



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTONOMA DE MEXICO



FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES
CUAUTITLAN

" ANALISIS DEL PROCESO DE
FABRICACION DEL HIERRO
NODULAR "

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE
INGENIERO MECANICO ELECTRICISTA

P R E S E N T A N

RAFAEL HERNANDEZ MIRANDA
SERGIO AGUSTIN LEON QUINTERO

ASESOR: INGENIERO SAMUEL PEREZ DIAZ

CUAUTITLAN IZCALLI, EDO. DE MEX.

1992



UNAM – Dirección General de Bibliotecas Tesis Digitales Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS © PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

INDICE

PROLOGO	1
CAP 1.- INTRODUCCION E HISTORIA	2
CAP 2.- METALES FERROSOS	3
2.1.- Clasificación de los metales ferrosos	3
2.2.- Diagrama Hierro-Carbono	4
2.3.- Aceros	6
2.4.- Fundiciones	16
CAP 3.- PROPIEDADES MECANICAS Y COMPOSICION QUIMICA DEL HIERRO NODULAR	29
CAP 4.- ASPECTOS GENERALES SOBRE LOS DIFERENTES TIPOS DE HORNOS EN QUE SE FUNDE HIERRO BASE	44
4.1.- Horno de Cubilote Acido	44
4.2.- Horno de Cubilote Básico	47
4.3.- Horno de Arco Directo	48
4.4.- Horno Electrico de Inducción sin Nucleo	52
4.5.- Horno de Inducción Tipo Canal y Frecuencia de Red	58
CAP 5.- REACONDICIONAMIENTO DEL HIERRO BASE Y ALEACIONES DE MAGNESIO UTILIZADAS PARA LA PRODUCCION DE HIERRO NODULAR.	62
CAP 6.- METODOS UTILIZADOS EN LA PRODUCCION DEL HIERRO NODULAR	70
6.1.- Metodo de Vaciado Directo	70
6.2.- Metodo Sandwich	73
6.3.- Metodo de Inmersión (plunger)	76
6.4.- Metodo de Tapón Poroso	82
CAP 7.- INOCULACION EN LA PRODUCCION DE HIERRO NODULAR	89

CAP 8.- PRACTICAS DE LA FUNDICION	93
8.1.- Características de contracción en el Hierro Nodular	93
8.2.- Manejo del Metal	95
8.3.- Moldeo	98
8.4.- Practicas de Colada	99
8.5.- Velocidades de Vaciado para piezas de Hierro-Nodular	100
8.6.- Altura efectiva de bajada	101
8.7.- Area de Restricción	105
8.8.- Embudo de vaciado	105
8.9.- Alimentadores y entradas	105
8.10.- Cabezas Alimentadoras para Hierro Nodular	110
8.11.- Pasos en el diseño de un sistema de Colada	113
CAP 9.- DEFECTOS EN LAS FUNDICIONES DE HIERRO NODULAR	114
9.1.- Flotación de carbono	114
9.2.- Grafito explotado	116
9.3.- Carburos Centrales	119
9.4.- Formación de grafito en trozos	120
9.5.- Inclusiones de escoria (dross)	120
9.6.- Microporos (pinholes)	124
9.7.- Rechupe (shrinkage)	125
9.8.- Tratamientos excesivos de magnesio	127
CAP 10.- TRATAMIENTOS TERMICOS APLICADOS AL HIERRO NODULAR	128
10.1.- Eliminación de Tensiones	128
10.2.- Disolución de Carburos	129
10.3.- Ferritización	130
10.4.- Normalizado	130
10.5.- Temple	131
10.6.- Revenido	132
10.7.- Temple superficial por flama y por Inducción	132
10.8.- Nitruración	133
BIBLIOGRAFIA	134

PROLOGO

Una de las razones por las cuales nos interesamos en el Hierro Nodular como tema de la presente tesis, la de haber encontrado que todavía en la actualidad, a 44 años de la creación de ésta importante y útil aleación de hierro, la información que existe en nuestro país es muy pobre y dispersa, además que es poca la difusión que se le ha dado a estos conocimientos.

En la actualidad los conocimientos y adelantos técnicos del Hierro Nodular (como en la mayoría de los casos), se hallan solamente en los centros de investigación de compañías dedicadas a este ramo, por lo tanto la información especializada no se encuentra al alcance de los centros de enseñanza.

Es nuestro objetivo principal en esta tesis, efectuar una labor de investigación sobre las técnicas del proceso de fabricación de este material y conjuntar toda la información posible sobre dicho hierro.

Como resultado obtenemos un escrito que contiene aspectos teóricos y prácticos que nos dan un conocimiento más profundo acerca del origen de este material, así como de sus aplicaciones.

C A P I T U L O 1

INTRODUCCION E HISTORIA

Fue en 1948 en el Congreso de la American Foundrymen Society cuando la International Niquel Co., reveló que poseía ya la técnica necesaria para convertir las laminillas de grafito en nódulos, sin la necesidad de usar algún tratamiento térmico posterior a la colada. En términos generales esto se lograba con la adición del 0.40% de magnesio. El material recién inventado resultaba un puente entre el hierro gris y el acero en cuanto a sus propiedades mecánicas, sus características de producción y precio. La ardua labor desarrollada en el laboratorio, así como en la línea de producción fué realizada por H. Morrogh, K. D. Millis y A.P. Gagnebin. Su invención fué un tanto inesperada dado que ellos buscaban un sustituto del cromo para su aleación con el acero, pues la Segunda Guerra Mundial había cortado el suministro de este elemento. La producción de esta aleación ha alcanzado altísimos niveles en todo el mundo, llegando a ser en 1968 del orden del millón de toneladas coladas y para fines de 1971, alcanzó una producción de dos millones de toneladas en E.U.

A pesar de las intensas investigaciones existe todavía una incógnita en cuanto al mecanismo, y la razón exacta del porque el magnesio causa que el grafito precipite en forma nodular. Hasta la fecha se han desarrollado varias teorías al respecto, pero, ninguna ha sido suficientemente convincente para aclarar el mecanismo de nodulización. Esta situación no solo priva en esta área, sino en otras muchas áreas de la ciencia y tecnología en donde aún contando con muchos adelantos, no se ha podido conocer el porque de algunos fenómenos. Sin embargo, en tales casos y a reserva de encontrar posteriormente la explicación a tales dudas, por lo pronto lo importante es usar y aprovechar el resultado, que en este caso es la obtención del Hierro Nodular.

C A P I T U L O 2

METALES FERROSOS

2.1 Una de las formas de clasificar los metales ferrosos es:

- a) Aceros
- b) Fundiciones

A continuación se describe en forma muy general a cada uno de estos grupos.

Aceros:

El acero es una aleación cristalina de hierro, carbono y otros varios elementos, que endurece cuando se le enfría bruscamente después de estar arriba de su temperatura crítica. No contiene escoria y se puede conformar, laminar o forjar. El carbono es un constituyente muy importante por su habilidad para aumentar la dureza y resistencia del acero. No obstante que el acero puede ser vaciado en moldes para conformarlo a un perfil y tamaño definido y complejo, lo más común es que se le solidifique en forma de lingotes, para usarlo después en la fabricación de tubos, barras, láminas o formas estructurales. La materia prima fundamental para la producción de acero es el arrabio y la chatarra de metales ferrosos.

Fundiciones:

Las fundiciones son aleaciones de hierro, carbono y silicio que generalmente contienen también manganeso, fósforo, azufre, etc. Son de mayor contenido de carbono que los aceros y adquieren su forma definitiva por colada, no siendo nunca sometidas a procesos de deformación plástica ni en frío ni en caliente. En general, no son dúctiles ni maleables, no obstante mediante una aleación apropiada, buen control del hierro base y un adecuado tratamiento térmico, las propiedades de cualquier tipo de fundición pueden variar ampliamente. Aunque las fundiciones comunes son frágiles y tienen mas bajas propiedades de resistencia que los aceros, son baratas, pueden fundirse más fácilmente y tienen otras propiedades útiles suficientes para muchísimas aplicaciones.

El cubilote es la instalación más empleada para la fabricación de la mayoría de las piezas de fundición. Un porcentaje de piezas mucho más pequeño se obtiene utilizando hornos de reverbero, hornos de crisol y hornos eléctricos, siendo estas últimas instalaciones las más utilizadas para la fabricación de fundiciones de calidad, fundiciones aleadas y de alta resistencia. Algunas ventajas de las fundiciones son que su fabricación es más sencilla por emplearse instalaciones menos costosas y realizarse la fusión a temperaturas relativamente poco elevadas, y más bajas que las que corresponden al acero; son más fáciles de mecanizar que los aceros; se pueden fabricar con relativa facilidad piezas de grandes dimensiones, así como también piezas pequeñas y complicadas que se pueden obtener con precisión de formas y medidas.

2.2 Diagrama Hierro-Carbono.

Antes de estudiar este diagrama es importante señalar que éste no es un verdadero diagrama de equilibrio, pues equilibrio implica que no hay cambio de fase con el tiempo sin embargo, es un hecho que el compuesto carburo de hierro se descompondrá en hierro y carbono (grafito), lo cual tomará un tiempo muy largo a temperatura ambiente, y aun a una temperatura de 926 grados Centígrados tarda varios años en formarse el grafito. Con el fin de entender las diferencias básicas entre las aleaciones de hierro y el control de sus propiedades es esencial este diagrama. A continuación se examinará solo aquella parte del diagrama de equilibrio que comprende las aleaciones con contenido de carbono hasta de 6.67%, puesto que aquellas aleaciones con mayor contenido de carbono se aplican en la práctica. El carbono se puede encontrar en las aleaciones hierro-carbono, tanto en estado ligado (Fe_3C) como en estado libre (C, es decir, grafito), por eso, el diagrama comprende dos sistemas que son:

Fe- Fe_3C (metaestable):

Este sistema está representado en el diagrama con líneas continuas gruesas y comprende aceros y fundiciones blancas, o sea, las aleaciones con el carbono ligado, sin carbono libre (grafito). Fig. N°1.

Fe-C (estable):

En el diagrama se representa con líneas punteadas; este sistema expone el esquema de formación de las estructuras en las fundiciones grises donde el carbono se encuentra total o parcialmente en estado libre (grafito).

Examinemos el diagrama de equilibrio de los componentes Fe-Fe₃C.

El punto A en la ordenada del hierro puro corresponde a la temperatura de solidificación del hierro puro, 1539 grados Centígrados, el punto D en la ordenada corresponde a la temperatura de solidificación de la cementita (aprox. 1550 grados Centígrados).

Según el carácter de transformación de las aleaciones con el cambio de temperatura, todo el diagrama se puede dividir en dos partes; la superior que comprende la cristalización primaria de las aleaciones a partir del liquidus ABCD, hasta solidus AHJECF; la inferior desde solidus hasta el enfriamiento completo, que comprende los procesos de cristalización secundaria de las aleaciones.

Por encima del liquidus ABCD, las aleaciones con cualquier concentración se hallan en estado líquido. La línea de solidus AHJECF muestra la temperatura de solidificación de las aleaciones, o sea, en esta línea terminan los procesos de cristalización primaria. Entre solidus y GPSK tienen lugar los procesos de cristalización secundaria de las aleaciones.

2.3 Aceros.

Según la composición (concentración) de las aleaciones el diagrama de equilibrio se puede dividir en dos zonas: la zona de los aceros con contenido de carbono hasta de 2% (en estas aleaciones no hay eutéctica-ledeburita) y la zona de las fundiciones con contenido de carbono de 2 a 6.67%, (en estas aleaciones se forma eutéctica-ledeburita). Dentro de la zona de los aceros tenemos dos clasificaciones: los hipoeutectoides y los hipereutectoides. Fig. Nº 2.

Los aceros hipoeutectoides son aquellos que contienen hasta 0.8% C, a continuación estudiaremos el enfriamiento típico de esta clase con un 0.3% C. Desde el estado líquido los cambios más importantes ocurren durante el enfriamiento en el intervalo de 849 a 727 grados Centígrados. La ferrita (α) se comienza a precipitar en los límites de los granos de la austenita (γ) a 849 grados Centígrados. Este proceso continúa hasta los 728 grados Centígrados y la fase austenítica (γ) cambia del 0.30 a 0.80% C, como resultado de esto. A 727 grados Centígrados lo que queda de austenita (γ) se transforma en una mezcla de $\alpha + \bar{C}$ (\bar{C} =carburo de hierro) por medio de una reacción eutectoide a temperatura constante, $\gamma \rightarrow \alpha + \bar{C}$. El hecho importante es que

Figura 2

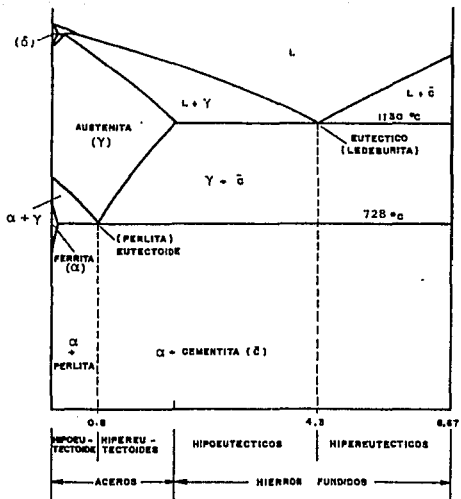


Diagrama de equilibrio Hierro-Carburo de Hierro

forma una mezcla entretrejida o laminar de α ductil y \bar{C} duro. Este compuesto se denomina perlita y tiene una mayor resistencia y menor ductilidad que la ferrita. Volvamos a nuestro estudio del diagrama de fases. A 728 grados Centígrados tenemos aproximadamente 63% ferrita y 37% de austenita. Nos referimos a la ferrita como ferrita primaria, para no confundirla con la que resulta de la formación de la perlita. Ahora, a 727 grados Centígrados toda la austenita que queda (0.80%C) se transforma en perlita y por lo tanto obtenemos ferrita eutectoide. Se debe recalcar que, para lograr equilibrio, el enfriamiento debe ser lento. Figuras Nº 3 y 4. Un enfriamiento más rápido tal como en enfriamiento por aire quieto, produciría una perlita más fina y se denomina normalizado. Un enfriamiento lento tal como el enfriamiento en horno, pasando por el autectoide se denomina recocido total y tiene como resultado una resistencia algo más baja pero una ductilidad mayor que la del normalizado. Se puede obtener otra variación en el tamaño del grano y de la perlita recalentando y manteniendo por periodos largos la temperatura justo debajo de la eutectoide aproximadamente a 704 grados Centígrados. Los carburos en la perlita cambian de las placas comunes a esferas, esta microestructura se denomina perlita globulizada y tiene una menor dureza, pero mayor ductilidad y tenacidad.

Los aceros hipereutectoides son aquellos que contienen más 0.8 a 2.0%C. El intervalo de temperaturas importantes para este material está entre 704 grados Centígrados y 815 grados Centígrados. Es importante observar que el \bar{C} que es frágil se precipita en los límites de los granos austeníticos desde 708 a 727 grados Centígrados para una composición de 1%, a pesar de que este carburo protectoide solamente corresponde a un 3.5% aproximadamente. Esto contrasta con la ferrita primaria ductil que se precipitó en el acero al carbono de 0.3%C. La reacción eutectoide es la misma en ambos casos; la austenita con 0.8%C en solución sólida forma la fase $\alpha + \bar{C}$ ó la perlita. Las propiedades de este material con alto contenido de carbono en el caso en el cual se enfria lentamente son muy malas, el alargamiento por ejemplo, es menor del 5% debido a la red de carburo frágil. Figuras Nº 5 y 6. Sin embargo, si calentamos a 815 grados Centígrados para disolver el carburo en la austenita y luego enfriamos rápidamente por debajo de 704 grados Centígrados para permitir una transformación a una mezcla fina de $\alpha + \bar{C}$ y luego calentamos a 704 grados Centígrados el \bar{C} en los límites de los granos gruesos no tiene tiempo de formarse mediante enfriamiento, obteniéndose una mejor forma de \bar{C} y distribución del mismo con una mayor ductilidad. Este material se denomina globulizado. En general la tenacidad de estos aceros hipereutectoides es aún menor que la de los hipoeutectoides, debido a que contienen una mayor cantidad de \bar{C} .

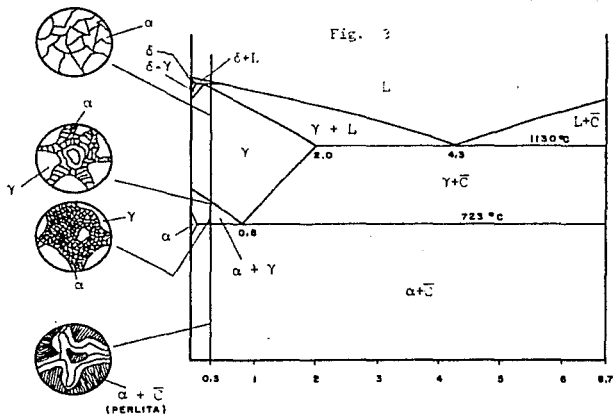


Fig. 4



Microestructura de un acero al 0.73C enfriado lentamente

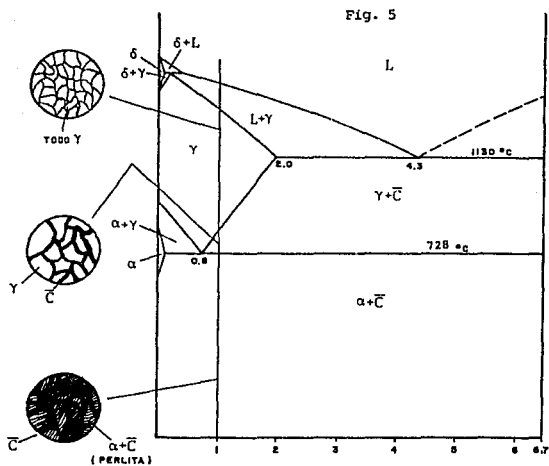


Fig. 6

Microestructura de un acero de 1% \bar{C} enfriado lentamente-500X

Principales Aleantes. Los aceros al carbono son muy satisfactorios donde la resistencia y otros requisitos no son muy severos como temperaturas comunes y atmosferas no altamente corrosivas, pero su templabilidad relativamente baja limita la resistencia que pueda obtenerse excepto en secciones regularmente delgadas. La mayoría de las limitaciones de los aceros al carbono pueden vencerse mediante el uso de elementos de aleación, siendo una de sus funciones el aumentar el tiempo requerido para que la austenita se transforme en perlita o en bainita, de tal manera que una tasa de enfriamiento más lenta todavía pueda evitar esta reacción. Mencionemos dos casos en los cuales el elemento de aleación viene a ser la solución a problemas típicos: uno, cuando se trata de piezas de sección muy grande o en donde no se puede obtener en toda la pieza una estructura martensítica aun usando un temple con agua, y otro, cuando se trata de piezas de forma caprichosa donde un temple con agua ocasionaría distorsiones o agrietamientos.

Un acero aleado pueda definirse como aquel cuyas propiedades características se deben a algún elemento diferente al carbono. Aunque todos los aceros al carbono contienen moderadas cantidades de Mn (hasta 0.9%) y Si (hasta 0.3%), no se consideran aleados porque la función principal del Mn y Si es actuar como desoxidantes, ellos se combinan con el oxígeno y azufre para reducir el efecto dañino de estos elementos.

Los elementos de aleación se añaden a los aceros para muchos propósitos, entre los cuales sobresalen:

- Aumentar la templabilidad.
- Mejorar la resistencia a temperaturas comunes.
- Mejorar las propiedades mecánicas tanto a altas como bajas temperaturas.
- Mejorar la tenacidad a cualquier dureza o resistencia.
- Aumentar la resistencia al desgaste.
- Aumentar la resistencia a la corrosión.
- Mejorar las propiedades magnéticas.

Los elementos aleantes metálicos se disuelven en la austenita y ferrita formando las soluciones sólidas sustitucionales bajo la condición de que las redes cristalinas sean iguales y exista una pequeña diferencia entre los diámetros atómicos del hierro y los elementos aleantes. Cuando la diferencia de los diámetros atómicos es menor del 8%, la solubilidad es ilimitada, cuando la diferencia esta entre 8 y 15%, la solubilidad está limitada; con diferencias mayores al 20%, las soluciones sólidas practicamente no se forman. Los

elementos no metalidos con diametro atomico muy pequeño (B,C,N,O,H) forman soluciones solidas intersticiales.

Al disolverse en la ferrita el Si, Ni, Co, Mn, Cr, Mo y W la endurecen en uno u otro grado; al disolverse éstos en austenita elevan su estabilidad al enfriarse.

Como un gran numero de aceros se manufacturan no es posible analizarlos en forma individual; sin embargo, consideraremos brevemente los efectos especificos de los elementos de aleación comunes y sus aplicaciones.

Niquel: Este es el elemento más comun de aleación de los aceros. Tiene ilimitada solubilidad en la austenita y es altamente soluble en la ferrita, contribuyendo a la resistencia y tenacidad de ésta. Además disminuye las temperaturas criticas del acero, amplía el intervalo de temperaturas para un tratamiento termico exitoso, retarda la descomposición de la austenita y no forma carburos que puedan disolverse con dificultades durante la austenización. Así mismo, reduce el contenido de carbono del eutectoide; por tanto, la estructura de los aceros no endurecidos al niquel contienen mayor porcentaje de perlita que los aceros al carbono tratados de manera similar. Como la perlita se forma a una temperatura menor es más fina y tenaz que la de los aceros no aleados. Estos factores no permiten obtener ciertos niveles de resistencia con inferiores cantidades de carbono incrementando de esta manera la tenacidad, la plasticidad y la resistencia a la fatiga. Los aceros al niquel son altamente adecuados como aceros estructurales de alta resistencia, los cuales se utilizan en la condicion de laminado o para grandes forjas no adaptables al temple. El niquel tiene sólo un ligero efecto sobre la templabilidad, pero es relevante su capacidad para mejorar la tenacidad, sobre todo a bajas temperaturas.

Cromo: El cromo es un elemento de aleación menos costoso que el niquel y forma carburos simples y complejos. Estos carburos tienen alta dureza y buena resistencia al desgaste. Es soluble hasta 13% en austenita y tiene solubilidad considerable en ferrita. En los aceros de bajo carbono tiende a entrar en la solución incrementando de esta manera la resistencia y la tenacidad de la ferrita. Cuando el cromo está presente en cantidades que exceden al 5%, las propiedades a altas temperaturas y la resistencia a la corrosión del acero se ven altamente mejoradas. Los aceros al bajo cromo y bajo carbono generalmente se carburizan. La presencia del cromo aumenta la resistencia al desgaste de la superficie endurecida, pero la tenacidad en el interior de las piezas no es tan alta como la de los aceros al niquel. Al medio carbono estos aceros son endurecibles en aceite. Un acero de alto cromo y alto

carbono se caracteriza por la gran dureza y resistencia al desgaste, tal como para cojinetes de bolas y rodillos y para maquinaria de trituración.

Níquel-Cromo: La proporción de los elementos de aleación en aceros de esta clase es de dos y media partes de níquel por una de cromo. El efecto del níquel de aumentar la tenacidad y la ductilidad se combina con el efecto del cromo de mejorar la templabilidad y la resistencia al desgaste. Es importante recordar que el efecto combinado de dos o más elementos de aleación sobre la profundidad y distribución de la dureza suele ser mayor que la suma de los efectos de los mismos elementos de aleación utilizados por separado. El cromo proporciona la resistencia al desgaste de la superficie endurecida, mientras que ambos elementos de aleación mejoran la tenacidad de la porción interna. Algunos de sus usos son para la manufactura de bielas automotrices, flechas de transmisión, levas, etc.

Molibdeno: Es un elemento de aleación relativamente costoso. Es soluble en ferrita y austenita y es un fuerte formador de carburos. Además ejerce un fuerte efecto sobre la templabilidad, y de manera semejante al cromo, aumenta la dureza y resistencia de los aceros a alta temperatura. Los aceros al molibdeno son menos susceptibles al fragilizado cuando se les da un revenido, que los demás aceros aleados. Este elemento se utiliza más a menudo con el níquel y cromo o con ambos. Para aplicaciones de carburización, mejora la resistencia al desgaste de la superficie endurecida y la tenacidad de la porción interna. Los aceros al níquel-cromo-molibdeno aparte de contar con las propiedades de los aceros al níquel-cromo cuentan con la alta templabilidad que proporciona el molibdeno. Se usan mucho en la industria aeronáutica en las alas, fuselaje, tren de aterrizaje, etc.

Tungsteno: Este material tiene un marcado efecto sobre la templabilidad, es un fuerte formador de carburos y retarda el suavizamiento de la martensita en el revenido. En general, el efecto de este es similar al del molibdeno. Generalmente no utiliza para aceros estructurales, su principal uso es en aceros para herramienta.

Vanadio: Es el más costoso de los elementos de aleación. Es un potente desoxidante y fuerte formador de carburos el cual inhibe el crecimiento de grano, cuando está presente el vanadio tiene un marcado efecto sobre la templabilidad y proporciona altas propiedades mecánicas al enfriamiento con aire. Por tanto, los aceros al carbono-vanadio se utilizan para grandes forjas de locomotoras y maquinaria. Se ha usado en la manufactura de muelles, herramientas, etc.

Manganeso: Este elemento aparte de ser barato está presente en todos los aceros como desoxidante. Reduce la tendencia a la fragilidad en caliente debido a la presencia del azufre. Es notable su poder para combinarse con el azufre y el sulfuro de manganeso tiene un punto de fusión mucho mayor que el del sulfuro de hierro eutéctico, conservándose sólido a las temperaturas de laminación. Es débil formador de carburos además de tener un leve efecto sobre la templeabilidad.

Silicio: Este también como el manganeso está presente en todos los aceros como desoxidante barato. No es un formador de carburos, se disuelve en la ferrita aumentando la resistencia y tenacidad. Un acero que contiene menos de 0.01% C y 3% Si tiene excelentes propiedades magnéticas para emplearse en núcleos de polos de la maquinaria eléctrica. Una aleación adecuadamente balanceada de manganeso y silicio produce un acero con alta resistencia poco común y con buena ductilidad y tenacidad. A continuación se mencionan algunos de los efectos de estos elementos señalados, en la Tabla Nº 1.

