

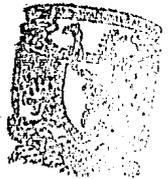
30
2. Gen



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

FACULTAD DE QUIMICA

"GRAFITO VERMICULAR EN LA PRODUCCION DE HIERRO NODULAR"



EXAMENES PROFESIONALES
FAC. DE QUIMICA

T E S I S

Que para obtener el título de:

INGENIERO QUIMICO METALURGICO

P R E S E N T A

DANIEL FERNANDO RAMIREZ CARREÑO

México, D. F., 1985



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas Tesis Digitales Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS © PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

INDICE

INTRODUCCION:

- 1. PRACTICA DE PRODUCCION DE HIERRO NODULAR**
 - 1.1 GENERALIDADES
 - 1.2 DEFINICION
 - 1.2.1 COMPOSICION QUIMICA
 - 1.2.2 GRADOS
 - 1.2.3 ESTRUCTURA
 - 1.2.4 PROPIEDADES MECANICAS Y FISICAS
 - 1.3 PRODUCCION DE HIERRO NODULAR
 - 1.3.1 INTRODUCCION
 - 1.3.2 METODOS DE TRATAMIENTO
 - 1.3.3 PREACONDICIONAMIENTO
 - 1.3.4 NODULIZACION
 - 1.3.4.1 ELEMENTOS NODULIZANTES
 - 1.3.4.2 MATERIALES NODULIZANTES
 - 1.3.5 INOCULACION
 - 1.3.6 PRACTICAS DE CONTROL EN LA PRODUCCION DE HIERRO NODULAR

 - 2. HIERROS VERMICULARES**
 - 2.1 GENERALIDADES
 - 2.2 ESTRUCTURA
 - 2.3 PROPIEDADES MECANICAS
 - 2.4 PRODUCCION
 - 2.4.1 CONTROL DE CALIDAD DE LA FUNDICION

 - 3. PARTE EXPERIMENTAL**
 - 3.1 EXPLICACION.- DISEÑO EXPERIMENTO
 - 3.2 FUNDAMENTO .- LA ESTRUCTURA VERMICULAR EN LA PRODUCCION DE HIERRO NODULAR.
 - 3.3 DISCUSION DE RESULTADOS
- CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

4.

BIBLIOGRAFIA

APÉNDICE I EFECTOS DE ALGUNOS ELEMENTOS DE ALEACIÓN.

APÉNDICE II APTITUD DE ALGUNOS ELEMENTOS PARA FORMAR GRAFITO ESFEROIDAL EN ALEACIONES **Fe-C-Si**.

APÉNDICE III COMPOSICIÓN DE LAS PRINCIPALES ALEACIONES DE MAGNESIO UTILIZADAS PARA LA PRODUCCIÓN DE HIERRO NODULAR.

INTRODUCCION. Entre las fundiciones o hierros colados que se conocen comercialmente, destacan de manera especial, los hierros grises, los hierros nodulares y los hierros maleables. Estos materiales se conocen desde hace muchos años y el estudio de sus propiedades ha hecho posible su utilización en un gran número de aplicaciones prácticas. Hay, sin embargo, un nuevo grupo de hierros que son intermedios, por así decir, entre los hierros grises y los hierros nodulares. Este grupo de materiales se conoce con el nombre de hierros vermiculares o hierros con grafito vermicular.

Presentan una estructura de grafito bien definida y reconocible fácilmente por observación con el microscopio. Poseen además, una serie de propiedades mecánicas y físicas que los hacen aptos para algunas aplicaciones específicas.

La utilización en forma generalizada, esto es, la producción a escala industrial de los hierros vermiculares, por ahora parece estar aún, lejana. Se pueden citar dos razones: 1a. el amplio conocimiento y aceptación que tienen los hierros grises y los hierros nodulares para un sinnúmero de aplicaciones y 2a. el relativo desconocimiento de los hierros vermiculares, en relación a su comportamiento bajo condiciones normales de operación y a procesos de producción consistentes.

