica grafito 2.25 g/cm³, punto de fusión 3527°C, sublima a los 3850°C, el grafito a la temperatura ambiente es un sólido gris. Posee una estructura cristalina hexagonal; es buen conductor del calor y la electricidad, razones por las que se utiliza en la fabricación de electrodos. El carbono puede presentarse en otra variedad alotrópica conocida como diamante y cuyas propiedades son diferentes a las del grafito.

Propiedades Químicas.- Su configuración externa es $2s^2 2p^2$; sus valencias principales son +4, +2 y -2. La actividad química del grafito es superior a la del diamante, debido a que se estructura laminar y la distancia entre las capas permiten la intercalación de otros átomos pequeños; pudiendo incluso separar más las capas. El grafito pulverizado arde en el oxígeno a 690°C, se utiliza como combustible y tiene un uso muy difundido por sus propiedades como reductor.

Carbono en el acero.

Es el elemento que ejerce una mayor influencia en las propiedades mecánicas de los aceros, razón por la cual ha sido uno de los elementos aleantes estudiados con mayor profundidad. La solubilidad del carbono en las diferentes fases del hierro es variable; la fase gamma puede llegar a disolver hasta un 1.8% C a temperaturas del orden de los 1200°C, dicha solubilidad decrece a medida que la temperatura disminuye; cuando el hierro está en su fase alfa prácticamente no disuelve al carbono o si lo hace es en proporciones pequeñas y variables de 0.035 a 0.050% cuando la temperatura es del orden de 720°C, estos contenidos llegan a disminuir hasta un 0.008% a la temperatura ambiente.

El carbono abate el punto de solidificación del hierro, puesto que se disuelve en su fase para formar austenita, esta solubilidad del carbono en austenita decrece con la temperatura hasta que a los 695°C se transforma en perlita; éste es un eutectoide mezcla de ferrita y cementita (carburo de hierro). Los aceros ordinarios son una mezcla de hierro puro, cementita y otros elementos; se emplean en grandes cantidades para la construcción de estructuras metálicas, piezas de maquinaria y motores; las propiedades de los aceros ordinarios dependen principalmente del porcentaje de carbono que contienen; en general estos aceros comerciales están constituidos por una dispersión de cementita en ferrita y como solo un máximo de 0.05% de C es soluble en ferrita a 720°C , el contenido de carbono determina la proporción de carburos de hierro en el acero. Se consideran aceros ordinarios aquellos cuyos contenidos de C, Mn, Si, P y S varían entre los siguientes rangos: C de 0.03% a 0.70%, Mn < 0.90%, Si < 0.50%, P < 0.10% y S < 0.10%.

En los aceros no aleados, el aumento del contenido de carbono (hasta un 0.84%) favorece una creciente formación de perlita, lo que implica un aumento del límite elástico y de la resistencia a la tracción; sin embargo estos aumentos están íntimamente ligados con un decremento en la ductilidad y maleabilidad del material. Variando el contenido de carbono en los aceros y sometiendo a apropiados tratamientos térmicos, puede obtenerse en ellos la más amplia gamma de propiedades tales como alta tenacidad y resistencia a la fluencia a elevadas temperaturas. Los aceros al carbono sin aleación proporcionan microestructuras típicas que pueden ser tomadas como referencia para evaluar por comparación la influencia de los elementos de aleación.

Carbono en la fundición.

Las fundiciones son aleaciones hierro-carbono, difieren de los aceros por su contenido de carbono el cual es superior al 1.75% y por la constante presencia de otros elementos tales como el Si, Mn, P y S cuyos contenidos son muy variables. Aunque industrialmente las fundiciones se consideran aleaciones binarias impuras, en realidad son aleaciones ternarias Fe-C-Si conteniendo usualmente de 2 a 4% de C y de 0.25 a 3% de Si junto como ya se mencionó anteriormente a cantidades variables de Mn, P y S y en algunos casos de otros elementos. El carbono es sin duda el aleante más importante de las fundiciones, ya que es factor determinante de su estructura y lógicamente de sus propiedades; se le puede encontrar en la microestructura como eutéctico cementítico (ledeburita), en estado libre como grafito o ambos a la vez; son muchos los factores que pueden favorecer una forma u otra tales como la velocidad de enfriamiento y la presencia de elementos grafitizantes o estabilizadores.

Durante la solidificación y el subsiguiente enfriamiento en el estado sólido, la fundición es austenítica por encima de la temperatura crítica; la solubilidad del carbono en la austenita decrece con el descenso de temperatura. En la fundición gris, el carbono segregado de la austenita durante el enfriamiento normal precipita sobre las partículas de grafito ya existentes. En la fundición blanca, precipita sobre la cementita ya existente o formando carburos en el mismo grano o en sus contornos.

Un enfriamiento lento y contenidos elevados de silicio favorecen la grafitización, en estos casos el grafito precipita sobre las partículas de grafito ya existentes, siempre y cuando estas sean lo suficientemente finas; el carbono grafitico disminuye la resistencia del metal porque interrumpe

la continuidad de la estructura facilitando así su maquinabilidad y da a la fractura una coloración gris o gris oscura. Cuando el carbono se precipita como grafito, la matriz es parcial o totalmente ferrítica y en este caso el carbono (como carburo) a la temperatura eutectoide forma una mezcla constituida por las fases de carburo y ferrita conocida como perlita; la perlita es un constituyente de gran resistencia mecánica, no frágil y de fácil maquinabilidad; es por esto que cuando se desean fundiciones de alta resistencia se busca que la matriz esté constituida fundamentalmente por perlita y puesto que en este caso es la estructura más óptima es lógico que deba existir una proporción adecuada entre carbono e hierro que permita obtener las mejores características mecánicas, la relación mas aceptable es la que se conoce como grado de saturación y se expresa de la manera siguiente:

$$Sc = \frac{CT}{4.23 - 0.312xSi - 0.33xP + 0.66xMn}$$

en donde:
Sc=grado de saturación
Ct=Carbono total.

cuando el grado de saturación oscila entre 0.70 y 0.75 el material adquiere resistencias a la tracción del orden de 50 a 60 Kg/mm².

Conforme a su aspecto en la fractura las fundiciones se pueden clasificar en: Grises, atruchadas (o sea con puntos blancos sobre fondo gris o viceversa) y blancas. El aspecto de la fractura depende de como se presente el carbono (cementita o grafito) y de las proporciones de ferrita presentes. Cuando las fundiciones son tratadas térmicamente la matriz puede estar constituida por austenita, martensita u otras estructuras intermedias. El grafito eutéctico cristaliza en la fundición frecuentemente en forma de células eutécticas formando un armazón grafitico interdependiente, según la ramificación y finura de esta armazón se localizarán en la microgra

fia láminas finas o bastas de grafito las cuales como se ha mencionado anteriormente, influyen en forma determinante en las propiedades mecánicas de la fundición y se estará por tanto en condiciones de deducir el comportamiento de la fundición a relaciones tensión alargamiento en función de la forma y tamaño de las partículas de grafito presente.

Por tratamiento con magnesio se consigue que ya en estado bruto de colada el grafito esté presente es forma preferencialmente esferoidal nodular; este efecto también se logra cuando fundiciones maleables (las cuales solidifican por lo regular completamente blancas) se someten a tratamientos térmicos prolongados, efectuándose en ellas una descomposición de la cementita eutéctica y eutectoide, segregándose grafito que tiende a adoptar la forma nodular. El tipo de fundiciones con grafito esferoidal o nodular, llegan a presentar resistencias a la tracción del orden de 70 a 80 Kg/mm² o más; estas fundiciones pueden alcanzar también elevada ductilidad, bien sea en el estado bruto de colada o después de un tratamiento térmico, sin embargo tal aumento lleva consigo un leve decremento de la resistencia. Por adición de elementos formadores de carburos se puede reducir la tendencia a la formación de ferrita y con ello elevar por consiguiente la resistencia; un temple, un revenido o el favorecer la formación de estructuras aciculares mejorará también la resistencia de la matriz; por otra parte a una fundición puede reducirse su resistencia elevando su contenido en silicio o mediante enfriamientos lentos.

En cierto tipo de fundiciones es característico que su tendencia al crecimiento lleve a cambios de volumen que pueden rebasar el 100%. Lo cual está condicionado por la grafitización. El crecimiento puede producirse a causa de la gra

fitización a temperaturas hasta la crítica e influido considerablemente por la expansión térmica de los distintos constituyentes de la fundición, así como también por la oxidación y la repetida disolución y precipitación de grafito sobre la temperatura crítica.

La conductividad térmica de las fundiciones decrece a medida que disminuye el contenido de grafito; sin embargo su conductividad eléctrica aumenta, lo cual es debido a que el grafito es un buen conductor de la corriente eléctrica.

COBRE.

Propiedades Físicas.- Símbolo Cu, número atómico 29, peso atómico 63.54, densidad (a 20°C) 8.94 g/cm³, punto de fusión 1083°C, punto de ebullición 2310°C. A la temperatura ambiente es un sólido de color rojizo, posee una estructura cristalina cúbica de caras centradas la cual conserva hasta su fusión, es buen conductor del calor y la electricidad, es dúctil y maleable.

Propiedades Químicas.- Su configuración, electrónica externa es $3d^{10} 4s^1$, sus valencias principales son +1 y +2. Aunque inalterable al aire seco, en el aire húmedo se recubre con una capa de hidroxicarbonato conocida como cardenillo; por acción del calor en presencia del oxígeno del aire se forma óxido de cobre, no es atacado por el HCl pero si por el H₂SO₄ (concentrado y caliente) y el HNO₃.

Cobre en el acero.

La solubilidad del cobre en el hierro es limitada, desde un máximo de 8.5% en el hierro gamma alrededor de 100°C, la solubilidad desciende al 3% a la temperatura eutectoide 723°C aproximadamente. Las solubilidades a temperaturas próximas a la del medio ambiente no son conocidas, pues apenas se puede lograr el equilibrio. Durante el enfriamiento, una solución de C y Cu en hierro gamma se transforma en perlita, la cual puede ser rica o pobre en cobre.

Cuando se calientan aceros cuprosos (lingotes, productos laminados o forjados) con objeto de homogeneizarlos, como el calentamiento se produce normalmente en condiciones oxidantes, la superficie del acero se oxida cubriéndose así con una capa gruesa de óxido constituida generalmente por óxidos de hierro y otros elementos excepto de Cu y/o Ni. En realidad los átomos de cobre no se oxidan, no forman carburos y tampoco son

propensos a formar compuestos intermetálicos con el hierro, debido a este comportamiento el Cu tiende a concentrarse en la superficie entre metal y costra, pudiendo incluso segregarse hacia los límites de grano. Cuando estos materiales se trabajan en caliente y la temperatura rebasa o se aproxima a la temperatura de fusión del cobre, la deformación plástica provoca grietas superficiales y origina una superficie rugosa, sobre todo en las aristas de los productos laminados; este fenómeno se conoce como "fragilidad en caliente" y es despreciable para contenidos de cobre de hasta 0.5%, para evitarlo es ideal efectuar estas homogeneizaciones en atmósfera inerte cosa que no resulta muy práctica, lo que se hace generalmente es homogeneizar a más bajas temperaturas o adicionando níquel (por lo menos un tercio del contenido de cobre) a fin de elevar la temperatura de fusión de la fase rica en cobre, aumentando con esto la temperatura de trabajo en caliente y evitando consecuentemente la formación de grietas superficiales.

En los aceros de bajo contenido de carbono, el cobre suele añadirse en cantidades que varían entre 0.2 y 0.4% con un máximo de 0.5% con el fin de aumentar su resistencia a la corrosión atmosférica, estos aceros se denominan algunas veces aceros para intemperie; cabe destacar que la resistencia a la corrosión atmosférica y a la producida por el suelo mejora en estos aceros con la presencia de fósforo. Adiciones del orden de un 2% de Cu a los aceros pobres en carbono incrementan el límite elástico sin detrimento esencial de la tenacidad. Un enfriamiento al aire, por ejemplo al normalizar, suele ser suficiente para mantener al cobre en solución; a menos que las secciones sean gruesas se requiere que el enfriamiento en el intervalo crítico (600 a 400°C) sea muy lento, de no presentarse en este caso un revenido a una temperatura de 450°C aproxima-

damente conduce a la precipitación de una fase rica en cobre, con lo que consecuentemente se obtiene una mayor dureza, sin embargo aunado a este efecto aparece un decremento de la tenacidad. Al incrementarse los contenidos de carbón en los aceros al cobre, decrece en ellos la tendencia al temple por precipitación; para que en un acero tenga lugar un endurecimiento por precipitación el contenido de cobre debe ser 0.6% como mínimo, contenidos de cobre de 1 a 1.5% en aceros de bajo carbono elevan considerablemente su resistencia a la tracción (15 Kg/mm^2) y su límite elástico (17 Kg/mm^2 aprox.) lo cual es una ventaja frente a los aceros normalizados.

El cobre es un estabilizador de la austenita suave y por lo tanto retarda su transformación, retarda también la formación y crecimiento de la perlita, no se alea con la cementita y su influencia en la disolución de carburos en la austenita durante el tratamiento térmico es nulo. En aceros con moderado porcentaje de cobre, el que no se alcanza a disolver se separa en forma de partículas finas ricas en cobre; cuando el contenido de Cu es mayor del 8% se forma una fase rica en cobre (fase epsilon) la cual puede llegar a aparecer en los contornos de grano.

Aunque se tienen en cuenta y utilizan los efectos del cobre para aumentar el límite elástico, resistencia, templabilidad, endurecimiento, etc; la razón primordial de su uso es generalmente la facultad que tiene de aumentar la resistencia a la corrosión. Adiciones del orden de 0.25 a 0.50% se ha encontrado en forma práctica que son los más adecuados para este fin; si bien el efecto del cobre en la velocidad de corrosión no se puede comparar con el efecto que tienen las adiciones de Cr-Ni, el aumento del costo del acero al carbono para construcciones por adición de cobre resulta insignificante con el que representa la adición de Cr-Ni para obtener acero inoxidable.

ble. Adiciones de Cu del orden de 1.0 a 4.5% a aceros inoxidables del tipo 18-8 (18% Cr-8% Ni) incrementan su resistencia a la corrosión de los ácidos sulfúrico, fosfórico y nítrico así como a soluciones clorhídricas suaves en frío.

Debido a que el cobre aumenta el límite elástico de los aceros se adiciona en la actualidad a aceros para construcciones poco aleados y en los que se requiere una resistencia elevada, es evidente que se prefiera en estos casos a éstos aceros que los aceros ordinarios con análoga tenacidad y formabilidad ya que el cobre también aumenta la resistencia a la corrosión y la maquinabilidad en forma considerable, además no altera la soldabilidad, propiedad que consiste fundamentalmente en obtener juntas cuyas propiedades permitan utilizar toda la capacidad del material.

Cobre en la fundición.

Puesto que el cobre es un elemento que puede estabilizar la perlita, favoreciendo con ello su formación tanto en secciones delgadas como gruesas y promoviendo así la formación de una estructura uniforme, el Cu suele agregarse a las fundiciones con este fin; esto se traduce en una mayor dureza y resistencia de las fundiciones. La resistencia disminuye con adiciones mayores del 3% considerándose este valor como el máximo que puede causar una influencia benéfica, a mayores porcentajes el Cu precipita en forma de finas partículas. El cobre tiene una influencia grafitizante durante la solidificación, permitiendo esto adiciones de Cr así como también de Cu con objeto de obtener mejores propiedades mecánicas; sin embargo, puesto que el cromo es un buen formador de carburos su contenido como máximo debe estar limitado a 0.5%, con el fin de evitar la formación de carburos ledeburíticos durante la solidificación (fundición atruchada) los cuales perjudican la maqui

nabilidad del hierro; además el contenido de cobre y cromo debe estar en una relación 1 a 4 la cual asegura en la práctica un equilibrio entre la tendencia formadora de carburos del cromo y la influencia grafitizante del cobre. A pesar de las ventajas antes mencionadas las fundiciones corrientemente empleadas en construcciones mecánicas no contienen cobre.