TABLA Nº 1

Efectos específicos de los elementos de aleación en el acero

ELEMENTO	SOLUBILIDAD SOLIDA		INFLUENCIA EN LA FERRITA	INFLUENCIA EN LA AUSTENITA (PROF/DIST. DE DUREZA)	INFLUENCIA EJERCIDA POR MEDIO DEL CARBURO		FUNCIONES PRINCIPALES
	EN HIERRO GAMMA	EN HIERRO ALFA			TENDENCIA A FORMAR CARBURO	ACCIÓN DURANTE EL REVENIDO	
Aluminio	1.1% (aumentado por C)	36%	Se endurece considerablemente por solución sólida	Si se disuelve en austenita, aumenta ligeramente la templeabilidad	Negativa (grafita)	...	<ol style="list-style-type: none"> 1. Desoxidante efectivamente 2. Restringe el crecimiento de grano (por formación de óxidos o nitruros dispersos) 3. Elemento de aleación en la nitruación del acero
Cromo	12.8% (20% con 0.3% C)	Ilimitada	La endurece ligeramente; aumenta la resistencia a la corrosión	Aumenta la templeabilidad moderadamente	Mayor que Mn; menor que W	Contrarresta ligeramente al suavizamiento	<ol style="list-style-type: none"> 1. Aumenta la resistencia a la corrosión y a la oxidación 2. Aumenta la templeabilidad 3. Añade alguna resistencia a altas temperaturas 4. Resiste la abrasión y al desgaste (con alto contenido de carbono)
Cobalto	Ilimitada	75%	La endurece considerablemente por solución sólida	Cuando está disuelto disminuye la templeabilidad	Semejante al Fe	Mantiene la dureza por efecto de la aleación sólida	<ol style="list-style-type: none"> 1. Contribuye a conservar la dureza al rojo, endureciendo la ferrita
Manganeso	Ilimitada	3%	La endurece marcadamente; reduce la plasticidad	Aumenta moderadamente la templeabilidad	Mayor que Fe; menor que Cr	Muy poca, en porcentajes usuales	<ol style="list-style-type: none"> 1. Contrarresta la fragilidad debida al azufre 2. Aumenta a bajo costo la templeabilidad
Molibdeno	3% ± (8% con 0.3% C)	37.5% (menor con temperatura disminuida)	Proporciona un sistema de endurecido por revenido en los aceros aleados con alto Mn-Fe	Aumenta fuertemente la templeabilidad (Mo > Cr)	Fuerte; mayor que Cr	Se opone al suavizamiento, por endurecimiento secundario	<ol style="list-style-type: none"> 1. Eleva la temperatura del inicio de crecimiento del grano de la austenita 2. Profundiza el endurecimiento 3. Contrarresta la tendencia a la fragilidad por revenido 4. Aumenta la resistencia a alta temperatura, a la fluencia y a la dureza al rojo 5. Mejora la resistencia a la corrosión en aceros inoxidables 6. Forma partículas resistentes a la abrasión
Niquel	Ilimitada	10% (independiente del contenido de carbono)	La hace resistente y tenaz por solución sólida	Aumenta ligeramente la templeabilidad pero tiende a retener tenacidad con alto contenido de carbono	Negativa (grafita)	Muy poca en pequeños porcentajes	<ol style="list-style-type: none"> 1. Hace resistentes los aceros no templados o forjados 2. Hace tenaces los aceros perlito-ferríticos (especialmente a baja temperatura) 3. Aumenta las aleaciones de hierro al alto cromo

(Continuación)

ELEMENTO	SOLUBILIDAD SÓLIDA		INFLUENCIA EN LA FERRITA	INFLUENCIA EN LA AUSTENITA (PROF. DIST. DE DUREZA)	INFLUENCIA EJERCIDA POR MEDIO DEL CARBURO		FUNCIONES PRINCIPALES
	EN HIERRO GAMMA	EN HIERRO ALFA			TENDENCIA A FORMAR CARBURO	ACCIÓN DURANTE EL REVENIDO	
Fósforo	0.3%	2.8% (independiente del contenido de carbono)	La endurece fuertemente por solución sólida	Aumenta la templeabilidad	Despreciable	...	<ol style="list-style-type: none"> 1. Aumenta la resistencia del acero al bajo carbono 2. Aumenta la resistencia a la corrosión 3. Mejora la maquinabilidad en los aceros de cortado libre (aceros rápidos)
Silicio	2% ± (0% con 0.33% C)	18.5% (no cambia mucho con el contenido de carbono)	La endurece con pérdida en plasticidad (Mn < Si < P)	Aumenta moderadamente la templeabilidad	Negativa (grafita)	Sostiene la dureza por solución sólida	<ol style="list-style-type: none"> 1. Se emplea como desoxidador de propósito general 2. Elemento de aleación para láminas eléctricas y resódicas 3. Mejora la resistencia a la corrosión 4. Aumenta la templeabilidad de los aceros que no tienen elementos grafilizadores 5. Hace resistentes los aceros de baja aleación
Titanio	0.75% 1% ± con 0.30% C)	6% ± (menos con temperatura disminuida)	Proporciona un sistema de endurecimiento por envejecido en aleaciones con alto contenido de Ti-Fe	Probablemente aumenta muy fuerte la templeabilidad al estar disueltos. Los efectos del carbono no se pueda endurecer)	La mayor que se conoce (1% de Ti hace que el acero con 0.50% de carbono no se pueda endurecer)	Los carburos persistentes probablemente no se afectan. Algunos endurecimiento secundario	<ol style="list-style-type: none"> 1. Fija el carbono en partículas fuertes a) Reduce la dureza martensítica y la templeabilidad en aceros al cromo medio b) Previene la formación de austenita en aceros al alto cromo c) Previene el agotamiento localizado de cromo en aceros inoxidables durante un largo calentamiento
Tungsteno	6% (1% con 0.13% C)	33% (menos con temperatura disminuida)	Proporciona un sistema de endurecimiento por envejecido en aleaciones con alto W-Fe	Aumenta fuertemente la templeabilidad en pequeñas cantidades	Fuerte	Se opone al suavizamiento por endurecimiento secundario	<ol style="list-style-type: none"> 1. Forma partículas duras y resistentes a la abrasión en aceros para herramientas 2. Promueve la dureza y la resistencia a altas temperaturas
Vanadio	1% (4% con 0.30% C)	Ilimitada	La endurece moderadamente por solución sólida	Aumenta fuertemente la templeabilidad cuando está disuelto	Muy fuerte (V < Ti o Cr)	Más que por endurecimiento secundario	<ol style="list-style-type: none"> 1. Eleva la temperatura de inicio de crecimiento del grano de la austenita (promueve el grano fino) 2. Aumenta la templeabilidad (cuando está disuelto) 3. Retarda el revenido y produce un marcado endurecido secundario

* Metals handbook, ed. de 1948, American Society for Metals, Metals Park, Ohio.

2.4 Fundiciones

Teóricamente las fundiciones pueden contener de acuerdo con el diagrama Hierro-Carbono, de 2 a 6.67%C. Sin embargo, en la práctica su contenido varía de 2 a 4.5%C, siendo lo más frecuente que oscilen entre 2.75 a 3.5%C. El contenido en silicio puede variar de 0.5 a 3.5%, y el manganeso de 0.4 a 2.0%. Los porcentajes de azufre pueden oscilar de 0.01 a 0.2%. los de fósforo de 0.4 a 0.8%.

La más conocida de las clasificaciones es la siguiente:

Fundición Blanca
Fundición Gris
Fundición Maleable
Fundición Nodular

La fundición gris contiene en general mucho silicio, 1.5 a 3.5%, la blanca, poco silicio, generalmente menos de 1%. El color oscuro que tiene las fracturas de las fundiciones grises se debe a la presencia en las mismas de gran cantidad de láminas de grafito; el color claro de la fractura de las fundiciones blancas es debido a que el carbono se encuentra combinado formando cementita.

El contenido en silicio de las aleaciones Hierro-Carbono y la velocidad de enfriamiento, tienen gran influencia en la formación de una u otra clase de fundición. Las velocidades de enfriamiento muy lentas favorecen la formación de fundición gris; el enfriamiento rápido en cambio tiende a producir fundición blanca. Finalmente el azufre y el manganeso ejercen también una cierta influencia contraria a la del silicio y favorecen la formación de fundición blanca. Sin embargo el manganeso y el silicio, cuando se encuentran formando inclusiones no-metálicas de sulfuro de manganeso, no ejercen influencia favorable ni desfavorable en la formación de grafito ni en la aparición de fundiciones grises o blancas.

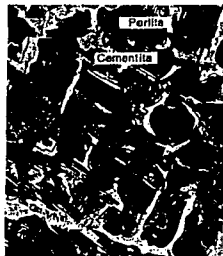
La fundición maleable se obtiene, en dos etapas; primero se fabrica la fundición blanca y luego por recocido de ésta se obtiene la fundición maleable en la que el grafito tiene forma de nódulos irregulares. Hasta hace pocos años las únicas fundiciones con grafito en forma de nódulos eran las fundiciones maleables con un alto costo de producción. En la actualidad, sin embargo, existen además fundiciones con grafito nodular, mejor dicho esférico, fabricadas con cerio o magnesio y con un costo mucho menor.

En la actualidad existen también, además de estas cuatro clases algunos otros tipos como las fundiciones aleadas o espaciales que se han comenzado a fabricar recientemente y que complican algo el estudio clásico de las cuatro clases que acabamos de citar. En la Fig. N^o 7 se muestran microestructuras típicas de las fundiciones arriba señaladas. En la Tabla N^o 2 se ilustran las propiedades mínimas de las fundiciones mencionadas.

Figura No. 7



Fundición Gris



Fundición Blanca



Fundición Maleable



Fundición Nodular

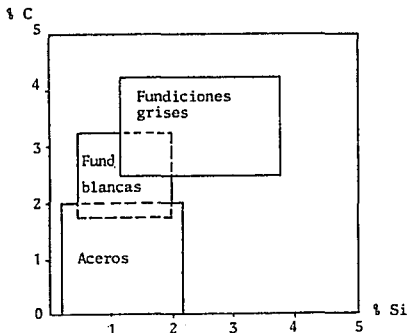
Tabla No. 2

PROPIEDADES MINIMAS DE LOS HIERROS BLANCO, GRIS, NODULAR Y MALEABLE

Nombre y número	Análisis químico, porcentaje	Condición	Resistencia a la tracción lb/pulg ² X 10	Resistencia a la fluencia lb/pulg ² X 10 ¹	Alargamiento porcentajes	BHN	Uso típico
Hierro fundido blanco sin aleas	3.5 C, 0.5 Si	Fundido	40	40	0	500	Piezas resistentes al desgaste
<i>Hierro gris</i>							
Ferítico clase 25	3.5 C, 2.5 Si	Fundido	25	20	0.4	150	Tubos, artefactos sanitarios
Ferítico clase 40	3.2 C, 2 Si	Fundido	40	35	0.4	220	Máquinas herramientas, taz, bloques
Martensítico templado	3.2 C, 2 Si [®]	Templado	80	80	0	500	Superficies de desgaste
Bainítico templado	3.2 C, 2 Si [®]	Templado	70	70	0	300	Ejes de levas
<i>Hierro Nodular</i>							
Ferítico (60-40-18)	3.5 C, 2.5 Si	Recocido	60	40	18	170	Tubería de servicio pesado
Ferítico (80-55-06)	3.5 C, 2.2 Si	Fundido	60	55	6	190	Cigüeñales
Templado (120-90-02)	3.5 C, 2.2 Si	Templado y revenido	120	90	2	270	Piezas de máquinas de alta resistencia
<i>Hierro maleable</i>							
Ferítico (35018)	2.2 C, 1 Si	Recocido	53	35	18	130	Ferretería, accesorios
Ferítico (45010)	2.2 C, 1 Si	Recocido	65	45	10	181	Acoples
Templado (80002)	2.2 C, 1 Si	Templado y revenido	100	80	2	250	Yugos de alta resistencia

Influencia del silicio en las fundiciones. Los constituyentes en las fundiciones son algo diferentes en algunos casos de los que se estudian en el diagrama Hierro-Carbono correspondiente a los aceros. Las diferencias que existen entre éstas y aquellas son debidas principalmente a la presencia de silicio en cantidades bastante elevadas, generalmente variables de 1 a 4%. En la Fig. Nº 8 se ilustran los contenidos típicos de silicio y carbono para los aceros y fundiciones grises y blancas.

FIGURA Nº 8



Cuando se haya presente en pequeñas cantidades variables de 0.1 a 0.6% no ejerce influencia importante. En cambio cuando el silicio se halla presente en porcentajes variables de 0.6 a 3.5%, ejerce indirectamente una acción muy destacada y contribuye a la formación de grafito, que modifica completamente el carácter y propiedades de la aleación hierro-carbono. En el siguiente ejemplo que se refiere a dos piezas del mismo tamaño, se aprecia perfectamente su influencia. La composición de la primera pieza es la siguiente: carbono 3%; silicio 0.5%; magnesio 0.45%; fósforo 0.05% y azufre 0.070%; la segunda tiene la misma composición excepto el contenido de silicio, que es de 2.5 en

lugar de 0.5%. Esa diferencia en el silicio hace que la microestructura y propiedades de las dos piezas sean completamente distintas. La primera es una fundición blanca muy dura, frágil, tiene fractura blanca encontrándose en ella todo el carbono en forma de cementita, la segunda es una fundición gris relativamente blanda tiene fractura grisacea y un gran porcentaje de carbono en forma de grafito. En la Fig. N° 9 se ilustran los diferentes tipos de matrices para los distintos porcentajes de carbono y silicio.

FIGURA N° 9

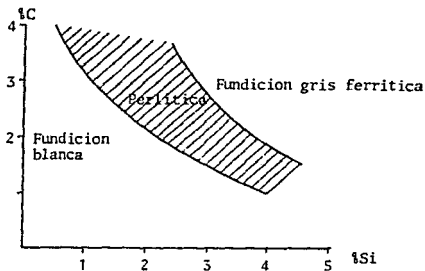


Diagrama de Norbury para piezas de 25mm de espesor

Influencia de la velocidad de enfriamiento. La velocidad de enfriamiento que depende del espesor de las piezas y de la clase de molde empleado, es otro factor que también ejerce influencia decisiva en la calidad y microestructura de las fundiciones.

Los enfriamientos rápidos tienden a producir fundiciones blancas; los enfriamientos lentos favorecen la formación de grafito y, por lo tanto, la formación de fundiciones grises. Esta influencia es tan marcada que con una misma composición al variarse la velocidad de enfriamiento se obtienen diferentes calidades con distintas durezas y microestructuras. La velocidad de enfriamiento que suele variar principalmente con el espesor de las piezas también se modifica con la naturaleza de los moldes.

Los pequeños espesores se enfrían mucho más rápidamente que los grandes. Un molde metálico enfría más rápidamente que un molde de arena. En los moldes metálicos el enfriamiento de las fundiciones será más o menos rápido según sea el espesor del molde. En algunos casos para alcanzar las mayores velocidades de enfriamiento, los moldes metálicos son refrigerados con agua.

Formación de grafito. La aparición del grafito en vez de cementita en las aleaciones hierro-carbono, es debida a la inestabilidad del carburo de hierro en determinadas circunstancias y condiciones que hacen imposible su existencia y favorecen, en cambio, la formación del grafito.

Las principales circunstancias que favorecen la formación de grafito son, como ya hemos señalado antes, un elevado porcentaje de silicio y un enfriamiento relativamente lento. Experimentalmente se ha comprobado también que la presencia de núcleos de cristalización en la fase líquida, ejerce gran influencia en la formación de grafito. El manganeso, azufre y cromo favorecen en cambio la formación de cementita.

La máxima temperatura alcanzada por la aleación durante la fusión y la temperatura de colada, también influyen en la cantidad, tamaño y distribución de láminas de grafito. En algunos casos el grafito se forma directamente, y en otros se forma al desdoblarse la cementita en grafito y hierro.

En la actualidad existen diversas teorías y, en cierto modo, hay incluso ciertas discrepancias sobre la interpretación de los fenómenos de grafitización.

En la práctica casi nunca se transforma todo el carbono en grafito, y es muy frecuente que durante el enfriamiento se forme grafito al realizarse una parte de las transformaciones de acuerdo con el diagrama estable, y luego se forma cementita al realizarse otra parte de las transformaciones según el diagrama metaestable. La cantidad de grafito o cementita que se forme, en cada caso, depende de que sea grande, pequeña o intermedia la influencia que ejerzan los factores que favorecen la formación de grafito o cementita. En general el grafito se forma más fácilmente a temperaturas elevadas que a bajas, y en las fundiciones hipereutécticas se realiza más fácilmente la formación de grafito cuando parte de la aleación está todavía fundida, que cuando toda ella se encuentra en estado sólido.

Efectos de algunos elementos presentes en las fundiciones. A continuación señalaremos la influencia del azufre, fósforo y manganeso en la microestructura de las fundiciones.

Azufre. Este se opone a la grafitización del carbono y favorece la formación de la cementita. Su influencia en ausencia del manganeso es verdaderamente sencilla. El azufre tiene una fuerte afinidad con el manganeso y al combinarse ambos elementos forman el sulfuro de manganeso, que no tiene en cambio ninguna influencia en la formación de grafito o cementita. Por lo tanto, inversamente a lo que antes hemos explicado, la cantidad original de azufre en una fundición de un contenido relativamente elevado de manganeso tiende indirectamente a grafitizar la fundición. Esto es debido a que el azufre en cierto modo absorbe algo de manganeso, que es un elemento que favorece la formación de cementita. Lo mismo ocurre con la adición de manganeso a una fundición con elevado contenido de azufre, ya que al principio favorecen la grafitización el lugar de oponerse a ella.

En tambic, cuando el azufre existe en exceso en una fundición con poco manganeso, forma con el hierro el sulfuro de hierro que favorece la formación de cementita y tiende, por lo tanto, a blanquear la fundición.

En la fundición, los contenidos de azufre suelen variar de 0.01 a 0.20%. El azufre en ocasiones, cuando se encuentra en las fundiciones en cantidades importantes y forma SFe, por no haber suficiente cantidad de manganeso, pueda dar lugar al fenómeno de temple invertido. Suele ocurrir que el azufre aparece segregado en las zonas centrales (roximas a las mazarotas o rechupes en forma de sulfuro de hierro que tiende a blanquear en esos puntos a la fundición. Entonces ocurre que la zona central es mas dura que la periferia y por eso se le conoce con el nombre de temple invertido.

Fósforo. Suele añadirse a veces intencionalmente a la fundición con el objeto de favorecer su colabilidad y se emplea cuando se requiere fabricar piezas de forma complicada. El fósforo no ejerce influencia muy sencilla sobre la grafitización del carbono en las fundiciones, aunque puede decirse que, en general, se opone ligeramente a ella. La presencia del fósforo dá lugar a un aumento de fragilidad y aumenta la dureza. La mejora de la colabilidad de las fundiciones por la presencia del fósforo es debida a la formación del eutéctico esteadita de bajo punto de fusión que suele aparecer en los contornos de granos. En fundición gris la ferrita llega a contener en disolución hasta 1.7% de fósforo y cuando el porcentaje es mayor de 1.7 se forma un eutéctico binario de hierro con fósforo en solución y fósforo de hierro. En las fundiciones blancas se forma un eutéctico ternario de ferrita con algo de fósforo en solución, fósforo de hierro y cementita.

En las fundiciones grises se forma un eutéctico binario de 39% de ferrita con algo de fósforo en solución y de 61% de fósforo de hierro.

Un contenido normal en fósforo en las fundiciones es, por ejemplo, 0.15% empleándose contenidos más bajos cuando se desea alta resistencia, y más elevado, de 0.50 a 1.50%, cuando se desea alta colabilidad. Hay fundiciones en las que para mejorar su resistencia al desgaste se le añade de 0.5 a 1.0% de fósforo para conseguir que se forme la esteadita que es de gran dureza.

Manganeso. Este se opone lo mismo que el azufre a la grafitización del carbono y en cambio favorece la formación de carburos. Tiende a blanquear las fundiciones y aumentar su dureza dificultando la mecanización. Normalmente las fundiciones suelen tener de 0.4 a 1.5% de manganeso. El manganeso con azufre forma inclusiones de sulfuro de manganeso, y como se señaló anteriormente el principal papel del manganeso es neutralizar al azufre formando sulfuro de manganeso.

Oxígeno. Es un elemento antigrafitizante energético que se encuentra presente en mayor o menor cantidad en todas las fundiciones. Se presenta principalmente en forma de inclusiones no metálicas, muchas de ellas submicroscópicas, de óxido de hierro, de manganeso, de aluminio y de silicio. El porcentaje de oxígeno que tienen las fundiciones suele ser de 0.002 a 0.02%. Con altos porcentajes de oxígeno la colabilidad del metal disminuye mucho, se producen rechupes importantes y la estructura puede sufrir sencibles modificaciones.

Hidrógeno. Se presenta casi siempre como impureza gaseosa en las fundiciones y da lugar a porosidad en las piezas cuando el porcentaje es importante. El hidrógeno suele provenir de la humedad de los moldes, del vapor de agua contenido en el aire, solado, de la humedad de coke.

La solubilidad del hidrógeno en las fundiciones aumenta con el porcentaje de silicio. Por ello las fundiciones altas en silicio suelen ser más porosas que las de bajo contenido de silicio. Una de las ventajas de las fundiciones inoculadas es que al fabricarse en el horno con bajo porcentaje de silicio y añadirse luego el ferrosilicio al canal de colado o a la cuchara, se consigue limitar mucho la absorción del hidrógeno y como consecuencia se reduce notablemente los riesgos de que aparezcan porosidades en las piezas de fundición.

Efectos de los elementos de aleación en las fundiciones. El estudio de la influencia de los elementos de aleación en las fundiciones es bastante más complicado que en los aceros. Puede decirse que los elementos de aleación modifican la microestructura de las fundiciones y con ello su dureza y resistencia, además estando en ocasiones estos cambios influenciados por una variación de la templabilidad. Los elementos de aleación modifican también como en los aceros, la situación de los puntos críticos y además ejercen una acción muy importante y compleja sobre la grafitización.

Ciertos elementos como el silicio, aluminio níquel y cobre, que se disuelven en la ferrita, la endurecen y hacen aumentar su resistencia; son elementos que favorecen la grafitización.

Otros elementos como el cromo, manganeso y molibdeno son formadores de carburo, son elementos que tienden a formar fundición blanca en vez de gris y dificultan la grafitización.

El níquel, el manganeso y el cobre aumentan la estabilidad de la austenita y favorecen la formación de una matriz austenítica, como se explicó para los aceros. El silicio y el aluminio, y también el molibdeno (éste en muy pequeña proporción) aumentan la estabilidad de la ferrita y favorecen la formación de fundiciones de matriz ferrítica. En la Tabla Nº 3 se ilustra la influencia de algunos elementos de aleación de las fundiciones.

TABLA Nº 3

Elemento	Oxidación y coeficiente de grafritización	Efecto sobre los carburos a alta temperatura	Efecto en la estructura del grafo	Efecto en el rebabe contenido de la perlit	Efecto que promueve en la matriz
Carbono	Favorece	Disminuye estabilidad	Engruesa	Disminuye fuertemente	Ablanda y favorece la formación de ferrita
Silicio	Favorece	Disminuye estabilidad	Engruesa	Disminuye fuertemente	Ablanda y favorece la formación de ferrita
Aluminio	Favorece	Disminuye estabilidad	Engruesa	Disminuye fuertemente	Ablanda y favorece la formación de ferrita
Ti silicio	Favorece	Disminuye estabilidad	Afina fuertemente	Disminuye	Ablanda y favorece la formación de ferrita
Níquel	Favorece	Disminuye ligeramente estabilidad	Afina ligeramente	Disminuye y estabiliza la perlit	Afina la perlit y da dureza
Cobre	Favorece	Indiferente	Indiferente	Disminuye ligeramente	Da dureza
Manganeso	Se opone	Estabiliza	Afina ligeramente	Aumenta	Afina la perlit y da dureza
Molibdeno	Se opone	Indiferente	Afina fuertemente	Aumenta ligeramente	Afina la perlit y da resistencia
Cromo	Se opone	Estabiliza fuertemente	Afina fuertemente	Aumenta	Afina la perlit y da dureza
Vanadio	Se opone	Estabiliza fuertemente	Afina	Aumenta	Afina la perlit y da dureza

En la segunda columna de la tabla 3, se menciona el poder grafitizante diversos elementos, que señalan el valor de su influencia comparada con la del silicio. Esa información conviene completarla con las siguientes aclaraciones.

Aluminio. La función que se señala sirve hasta 2%. Al aumentar el aluminio de 2 a 4%, la acción grafitizante decrece hasta 0.

Titanio. Con 0.1 a 0.2%, el titanio tiene una acción grafitizante mas intensa que el silicio, mientras que para mayores porcentajes su acción es inferior como se señala en la tabla.

Molibdeno. El Molibdeno favorece la estabilidad del carburo de hierro y reduce el tamaño de las láminas de grafito y también aumenta la resistencia de la matriz. Se emplea en muchos tipos de fundiciones, pero su uso tiene un interés muy especial en las fundiciones aciculares, que tienen una tenacidad muy elevada. Su función corresponde a 0.8 a 1.5% de molibdeno. Porcentajes de molibdeno inferiores a 0.8% tienen una acción más débil y contenidos más elevados tienen una acción más intensa.

Niquel. El níquel facilita la grafitización, se disuelve en el hierro y disminuye la estabilidad del carburo. Su acción es menos activa que la del silicio, ya que tres partes del níquel hacen el mismo efecto que una de silicio. Aumenta la dureza y resistencia de la matriz y reduce el tamaño de las láminas de grafito y el tamaño de grano. Además, y esto es quizás lo más importante, evita la formación de fundición blanca en las esquinas y secciones delgadas de las piezas y mejora su maquinabilidad. Para la fabricación de fundiciones de alta resistencia, se suele emplear de 0.5 a 3% de níquel. De 3.5% a 5% de níquel, se emplea para obtener fundiciones martensíticas de elevada dureza, y más de 15% de níquel para fabricar las fundiciones austeníticas muy resistentes a la corrosión y al calor.

Cromo. El cromo estabiliza la cementita y evita la grafitización. Reduce ligeramente el tamaño de las láminas de grafito y afina y aumenta la dureza de la matriz. Se fabrican fundiciones de 12 a 30% de cromo para resistir a la corrosión y altas temperaturas. Forma carburos de cromo que son muy estables a alta temperatura.

Cobre. El cobre favorece ligeramente la grafitización y endurece y aumenta la resistencia de la matriz. Mejora la resistencia al desgaste al choque de las fundiciones, proporcionándoles cualidades antifricción muy interesantes. También mejora la resistencia a la corrosión atmosférica y a la acción de agentes corrosivos relativamente débiles. Por su bajo precio es muy empleado para substituir al níquel. Se suele utilizar para fabricar fundiciones perlíticas de alta resistencia a la tracción. La acción grafitizante casi es nula, cuando los contenidos de carbono son mayores de 3%. Tablas N^o 4 y 5.

TABLA N^o 4

Modificación que se produce	Si	Mn	Ni	C.	Al	Mo
Desplazamiento del punto eutéctico	Hacia la izquierda	Hacia la derecha	Hacia la izquierda	Hacia la izquierda		
Desplazamiento de la temperatura eutéctica	Hacia arriba	Hacia abajo	Hacia abajo	Hacia abajo	Hacia arriba	
Templabilidad		Aumenta		Aumenta	Disminuye	Aumenta
Desplazamiento del punto eutéctico	Hacia la izquierda	Hacia la izquierda	Hacia la izquierda	Hacia la izquierda	Hacia la izquierda	Hacia la izquierda

Influencia de los elementos de aleación en la situación de los puntos críticos del diagrama hierro-carbono

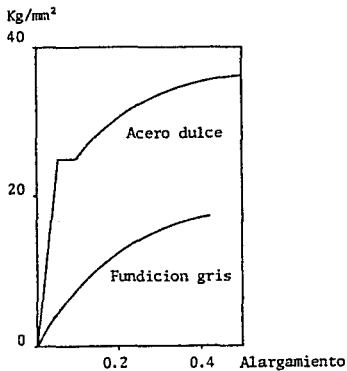
Tabla No. 5

Fundiciones aleadas de alta resistencia							
	% C	% Si	% Mn	% Cr	% Cu	% Mo	% Ni
Camisas de cilindros de motores de automóviles	3,35	2,20	0,75	0,35	—	—	0,75
	3,25	2,25	0,60	0,30	—	—	0,25
	3,25	2,00	0,70	—	0,10	—	—
	3,20	2,15	0,70	0,50	—	0,50	0,50
	3,25	2,20	0,60	0,50	1,00	1,00	0,20
Tambores de freno	3,35	2,00	0,70	0,35	—	—	1,75
	3,30	2,25	0,65	0,30	—	—	0,25
	3,25	2,00	0,60	—	1,00	0,50	—
	3,40	2,40	0,70	—	—	0,75	1,00
	3,20	1,00	0,70	0,50	—	—	1,50
Cigüeñales	2,50	2,50	1,00	—	—	1,00	1,00
	2,80	2,10	0,70	—	—	0,60	1,75
	3,00	2,00	0,80	—	—	0,75	1,50
	1,50	0,05	0,70	0,45	1,75	—	—
Troqueles para estampación de chupa	3,25	1,50	1,25	—	—	0,70	—
	3,50	1,50	0,50	—	0,20	—	1,75
	3,00	2,20	0,75	0,35	—	0,60	2,00
Planchas de máquinas	3,00	1,45	0,50	0,00	—	—	3,00
	3,30	1,60	0,60	0,25	—	0,20	1,00
	3,00	1,00	0,75	0,35	—	—	1,25
Cilindros de laminación en caliente	2,00	1,90	0,90	—	—	—	1,50
	3,00	0,60	0,25	—	—	0,35	—
	3,00	0,55	0,20	0,25	—	0,25	0,25
	3,10	0,60	0,20	0,40	—	0,40	3,50
Fundición gris martensítica	3,50	0,90	1,30	2,00	—	—	4,50
	3,40	0,60	0,25	1,30	—	0,10	4,50
Fundiciones aleadas martensíticas							
CrNi alta en carbono (blanca)	3,25	0,50	0,50	2,00	—	—	4,50
CrNi baja en carbono (blanca)	2,75	0,50	0,50	2,00	—	—	4,50
Al manganeso (blanca)	2,00	2,90	3,00	0,25	—	—	—
Fundición gris martensítica	3,10	1,75	0,9	0,8	—	—	4,10
Alta aleación de cromo	2,60	1,50	0,6	20	1,5	1,5	2,60
Alta aleación de molibdeno	2,70	1,50	0,8	3,00	0,5	0	2,00
Fundiciones aleadas resistentes al calor (400° a 750°)							
Al cromo (baja aleación)	3,50	2,25	0,60	1,25	—	—	—
	3,10	2,10	0,60	1,00	—	—	—
	3,00	2,00	0,60	0,75	—	—	—
	3,40	2,00	0,60	0,60	—	—	1,50

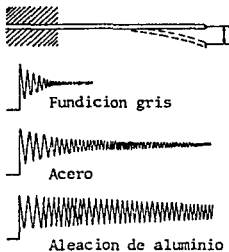
Composiciones de algunas fundiciones de baja y media aleación de uso más corriente.