Así mismo, es indudable que este desconocimiento es debido, también, al escaso interés que los fundidores han - mostrado hasta ahora, por los hierros con grafito vermicular. Morrogh (2) produjo hierro con grafito vermicular en 1950, al intentar obtener hierro nodular utilizando cerio. Sin embargo, en los últimos años ha tenido lugar un cambio de opinión respecto a su posible utilización en algunas aplicaciones específicas, de tal forma - que, aunque como se mencionó anteriormente, su uso generalizado no se avisa, sí surge como una alternativa - aprovechable, inclusive a corto plazo. Esto, claro está, en la medida del grado de conocimiento que se alcance.

Por otra parte, si el conocimiento sobre los hierros - vermiculares es limitado en los centros de enseñanza superior, es de suponerse que lo mismo suceda en la industria.

De aquí que el primer objetivo de la Tesis sea presentar, por así decir, a los hierros con grafito vermicular, dando una exposición basada sobre estudios e investigaciones y cuyas referencias se citan en la bibliografía.

Durante la producción de hierro nodular, se obtienen eventualmente, piezas con estructura que presenta grafito vermicular.

En la práctica de producción de hierro nodular, se deben

satisfacer ciertas condiciones de proceso para obtener una estructura aceptable de grafito esferoidal.

El segundo y principal objetivo de la Tesis, es determinar bajo qué condiciones de operación se puede obtener una estructura vermicular durante la práctica de producción de hierros con grafito esferoidal.

Evaluar tales condiciones implica conocer a los factores que se manejan normalmente en la producción de hierro nodular y su influencia en el proceso.

Por tanto, el primer capítulo de la Tesis, trata sobre la producción del hierro nodular, atendiendo básicamente, el aspecto de la práctica diaria y proporcionando, además, una visión general acerca de la naturaleza de los hierros con grafito esferoidal y de los factores que afectan, de una manera u otra, su obtención. Se pretende analizar estas cuestiones desde un punto de vista práctico, sin tratar de profundizarse demasiado sobre aspectos de metalurgia física o sobre explicaciones fisicoquímicas reconociendo que son el respaldo teórico sobre el que se sustentan todos los cambios y fenómenos que suceden en la producción del hierro nodular.

Teniendo claramente entendida la naturaleza del hierro nodular y habiéndonos situado en las condiciones que se presentan en su producción diaria, es posible establecer una serie de factores cuantificables que implican o pro-

vocan un cambio en la forma del grafito esferoidal. Es decir, que a partir de lo que ocurre en el proceso de fabricación y del análisis de la influencia de los diversos factores, se pueden deducir las condiciones en las cuales se produce grafito vermicular.

En el segundo capítulo, se da una exposición de los hierros con grafito vermicular, basada exclusivamente en la bibliografía consultada al respecto.

El tercer capítulo trata sobre la parte experimental de la Tesis: fundamento, procedimiento, resultados y discusión de resultados.

1.1 GENERALIDADES

Las fundiciones o hierros fundidos, llamados también - - hierros colados, son aleaciones ternarias de hierro - - carbono - silicio.

En relación al diagrama hierro - carbono, el contenido - de carbono en las fundiciones está en el rango de 2.5 a 4% mientras que en los aceros el porcentaje de carbono - es del 0.08% al 2.0%.

Por otra parte, el carbono se presenta en las fundiciones en forma de carburo de hierro o bien como grafito; en los aceros, el carbono siempre se presenta en forma de carburo de hierro.

La familia o grupo de las fundiciones, comprende, principalmente:

- a) Hierros grises
- b) Hierros maleables
- c) Hierros nodulares

De estos, el hierro gris y el hierro nodular se pueden - considerar los más importantes, debido a la amplia aceptación que tienen para un gran número de aplicaciones - prácticas.

Como se mencionó anteriormente, este trabajo trata sobre hierros nodulares y en especial sobre una estructura que cambia de alguna manera, las propiedades de los hierros nodulares: la estructura vermicular.

Este primer capítulo versa sobre la práctica de fundición de hierros nodulares. A continuación se presenta una visión detallada de lo que son estos materiales.

1.2 DEFINICION

El hierro nodular es una fundición en la cual el grafito se presenta en forma esferoidal, en lugar de escamas como ocurre en el hierro gris o de nódulos irregulares como en el hierro maleable.