En las fundiciones nodulares a pesar de que el cobre es un antiferritizante y favorece la grafitización, su presencia no es deseable; no tanto porque sea un elemento perjudicial sino por tener correlaciones especiales con elementos perjudiciales tales como: Ti, Pb, Sb, Bi, Al, As y Sn. En los de más tipos de fundiciones el Cu suele adicionarse porque les imparte una mayor resistencia a la corrosión y aumenta su límite elástico, características que les permiten un amplio rango de aplicación.

CROMO.

Propiedades Físicas.- Símbolo Cr. número atómico 24, peso atómico 52.01, densidad (a 20°C) 7.14 g/cm³, punto de fusión 1930°C, punto de ebullición 2482°C. A la temperatura ambiente es un sólido de color blanco-azulino brillante, posee una estructura cristalina cúbica centrada en el cuerpo, es muy duro y bastante frágil, tiene una gran estabilidad en el aire a la temperatura ordinaria.

Propiedades Químicas.- Su configuración electrónica externa es 3d⁵ 4s¹, sus valencias principales son +2, +3 y +6. A elevadas temperaturas reacciona con el oxígeno, los halógenos, el azufre, el nitrógeno, el carbono etc. Es atacado, oxidándose por los ácidos; sin embargo el HNO₃ le comunica un estado pasivo. Tiene tendencia a formar ácidos y polícidos.

Cromo en el acero.

Es uno de los elementos más empleados para la fabricación de aceros aleados, usándose indistintamente en los aceros de construcción, en los de herramientas, en los inoxidables y en los de resistencia en caliente. La solubilidad del cromo en el hierro gamma es muy elevada, no así en la fase alfa donde se puede contener hasta 13% en solución sólida, este contenido se incrementa hasta un 20% aproximadamente cuando el carbono se encuentra presente en porcentajes del orden de 0.5%.

El cromo en los aceros se adiciona en las cantidades más diversas, desde 0.30 a 30% según los casos; sirve fundamentalmente para aumentar la dureza y la resistencia a la tracción de los aceros, mejorar la templabilidad y evitar deformaciones en el temple, aumentar la resistencia al desgaste, la inoxidabilidad, la resistencia a la corrosión (al disolverse en la

ferrita la endurece ligeramente), además por ser un fuerte formador de carburos aumenta la resistencia a la abrasión en aceros de alto contenido de carbono.

Adiciones de cromo al hierro puro restringen la fase γ , con contenidos del orden del 13% de Cr la fase delta existe hasta la temperatura ambiente, cuando los contenidos son del orden del 22 al 65% de Cr, se suele presentar el compuesto FeCr (fase sigma), la fase sigma también la fomentan otros elementos y aún con bajos contenidos de cromo se puede presentar esta fase, así por ejemplo un acero del tipo 18-8 que contenga elementos formadores de carburos tales como Mo (3%) y Ti (1%) si se calienta alrededor de los 850°C se formará fácilmente la fase sigma. Contenidos de cobalto del orden de 7 a 10% originan una fragilidad similar a la observada cuando los contenidos de cromo son inferiores al 20%, esto es debido a la formación de la fase sigma.

En los aceros aleados con cromo existen esencialmente cuatro carburos complejos, a saber: Cementita rómbica $(FeCr)_3C$, en donde el contenido de cromo puede llegar al 45% aproximadamente; el carburo de cromo trigonal $(CrFe)_7C_3$, que puede contener hasta un 40% de cromo; el carburo de cromo cúbico $(CrFe)_4C$, en donde el cromo es reemplazable por el hierro (25% aprox.) y el carburo de cromo ortorrómbico $(CrFe)_3C_2$, el cual puede contener escasa proporción de fierro este solo se presenta en aleaciones con 0.9% (o más) de carbono. En caso de encontrarse el cromo en mayor cantidad que la necesaria para formar carburos, el exceso entra en solución sólida; cuando esto sucede ejerce un efecto endurecedor menor que cualquiera de los elementos de aleación corrientes (excepto el cobalto), esta es la razón por la cual aceros con contenidos de hasta un 30% de Cr sean relativamente suaves contribuyendo con ello a su amplia aplicación en la fabricación de aceros inoxidables.

dables.

El cromo disuelto aumenta el tiempo necesario para la transformación isotérmica de la austenita, razón por la cual en aceros con 0.3% de C y más de 2% de Cr no se forma perlita a las velocidades normales de enfriamiento; cuando el enfriamiento es suficientemente lento (impidiendo con ello la formación de martensita) se obtiene una estructura perlítica finamente laminar conocida como "bainita".

Debido a que es un fuerte formador de carburos, el cromo reduce el contenido de carbono de la perlita eutectoide y eleva la temperatura de transformación de la austenita; en un acero con 12% de Cr la transformación eutectoide se lleva a cabo con un contenido de carbón de 0.35% y la temperatura de transformación se eleva alrededor de los 800°C.

Un acero con bajo contenido de carbón (0.25 a 0.45%) y hasta 1.5% de Cr puede poseer buena resistencia a la tracción y formabilidad, para poder lograr los efectos anteriores es conveniente tomar medidas adecuadas y oportunas que eviten un excesivo crecimiento del grano y con ello la fragilidad; este acero después de templado muestra una apreciable resistencia al revenido, son resistentes a la corrosión atmosférica y su resistencia a la tracción se ve mejorada con adiciones del orden de 0.5% de Mo. Aceros de bajo carbón pero con contenidos de cromo de 3 a 3.5% y en algunos casos hasta con 0.5% de Mo, son requeridos en la fabricación de grandes piezas forjadas debido a su gran resistencia, la cual proviene en estos casos de la estructura bainítica provocada por un lento enfriamiento. Cuando en aceros de bajo carbono se adicionan porcentajes del orden de 5 a 6% de Cr junto con pequeñas cantidades de Mo o Nb (o ambos), estos adquieren buena resistencia a la tracción, a la fluencia y a temperaturas relativamente altas;

este tipo de aceros se emplea comunmente en las refineries. Adiciones moderadas de molibdeno a estos aceros mejoran la templabilidad (siempre y cuando el contenido de carbono no sea mayor del 0.3%)

La mayor parte de los aceros aleados con bajo contenido de cromo tienen 1% de Cr y Ni de 1.5 a 4.5% aproximadamente, la presencia simultánea de estos elementos en los aceros imparte a los mismos particularidades especiales, el Ni provoca una disminuci3n de los puntos críticos lo cual implica mayor capacidad de temple y afinamiento del grano; el Cr aumenta notablemente la dureza permitiendo con ello obtener aceros duros y tenaces (el Cr exalta todos los efectos benéficos del níquel). Los aceros de bajo contenido de níquel y 0.3% de carbono se templean en aceite; los aceros con 1.2% de Cr y 4%Ni se templean al aire y presentan una gran dureza, buena resistencia a la tracci3n, tenacidad y resistencia al impacto elevadas, estas características justifican el hecho del porque son utilizados en la fabricaci3n de piezas de gran espesor (3rganos de máquinass, ruedas, etc.). Los aceros níquel-cromo se utilizan en piezas cementadas si el carbono es muy bajo (0.15% aprox.), realzando el cromo las propiedades del acero cementado ya que forma carburos fáclilmente y aumenta la templabilidad; los aceros al cromo puro no suelen cementarse debido a que la capa superficial formada es muy frágil y puede desprenderse fáclilmente; a estos aceros suele añadirse molibdeno con objeto de aumentar la penetraci3n del temple y disminuir el peligro de la fragilidad de revenido debido a que las piezas después del revenido soportan enfriamientos lentos en el intervalo crítico (550-450°C). La dureza superficial puede ser obtenida en los aceros nitrurados, con cromo, ya que éste tiene, una gran afinidad con el nitr3geno, con el cual forma un nitruro insoluble en el hierro alfa que

precipita inmediatamente, quedando en forma de partículas submicroscópicas muy dispersas que deforman la red y por consiguiente aumentan la dureza del acero.

El cromo se utiliza en la fabricación de los llamados aceros indeformables dentro de los cuales se distinguen dos grupos de aceros con cromo, a saber: Aceros de 5% de Cr y aceros de 12% Cr, la ventaja de los primeros es que aún cuando tienen menor resistencia al desgaste su maquinabilidad es mejor; los segundos lógicamente son más resistentes y más difíciles de maquinar, un tipo de acero de este grupo con 12% de Cr y 2% de C revenido a 500 o 600°C sufre un aumento considerable de dureza (temple secundario), razón por la cual se utilizan bastante en la fabricación de matrices y estampas ya que estas conservan por bastante tiempo los perfiles originales, otra propiedad que manifiesta este acero es su escasa propensión a descarbonarse. Los aceros indeformables al cromo se pueden templar al aire o en aceite, los templados al aire tienen contenidos del orden de 1% de Mo el cual mejora notablemente su templabilidad. El cromo también está presente en la composición de los llamados aceros rápidos (con W o Mo) ya sea en los del tipo de 1% de V o en los de mucho carbono y vanadio, el porcentaje de Cr en estos aceros fluctúa entre 3.5 y 5% ya que estos contenidos son los adecuados para asegurar la formación de la cantidad de carburos estables necesaria.

El cromo se emplea en gran cantidad en la fabricación de aceros inoxidables, los cuales pueden clasificarse en 3 grupos:

- 1o.- Aceros martensíticos.
- 2o.- Aceros ferríticos.
- 3o.- Aceros austeníticos.

Los primeros reciben este nombre ya que suelen quedar

con esa estructura después del temple y aún también después del enfriamiento al aire, los aceros más clásicos de este grupo contienen de 12 a 14% de Cr, el contenido de cromo es el responsable de la buena resistencia a la corrosión en estos aceros, en el estado de temple y revenido un acero con 13% de Cr y 0.3% de C puede presentar durezas de aproximadamente 530-550 Brinell, se fragiliza con la soldadura requiriendo por lo tanto de un tratamiento térmico posterior, presenta buena forjabilidad en el rango de 1100 a 900°C, después de un recocido de ablandamiento a 750°C se maquina fácilmente, sin embargo su formabilidad en frío es mala. Un acero similar con 13% de Cr pero con solo 0.1% de C es menos duro, tras el temple (en aceite) y subsiguiente revenido su dureza se incrementa hasta 150 Brinell aproximadamente, este acero martensítico es muy empleado en la elaboración de paletas para turbina, sin embargo en las turbinas de vapor debido a las altas temperaturas de servicio han tenido que emplearse aceros de más alta aleación; este acero es más soldable aún cuando para evitar la fragilidad es necesario tratar térmicamente las partes soldadas, presenta además buena formabilidad en caliente y regular en frío. Crecientes contenidos de cromo mejoran la resistencia a la corrosión de los aceros inoxidables martensíticos.

Los aceros ferríticos se denominan también aceros de alto contenido de cromo y el porcentaje que suelen contener, varía de 15 a 30% aproximadamente; su contenido de carbon suele ser bajo, por lo general menor de 0.15% y solo en los aceros de 27% de Cr suele oscilar hasta valores de 0.30%; el elevado contenido de cromo proporciona buena resistencia a los agentes oxidantes (ácido nítrico y otros), a la oxidación y a la formación de cascarilla a elevada temperatura; la resistencia a la corrosión de los aceros ferríticos es li

geramente superior a la de los martensíticos. Los aceros con contenido de cromo de 25 a 30% tienen un excelente comportamiento a la oxidación a elevadas temperaturas, empleándose a menudo temperaturas superiores a 1000°C , se prestan particularmente para su empleo en atmósferas sulfúricas aunque su duración en servicio se vea limitada a menudo por sus deficientes propiedades mecánicas a altas temperaturas, esto se debe principalmente a que a elevadas temperaturas el grano se engruesa rápidamente; cuando se quiere reprimir este efecto se añade al acero al fabricarlo, nitrógeno, los contenidos de nitrógeno deseados se logran por adición (al baño) de ferrocromo conteniendo nitrógeno. Los aceros de este grupo se caracterizan por no poder ser tratados térmicamente como los aceros ordinarios, por que tienen en cualquier estado y a cualquier temperatura una estructura fundamentalmente ferrítica (no son templables); son en general aceros de baja resistencia mecánica, bastante blandos y relativamente frágiles.

Los aceros austeníticos son aceros Cr-Ni más inoxidables y resistentes a la corrosión atmosférica y a ciertos ácidos que los aceros martensíticos y ferríticos. En estos aceros la adición de níquel mejora aún más la resistencia a la corrosión, a la oxidación y a la formación de cascarilla a altas temperaturas. Estos aceros no pueden ser templados, revenidos o recocidos en la forma ordinaria, debido a que en cualquier estado y a cualquier temperatura están constituidos fundamentalmente por austenita, que tiene gran estabilidad y no se transforma por el enfriamiento aún por debajo de la temperatura ambiente en otros constituyentes; solo pueden endurecerse por deformación en frío. Manifiestan una mínima dureza tras un tratamiento térmico a temperaturas alrededor de 1050 a 1100°C , son resistentes al ácido sulfúrico y clorhídrico (no oxidantes), su resistencia a la corrosión puede incrementarse con adiciones del orden del 3% de Mo y aún más si

se añade Cu en porcentaje similar. Los aceros austeníticos del tipo 18-8 suelen presentar un fenómeno de corrosión en los límites de grano, esto sucede cuando el acero permanece un tiempo sometido a temperaturas del orden de 500 a 600°C, se presenta en las proximidades de zonas soldadas y es ocasionado por un empobrecimiento de cromo en los granos como consecuencia de una precipitación de carburos en los contornos del grano durante el calentamiento (de 500 a 650°C); el fenómeno antes descrito se conoce como "corrosión intergranular" y se puede atenuar ajustando el carbono a un valor máximo de 0.03% ya que ello garantiza precipitación de pocos carburos, también se puede agregar con el mismo fin al acero un elemento con mayor afinidad con el carbono que el cromo mismo, para que así no se formen carburos de cromo y no se empobrezca el contenido de cromo de la solución sólida; mayores contenidos de carbón y un grano grueso favorece notablemente la corrosión intergranular. Se ha mencionado que los aceros Cr-Ni poseen buenas características de resistencia a elevadas temperaturas, sin embargo para especificaciones especialmente elevadas suelen alearse con otros elementos, por ejemplo: Adiciones de Nb a un acero con 18% Cr y 12% Ni le imparten buena resistencia a la fluencia a temperaturas entre los 600 y 650°C, para aplicaciones a temperaturas menos elevadas son apropiadas adiciones de Co, Mo y W, todas estas aleaciones son también de carácter austenítico; para aplicaciones en las que se precisa buena resistencia a la formación de cascarilla es conveniente adicionar Si y W en grandes cantidades, un acero de este tipo es por ejemplo uno con 19% Cr, 8% Ni, 3% W y 2% Si; para aplicaciones en las que se requiera elevadísima resistencia al calor se recurre a aleaciones a base de níquel, por ejemplo: A una con 65% Ni, 15% Cr y 20% Fe o en su defecto a una con 80% Ni y 20% Cr.

La producción de aceros inoxidable**s** bajos en carbono, va en aumento de la misma forma que la demanda de ferroaleaciones y materias primas de escasísimo contenido de carbono. En estos aceros suelen adicionarse para fines de estabilización Nb y Ti, el Mo produce también un leve efecto de estabilización siempre y cuando el contenido de carbono no pase del 0.07%, en este caso adiciones del 2.5 al 3% de Mo protegen al acero de una manera eficaz de la corrosión intercris**t**alina.