Características mecánicas de las fundiciones. Una propiedad importante de las fundiciones, debida precisamente a la presencia de láminas de grafito, es su gran capacidad de amortiguación de las vibraciones, muy superior a la de los aceros. Se observa que las vibraciones se amortiguan en la fundición mucho antes que en el acero y que en aleaciones de aluminio, lo cual, en general, es muy ventajoso cuando se emplea este material para la fabricación de bancadas de máquinas, motores, etc. Figura N° 10.

FIGURA N° 10



Ensayo de tracción



Amortiguamiento de vibraciones

La presencia de numerosas discontinuidades en la estructura, debido a las líneas de grafito, hace que las fundiciones grises sean mucho menos sensibles al efecto de entalle que los aceros, lo cual es muy ventajoso. Por ello, no hay que temer tanto como en los aceros el peligro de rotura en las piezas por rayas de mecanizado, ángulos vivos, etc.

C A P I T U L O 3

PROPIEDADES MECANICAS Y COMPOSICION QUIMICA DEL HIERRO NODULAR.

Anteriormente el costo del tratamiento termico de un Hierro Nodular no tenia vital importancia dentro del costo total del mismo. Sin embargo, en la actualidad este costo se ha incrementado de tal modo que ha llegado a influir directamente en el costo total, debido a los fuertes incrementos de precio de los combustibles utilizados durante dicho proceso.

Durante mucho tiempo los fundidores usaron este recurso como una alternativa para no controlar debidamente la composición de su materia prima (hierro base).

Hoy en dia el uso de los tratamiento térmicos se ha limitado exclusivamente para la obtención de una serie de Hierros Nodulares, con propiedades mecánicas no obtenibles directamente de la colada, dejando otro grupo de Hierros Nodulares con una consistente gama de propiedades mecánicas muy útiles y factibles de obtener directamente del molde, mediante un adecuado control de la composición química y velocidad de enfriamiento.

En la actualidad se han establecido las cuatro siguientes especificaciones para Hierro Nodular sin aleación todas ellas obtenibles del molde.

100-70-03
80-55-06
65-45-12
60-40-18

La 100-07-03 es perlítica un 95% y se produce mediante aleación con manganeso o cobre y por tratamiento térmico de normalizado. La 80-55-06 es un grado perlítico que generalmente contiene un 70% de perlita junto con algo de ferrita. La 65-45-12 es parcialmente perlítica conteniendo aproximadamente 60% de ferrita. La 60-40-18 es un grado ferrítico que no contiene más del 5% de perlita.

A continuación se muestran las figuras Nº 11, 12, 13, 14 y 15 y la Tabla Nº 6 acerca de la composición química de Hierro Nodular y algunas de sus propiedades.

FIGURA Nº 11

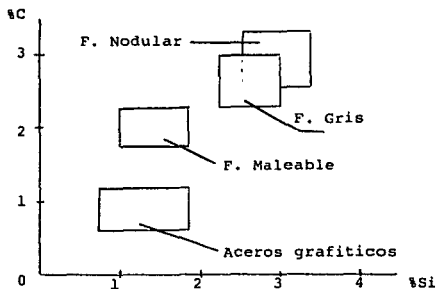


TABLA Nº 6

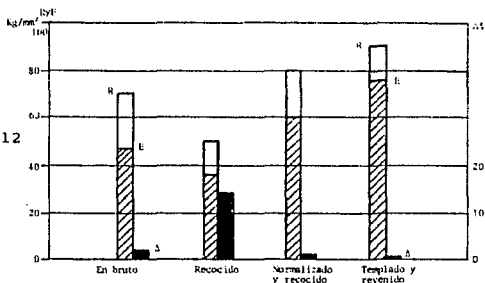
ACERO NODULAR "DE FOLLE"

PROPIEDADES MECANICAS Y COMPOSICION QUIMICA

Especificacion	Resistencia a la Tension Kgs./ cm ²	Limite Elastico Kgs./ cm ²	Alargamiento %	MN	C	Si	Mn	P	S
80-55-06	60.0	40.2	9	217	3.70	2.62	0.58	0.05	0.010
100-70-03	79.1	53.0	5	255	3.73	2.58	0.60	0.01	0.009
65-45-12	48.5	33.6	15	169	3.77	2.66	0.23	0.02	0.007
60-30-18	44.6	29.8	21	150	3.82	2.68	0.12	0.02	0.010

Influencia dependiente del Manganeso

Figura No. 12



Características mecánicas de las fundiciones con grafito esferoidal en diferentes estados de tratamiento

Figura No. 13

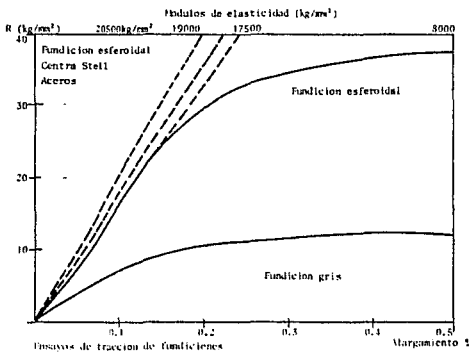
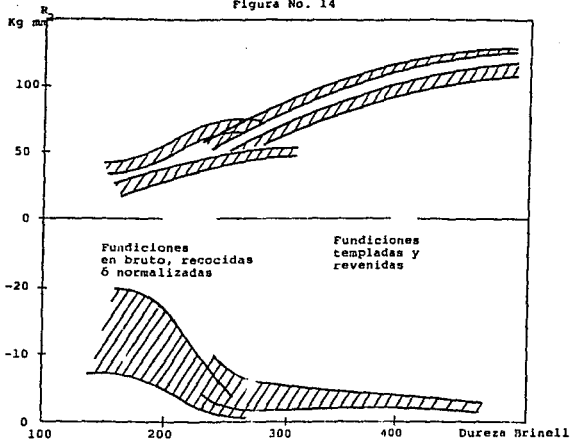
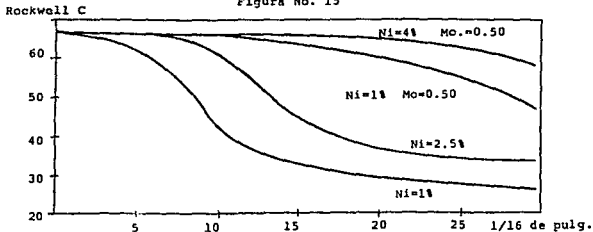


Figura No. 14



Relación entre las durezas y las resistencias y alargamientos de las fundiciones con grafito nodular en diferentes estados de tratamiento

Figura No. 15



Curvas de Jominy de varias fundiciones nodulares de la siguiente composición base: C=3.3%, Si=2.35% y Mn=0.3%. Se observa la gran influencia que sobre la templabilidad tienen los elementos de aleación

Ha quedado bien establecido que las cantidades de elementos estabilizadores de carburos y de perlita presentes en la materia prima (hierro base), en una gran parte determinan el tipo de microestructura "de molde" y propiedades mecánicas que resultarán en las fundiciones de Hierro Nodular, suponiendo desde luego que tanto el carbono como el silicio se mantienen constantes. Por ejemplo, cuando el manganeso está presente en cantidades que exceden a 0.65% se forman carburos no recocibles con propiedades mecánicas de bajo nivel. Sin embargo, a medida que el nivel de manganeso en Hierro Nodular se incrementa hasta 0.65% la cantidad de perlita de la matriz aumenta hacia 100%.

Esto ocasiona que la resistencia a la tensión y el límite elástico aumenten y que el alargamiento se reduzca. Cuando el manganeso se reduce hasta 0%, la cantidad de ferrita en la matriz del Hierro Nodular aumenta, esto ocasiona que la resistencia a la tensión y el límite elástico del Hierro Nodular decrezcan y que el alargamiento aumente.

Todos los otros estabilizadores de perlita afectan las propiedades mecánicas del Hierro Nodular de forma similar. En la tabla N^o 7 se enlistan los principales elementos estabilizadores de carburos y perlita que se encuentran en el Hierro Nodular, y sus límites máximos.

TABLA N^o 7

ELEMENTOS ESTABILIZADORES DE CARBUROS Y DE PERLITA EN EL HIERRO NODULAR.

Elementos	% Para		% Para	
	Grado Ferrítico		Grado Perlitico	
Arsénico	0.02	máximo	0.02	máximo
Boro	0.002	máximo	0.002	máximo
Cobre	0.003	máximo	0.25 - 0.75	
Cromo	0.03	máximo	0.03 - 0.12	
Manganeso	0.09 - 0.20		0.40 - 0.65	
Molibdeno	0.03	máximo	0.40	máximo
Vanadio	0.03	máximo	0.05	máximo
Fósforo	0.04	máximo	0.06	máximo
Estaño	0.01	máximo	0.05	máximo

En los grados perliticos de Hierro Nodular se puede tolerar un nivel relativamente alto de los elementos estabilizadores de perlita. Por ejemplo los totales acumulativos de manganeso, cobre, níquel, vanadio, molibdeno y fósforo, frecuentemente suman un total del 1%. Para los grados perliticos "de molde" los límites de los elementos estabilizadores de carburos y perlita se muestran en la misma tabla N° 7.

La fuente típica de todos estos elementos con excepción del boro es la carga metálica usada en el hierro base (materia prima). El boro generalmente se presenta en el hierro base en hornos de inducción sin núcleo, siendo la fuente, los materiales de revestimiento que contienen boro y que no han sido debidamente sinterizados. Hay otro grupo de elementos que cuando están presentes entorpecen la formación de grafito nodular.

Cuando se le da la debida consideración a la influencia de estos dos tipos de elementos, es evidente que la composición de los hierros base requiera de un control muy estricto, si se pretende obtener propiedades mecánicas en forma consistente directamente del molde.

La eliminación de los elementos residuales que causan la formación de grafito laminar o vernicular en los hierros base, o bien el desarrollo de los medios para nulificar su influencia, es necesario si se ha de producir Hierro Nodular de calidad. Ver Tabla No. 8.

TABLA N° 8

ELEMENTOS QUE FORMAN LAMINILLAS

Elementos	Por ciento
Aluminio - Al	0.04 Máximo
Antimonio - Sb	0.003 Máximo
Bismuto - Bi	0.002 Máximo
Plomo - Pb	0.002 Máximo
Titanio - Ti	0.030 Máximo

De todo lo anterior deducimos que los materiales de carga para el hierro base deberán tener un alto grado de pureza y contener un bajo nivel de elementos que afectan la formación de grafito nodular. Este cuidado debe ser mantenido aun cuando el

uso de tierras raras reducen notoriamente la influencia nociva de los elementos a formar grafito laminar. Además, los materiales usados para producir los grados ferríticos "de molde" deben contener niveles bajos de elementos como el manganeso que estabiliza la perlita.

La composición química que deben tener los hierros base para que produzcan Hierro Nodular de alta calidad se señala en las Tablas Nº 9 y 10.

TABLA Nº 9

COMPOSICION DE HIERRO BASE PARA GRADOS FERRITICOS.

Elementos	Porcentaje
Carbón	3.60 - 3.85
Silicio	1.00 - 1.20
Manganeso	0.40 - 0.60
Fósforo	0.03 máximo
Azufre	0.02 máximo

TABLA Nº 10

COMPOSICION DE HIERRO BASE PARA GRADOS FERLITICOS.

Elementos	Porcentaje
Carbón	3.60 - 3.80
Silicio	1.00 - 1.25
Manganeso	0.10 - 0.20
Fósforo	0.05 máximo
Azufre	0.02 máximo
Níquel	0.0 - 1.5
Cobre	0.0 - 0.60

Los materiales necesarios para producir hierro base, tanto para grado perlítico como ferrítico, son un grupo del cual algunos de ellos no se usan en la producción de hierro gris, a continuación se mencionan algunos de ellos en las Tablas 11 y 12.

TABLA Nº 11

MATERIALES DE FUSION PARA HIERRO BASE
DE GRADOS PERLITICOS "DE MOLDE".

1. Retornos de hierro dúctil.
2. Lingote especial de bajo fósforo.
3. Sorelmetal.
4. Aditivos de carbón (Para fusión con hornos eléctricos).
5. Briquetas de carburo de silicio - para fusión en cubilote.
6. Granos de carburo de silicio - para fusión en horno eléctrico.
7. Ferrosilicio en trozo al 50%.
8. Pedacera de placa y acero estructural - 60% manganeso.

TABLA Nº 12

MATERIALES DE FUSION PARA HIERRO BASE
DE GRADOS FERRITICOS "DE MOLDE".

1. Retornos de hierro dúctil.
2. Lingote especial de bajo fósforo y de bajo manganeso.
3. Idem.
4. Aditivos de carbón - para fusión en hornos eléctricos.
5. Briquetas de carburo de silicio - para fusión en cubilote.
6. Granos de carburo de silicio - para fusión en horno eléctrico.
7. Ferrosilicio en trozo al 50%.
8. Chatarra de Acero (pacas) - 0.35% manganeso.

Una vez identificados los materiales necesarios, es importante señalar su función.

Retornos de Hierro Nodular. Son las piezas rechazadas de Hierro Nodular en coladas anteriores, que se utilizan para volverse a fundir, debido a que el rendimiento del Hierro Nodular está generalmente entre el 40 y 50%. La cantidad aproximada que se usará en el horno es de 50%. Es de vital importancia tener un control sobre los retornos de Hierro Nodular con objeto de evitar su contaminación con otra clase de retornos de fundición o chatarra, dado que es precisamente ésta una de las principales causas de rechazos, pues con este ingrediente contaminado no se logra alcanzar las especificaciones de las normas.

Lingota de bajo fósforo y bajo manganeso. Dentro de los puntos de mayor importancia durante la producción de Hierro Nodular, destaca la reducción de elementos nocivos que promueven grafito en forma laminar o bien carburos; una reducción a mínimo nivel puede ser lograda mediante la utilización de lingote de bajo fósforo y alta pureza, en general, con el fin de lograr diluir a los elementos nocivos. Cargando con un 15 a un 30% de este lingote se logra todo lo anterior y además de también reducir los niveles de Si y Mn.

Sorelmetal. Este material es otra presentación del lingote de bajo fósforo a base de hierro, carbono y silicio, este último en cantidad muy reducida. Su uso es recomendado por las mismas razones que el caso anterior.

A continuación se da la composición de estos dos materiales en la tabla Nº 13.

TABLA Nº 13

COMPOSICIONES TIPICAS DE LINGOTES - PORCIENTO

Elementos	Lingote de bajo fósforo	Sorelmetal F-1
Silicio	0.950	0.180 máximo
Carbono	4.10 - 4.30	4.00 - 4.30
Azufre	0.025 máximo	0.020 máximo
Fósforo	0.030 máximo	0.020 máximo
Manganeso	0.150	0.010 máximo
Aluminio	0.010	0.010 máximo

TABLA Nº 13

COMPOSICIONES TÍPICAS DE LINGOTES - PORCIENTO
(continuación)

Elementos	Lingote de bajo fosforo	Sorelmetal F-1
Arsénico	0.002	0.001
Boro	0.000	0.002
Cromo	0.005	0.010
Cobre	0.003	0.040
Plomo	0.000	0.001
Molibdeno	0.001	0.001
Niquel	0.040	0.085
Estañc	0.000	0.001
Titanio	0.004	0.020
Vanadio	0.000	0.020
Zinc	0.000	0.001
Zirconio	0.000	0.002

Aditivos de carbono con bajo azufre. Cuando se usa chatarra de acero para la obtención de hierro base en hornos eléctricos, siempre se hace necesario añadir cantidades de carbono. Las principales consideraciones para seleccionar un aditivo de carbono para hierro base, son el contenido de azufre y la recuperación efectiva de carbono. Los aditivos usados para este propósito son electrodos sintéticos de grafito, coque de bajo azufre de petróleo y grafito natural. El grafito sintético es una forma de grafito cristalino que tiene el más bajo contenido de azufre, y entra en solución inmediata con el hierro. Su composición química generalmente es la que se ilustra en la Tabla Nº 14.

TABLA Nº 14

Carbono	99.24%
Azufre	0.02%
Ceniza	0.66%
Volátiles	0.08%

El coque de petróleo al bajo azufre y calcinado se usa normalmente como aditivo de carbono en las cargas de hornos eléctricos o por inyección.

El grafito natural es un material que entra en solución lentamente por su alto contenido de ceniza y por este motivo solamente puede ser usado en fusión por hornos eléctricos.

Su composición típica es la que se ilustra en la Tabla Nº 15.

TABLA Nº 15

Carbono	83.0-85.0%
Azufre	0.08-0.12%
Ceniza	1.00 máximo
Volátiles	15.0-18.0%

Briquetas y grano de carburos de silicio. Este material es una fuente de silicio y carbono, tanto en la fusión de cubilote como de horno eléctrico. El carburo de silicio tiene una función muy importante, la nucleación del hierro base, que aumenta el número de nódulos en el Hierro Nodular tratado. Afectando esto último las propiedades mecánicas de la siguiente manera:

Un número mayor de nódulos reduce la dureza general de la pieza.

Un número mayor de nódulos minimiza la formación de carburos y perlita.

Un número mayor de nódulos aumenta el alargamiento y la resistencia al impacto.

Las briquetas de carburo de silicio se usan de 1.0 a 2.0% y las hay en dos clases, con el 65% y 75% de carburo de silicio. Su composición típica es la que se ilustra en las Tablas Nº 16 y 17.

TABLA Nº 16

Briquetas con 65% de Carburo de silicio.

Carbono	19.5%
Silicio	45.5%
Aglutinante	saldo

TABLA Nº 17

Briquetas con 75% de carburo de silicio.

Carbono	22.5%
Silicio	52.5%
Aglutinante	saldo

Ferrosilicio en trozo al 50%. Aleación de hierro y silicio normalmente usada para fusión en cubilote y horno eléctrico. Es recomendable el uso del grado duro de este material en toda la fusión de hierro base. No se quiebra por impacto térmico cuando entra en contacto con el hierro líquido. Este tipo de material tiene aproximadamente 48% de silicio y está debajo del eutéctico hierro-silicio. También se vacía en capas en moldes de hierro gris dejándose enfriar lentamente. Su composición es aproximadamente la que se muestra en la Tabla Nº 18.

TABLA Nº 18

Silicio	47.0-51.0%
Carbono	0.10 máximo
Azufre	0.025 máximo
Fósforo	0.035 máximo
Aluminio	1.25 máximo
Manganeso	0.75 máximo

Chatarra de placa y estructural. Se usa para la obtención de los grados 80-55-06 y 100-70-03, ambos perlíticos. Este tipo de material contiene de 0.50 a 0.70% de manganeso, es responsable de la cantidad de perlita que se encuentra en la matriz de Hierro Nodular.

Chatarra de acero en pacas. La chatarra de acero en pacas o sea de lámina de acero, con su bajo nivel de manganeso, de 0.20-0.35%, puede ser utilizada con ventajas junto con lingotes de bajo fósforo y bajo manganeso para la producción de los grados ferríticos tales como el 65-45-12 y el 60-40-18. El contenido de manganeso del Hierro Nodular "de molde" debe ser de 0.15-0.25%.

En las Tablas Nº 19, 20 y 21 se resumen la función de los elementos presentes en el Hierro Nodular.

Tabla No. 19

RESUMEN DE LA FUNCION DE ELEMENTOS
PRESENTES EN EL HIERRO NODULAR

ELEMENTOS PRIMARIOS				
Elemento	Límite para grado ferrítico	Límite para grado perlítico	Función	Observaciones
C	3.00 - 4.00%	3.00 - 3.80%	Material primario de los esferoides de grafito.	El exceso promueve flotación. C. E. en exceso de 4.3 en secciones de 1/2" puede causar flotación de carbón.
Si	1.00 - 2.90% Depende de la sección	1.80 2.75% Depende de la Sección	Grafitizante y Ferritizante.	Promueve la formación de ferrita. Arriba de 2.50% refuerza la ferrita y reduce la resistencia del impacto.
P	0.050% Máx. 0.010% Máx.	0.050% Máx. 0.010% Máx.	Reduce alargamiento.	Estabilizador de perlita.
Mn	0.20% Máx. en fundición de "molde"	0.65 % Máx.	Estabilizador de perlita	Se combina con magnesio. Es esencial la eliminación del azufre. Arriba de 0.65% promueve carburos aciaurales que resisten el resaca.
ELEMENTOS DE ALEACIÓN				
Ni	Lo más bajo posible en el grado "de molde".	0.40% Mínimo "de molde"	Aumenta la resistencia a la tensión.	Forma perlita y refuerza ferrita en secciones gruesas.
Mo.	0.03 % Máx.	A especificación.	Aumenta la templabilidad.	Promueve interacción en piezas gruesas de enfriamiento lento.
Cu	0.03%	A especificación.	Aumenta la resistencia a la tensión.	Estabiliza perlita. Cuando se enfría de 1.0% a 1.5% a los grados normalizados y revertidos se promueve endurecimiento por precipitación.

Tabla No. 20.

RESUMEN DE LA FUNCION DE LOS ELEMENTOS
PRESENTES EN EL HIERRO NODULAR

ELEMENTOS CON TENDENCIA A FORMAR ESFEROIDES

Elemento	Límite grado ferrítico	Límite grado perlítico	Funcion	Observaciones
Mg	Suficiente para asegurar esferoides		Produce grafito esferoidal	Forma carburos y grafito acicular en forma de estrella
Cc	Aprox. 0.02%	Max. 0.02%	Promueve la formacion de grafito esferoidal solo o en combinacion con el magnesio	El exceso promueve la formacion de carburos. Contraresta los efectos subversivos de los elementos Pb, Sb, Ti, Bi, Al.
La	Aprox. 0.02%	Aprox. 0.02%	Promueve la formacion de grafito esferoidal cuando se usa en combinacion con magnesio	Promueve la formacion de ferrita
Nd y Pr	No conocidos		Promueven la formacion de grafito esferoidal compactado	Estabilizadores de carburos
Y	Aprox. 0.05%	Aprox. 0.05%	Promueve la formacion de grafito esferoidal	Reaccion moderada. Se piensa que promueve la formacion de ferrita
Ca	Ligeramente soluble en hierro	Ligeramente soluble en hierro	Inocula, promueve la formacion de grafito esferoidal en combinacion con el magnesio	Inocula. Reduce el tamaño de las celdas. Puede producir carburos

ELEMENTOS GASEOSOS

O	Aprox. 0.003%	Aprox. 0.003%	Se combina con magnesio	Aumenta los requerimientos de magnesio
H	Aprox. 0.0003%	Aprox. 0.0003%	Causa microporos y estabiliza carburos	Se combina con R.E. Su fuente es la humedad de la arena
N	Aprox. 0.009%	Aprox. 0.009%	Estah. de perlita y causa micro poros	Se combina con R.E. Su fuente es la resina de corazones y aglutinantes de moldes

Tabla No. 21

RESUMEN DE LA FUNCION DE ELEMENTOS PRESENTES EN EL ITERNO MODULAR

ELEMENTOS QUE ESTABILIZAN PERLITA Y PRODUCEN CARBUROS

Elemento	Limite para grado ferritico	Limite para grado perlítico	Funcion	Observaciones
Cr	0.04% Máximo	0.09% Máximo	Fuerte promotor de carburos	Alarga recocido
V	0.03% Máximo	0.05% Máximo	Forma carburos estables	Demora recocido
Sn	0.01% Máximo	0.05% Máximo	Potente estabilizador de perlita	0.05% produce 100% de perlita en todas las secciones
As	0.02% Máximo	0.05% Máximo	Reduce alargamiento	Estabilizador de perlita. En combinación con P para grado ferrítico. De -- 0.35% a 0.05% para grado perlítico
B	0.002% Máximo	0.002%	Forma borocarburos muy estables	Los carburos resisten fuertemente el recocido

ELEMENTOS RESIDUALES Y ELEMENTOS PARA PROPOSITOS ESPECIALES

Pb	0.002% Máximo	0.002% Máximo	Ocasiona la degeneracion de los esferoides grafiticos en laminilla y grafito "mesh"	Es el mas potente elemento subversivo Su influencia se elimina con 0.02% de tierras raras
Ti	0.03% Máximo	0.03% Máximo	Promueve la formacion de grafito vermicular	Su influencia se elimina con 0.02% de tierras raras
Al	0.04% Máximo	0.04% Máximo	Promueve la formacion de grafito vermicular	Ocasiona microporosidad por hidrógeno Su influencia se elimina con 0.02% de tierras raras
Sb	0.003% Máximo	0.003% Máximo	Limita el efecto del magnasio libre ocasionando grafito tipo laminilla y "mesh"	Los efectos se eliminan con 0.02% de tierras raras. Añadiendo 0.004% de -- tierras raras se elimina el grafito tipo "chunck".
Bi	0.002% Máximo	0.002% Máximo	Ocasiona la formacion de grafito laminar. Estabiliza los carburos	Sus efectos se eliminan con 0.02% de tierras raras
Zr	0.10% Máximo	0.10% Máximo	Ocasiona la formacion de grafito vermicular	Actúa como inoculante

C A P I T U L O 4

ASPECTOS GENERALES SOBRE LOS DIFERENTES TIPOS DE HORNOS EN QUE SE FUNDE EL HIERRO BASE.

Existen dos clases de instalaciones (hornos) en los cuales se practica comunmente la fusión de Hierro Base, siendo estas los llamados hornos de cubilote y los hornos eléctricos. Dentro de los hornos de cubilote a su vez se encuentran dos clases, los hornos de cubilote ácido y los de cubilote básico. Por otro lado, dentro de los hornos eléctricos se puede hacer una clasificación como sigue: hornos de arco eléctrico, horno de inducción sin nucleo, hornos de inducción tipo canal.

A continuación se mencionarán los aspectos más importantes de cada uno de éstos hornos.

4.1 Horno de Cubilote Acido.

Este tipo de horno se puede utilizar tanto para fundiciones grises como nodulares, en sus diferentes grados; facilita el control de carbono en la producción de hierros grises de alta resistencia y se presta perfectamente para altas producciones, así como para producciones limitadas. En este tipo de horno se pueden controlar los elementos más oxidables que tienen una influencia negativa sobre la estructura y propiedades de Hierro Nodular, tal es el caso del hidrógeno, antimonio, cromo, boro, manganeso, etc. Se pueden obtener mayores temperaturas con mejores relaciones de hierro-coke, sin la necesidad de soplo de aire caliente. Su costo es menor que el del cubilote sin refractario enfriado por agua o el horno eléctrico. Una de las principales desventajas de este tipo de horno, es el considerable incremento del contenido de azufre llegando a ser incluso de 0.13% dependiendo de la calidad y cantidad del coke utilizado. Esto implica que debe realizarse algún proceso de desulfurización energético, bien sea con carbonato de sodio o carburo de calcio mediante el método del tapon poroso, dado que de otra forma se tendría que añadir una cantidad mayor de magnesio para lograr desarrollar el grafito nodular. En estos hornos también se hace necesario que la carga del cubilote deba consistir en un 40% aproximadamente de hierro con alto contenido de carbono. En las Tablas N^o 22 y 23 se muestran dos tipos de cargas típicas para estos hornos.

Tabla No. 22

CUBILOTE ACIDO

Tipo de Fusión:
HIERRO BASE PARA GRADOS PERLITICOS DE MOLDE

	%	Kgs.	Silicio		Azufre		Fósforo		Manganezo		Carbón Total		Aleación	
			% metal	% carga	% metal	% carga	% metal	% carga	% metal	% carga	% metal	% carga	% metal	% carga
Retornos	50.0	500	2.60	1.30	0.02	0.010	0.02	0.010	0.60	0.30	3.75	1.87	0.04	0.20
Lingote bajo - fósforo.	29.8	298	0.90	0.27	0.02	0.006	0.02	0.006	0.16	0.05	4.01	1.19		
Chatarra es -- tructural.	20.0	200	0.10	0.02	0.02	0.004	0.03	0.006	0.70	0.14	0.25	0.05		
Cobre o Nickel	$\frac{0.20}{100}$	$\frac{2}{1000}$											100.0	0.20

Análisis de la Carga			1.59		0.020		0.002		0.49		3.11		0.40
Pérdida o Ganancia de fusión			-0.15		+0.070		-		-0.04		+0.70		-
Análisis estimado de la Fundición			1.44		0.080		0.022		0.45		3.81		0.40

Análisis Real de la Fundición

Observaciones:

- Requerimientos de Coke - 14% al 15% de la carga metálica
- Requerimiento de piedra caliza - 20% al 25% de la carga de coke
- Carburo de calcio - 1.0% de la carga metálica si el aumento del carbón es pobre.