Los nódulos o esferoides de grafito se encuentran inmersos en una matriz de ferrita o de perlita fina, esencialmente libre de grafito laminar y de carburos.

El hierro nodular se puede usar en la condición de colada o bien puede ser tratado térmicamente. De acuerdo a la definición de tratamiento térmico se tiene que el hierro nodular puede tener diferentes estructuras de matriz, según el tratamiento térmico aplicado. De esto se tratará en la parte correspondiente a estructura.

1.2.1 COMPOSICION QUIMICA

La composición química típica está en los siguientes rangos:

Carbón total	3.20 - 4.10%
Silicio	1.80 - 3.00%
Manganeso	0.10 - 1.00%
Fósforo	0.005- 0.10%
Azufre	0.005- 0.015%

La importancia de mantener estos elementos dentro de los niveles descritos se explica por el efecto que tienen sobre la estructura y en consecuencia sobre las propiedades físicas y mecánicas de los hierros nodulares.

Se debe aclarar que estos elementos, llamados elementos primarios, no son los únicos que entran en la composición de un hierro nodular y por consiguiente, que influyen en su estructura.

Investigaciones ⁽¹⁾ han demostrado que muchos elementos tienen influencia en las fundiciones de grafito esferoidal. La función de estos elementos, así como sus contenidos se muestran en el apéndice No. 1.

La estructura con grafito esferoidal se obtiene aleando el hierro fundido con pequeñas cantidades de uno o más elementos, principalmente cerio y magnesio. De hecho, el paso más importante en la producción de hierro nodular es la esferoidización o nodulización y en esto, el magnesio juega un papel importante.

A continuación se tratará brevemente sobre los elementos primarios: C, Si, Mn, P, S. De los elementos de aleación más importantes (níquel, magnesio, calcio, molibdeno, etc.) se tratará en el transcurso de este trabajo.

Carbono. El rango de carbono para hierro nodular comercial está entre 3.0 y 4.5%. El carbono afecta la formación de microconstituyentes y esto es básico para todas

las propiedades mecánicas. Por lo general, el rango óptimo de carbono se sitúa entre 3.0 y 3.8% para el hierro final; cuando se sobrepasan los límites recomendados, el carbón flota en las piezas de espesor medio y grande, - siendo esto, una circunstancia indeseable.

Carbón equivalente. Ya que el contenido de carbono y de silicio, influyen sobre la composición eutéctica, se ha encontrado conveniente combinar sus valores para hierros fundidos dentro de un factor conocido como carbón equivalente. Este valor está dado por la siguiente ecuación: -

$$C.E. = \%C + 1/3 Si\%$$

Para valores de carbón equivalente iguales a 4.3, la aleación es eutéctica. Una aleación con carbón equivalente superior a 4.3 se denomina hipereutéctica, mientras - una C.E. inferior al de la composición autéctica se denomina hipoeutéctica. Con alguna excepción, (la industria de la tubería de presión) el hierro nodular se produce ligeramente hipereutéctico ⁽³⁾. El problema de flotación de carbón se incrementa a medida que aumenta el - valor de carbón equivalente.

Silicio. El contenido usual final del silicio en el hierro nodular, está en el rango de 2.0 a 3.0%. El silicio es un fuerte grafitizador promoviendo la formación de - ferrita. Es el elemento más útil para aumentar la resistencia al impacto cuando su contenido no sobrepasa este -

rango. Hierros nodulares con alto silicio (3.5%) son resistentes a la corrosión, pero su resistencia al impacto disminuye.

Manganeso. La función del manganeso en los hierros nodulares es estabilizar la perlita. Cuando el manganeso excede de 0.5% se presentan carburos no recocibles con propiedades mecánicas bajas; sin embargo, aumentando la cantidad de manganeso aumenta el porcentaje de perlita, ocasionando que la resistencia a la tensión y al límite elástico aumenten. Además del manganeso en su función de estabilizador de perlita y de carburos, existen otros elementos que tienen el mismo efecto. Los principales se presentan a continuación (3):