En toda la familia de los aceros inoxidable**s**, la buena resistencia a la corrosión proviene de la capa extremadamente delgada de óxidos formados en un tiempo mínimo sobre la superficie del acero cuando éste está expuesto al aire, líquidos o gases conteniendo oxígeno; la capa de óxido se denomina película pasiva, y presenta las siguientes propiedades: Es transparente, se adhiere firmemente al acero y es tan delgada que no es visible en la superficie del acero, es insoluble en agua y otros líquidos e impermeable para ellos así como para muchos gases, mientras la película permanezca intacta y adherida a la superficie del acero este se mantendrá protegido de la corrosión.

En años recientes aparecieron los aceros inoxidable**s** templables por precipitación, éstos poseen una estructura esencialmente austenítica; sin embargo puede transformarse en martensita por tratamiento térmico cuando se enfrían desde altas temperaturas a temperaturas bajo cero o revenido a aproximadamente 750°C; un siguiente tratamiento de envejecimiento entre los 450 y 600°C se traduce en un nuevo aumento de dureza; las razones anteriores hacen que en este estado los aceros posean excelentes propiedades mecánicas independientemente de una buena resistencia a la corrosión, un acero de este tipo es por ejemplo uno con 16% Cr, 5% Ni, 2% Cu y 2% Mo, en donde el co-

bre y el molibdeno incrementan la resistencia a la corrosión, favoreciendo además el cobre el envejecimiento.

Cromo en la fundición.

Tanto en la microestructura y las características de las fundiciones los contenidos de cromo ejercen una influencia muy diversa; cabe señalar que es un fuerte formador de carburos, el hierro colado aún con pequeños contenidos de cromo se enriquece de ellos, los carburos formados pueden ser complejos y resultan mas estables que la cementita; contenidos pequeños de cromo logran retardar la grafitización tanto de la cementita eutéctica como de la perlita durante el tratamiento térmico o en el enfriamiento lento normal. Contenidos de cromo de 0.10 a 0.20% afinan la perlita y el grafito en las fundiciones ordinarias; porcentajes del orden de 1% provocan ya la aparición de carburos de gran dureza, los cuales son muy estables a altas temperaturas; con contenidos del 2% desaparece el grafito ocasionando con ello que la fundición se vuelva blanca y la proporción de carburos de cromo aumenta; con 6% de Cr la matriz es perlítica y los carburos formados ejercen gran influencia; a partir del 12% los carburos se afinan y se disponen en red, apareciendo austenita en la microestructura; cuando los contenidos de cromo son 30% o más, la matriz es ferrítica (se observa en ella cantidades del eutéctico ferrita-carburo de cromo), estas fundiciones no tienen puntos de transformación en el calentamiento y en su estructura aparecen carburos finos de cromo incrustados en la matriz; para garantizar en estas fundiciones una estructura ferrítica el contenido de carbono no debe rebasar el 1.4%.

El cromo en las fundiciones incrementa la dureza y resistencia al desgaste, cuando los contenidos de cromo son eleva-

dos las fundiciones manifiestan una excelente resistencia al calor, si el porcentaje es del 30% o mayor, además de su buena resistencia al calor tienen mejor resistencia a la corrosión y son inoxidables. El cromo suele añadirse a las fundiciones con níquel o cobre con objeto de regular la acción grafitizante de estos elementos, esto lleva consigo una mejora en las propiedades mecánicas de las fundiciones sin detrimento de las de solidificación, en otros casos el cromo se aprovecha por su acción estabilizadora.

POSFORO.

Propiedades Físicas.- Símbolo P, número atómico 15, peso atómico 30.97, densidad (a 20°C) 1.82 g/cm³ (variedad blanca), punto de fusión 44.1°C, punto de ebullición 280.5°C. A la temperatura ambiente es un sólido blanco o negro, posee una estructura tetraédrica; es blando hasta el punto que se corta con navaja; se vuelve duro y frágil y de aspecto cristalino si se enfría hasta 0°C. El fósforo blanco ioniza al aire saturado de humedad, para evitar su oxidación se conserva sumergido en agua o encerrado herméticamente, es extremadamente tóxico.

Propiedades Químicas.- Su configuración electrónica externa es $3s^2 3p^3$, sus valencias principales son +3, +5 y -3. El fósforo blanco arde a 50°C con llama blanca y viva convirtiéndose en P_2O_5 ; finamente dividido arde a la temperatura ambiente. Reacciona espontáneamente con los halógenos, en menor grado con el azufre y se combina directamente con muchos metales formando fosfuros. Es oxidado por oxidantes como el HNO_3 y hasta por el vapor de H_2O a 600°C; es un buen reductor.

Fósforo en el acero.

El fósforo se presenta siempre disuelto en los granos de ferrita y austenita, su solubilidad máxima en la ferrita es de 2.8% y en la austenita, asciende hasta 0.5%. El fósforo ejerce una influencia notable sobre la resistencia de los aceros y aparentemente esta particularidad parece ser una influencia favorable; sin embargo en la práctica la presencia de fósforo en casi todos los casos resulta perjudicial, esto se debe a que el fósforo influye notablemente en las temperaturas de transición del acero y además imparte a las fases en las que se disuelve una gran fragilidad, favorece también la for

mación de una estructura de grano basto y puede traducirse en segregaciones indeseables; las razones anteriores nos dan una idea del porqué el fósforo en la gran mayoría de los casos se le considera una impureza y no un aleante. El fósforo está presente como impureza residual en todos los aceros comerciales y puesto que su influencia es nociva y no fácil de contrarrestar, se suele siempre tratar de reducir todo lo posible en ellos el contenido de fósforo. En solución sólida el fósforo endurece la ferrita y en cantidades relativamente pequeñas incrementa la templabilidad de la austenita.

El hierro y el fósforo tienen fuerte afinidad entre sí, el fosfuro (Fe_3P) formado puede disolverse hasta en un 1.7% en austenita y en un 1% en ferrita; el fosfuro y el carburo de hierro son mutuamente insolubles. El carbono disminuye la solubilidad del fósforo en la ferrita, pero como el contenido de fósforo en la mayoría de los aceros resulta insignificante éste está siempre presente en solución sólida.

En los aceros de bajo carbono (pobres en carbono) adiciones de fósforo incrementan la resistencia a la tracción y a la corrosión. En los aceros automáticos aún cuando sea añadido solo y no juntamente con azufre mejora la maquinabilidad de ellos. aceros que se maquinan a elevadas velocidades de corte como son los utilizados en tornillería, pueden contener hasta 0.1% de fósforo.

Aceros para construcción poco aleados y de alta resistencia con contenidos de carbón de 0.10 a 0.15% reciben adiciones hasta de 0.1% de P, en estos casos el fósforo incrementa la resistencia sin fragilizar el material; en estos aceros de elevada resistencia casi siempre están presentes como aleantes Cu, Ni y/o Cr; los aceros de este tipo son además de fácil conformabilidad y el riesgo de un endurecimien-



to por soldadura es despreciable. A ciertos aceros de bajo carbono y con contenidos de cobre del orden del 0.3% suele agregarse hasta un 0.07% de P con objeto de conferirles buena resistencia a la corrosión atmosférica.

Fósforo en la fundición.

La mayoría de las fundiciones contienen fósforo procedente del mineral de hierro en cantidades variables entre 0.1 y 0.9%, el lingote de moldería puede llegar a contener hasta un 1.4%, sin embargo por lo general el contenido de fósforo tanto en el hierro como en los hierros de afino es inferior al 0.04%.

El fósforo confiere a la fundición líquida una particular fluidez porque disminuye el punto de solidificación, pero al mismo tiempo aumenta la fragilidad y la dureza; pese a estos efectos suele añadirse a la fundición con objeto de favorecer su colabilidad y así emplearla en la fabricación de piezas de poco espesor y de forma complicada (también para piezas de carácter decorativo u ornamental), en donde una fundición menos fluida no llenaría ni se adaptaría en forma adecuada a las paredes del molde. La mejora de la colabilidad de las fundiciones por la presencia del fósforo es debida a la formación de un constituyente eutéctico (steadita) de bajo punto de fusión y que suele aparecer en los contornos de grano (formando una red continua) de austenita primaria, esto origina un aumento de la fragilidad y una disminución de la tenacidad de las fundiciones, por lo que debe controlarse cuidadosamente el contenido de fósforo con objeto de obtener características mecánicas óptimas, esta condición se logra cuando el contenido de fósforo no sobrepasa el 0.2%. El constituyente eutéctico puede ser ternario, formado por fosfuro de hierro-cementita y austenita (perlita a tempera-

tura ambiente) o pseudobinario en donde la cementita es reemplazada por granos de grafito; el punto de fusión del eutético en la fundición ordinaria es aproximadamente 930°C y como es el constituyente que solidifica al final, suele aparecer en la fundición gris como un duro retículo que delimita los bordes de grano, en la fundición blanca forma hileras.

Contenidos de fósforo hasta del 0.2% en la ferrita fragilizan la fundición, es por eso que la fundición nodular y maleable (americana) se limita a contenidos menores (aproximadamente 0.12% como máximo). Las fundiciones grises que se someten en servicio a elevados esfuerzos y temperaturas (piezas para motores de automóviles), raramente contienen más de 0.2% de fósforo, ya que cuando este contenido se supera el riesgo de que se produzcan contracciones en el material, aumenta gradualmente.

La resistencia a temperatura ambiente y a elevada temperatura de las láminas de grafito puede ser elevada con adiciones de fósforo de 0.5 a 1.0%. El fósforo no ejerce una influencia sensible sobre la grafitización en las fundiciones, aunque en forma general puede decirse que se opone ligeramente a ella.

HIDROGENO.

Propiedades Físicas.- Símbolo H, número atómico 1, peso atómico 1.008, densidad (a 0°C y 1 atm) 0.089 g/l, punto de fusión 259.2°C, punto de ebullición 252.7°C. A la temperatura ambiente es un gas incoloro; es la substancia más ligera que se conoce, es soluble en diversos grados en los disolventes comunes. Es absorbido por distintos metales, pasa a través de las paredes metálicas descarrurandolas modificando con ello su estructura física y volviendolos quebradizos.

Propiedades Químicas.- Su configuración electrónica externa es $1s^1$, sus valencias principales son +1 y -1. El hidrógeno se combina fácilmente a temperaturas que no sobrepasen los 500°C con los metales alcalinos; su combinación con los alcalino-térreos se produce fácilmente a presiones moderadas, con el magnesio y el berilio no se combina directamente. En general se combina con la mayoría de los demás elementos. Tiene una gran aplicación como reductor y en metalurgia se utiliza para crear atmósferas de este tipo en el moldeo de piezas metálicas susceptibles de oxidarse.

Hidrógeno en el acero.

A 1350°C y 1 atm de presión, la solubilidad del hidrógeno en el hierro gamma asciende al 0.0008% o 9 ml de hidrógeno por cada 100 g de hierro; con la transformación a hierro alfa la solubilidad decrece bruscamente, a 900°C el hierro alfa puede disolver aproximadamente 0.0005% o 6 ml de hidrógeno por cada 100 g de hierro.

La presencia de hidrógeno en la fundición de acero es difícil de evitar ya que es absorbido desde los gases del horno: en la desoxidación puede llegar a absorberse hidrógeno proveniente de las ferroaleaciones, desoxidantes y agentes formadores de escoria; puede ser absorbido también de la hume

dad del aire, de los productos de la combustión así como de los escorificantes húmedos y chatarra herrumbrosa. En el metal líquido el hidrógeno se disocia, quedando disuelto en forma atómica. Durante el período de afino la mayor parte del hidrógeno absorbido puede eliminarse mediante viva ebullición del baño de acero; a temperaturas altas puede eliminarse lentamente por difusión, razón por la cual, las grandes piezas de forja se tratan a temperaturas del orden de 650°C con objeto de separar el hidrógeno, el tiempo del tratamiento varía de acuerdo al cuadrado del diámetro de la pieza, estas relaciones pueden ser iguales cuando se trata de tratamientos prolongados y piezas de gran tamaño.

Durante la solidificación el hidrógeno presente escapa en exceso y puede producir sopladuras en el metal sólido. Cuando desciende la temperatura y disminuye la solubilidad, el hidrógeno tiende a acumularse en microfisuras en la estructura; en tal caso la presión puede aumentar localmente y conducir a fracturas localizadas en el material, dando lugar a las llamadas grietas capilares (siempre y cuando la temperatura descienda de 300°C). El hidrógeno aparte de favorecer la formación de grietas capilares promueve la fragilización, la cual incrementa la resistencia a la tracción; estos efectos son observables notablemente en los aceros para temple y revenido y menos pronunciados en los aceros inoxidables martensíticos al cromo y desconocidos en los aceros inoxidables austeníticos. El hidrógeno incrementa también la ductilidad con el tiempo ya que aún a temperatura ambiente se difunde aunque lentamente, en el acero.

Una leve corrosión superficial en el acero no aleado puede dar lugar a la formación (si el acero es de bajo carbono) de ampollas, tal corrosión provoca la evolución del hidrógeno atómico, que se difunde en el acero y forma hidrógeno molecu-

lar en las inclusiones y zonas no homogéneas de la estructura, ello hace que la presión aumente (sobre todo en secciones delgadas) hasta formar ampollas. En un acero muy puro el hidrógeno se difunde por lo regular a la atmósfera, razón por la que el tamaño y distribución de las inclusiones determinan la tendencia a la formación de ampollas, cuando las inclusiones son pequeñas y dispersas las ampollas no se forman rápidamente; efectos similares pero más rápidos se dan en el decapado del acero, aparece una fragilidad sin formación de ampollas, la cual es producida por la difusión del hidrógeno atómico.

El hidrógeno presente en la atmósfera de arco o en el material puede conducir a su agrietamiento en la proximidad del cordón de soldadura cuando se soldan aceros sensibles, para reducir este efecto, los materiales de revestimiento de la varilla de soldadura deberán contener la menor cantidad posible de elementos generadores de hidrógeno en la atmósfera del arco. Al soldar aceros de alta resistencia sensibles a las grietas, pueden utilizarse con éxito electrodos de soldar en aceros con 19% Cr y 8% Ni, ya que el cordón de soldadura del acero austenítico tiene una solubilidad relativamente elevada para el hidrógeno y por tanto éste estará en solución sólida; con esto se evita el inconveniente de la difusión y el subsiguiente envejecimiento; el cordón de soldadura austenítico casi siempre tiene menor resistencia a la tracción que el metal base, por lo que deben emplearse electrodos del mismo tipo con bajo contenido de hidrógeno. Los aceros automáticos conteniendo S, P y Pb pueden soldarse perfectamente con electrodos pobres en hidrógeno.

Hidrógeno en la fundición.

Está presente en las fundiciones casi siempre como impureza gaseosa y en muy pequeñas cantidades las cuales influyen

poco o nada en la estructura y características, sin embargo da lugar a porosidades y rechupes cuando el contenido es importante. El hidrógeno presente suele provenir de la humedad de los moldes, del vapor de agua contenido en el aire soplado y de la humedad del coque. En la fundición gris ordinaria apenas hay efectos que provengan de la presencia de hidrógeno en el metal fundido; por lo general el contenido de hidrógeno en las fundiciones varía entre 0.0001 y 0.0002%.

Una absorción de hidrógeno del material de moldeo durante la colada, particularmente cuando se cuela hierro contenido Al o Mg, puede producir finas picaduras (pin-holes); las burbujas de hidrógeno se identifican fácilmente por su superficie brillante.