Tabla No. 23

CUBILOTE ACIDO

Tipo de Fusión:
HIERROS BASE PARA GRADOS
FERRITICOS "DE MOLDE".

Material tipo	Silicio		Azufre		Fósforo		Manganeso		Carbón Total		Ateación	
	%	Kgs. metal carga	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%
Retornos	50.0	500	2.65	1.32	0.01	0.005	0.03	0.015	0.21	0.10	3.75	1.87
Lingote de bajo fósforo.	30.0	300	0.91	0.27	0.02	0.006	0.03	0.009	0.16	0.05	4.01	1.20
Pacas de Acero	<u>20.0</u>	<u>200</u>	0.10	0.02	0.02	0.004	0.02	0.004	0.04	0.08	0.25	0.05
	100.0	1000										

Análisis de la Carga 2.61 0.015 0.028 0.23 3.12

Pérdida o Ganancia de Fusión -0.30 +0.060 - -0.04 +0.70

Análisis estimado de la Fundición. 1.31 0.075 0.028 0.19 3.82

Análisis Real de la Fundición

Observaciones:

- Requerimientos de Coke - 14% al 15% de la carga metálica
- Requerimientos de piedra caliza - 20% al 25% de la carga de coke
- Carburo de Calcio requerido - 1.0% de la carga metálica

Este hierro base debe ser desulfurizado antes de utilizarse para la producción de Hierro Modular.

4.2 Horno de Cubilote Básico.

Este tipo de horno es el que comunmente se usa para la obtención de hierro base. Pueden ser recubiertos con refractario básico o pueden ser del tipo enfriado por agua sin refractario. Aunque en un principio fueron muy usados los hornos con refractario básico, después se cambio al tipo enfriado con agua sin refractario, dado el incremento en el costo del refractario básico, las dificultades en su operación y los problemas que se tenían para lograr el control de la composición. De los hornos de cubilote básico se pueden obtener hierros base con un contenido muy bajo de azufre, en la escoria se produce sulfuro de hierro que es insoluble en el hierro. Asimismo el contenido de oxígeno en el hierro base, es muy bajo, no requiere de materia prima costosa, la chatarra de acero puede substituir al lingote en los casos en que se producirán hierros nodulares perlíticos; no se hace necesaria la desulfurización del hierro base al mismo tiempo que se obtienen todas las ventajas del hierro a alta temperatura con bajo contenido de carbono, el costo por aditivos de magnesio se reduce notablemente, dado que la escoria básica limpia al coque y permite que haya una mayor absorción de carbono, pudiéndose obtener hierros base con alto contenido de carbono. Este tipo de hornos reduce considerablemente su costo por concepto de refractarios, y en el caso de los enfriados por agua sin refractario se reduce el costo por mano de obra, dado que se pueden operar varios días antes de tirar el fondo. Cuando se requiere tener un cierto control sobre la composición en estos hornos, existe cierta dificultad para lograrlo, pues se hace necesario tener una continua y constante velocidad de operación, teniendo en cuenta que en estos hornos se utiliza una mayor cantidad de coque, la fusión se realizará en forma más lenta, aproximadamente un 30%, en los casos en los que se tienen escorias muy básicas se llega a tener hasta un 35% de pérdidas de silicio. Un paro en la producción ocasionará un cambio en la composición.

El menor costo de producción en caso de grandes toneladas, se logra, con el horno enfriado con agua sin refractario, aunque en su operación resulten un poco más complicados, razón por la cual son los más comunes. Existe un peligro que se debe considerar en estos hornos, y es que un corte en el suministro de agua de enfriamiento puede ocasionar la destrucción total del equipo de fusión. No se puede pasar por alto el costo de esta agua de enfriamiento que aunque es muy inferior al de los refractarios, no deja de ser un costo directo en el horno. Se recomienda que este tipo de hornos no se contruyan con diámetros menores de 1.30 mts., puesto que no se puede mantener en forma

consistente a la temperatura, a consecuencia de la relación del diámetro del cubilote y la circunferencia enfriada por el agua. En el caso de cubilotes grandes sin refractarios, se recomienda el uso de un antecrisol de inducción, y en los casos de cubilotes pequeños, este se hace casi obligatorio. La proporción entre los componentes básicos y ácidos de la escoria, se llama relación de basicidad. Cuando ésta es igual a uno, se considera neutral; cuando es menor que uno se considera ácida; y si es mayor que uno se considera básica. Los componentes ácidos de la escoria son sílice (SiO_2) y óxido de hierro (Fe_2O_3), mientras que los componentes básicos son óxido de calcio (CaO) y óxido de magnesio (MgO).

$$\text{Basicidad} = \frac{\text{MgO} + \text{CaO}}{\text{SiO}_2 + \text{Fe}_2\text{O}_3}$$

Entre los componentes que forman escoria ácida están: cenizas, azufre del coke, arena silicea de las coladas, sílice oxidado de ganga y óxido de hierro de la carga. Por otro lado tenemos los componentes que forman escoria básica: piedra caliza, magnesita y feldespatos. Es importante que el operador de un horno básico conozca la forma de calcular la relación de basicidad así como la química de la escoria. A continuación se muestran dos tipos de cargas típicas para la obtención de hierro base tanto para grado perlítico como ferrítico. En las Tablas N^o 24 y 25, en la Figura N^o 16 se muestra un horno de cubilote típico.

4.3 Hornos de Arco Directo.

Este tipo de hornos tiene una forma de olla revestida, posee 3 electrodos suspendidos verticalmente que atraviesan la cubierta. Los electrodos están separados entre sí lo suficiente para no crear el arco eléctrico entre ellos, y sí con el metal. Esta especie de olla tiene en el borde una saliente para el vaciado de metal. La capacidad de estos hornos es de 250 kgs hasta 60 Ton. El revestimiento de estos hornos es de naturaleza silicea. Una capa de ladrillo refractario junto a la coraza, es el refractario que generalmente usan por primera vez estos hornos. Estos ladrillos son colocados formando un fondo de olla y separados un poco entre sí; se les pega con un cemento de alta temperatura y posteriormente se rellenan los espacios con arena sílica. Esta capa resulta ser un fondo permanente que no se quita al cambiar los refractarios apisonados en el fondo. Los refractarios son una mezcla húmeda apisonada de arcilla refractaria y ganister sílice, de un 90% de sílica ganister, 5% arcilla refractaria y 5% de agua. Para las paredes se utilizan ladrillos de sílice cuando los hornos operan continuamente, en los casos en que se trabaja intermitentemente, las paredes son de

Tabla No. 24

CUBILOTE BASICO ENFRIADO POR AGUA

Tipo de Fusión:
HIERRO BASE PARA GRADOS
PERLITICOS "DE MOLDE"

	%	Kgs.	Silicio		Azufre		Fósforo		Manganeso		Carbón Total		Aleación	
			% metal	% carga	% metal	% carga	% metal	% carga	% metal	% carga	% metal	% carga	% metal	% carga
Retornos	50.0	500	2.60	1.30	0.0100	0.005	0.0200	0.010	0.60	0.30	3.70	1.85		
Chatarra de - Acero.	37.6	375	0.09	0.03	0.0200	0.007	0.0200	0.007	0.70	0.26	0.25	0.09		
Lingote bajo- fósforo.	12.0	120	0.09	0.11	0.0200	0.002	0.0200	0.002	0.16	0.02	4.01	0.48		
Briquetas car- buro de silicio 75%.	0.5	5	52.5	0.26	----		----		----		22.5	0.11		

100.0 1000

Análisis cargado				1.70		0.014		0.019		0.58		2.53		
Pérdidas o ganancias de fusión				-0.34		-		-		-0.05		+1.22		
Análisis estimado de la fundición.				1.36		0.010		0.019		0.53		3.75		
Análisis Real														

Observaciones:

Requerimientos de Coke	-	del 16% al 17% de la carga metálica
Requerimiento de piedra caliza	-	9.9% de la carga metálica
Requerimientos de feldespato	-	2.5% de la carga metálica

Tabla No. 25

CUBILOTE BASICO ENFRIADO POR AGUA

Tipo de Fusión:
HIERRO BASE PARA GRADOS
FERRITICOS "DE MOLDE"

Material tipo	%	Kgs.	Silicio		Azufre		Fósforo		Manganeso		Carbón Total		Aleación	
			% metal	% carga	% metal	% carga	% metal	% carga	% metal	% carga	% metal	% carga	% metal	% carga
Retornos	50.0	500	2.65	1.32	0.01	0.005	0.02	0.010	0.20	0.10	3.80	1.90		
Lingote bajo - fósforo.	20.0	200	0.92	0.18	0.02	0.004	0.03	0.006	0.16	0.03	4.01	0.80		
Chatarra de -- acero.	29.0	290	0.10	0.03	0.02	0.006	0.02	0.006	0.30	0.09	0.10	0.03		
Briquetas carbu- ro de silicio - 65%.	1.0	10	45.0	0.45							19.50	0.19		
Análisis cargado 100.0 1000														
Pérdidas o ganancias de fusión			1.98		0.015		0.002		0.22		2.92			
Análisis estimado de la fundi- ción.			-0.39		-0.005		-		-0.02		+0.95			
Análisis real			1.59		0.010		0.022		0.20		3.87			

Observaciones:

Requerimiento de coque 16% al 17% de la carga metálica
Requerimiento de piedra caliza 9.9 de la carga metálica
Requerimiento de feldespato 2.5% de la carga metálica

Figura No. 16

Arrastre de cenizas



Puerta de cargado

Piso de cargado

Carga de metal

Carga de fundente

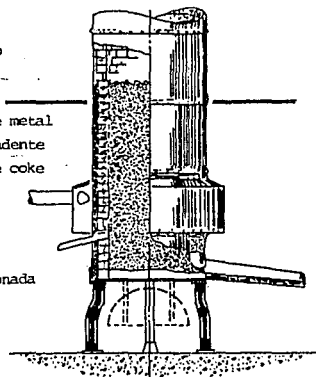
Carga de coque

Tubo de soplado

Caja de aire

Salida de escoria

Fondo de arena apisonada



Salida del metal

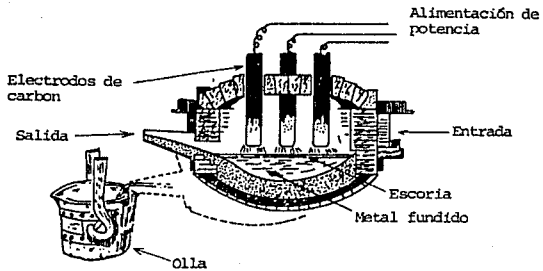
Horno de Cubilote

una mezcla apisonada de arcilla y ganister sobre ladrillo refractario de trabajo pesado; esto se hace con el objeto de reducir el desconchamiento. En el caso de las bovedas de los hornos, debido a que el calentamiento y enfriamiento intermitente provoca el agrietamiento y desconchamiento de los ladrillos de sílice, se tienen que buscar materiales con los cuales se pueda recubrir, y se ha encontrado que el ladrillo de alta alumina o refractarios apisonados de alta alumina tienen buen resultado; así como los refractarios plásticos de alta alumina para los hornos de 1 a 2 Ton. Los electrodos que se usan en hornos de arco son de grafito, en diámetros que van de 10 a 20 cms., son fáciles de usar y su costo no resulta oneroso. El consumo promedio de los electrodos de grafito, por tonelada de carga es de 4 kg. aprox. Una carga típica para el grado ferrítico de Hierro Nodular se ilustra en la Tabla NV 26. En la Figura N° 17 se ilustra un horno de arco directo.

4.4 Horno Eléctrico de Inducción sin Núcleo.

Este tipo de horno ofrece las ventajas de evitar los efectos químicos nocivos de quemar combustible, ser rápida y silenciosa la fusión y además se logra un alto grado de control de la composición química del Hierro Base. Son muy comunes en las fundidoras. Su principio de operación es sencillo pues cuando una corriente alterna pasa por una bobina se crea un campo magnético que induce a corrientes Eddy en el metal que se coloque dentro de tal campo, estas corrientes de Eddy y la resistencia del metal de la carga hacen que se eleve la temperatura del metal, tanto como lo permitan la intensidad del campo o bien su frecuencia. Sobre el crisol y revestimiento no se genera calor, dado que no son conductores eléctricos. La temperatura que se puede llegar a tener sólo es limitada por el reblandecimiento o refractabilidad del material del revestimiento; en casos de revestimiento de origen silíceo, este puede soportar hasta 1600 grados Centígrados en operación continua o aun más con operación intermitente, para revestimientos a base de magnesita o alta alumina, la temperatura general una tonelada de carga requiere aprox. 500 Kw/h. para obtener una temperatura de 1538 grados Centígrados, en los casos en los que se precalienta la carga a 650 grados Centígrados, el consumo de energía puede ser de 265 Kw/h. Una alta agitación "natural" se alcanza con este horno, teniendo el metal fundido mayor homogeneidad y permitiendo mayor porcentaje de aleación. Se adapta particularmente bien para la producción de Hierro Nodular. Para que opere el horno de la manera más económica, se recomienda que se mantenga un 30% de la capacidad de carga del horno, en estado líquido y entonces añadir la carga. Primeramente los aditivos de carbono y carburo de silicio, después la chatarra de acero y finalmente los retornos de Hierro Nodular.

FIGURA Nº 17



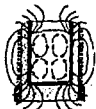
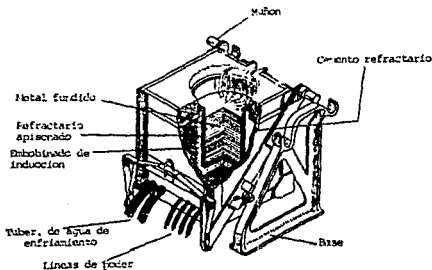
Horno de Arco Directo

Debido al mencionado efecto de agitación, se logran tener recuperaciones de los aditivos de carbono hasta en un 85%, así como una casi total combinación en el hierro, del carburo de silicio que en esta forma resulta ser una de las fuentes de silicio más económicas.

Debido a que se requieren altas cantidades de energía eléctrica, este tipo de hornos no se recomiendan que sean arrancados con carga fría; por lo que se sugiere tenerlos en operación continua la mayor parte de la semana. Dándoles mantenimiento semanalmente, su revestimiento puede durar hasta 6 meses.

Este revestimiento generalmente se utiliza de cuarcita ácida. La cantidad de refractario que se gasta por tonelada, fundiendo a 1538 grados Centígrados, es de 2 Kg. aprox. Adelante se muestran cargas típicas para la obtención de hierro base, para grados ferríticos y perlíticos en las Tablas N^o 27 y 28. En la figura N^o 18 se muestra un horno de inducción sin núcleo.

FIGURA N^o 18



Horno de inducción sin núcleo

Tabla No. 27

HORNO DE INDUCCION SIN NUCLEO

Tipo de Fusión
HIERRO BASE PARA GRADOS
PERLITICOS "DE MOLDE"

Material	%	KGS.	Silicio		Azufre		Fósforo		Manganeso		Carbon Total		Aleación	
			% metal	% carga	% metal	% carga	% metal	% carga	% metal	% carga	% metal	% carga	% metal	% carga
Retornos	50.0	500	2.63	1.31	0.010	0.005	0.020	0.010	0.60	0.30	3.72	1.86		
Chatarra de Ace- ro estructural	47.6	476	0.08	0.30	0.020	0.009	0.020	0.009	0.68	0.32	0.27	0.13		
Grano de carburo de silicio al 90%	0.4	4	60.0	0.24	--	--	--	--	--	30.00	0.06			
Grafito	2.0	20	--	0.020	--	--	--	--	98.00	1.96				

100.0 1000

Análisis cargado 1.58 0.014 0.019 0.62 4.07

Pérdidas o ganancias de fusión 0.16 - - -0.06 -0.25

Análisis estimado de la Fundición 1.42 0.014 0.019 0.56 3.82

Análisis Real

Observaciones:

Tabla No. 28

HORNO DE INDUCCION SIN NUCLEO

Tipo de fusión
HIERRO BASE PARA GRADOS
FERRITICOS "DE MOLDE"

Material Tipo	%	Kgs.	Silicio		Azufre		Fósforo		Manganeso		Carbón Total		Aleación	
			% metal	% carga	% metal	% carga	% metal	% carga	% metal	% carga	% metal	% carga	% metal	% carga
Retornos	40.0	400	2.60	1.04	0.010	0.004	0.020	0.008	0.18	0.072	3.76	1.50		
Lingote al bajo fósforo	20.0	200	0.90	0.18	0.020	0.004	0.030	0.006	0.15	0.030	4.01	0.80		
Pacas de Acero	37.7	377	0.05	0.01	0.020	0.006	0.020	0.006	0.30	0.114	0.10	0.04		
Grano carburo de silicio al 90%	0.4	4	60.0	0.24	--	--	--	--	--	30.0	1.86			
Grafito	1.9	19	--	0.02	--	--	--	--	--	98.0				

100.0 1000

Análisis cargado			1.47		0.014		0.020		0.216		4.32			
Pérdidas o ganancias de fusión			-0.14		-		-		-0.020		-0.44			
Análisis estimado de la fundición			1.33		0.014		0.020		0.196		3.88			

Análisis Real

Observaciones:

4.5 Horno de Inducción Tipo Canal y Frecuencia de la Red.

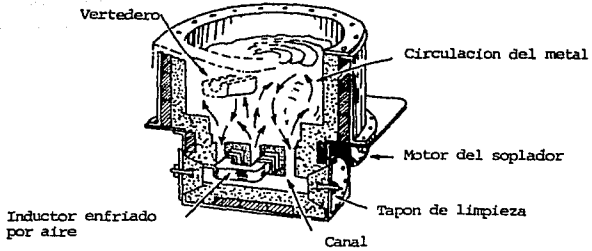
Aunque su uso se ha popularizado, este a su vez es limitado a tamaños hasta de 100 tns. de capacidad. Su principio de operación es similar al anterior, pero con la diferencia de que el inductor ahora queda en el centro del crisol, o sea que se le podría llamar horno de inducción con núcleo.

No resulta costoso arrancarlo con metal frío. Al igual que el horno de inducción sin núcleo, su consumo de potencia para mantener fundida la carga, es menor entre mayor sea su tamaño.

Para iniciar su operación necesitan de metal fundido, suficiente para cubrir totalmente los canales y además un 20% del cupo del horno. Una gran desventaja radica en el hecho de que si por alguna razón se llega a solidificar el metal en alguno de los canales, el horno deberá ser desmantelado.

Su uso más generalizado es como recipiente que mantiene en estado líquido al metal durante largos periodos. Generalmente se revisten con refractario de alta alumina apisonado, y los inductores se revisten con refractario ya sea de alumina o de magnesita. El tiempo de uso de los refractarios llega a ser incluso de 1 año en el caso del crisol, y de 6 meses en el caso de los inductores. Debido a la poca agitación que se presenta en el horno, la recuperación de los aditivos de carbono son bajas, variando ésta entre 50 y 70%. En el caso de la producción de hierro base, este tipo de horno se utiliza para almacenar por periodos largos hierro desulfurado, con pretratamientos y tratamientos de magnesio. También se presta perfectamente al abastecimiento continuo de metal proveniente de hornos que lo producen intermitentemente (hornos de arco eléctrico). Cargas típicas para la obtención de hierro base se muestran a continuación en las Tablas N^o 29 y 20, en la Figura N^o 19 se muestra un horno de inducción tipo canal.

FIGURA Nº 19



Horno de Inducción Tipo Canal

C A P I T U L O 5

REACONDICIONAMIENTO DEL HIERRO BASE Y ALEACIONES DE MAGNESIO UTILIZADAS PARA LA PRODUCCION DE HIERRO NODULAR.

El reacondicionamiento de los hierros base tiene una serie de objetivos que son: desoxidación, nucleación y desulfurización. Los procedimientos para lograr esto se describen a continuación:

Desoxidación y nucleación. Esto puede ser logrado con pequeñas adiciones de carburo de silicio o calcio silicio previo al tratamiento de magnesio. Estas adiciones son particularmente beneficiosas para hierros fundidos en hornos eléctricos, cuando el metal se ha mantenido a altas temperaturas por periodos largos de tiempo. Esta práctica introduce o restablece los núcleos que fueron destruidos por el sobrecalentamiento. También se ha establecido que la desoxidación es una parte necesaria de cualquier práctica de tratamiento por magnesio ya que éste se combina con el oxígeno para formar MgO , dando por resultado que un hierro base oxidado requiera una cantidad adicional de aleaciones de magnesio para su tratamiento. Los hierros bases que se funden en cubilotes ácidos con contenido de azufre en cantidad de 0.05 a 0.10%, generalmente requieren cantidades excesivas de aleación de magnesio en el tratamiento que produce Hierro Nodular. Esto trae como resultado la presencia de cantidades excesivas de óxido de magnesio y escoria de sulfuros en el metal tratado que no puede ser eliminada llevando a la obtención de inclusiones de escoria y pequeñas agrietaduras (crazing) en las piezas. Si el tratamiento de desulfurización no se lleva a cabo, los requerimientos del aleante serán mayores y para contrarrestar esto se puede realizar un pre-tratamiento del hierro base con cantidades pequeñas de tierras raras, o una aleación conteniendo de 9 a 11% de cerio. Los elementos de las tierras raras se combinan con el azufre del hierro para formar sulfuros estables, que no se combinan con el magnesio de la aleación utilizada para producir Hierro Nodular. La eficiencia de este tratamiento es de aproximadamente 90%.

Los cubilotes ácidos tienen velocidades de fusión relativamente altas en comparación con los cubilotes básicos y producen hierros base con niveles adecuados de carbono, silicio y manganeso. Sin embargo, los contenidos de azufre caen en el orden

de 0.08 a 0.12%, por lo que se hace necesaria la desulfurización para tener niveles adecuados en azufre que de otro modo nos ocasionaría cantidades excesivas de inclusiones de escoria (gross), y defectos en la superficie (crazing). Esto hace posible la adición de cantidades nominales de aleaciones de magnesio, para producir grafito nodular con un mínimo de sulfuro de magnesio, óxido y escorias de silicato.

Desulfurización. Uno de los métodos más conocidos para eliminar azufre en los hierros de cubilote es por medio de la introducción de carbonato de sodio en la canal del cubilote. Por este procedimiento el carbonato de sodio se mezcla con el hierro líquido en la canal y fluye hasta la cuchara en que se está recibiendo el metal. La desulfurización se realiza tanto en la canal como el recibirse en la cuchara. La canal debe ser revestida con refractario de carbono o bien con alumina al 90% para resistir las escorias del carbonato de sodio. Las cucharas deben tener un pico para eliminar el exceso de escoria y otro para el vaciado de metal. La capa de escoria en esta cuchara puede ser de 10 a 20 cms. El exceso de escoria debe ser removido a intervalos a medida que progresa el vaciado. Una adición de aproximadamente 1 Kg de grafito por tonelada a la escoria de carbonato de sodio en la cuchara ayuda a mejorar la efectividad del proceso. La Tabla N^o 31 es representativa de los resultados típicos.

TABLA N^o 31

DESULFURIZACION DE HIERRO BASE CON CARBONATO DE SODIO.

ADICION DE CARBONATO DE SODIO		CONTENIDO PROMEDIO DE AZUFRE	
%	Kgs/Ton	Antes del trat.	Despues del trat.
1.0	9	0.11	0.047
2.0	18	0.11	0.030
3.0	27	0.11	0.022
4.0	36	0.11	0.013

Esta desulfurización se acompaña por una pérdida de silicio de 0.06% y una pérdida de temperatura de -8 grados Centígrados a -7 grados Centígrados por cada 0.5% de adición de carbonato de sodio. La desulfurización por carbonato de sodio tiene sus problemas, ocasionalmente la escoria tiende a mezclarse con el hierro, particularmente cuando:

en la cuchara donde se recibe el metal es de poca profundidad. El desgaste del refractario es considerable aun bajo condiciones óptimas. Adicionalmente los humos que se desprenden de la escoria representan un peligro para la salud del personal atacando también al acero estructural del edificio y al equipo.

El método de tapon poroso para desulfurar hierro, se basa en la agitación del metal líquido mediante la inyección de nitrógeno a través de uno o varios tapones porosos de refractario que se localizan en el fondo de una cuchara o tina de tratamiento para recibir metal directamente del cubilete. Se añade carburo de calcio granular que actúa como un agente desulfurante del metal que se está tratando. Las burbujas de gas producen una acción mezclante en la superficie de contacto entre el metal y el carburo de calcio que acelera la acción desulfurante. Aproximadamente el 75% del azufre inicial de un hierro base puede ser eliminado con 2.0% de carburo de calcio. El procedimiento generalmente se usa como un paso directo en la producción de Hierro Nodular y será discutido más adelante.

La clave para la producción exitosa de Hierro Nodular es tratar un hierro base de bajo azufre, de 0.02% o menos, con la menor cantidad posible de aleación de magnesio, ya sea, por sí sola o en combinación con elementos de tierras raras. El nivel de magnesio que es necesario para producir un hierro con 90% o más de grafito esférico, es de (0.030% a 0.040%). Esto se determina en gran parte por el contenido de azufre y oxígeno en el hierro base.

A las temperaturas del hierro base las aleaciones de magnesio y materiales a base de magnesio reaccionan violentamente. Esto se debe a la baja temperatura de vaporización del magnesio que es de 1120 grados Centígrados.

Se han hecho grandes esfuerzos para controlar estas características pirotécnicas y volátiles del magnesio. Como resultado se han desarrollado muchas aleaciones de magnesio en forma metálica y briquetas. También se han desarrollado muchas técnicas para el empleo más efectivo de estos productos, mismas que se analizarán más adelante.

En la tabla No. 32 se muestran las principales aleaciones de magnesio utilizadas para la producción de Hierro Nodular.

Las primeras cuatro aleaciones indicadas son a base de níquel. Estas aleaciones tienen el grado más elevado de recuperación de magnesio de todos los materiales actualmente disponibles.

Tabla No. 32

COMPOSICION DE LAS PRINCIPALES ALEACIONES DE MAGNESIO UTILIZADAS PARA LA PRODUCCION DE HIERRO NODULAR

TIPO	ELEMENTOS - PORCIENTO							
	Mg	Ni	Si	Ca	Ce	Al	Fe	C
Incomag Alloy 1	13.0-16.0	Bal.						2.0
Incomag Alloy 2	13.0-16.0		26.0-33.0				5.0	
Incomag Alloy 3	4.2- 4.8	Bal.						1.4-2.0
Incomag Alloy 4	4.0- 4.5	Bal.					32.0-36.0	2.5-3.0
Noduloy 3	2.8- 3.3		44.0-48.0	0.8-1.3		1.20 Máx.	Bal.	
Noduloy 3-R	2.8 -3.3		44.0-48.0	0.8-1.3	0.35-0.50	1.20 Máx.	Bal.	
Remag	2.75-3.5		46.0-48.0	0.8-1.3	1.75-2.50	120. Máx.	Bal.	
Noduloy 5	5.0- 6.0		44.0-48.0	0.8-1.3				
Noduloy 5C	5.0- 6.0		44.0-48.0	0.8-1.3	0.50-0.75	1.20 Máx.	Bal.	
Noduloy 5-LC	5.0- 6.0		44.0-48.0	0.8-1.3	0.30-0.48	1.20 Máx.	Bal.	
Noduloy 5R-1	5.0- 6.0		44.0-48.0	0.8-1.3	0.30-0.45	1.20 Máx.	Bal.	
Noduloy 5R-2	5.0- 6.0		44.0-48.0	0.8-1.3	0.45-0.60	1.20 Máx.	Bal.	
Noduloy 5R-3	5.0- 6.0		44.0-48.0	0.8-1.3	0.85-1.00	1.20 Máx.	Bal.	
Noduloy 9	8.5-10.0		44.0-48.0	1.0-1.5		1.20 Máx.	Bal.	
Noduloy 9-LC	8.5-10.0		44.0-48.0	1.0-1.5	0.30-0.40	1.20 Máx.	Bal.	
Noduloy 9-C	8.5-10.0		44.0-48.0	1.0-1.5	0.50-0.75	1.20 Máx.	Bal.	
Noduloy 9-R	8.5-10.0		44.0-48.0	1.0-1.5	0.35-0.50	1.20 Máx.	Bal.	