ELEMENTO	%P/GRADO FERRITICO	% P/GRADO PERLITICO
Arsénico	0.020	0.020
Boro	0.002	0.002
Cobre	0.003	0.25 - 0.75
Estaño	0.010	0.050
Vanadio	0.030	0.050
Molibdeno	0.030	0.040
Cromo	0.030	0.04-0.1
Manganeso	0.09-0.2	0.40-0.6

Cuando el nivel de elementos estabilizadores de carburos excede de lo recomendado ocurren carburos, los cuales disminuyen las propiedades de tenacidad y sobre todo, la

aptitud al mecanizado. En este caso, es preciso eliminar estos carburos mediante un tratamiento térmico llamado - recocido de ablandamiento o de descomposición de carburos. Además, un contenido demasiado elevado de manganeso aumenta la tendencia a la absorción de hidrógeno y por esta razón, existe mayor peligro de la aparición de poros. Fósforo. El nivel de fósforo en el hierro nodular debe ser menor que 0.1% para prevenir la formación de fase - esteadita ya que ésta condición reduce la tenacidad y hace frágil al hierro. Por tanto, es necesario controlar cuidadosamente el contenido de fósforo para obtener buenas propiedades mecánicas.

Azufre. El azufre es uno de los elementos indeseables en el hierro nodular. La desulfurización abajo de 0.02% de azufre es una de las necesidades básicas para la esferoidización del grafito en la mayoría de los procesos. Se tratará más extensamente sobre éste elemento en la parte correspondiente a preacondicionamiento.

1.2.2 GRADOS

A continuación se enlistan los diferentes grados del hierro nodular (3):

El grado 1 (ASTM D 4512) es un hierro nodular ferrítico - y la estructura puede obtenerse en la condición de colada o bien por tratamiento térmico. La matriz es esencialmente ferrítica, pero este grado puede contener perlita,

dependiendo del tamaño de sección. Las propiedades mecánicas son satisfactorias.

El grado 2 (ASTM D 5506) es un hierro ferrítico-perlítico, obtenido en estado bruto de colada o por tratamiento térmico.

La matriz es perlítica. Este grado puede contener sustancialmente más ferrita.

El grado 3 (ASTM D 7003) es un hierro generalmente enfriado en aire o en líquido y revenido para lograr la dureza adecuada. La matriz resultante es perlita o martensita revenida.

El grado 4 (ASTM DQ y T) es un hierro templado en líquido y revenido. La matriz resultante es martensita revenida. El rango de dureza Brinell es una cuestión a tratar entre el fabricante y el comprador.

El grado 5 (ASTM D 4018) es un hierro nodular recocido. El tiempo de recocido y el ciclo de temperatura es tal que carburos primarios, si se presentan en la condición de colada, son descompuestos. La matriz resultante es ferrítica.

1.2.3 ESTRUCTURA

La estructura del hierro nodular consta de esferoides de grafito inmersos en lo que se llama matriz, que, como se mencionó, puede ser ferrítica, perlítica, ferrítica-perlítica, etc., según el tratamiento térmico aplicado o -

bien debido a los elementos presentes en el hierro líquido. Los nódulos de grafito caracterizan la estructura del hierro nodular y deben cumplir condiciones de forma y tamaño:

a) Forma de los nódulos de grafito. El componente grafito de la microestructura deberá consistir de por lo menos 90% de grafito esferoidal conforme a los tipos I y II según norma ASTM 247, pudiéndose encontrar el resto en forma vermicular (III).

b) Tamaño de los nódulos. No hay condición restrictiva ya que depende de la sección de la pieza de donde se toma la probeta, encontrándose que en secciones muy delgadas el tamaño de los nódulos es muy pequeño.

Por otra parte, la matriz de los hierros nodulares que consistirá de ferrita, perlita, martensita o una combinación de éstas, estará sustancialmente libre de cementita primaria.

Las relaciones recomendadas de ferrita, perlita, martensita revenida y carburos, se muestran a continuación (2):

GRADOS	FERRITA	PERLITA	MARTENSITA REV.	CARBUROS *
1	40% mín.	60% máx.		10% máx.
2	50% máx.	50% mín.		10% máx.
3	20% máx.	80% mín.		3% máx.
4	10% máx.	10% máx.	80% mín.	3% máx.
5	90% mín.	10% máx.		3% máx.