Aunque en la fundición ordinaria la presencia de hidrógeno en el metal líquido tiene poca o ninguna influencia, cuando se fabrican tipos aleados como las fundiciones altas en silicio, el hidrógeno debe eliminarse cuidadosamente de la colada para impedir porosidades en las piezas fundidas, ya que el hidrógeno incrementa su solubilidad con crecientes contenidos de silicio; esto se puede evitar si la fundición se fabrica en el horno con bajo contenido de silicio, incrementándolo posteriormente mediante la adición de ferrosilicio al canal de colada o a la cuchara, con lo que los riesgos de que aparezcan porosidades se reducen notablemente.

MANGANESO.

Propiedades Físicas.- Símbolo Mn, número atómico 25, peso atómico 54.94, densidad (a 20°C) 7.44 g/cm³, punto de fusión 1245°C, punto de ebullición 2097°C. A la temperatura ambiente es un sólido blanco grisáceo o rojizo, la variedad alfa tiene una estructura cristalina cúbica centrada en el cuerpo, es muy frágil, puede ser pulverizado fácilmente, es bastante duro y capaz de adquirir pulimento. No es magnético en estado puro, pero son intensamente ferromagnéticas algunas de sus aleaciones con metales no magnéticos como la de Sb y Al.

Propiedades Químicas.- Su configuración electrónica externa es 3d⁵ 4s², sus valencias principales son +2, +3, +4, +6 y +7. El estado de oxidación más estable para el estado sólido es el de +7, con este número y con +6 en solución tiene carácter ácido. Es muy activo, es atacado y oxidado a la temperatura ambiente o en caliente, es por tanto un buen reductor; le atacan los halógenos, el azufre y el oxígeno, reacciona además con el HCl.

Manganeso en el acero.

Es un elemento que prácticamente aparece en todos los aceros, la razón de ello es que se adiciona normalmente con objeto de neutralizar la influencia nociva tanto del azufre como del oxígeno, que siempre suelen estar presentes en los aceros cuando se encuentran en estado líquido en los hornos durante el proceso de fabricación. La solubilidad del manganeso en el hierro gamma es ilimitada, mientras que en el hierro alfa asciende hasta el 3% aproximadamente.

El manganeso actúa también como desoxidante evitando en parte, que en la solidificación del acero se desprendan gases que den lugar a porosidades perjudiciales en el material. Su efecto como desoxidante es menos potente que el del silicio y en presencia de este no surge como producto de la de-

oxidación ningún óxido de manganeso, sino un silicato hierro-manganeso complejo. Si al desoxidar, la adición de manganeso es bastante elevada de tal manera que diera lugar a la formación de silicato de manganeso estable, en estos casos el poder desoxidante del silicio resulta incrementado.

Si los aceros no tuvieran manganeso, no se podrían laminar ni forjar, porque el azufre que siempre suele encontrarse en menor o mayor cantidad en los aceros, formaría sulfuro de hierro, el cual con el hierro forma un eutéctico que tiende a rodear por completo los granos primarios, como este eutéctico es de muy bajo punto de fusión (980°C aproximadamente) a las temperaturas de trabajo en caliente (forja o laminación) funde y puesto que está contorneando los granos, la cohesión de éstos se debilita y las piezas y barras se abren en estos procesos de transformación. En cambio cuando el acero contiene manganeso, se formará preferentemente MnS en lugar de sulfuro de fierro; el MnS tiene un punto de fusión más elevado que el sulfuro de hierro y forma en el acero inclusiones separadas entre si que no funden a las temperaturas de laminación, a estas temperaturas estas inclusiones esferoidales son plásticas y por tanto no ocasionan problemas y dificultades en el trabajo en caliente (forja y laminación).

El manganeso se disuelve en la ferrita y la endurece; se combina con el carbono formando carburos de apariencia similar a la cementita, aunque su tendencia a formar carburos es mayor que la del fierro es inferior a la del cromo; también incrementa la templabilidad de la austenita. Adiciones de manganeso a las aleaciones hierro-carbono disminuyen la velocidad de transformación así como también la temperatura de transformación; conducen además a un decremento del contenido de carbono eutectoide y a la formación de finas láminas de perlita. Las adiciones de manganeso al promover con un enfriamiento lento la transformación en el intervalo martensí-

tico, dan lugar a una mayor profundidad en el temple.

El manganeso incrementa el límite elástico y la resistencia a la tracción, esta última aumenta casi en la misma proporción que el contenido de carbono. En combinación con el carbono reduce la velocidad crítica de enfriamiento provocando en este caso un endurecimiento del material, esta es la razón por lo que la tenacidad para un contenido de carbono dado disminuye con crecientes contenidos de manganeso y por lo que en tales casos el contenido de carbono se suele reducir; mientras el carbono no exceda al 0.25% y el Mn al 1.3% no se presenta este problema, aceros de este tipo presentan buena resistencia a la tracción y buena tenacidad. Adiciones de manganeso al acero sin alear mejoran la templeabilidad, en este aspecto es el elemento que tiene una influencia mas intensa (ligeramente superior a la del molibdeno); es un elemento de aleación relativamente barato motivo que aunado a su presencia benéfica permite que esté presente en casi todos los tipos de aceros.

Con contenidos de Mn superiores al 1.1% el acero se hace austenítico y los cambios de fase y la precipitación de carburos se realizan tan lentamente que en ausencia de deformaciones para fines prácticos no tienen importancia; esto quiere decir que en aceros con más de 1.1% de Mn después de ser calentados por encima de 1000°C y enfriados posteriormente en agua, la austenita formada a alta temperatura no se transforma en otros constituyentes, esta es la razón por la que los aceros austeníticos no pueden ser templados y sus propiedades son muy diferentes a la de los aceros ordinarios; un ejemplo de este tipo de aceros es uno con 1.0 a 1.4% de C y 10 a 14% de Mn en el cual el elevado contenido de Mn impide la transformación usual y el acero aún a temperatura ambiente sigue austenítico con elevada resistencia a la tracción y excelen-

te tenacidad, tiene además gran resistencia al desgaste debido al endurecimiento por deformación en frío razones por las cuales se emplea adecuadamente en la fabricación de piezas que requieren una gran resistencia a la abrasión tales como: mordazas de máquinas, trituradoras de mineral, excavadoras, cruzamientos de vías, etc. Cuando el contenido de Mn está por debajo del 10% la resistencia a la tracción disminuye notablemente, por ejemplo un acero con 8% de Mn presenta prácticamente la mitad del valor usual de un acero con 10 a 14% de Mn; los altos contenidos de Mn (10 a 14%) no influyen en forma notable sobre el límite elástico del acero. Los aceros al manganeso en general tienen una tendencia marcada a presentar el fenómeno de fragilidad por revenido, razón por la cual y en particular piezas de gran sección deben templarse tras un tratamiento de revenido.

El manganeso se combina con el nitrógeno presente formando nitruros de manganeso, en forma similar que los que el nitrógeno forma con el Al, Cr, Ti y Mo, todos estos nitruros incluyendo el de Mn son extremadamente duros, por tal motivo el Mn solo o en combinación con los elementos antes citados es un importante constituyente de los aceros de nitruración. Tanto el Mn como el N ejercen un débil efecto como estabilizadores de la austenita, motivo por el cual en los aceros Cr-Ni austeníticos se ha optado por sustituir una parte de Ni por estos dos elementos; un acero típico de este tipo es uno que contiene 0.1% de C, 18% de Cr, 5% de Ni, 8% de Mn y 0.12 a 0.18 de N, este acero es puramente austenítico y muestra en comparación con los aceros usuales 18-8 un buen comportamiento a la rotura a elevadas temperaturas, su resistencia y tenacidad a temperaturas bajas y ambiente son excelentes y en condiciones oxidantes su resistencia a la corrosión es comparable a la de estos aceros. En los aceros ferríticos el Mn no

ejerce una influencia evidente en la resistencia al desgaste y a la corrosión, así como tampoco en la resistencia a la formación de cascarilla.

En los aceros para herramienta (el Mn está presente normalmente en porcentajes del orden de 0.20 a 0.40%) los contenidos de Mn ejercen una influencia importante en su calidad y en especial en la templabilidad (aumenta la penetración del temple), lo cual es debido a que el manganeso disminuye la velocidad crítica del temple. Es tal la influencia del manganeso en el aumento de la dureza de los aceros que cuando los contenidos se elevan entre 1 y 3% estos son clasificados como aceros indeformables. La templabilidad de los aceros de herramienta que contienen aproximadamente 1% de Mn y 1% de C, no solo se ve influenciada por los contenidos de Mn sino también por adiciones de Cr y W de hasta un 0.5%; un acero típico de este tipo es el que contiene 0.90% de C, 0.50% de Cr y 0.50% de W el cual por ser templable en aceite está catalogado como indeformable.

Manganeso en la fundición.

El manganeso favorece la formación de carburo y, a su vez, se combina fácilmente tanto con el carbono como con el azufre. Dada su gran afinidad con el azufre y formar inclusiones de MnS el cual substituye al sulfuro de hierro en el hierro fundido, por tanto con este efecto neutraliza el efecto del azufre y con ello se deriva que éste es el principal papel del manganeso; teóricamente para formar sulfuro de manganeso es necesario que éste sea 1.7 veces mayor en peso que el contenido de azufre, en la práctica es necesaria una cantidad de Mn mayor, alrededor de 3 veces más que el contenido de azufre; como la mayor parte de las fundiciones contienen entre 0.06 y 0.12% de S, el contenido de Mn suele ser como mínimo del 0.5%.

El manganeso puede aparte de presentarse como sulfuro en forma disuelta, cuando se halla en solución favorece la forma ción de perlita (también la afina) y eleva la templabilidad. Si el Mn se encuentra en la proporción justa para formar MnS , disminuye la cantidad de carbono combinado presente al neutra lizar la influencia del azufre; en este caso se favorece lige ramente la grafitización, sin embargo en la grafitización eu- tectoide el Mn es un enérgico estabilizador de la cementita. El Mn puede estar en exceso en el caldo y no ejerce una influen cia notable sobre la solidificación aún cuando en este caso se retrasa ligeramente la grafitización primaria. El Mn tien e también a blanquear las fundiciones y a aumentar su dureza dificultando así su mecanización; a menos que no se quie ran obtener fundiciones con dureza particular, el contenido de Mn suele variar entre 0.4 y 1%.

Cuando el contenido de Mn rebasa en exceso la cantidad necesaria para neutralizar al azufre, pueden producirse rechupes con bajas temperaturas de colada, de esto se deduce que contenidos de Mn altos pueden ser indeseables, aunque por otra parte elevados porcentajes de Mn son útiles para conse guir (con contenidos de azufre adecuados y una controlada tem peratura de colada) estructuras con matriz puramente perlítica. El Mn en las fundiciones nodulares y maleables suele man tenerse bajo, con objeto de favorecer la formación de estruc turas ferríticas tenaces; sin embargo cuando se requiere un hierro maleable perlítico, el contenido de manganeso suele ser superior al 1%.

MOLIBDENO.

Propiedades Físicas.- Símbolo Mo, número atómico 42, peso atómico 95.95, densidad (a 20°C) 10.21 g/cm³, punto de fusión 2622°C, punto de ebullición 5500°C aproximadamente. A la temperatura ambiente es un sólido de color blanco, posee una estructura cristalina cúbica centrada en el cuerpo; es dúctil y maleable y puede forjarse y moldearse en caliente.

Propiedades Químicas.- Su configuración electrónica externa es 4d⁵ 5s¹, sus valencias principales son +2, +3, +5 y +6. Es estable en el aire a temperatura ambiente; a elevadas temperaturas reacciona con el oxígeno, halógenos, azufre, nitrógeno, carbono, etc. Con el HNO₃ forma óxido de molibdeno. El Mo en polvo absorbe pequeñas cantidades de hidrógeno sin llegar a formarse por ello el hidruro. Los hidróxidos no tienen acción sobre el Mo.

Molibdeno en el acero.

Es un elemento que mejora notablemente las propiedades de los aceros, razón por la cual su uso se ha difundido bastante. El hierro gamma puede contener hasta un 3% de Mo en solución sólida, con contenidos del orden de 0.3% de C la cantidad de Mo puede incrementarse hasta un 8%; la solubilidad del Mo en el hierro alfa asciende hasta un 37.5%.

El Mo se disuelve en la ferrita (la endurece por solución sólida), incrementa notablemente la templeabilidad de la austenita, mejora también la resistencia a la tracción y al "creep". El Mo es un potente estabilizador de los carburos complejos y tiene además fuerte tendencia a formar carburos, también tiende a retardar el ablandamiento de los aceros en el revenido, es decir, mejora su resistencia ante él. Cuando el Mo se adiciona a aceros no aleados de alta resistencia, les confiere buenas características de tenacidad, incrementando con ello la resistencia a la tracción y la dureza;

comparativamente estos aceros al molibdeno poseen mejores características de elasticidad y mayor resiliencia que los aceros no aleados.

Las adiciones de Mo retardan la transformación austenítica y con bajas velocidades de enfriamiento se forman estructuras de gran dureza. Este efecto permite evitar las dificultades que implica el templear piezas de gran sección, cuestión que no se evita con los aceros al carbono. Adiciones pequeñas de Mo se traducen en una dureza uniforme cuando las secciones son de poco espesor, un contenido de 0.15% de Mo ejerce prácticamente el mismo efecto que 0.20% de Cr o 1.25% de Ni.

Los aceros al Mn, al Cr y al Ni-Cr (con más de 0.75% de Cr) son muy propensos a presentar fragilidad por revenido, este fenómeno se reduce notablemente por adición de Mo, con un suficiente contenido de Mo (3% aproximadamente) estos aceros pueden ser enfriados lentamente tras el revenido sin que se produzca la fragilidad. Este tipo de aceros tiene gran difusión en la fabricación de piezas de alta resistencia tales como ejes, cigüeñales etc. Con adiciones de Mo se retarda la disminución de la dureza de la martensita por encima de los 260°C, contenidos menores al 0.25% de Mo bastan para incrementar en forma notable la dureza de aceros martensíticos de alto y medio carbono que se revienen entre 450 y 650°C.

Adiciones de Mo del 2 al 4% a aceros con contenidos de carbono entre 0.10 y 0.25% conducen a un endurecimiento secundario tanto en la porción martensítica como en la no martensítica en la estructura de temple (cuando el revenido se efectúa entre los 500 y 650°C), este endurecimiento secundario redundan en un detrimento de la ductilidad; cuando las tem

peraturas de revenido son mayores de 650°C la dureza disminuye rápidamente y la ductibilidad tiende a recuperarse. A elevadas temperaturas de revenido el Mo tiende a segregarse en la fase de carburos, tras prolongado revenido a 700°C aproximadamente pueden presentarse en la cementita elevados contenidos de Mo.

Adiciones de Mo a los aceros de baja y alta aleación mejoran las características de resistencia tanto a la tracción como a la fluencia a elevadas temperaturas; esta particularidad puede deberse a dos probables razones, a saber: Primero.- El notable aumento de la resistencia en caliente de la ferrita y la elevación de la temperatura de recristalización tras el endurecimiento por deformación. Segundo.- Puede ser que mediante el tratamiento térmico de los aceros al Mo se consigan estructuras intermedias que posean una mayor resistencia a la fluencia que la perlita o la martensita revenida. Aún cuando el Mo basta por sí solo para mejorar la resistencia a la fluencia, la mayor parte de los aceros resistentes al calor tienen aparte de Mo adiciones de Cr y/o vanadio, estos aceros se requieren principalmente en la fabricación de partes que demandan temperaturas de servicio superiores a los 450°C (calderas y tubos); estos aceros deben ser, resistentes a los gases y a la oxidación, resistentes al vapor sobrecalentado, poseer elevada resistencia a la fluencia y no presentar fragilidad por revenido.