Incomag No. 1. Esta aleación a base de níquel fue la primera para tratamiento de Hierro Nodular. La aleación no flota y puede ser usada efectivamente en Cuchara Abierta, procedimiento de Sandwich o Inmersión (Plunging), para la producción de Hierro Nodular. Las recuperaciones de magnesio por estos métodos, a 1500 grados Centígrados, son como sigue:

Metodo	Recuperación de Magnesio %
Cuchara abierta	40.0-50.0
Sandwich	50.0-60.0
Inmersión (Plunging)	60.0-70.0

Incomag No. 2. Es también a base de níquel y contiene ferrosilicio. La aleación cuesta menos que el Incomag No. 1. Debido a su baja densidad y tendencia a flotar, la recuperación de magnesio no es tan alta como la del Incomag No. 1 cuando se utiliza en el método de "vaciar encima" o sea Pour-Over. Sin embargo, se logran recuperaciones satisfactorias del orden de 40 a 50%, con el método de Sandwich las recuperaciones son similares. En Inmersión, las recuperaciones de magnesio son de 50 a 60%. El Incomag No. 2 se usa frecuentemente en combinación con una aleación de magnesio y ferrosilicio para aumentar el límite elástico del Hierro Nodular. Esta aleación puede ser usada para moderar el aumento de silicio cuando se usa el método de Sandwich con hierros base de alto azufre. La reactividad del Incomag No. 2 es similar a la del ferrosilicio magnesio al 5%. Sin embargo, 1 kg de Incomag No. 2 es equivalente a 3 kg de ferrosilicio magnesio al 5%.

Incomag No. 3. Este material a base de níquel que se sumerge, es una aleación de reciente desarrollo. Se han reportado recuperaciones del 90% cuando la aleación se usa con hierros base con azufre de menos de 0.02%. Lingotes de 1.5 a 7 kgs se dejan caer en la cuchara sumergiéndose entonces hasta el fondo sin una reacción violenta, notándose solamente algunas burbujas y un poco de humo. El hierro base usado con Incomag No. 3 requiere de un pretratamiento con una cantidad de cerio igual al contenido de azufre del hierro base. Se pueden usar siliciuros de tierras raras, CSF-10 o Mischmetal.

Incomag No. 4. Esta aleación contiene hierro magnesio, no flota en el hierro líquido. Las recuperaciones de magnesio llegan hasta un 50% con hierros base con azufre con un máximo de 0.02% y con el método de "vaciado encima" (Pour-Over). Los hierros más utilizados en esta aleación también requieren pretratamientos con una cantidad de cerio igual al contenido de azufre.

Nodulov 3, Nodulov 3-R v Remag. Estas aleaciones son del tipo ferrosilicio magnesio de baja emasividad, que se recomiendan para usarse con el método de Sandwich. Niveles de azufre máximos de 0.02% son requeridos con estas aleaciones. El Nodulov 3-R v Remag contienen elementos de tierras raras. Cuando se utiliza el Nodulov es necesaria una adición de cerio igual al contenido de azufre. Esta práctica minimiza la evaporización de magnesio y reduce la cantidad de magnesio requerida para el tratamiento.

Grupo de Nodulov 5-Ferrosilicio magnesio al 5%. El grupo de aleaciones Nodulov 5 es a base de ferrosilicio magnesio al 5%. Las letras que siguen a la designación Nodulov 5 indican la cantidad de cerio y elementos de tierras raras en el contenido. Este grupo de aleaciones fue desarrollada específicamente para ser utilizados con el método Sandwich para la producción de Hierro Nodular. Las recuperaciones de magnesio llegan hasta el 55% con estas aleaciones. El contenido de azufre recomendado en el hierro base para esta aleación no debe exceder de 0.03%.

Grupo Nodulov 9-Ferrosilicio magnesio al 9%. Este grupo contiene ferrosilicio magnesio al 9%. Como se indicó previamente las letras indican la cantidad de cerio y elementos de tierras raras en el contenido. Estas aleaciones se usan tanto en el procedimiento Sandwich como en el de Inmersión (Plunging). El contenido de azufre en el hierro base se puede tolerar hasta niveles del 0.05%. En la Tabla N^o 34 se indican las composiciones de las aleaciones anteriormente señaladas.

Aleaciones a base de tierras raras. La razón principal por la que se usan tierras raras en el Hierro Nodular es que los elementos de las tierras raras se combinan con elementos que promueven formación de laminillas tales como titanio, aluminio, plomo, antimonio, virilio, arsénico, formando compuestos estables que no toman parte en la formación de los nodulos de grafito. Las tierras raras también son utilizadas como pretratamiento para hierros base, ya que se combinan con azufre y gases tales como oxígeno, hidrógeno v nitrógeno. Esta reacción resulta en la formación de compuestos estables o inertes que no participan en la reacción de tratamiento. Las aleaciones de tierras raras disponibles para uso en la producción de Hierro Nodular son: Mischmetal y Siliciuros a base de tierras raras. La composición de estos materiales se dan en las Tablas N^o 33 y 34.

TABLA Nº 33

MISCHMETAL

Ce	40-50%
La	30-35%
Pr	5%
Nd	10%
Otras tierras raras	Saldo

TABLA Nº 34

SILICIUROS DE TIERRAS RARAS

CSF-10	Siliciuros de tierras raras	
tierras raras	12.0-15.0	30.0-35.0
Ce	9.0-11.0	15.0-20.0
Ca	1.0-1.25	1.0-1.25
Al	0.8-1.25	0.8-1.25
Fe	Saldo	Saldo

Cálculos para tratamiento de magnesio. Para la más alta eficiencia y economía, los hierros base usados para producir Hierro Nodular deberían tener niveles de azufre de 0.02% o menos. Sin embargo, se pueden tolerar niveles más elevados. Bajo estas condiciones el magnesio actúa como desulfurante a la vez que forma los esferoides de grafito. Teóricamente, 1.3 kgs. de magnesio se combina con 1.0 kg de azufre. Sin embargo, en la práctica para efectos de cálculo 1.0 kg de magnesio se combina con 1.0 kg de azufre. A continuación se describe un método que puede ser utilizado para determinar los requerimientos de magnesio para producir Hierro Nodular. Los factores de eficiencia a que se hace referencia en estos cálculos se han determinado por experiencia, y las fórmulas son como sigue:

$$\% \text{ de recuperación de magnesio} = \frac{\% \text{ de Mg en el Hierro Nod.} \times 100}{\% \text{ de Mg añadido} - \% \text{ de S en el H. base}}$$

$$\% \text{ de Mg añadido} = \frac{\% \text{ de Mg deseado}}{\% \text{ de Mg recuperado} \times 0.01} + \% \text{ de S en el hierro base}$$

Cuando se ha determinado el requerimiento de magnesio para una practica en particular la cantidad de alguna otra aleación de magnesio puede ser determinada como sigue:

$$\% \text{ Aleacion de Mg requerido} = \frac{\% \text{ Mg requerido en el Hierro Nod.}}{\% \text{ de Mg en la aleacion}} \times 0.01$$

Pérdida de magnesio del hierro líquido. Generalmente, el magnesio se pierde muy lentamente de una cuchara en donde se mantiene bajo condiciones normales, como particularmente cuando hay algo de escoria en la superficie y la temperatura desciende gradualmente. Las pérdidas de magnesio por oxidación no sólo se deben a la superficie expuesta del metal sino que también se incrementan por los refractarios silíceos de la cuchara o por contacto con óxido de hierro en cualquier parte de la cuchara. Un refractario neutro de alumina o bien básico reduce al mínimo las pérdidas por este concepto.

Bajo pruebas de laboratorio, usando un horno eléctrico para control de temperatura, se ha determinado que las pérdidas de magnesio a una temperatura de 1482 grados Centígrados son de aproximadamente 0.001 % por minuto. A temperaturas más bajas las pérdidas son menores.

C A P I T U L O 6

MÉTODOS UTILIZADOS EN LA PRODUCCION DEL HIERRO NODULAR.

Hay muchos métodos diferentes en el tratamiento del hierro para producir Hierro Nodular, todos estos métodos introducen el magnesio en alguna forma en el hierro base. La mayor parte del Hierro Nodular producido se trata con aleaciones de magnesio silicio y magnesio níquel. Sin embargo, magnesio metálico y rebaba de magnesio en briquetas con rebabas de Hierro Nodular, se usan bajo ciertas condiciones especiales.

Los métodos de fusión y el tipo de piezas producidas generalmente determinan el método de tratamiento que se debe utilizar. Por estas razones no hay un sólo tratamiento que sea satisfactorio para todas las fundiciones que producen Hierro Nodular. Hay sin embargo cuatro procedimientos utilizados por la mayoría de las fundiciones y que son:

- Vaciado Directo (Pour-Over)
- Sandwich
- Inmersión (Plunging)
- Tapon Poroso

6.1 Método de Vaciado Directo

El tratamiento de hierros base utilizando magnesio puro es teóricamente posible; sin embargo, debido a la violencia de la reacción entre hierro y magnesio puro, este método no es práctico para usarse en la producción de hierro nodular para fundiciones. Bajo condiciones prácticas de producción es necesario usar algún material o substancia que contenga magnesio y que modere la reacción reduciendo la velocidad de los vapores de magnesio que se generen dentro del hierro base.

El más sencillo procedimiento utilizado para producir Hierro Nodular, es el de vaciar hierro líquido sobre una aleación de níquel magnesio que tiene una gravedad específica mayor que la del hierro base. Este fue el primer método comercial práctico que se utilizó para producir Hierro Nodular empleándose una aleación de 85% de níquel y 15% de magnesio.

Cuando se usaba el método de Vaciado Directo, en combinación con una aleación de níquel magnesio como la anterior, las recuperaciones de magnesio llegaban al 60%.

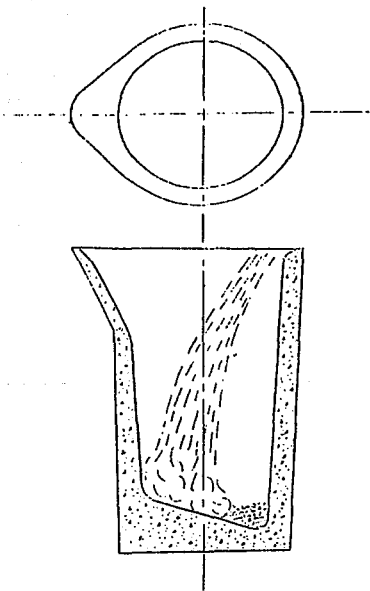
Recientemente una aleación conteniendo el 97% de níquel y el 3% de magnesio se ha utilizado según se informa, con recuperaciones del 90%. También se usan otras aleaciones con el método de Vaciado Directo sin embargo, las recuperaciones de magnesio son considerablemente más bajas que las mencionadas.

Las más altas recuperaciones de magnesio se obtienen con método de Vaciado Directo cuando la profundidad de la tina de tratamiento es aproximadamente 3 veces el diámetro de la misma. Sin embargo, debe ser mencionado que las tinas de tratamiento con diámetros menores a 500 mm se tienden a cerrar demasiado rápido con escoria. La Figura Nº 20 es un diagrama esquemático de una tina que se usa con este método, en el cual, para producir Hierro Nodular se pueden utilizar hierros base con relativamente altos contenidos de azufre (0.07-0.09%). sin embargo, la mayor eficiencia y la máxima recuperación de magnesio es posible solamente con los hierros base de bajo azufre.

El método de Vaciado Directo es como sigue:

- 1.- Coloque la cantidad requerida de aleación de magnesio en el fondo de una tina de tratamiento, limpia y precalentada en exceso de 1150 grados Centígrados según se indica en la Figura Nº 20.
- 2.- Vacíese una cantidad determinada de hierro base directamente encima de la aleación tan rápido como sea posible. Cuando la reacción se ha terminado, quítese la escoria tan pronto como sea posible.
- 3.- Inocúlese el hierro con un inoculante adecuado tal como el ferrosilicio 75% con calcio. El inoculante debe ser añadido en el chorro a medida que el hierro tratado se transfiere de la tina de tratamiento a la de vaciado. En algunos casos la inoculación con ferrosilicio se hace en la última tercera parte del hierro base a medida que se vacía a la tina de tratamiento.

Figura No. 20



Tina para metodo de vaciado directo (Pour Over)

6.2 Método Sandwich.

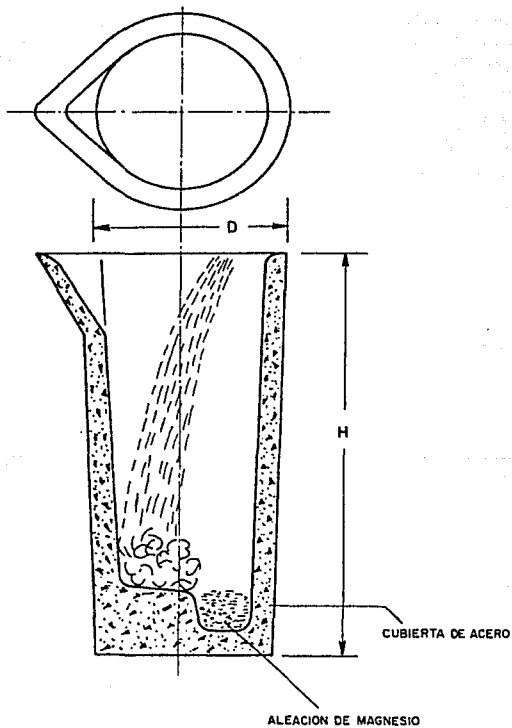
El método Sandwich es probablemente el más ampliamente utilizando para la producción de Hierro Nodular en grandes tonelajes, sobre todo para piezas automotrices. Esta técnica tiene un número de variaciones aun cuando sus principios básicos son los mismos. Consiste primeramente en colocar la aleación de magnesio en una depresión en el fondo de la tina de tratamiento, cubriéndola con pedacera pequeña de acero. En la Figura Nº 21 se muestra una sección de una tina de tratamiento con la aleación y cubierta de acero en su lugar. Las tinas usadas en el método Sandwich se recomienda ser recubiertas con refractario plástico de alta alumina al 80-90%. Esta práctica minimiza la erosión en la parte inferior de la tina de tratamiento. Para una recuperación óptima de magnesio la altura de la tina de tratamiento se recomienda ser por lo menos 2 veces su diámetro. La figura también muestra como el chorro de metal se dirige opuestamente a la localización de la aleación y cubierta de acero.

La experiencia con este método indica que da mejores recuperaciones de magnesio que el método de Vaciado Directo previamente discutido. La mayor parte de la reacción queda localizada en el fondo de la tina y se efectúa a una velocidad reducida, probablemente por que la temperatura del hierro base en esa área se reduce considerablemente por la cubierta de acero cuando ésta se funde. Esta temperatura más baja ayuda a mejorar las recuperaciones de magnesio en el tratamiento. En efecto, el hierro sobretreado en el fondo de la tina es subsecuentemente diluido con el hierro más caliente que está en las partes superiores de la tina. Esto resulta en un mejoramiento general de la recuperación de magnesio.

Además de lo anterior, ya que la reacción ocurre debajo de la superficie del hierro fundido, hay una menor oportunidad de pérdidas de magnesio por oxidación que con otros métodos. El resultado final es un hierro tratado con mayor contenido de magnesio por unidad de aleación utilizada, con pérdida de temperaturas no mayores que las que ocurren con otros métodos de adición.

Es importante que la pedacera de acero sea de 2 a 4 mm de espesor para que tenga poca tendencia a flotar, pero que de todas formas se funda rápidamente debido a su alta relación de superficie a volumen, creando el gradiente de temperatura requerido en el área de la reacción tan pronto como sea posible.

Figura No. 21



TINA PARA TRATAMIENTO POR METODO SANDWICH

La cantidad de pedacería de acero puede ser variada dependiendo de la pérdida de temperatura permisible o tolerable en el hierro. La cantidad normal utilizada, cuando las pérdidas de temperatura deben ser mínimas, es entre 1.5 y 2.0% del hierro que se va a tratar.

El tamaño o malla de la aleación es también muy importante en el método Sandwich. Un tamaño uniforme de 3 a 25 mm es ideal. Los tamaños mas grandes reaccionan demasiado lentamente y pueden causar turbulencia excesiva al final de la reacción, mientras que los más finos reaccionan demasiado rápidamente y se quemán antes de que se haya acumulado suficiente metal en la tina.

La aleación de ferrosilicio magnesio que da el más alto grado de recuperación de magnesio con el método Sandwich es el Noduloy 5C. Estas aleaciones cuando se usan regularmente en producción dan recuperaciones de magnesio del orden del 50% debido a su reacción relativamente lenta.

Temperaturas de metal base de 1480 grados Centígrados a 1540 grados Centígrados se pueden utilizar eficientemente. Las cantidades para tratamiento del orden de 2275 kgs, resultan con una pérdida mínima de temperatura. Las cantidades que están por debajo de 450 kgs no son generalmente prácticos para fundición de piezas porque las pérdidas de temperatura en el metal son excesivas.

Resumiendo todo lo anterior podríamos enumerar los pasos a seguir en este método:

- 1.- Colocar la aleación de magnesio en la depresión de la tina de tratamiento, limpia y no debajo de 1100 grados Centígrados.
- 2.- Colocar la cubierta de pedacería de acero encima de la aleación en la depresión.
- 3.- Llenar la tina tan rápidamente como sea posible sin interrupción.
- 4.- Eliminar la escoria de la superficie del metal después de que la reacción ha terminado.
- 5.- Inocular el metal tratado a medida que se transfiera a la tina de tratamiento.

Las tinajas que se usan tanto para el método de Vaciado Directo como el método Sandwich para producción de Hierro Nodular, deben estar cubiertos con un refractario de alta alumina. Este puede ser un refractario plástico o apisonable. El contenido de alumina debe ser cuando menos de 70%.

6.3 Método de Inmersión (Plunger).

Este método para la producción de Hierro Nodular fue el primer desarrollo importante en técnica de proceso después del desarrollo del método de Vaciado Directo. Este método de producción es versátil y puede ser usado en combinación con un número considerable de materiales de magnesio para tratamiento. Las recuperaciones de magnesio de una serie de aleaciones que se pueden usar con este método se indican en la Tabla N° 35.

Las temperaturas de tratamiento en esta tabla caen en el orden de 1480 grados Centígrados a 1540 grados Centígrados.

Todos los materiales de tratamiento indicados en la Tabla N° 35 se usan comercialmente en la producción de Hierro Nodular. Cada uno de estos materiales tiene su lugar directamente relacionado con los requerimientos de las fundiciones individuales. Ningun material en particular es adecuado bajo todas las condiciones. Los factores que determinan que tipo de aleación se debe utilizar en el procedimiento de Inmersión son como sigue:

- Contenido de azufre en el hierro base.
- Contenido de silicio en el hierro base.
- Eficiencia en la recuperación de magnesio.

En el proceso de Inmersión una lata de metal o un paquete de lamina de metal conteniendo material con magnesio se forza bajo la superficie del hierro base en una cuchara de tratamiento, dejándose en Inmersión hasta que todo el magnesio haya reaccionado con el hierro. El tiempo normal de reacción para un tratamiento de 1800 kgs es de 60-90 segundos.

TABLA N° 35

MATERIALES PARA TRATAMIENTO CON MAGNESIO UTILIZADOS CON EL METODO DE INMERSION EN LA PRODUCCION DE HIERRO NODULAR.

	Mg	Si	Ni	Ce	Fe	Saldo Mg.
Incomag No. 2	15	35	50	-	Saldo	45-55
Noduloy 9C	7/9	50	-	0.7	Saldo	45-55
Incomag No. 1	16	-	Saldo	-	-	60-70
Briquetas de Mg	15/20	-	-	-	Rebata	25-20

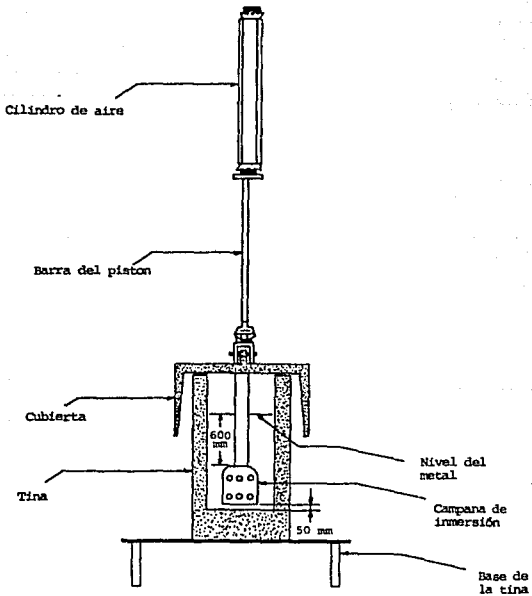
Todas las cantidades indicadas representan el porcentaje.

El método de Inmersión es del 30% al 50% más eficiente que el método de Vaciado Directo. Este aumento en eficiencia se debe primordialmente a que el vapor de magnesio fluye a una distancia mayor a través del metal líquido, logrando así un metal más limpio, con menos contenido de óxidos de magnesio. La reacción entre el hierro y el magnesio se da dentro del metal resultando menos humo, luz, metal derramado y peligro para el personal. Los costos de operación dependen primordialmente de la vida de la campana de Inmersión. El proceso de Inmersión es por mucho el más consistente de todos los procedimientos. Los resultados son fácilmente reproducibles y no dependen de la velocidad de vaciado que utilice cada operario. El método de Inmersión puede ser fácilmente adaptado para cualquier fundición de alta producción. Sin embargo, el proceso tiene algunos inconvenientes: las pérdidas de temperatura son más elevadas cuando se tratan cantidades reducidas. El proceso no es práctico, excepto cuando se trata de producción continua, cuando la campana y la tina de tratamiento no llegan a enfriarse.

En la Figura N° 22 se incluye un dibujo esquemático del equipo típico de inmersión.

Tina para Inmersión. La selección de un buen tamaño de tina de inmersión es muy importante para establecer una buena práctica. El tamaño de la tina depende principalmente de la velocidad de fusión, de la facilidad para manejar el metal y del peso de las piezas que se deben de vaciar. Un ante-crisol con calentamiento o un horno de inducción de canal son casi una necesidad si se requieren temperaturas de tratamiento consistentes.

Figura No. 22



Equipo de inmersión para la producción de Hierro Nodular

ESTA TESIS NO DEBE SALIR DE LA BIBLIOTECA

Es necesaria una tina alta y esbelta para Inmersión por dos razones. Primeramente, la altura es necesaria para permitir el alojamiento de la campana y la acción de hervor que toma lugar en la tina. Cuando está en operación la tina se llena de una a dos terceras partes. En segundo lugar, la recuperación de magnesio depende en alto grado de la distancia vertical a través de la cual tienen que pasar los vapores de magnesio en el metal líquido. Por lo tanto mientras mas grande es la distancia mas alta será la recuperación de magnesio. Una tina eficiente y práctica tiene una altura de dos veces el diámetro interior.

Refractario de la tina. Se sugiere un refractario neutro al 90% de alumina, apisonado, por dos razones: los revestimientos ácidos son atacados por las escorias básicas de óxido de magnesio, que se producen en la reacción de tratamiento. A medida que el revestimiento se erosiona, aumenta el diámetro interior de la tina de tratamiento y el nivel del metal baja. A medida que baja el nivel del metal también baja la recuperación de magnesio por las razones antes enumeradas. Además de esto, en la reacción entre el revestimiento ácido y la naturaleza básica del Hierro Nodular, seguido resulta en variaciones demasiado amplias en el grado de recuperación de magnesio, dificultando más el control del proceso.

Cubierta de la tina. La principal función de la cubierta es mantener firme el ensamble de Inmersión con campana y aleación de magnesio. No se pretende que sea un sello, de tal forma que la presión se eleve. En realidad el borde superior de la tina debería ser irregular para impedir que se eleve la presión.

Para asegurarse un buen funcionamiento, la cubierta de la tina deberá pesar de 1/3 a un 1/2 del peso del metal que se va a tratar. Si se van a utilizar pistones hidráulicos o neumáticos para bajar la campana y cubierta, estos pueden ser empleados para mantener la cubierta en su lugar.

La parte interior de la cubierta deberá estar recubierta con 50 mm de refractario. Este refractario permite que la cubierta se caliente uniformemente impidiendo torceduras y rajaduras. Esto es importante, ya que un cilindro de aire o un malacate deberán estar montados sobre la tapa.

Como medida de precaución un faldón revestido con refractario y hecho con placa de 5 a 10 mm y de 300 a 500 mm de profundidad se debe usar alrededor de la cubierta. El propósito de este faldón es controlar cualquier metal impulsado y que caiga sin peligro verticalmente a los lados de la tina.

Velocidad de Inmersión y mecanismo. Una velocidad de Inmersión de 300 a 380 mm por segundo se sugiere. Si la inmersión es muy lenta la reacción comienza antes de que la campana este totalmente sumergida y reducirá la recuperación de magnesio. Una velocidad demasiado elevada reduce la vida de la campana de Inmersión debido al impacto sobre la superficie del hierro.

La selección del mecanismo de Inmersión depende principalmente de las condiciones existentes en cada fundición. Si se usan cilindros de aire o hidráulicos para activar el mecanismo de Inmersión se cae en la generalidad de los casos. Adicionalmente se pueden utilizar malacates de aire o eléctricos para inmersiones en tratamiento de menos de 1000 kgs.

Campana de Inmersión. Las campanas de Inmersión están sujetas a condiciones de operación muy severas, choque térmico, impacto y erosión. La campana de Inmersión es una pieza de desgaste que debe ser reemplazada cuando falle. Su vida depende principalmente del cuidado con que se trate.

Existen campanas producidas comercialmente de varias fuentes. Las campanas se hacen de arcilla de alta alúmina y refractarios de grafito. La vida promedio de estas campanas es de 50 a 100 Inmersiones.

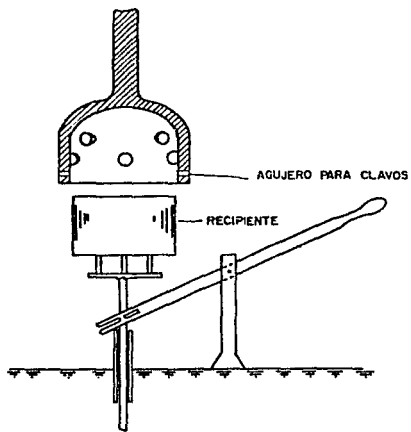
Las siguientes sugerencias se dan para ayudar en el mejoramiento de la vida de estas campanas reduciendo así el costo de los tratamientos.

- 1.- Precalentamiento de la campana hasta un rojo brillante antes de usarse reducirá el efecto del choque térmico e igualmente reducirá las pérdidas de temperatura en el hierro. Si se mantiene caliente la campana entre Inmersiones se duplicará su vida.
- 2.- Escoria y metal adheridos deberán ser quitados cuando la campana este caliente ya que los refractarios calientes soportan mucho mejor el impacto mecánico.
- 3.- Las campanas se deben enfriar lentamente para reducir esfuerzos internos que tienden a rajarlas.

Ajustes de profundidad en la campana. La parte inferior de la campana de inmersión o bien la lata conteniendo la aleación deberá quedar aproximadamente 50 mm arriba del fondo de la tina de tratamiento. Permitir el contacto con el fondo de la tina puede demorar el principio de la reacción y prolongar la reacción igualmente.

Figura No. 23

MECANISMO PARA COLOCAR MATERIALES DE TRATAMIENTO A BASE DE MAGNESIO EN LA CAMPAÑA DE INMERSION



Cuando se diseña equipo de inmersión se sugiere que se incorpore un resorte en la barra que detiene la camisa de la campana contra la cubierta. El propósito de este resorte es permitir ajustes en la profundidad de la campana y para la contracción y expansión en la barra, sin generar esfuerzos en la campana o la camisa refractaria que cubre la barra.

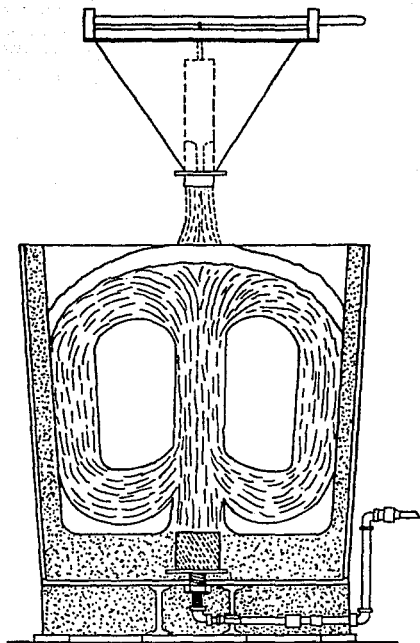
Latas con aleación. Se puede utilizar cualquier tipo de lata ligera, de metal, que no tenga soldadura para mantener los materiales de tratamiento a base de magnesio; en algunos casos esos materiales se envuelven en lámina muy delgada de acero. Este procedimiento, según se reporta, es menos costoso que las latas. En la figura Nº 23 se muestra el mecanismo utilizado por este método.