Se explicarán brevemente las transformaciones que ocurren en estado sólido y que determinarán la estructura de la matriz.

Las fundiciones con grafito esferoidal solidifican formando primero austenita primaria. A temperatura ambiente la austenita no es estable y se transforma en otra variedad cristalográfica del hierro: la ferrita. Durante el enfriamiento continuado, la solubilidad del carbono en la austenita disminuye y por tanto habrá una precipitación adicional de carbono; por otro lado, la solubilidad del carbono en la ferrita es muy baja y el carbono es rechazado. Si la velocidad de enfriamiento es lenta, todo el carbono precipitará como grafito o como cementita eutectoide que grafitiza rápidamente, resultando una estructura ferrítica.

Si se evita la grafitización del carbono se formarán láminas de cementita en el interior de la austenita original. De cada lado de las láminas de cementita se forman delgadas capas de ferrita. El proceso continúa con la formación de capas alternas de ferrita y cementita para dar una estructura perlítica.

Bajo velocidades de enfriamiento lentas o moderadas, los átomos de carbono pueden difundirse hacia afuera de la estructura de la austenita. Con un aumento adicional en la velocidad de enfriamiento, no hay tiempo suficiente -

para que el carbono se difunda en la solución y entonces queda atrapado en ésta. La estructura resultante llamada martensita, es una solución sólida sobresaturada de carbono atrapado en una estructura tetragonal centrada en el cuerpo. Aplicando un tratamiento térmico de revenido a las piezas con estructura martensítica, es posible obtener una microestructura más blanda y tenaz conocida con el nombre de martensita revenida.

Si la pieza se enfría primero rápidamente y se mantiene por un tiempo prolongado a una temperatura entre 95 - - 150°C, resulta una velocidad de carbono muy lenta y la distorsión de la red cristalina no es tan drástica, resultando una matriz bainítica.

Para terminar el punto correspondiente a estructura, se debe mencionar otro componente común: los carburos. Estos disminuyen las propiedades mecánicas de las piezas, por lo que, cuando están en cantidades superiores a las permitidas, se hace necesario eliminarlos mediante un tratamiento térmico de solubilización.

1.2.4 PROPIEDADES MECANICAS Y FISICAS. Las propiedades mecánicas de los diferentes grados de hierro nodular, pueden variar con la microestructura, la cual, especialmente en la condición de colada, depende del tamaño de sección, así como también de la composición química y de

algunos procesos de fundición.

Las propiedades mostradas en la siguiente tabla se usan para designar propósitos o usos específicos, pero, para determinar si un grado en particular es satisfactorio para un requerimiento dado, es conveniente recurrir a pruebas de laboratorio.

GRADO	RANGO DE DUREZA (BHN)	DESCRIPCION	RESISTENCIA A LA TENSION PSI (MPA)	LIMITE DE FLUENCIA PSI (MPA)	ELONG. % in 2"	MODULO ELAST. 10 ⁶ PSI
1 (D4512)	156-217	FERRITICO-PER	65,000	45,000	12	22
	(4.8-4.1 BID)	LITICO	(448)	(310)		(152)
2 (D5506)	187-225	FERRITICO-PER	80,000	55,000	6	22
	(4.4-3.8 BID)	LITICO	(552)	(379)		(152)
3 (D7003)	241-302	PERLITICO	100,000	70,000	3	22
	(3.9-3.5 BID)		(685)	(482)		(152)
4 (DQ y T)	RANGO ESPECIFICADO POR ACUERDO.	MARTENSITICO				
5 (4018)	170 BHN MAX.	FERRITICO	60,000	40,000	18	22
	4.6 BID MIN.		(414)	(276)		(152)

1.3 PRODUCCION DEL HIERRO NODULAR

1.3.1 INTRODUCCION

La producción de hierro nodular se ha incrementado notablemente durante los últimos años. Esto se debe a dos cosas principalmente: - 1o. Su relativamente sencillo y económico proceso de elaboración y 2o. el desarrollo de la investigación que ha hecho posible

el descubrimiento de nuevas aplicaciones,

Es importante hacer notar que, para producir un hierro nodular de calidad consistente, se requiere de un conocimiento amplio sobre la naturaleza del mismo; se menciona ésto debido a que existe la creencia de que solo es necesario desulfurar el hierro y allearlo con magnesio en alguna forma para obtener hierro con grafito esferoidal. Sin duda, una apreciación falsa, que resulta en la obtención de un hierro con estructura y propiedades definitivamente bajas.