Puesto que el Mo incrementa la profundidad del temple, algunos aceros para herramienta con alto contenido de cromo tienen también Mo. Adiciones del orden de 1% de Mo incrementan la tendencia al temple al aire de estos aceros en forma considerable; cuando el contenido de cromo es entre 12 y 14% y el carbono entre 2.2 y 2.4% los aceros son difíciles de trabajar, razón por la cual se prefieren aceros con 1% de C,

6% de Cr y 1% de Mo aún cuando su dureza y resistencia a la corrosión son inferiores, sin embargo poseen una mayor tenacidad.

En los aceros rápidos donde el W es un elemento fundamental éste puede ser substituido por Mo aún cuando esta substitución en la mayoría de los casos no es total; la relación empírica de substitución es de, una parte en peso de Mo substituyendo a dos de W; conviene aclarar que los aceros rápidos al Mo requieren un mayor cuidado que los aceros rápidos al W, ya que a elevadas temperaturas y en condiciones oxidantes son muy propensos a descarbonarse; este problema puede evitarse usando baños de sales, atmósferas controladas o revestimientos adecuados. Las temperaturas de recocido y temple de los aceros rápidos con Mo son ligeramente inferiores a las que corresponden a los aceros al W.

El Mo reduce la tendencia a la formación de grafito en los aceros a altas temperaturas. El Mo produce en el acero nitruros con alta resistencia al desgaste razón por la que se utiliza en la fabricación de aceros de herramienta de nitruración. Las adiciones de Mo en aceros al cobre con reducido porcentaje de carbono incrementan la resistencia a la corrosión atmosférica.

Molibdeno en la fundición.

Mejora las propiedades de la fundición y favorece muy ligeramente la estabilidad de los carburos. El Mo se adiciona a la fundición en cantidades variables con objeto de mejorar su resistencia y tenacidad; su influencia en la fundición es similar a la que ejerce sobre el acero; las adiciones normales fluctúan entre el 0.25 y el 1.25% y tienen como consecuencia la formación de una estructura básicamente perlítica en piezas de mediana y gran sección, con lo cual la estructura

resulta más uniforme y la dureza y resistencia son mayores. En piezas de sección pequeña, la adición de Mo favorece la formación de estructura acicular (estructura bainítica) en las cuales el carbono grafitico toma una forma finamente laminar y rizada con matriz perlítico-martensítica. Con adiciones de Mo junto con Ni, puede obtenerse en las fundiciones tipos de estructura acicular en todos los espesores de sección. Con elevados contenidos de Mo se obtiene formación de martensita. Adiciones de Cu junto con Mo ejercen un efecto similar que el de Mo-Ni, el contenido de Cu en estos casos debe ser tan bajo de tal manera que se garantice que se encuentre totalmente en solución. Las fundiciones aciculares en general son de elevada resistencia a la tracción, al choque y al desgaste además poseen una gran dureza, razones por las cuales se utilizan en la fabricación de piezas que precisan estas características (levas, engranajes, camisas para motores, etc.)

El Mo retarda la transformación de la austenita, aumentando por tanto la templabilidad y disminuyendo el riesgo de la aparición de grietas y deformaciones. El Mo tiende ligeramente a blanquear las fundiciones, es formador de carburos y precipita fácilmente con Cr y V en el fosfuro eutéctico, de este efecto se deriva que tanto el Cr, V y P son elementos indeseables en las fundiciones aciculares en las cuales el Mo juega un papel primordial.

NIQUEL

Propiedades Físicas.- Símbolo Ni, número atómico 28, peso atómico 58,71, densidad (A 20°C) 8.9 g/cm³, punto de fusión 1455°C, punto de ebullición 2900°C. A la temperatura ambiente es un sólido blanco azulino, posee una estructura cristalina cúbica centrada en las caras, es dúctil y maleable (menos que el hierro) y es relativamente blando.

Propiedades Químicas.- Su configuración electrónica externa es $3d^8 4s^2$, presenta casi exclusivamente la valencia +2. Aún a la temperatura ordinaria es un reductor moderado y por tanto susceptible de reaccionar con los halógenos, oxígeno y azufre; a elevadas temperaturas reacciona con otros elementos de menor actividad tales como el H, N y Si. El níquel fundido puede absorber hasta un 6.25% de carbono sin que se produzca carburo alguno. Con ácido nítrico concentrado se vuelve pasivo y no es atacado por los hidróxidos alcalinos.

Níquel en el acero.

El níquel es el único elemento entre todos los aleantes, que puede formar con el hierro, una serie continua de soluciones sólidas; es totalmente soluble en la fase gamma y hasta un 10% puede estar presente en solución sólida en la fase alfa, en ocasiones (poco frecuentes) llega a formar un carburo (Ni₃C) inestable que se asocia con la cementita. El Ni abate la temperatura de transformación gamma-alfa, con lo cual se favorece la estabilización de la fase austenítica a bajas temperaturas; cuando el contenido de níquel es mayor del 30% las aleaciones son totalmente austeníticas a temperatura ambiente independientemente de la velocidad de enfriamiento. El níquel también incrementa y reforza por solución a la ferrita y aumenta ligeramente la templabilidad de la austenita; sin embargo una de las ventajas más importantes del empleo del níquel como

aleante es, evitar con su presencia el crecimiento de grano, lo cual redundaría en la consecución de gran tenacidad en los ma teriales.

Aunque la velocidad de difusión del carbono en la austenita no se ve afectada en forma determinante por la presencia de Ni, la velocidad de difusión de éste (la cual es mucho más lenta) si puede verse afectada por variaciones del contenido de carbono. Es conveniente señalar que la influencia del Ni en la transformación de la austenita se acentúa más en el intervalo de temperatura de formación de la bainita que en el de formación de perlita, razón por la cual la influencia del Ni es más notoria por su efecto principalmente sobre la ferrita y la formación y distribución de la fase de carburos. El Ni no tiende a formar carburos y prácticamente solo se encuentra presente en solución sólida.

Los aceros con Ni aún cuando sean sometidos accidentalmente a temperaturas demasiado elevadas, conservan una buena tenacidad después del temple y revenido; los aceros que carecen de Ni manifiestan en forma notable los efectos de un tratamiento térmico defectuoso, quedando por lo general después de él, con cierta fragilidad. El Ni permite que los tratamientos térmicos se realicen a temperaturas ligeramente más bajas que las de un acero ordinario ya que abate los puntos críticos de transformación. Los aceros al Ni manifiestan sobre los aceros al carbono la ventaja de, que para una misma dureza los aceros con Ni incrementan ligeramente el límite elástico y además se obtienen mayores alargamientos y resiliencias, así como también una mayor resistencia a la fatiga.

En los aceros para construcción pobres en carbono, el Ni se suele agregar en porcentajes del 1.5 al 3.5% con objeto de incrementar su resistencia y dureza, sin que por ello halla un

cambio perceptible en su tenacidad; con contenidos mayores al 5% de Ni los aceros se vuelven muy frágiles debido a la martensita que contienen aún cuando hallan sido enfriados lentamente, y por tanto, este tipo de aceros no encuentran una aplicación adecuada. Con contenidos comprendidos entre 15 y 20% de Ni el acero presenta una estructura prácticamente austenítica, con la cual puede alcanzar una dureza del orden de 300 Brinell, que es la máxima que se consigue dentro del sistema Fe-Ni; con mayores adiciones de Ni la austenita empieza a aparecer en forma proporcional y por tanto se experimenta un decremento de la dureza del material. La combinación de Ni y C en aceros de bajo carbono (0.3%) y Ni en un 3% aproximadamente redundan en una mayor resistencia a la tracción, buena tenacidad, mejor resistencia al impacto y mayor límite de fluencía en comparación con un acero no aleado, este tipo de aceros tiene gran demanda en la fabricación de grandes piezas de forja y partes móviles de máquinas y motores.

Al igual que otros aceros aleados, los aceros con Ni cuyo contenido oscila entre 3 y 5% tienen mejores propiedades tras el temple y revenido, pero además tienen la ventaja sobre los aceros al carbono (con contenidos similares), de poder templarse a temperaturas menores debido a la influencia que sobre la transformación de la austenita ejerce el Ni, a esto se suma también el hecho de que cuando hay Ni no se presentan carburos que disolver y por tanto el tiempo de austenización es menor; los dos factores últimos reducen la distorsión y la tendencia a la descarburación, permitiendo con ello, obtener una mejor resistencia al impacto y a la tracción.

El Ni también se encuentra en porcentajes entre el 3 y 5% en los aceros de cementación (núcleo tenaz y superficie en durecida) en los cuales su presencia reduce la distorsión, ya que disminuye la temperatura de transformación, lo cual permi

te que los intervalos de transformación del núcleo y la capa cementada tiendan a igualarse; puesto que el Ni retarda la di fusión del carbono, se hacen indispensables en estos casos, tratamientos de carburación más prolongados con objeto de ase gurar una adecuada penetración del temple; con adiciones del orden de 1% de Cr se puede también contrarrestar la lenta di fusión del carbono, pero hay que tener cuidado de no agregar Cr en exceso ya que se corre el riesgo de obtener una capa su perfiacial muy frágil y que puede desprenderse fácilmente. Adi ciones de Ni a aceros de bajo carbono elevan la resiliencia aún a temperaturas por abajo de 0°C, estos aceros manifiestan también mejor soldabilidad que los no aleados con contenidos similares de carbono.

Aún cuando los aceros solo con Ni, tienen gran uso y apli cación, en la práctica se encuentra generalmente acompañado por Cr o Mo (o ambos), la adición de estos últimos es con ob- jeto de obtener mayores propiedades mecánicas; adiciones peque ñas de estos aleantes a los aceros al Ni, incrementan la resis tencia al desgaste y a la tracción sin que por ello la tenaci dad disminuya perceptiblemente; los contenidos de Cr, Ni y Mo en estos aceros fluctúa entre los siguientes intervalos: hasta 1.5% de Cr, de 1 a 3% de Ni y hasta un 0.5% de Mo, este últi- mo con objeto de evitar al máximo la fragilidad por revenido; la elevada relación resistencia-peso de estos materiales los hace de gran utilidad en la fabricación de piezas de gran re- sistencia.

El Ni tiene gran utilidad en la fabricación de aceros ino xidables y en los resistentes al calor, en los cuales el Ni por favorecer la austenita estable influye indirectamente para que los aceros tengan una gran ductilidad, tenaci dad, resis- tencia a la corrosión y a la deformación en caliente, propie- dades que son inherentes de la estructura austenítica, en rea lidad la acción del Ni es indirecta ya que la mejora de las

propiedades se debe fundamentalmente a la deformación de la austenita (con Cr y Ni en solución); se ha comprobado experimentalmente que los principales aspectos en que el Ni influye en los aceros inoxidable son fundamentalmente el favorecer la formación de austenita y mejorar la resistencia a la corrosión (reforzando el efecto del cromo). En la actualidad la mayor parte de la producción de Ni se emplea en la fabricación de este tipo de aceros.

La dilatación térmica es también influenciada por la presencia de Ni, una aleación con 36% de Ni llamada "INVAR" tiene un coeficiente de dilatación muy pequeño (del orden de 10^{-6}), razón por la cual es utilizado en la fabricación de instrumentos de medida, péndulos, volantes de reloj y piezas que requieren de gran confiabilidad en sus dimensiones; otra aleación de este tipo es la "PLATINITA" (46% de Ni), este material tiene amplio uso en soldadura de vidrio y en trabajos en unión al vidrio. El Ni también influye en otras propiedades especiales tales como, el ferromagnetismo, la resistividad eléctrica y la permeabilidad magnética.

Níquel en la fundición.

Este elemento se disuelve en el hierro en todas las proporciones, facilita la grafitización (además afina su estructura), disminuye la estabilidad del carburo, limita el contenido de ferrita libre y estabiliza a la perlita, mejora la maquinabilidad, aumenta la resistencia al desgaste y atenúa la diferencia de durezas en las piezas debido a los diferentes espesores (la diferencia de durezas entre espesores grandes y pequeños suele ser poca); por las razones anteriores podemos decir que el Ni actúa como un unificador de la estructura a la vez que uniformiza otras propiedades. Cabe señalar que la acción grafitizante del Ni es menor que la del silicio, ya que

3 partes de Ni hacen aproximadamente el mismo efecto que una de Si, motivo por el cual es recomendable mantener bajo al Si en la fundición aleada con Ni cuando se deba limitar la grafitización, esta medida no siempre es posible en la práctica, por lo que en estos casos suele añadirse cromo.

Pequeñas adiciones de Ni (0.1 a 1%) permiten la formación de una perlita fina, con contenidos mayores se favorece la formación de martensita y austenita; la perlita de formación fina y estable permite una mejor maquinabilidad y favorece la templabilidad, razón por la que este tipo de fundiciones con níquel son muy utilizadas en la colada de piezas para motores. Con contenidos del orden del 3% de Ni, la perlita se transforma en sorbita lo cual implica, un incremento en la dureza y la resistencia al desgaste. Con porcentajes entre el 4 y el 12% de Ni la fundición se hace blanca y difícil de trabajar, porque la matriz está constituida por una mezcla de austenita y martensita (producto de descomposición de la solución sólida de carbono, antes de llegar a la completa separación en Fe y Fe_3C). Con contenidos superiores al 15% y menores del 35% y cantidades variables de Cr y Cu, la fundición se hace completamente austenítica y de ella dependen fundamentalmente sus propiedades físicas y mecánicas; a este grupo de fundiciones se les conoce como Ni-Resist y todas ellas se caracterizan por resistir bien la corrosión (de ácidos y álcalis), por tener una buena resistencia al calor (sin sufrir dilataciones como las fundiciones ordinarias en esos intervalos) y tener buena tenacidad, sin embargo debido a sus bajos coeficientes de dilatación no suelen resistir los choques térmicos; la principal aplicación de estas fundiciones es la fabricación de recipientes y accesorios para la industria química, del jabón, petróleo etc. Adiciones de Mo a las fundiciones con Ni retardan la transformación perlítica y favorecen la formación de una estructura acicular de tipo bainítico.

Para la fabricación de piezas que deban tener gran resistencia al desgaste, o que exijan altas durezas o sufrir grandes presiones (fabricación de mordazas, martillos, recipientes para materiales abrasivos, etc.) se requiere de fundiciones al Ni y de gran dureza, el contenido de Ni en éstas es de 4.5%, tienen además 2% de Cr y bajo Si promiviendose con ello la formación de una matriz martensítica desde la colada, se debe tener cuidado de que el Ni no esté en contenidos excesivos ya que éstos pueden dar lugar a la formación de austenita lo cual no es deseable; a este tipo de fundiciones se les conoce genericamente con el nombre de Ni-Hard.

El Ni es un elemento que influye en forma notoria en la microestructura de las fundiciones, éstas suelen ser sin embargo algo diferentes cuando además de Ni se encuentran presentes Cr y Mo. Con contenidos hasta de 2% la estructura es perlítica, con 2 a 4% sorbítica, con 4 a 8% martensítica y del 15 al 35% es totalmente austenítica.

NITROGENO.

Propiedades Físicas.- Símbolo N, número atómico 7, peso atómico 14.01, densidad (a 0°C y 1 atm) 1.25 g/l, punto de fusión -210°C, punto de ebullición -195.8°C. A la temperatura ambiente es un gas incoloro, por abajo de -238°C presenta una estructura cristalina cúbica de caras centradas, es poco soluble en agua y mucho mayor en alcohol etílico.