6.4 Método del Tapón Poroso.

Este método para producir Hierro Nodular se basa en la agitación del metal por la inyección de gas nitrógeno através de un tapón poroso refractario localizado en el fondo de la tina. Este procedimiento ha tenido buena aceptación y se ha generalizado. Se usa comunmente como un proceso de combinación, tanto como para desulfurar como para nodulizar, con metal proveniente de cubiletos ácidos. Pero debido a las considerables pérdidas de calor el método del Tapón Poroso no se considera satisfactorio para desulfurar y nodulizar combinadamente cuando se van a vaciar piezas de secciones ligeras. Sin embargo, tratándose de piezas de secciones gruesas que pesan 500 kgs. o más y temperaturas de vaciado de aproximadamente 1374 grados Centígrados, puede usarse pues ha demostrado ser satisfactorio.

Aún cuando hay otros diferentes métodos de mezclar y agitar el hierro líquido, casi todos requieren alguna forma de transferencia de tinas y por consiguiente hay una pérdida considerable de temperatura. La agitación con un gas tal como nitrógeno hace posible la desulfurización, el proceso de nodulización y la inoculación, todo en la misma tina, con un mínimo de pérdida en la temperatura. Se ha encontrado que inyectando este gas inerte a través de un Tapón Poroso, colocado en el fondo de la tina, el paso de estas pequeñas burbujas de gas adentro del líquido crea un movimiento general vertical con corrientes hacia arriba y hacia abajo, agitando el metal líquido en la tina como se indica en la Figura Nº 24.

Figura No. 24



INSTALACION DE UN TAPON POROSO EN UNA TINA CON EL FONDO REFORZADO

Al depositar en la superficie del metal, un agente desulfurante ligero tal como carburo de calcio, o bien un agente reductor más pesado tal como ferrosilicio de magnesio, parte de estos materiales serán arrastrados hacia abajo hasta el fondo de la tina mientras que nuevo metal líquido llega en contacto con los metales que flotan en la superficie.

Un efecto de agitación se puede producir con un flujo relativamente bajo de gas. Una tina grande de 40 tons. requiere aproximadamente 3 mts cúbicos por minuto de nitrógeno para una fuerte agitación. Una tina de 4 ton. requiere 0.25 mts. cúbicos por minuto de nitrógeno para lograr una agitación efectiva. La pérdida de temperatura debida a radiación es aproximadamente 50 grados Centígrados por minuto de tiempo de agitación.

Hay tapones disponibles en tamaños estandars de los proveedores. Se hacen a base de materiales de alumina pura con granulometrias muy bien controladas, se moldean a presión, se secan y se calcinan a una alta temperatura de 1815 grados Centígrados o más. Los materiales refractarios del Tapón Poroso, son suficientemente permeables a los gases pero no dejan pasar el metal líquido, aun cuando el gas no esté circulando. La Figura N° 25 es un ejemplo de un Tapón Poroso comercialmente disponible.

Dependiendo de la capacidad de la tina se usan uno o más tapones porosos en la parte inferior de la tina que ha sido reforzada.

Cualquier tipo de refractario puede ser usado en tinas para tapones porosos, sin embargo, un refractario de alta alumina durara mas tiempo que un refractario a base de silice.

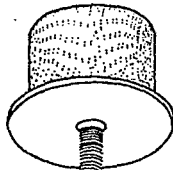
Un mismo tipo de tapón poroso puede proveer agitación suficiente en tinas desde 450 hasta 2700 kgs. Instalaciones de tapones múltiples se requieren para tinas más grandes. Deben instalarse suficientes tapones en las tinas para proveer una turbulencia notable en toda la superficie del metal líquido.

Para tinas más grandes se usan de dos a tres tapones porosos. Estos tapones deben ser instalados de tal forma que la totalidad de la tina sea efectivamente agitada y que el metal se mueva rápidamente desde el fondo de la tina hasta la superficie. Cada tapón debe tener un regulador separado y fuente de nitrógeno separado. Adicionalmente, los tapones deben estar sellados lateralmente con un cemento líquido de alta temperatura y secado en horno a 200 grados Centígrados antes de colocarse en el fondo de las tinas de tratamiento, que se revisten con ladrillo o

Figura No. 25

REFRACTARIO POROSO

METAL EXPANDIDO



TUBO ENTRA DE GAS
ROSCA 1"

PLACA SOPORTE

RONDANA

ANILLO ESPACIADOR

TUERCA 1"

TAPONES POROSOS

alumina al 90% apisonada. Esto es muy importante para poder prevenir los escapes de gas.

El gas Nitrógeno. El gas fluye desde la fuente de gas comprimido hasta un regulador de precisión, un regulador de flujo, un manómetro y una manguera flexible equipada con un cople rápido hasta el tubo que alimenta al Tapón Poroso. La tina para tratamiento con gas puede ser convenientemente localizada cerca del horno.

La secuencia que se sigue para producir Hierro Nodular es prácticamente la misma para cualquier tipo de horno, y todas las capacidades de tinas de tratamiento. Para Hierro Nodular, el metal generalmente se desulfuriza, noduliza y posiblemente se recarburiza y finalmente se inocula.

Desulfurización. La desulfurización antes del tratamiento es recomendable cuando el azufre excede de 0.035%. El material que se utiliza para desulfurar es generalmente el carburo de calcio llamado "de grado para desulfurar". La cantidad de carburo de calcio que debe introducirse depende del contenido de azufre y también de la capacidad de la tina debido al hecho de que la eficiencia de la operación es más grande en tinas grandes que en pequeñas. Generalmente se utiliza un 0.02% de carburo de calcio por cada 0.01% de azufre. El tiempo de agitación requerido es 2 a 5 minutos, dependiendo del tamaño de la tina. Una adición de 2.0% de carburo de calcio agitado por 3 minutos en una tina de 2 tns. producirá el azufre de 0.1 a 0.01%.

Nodulización. Después de quitar la escoria la inyección de gas se continúa y el agente nodulizante posiblemente mezclado con un agente inoculante se deja caer sobre la superficie del metal agitado por medio de un embudo especial o mejor todavía por un distribuidor a base de vibración.

La agitación que es más corta en este caso que para la desulfurización dura solamente 30 a 120 segundos, dependiendo del tamaño de la tina. Después de este tratamiento la manguera flexible se desconecta y la tina se vacía.

El agente nodulizante no debe contener ninguna pieza grande o fina. La granulometría debe ser de 0.03 a 2.4 mm.

Las aleaciones utilizadas son níquel magnesio o ferrosilicio magnesio, con o sin calcio o cerio.

El contenido de magnesio no es muy importante afectando

solamente el porcentaje de agente nodulizante que debe añadirse al hierro líquido.

Una agitación completa generalmente permite una reducción en la cantidad de aleación que se debe usar. Cuando se utiliza ferrosilicio magnésico al 9.0%, 2.0% de la aleación es suficiente, dependiendo de la capacidad de la tina. Aproximadamente 1 m. cúbico de nitrógeno por tonelada es lo que se requiere.

La recuperación de magnesio es de 30 a 60%, dependiendo del tipo de aleación y del peso del metal tratado. El objetivo es obtener el más bajo magnesio residual consistentemente con la nodularidad necesaria.

Inoculación. La inoculación puede ser hecha con una adición de 1.0% de ferrosilicio al 75%, tan pronto como se terminó la reacción del tratamiento anterior.

Recarburización. Los agentes de recarburización, por ejemplo grafito en polvo, pueden ser introducidos en el fondo de la tina antes del vaciado y el mezclado que ocurren durante la desulfuración.

Cuando la recarburización se hace separadamente, el agente recarburizante se distribuye sobre la superficie del baño que está en agitación. El mezclado durará 3 minutos aproximadamente el carbono retenido variará de 50 a 80%, dependiendo de la temperatura de tratamiento, del contenido inicial de carbón, la cantidad de agente recarburizante y la duración del tratamiento.

El método de Tapón Poroso ha sido probado como método eficiente para la producción de Hierro Nodular en tinas grandes a partir de cubilotes ácidos. En el caso de tinas pequeñas es necesario un calentamiento intermedio para lograr temperaturas satisfactorias de tratamiento y de vaciado.

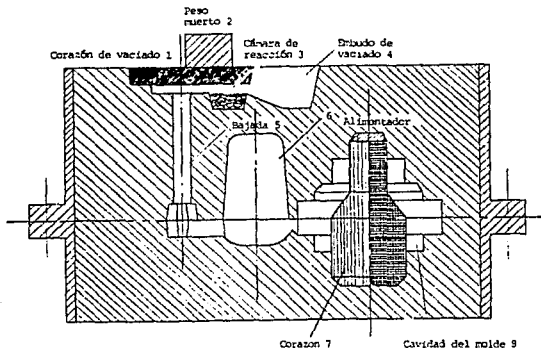
Otra aplicación de la desulfuración a través de Tapón Poroso con carburo de calcio es directamente a la salida de cubilotes con depósitos integrales para tratamiento.

Tratamiento "en el molde". Un nuevo desarrollo consiste en esferoidizar el metal líquido dentro del molde, mismo que se logra incorporando una cámara de reacción dentro del sistema de colada del molde. Ver Figura Nº 26. En esta cámara se colocan las aleaciones nodulizantes y la reacción ocurre durante el vaciado del molde.

Como es de esperarse el proceso requiere de controles precisos para producir optima nodulizacion y buenas piezas. Una reaccion controlada entre la aleacion y el hierro liquido depende, entre otras condiciones, de: temperatura del metal, velocidad de flujo, granulometria de la aleacion, tamaño de la pieza y geometria. Sin embargo, estos aspectos son generalmente constantes requiriendo experiencia y conocimientos para ser manipulados efectivamente. Se han reportado recuperaciones tan altas como el mismo 100%. Un requerimiento es que el azufre esté debajo de 0.010% antes del tratamiento. Una variación de este proceso es tratar incompletamente al metal con los procedimientos antes descritos y tener que añadir la cantidad faltante de magnesio directamente por aleacion en el molde. Este proceso es relativamente nuevo y no hay informacion en relacion con su efectividad. Las dos principales ventajas son la simplificacion del manejo del hierro liquido y la ausencia casi total de óxido de magnesio en el molde.

Las desventajas de un menor rendimiento son aparentes porque se diseña una camara de reaccion individualmente para cada molde. Se cree que hay tamaños prácticos de piezas y geometria de las mismas que restringen la aplicacion de este procedimiento. Es una desventaja la mayor posibilidad de que entren a la pieza escoria y otros productos de la reaccion, siendo probable una mayor necesidad de pruebas de nodularidad para cada pieza producida debido al mayor peligro de errores en el tratamiento.

FIGURA Nº 26



C A P I T U L O 7

INOCULACION EN LA PRODUCCION DE HIERRO NODULAR.

La inoculación es un paso necesario en la producción de Hierro Nodular. Los hierros tratados a base de magnesio sin inoculación tienen un alto contenido de carburos (blancos), y el grafito que posiblemente se haya formado de nucleación residual se encuentra en forma compactada pero no necesariamente en forma esferoidal. El paso de inoculación por consiguiente, es muy importante en la producción de grafito esferoidal y debe ser efectuado con el mismo cuidado y precisión que el tratamiento de magnesio.

En el caso de Hierro Nodular, la inoculación es un medio de promover la cristalización o la formación de esferoides de grafito, así como impedir la formación de grafito vermicular y para fomentar el número de celdas eutécticas.

Una teoría del mecanismo de inoculación es que se precipitan pequeñas partículas de grafito en el metal por la adición de un fuerte grafitizante como el ferrosilicio. Esta teoría mantiene que el trozo de ferrosilicio que se está disolviendo, momentáneamente aumenta el contenido de silicio en el metal en contacto, a un nivel tan alto que esta zona se encuentra super saturada con respecto al carbono y entonces las partículas de grafito que forman los núcleos se precipitan. En base a esta teoría se puede entender que una muy pequeña partícula de silicio no logrará producir suficiente concentración local de silicio antes de que sea disipada. En otras palabras hay un tamaño crítico del ferrosilicio o inoculante que producirá una efectividad óptima. Es también lógico suponer entonces que la temperatura del ferrosilicio, en el momento de su adición al hierro líquido, tiene un efecto importante en su habilidad para proveer una concentración elevada de silicio. La temperatura mínima para una máxima eficiencia de inoculación es de 1425 grados Centígrados.

El inoculante grafitizante, más ampliamente utilizado es ferrosilicio al 75% con calcio. El grado que contiene calcio se prefiere por su mayor capacidad de reducir enfriamiento. Un tamaño de aleación de 2 x 10 mm es más efectiva para inoculación en tinas.

Los inoculantes conteniendo tanto aluminio como calcio son más efectivos que los que contienen solamente un elemento. Sin embargo, el aluminio aumenta la tendencia del hierro a absorber hidrógeno y por lo tanto causa microporosidad (pinóles). Por lo tanto, el contenido de aluminio en el ferrosilicio 75%, deberá ser entre 0.80 y 1.02 % y los niveles de calcio deberán ser de aproximadamente 1.5%.

Método preferible y cantidad. El mejor método de inoculación de hierro conteniendo magnesio, consiste en añadir el inoculante uniformemente al chorro durante la transferencia de tina de tal forma que mientras sea posible cada partícula del inoculante caiga en contacto con el nuevo metal líquido. Un método menos deseable consiste en localizar el inoculante en el fondo de la tina el cual se transferirá al hierro conteniendo magnesio. En este caso la temperatura del ferrosilicio puede ser elevada hasta el punto que pierda una parte considerable de su habilidad para inocular.

Esto ha sido claramente demostrado por el hecho de que el ferrosilicio fundido no tiene efectos inoculantes. Otros métodos indeseables de inocular son los siguientes:

- 1.- Añadir inoculantes con el material de tratamiento.
- 2.- Añadir inoculante en la superficie de la tina y pretender agitarlas dentro del metal. Esto puede resultar en la inoculación de la parte superior de la tina.

Se da considerable atención a la mecánica del procedimiento de inoculación y hay muchos ejemplos para indicar su importancia. En un caso una fundición de secciones ligeras vaciada en arena verde, resultaba altamente carburizada en donde el inoculante se añadía al fondo de la tina de transferencia. Sin embargo, añadiendo el inoculante en el chorro durante la transferencia, sin cambio en el tamaño de la edición, se lograban fundiciones libres de carburo.

La cantidad de inoculación requerida depende de la composición del hierro, del espesor de las piezas y velocidades de solidificación de las piezas, el tipo de horno de fusión y composición del inoculante utilizado. Generalmente se usa 0.5% de silicio como ferrosilicio, o 7.5 kgs de ferrosilicio al 75% por tonelada métrica para piezas con secciones entre 15 y 50 mm. En piezas con secciones más ligeras se usan adiciones de ferrosilicio hasta de 1% para minimizar la formación de carburos.

Inoculantes comerciales. Aparte del ferrosilicio hay otros elementos inoculantes, comerciales disponibles: uno de estos es el Inoculoy 63. La composición típica de este material es la que se indica en la tabla No. 36.

TABLA Nº 36

Elementos	Porcentaje
Silicio	60-65
Calcio	1.50-3.00
Aluminio	1.00-1.50
Bario	4-6
Manganeso	9-12
Hierro	Saldo

Muchos productores de Hierro Nodular usando fusión por cubillote ácido tienen hierros base de alto azufre. Ellos tienen problemas para usar todos los retornos de fundición y mantener el contenido de silicio debajo de los máximos especificados. Entonces deben reducir la cantidad de inoculante utilizado y esto provoca una calidad inferior en el Hierro Nodular, con cantidades excesivas de carburos en las secciones delgadas que después deben ser tratadas térmicamente.

Su problema puede ser resuelto en gran parte con el uso de Inoculoy 63. Por ejemplo, una inoculación efectiva puede ser obtenida con un carbono equivalente de 4.63% por una adición de 2 a 3 kgs por tonelada o aproximadamente del 0.15 a 0.20% de silicio en forma de Inoculoy 63. Para resultados similares usando ferrosilicio de 75%, se necesitaría una adición de 8 kgs por tonelada o 0.55% de silicio.

Inoculación en el molde. La inoculación en el molde se desarrolló originalmente como un medio para eliminar carburos centrales y la formación de carburos en secciones menores a 10 mm.

Es un procedimiento relativamente simple. Un gramo de ferrosilicio al 75%, conteniendo 1.25% de aluminio y 1.0% de calcio se coloca en el molde en la base de la bajada y el molde se vacía en la forma acostumbrada. El ferrosilicio debe tamizarse através de una malla No. 30, (o sea con aberturas de 0.0232"). El material mas grueso no se disuelve completamente y el mas fino se oxida en contacto con el hierro, resultando una grafitización mediocre. El ferrosilicio debe añadirse a cada molde al cerrarlo,

por medio de una cuchara controlada en tamaño para un gramo. Adiciones de un gramo trabajan bien en piezas que pesan hasta 50 kgs.

Además de contrarrestar la tendencia del efecto de inoculante, a reducirse, esta adición extremadamente pequeña aparentemente provoca nucleación formando más y más pequeños nódulos y más ferrita. Este tratamiento elimina el costoso y tardado tratamiento térmico para grafitizar los pequeños carburos del centro (centerline).

La inoculación en molde tiene una deficiencia seria. El vaciado de baja temperatura tiende a hacer flotar a las partículas no disueltas de este inoculante hasta la superficie. Se ha sabido en algunos casos que estas partículas no disueltas, en las superficies de las fundiciones, han llegado hasta a romper herramientas de maquinado.

CAPITULO 8

PRACTICAS DE LA FUNDICION.

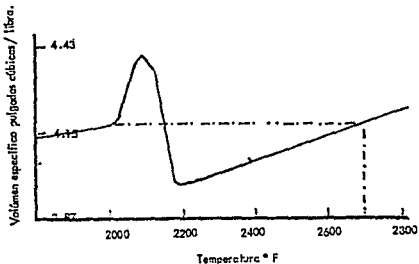
Cuando se produce hierro tratado con magnesio de calidad aceptable y temperatura de vaciado adecuada, la clase de equipo de que se dispone y la supervisión en el piso de moldeo, en gran parte determinan el costo de las piezas de Hierro Nodular. Por esta razón las características del Hierro Nodular, según se relacionan con las prácticas de fundición, son muy importantes.

Para obtener niveles bajos de rechazo y altos índices de rendimiento, habrá de aprovecharse de todos los conocimientos disponibles aplicándolos debidamente. En este capítulo se hará el intento de presentar información en las áreas de práctica de fundición que específicamente se relacionan con la producción de piezas de Hierro Nodular.

8.1 Características de contracción en el Hierro Nodular.

Durante su enfriamiento y solidificación el Hierro Nodular experimenta primeramente una reducción en volumen, después una expansión cuando se forma el grafito, y después nuevamente otra contracción. En la Figura Nº 27 se hace una descripción gráfica de lo anterior.

FIGURA Nº 27



Los cambios en el volumen específico pueden causar cambios en el volumen de las piezas debido a expansión, encogimiento superficial, rechupes internos debidos a contracción. Estos cambios en el volumen pueden causar variaciones erráticas en las dimensiones de piezas de Hierro Nodular. Sin embargo, esto puede ser minimizado, hasta cierto punto mediante el uso de moldes densos y bien apisonados con durezas considerables en el área de contacto. Este factor contribuye al relativamente alto grado de expansión que ocurre en el Hierro Nodular con la formación del grafito.

Las contracciones en Hierro Nodular dependen de las siguientes consideraciones:

- Consistencia en los procedimientos de tratamiento e inoculación.
- Composición del metal.
- Tamaño del nódulo.
- Estructura de la matriz.
- Consistencia de la arena de moldeo y sus propiedades.
- Dureza del molde.
- Temperatura de vaciado.

Sin embargo, es necesario controlar estos factores para mantener la contracción a niveles constantes. Los siguientes párrafos están relacionados con la contracción en el Hierro Nodular:

Perlítico "de molde". Si el Hierro Nodular tiene una matriz perlítica "de molde" entonces se contrae igual que el hierro gris. La contracción es de 0.15 pulgadas/pie. Cuando la pieza se ferritiza entonces crece aproximadamente 0.05 pulgadas/pie. Por lo tanto, la contracción es similar a la del hierro gris en el rango de 0.15 a 0.10 pulgadas/pie.

Ferrítico "de molde". Una pieza totalmente ferrítica "de molde" será del mismo tamaño que se modeló. Su contracción es cero y como resultado para construir los modelos correspondientes no se hace corrección por contracción. Un pequeño porcentaje de perlita no afectará la dimensión "de molde" pero sí producirá un pequeño crecimiento en dimensión si la pieza se ferritiza.

Piezas con Carburos parciales y Recocidas. Una pieza de sección ligera que se produce de molde con alto contenido de carburos se contrae al enfriarse 0.20 pulg./pie. Al ser recocida totalmente la pieza crecerá 0.30 pulg./pie de tal forma, las piezas que se produzcan en esta forma serán 0.10 pulg./pie más grandes que el modelo utilizado para producirlas. Los componentes con secciones muy ligeras con alto contenido de carburos y secciones pesadas que pueden ser perliticas "de molde", generalmente se tuercen en el recocido. Las secciones ligeras crecerán 0.30 pulgadas/pie y las secciones gruesas crecerán solamente 0.05 pulg./pie resultando en distorsiones considerables. Debe utilizarse la composición química adecuada y un buen procedimiento de inoculación para asegurarse una matriz constante tanto en las secciones ligeras como pesadas de la pieza. Es posible construir el modelo usando 2 grados diferentes de contracción para las partes ligeras y las pesadas de tal forma que se logre una pieza dimensionalmente satisfactoria después del recocido.

Resistencia del molde o de los corazones contra la contracción. Un componente de diseño complicado puede ser que no se contraiga totalmente debido a que el corazón o el molde no se desintegra totalmente o a tiempo. Sin embargo, no habrá ningún impedimento durante el recocido y las piezas se expandirán de acuerdo a la estructura de su matriz. De tal forma una sección ligera después de ser recocida puede tener dimensiones considerablemente más grandes de las deseadas según se indica en la Tabla N° 37.

TABLA N° 37

Condición	Modelo Pulgadas	Blanco "de molde" Pulgadas	Recocido Pulgadas
Sin resistencia en el molde	12.00	11.80	12.10
Algo de resistencia	12.00	11.90	12.20
Mucha resistencia	12.00	12.90	12.30

8.2 Manejo del metal.

Uno de los más importantes factores que debe ser considerado en la producción de Hierro Nodular es el método de vaciar metal líquido en los moldes. Con el cambio del grafito a

forma esferoidal un nuevo metal ferroso surge con su propia personalidad y temperamento. No es como hierro gris ni como hierro maleable o acero, aun cuando tiene muchas similitudes con ellos.

Aun cuando el principal objetivo de este capítulo es la producción de piezas de calidad desde el punto de vista de diseño de coladas, es necesario conocer las siguientes características básicas.

Amplias variaciones en la composición del metal, procesamiento y temperatura de vaciado, resultan en variaciones en dimensiones físicas y de calidad de los componentes producidos. El control sobre el refinamiento del metal durante la fusión a la temperatura del metal, el peso del metal tratado y la cantidad de aleación de magnesio que se usa, efectivamente de altos rendimientos en el resultado final.

Limpieza del metal. La cantidad de magnesio necesaria para producir grafito esferoidal en el hierro, resulta en una formación continua de óxido en forma de escoria (dross) en la superficie del metal fundido en las tinas de vaciado similarmente al que se forma en el manganeso o bronce con aluminio. Cantidades excesivas de magnesio utilizadas en el tratamiento de hierros base con alto contenido de azufre aumentan considerablemente la cantidad de óxido en forma de escoria y sulfuro de magnesio presentes en el hierro. Esto debe ser eliminado al escoriar la tina antes de la inoculación, ya que de otra forma sería la escoria mezclada nuevamente con el metal, pudiendo acarrear hasta las piezas.

Tinas. Tinas con sifón (teapot) o similares, son esenciales para asegurarse que solo metal limpio entra al molde. Si se usan tinas con vaciado por el borde, aunque no se recomiendan, es mas necesario todavía que la escoria se elimine con todo esmero. La adición de un coagulante de escoria en la superficie del hierro ayudará a coagular la escoria remanente, sirviendo también como aislante en la superficie del metal mientras se vacía. Cuando cantidades elevadas de metal se tratan en tinas de gran tamaño, el metal debe ser mantenido por un corto tiempo, 3 a 4 minutos, de tal forma que la escoria pueda elevarse hasta la superficie y de ahí ser eliminada. Es preferible utilizar en las tinas un refractario neutral de alta alumina o básico. Barros a base de sílice o refractarios ácidos reaccionan con el óxido de magnesio y sulfuro de magnesio ocasionando una rápida reversión a estructura vermicular o de laminilla en el hierro tratado.

Temperaturas de tratamiento y de vaciado. La temperatura de vaciado del Hierro Nodular es muy importante porque es un metal oxidante. Cuando la temperatura baja por debajo de 1370 grados Centígrados el producto de oxidación se aumenta, temperaturas de 1426 grados Centígrados o más altas se prefieren porque los óxidos están todavía líquidos y no presentan tanta dificultad como en el estado sólido. Debido a las características de solidificación del Hierro Nodular, que serán tratadas en la sección de alimentadores, la fluidez es muy buena. Esto a veces funciona en contra de la producción de piezas limpias y sin rechupes ya que los fundidores tienden a desmoldear mientras el metal fluye.

Ya que el Hierro Nodular se produce por una serie de adiciones frías, se requiere una temperatura de vaciado de 1426 grados Centígrados, es claro que el hierro base antes del tratamiento deberá de estar a una temperatura considerablemente más elevada. Por lo tanto el hierro base deberá estar a una temperatura en un rango de 1510 grados Centígrados a 1565 grados Centígrados para óptimos resultados.

Para poder tratar metal a esta temperatura y todavía estar en condiciones de vaciar moldes a una temperatura de 1426 grados Centígrados, es esencial que todas las cucharas se mantengan bien calientes. Adicionalmente el metal deberá ser manejado rápida y convenientemente. Esto es particularmente importante cuando se tratan cantidades pequeñas de metal.

Fundentes y coagulantes de escoria. Los coagulantes de escoria generalmente se usan para cobinar con escorias líquidas y polvosas que estén presentes en las tinas de tratamiento y de vaciado inmediatamente después de la inoculación. Estos materiales se añaden en la superficie del metal en las tinas, en cantidades suficientes para combinarse con la escoria que después puede ser eliminada fácilmente.

La adición de un fundente consistente de 50% de creolita y 50% de fluoruro de sodio al metal durante la inoculación y transferencia, ayuda a limpiar el metal de escorias existentes e impide la oxidación adicional del metal. Adiciones pequeñas de este fundente preparado, son suficientes. Dependiendo de la cantidad de metal tratado la adición puede ser de 0.02 a 0.10 % para cantidades mayores de metal, o cuando se vacían moldes grandes, la adición del fundente en el embudo de vaciado es lo más efectivo.

8.3 Moldeo.

Para producir piezas de Hierro Nodular de alta calidad se deben utilizar piezas de moldeo óptimas. El tipo de arena usada, el grado de apisonado, el tipo y condición del equipo de cajas y el cuidado en su uso, juegan un papel importante en lograr piezas satisfactorias de fundición.

Moldeo en Verde. La importancia en la preparación de moldes con arena en verde puede ser apreciada al recordar que el Hierro Nodular forma una película resistente en la superficie y que el hierro líquido se encuentra presente a través de toda la pieza durante la solidificación. Esta condición permite que la pieza se deforme o que siga el movimiento de las paredes del molde. Una dureza de molde arriba de 90 se prefiere para soportar adecuadamente el metal. Esto puede requerir de un tamaño de grano de la arena para mantener permeabilidad adecuada. Puede ser necesario aumentar la resistencia en caliente de la arena para resistir la prolongada condición líquida del metal, preferiblemente arriba de 50 lbs/pulg² y de 538 grados Centígrados a 816 grados Centígrados. La deformación en húmedo y en seco deberá ser controlada debajo de 0.02 pulg/pulg. El molde deberá ser soportado por buenas cajas y pesas adecuadas para reducir el movimiento de la arena durante la solidificación. Al seguir estas sugerencias se notará un considerable mejoramiento en el rendimiento de los moldes.

El hecho de que el Hierro Nodular es un metal eutéctico inoculado, que desarrolla el doble de presión que los hierros grises no puede ser minimizado. Por lo tanto requieren moldes con dureza de 90 y arenas fuertes para la producción de moldes para Hierro Nodular.