Resulta obvio decir que la producción de hierro nodular requiere de una práctica de tratamiento tal; que garantice plenamente, la obtención de un hierro nodular de calidad aceptable.

En los siguientes puntos se tratará sobre esta cuestión.

1.3.2 METODOS DE TRATAMIENTO

Aunque existen varios métodos de producción, ninguno de ellos es aplicable universalmente para todos los tipos y tamaños de piezas. Esto quiere decir que cada método tiene sus ventajas y también sus desventajas y que se optará por uno en particular de acuerdo a los requerimientos y las condiciones de una determinada fundición.

Hay, sin embargo, cinco procesos que se usan en la mayoría de las fundiciones. Estos procesos son los siguientes:

- a) Método de vaciado directo (Pour Over)
- b) Método de inmersión
- c) Método sandwich
- d) Método del tapón poroso
- e) Método de inyección de finos con magnesio metálico.

Existe suficiente información, en la literatura especializada, sobre los detalles de cada uno de estos procesos. Baste decir que estos ofrecen una forma segura y relativamente económica, de obtener un hierro nodular de características invariablemente buenas, a condición, por supuesto, de que sigan una práctica de tratamiento adecuado.

Para optar por un método dado, existen algunas consideraciones que sirven para normar el criterio de selección, las principales son:

- a) Tamaño de carga. La capacidad individual de cada planta debe dictar el tamaño de la carga con una buena exactitud.
 - b) Temperatura requerida. Piezas con secciones delgadas y ligeramente pesadas requieren de un hierro más caliente y podrán, conservadoramente, dictaminar el uso del tratamiento adecuado.
 - c) Posibilidades de mecanización. Operaciones altamente repetidas, que involucran labores manuales, pueden realizarse más rápidamente, mecanizándolas.
 - d) Simplicidad. La carencia de expertos y de personal calificado, además de la necesidad de un equipo sofisticado puede ser un factor de selección.
 - e) Consideraciones ambientales. El desprendimiento de humos y otros contaminantes, puede ser muy importante en alguno de los métodos mencionados.
 - f) Limitaciones físicas. Las dimensiones y el diseño de la planta puede imponer restricciones sobre algún método en particular.
- Cualquiera que sea el método de producción utilizado, deberá, nor-

malmente, llevar a cabo una serie de etapas o fases de proceso, para garantizar la estructura y las propiedades del hierro nodular producido. Estas etapas son:

- 1o. Preacondicionamiento (desulfurización)
- 2o. Nodulización
- 3o. Inoculación

Del efectuar cada una de estas operaciones, siguiendo una práctica establecida y ejerciendo los controles necesarios, depende el éxito o el fracaso de la producción de piezas de hierro nodular. A continuación se tratará sobre estas operaciones.

1.3.3 PREACONDICIONAMIENTO. Esta es la primera de las etapas del proceso de producción de hierro nodular. Acondicionar el metal fundido para el posterior tratamiento con agentes esferoidizantes, incluye normalmente:

- 1o. Ajustes de temperatura
- 2o. Ajustes químicos para tener los niveles deseados de azufre.

Temperatura: en todo proceso, la temperatura de tratamiento del metal fundido es determinada por: a) la temperatura de vaciado deseada para el metal y b) las pérdidas de temperatura que ocurren durante el proceso.

La importancia de mantener la temperatura del metal líquido dentro de los límites recomendados, se explica por su estrecha interrelación con otras variables de proceso,

como son: cantidad de magnesio, tiempo de permanencia, etc.

El rango de temperatura de tratamiento del metal es de 1480 - 1510°C. Temperaturas inferiores provocan una disminución en la fluidez del metal y esto, tratándose de piezas con formas complicadas o bien con secciones delgadas, es causa de piezas coladas incompletas, debido a que el metal solidificó rápidamente y no alcanzó a llenar en su totalidad el molde.