Propiedades Químicas.- Su configuración electrónica externa es $2s^2 2p^3$, puede presentar valencias positivas desde +1 a +5 y también la de -3. A temperaturas inferiores de 200°C manifiesta una gran inercia química y solo a elevadas temperaturas reacciona tanto con oxígeno como con otros elementos (H, Al, Si, Cr, C, Etc.) con el hidrógeno no solo necesita altas temperaturas sino además elevadas presiones y la presencia de catalizadores. Por su inactividad, sirve de atenuante a la acción del oxígeno atmosférico en las oxidaciones en la superficie terrestre.

Nitrógeno en el Acero.

El porcentaje de nitrógeno que puede formar solución sólida en la fase alfa es muy pequeño, varía desde 0.42% (a la temperatura eutectoide, 590°C) hasta 0.001% a la temperatura ambiente; a temperaturas mayores el hierro disuelve mayores cantidades que las citadas anteriormente, lo cual es debido a que el nitrógeno no solo se presenta en solución como elemento, sino que además forma nitruro de hierro con el cual el hierro puede formar una amplia gamma de soluciones sólidas. El nitrógeno no solo forma nitruros con el hierro, también lo hace con otros elementos tales como Cr, Nb, V, Zr y Mo, este hecho justifica el porque el nitrógeno puede alcanzar una mayor solubilidad a temperaturas superiores a la de transformación eutectoide.

La velocidad de difusión del nitrógeno es mayor que la del carbono, pero menor que la del hidrógeno; la difusión del nitrógeno hacia el interior de un material es menor con la presencia de elementos de aleación (Cr, Al, Mo, etc.), ya que con ellos puede formar nitruros, por tanto la difusión de nitrógeno se efectúa con mayor facilidad en los aceros ordinarios al carbono que en los aleados.

Con contenidos de nitrógeno del orden de 0.01% no se forma por encima de los 300°C ninguna segunda fase, sin embargo por debajo de esta temperatura tiene lugar la precipitación de nitruros de fierro (distribuidos finamente) que suelen estar alineados, conduciendo con ello a un envejecimiento y fragilización del material. Uno de los aleantes que ejerce una gran influencia sobre el nitrógeno es el aluminio, pequeñas cantidades de éste son suficientes para formar nitruros, los cuales precipitan alrededor de los 1300°C evitando con ello la la formación de nitruros de hierro y por consiguiente la fragilización; los nitruros de aluminio conducen frecuentemente a la formación de grano alargados así como también a un afinado del grano (en aceros no aleados).

Un grupo de aceros en los cuales el nitrógeno juega un papel importantísimo es en los llamados aceros de nitruración, en ellos por lo regular están presentes considerables cantidades de formadores de nitruros (Al, Cr, Mo y V principalmente) y de los cuales depende la dureza requerida en la capa superficial nitrurada; los contenidos de carbono en estos aceros fluctúa entre 0.25 y 0.55%, puesto que con ellos se obtienen las características óptimas de estos materiales que requieren gran dureza superficial y buena tenacidad en el núcleo.

Aunque la mayoría de los aceros son tratados en ambientes oxidantes, su contenido de nitrógeno por lo general no varía, esto se debe a la capa de óxido que en la superficie se forma

impide un intercambio de nitrógeno; en ausencia de esta capa de óxido (en atmósferas no oxidantes) es susceptible de efectuarse una variación en el contenido de nitrógeno. Un acero no aleado que sea tratado en atmósferas reductoras conteniendo nitrógeno, tiende en las temperaturas de la fase gamma, a absorberlo y en la zona de las temperaturas de la fase alfa a perderlo, este efecto se debe a que los contenidos de nitrógeno en estos aceros se encuentra entre los límites de solubilidad de la fase gamma y alfa. Los aceros con alto contenido de cromo (3% a 18% o más), cuando son calentados en atmósferas nitrogenadas en el intervalo de los 1000°C o más, absorben fácilmente nitrógeno y pueden aún estos aceros, absorberlo en calentamientos al aire, ya que la capa de óxido formada en este caso resulta de poco espesor; el proceso de disolución de nitrógeno puede acelerarse con la presencia de Mn en porcentajes superiores al 3%. Es común adicionar nitrógeno a los aceros inoxidable con 20 a 27% de Cr, estos aceros son usualmente ferríticos y calentados a altas temperaturas son propensos al crecimiento de grano; el nitrógeno en estos aceros permite la formación de pequeñas cantidades de austenita y por tanto dichos aceros pueden utilizarse a elevadas temperaturas sin que experimenten en su estructura un excesivo crecimiento de grano; la cantidad de nitrógeno que se añade generalmente en estos casos es del orden de una centésima parte del contenido de cromo (0.12 a 0.25% de nitrógeno) cantidad aproximada al límite que en solución sólida tiene el nitrógeno; como la solubilidad del nitrógeno es mayor en el acero fundido, cualquier exceso de éste sobre la cantidad limitante, se desprenderá en la solidificación dando lugar a sopladuras en los materiales, por lo tanto es recomendable tener un control adecuado en este aspecto. La adición de nitrógeno se suele hacer sin dificultad empleando ferrocromos altos en nitrógeno.

El nitrógeno puede substituir al níquel en forma parcial en los aceros inoxidables austeníticos, puesto que como estabilizador de la austenita es más eficaz que el níquel (20 a 30 veces mayor); la solubilidad del nitrógeno en aceros típicos austeníticos está limitada a no más del 0.06 al 0.08%, es tos contenidos pueden ser incrementados con adiciones de manganeso y los aceros así obtenidos adquieren propiedades en lo que respecta a corrosión y soldabilidad, comparables a los austeníticos 18-8. Los aceros con nitrógeno y manganeso son de menor formabilidad en caliente y de mayor precio, la razón principal de los intentos por substituir al níquel es la escasez de éste en el mercado.

Nitrógeno en la fundición.

El contenido de nitrógeno en las fundiciones es generalmente del orden de 0.003 a 0.01%, aunque en ocasiones estos pueden ser rebasados, raras veces el contenido está por encima del límite capaz de provocar defectos; el nitrógeno puede disolverse en cantidades pequeñas en la ferrita o entrar en combinación con otros aleantes presentes en la fundición.

El nitrógeno presente en la fundición maleable puede formar carburos, los cuales ejercen un efecto estabilizante sobre la estructura y tienden a blanquearla, este efecto puede ser neutralizado en gran parte mediante adiciones de aluminio o titanio, con los cuales el nitrógeno forma nitruros estables y por tanto sus efectos nocivos en este caso, disminuyen en forma notable. En fundiciones que tienen gran tendencia al crecimiento de grano como lo son las de alto contenido de cromo, se suele adicionar nitrógeno con objeto de afinar la estructura, la adición de nitrógeno se hace en el baño mediante adiciones de ferrocromo nitrogenado.

Las fundiciones para nitruración contienen generalmente aluminio y cromo, elementos con los que el nitrógeno forma ni

truros bastantes duros y estables lo que implica que estos ma
teriales posean excelente dureza y resistencia a la abrasión,
encontrando como consecuencia de estas propiedades, aplicación
en la fabricación de piezas que requieren de dichas caracterís
ticas.

OXIGENO.

Propiedades Físicas.- Símbolo O, número atómico 8, peso atómico 16.00, densidad (a 0°C y 1 atm) 1.43 g/l, punto de fusión -218.9°C, punto de ebullición -183°C. A la temperatura ambiente es un gas incoloro, por debajo de -250°C presenta una estructura cristalina cúbica de caras centradas, presenta para magnetismo al estado líquido y en menor grado como gas.

Propiedades Químicas.- Su configuración electrónica es $2s^2 2p^4$, su valencia más común es -2. Es un elemento de gran actividad y se combina con casi todos los demás (lenta o rápidamente); su actividad es aminorada por la fuerte energía de enlace entre los dos átomos de su molécula así como por el nitrógeno. Es un comburente por excelencia; encuentra aplicación como microbicida y decolorante por su acción oxidante, líquido se utiliza en la fabricación de ciertos explosivos y en mezcla con hidrógeno líquido en la propulsión de cohetes; en metalurgia tiene aplicación como sustituto del aire.

Oxígeno en el Acero.

La solubilidad del oxígeno en el hierro hasta temperaturas del orden de 1000°C, se encuentra por abajo del 0.1%, su influencia sobre las temperaturas de transformación no se conoce con certeza ya que no se sabe con precisión la solubilidad en las fases gamma y alfa. Su solubilidad disminuye con la presencia de carbono ya que se combina con él, formando CO.

Al oxígeno suele considerarsele más que un aleante una impureza indeseable en los aceros, sin embargo el oxígeno en la fabricación de éstos juega un papel importante, ya que en función de su control (y la de otros elementos) adecuado y de un conveniente proceso de fusión, es posible fabricar una gran variedad de aceros, tales como: Efervescentes, calmados, de grano grueso y fino, de temple profundo o superficial, de envejecimiento o resistentes a él.

Es un elemento que debido a su actividad se combina con el hierro, carbono y con la mayoría de los elementos que se encuentran presentes y con los cuales forma óxidos; a elevadas temperaturas el FeO es el más estable de los óxidos de Fe . La cantidad de óxido de fierro disuelto en las reacciones de equilibrio es rebajado por otros elementos que tengan mayor afinidad por el oxígeno, con ellos forma óxidos volátiles de menor solubilidad en el hierro que el óxido de hierro, o bien, forma óxidos con un mayor calor de formación que el propio óxido de hierro, de esta manera el oxígeno puede estar en el acero en forma combinada como óxido de hierro o bien formando otros óxidos, combinando así las propiedades de éstos; en última instancia puede encontrarse al oxígeno en solución aunque en pequeñas cantidades. El oxígeno en solución no influye sobre la resistencia a la tracción pero hace que disminuya la ductilidad y como consecuencia de ello se sufra un ligero aumento en la dureza, ejerce también influencia sobre las propiedades magnéticas de tal forma que, las propiedades magnéticas excelentes de los aceros al silicio se presume no son debidas al alto contenido de silicio sino a la ausencia de oxígeno. Incrementos en el contenido de oxígeno en aceros pobres en carbono hacen que estos tengan una creciente tendencia a envejecer.

Debido a la reacción del oxígeno con el carbono, durante la colada se puede producir gas siempre y cuando el acero en fusión contenga suficiente oxígeno; puesto que en la fabricación del acero es necesario garantizar un cierto contenido de carbono, es indispensable controlar la relación carbono-oxígeno con la ayuda de desoxidantes, la adición de éstos se puede efectuar en cualquiera de los pasos de fabricación (en el horno, la cuchara, lingoteras, etc.) o en forma combinada en éstos; la desoxidación se hace generalmente adicionando Al o

aleaciones reductoras (ferromanganeso, ferrosilicio y silicio de calcio) en proporciones y combinaciones variables. El control de oxígeno en la fusión depende fundamentalmente de la temperatura, ya que a medida que esta desciende, el oxígeno en equilibrio con la cantidad de desoxidante también decrece.

El oxígeno presente en el acero puede proceder no solo del proceso de fusión, en el cual es aplicado en muchas ocasiones con finalidades específicas sino también de las escorias, las cuales durante la fusión permiten en forma continua el paso de oxígeno al baño metálico. Una gran cantidad de oxígeno es consumida en la combustión del carbono, pero también la oxidación del hierro requiere cantidades considerables; a partir de la fusión del hierro el contenido de oxígeno se incrementa mientras el contenido de carbono decrece, en estos casos el contenido de oxígeno puede en forma, no muy precisa, permitir el cálculo del contenido de carbón, esta relación (Carbono-Oxígeno) es la que se controla sobre todo, en la fabricación de aceros efervescentes, el contenido de carbono en estos casos suele ser menor del 0.15% ya que ello permite tener suficiente oxígeno, el cual asegura una efervescencia en las lingoteras; a estos aceros se les adiciona suficiente desoxidante con objeto de controlar la evolución del gas y por lo tanto la posición de las sopladuras bajo la capa superficial, una gran cantidad de gas impide el rechupe de los lingotes (de este tipo de aceros) los cuales presentan porosidades y sopladuras en el centro del material. En los aceros semicalmados la producción de gas es tal que puede contrarrestar la aparición de los rechupes en la solidificación, sin embargo en ellos es difícil el control de la distribución de poros, generalmente la parte superior del lingote es más porosa que la inferior. Los aceros calmados contienen un exceso de materiales desoxidantes, lo que permite asegurar una mínima cantidad de oxígeno y evita que la reacción carbono-oxígeno

se lleve a cabo en el intervalo de enfriamiento hasta la solidificación. En los aceros totalmente calmados, la cantidad de desoxidantes es tal que los productos de la desoxidación no pasan todos a la escoria, debido al enfriamiento rápido y a la fina dispersión de las partículas muchos de estos productos quedan atrapados en el acero y al solidificar el material aparecen como inclusiones (complejos de alúmina, óxido y silicato), si estas inclusiones no quedan bien distribuidas originan tensiones, las cuales pueden provocar agrietamientos durante el enfriamiento o en el trabajo en caliente.

A elevadas temperaturas un acero puede sufrir oxidación superficial y consecuentemente formarse cascarilla, esto se puede evitar con el uso de aceros refractarios especiales; la capa de óxido no siempre es indeseable, ya que en los aceros inoxidables esta capa es la responsable de la gran resistencia de éstos a la corrosión.

Oxígeno en la fundición.

Está presente en mayor o menor cantidad en todas las fundiciones y su contenido generalmente fluctúa entre 0.002 y 0.003%, razón por la que comunmente no es necesario efectuar una desoxidación. El oxígeno se presenta principalmente en forma de inclusiones no metálicas (óxidos de hierro, manganeso, aluminio y silicio). El oxígeno es un antigrafitizante energético y con objeto de evitar su efecto se adicionan inoculantes (ferrosilicio, grafito y siliciuro de calcio) con afinidad por él, y que por consecuencia favorecen la grafitización.

SILICIO.

Propiedades Físicas.- Símbolo Si, número atómico 14, peso atómico 28.09, densidad (a 20°C) 2.33 g/cm³, punto de fusión 1414°C, punto de ebullición 2680°C. A la temperatura ambiente es un sólido cristalino aunque puede presentar coloración gris o negra, posee una estructura cristalina cúbica centrada en las caras; el silicio además del campo metalúrgico es muy utilizado en la fabricación de semiconductores y celdas fotoeléctricas.

Propiedades Químicas.- Su configuración electrónica externa es 3s² 3p², sus valencias principales +4 y -4. Tiene una actividad superior a la del carbono (aún dentro de su relativa inercia), muestra de ello es que reacciona con los carbonatos e hidróxidos alcalinos fundidos. A elevadas temperaturas es un buen reductor de los óxidos metálicos; se combina con facilidad con los halógenos, en el horno eléctrico se une al carbono y a algunos metales de transición; a menores temperaturas se combina con el nitrógeno y el azufre. En el aire arde con mayor facilidad que el grafito.

Silicio en el acero.

Este elemento al igual que el manganeso prácticamente aparece en todos los aceros, debido a que durante el proceso de fabricación es añadido en forma intencional por su poder desoxidante y además de bajo precio. Su acción desoxidante es más enérgica que la del manganeso, y se emplea con este fin complementándolo, con objeto de evitar que en el acero puedan aparecer poros y otros defectos internos. La solubilidad del silicio en el hierro gamma asciende hasta el 2%, este contenido de carbono del 0.35%; la fase alfa puede disolver hasta un 18.5%.