Las variaciones en el contenido de humedad en los moldes de arena en verde contribuyen a la presencia de efectos de "dross". La presencia de humedad no es tan importante como el porcentaje de humedad arriba del temple de la arena. Humedad excesiva producirá "dross" y microporos.

Se ha determinado que el porcentaje de materiales carbonosos en la arena afecta la cantidad de inclusiones por "dross", del 6 al 8% de contenido de materiales carbonosos es ideal y los defectos aumentan cuando el porcentaje se reduce considerablemente. La bentonita sintética elimina muchas de las variables que se encuentran en arenas con aglutinación natural produciendo piezas con menos defectos superficiales.

Moldes con arena seca. Con moldes de arena seca se logra un mínimo de microporosidad (pinhole), y otros efectos o reacciones de la superficie del molde.

La deformación de la calidad del molde es un factor muy importante en el grado de rechupe. En moldes secos o cocidos esta variable se elimina. La erosión de molde, defectos por humedad y otros defectos de arena (buckles, scabs, fallouts), se minimizan si es que no se eliminan, mediante la práctica de arena seca. Las mejores superficies se logran con pinturas refractarias a base de carbono. No se deben usar pinturas refractarias a base de óxido de hierro porque esto produce microporosidad.

Shell Molding. Una cantidad considerable de Hierro Nodular se produce en moldes de Shell con mucho éxito, lográndose detalles y buen control dimensional. Los moldes deben ser bien respaldados debido a las características de solidificación del Hierro Nodular. Los productores indican que algunas de las resinas usadas como aglutinante tienden a plastificarse cuando entra el metal en el molde, reduciendo así la permeabilidad de la arena hasta el grado que a veces se provocan llenadas incompletas o porosidades por gas en las piezas.

Moldes a base de cerámica "investment". Debido a la baja permeabilidad de estos moldes en la actualidad es imposible eliminar los vapores de magnesio debidamente, lo que resulta en piezas con superficies ásperas.

8.4 Prácticas de coladas.

El diseño de coladas es una de las partes más importantes en el moldeo y requiere atención especial para producir piezas limpias y sin porosidad. Se debe determinar la dirección básica que debe seguir el metal en el molde, para diseñar el sistema de coladas individualmente a cada modelo. Las funciones del sistema de coladas son las siguientes:

- Impedir que entre a la cavidad escoria y arena.
- Introducir metal a la cavidad con un mínimo absoluto de turbulencia.
- Permitir que entre el metal a la cavidad a una velocidad predeterminada.
- Establecer un gradiente termal que promueva la solidificación progresiva mediante la localización adecuada de las entradas.

Las diferencias principales entre sistemas de coladas para hierro gris y nodular se deben a la tendencia de este último a oxidarse y formar escoria de óxidos "dross". Esto se debe a la presencia del magnesio y al relativamente alto contenido de silicio. Por esta razón es necesario bajar al mínimo la turbulencia en los sistemas de coladas utilizados para la producción de piezas de Hierro Nodular a un grado que no es necesario en el hierro gris. El resultado es un sistema de coladas mas voluminoso con la consecuente reducción en el rendimiento.

A continuación se presenta información que puede ser utilizada en el diseño de un sistema de colada para piezas de Hierro Nodular paso a paso. El peso de las piezas y su relación con la velocidad de vaciado es la primera consideración en el diseño de un sistema de coladas.

8.5 Velocidades de vaciado para piezas de Hierro Nodular.

En el caso del Hierro Nodular es necesario usar sistemas de colada relativamente grandes, para minimizar la turbulencia que causa la formación del "dross", de tal forma que entonces las velocidades de entrada del metal son relativamente bajas. Las formulas publicadas para velocidades de vaciado son empiricas. Se basan en la maxima velocidad de hierro liquido y volúmenes que no erosionan las arenas de moldeo, con resistencias y contenidos de arcillas normales para un rango de temperaturas dado. La fórmula empirica original fué una ecuación establecida por H. W. Dietert en 1926 y se basa en arenas con aglutinamiento natural. Evaluaciones recientes de arenas sintéticas indican solamente una pequeña reducción en los grados de erosión. La siguiente es una fórmula reciente desarrollada para velocidades de vaciado que en base a la experiencia minimiza la erosión en arenas sintéticas, aglutinadas con una combinación de bentonitas tipo "Western y Southern".

$$PT = (0.83 + 1.025 T) CW$$

PT = Tiempo de Vaciado en segundos

T = Pared mínima de pieza en pulgadas

CW = Peso de la pieza en libras

En la Tabla N^o 38 se dan valores para velocidad de vaciado para piezas hasta de 1000 lbs. de peso con secciones minimas desde 1/8 hasta 1 1/2 pulgada. La fórmula está basada en temperaturas de vaciado en el rango de 1371 grados Centigrados a 1454 grados Centigrados.

B.6 Altura efectiva de bajada.

Esta expresion se usa para representar la altura ferroestática promedio durante el vaciado, porque en la mayor parte de los casos esta altura cambia a medida que se llena el molde. Esto es cierto siempre que la configuración de las coladas sea tal que el metal que entra en la cavidad del molde quede debajo de la altura máxima de la cavidad de la pieza, ver figura N^o 28. El primer caso de la figura N^o 28, es un molde con entradas en la parte superior de la cavidad ilustrando el único caso cuando la altura ferroestática es constante.

La fórmula básica utilizada para determinar la altura efectiva de bajada, necesaria para llenar una cavidad es como sigue:

$$ESH = H - \frac{P_2}{2C}$$

- ESH = Altura efectiva de bajada
- H = Distancia de la restricción hasta el embudo de vaciado.
- P = Altura de la pieza arriba de la restricción
- C = Altura de la pieza en el molde

En el segundo caso de la figura N^o 28 se ilustra la forma de calcular la altura efectiva de bajada.

La Tabla N^o 39 da el valor de la cantidad $P_2/2C$ que ha sido designada como Z, y se subtrae de la dimensión H para obtener la altura efectiva de la bajada para la configuración de la pieza mostrada en el segundo caso de la Figura N^o 28.

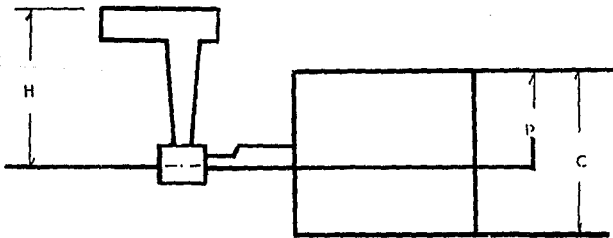
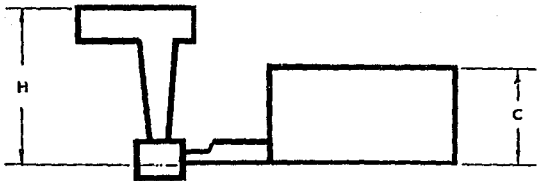
Tabla No. 38

TIEMPO DE VACIADO PARA HIERRO NODULAR EN SEGUNDOS

TEMPERATURA DE VACIADO 2550 - 2550°F

Peso de la Pieza Lbs.	ESPESOR DE PARED - MIN. EN PULGADAS										
	1/8	1/4	3/8	1/2	5/8	3/4	7/8	1	1-1/4	1-1/2	
10	3	3.5	4	4.5	4.7	5	5.5	6	7	7.5	
20	4.5	5	5.5	6	6.5	7	7.7	8.4	9.5	10.6	
30	5.3	6	6.7	7.4	8	8.7	9.5	10.2	11.6	13	
40	6.1	7	7.7	8.5	9.3	10	11	11.8	13.2	15	
50	6.8	7.7	8.6	9.6	10.3	11.3	12.2	13.2	15	17	
60	7.5	8.5	9.4	10.5	11.3	12.3	13.3	14.4	16.3	18.2	
70	8.1	9.2	10.1	11.3	12.3	13.3	14.5	15.6	17.8	20	
80	8.6	9.7	10.8	12.1	13.1	14.2	15.3	16.6	17	21	
100	9.6	11.0	12.2	13.5	14.8	15.0	17.2	18.6	21.2	24	
120	10.6	12.0	13.2	14.0	16.0	17.5	18.0	20.2	23.2	26	
140	11.4	12.0	14	15.9	16.4	18.8	20.3	22	25	28	
160	12.2	13.0	15.3	17.0	18.4	20.1	21.8	25.3	26.8	30	
180	12.8	14.0	16.2	18.0	19.8	21.3	23.1	25	28.5	32	
200	13.5	15.3	17.1	19.0	20.8	22.5	24.5	26.2	30	33.5	
250	15.8	17.2	19	21.2	23.2	25.2	27	29.3	33.5	37.5	
300	16.5	18.0	20.8	23.3	25.4	27.8	30	32.2	37	42	
350	17.8	20.3	22.6	25.3	27.5	30	32.5	35	40	45	
400	19.2	21.8	24.2	27	29.5	32	34.6	37.2	43	47.5	
450	20.3	23.2	25.8	28.8	31.5	34	37	39.6	46	51	
500	21.3	24.5	27	30.2	32.8	35.8	38.5	42	48	53	
600	24.0	26.8	29.8	33.2	36.2	39	43	47	53	58	
700	25.3	29	32	35.6	39	42	46	49	57	63	
800	27.2	31	34.5	38.5	42	46	49	53	60	68	
900	28.8	32.8	36.2	41	44	48	52	56	62	72	
1000	30.5	35	38.5	43	47	51	55	59	68	76	

Figura No. 28



ALTURA EFECTIVA DE BAJADA

E. S. H. = H - Z

Altura
de la
Pieza
sobre
la
restricción

P	Z														
	C= ALTURA DE LA PIEZA (Pulgadas)														
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1	.5	.25	.166	.125	.100	.083	.071	.062	.055	.05	.045	.041	.037	.035	.033
2		1	.666	.50	.40	.33	.28	.25	.22	.20	.18	.166	.154	.142	.133
3			1.50	1.12	.90	.75	.64	.56	.50	.45	.41	.375	.345	.32	.30
4				2	1.6	1.33	1.14	1.00	.887	.80	.725	.666	.615	.57	.53
5					2.5	2.08	1.78	1.56	1.39	1.25	1.13	1.03	.96	.88	.83
6						3	2.57	2.25	2.00	1.80	1.64	1.50	1.38	1.28	1.20
7							3.5	3.06	2.72	2.45	2.22	2.04	1.88	1.75	1.63
8								4	3.55	3.20	2.90	2.66	2.46	2.28	2.13
9									4.5	4.03	3.68	3.36	3.10	2.86	2.70
10										5	4.55	4.15	3.85	3.57	3.33
11											5.5	5.05	4.66	4.32	4.03
12												6	5.53	5.15	4.8
13													6.5	6.03	5.6
14														7	6.4
15															7.5

$Z = \frac{P^2}{2C}$

H= Altura del metal sobre la restricción - Pulgadas

P= Altura de la pieza sobre la restricción - Pulgadas

C= Altura de la pieza en el molde - Pulgadas

8.7 Area de restricción.

La sección con Área mínima en cualquier sistema de coladas se denomina área de restricción. En el caso de sistema a presión, el área de restricción es igual a la suma de todas las áreas de entrada a las piezas.

$$CA = \frac{0.33 \times WP}{PT \times ESH}$$

- CA = Área de restricción en pulgadas cuadradas.
WP = Peso vaciado de la pieza en libras. Esto incluye el peso de las piezas además del peso de las coladas y alimentadores.
PT = Tiempo de vaciado en segundos.
ESH = Altura efectiva de bajada en pulgadas.

En la Tabla Nº 40 se listan las áreas seccionales, en pulgadas cuadradas, para alimentadores redondos, cuadrados y rectangulares, usados comunmente en los sistemas de coladas.

8.8 Embudos de vaciado.

Es muy importante incorporar en el sistema de vaciado un embudo correctamente diseñado. En muchos casos esto se omite y el resultado es que el sistema de vaciado produce condiciones erráticas y no predecibles. Un embudo eficiente debe ser diseñado de tal forma que pueda ser llenado rápidamente. Debe tener suficiente profundidad, de tal forma que la bajada no haga remolino y aspire aire y arrastre escoria. En la Figura Nº 29 se ilustran algunos embudos correctamente diseñados. Aun cuando se prefieren embudos de arena seca, también se pueden formar en arena verde.

8.9 Alimentadores y entradas.

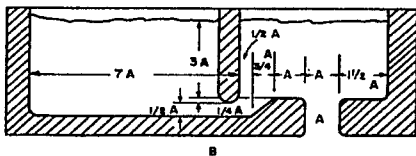
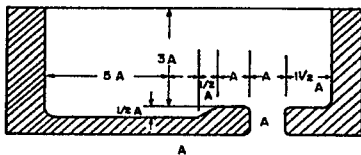
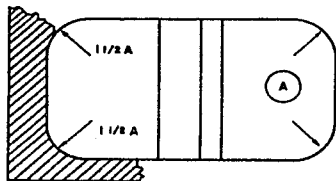
Un sistema de coladas moderadamente a presión con una relación de áreas de bajada a alimentadores y entradas de aproximadamente 4:8, 3 : 2, 4:1, consistentemente produce piezas de calidad en todos los tamaños. La Figura Nº 30 es una ilustración gráfica de este sistema indicando la relación de áreas seccionales en el sistema de coladas. Este diseño tiene por objeto la reducción de la velocidad del metal en el sistema de coladas para permitir que la escoria flote y se atrape en el alimentador.

Tabla No. 40

SECCIONES EN BAJADAS (SPRUES) Y ALIMENTADORES (RUNNERS)
EN RELACION CON DIMENSIONES DE ENTRADAS (GATES)

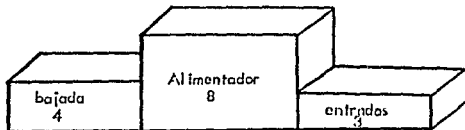
Entrada= Diámetro o lado de un cuadrado	Área de la bajada en pulgadas		Dimensiones de Alimentador rectangular en pulgadas		Área del Alimentador en pulgadas
	Redondo	Cuadrada	Alto		
			Ancho	Alto	
1/4	.049	.063	1/2	1/2	.250
1/2	.196	.250	1/2	3/4	.375
9/16	.249	.316	1/2	1	.500
5/8	.307	.391			
11/16	.371	.473	5/8	5/8	.307
			5/8	1	.625
3/4	.442	.563	5/8	1-1/4	.781
13/16	.519	.660			
7/8	.601	.766	3/4	3/4	.442
15/16	.609	.879	3/4	1	.750
			3/4	1-1/4	.937
1	.785	1.000	3/4	1-1/2	1.125
1-1/16	.887	1.129			
1-1/8	.994	1.266	7/8	7/8	.765
1-3/16	1.100	1.410	7/8	1-1/8	1.094
			7/8	1-1/2	1.313
1-1/4	1.227	1.563	7/8	1-3/4	1.531
1-5/16	1.353	1.723			
1-3/8	1.485	1.890	1	1	1.000
1-7/16	1.623	2.066	1	1-1/4	1.250
			1	1-1/2	1.500
1-1/2	1.767	2.250	1	1-3/4	1.750
1-9/16	1.918	2.441	1	2	2.000
1-5/8	2.074	2.640			
1-11/16	2.237	2.848	1-1/4	1-1/4	1.563
			1-1/4	1-1/2	1.875
1-3/4	2.405	3.063	1-1/4	2	2.500
1-13/16	2.580	3.265	1-1/4	2-1/2	3.120
1-7/8	2.761	3.516			
1-15/16	2.948	3.754	1-1/2	1-1/2	2.250
			1-1/2	2	3.000
2	3.142	4.000	1-1/2	2-1/2	3.750
			1-1/2	3	4.500

Figura No. 29



EMBUDOS DE VACIADO

FIGURA Nº 30

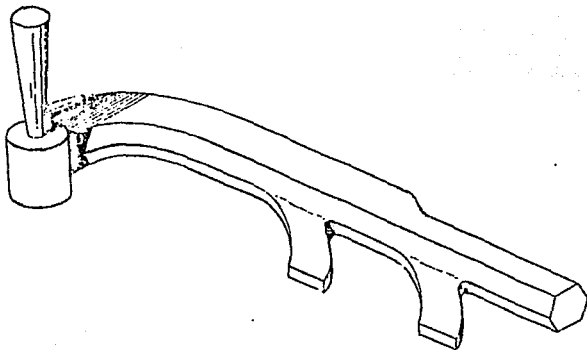


Este diseño tiene por objeto la reducción de la velocidad del metal en el sistema de coladas para permitir que la escoria flote y se atrape en el alimentador.

En un sistema efectivo de coladas una bajada cónica según se indica en la Figura Nº 31 es necesaria para minimizar la aspiración de aire en el metal que está bajando. La bajada debe desembocar en un espacio aproximadamente del doble de la profundidad del alimentador y por lo menos cuatro o cinco veces el diámetro de la restricción para minimizar la turbulencia a medida que el metal cambia de dirección y fluye hacia los alimentadores y entradas.

En los alimentadores usados en el Hierro Nodular es deseable que la altura sea aproximadamente el doble del ancho para que las inclusiones puedan ser separadas y atrapadas efectivamente.

FIGURA N^o 31



Sistema típico de colada

En este sistema de vaciado el área de restricción finalmente se localiza en la unión de los alimentadores y las entradas. Los mejores resultados se obtienen usando una conicidad de 3% desde este punto hasta el punto de entrada a la pieza. Esto tiende a reducir la velocidad del metal a medida que entra a la cavidad de la pieza. Las entradas deben estar siempre localizadas de tal forma que el metal fluya suavemente sin obstrucciones y sin chocar con paredes internas, por lo que a veces se diseñan entradas tangenciales sobre todo para piezas de paredes delgadas.

8.10 Cabezas alimentadoras para Hierro Nodular.

El conocimiento de las características de contracción en el Hierro Nodular es muy importante para poder diseñar adecuadamente las cabezas alimentadoras. El Hierro Nodular no se solidificará como ningún otro metal ferroso que progresivamente se solidifica de la superficie hacia adentro. En el Hierro Nodular hay metal líquido hasta la superficie excepto por la película dura, durante prácticamente todo el proceso de solidificación. Esto se debe a que el Hierro Nodular es esencialmente un metal eutéctico.

El Hierro Nodular tiende hacia una solidificación instantánea y se producirá una contracción considerable si no se retiene en un molde duro y seco.

La contracción volumétrica del Hierro Nodular es una función de cuatro factores:

- Contracción líquida.
- Contracción en la solidificación.
- Deformación de la cavidad del molde.
- Precipitación del grafito.

Ya que el Hierro Nodular es básicamente un metal hipereutéctico, al enfriarse, algo de carbono se precipita como grafito con un aumento en volumen, requiriendo espacio adicional. Esta característica compensa la contracción del líquido resultante del enfriamiento.

Si el metal se vacía con cualquier grado de sobrecalentamiento, el porcentaje de contracción del líquido se aumenta 0.825% por cada 38 grados Centígrados arriba de la temperatura de solidificación o 4.13% para una pieza que se vacía a 1425 grados Centígrados.

La contracción en solidificación se estima en aproximadamente 3% para Hierro Nodular.

La deformación de la cavidad juega un importante papel en la contracción del Hierro Nodular y puede ser del orden de 5 a 7% para moldeo en verde, dependiendo de la dureza.

El aumento de volumen en un Hierro Nodular normal con un carbono entre 3.6 y 3.8% será del orden de 10.5 a 10.8%.

Si se totalizan todos los factores involucrados se puede demostrar que es necesaria una alimentación para moldeo en verde en todos los casos como se indica a continuación.

Contracción del liquido de 1426 grados Centigrados	4.13%
Contracción por solidificación	3.00%
Deformación de la cavidad	<u>6.00%</u>
Deformación total de la cavidad	13.13%
Aumento de volumen debido a la precipitación de grafito	- 10.60%
Metal requerido del alimentador	2.53%

Los alimentadores requeridos para proveer el 2.53% del peso de una pieza, pueden llegar fácilmente a significar el 10-20% del peso de las piezas. La tabla 41 da información en relación con el tamaño de alimentadores para proveer cantidades diferentes de metal en Hierro Nodular.

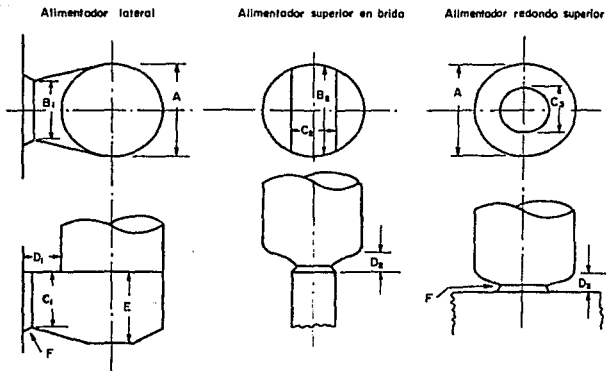
TABLA Nº 41

Sección de la pieza pulg.	Diámetro del Alimentador Pulgadas	Altura del Alimentador Pulgadas	Alimentador Superior Libras	Alimentador Lateral Libras	Alimentador en la entrada Libras
0.5	2.5	2.75	0.7	0.9	1.0
0.75	3	3.25	1.5	1.4	1.7
1	3.25	3.875	1.6	2	2.4
1.5	3.75	7	3.9	4.9	5.8
2	4.5	8	6.4	8	9.5
2.5	4.75	9.5	8.4	10.5	12.6
3	5.5	11	13	16.3	19.2
4	6	12	17	21.2	25.4
5	7.5	14	36.8	38.5	46.2
6	8	16	40.2	50.3	60.3
7	9	18	57.2	71.5	88.8
8	10	20	78.5	98.2	117.8
10	12	24	135.7	169.7	203.6

La Figura Nº 32 indica la relación de conexiones de alimentadores a piezas.

Figura No. 32

CONEXIONES DE ALIMENTADORES



Diámetro	A	8.00	7.50	6.00	3.50	4.75	4.50	3.75
	B ₁	6.00	5.50	4.75	4.00	3.375	2.50	1.75
ancho	B ₂	6.00	6.00	5.00	3.50	4.75	4.50	3.75
	C ₁	4.50	3.50	2.875	2.375	2.00	1.625	1.125
	C ₂	4.25	3.625	3.00	2.375	2.00	1.75	1.125
	C ₃	4.80	4.00	3.50	2.40	2.00	1.75	1.125
	D ₁	2.70	2.50	2.00	1.95	1.60	1.50	1.30
Cuello	D ₂	3.50	3.50	3.00	2.50	2.50	2.50	2.50
	D ₃	2.40	2.25	1.80	1.65	1.42	1.35	1.125
	E	5.375	4.50	3.625	3.063	2.50	2.125	1.188
Entrada	F	0.625	0.50	0.375	0.313	0.25	0.25	0.25

Todos los ángulos de entrada-45°

8.11 Pasos en el diseño de un sistema de coladas.

El primer paso al diseñar un sistema de coladas es determinar el lugar en el cual entrará el metal al molde. Hay muchas opiniones acerca de esta consideración en particular. La información que ha de presentarse debe usarse como guía con experiencia práctica y sentido común. Frecuentemente es deseable promover la solidificación progresiva alimentando en una sección ligera. Sin embargo, hay otras situaciones que requieren el llenado através de alimentadores en secciones pesadas o uniformes para eliminar rechupes en algunas configuraciones de la pieza.

El siguiente paso es determinar la velocidad con la cual se debe llenar el molde. Esto se hace usando la fórmula:

$$PT = (0.83 + 1.025 T) CW$$

o bien la información provista en la tabla 38. Entonces se determina el área de la restricción de la altura efectiva de bajada:

$$H = \frac{P2}{2C}$$

o Tabla Nº 39, y la velocidad de llenado usando la fórmula

$$CA = \frac{0.33 \times WP}{PT \quad ESH}$$

y en la información de la Tabla Nº 40.

El tercero y último paso es diseñar el resto del sistema de coladas. Esto incluye la bajada, alimentadores y cabezas alimentadoras. Las dimensiones de éstas, se determinan en base a las relaciones establecidas que producen piezas limpias.

C A P I T U L O 9

DEFECTOS EN LAS FUNDICIONES DE HIERRO NODULAR.

Las fundiciones de Hierro Nodular tienen casi todos los mismos defectos que se encuentran comunmente en las fundiciones de hierro gris y también algunos peculiares propios del Hierro Nodular que serán descritos en este capítulo, así como sus causas y la forma de eliminarlos o minimizarlos. Las causas de algunos defectos del Hierro Nodular no se entienden claramente y en algunos casos hay diferencias de opinión acerca del origen y el remedio. En estos casos se hará un esfuerzo para presentar objetivamente la información mas reciente de que se dispone sobre el particular. Hay muchas técnicas diferentes para la producción de Hierro Nodular, cada una con sus limitaciones y ventajas. Ninguna técnica en particular es aplicable universalmente para todos los tipos y tamaños de piezas. Cuando se consideran las causas de los defectos en el Hierro Nodular, todas las diferentes ramificaciones, circunstancias relacionadas con la práctica de tratamiento, diseño de coladas y moldeo, deben ser estudiadas seriamente. Más adelante se examina individualmente los diferentes defectos que ocurren en el Hierro Nodular.

9.1 Flotación de carbono.

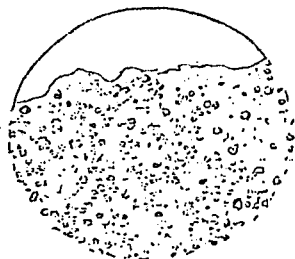
Quando se excede el límite de solubilidad del carbono en el Hierro Nodular, el exceso de nódulos flota hasta la superficie según se ilustra en la Figura N° 33. Las concentraciones de carbono en las secciones superiores llegan a ser hasta de 5 a 6%. Las propiedades mecánicas se deterioran hasta en un 50% más dependiendo del exceso de carbono.

Hay 3 factores que se asocian con el defecto de flotación de carbono en Hierro Nodular.

- Carbono equivalente.
- Sección de la pieza.
- Velocidad de solidificación.

Todos estos factores se relacionan igualmente con la configuración general de la pieza.

FIGURA Nº 33



Flotación de carbono

El Hierro Nodular es esencialmente un metal eutéctico cuando existe en condiciones de equilibrio, con carbono equivalente de 4.3%, un nódulo de carbono ocurre en cada celda eutéctica, resultando una distribución más o menos uniforme de los nódulos de grafito presente. Sin embargo, cuando se produce un hierro hipereutéctico y el carbono equivalente excede al 4.3%, el punto eutéctico, el número de nódulos de grafito excede el número de celdas eutécticas disponibles.

Bajo estas condiciones y suponiendo que el hierro se mantiene líquido durante un tiempo suficiente, los nódulos de grafito en exceso flotan hasta la superficie de la pieza y se origina el problema de flotación de carbono. Sin embargo, cuando las piezas con secciones de 3 a 10 mm son vaciadas, solidificando rápidamente, se puede tolerar hierro hipereutéctico ya que el número de nódulos de grafito no tiene tiempo para flotar a la parte superior de la pieza. Por eso es que se utiliza carbones equivalentes muy en exceso de 4.3%, para evitar formación de carburos en piezas ligeras.

En secciones comunes de 12 a 38 mm si el carbono equivalente es superior a 4.5%, la flotación casi siempre aparecerá. En secciones más gruesas o en piezas que se enfrían muy lentamente la flotación de carbono se encuentra ocasionalmente, cuando los carbonos equivalentes son apenas superiores a 4.3%. Para piezas de sección moderada un carbono equivalente de 4.5% máximo, producirá piezas libres de la flotación de carbono. Las piezas más pesadas que se solidifican y se enfrían lentamente, con secciones de 100 mm o más deberán tener un carbono equivalente de 4.3% o ligeramente menor.

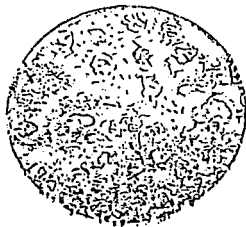
Las Tablas Nº 41, 42 y 43 incluyen las recomendaciones generales para contenidos de carbono y silicio en Hierro Nodular sin aleación, para la eliminación de carburos y flotación de carbono.

9.2 Grafito explotado.

Una de las fórmulas más comunes de grafito defectuoso se describe como grafito explotado según se indica en la Figura Nº 34.

Los factores generalmente responsables para la formación de grafito explotado son: enfriamiento lento y alto carbono equivalente. El grafito explotado se ocasiona por los mismos factores que se asocian con la flotación de carbono y generalmente se encuentra próximo a la flotación misma. En algunos casos el grafito explotado puede indicar la tendencia a la formación de grafito en trozo (Chunk graphite).