Los aceros al silicio contienen a este elemento en un porcentaje no superior al 5%, más allá de este límite y debido a

su potente acción grafitizante, separa al carbono en forma de grafito y la aleación se vuelve frágil; cabe señalar que todos los aceros contienen silicio en cantidades variables y que so lo cuando éste rebasa un 0.8% se considera al acero como alea do. El Silicio al igual que el níquel, no es un formador de carburos, sino que se disuelve en la ferrita aumentando con ello la resistencia y la tenacidad, mejora también la templa bilidad y en ciertos casos la resistencia a la oxidación. Par te del silicio presente en el acero proviene de los materia- les utilizados en el alto horno y de incorporaciones a la fun dición y que posteriormente parte de ellas quedan en el acero en solución sólida. Las adiciones de silicio que se hacen du rante la fabricación son pequeñas y generalmente inferiores a las de manganeso, razón por la que el contenido de silicio suele oscilar entre 0.20 y 0.35%, este contenido no afecta en forma perceptible las propiedades mecánicas y por otra parte facilita la desoxidación (asegura la fabricación de un acero calma do); con mayores tenores de silicio se incrementa la tem plabilidad y resistencia a la tracción, pero esto se consigue generalmente a costa de un decremento de la formabilidad y la resistencia al impacto, por tal motivo en los aceros el conte nido de silicio se limita a un porcentaje no mayor del 0.35%. Con contenidos de silicio entre 1.5 y 4.5% la formabilidad de crece notablemente, mientras que la resistencia a la tracción y el límite elástico aumentan; con contenidos entre 4.5 y 6.5% la resistencia a la tracción y el límite elástico disminuyen, y lo hacen aún más con crecientes contenidos de silicio.

Cuando el silicio se encuentra en porcentajes variables de 1 a 2%, acentúa en forma intensa la descarburación de los aceros en los tratamientos; por ejemplo en los aceros mangano- silicosos con contenidos de silicio de este orden (1 a 2%) in crementan el riesgo de fragilidad por revenido, el Mn hace ma yor aún la propensión de este efecto y por ello aceros con 1%

de Mn y 1 a 2% de Si suelen ser muy frágiles al reventarse, con un contenido de 0.6% de Mn estos aceros pueden tener hasta 3% de silicio sin que por ello la fragilidad por revenido represente un problema serio.

El silicio se adiciona a aceros al cromo, Cr-Ni y Cr-W resistentes al calor, con objeto de mejorar su resistencia a la oxidación a elevadas temperaturas, encontrando por ello estos aceros uso específico en la fabricación de válvulas; aceros comunes de este tipo son por ejemplo el acero Cr-Si con 0.45% de C, 8.5% de Cr y 3% de Si, y el acero Ni-Cr-W con 0.42% de C, 14% de Cr, 14% de Ni, 2.5% W y 1.4% de Si. Adiciones de alrededor del 2% de Si a los aceros inoxidables del tipo 18-8 mejora en ellos la resistencia a la oxidación aún a temperaturas hasta de 1000°C.

El silicio se emplea ampliamente en la fabricación de aceros para chapa magnética debido a su poder desoxidante, ya que reduce el contenido de óxidos y la formación de carburos, estas particularidades favorecen notablemente las propiedades magnéticas. El silicio en porcentajes superiores al 2.5% hace que los aceros sean ferríticos y no se forme austenita al calentarlos a elevadas temperaturas, esta circunstancia es en este caso favorable ya que estos aceros resultan ser de grano grueso y con tendencia a aumentar con sucesivos calentamientos a que el material sea sometido, esto es una ventaja en estos casos ya que con ello se reducen notablemente las pérdidas por histéresis y corrientes parásitas, además presentan buena permeabilidad magnética. Los aceros de chapa magnética son ampliamente utilizados en la industria de maquinaria eléctrica.

Silicio en la fundición.

El silicio es el elemento que tiene un efecto más favorable sobre la formación del carbono grafitico, debido a su acción grafitizante reduce la estabilidad de la cementita eutéct

tica y eutectoide ya que acelera la disociación de esta durante la solidificación y enfriamiento del metal fundido, es por ello que el contenido de silicio en una fundición debe calcularse tomando en cuenta el carbono total, la velocidad de enfriamiento y el espesor de las piezas; fundiciones con contenidos similares de carbono pero con cantidad variable de silicio, presentan en función de la acción del silicio porciones variables de grafito en su estructura; el contenido de carbono en la composición eutéctica disminuye aproximadamente de un 0.30% por cada 1% de silicio.

El silicio en las fundiciones está presente normalmente en forma de siliciuro de hierro y disuelto en la ferrita, cuando el contenido de silicio varía entre 0.1 y 0.6% no ejerce una influencia importante, por el contrario, cuando su contenido es mayor su influencia es tan notable que modifica completamente el carácter y propiedades de las fundiciones; las adiciones de silicio favorecen la formación de ferrita pero con detrimento de la tenacidad. Cuando se desea obtener una fundición dura y con fuerte resistencia a la tracción, el contenido de silicio debe ser bajo y más alto cuando se requiera sobre todo una fácil maquinación, es por eso que las fundiciones grises tienen cuando menos un 2% de Si y en las fundiciones blancas el porcentaje está aún por debajo del 1%. Aleaciones con más de un 14% de Si son muy resistentes a la oxidación a altas temperaturas, poseen además buena resistencia a la corrosión por parte de los ácidos, no así de los álcalis.

Si el efecto grafitizante del silicio no se contrarresta con la presencia de elementos formadores de carburos, durante la solidificación se favorece la formación de láminas de grafito primario, las cuales una vez formadas no se alteran con ningún procedimiento, estas láminas poco resistentes rompen totalmente la continuidad de la matriz y son la causa de la poca resistencia a la tracción y baja ductilidad de la fundición gris.

TITANIO.

Propiedades Físicas.- Símbolo Ti, número atómico 22, peso atómico 47.90, densidad (a 20°C) 4.5 g/cm³, punto de fusión 1690°C, punto de ebullición 3535°C. A la temperatura ambiente es un sólido de color gris, posee una estructura cristalina hexagonal compacta; es un elemento con buenas propiedades mecánicas y además forjable.

Propiedades Químicas.- Su configuración electrónica externa es 3d² 4s², sus valencias principales son +2, +3 y +4. El titanio solo al rojo se combina con el oxígeno, sin embargo con el fluor lo hace ya a 150°C y con el cloro a 300°C. A la temperatura ambiente es poco atacado por los ácidos debido a que forma una pequeña película protectora, sobre todo en presencia del aire y agentes oxidantes; a esta excelente resistencia a la corrosión debe el Ti algunas de sus aplicaciones. A la temperatura ambiente apenas le ataca el HNO₃ aún el concentrado y solo lo hace a elevadas temperaturas; resiste al H₂SO₄ diluido a concentrado; con el HCl reacciona poco al igual que con soluciones calientes de hidróxidos alcalinos.

Titanio en el Acero.

Es un extraordinario formador de carburos, su solubilidad en la fase gamma alcanza el 0.75% en solución sólida y en la fase alfa hasta un 0.6% aproximadamente. Todos los aceros con titanio cuando hay carbono suficiente, contienen el carburo (TiC) en su constitución, con el oxígeno y el nitrógeno el titanio forma compuestos muy estables, esta propiedad permite que el titanio se emplee tanto en la desoxidación como en la desnitruración; de todos los compuestos de titanio presentes en el acero el más estable es el óxido; comunmente el titanio se combina en atmósferas oxidantes a 1600°C con el oxígeno formando TiO₂, cuando la concentración de oxígeno es muy baja (aceros calmados), o la cantidad de titanio para la desoxida-

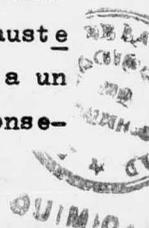
ción es muy elevada puede formarse entonces el trióxido (Ti_2O_3).

En los aceros comunmente hay presente hasta un 0.025% de titanio, estos contenidos se deben a que durante la fabricación el titanio es adicionado como desoxidante, cuando este contenido es superior lo más seguro es que el elemento halla sido agregado con objeto de que ejerza su influencia es decir, como aleante. El acero efervescente se desoxida en forma parcial por la adición de ferrotitanio con contenido medio y alto de carbono, directamente en la cuchara; se añade además Al en la lingotera con objeto de tener bajo control la evolución de gases; la adición de titanio al acero efervescente permite la obtención de una mejor superficie en los lingotes, ya que evita en gran medida los rechupes y segregaciones en las zonas próximas a la superficie del material. En aceros enteramente calmados una desoxidación con titanio puede permitir una gran pureza en él, ya que el óxido de titanio convierte los compuestos producto de una desoxidación anterior y difíciles de solubilizar (silicatos de Fe y Mn) en un compuesto que funde con mayor facilidad en este caso las inclusiones coagulan y ascienden a la superficie del baño con facilidad; debe tenerse cuidado de que las adiciones de titanio no sean muy grandes, ya que cuando esto sucede o el contenido de carbono es elevado, puede formarse un compuesto complejo de cianonitruro y carbonitruro de titanio, estas inclusiones son indeseables puesto que favorecen la formación de tensiones y por tanto van en detrimento de la maquinabilidad, para evitar la formación de estas inclusiones la adición de titanio no debe ser muy grande en los aceros de bajo carbono, los aceros con mucho carbono son claramente manifiestos a formar estas inclusiones y por tanto no es conveniente en estos casos adicionar titanio; es obvio que el uso de titanio en aceros de gran pureza y con las mejores propiedades mecánicas, debe hacerse con un control preciso con objeto de evitar la formación de

las inclusiones antes mencionadas. Una desoxidación con suficiente cantidad de titanio incrementa la resistencia contra la fragilidad que con el tiempo aparece después de la deformación en frío.

Adiciones de titanio en grandes cantidades y en ausencia de oxígeno o nitrógeno susceptible de reaccionar, permiten que el titanio se combine con el azufre evitándose así la formación de sulfuro de hierro y disminuyendo con ello la tendencia al agrietamiento en caliente; por ejemplo un acero puede ser forjable aún cuando no contenga manganeso, si tiene un contenido de 0.15% de S y 0.25% de Ti aproximadamente. Los aceros automáticos forjables con elevado contenido de azufre reciben adiciones de 1 a 1.5 Kg de ferrotitanio por tonelada, con objeto de conseguir una distribución más uniforme de las inclusiones de sulfuro; el titanio es preferible en este caso al Al ya que él no da lugar a la formación de inclusiones que perjudiquen la maquinabilidad, mientras que el aluminio puede formar alúmina, que si es perjudicial.

El titanio junto con el aluminio se emplea para controlar el tamaño de grano austenítico de los aceros, en los aceros de medio carbono el titanio es en este aspecto muy eficaz aunque presenta el inconveniente de fomentar la producción de grietas internas y superficiales; el titanio en unión con el aluminio también se usa en la fabricación de aceros inoxidables austeníticos y ferríticos con elevado contenido de níquel y manganeso templables por precipitación, así como también en los templables por precipitación a base de níquel, un ejemplo de este tipo de aleaciones son las conocidas como "Nicomac", las cuales son muy resistentes tanto a la temperatura ambiente como a elevadas temperaturas. Cuando el Al se emplea solo y hay nitrógeno disponible en los contornos de grano de austenita, probablemente se forma un nitruro frágil semejante a un eutéctico y que debilita la estructura, ésto trae como conse-



cuencia que los aceros tengan baja resistencia y tenacidad; cuando junto con el Al se agrega ferrotitanio al acero, se forman en gran parte nitruros de titanio los cuales son menos frágiles y por tanto las propiedades mecánicas del acero son mejores. Por tratamiento del baño con titanio, se evita en forma considerable la tendencia a la formación de grietas en los aceros de medio carbono, además se ha encontrado que las adiciones de aluminio con objeto de afinar el grano austenítico son notablemente menores cuando al mismo tiempo se adiciona titanio; en ocasiones se puede observar que los efectos del aluminio en el afino de grano son menores en los últimos lingotes colados de una cuchara, es decir, se produce un crecimiento de grano debido a que el aluminio presente en el baño durante el periodo de reposo reacciona continuamente con las escorias o pasa a ellas, una adición de 0.035% de Ti aproximadamente al sobrante en la cuchara permite afinar nuevamente el grano austenítico.

El titanio disuelto en la ferrita imparte a ésta una mayor resistencia, pequeñas cantidades de titanio son suficientes para afinar el grano de ferrita e incrementar su límite elástico; la resistencia al impacto es sin embargo inferior en los aceros con titanio que en los que contienen aluminio. En el acero no aleado las adiciones de titanio retardan la formación de perlita, impiden la formación de grandes cristales dendríticos y controla el tamaño de grano, esto último quizá se deba al efecto nucleante de los carburos de titanio. Adiciones del orden de 0.2 a 0.3% de Ti en los aceros no aleados mejoran la templabilidad, siempre y cuando durante la austenización (se logra mayor eficacia a altas temperaturas) se halla disuelto en la matriz suficiente cantidad de titanio, este proceso de disolución permite que la dureza tras un tratamiento térmico (recocido de disolución, temple, revenido, etc.) alcance elevados valores; si la temperatura de austeni-

zación es menor de 1000°C o la relación Ti/C es aproximadamente 4 (incluso mayor) la templabilidad por lo regular decrece. Adiciones de titanio en aceros para herramienta afinan el grano y limitan la profundidad del temple, en estos aceros la aparición de grietas disminuye notablemente.

Adiciones de titanio a aceros con 4 a 6% de Cr disminuyen la tendencia al endurecimiento al aire, se puede producir también una mejor resistencia a la tracción en caliente si la relación Ti/C no sobrepasa de 5.5. Los aceros de grano fino y bajo carbono que son tratados con titanio a altas temperaturas son menos propensos a la grafitización que los aceros con aluminio, la grafitización prácticamente no existe cuando la relación Ti/C es 3 o mayor, estos aceros manifiestan buenas propiedades mecánicas así como resistencia a la tracción a elevadas temperaturas.

En los aceros inoxidables Cr-Ni el titanio actúa como estabilizador de los carburos y evita la corrosión intergranular, ésta se presenta en ausencia de titanio y se debe a que durante los tratamientos térmicos el cromo se combina con el carbono formando carburos que precipitan en los contornos de grano, empobreciendo por tanto el contenido de cromo en la matríz; cuando hay titanio el carbono forma carburos con él y no hay pérdida de cromo en la matríz, para que esto suceda es necesario que el contenido de titanio sea por lo menos 4 veces mayor que el de carbono. En los aceros inoxidables austeníticos el titanio tiende a reducir el grano en el estado de colada y es posible que ello se deba a los efectos nucleantes de los compuestos de titanio presentes, también favorece la formación de ferrita delta (esta influye en el afino), aumenta la resistencia a la fluencia, sin embargo la influencia del titanio a temperatura ambiente es escasa. Para producir una matríz libre de ferrita delta es necesario aumentar el contenido de níquel, con objeto de que la matríz sea completa

mente austenítica y por tanto se obtengan las óptimas propiedades de resistencia a altas temperaturas que estos aceros requieren en los usos a que son destinados.

Titanio en la fundición.

Contenidos de 0.1 a 0.2% de Ti en la fundición ejercen una acción grafitizante, más intensa aún que la del silicio; con contenidos superiores esta acción decrece. La afinación del grafito por parte del titanio se atribuye principalmente a su combinación con el azufre, esta afinación trae como consecuencia un incremento de las propiedades mecánicas de la fundición; durante la formación de grafito puede originarse una estructura ferrítica con menor resistencia, sin embargo, el titanio disuelto en la matriz mejora generalmente la resistencia de la fundición; con burbujeo de CO_2 o argón en el baño se obtiene grafito muy fino, este efecto influye en la macroestructura de la fundición; la ventaja de estas fundiciones con grafito laminar es que no tienden, en función de no poseer una estructura compacta, al crecimiento, poseen además una mejor resistencia a la corrosión en soluciones ácidas.