FIGURA Nº 34



Grafito explotado

Tabla No. 42

RECOMENDACIONES GENERALES PARA CONTENIDOS DE CARBON Y SILICIO EN HIERRO NODULAR SIN ALEACION

Grueso de Parod		Matriz "de molde"				
Mínimo	Máximo	Perlítica		Ferrítica		
		C%	Si	C%	Si	
1/8"	1/8	4.00	3.75	3.95	4.00	
	1/4	3.70	"	3.65	"	
	1/2	3.50	"	3.35	"	
	1	3.05	"	3.15	"	
	2	3.00	"	3.00	"	
	4 o más	3.00	"	2.95	"	
1/4	1/4	3.90	3.25	3.75	3.75	
	1/2	3.70	"	3.55	"	
	1	3.40	"	3.25	"	
	3	3.25	"	3.05	"	
	4 o más	3.20	"	3.05	"	
1/2	1/2	3.85	2.75	3.70	3.25	
	1	3.55	"	3.40	"	
	3	3.40	"	3.25	"	
	4 o más	3.35	"	3.20	"	
1	1	3.60	2.50	3.50	3.00	
	3	3.45	"	3.30	"	
	4 o más	3.40	"	3.25	"	
2	2	3.50	2.10	3.40	2.75	
	3	3.45	"	3.35	"	
	4 o más	3.40	"	3.30	"	
3	3	3.60	2.00	3.40	2.50	
	4 o más	3.50	"	3.40	"	
4 o más	4 o más	3.55	2.00	3.40	2.45	

TABLA Nº 43

RECOMENDACIONES PARA CONTENIDO DE CARBONO EN HIERRO NODULAR SIN ALEACION Y MATRIZ PERLITICA CON SI DE 2.5%

Espesor de pared máxima en pulgadas.	Carbono Total %
1/8	4.40
1/4	4.10
1/2	3.90
1	3.60
2	3.45
3	3.40
4 o más	3.35

TABLA Nº 44

CONTENIDOS DE CARBONO RECOMENDADOS PARA HIERRO NODULAR SIN ALEACION MATRIZ FERRITICA Y SI DE 2.75%

Espesor de pared en pulgadas.	Carbono Total %
1/8	4.35
1/4	4.05
1/2	3.85
1	3.55
2	3.40
3	3.35
4 o más	3.30

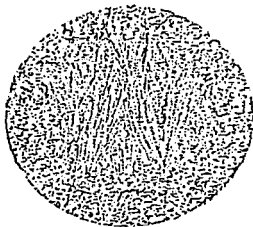
9.3 Carburos centrales.

Este defecto ocurre en piezas que solidifican rápidamente y siempre en el área que solidifica hasta el último. La misma pieza a menudo muestra carburos en otras áreas debido a enfriamiento rápido o insuficiencia de inoculación. La Figura N° 35 muestra este defecto. Análisis espectrográficos de micromuestras en el área de carburos centrales, indican que estos carburos tienen contenidos relativamente altos en elementos residuales tales como cromo, molibdeno, vanadio, níquel, manganeso y cobre, cuando se comparan con los contenidos del resto de la pieza. Frecuentemente el contenido de estos elementos residuales, en el área de carburos centrales es de 500 a 700% más elevada que la del metal base. Este defecto se puede eliminar considerablemente con los siguientes pasos:

El uso de un hierro base con un contenido de aleaciones residuales bajo, que se puede producir por cargas conteniendo Sorelmetal.

Post-inoculación con rodillo inoculante "I.L." o con inoculación en el molde usando ferrosilicio 85% , tamizado en la malla 30 para abajo.

FIGURA N° 35



Carburos centrales

9.4 Formación de grafito en trozo.

Este defecto casi siempre se asocia con piezas de sección grande y generalmente ocurre en las últimas zonas de las piezas que se solidifican. Este defecto se ve a simple vista en los cortes con sierra a través de secciones gruesas con aspecto gris. El mecanismo responsable para la formación de grafito en trozo no se ha establecido definitivamente. Algunos piensan que se ocasiona por la segregación de elementos nocivos en combinación con una solidificación demorada en cuyo caso el efecto puede ser controlado con adiciones pequeñas de cerio o mischmetal, aproximadamente de 0.01 a 0.02%. Otros creen que la condición está relacionada con una sobre-nucleación. Investigaciones recientes indican que esta condición puede ser minimizada reduciendo el número de nódulos en el Hierro Nodular. Un recuento de 30 a 60 en un block "Keel" de 25 mm indicaría que buenos nódulos de grafito ocurrirían en piezas de sección pesada.

Se puede bajar el recuento de nódulos de las siguientes formas:

Sobrecalentando el metal base arriba de 1510 grados Centígrados.

Manteniendo el hierro líquido por un periodo largo de tiempo a temperaturas de 1482 grados Centígrados o más.

Inoculando con cantidades mínimas de ferrosilicio, de 0.1 a 0.25%.

Adicionalmente, el contenido de silicio debe mantenerse entre 1 y 2%. Aún con enfriamiento lento el bajo contenido de silicio en piezas pesadas, puede causar la formación de carburo. Si este problema ocurre puede ser subsanado bajando el contenido de manganeso en el hierro base.

También se puede minimizar la formación de grafito en trozo en piezas pesadas, con la adición de cantidades pequeñas de antimonio (0.001% aprox.).

9.5 Inclusiones de escoria (dross).

Las inclusiones llamadas "dross" en el Hierro Nodular son un producto del tratamiento de magnesio y consiste principalmente de una mezcla de óxido de magnesio, silicato de magnesio y sulfuro de magnesio. Ya que el magnesio es expulsado continuamente por el hierro líquido y se oxida en la superficie del metal, ésta

escoria es probablemente el defecto más importante que se encuentra en la producción de Hierro Nodular. Este defecto es más común en secciones pesadas, pero puede ser encontrado en todos los tipos de piezas hechas en Hierro Nodular. En las Figuras Nº 36, 37, 38, 39 y 40 se muestran varios ejemplos de estas inclusiones y de defectos relacionados con ellas. Los defectos de "dross" pueden aparentar ser una fisura. En realidad el defecto es un pliegue del metal o bien una inclusión de película de este "dross", según se muestra en la Figura Nº 40. En casos extremos de defectos relacionados con "dross" se aprecian a simple vista arrugas en las superficies de las piezas. A esta superficie arrugada a veces se le llama piel de elefante. En todos los Hierros Nodulares fabricados por la introducción de magnesio, en el hierro, se encuentra el defecto "dross" en cierto grado en la superficie superior o "cope". Esto siempre se aprecia en las fundiciones cuando se realiza una inspección por Magnaflux o Magnaglow. Estas pequeñas inclusiones de tipo filiforme pueden llegar a ser un problema serio en fundiciones para aplicaciones de alta presión, tales como válvulas y bombas, que causan fallas debido a la erosión y ahucamiento de la escoria.

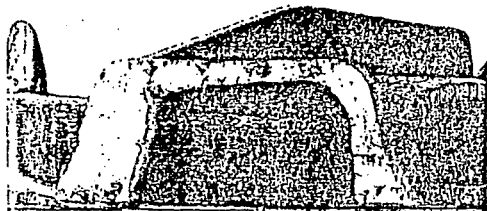
Es evidente que los defectos relacionados con "dross" pueden existir en diferentes grados y aparecer en diferentes formas. Este defecto puede ocasionarse debido a las siguientes causas:

- Excesivo contenido de magnesio retenido.
- Vaciado demasiado lento o demasiado frío.
- Un sistema de coladas que causa turbulencia en el flujo del metal.
- Contenidos de silicio arriba de 2.7% tienden gradualmente a aumentar la cantidad de "dross" presente en el hierro.
- Los hierros hipereutécticos con alto carbón y silicio tienen la máxima tendencia para la formación de "dross"

A continuación se describen algunas medidas que se pueden utilizar para minimizar o eliminar el "dross" de las piezas de Hierro Nodular.

- Drásticamente reducir la cantidad de magnesio utilizada en la producción de Hierro Nodular, mediante la sustitución de metales de tierras raras, usando C.S.F. 10, siliciuros de tierras raras o Mischmetal.
- Introducir criolita y fundentes de fluoruro de sodio en las tinajas de vaciado en cantidades de 0.5 a 1.0%
- Las tinajas deberán ser perfectamente escoriadas antes de que el metal se vacie en moldes.

Figura No. 36



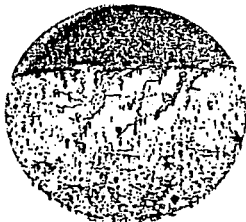
Fractura de una pieza indicando defecto de "dross" en la parte superior o "cope"

Figura No. 37



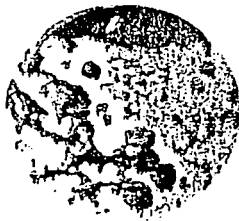
Defecto de "dross" asociado con "coldshut" en la superficie de la pieza

Figura No. 38



Defecto de escoria de silicato de magnesio en la superficie de la pieza

Figura No. 39



Microfotografía indicando escoria en forma de hilos así como huecos en la superficie de la pieza y también un área de descarburización

Figura No. 40

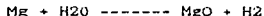


Microfotografía indicando hilos de escoria debajo de la superficie de la pieza y superficie de descarburización. Se pueden notar algunos nodulos en los hilos de escoria

Usar sistemas de coladas que promuevan un flujo de metal calmado a los moldes.

9.6 Microporos (Pinholes).

Los microporos generalmente se encuentran en secciones delgadas que han sido vaciadas frías y que también tienen tendencia ligera a formar carburos. Áreas alrededor de los microporos, generalmente son perlíticas, generalmente también tienen tendencias ligeras a formar carburos. Los microporos ocurren en piezas de Hierro Nodular que se han vaciado demasiado cerca a la temperatura de solidificación. Los microporos también se asocian con moldeo por arena verde y se cree que los vapores de magnesio que se expulsan del Hierro Nodular, reaccionan con la humedad de la arena de moldeo para producir microporos, según la siguiente reacción:



Los microporos son causados por gas hidrógeno, la presencia de aluminio también aumenta la retención de hidrógeno y puede ser responsable de microporo, particularmente si la temperatura de inoculación ha sido baja.

Las pinturas refractarias (core washes), que contienen óxidos de hierro tienden a reaccionar con el vapor de magnesio del Hierro Nodular. Este problema puede ser eliminado por el uso de pinturas a base de grafito o carbono.

Uno de los mejores preventivos para la formación de microporos es tratar y vaciar el metal a temperaturas suficientemente elevadas de tal forma que cualquier hidrógeno que se haya absorbido por el hierro, tenga oportunidad de eliminarse antes de que el metal se haya solidificado. Pequeñas adiciones de tierras raras mejoran la fluidez del Hierro Nodular a baja temperatura y reaccionan con el hidrógeno presente para minimizar la formación de microporos.

Adiciones de telurio de dos a cinco gramos por 45 kgs de hierro ayudan a la reducción o eliminación de microporos.

9.7 Rechupe (Shrinkage).

Los rechupes tipo esponja o interdendriticos ocurren durante las ultimas fases de solidificación y pueden ser eliminados cuando se generan cantidades adecuadas de grafito en la solidificación. Esto es muy importante en piezas que tienen áreas que son difíciles de alimentar efectivamente. La Figura N° 41 ilustra la importancia de una relación correcta de carbono y silicio, que promueva la formación de grafito en cantidades suficientes, la fórmula:

$\% \text{ total de carbono} + 1/7 \%$ del porcentaje de silicio 3.9

ha sido establecida para determinar un área segura de composición que produce piezas sin rechupe.

Como es evidente, esta fórmula se desvia de la fórmula para carbono equivalente en las áreas de altos silicios, ya que el silicio es solamente una séptima parte del carbono en vez de un tercio. Esto es muy importante en la producción de piezas de Hierro Nodular con moldes de arena seca o moldes esponsorados a mano sin alimentadores. Los rangos de carbono y silicio que hacen posible la utilización de autoalimentación del Hierro Nodular se indican en la Figura N° 41.

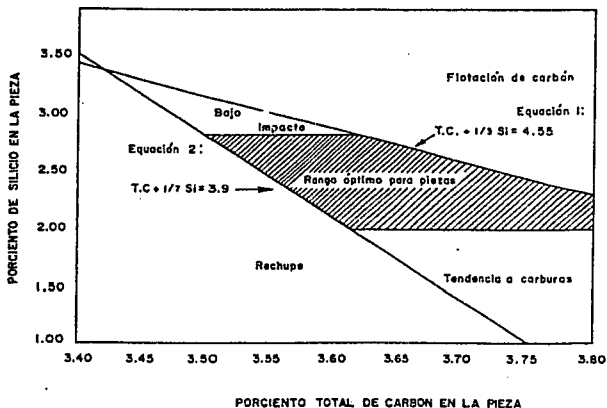
El rechupe tiende a aumentar, a medida que desciende la temperatura de vaciado, y es más pronunciado en secciones ligeras o medianas dependiendo de la relación de área a volumen, o sea la velocidad de enfriamiento del metal a medida que se llena el molde. Cuando las temperaturas del metal caen debajo de 1260 grados Centígrados, la precipitación de grafito comienza. Si la cavidad no está llena a esta temperatura, el efecto de aumento en volumen debido a la precipitación de grafito se pierde y se aumenta la tendencia al rechupe. Vaciados demasiado lentos o sistemas de coladas que causan enfriamientos excesivos pueden causar rechupes.

Es muy importante que la cavidad del molde se llene antes de que la temperatura del metal baje a más de 1260 grados Centígrados y que la distribución del metal sea tal que la temperatura sea tan uniforme como sea posible, de tal forma que la expansión debido a la precipitación de grafito, se contenga dentro del molde. Resultados inconsistentes de día a día y de tina a tina pueden indicar que la temperatura de vaciado este demasiado cerca del límite y que deberá ser elevada.

Las secciones pesadas en la pieza, posiblemente deban ser alimentadas y enfriadas, ya que de lo contrario actuarán como un alimentador de la sección ligera, particularmente en arena verde. Los problemas de rechupe frecuentemente pueden ser eliminados al aumentar la resistencia y dureza de los moldes a la vez que se vacía a temperaturas de 1426 grados Centígrados.

FIGURA Nº 41

RANGO DE COMPOSICIONES QUIMICAS
PARA PIEZAS DE HIERRO NODULAR



9.8 Tratamientos excesivos de magnesio.

Los sobretratamientos que resultan en Hierros Nodulares con contenidos de magnesio arriba de 0.06%, son una de las principales fuentes de defectos en el Hierro Nodular, siendo estas causas tambien de las más difíciles de diagnosticar y de entender. El rango satisfactorio de contenido de magnesio es de 0.035 a 0.043%. A continuación se listan algunos de los problemas más importantes que se ocasionan por sobretratamientos de magnesio.

- a) El contenido de magnesio arriba de 0.05% tiende a promover la formación en exceso de sílica de magnesio y óxido de magnesio en forma de escoria. Adicionalmente también se promueve la flotación.
- b) El contenido de magnesio en el rango de 0.07% o mas alto, ocasiona que los nodulos de grafito tomen la forma de trozos o forma de araña. A medida que se aumenta el contenido de magnesio, comienzan a aparecer áreas de grafito laminar. Esto produce una drástica disminución en las propiedades mecánicas del Hierro Nodular.
- c) El magnesio es un potente estabilizador de carburos cuando se añade al hierro gris. Cuando está presente en cantidades superiores a 0.06%, frecuentemente aparecen carburos que no pueden ser eliminados ni con inoculación ni con tratamiento térmico.
- d) El exceso de magnesio también ocasiona formaciones de microporos que comunmente se atribuyen al aluminio o a otras causas.

C A P I T U L O 1 0

TRATAMIENTOS TERMICOS APLICADOS AL HIERRO NODULAR.

Los Hierros Nodulares responden perfectamente a todos los tratamientos térmicos generales y algunos termoquímicos, además de aceptar el temple y revenido, en forma similar a los aceros. El uso de elementos de aleación proporciona influencias ventajosas.

En la fabricación de piezas de gran espesor, generalmente, con contenidos de 1 a 2% de níquel es suficiente para conseguir límites elásticos y resistencias a la tracción elevados, así como una excelente disposición al temple, mientras que adiciones de cromo de 1 a 2% y 1% de molibdeno, tienden a evitar la grafitización, con la consiguiente aparición de cementita (carburos), aumentando la resistencia de la aleación y afinando el constituyente perlítico.

Para obtener una buena respuesta a los tratamientos térmicos es necesario:

Tener muchos nódulos, lo más homogéneamente repartidos.
Una matriz, ferrítica-perlítica obtenida de fundición o bien después de un normalizado.
Presencia de níquel de 0.5 a 1%.

A continuación analizaremos los tratamientos térmicos aplicables al Hierro Nodular, uno por uno.

10.1 Eliminación de tensiones.

En muchas ocasiones, las piezas directamente de fundición quedan con tensiones residuales internas, que se incrementan durante el maquinado influyendo en forma decisiva su diseño.

Se tiene un elevado número de piezas que una vez maquinadas quedan con tolerancias muy estrechas. Como por ejemplo podemos citar: engranes, árboles de levas, cigueñales, bielas, yugos, etc.

Para eliminar este tipo de tensiones conviene proporcionar un calentamiento a una temperatura de 500 a 600 grados

Centígrados durante un tiempo de 2 a 5 horas, siguiendo un enfriamiento lento dentro del horno y sacarlas al aire cuando la temperatura baje a 200 grados Centígrados.

Este tipo de tratamiento también se le da a piezas grandes y delicadas como son: cabezas para motores diesel, bancadas, plataformas para prensas, carcazas para turbinas, cuerpos de válvulas, etc., que después de la fusión, son sometidos al tratamiento para eliminar las tensiones, y puestas seguidamente en funcionamiento, con resultados satisfactorios.

La dureza Brinell no sufre variaciones después del tratamiento, quedando prácticamente igual que al inicio.

10.2 Disolución de carburos.

Tiene como objeto principal eliminar los carburos, que además de dificultar el maquinado son sumamente frágiles, pudiendo fracturarse en servicio. Este fenómeno que en pequeña escala no tiene importancia, normalmente aparece en piezas de secciones delgadas; claro está que puede evitarse con un buen control en la composición química y con una buena técnica de inoculación. Este problema se presenta también con impurezas en el hierro base como son los sulfuros y los óxidos o elevados porcentajes de elementos estabilizadores de carburos.

Este tratamiento consiste en elevar la temperatura de las piezas de 900 a 930 grados Centígrados y mantener esta temperatura durante 30 minutos por cada centímetro cuadrado de espesor y a continuación dejar que la temperatura baje a 600 grados Centígrados, en seguida sacar las piezas al aire, con lo cual se consigue una matriz ferrítica-perlítica sin cementita.

Es importante realizar el enfriamiento al aire cuando se requiere que no baje de 220 BHN la dureza, ya que si se dejan enfriar dentro del horno, las propiedades mecánicas disminuyen, porque la matriz tiende a ferritizarse. Este tratamiento debe realizarse en todas aquellas piezas en las cuales por alguna razón se han precipitado cristales de cementita. Es importante señalar, que en otros tipos de tratamiento no desaparece la cementita, como en el caso del temple y revenido, lo que ocasiona que se presenten puntos duros fragilizando las piezas.

10.3 Ferritización.

Este tratamiento consiste en obtener una matriz totalmente ferrítica para aumentar la maquinabilidad, ductilidad y tenacidad de las piezas.

Pequeños porcentajes de níquel, elevan la resistencia a la tensión y el límite elástico de los hierros nodulares ferritizados. Dicho metal entre otras cosas tiene resistencia al impacto unas 10 veces mayor que un hierro gris perlítico.

Este tratamiento consiste en elevar la temperatura de la pieza de 860 a 900 grados Centígrados durante unas tres horas; enseguida se procede a un enfriamiento lento dentro del horno a razón de 15 a 20 grados Centígrados por hora, hasta alcanzar una temperatura entre 620 y 650 grados Centígrados a continuación se sacan las piezas del horno y se dejan enfriar al aire.

La dureza obtenida después del tratamiento es de unos 160 BHN y su resistencia a la tensión de 50 kg/mm², aproximadamente. El espesor de las piezas tiene mucha importancia en las características mecánicas de las piezas ferritizadas. Algunos metalurgistas mantienen la tesis de que al aumentar los espesores, la resistencia a la tensión disminuye en las piezas de fundición, mientras que con el tratamiento de ferritización permanece constante. Exactamente igual ocurre con la dureza y el límite elástico. Estos datos han sido comprobados recientemente por varios investigadores.

Así mismo, al aumentar el espesor de las piezas el porcentaje de nodulos decrece, y aumentando el porcentaje de inoculación disminuye el tamaño de los mismos.

Todo esto hace deducir que para cada espesor determinado el porcentaje de aleación nodulizante e inoculante debe ser ajustado, para evitar diferentes estructuras y matrices en diferentes secciones de la misma pieza.

10.4 Normalizado.

Este tratamiento destinado a homogenizar su estructura, y conseguir una excelente combinación entre el límite elástico y la resistencia a la tracción, consiste en elevar la temperatura de la pieza de 850 a 880 grados Centígrados durante 30 minutos por

centimetro cuadrado de sección y en seguida el enfriamiento se realiza al aire. La matriz resultante no difiere en mucho de la obtenida de fundición con la salvedad de tener mayor homogeneidad y una perlita más fina; puede decirse que se experimenta un ligero aumento de carbono combinado a costa de la ferrita.

En piezas de considerable espesor sometidas al tratamiento de normalizado, es aconsejable realizar, después de este tratamiento, uno de tipo subcrítico para la eliminación de tensiones internas ocasionadas durante el enfriamiento.

10.5 Temple.

Responde perfectamente al temple de igual forma que los aceros al carbono, e incluso mejor que ellos en algunos tipos de aleación.

Consiste al igual que en los aceros, en superar la velocidad crítica de enfriamiento para la total transformación de la austenita en martensita. Esta velocidad es más moderada que en los aceros de bajo contenido de carbono (0.20 a 0.45) y según el tipo de aleación aplicada.

En general el temple consiste en elevar la temperatura entre 850 y 880 grados Centígrados y mantenerla siguiendo la norma de 20 min/cm² de sección seguido de un enfriamiento lo suficientemente rápido para conseguir la transformación martensítica. Por lo general, en el Hierro Nodular, independientemente de la aleación aplicada, se pueden obtener estructuras martensíticas con enfriamiento en aceite con espesores de hasta 15 mm, al aumentar éstos, influyen en forma muy decisiva. Por tal razón, conviene agregar elementos de aleación como: níquel, manganeso, cobre, cromo, etc.

Este tratamiento proporciona resistencias a la tensión elevadas, es decir de 110 a 130 kg/mm² y durezas de 52 a 62 Rc, con una remota posibilidad de aparición de fisuras o grietas, siempre y cuando la configuración, diseño y acabado de las piezas se encuentre en los límites correctos.

Para conseguir los máximos niveles en las propiedades mecánicas en este tratamiento, es necesario partir de una matriz perlítica-ferrítica, obtenida de la pieza de fundición, o bien por normalizado de una estructura ferrítica. Después del temple, se obtiene una estructura de grafito esferoidal en una matriz martensítica, mediante el posterior revenido disminuye su resistencia y dureza, aumentando el alargamiento.

Para la fabricación de rodillos de laminación se utilizan elementos de aleación con el fin de conseguir durante el temple una estructura homogénea en toda la sección, mejorando la templabilidad y aumentando considerablemente la tenacidad.

10.6 Revenido.

Al igual que en los aceros fundidos, los hierros nodulares son sometidos a un tratamiento de revenido, después del temple, y mantenidos a una temperatura entre 200 a 650 grados Centígrados según las propiedades deseadas. La principal misión del revenido es eliminar la tensión provocada durante el temple un aumento en los elementos aleantes proporciona mayor tenacidad y alargamiento.

10.7 Temple superficial por flama y por inducción.

Los hierros nodulares también responden perfectamente al temple por flama o por inducción, teniendo la precaución de partir de una matriz perlítica y de ser posible con contenidos de níquel entre 1 y 2%, con estos requisitos se alcanzan fácilmente durezas de 650 BHN y profundidades de 2 a 3 mm.

Cuando se precisa de una matriz ferrítica en el núcleo, la respuesta al tratamiento térmico superficial será menor, y solamente con un calentamiento prolongado, pueden obtenerse resultados satisfactorios. El temple por flama es muy común en las fundiciones y consiste en un calentamiento local a temperaturas por encima de la crítica de transformación, por medio de una llama oxiacetilénica, procurando homogenizar el calentamiento, seguidamente el enfriamiento se realiza al agua o aceite, para obtener la máxima transformación martensítica. Después del tratamiento, las piezas de Hierro Nodular están constituidas por una capa periférica de martensita dura y resistente al desgaste, y un núcleo tenaz de ferrita y perlita.

Mediante este tratamiento las tensiones provocadas son inferiores a las del temple total, al tener que enfriar una zona pequeña que necesariamente crea menor distorsión.

El tratamiento de temple por inducción es similar al de por flama, pero mecanizado, con la ventaja de obtener una mayor regularidad en el calentamiento y mayor rapidez, dando todo ello una homogeneidad estructural muy aceptable, su desventaja mas

importante es el costo de la instalación y la imposibilidad de adaptar la bobina al diseño, si es complicado.

Durante la aplicación de un temple superficial debe extremarse la vigilancia a su temperatura de calentamiento, que además de ser homogénea no supere los 900 grados Centígrados, dado que con ello obtendríamos una estructura martensítica basta, que indudablemente mermaría las propiedades mecánicas del Hierro Nodular.

Este fenómeno sucede durante el flameado en zonas débiles, al actuar la flama concentrada en estos puntos un tiempo demasiado prolongado. Una de las piezas más clásicas tratadas superficialmente, es el árbol de levas automotriz, que es fabricado de Hierro Nodular en algunos casos.

10.8 Nitruración.

Los hierros nodulares aceptan la nitruración en sus dos variantes: gaseosa y líquida. La nitruración líquida es mucho más común que se utilice en lugar de la gaseosa, entre las principales propiedades mecánicas que de ella se obtienen, están:

- Aumento de la resistencia a la fatiga, especialmente en piezas sometidas a flexiones alternadas.
- Elevada resistencia al desgaste y rozamientos, incluso a temperaturas elevadas.
- Ligero aumento de la resistencia a la corrosión, más acusado en presencia de cromo y níquel.
- Ninguna variación en las dimensiones de las piezas tratadas.

Consiste en sumergir las piezas en un baño líquido de sales a base de cianuros y cianatos. Estos últimos, forman los elementos activos de la nitruración. el enriquecimiento superficial de nitrógeno se efectúa a una temperatura comprendida entre 500 y 580 grados Centígrados con permanencia de 1 a 3 horas y a continuación se lleva a cabo un enfriamiento al aire, o bien en un medio más energético.

La capa formada llega a alcanzar hasta 0.25 mm. Esta capa proporciona elevada resistencia al rozamiento y confiere propiedades antioxidantes, por ello las piezas de Hierro Nodular tratadas en esta forma no pueden ser rectificadas, pues se eliminarían sus principales propiedades. Como máximo, se puede realizar un lapeado o bruñido.

B I B L I O G R A F I A

- 1.- B. H. Amstead, Myron I. Begeman y Phillip F. Ostwald
Procesos de Manufactura
Compañía Editorial Continental S.A.
Septima Edición, 1981
- 2.- Jose Apraiz Barreiro
Fundiciones
Editorial Dossat
Tercera Edición, 1971
- 3.- Jose Campos Caudillo y Luis Hegewisch A.
Producción y Control del Hierro Nodular
Sociedad Mexicana de Fundidores, A.C.
Noviembre, 1983
- 4.- Lawrence H. Van Vlack
Materiales para Ingeniería
Compañía Editorial Continental S.A.
Tercera Edición, 1980
- 5.- Luis Hegewisch A.
Principales Tratamiento: Térmicos de los Hierros Nodulares
Revista Técnica de la Sociedad Mexicana de Fundidores A.C.
Numero 13, 1980
- 6.- H. Mayer F. Hammerli
Fabricación de Fundición Nodular de Alta Calidad
Revista Técnica SUZER
2/1972
- 7.- M. Quintero Nuñez
Estado del Arte en la Inoculación de los Hierros Grises
Instituto de Investigaciones en Materiales, Revista Técnica de
la Sociedad Mexicana de Fundidores A.C.
Numero 28, 1983
- 8.- Richard A. Flinn y Paul K. Trojan
Materiales de Ingeniería y sus Aplicaciones
Mc. Graw-Hill
Primera Edición, 1982
- 9.- Sydney H. Avner
Introducción a la Metalurgia Física
Mc. Graw-Hill
Segunda Edición, 1980