En las fundiciones altas en cromo la tendencia al crecimiento puede reducirse mediante adiciones de titanio, éstas afinan al carburo eutéctico, lo cual redundaría en una mejoría de las propiedades mecánicas. La dispersión fina de carburos y nitruros de titanio en matrices blandas permiten tener buena resistencia al desgaste sin que se afecte por ello la maquinabilidad. La adición de titanio se hace normalmente en la carga y en forma de aleaciones naturales.

VANADIO.

Propiedades Físicas.- Símbolo V, número atómico 23, peso atómico 50.95, densidad (a 20°C) 5.98 g/cm³, punto de fusión 1800°C, punto de ebullición 3500°C aproximadamente. A la temperatura ambiente es un sólido de color gris acero, posee una estructura cristalina cúbica centrada en el cuerpo; es un metal muy duro y se pulveriza con facilidad.

Propiedades Químicas.- Su configuración electrónica externa es 3d³ 4s²; sus valencias principales van desde +2 a +5, esta última es con la que logra compuestos de mayor estabilidad. Es muy estable al aire; a elevadas temperaturas reacciona con el oxígeno, nitrógeno, carbono, etc; es resistente a los ácidos reductores pero es atacado por el HNO₃ y otros poderosos oxidantes como por ejemplo una mezcla de HNO₃ y HF. Puro o en compuestos se emplea como catalizador (en sustitución del platino), sin embargo su principal aplicación es como aleante en el hierro.

Vanadio en el acero.

La fase gamma puede contener hasta 1% de vanadio en solución sólida, este contenido puede elevarse hasta un 4% en presencia de 0.2% de carbono; en la fase alfa el vanadio es soluble en cualquier proporción. De los elementos utilizados comúnmente como aleantes es el vanadio el de precio mas elevado.

En un potente formador de carburos, en este aspecto su tendencia es mayor que la de todos los demás aleantes excepto Nb y Ti, esta característica causa dificultades en el revenido de aceros con vanadio debido al considerable endurecimiento secundario. Cuando el vanadio se encuentra disuelto en austenita, incrementa ligeramente su dureza por solución sólida de vanadio sin que por ello disminuya la tenacidad. Cuando se añade al acero y se combina con el carbono, forma partículas muy finas de carburo de vanadio (V₄ C₃) que quedan repartidas

en toda la masa, estos carburos durante la solidificación actúan como núcleos de cristalización y traen como consecuencia la formación de una estructura de grano fino; la solubilidad del carburo en la ferrita es escasa, no así en la austenita en la que se disuelve aunque lentamente, en mayor cantidad; la poca solubilidad del carburo de vanadio en el carburo de hierro permite la formación de un carburo doble de Fe y V, el cual no es más que una mezcla finísima de ambos y con un efecto similar al del carburo de vanadio. Las adiciones de vanadio a aceros aleados o no aleados provocan pues un afinado del grano por acción de los carburos formados, éstos pueden aparecer en la fusión o bien precipitarse durante las transformaciones de fase en el curso de un tratamiento térmico; a los hipereutectoides se suele agregar vanadio con objeto de obtener finas estructuras de carburo, lo cual impide, el crecimiento de grano cuando el acero es calentado por encima de la zona de tratamiento permite empleos más amplios de temperaturas que las ordinarias en la zona de temple, evitándose además el sobrecalentamiento. Mientras los carburos de vanadio no estén disueltos, retardan el crecimiento y conducen a una menor penetración del temple, pero si se disuelven completamente a una temperatura de temple alta y se enfría bruscamente el acero, éste puede alcanzar una templabilidad comparable a la de un acero de mayor tamaño de grano, es por esto que para evitar daños en el acero después del temple éste debe ser sometido a un revenido a temperaturas superiores a los 400°C.

Por su efecto sobre la ferrita, el vanadio es añadido a los aceros de bajo carbono con objeto de mejorar la resistencia a la tracción sin que por ello halla un decremento apreciable de la tenacidad, este efecto encuentra aplicación en varios aceros para construcción que requieren un servicio de estas propiedades. En los aceros de medio carbono, contenidos de 0.1 a 0.3% de vanadio son suficientes para impartir

buena tenacidad a la ferrita y además afinar el grano, la dureza requerida en este caso se obtiene por la presencia conjunta de carburos de hierro y manganeso.

En aceros al carbono para herramienta, el vanadio se añade en pequeñas cantidades con objeto de afinar el grano y con ello aumentar la tenacidad y disminuir la penetración del temple, la composición de estos aceros es idéntica a la de los aceros al carbono solo que con adiciones de 0.1 a 0.2% de vanadio; en estos aceros se forman carburos estables que son solubles en austenita solo a temperaturas superiores a 900°C , esto permite que en casos de temple a temperaturas de 780 a 850°C , los carburos sin disolver impidan el crecimiento de grano austenítico, se logra además una penetración del temple pequeña y un grano en la fractura muy fino, consecuentemente se evita la fragilidad, así pues el empleo de vanadio permite un control preciso de la profundidad de la capa dura en las piezas fabricadas. Cuando se desea en algunos casos especiales que los aceros para herramienta tengan una templabilidad ligeramente superior a la normal, se adicionan pequeños porcentajes de cromo (0.5 a 1% aproximadamente), dentro de este grupo de aceros Cr-V poco aleados se tipifican dos grupos, uno con contenido de 0.5 a 1.4% de C, 0.1 a 0.35% de Mn, 0.6 a 1.2% de Cr y 0.1 a 0.2% de vanadio, en el otro el contenido Mn es más elevado y fluctúa entre 0.4 y 0.6%; los aceros con menos manganeso se templan normalmente en agua y los otros en aceite. Los aceros para herramientas Cr-V poco aleados se emplean con mayor amplitud a este fin que los no aleados, debido a que la influencia combinada de cromo y vanadio permite muchas variaciones en el contenido de carbono y por tanto en las propiedades mecánicas, esto favorece considerablemente la extensa aplicación de estos aceros en función de su gran resistencia al desgaste y dureza; los aceros Cr-V poco aleados también se utilizan en la fabricación de rodamientos. Los aceros Cr-V bajos

en carbono son utilizados para cementación fabricandose con ellos matrices y cigueñales; los aceros Cr-V con contenido medio de carbono presentan gran tenacidad y elevada resistencia, y se emplean en la fabricación de ejes y muelles de automóviles y locomotoras.

El vanadio está presente en los aceros rápidos (aceros para herramientas de corte) en porcentajes de hasta el 3.5% y sus principales efectos son: Forma carburos muy duros, en caliente aumenta la resistencia al desgaste, incrementa además la resistencia al revenido y la dureza en caliente, afina el grano y hace menos peligrosos los sobrecalentamientos en el temple. Suele usarse vanadio en la fabricación de aceros inoxidables martensíticos resistentes a la fluencia y en los cuales los carburos desempeñan un papel fundamental en los procesos de precipitación.

El vanadio ejerce también acción como desoxidante e influye en la transformación eutectoide, en este aspecto la desplaza hacia contenidos más bajos de carbono, por ejemplo con 1% de V el eutectoide contiene 0.6% de carbono. Todos los aceros con vanadio presentan como característica general aparte de las propiedades mencionadas, una gran resistencia al ablandamiento por revenido.

Vanadio en la fundición.

Puesto que es un elemento que presenta una fuerte tendencia a formar carburos, impide la formación de grafito, es un estabilizador de la cementita por lo que las fundiciones con vanadio tienden a solidificar blancas, sobre todo en secciones delgadas. El vanadio en porcentajes entre el 0.1 y 0.25% aumentan la resistencia a la tracción, la resistencia transversal y la dureza, como consecuencia de estabilizar a la cementita; además provoca la formación fina y uniforme de partículas de grafito, lo cual permite la aparición de perlita fi-

namente laminar independientemente de la afinación del grano de la matriz; estas fundiciones se utilizan en la fabricación de camisas para motores diesel y suelen contener de 0.1 a 0.2% de vanadio, contenidos necesarios para que las fundiciones presenten incremento en su dureza y resistencia a la tracción y al desgaste. Fundiciones altamente aleadas suelen tener hasta 0.12% de V con objeto de mejorar su maquinabilidad.

En las fundiciones aciculares el vanadio es indeseable por su tendencia a formar carburos, ya que ello hace que el molibdeno (elemento de influencia primordial en estas fundiciones) se segregue en la proximidad de los carburos complejos y con ello la matriz se empobrece en molibdeno y la estructura acicular por consiguiente se destruye.

WOLFRAMIO O TUNGSTENO.

Propiedades Físicas.- Símbolo W, número atómico 74, peso atómico 183.92, densidad (a 20°C) 19.3 g/cm³, punto de fusión 3380°C, punto de ebullición 5900°C aproximadamente. A la temperatura ambiente es un sólido blanco plateado, posee una estructura cristalina cúbica centrada en las caras; aún cuando es duro es dúctil, es además resistente a la tensión.

Propiedades Químicas.- Su configuración electrónica externa es 5d⁴ 6s²; puede presentar valencias desde +2 a +6. Es estable a la temperatura ambiente; a elevadas temperaturas reacciona con el oxígeno, los halógenos, azufre, nitrógeno, etc; resiste la acción de los ácidos, con el HNO₃ forma WO₃ además de volverlo pasivo.

Wolframio en el acero.

La solubilidad del W en la fase gamma asciende hasta el 6%, este contenido puede elevarse hasta un 11% en esta fase cuando el contenido de carbono es del orden del 0.25%; en la fase alfa y alrededor de los 1500°C puede disolverse hasta un 33% de W, este contenido decrece a la temperatura ambiente a un 4.2%, esta característica permite templar por precipitación las aleaciones Fe-W que no contienen carbono dentro de esta serie continua de composiciones.

El W se disuelve ligeramente formando una solución sólida en la ferrita y como consecuencia ésta incrementa levemente su dureza; en la austenita aún pequeñas cantidades de W disueltas provocan un aumento considerable en la templabilidad; el W es un elemento que tiene gran tendencia a formar carburos, estos son de extraordinaria dureza y resistencia al desgaste, el W también incrementa la resistencia al calor. La composición de los carburos que probablemente se forman es compleja (Fe₄W₂C y Fe₄W₃C probablemente), en condiciones es-

peciales estos se pueden descomponer en carburo sencillo (WC); la difícil solubilización de los carburos en la fase gamma hacen necesarios prolongados tratamientos de austenización para lograr una solución adecuada, la resistencia por parte de los carburos a disolverse limitan el crecimiento de grano, siendo esto la causa principal del grano fino de los aceros al W.

El W es un elemento que favorece la formación de ferrita y por lo tanto eleva la temperatura de transformación eutectoide, además obstaculiza y hace lenta la difusión de cementa en el hierro; debido a estas particularidades, los aceros al W requieren de temperaturas de temple muy superiores a las usuales, comunmente se templean entre 1050 y 1200°C lo cual es de comprenderse que no es una operación fácil y una pequeña desatención puede provocar el quemado del acero. En los aceros de medio y alto carbono la dureza y resistencia a la tracción son incrementadas por crecientes contenidos de W, pese a esto en raras ocasiones el W es empleado como aleante único, sino que generalmente es utilizado junto con otros que además de ser de menor precio permiten conseguir en acero propiedades similares o iguales.

Los aceros al W encuentran aplicación en la fabricación de aceros para herramientas de corte, la característica fundamental de estos aceros es la conservación de su filo en caliente, pudiendose incluso trabajar casi al rojo (600°C) sin que su rendimiento disminuya; sin embargo la principal aplicación de los aceros al W es la fabricación de los llamados aceros rápidos. Los aceros rápidos son aceros que requieren elevados rendimientos y velocidades de corte, así como grandes avances, la matriz de estos aceros es muy resistente al revenido, lo cual les permite obtener a altas temperaturas elevadas resistencias, así como también mayor tenacidad para una dureza dada; poseen además carburos extraordinariamente duros

y resistentes al desgaste; las particularidades antes mencionadas son fundamentales, ya que las propiedades de corte y tenacidad de estos aceros para el trabajo en caliente dependen en forma determinante de la dureza y resistencia del material en las superficies cortantes y que son requeridas en el servicio a altas temperaturas. Los aceros rápidos después del temple pueden presentar tensiones internas, éstas pueden eliminarse con un recocido a alta temperatura, el tratamiento redunda además en un incremento de la tenacidad sin que por ello halla una disminución perceptible de la dureza es decir, el tratamiento resulta muy favorable para las propiedades de corte; son tan importantes las cualidades de estos aceros que actualmente son insustituibles en la fabricación de la mayoría de la herramienta de corte. Contenidos de W mayores del 18% permiten obtener mayor resistencia al desgaste y rendimiento de corte, aún cuando la tenacidad decrece; cuando los contenidos son menores, la resistencia al desgaste disminuye y la tendencia al crecimiento de grano aumenta a altas temperaturas. Los aceros rápidos aparte de W contienen normalmente Cr, V, Mo y Co, del efecto conjunto de éstos con el W se obtiene una gran gama de composiciones y por consiguiente de propiedades, que nos llevan a la consideración de que el conocimiento y aplicaciones de los aceros rápidos merece un estudio específico, y que aquí no será tratado.

El W también encuentra aplicación en los aceros para la fabricación de chapa magnética. En los inoxidables por ser un fuerte formador de carburos impide la corrosión intergranular y la formación de grietas en los cordones de soldadura; el W dá a estos aceros buena resistencia mecánica en caliente (recuperadores de calor, parrillas, etc.), materiales en los que interesa que se conserve esta resistencia a pesar que durante el servicio puedan alcanzar altas temperaturas.

En las fundiciones el W no encuentra por sus caracterís-

ticas y sobre todo por las propiedades que imparte, aplicación como aleante.

CONCLUSIONES.

A los elementos aquí tratados a unos podemos llamarles verdaderamente elementos de aleación, ya que mediante su adición buscamos de y con ellos ciertas propiedades; otros son considerados como impurezas debido a que su influencia generalmente es nociva, estos elementos son difíciles de eliminar y por ello cuando se encuentren presentes es preferible buscar formar con ellos compuestos cuya influencia resulte menos perjudicial.

En la selección de un material con requerimientos específicos la influencia de los elementos aleantes es determinante, ya que las propiedades de un acero o fundición no solo dependen del o los aleantes presentes, sino además de la proporción en que estén contenidos. Cabe señalar que para toda selección de un material, debe tenerse en cuenta el máximo de factores que van a influir en él, si esto no se considera adecuadamente se presentarán fallas en el servicio.

BIBLIOGRAFIA.

- Apraiz B. José.
Aceros Especiales.
Ed. Dossat, 3a. Edición.
Madrid, España; 1971.
- Apraiz B. José.
Tratamientos Térmicos de los Aceros.
Ed. Dossat, 7a. Edición.
Madrid, España; 1971.
- Apraiz B. José.
Fundiciones.
Ed. Dossat, 3a. Edición.
Madrid, España; 1971.
- Avner H. Sidney.
Introducción a la Metalurgia Física.
Ed. Mc. Graw-Hill, 1a. Edición.
México, D.F.; 1975.
- Bain Edgar C.
Función of the Alloying Elements In Steel.
Cleveland American Society.
- Bruce Chalmers.
Metalurgia Física.
Ed. Aguilar, 2a. Edición.
Madrid, España; 1968.
- Capello Edoardo.
Tecnología de la Fundición.
Ed. Gustavo Gili, S.A., 2a. Edición.
Barcelona, España; 1971.

Grossmann M.A.

Elements Of Hardenability.

American Society For Metals

Metals Park, Ohio.

Losana Luigi y Ferrer J. Ma.

Metalurgia.

Ed. Manuel Marín, 1a. Edición.

Barcelona, España; 1951.

Polushkin E.P.

Defectos y Fallos De Los Metales.

Ed. Paraninfo, 1a. Edición.

Madrid, España; 1960.