Ahora veamos el caso contrario, es decir, cuando la temperatura es excesivamente alta. La recuperación de los agentes esferoidizantes disminuye rápidamente a medida que aumenta la temperatura. De igual forma, las pérdidas de magnesio son considerables a temperaturas altas, esto es importante: el magnesio es el agente nodulizante, es decir, es el que lleva a cabo la función de esferoidización del grafito, de aquí que sea lógico que si una temperatura excesivamente alta afecta de alguna forma su contenido dentro de la masa líquida, afectará de igual manera la morfología del grafito en el hierro final.

Por otra parte, el sobrecalentamiento de la masa fundida de hierro nodular a alta temperatura, promueve los carburos. A temperaturas del hierro líquido superiores a 1500°C, la reacción $\text{SiO}_2 + 2\text{C} = \text{Si} + \text{CO}$ elimina el oxígeno tanto más rápidamente cuanto más alta sea la temperatura.

tura y más largo el tiempo de permanencia. En estas condiciones, el bajo contenido de oxígeno origina carburos e inhibe la formación de grafito aceptable.

CONTROL DE AZUFRE

El azufre es uno de los elementos indeseables en el hierro nodular. Una práctica común en la producción del hierro nodular es mantener el nivel de azufre tan bajo como sea posible, para que resulte una aceptable nodulización y una mayor calidad en la superficie de la pieza fundida.

Cuanto más alto es el contenido de azufre en el hierro líquido más escoria se crea y por tanto, existe una mayor probabilidad de piezas rechazadas debido a inclusiones de escoria.

Por otra parte, un hierro con alto azufre (superior a 0.015%) implica problemas para una correcta nodulización: el magnesio, además de llevar a cabo funciones como nodulizante y como desoxidante, cumple un importante papel como desulfurante.

Debido a que el magnesio tiene una estrecha afinidad por el azufre, se combina primeramente con este para formar sulfuros estables de magnesio, ejecutando de esta manera la desulfurización; si el contenido de azufre es demasiado alto, será necesaria una gran cantidad de magnesio para combinarse con él, de tal forma que el magnesio restan

tante resulta insuficiente para llevar a cabo una correcta nodulización.

Se recomienda que el nivel de azufre en el hierro líquido sea inferior a 0.01%, normalmente 0.005%. Esta necesidad de bajo azufre ha dado por resultado el desarrollo de métodos eficientes de desulfurización. El tratamiento externo del hierro usa como agente desulfurante el carburo de calcio, el carbonato de sodio y el óxido de calcio, principalmente y los métodos requieren por lo general, de los siguientes factores básicos.:

- a) Contacto íntimo entre el metal y el agente desulfurante.
- b) Tiempo de reacción.
- c) Eliminación simple del azufre por escoriado después de la desulfurización.
- d) Control de temperatura.
- e) Mantenimiento mínimo de refractarios.
- f) Control de humos.
- g) Facilidad de manipulación y alimentación de los agentes desulfurantes.

La desulfurización es un paso anterior a la adición de magnesio; una vez efectuada, la escoria conteniendo sulfuros es removida y el hierro fundido está listo para el tratamiento con magnesio.

Resumiendo, un adecuado control de la temperatura y del nivel de azufre en el hierro líquido, facilitarán considerablemente las operaciones posteriores del proceso de producción: Nodulización e Inoculación.

1.3.4 NODULIZACION. Obtener un hierro nodular con una estructura del grafito que garantice buenas propiedades mecánicas, es una de las tareas fundamentales en la producción del hierro nodular.

Son varios los factores que afectan la formación de un grafito esferoidal de estructura aceptable, entre estos se encuentran la composición química, la temperatura del metal líquido, la forma de añadir los agentes nodulizantes, el tiempo de tratamiento, etc. En lo que sigue se hará una exposición sobre la nodulización, empezando por describir los elementos nodulizantes, los materiales usados en la práctica, hasta los controles que se deben aplicar para lograr obtener un producto que satisfaga los estándares de calidad establecidos.

1.3.4.a ELEMENTOS NODULIZANTES. Uno de los principales objetivos de la investigación sobre hierro nodular, ha sido descubrir cuales elementos promoverán la formación de grafito esferoidal. El apéndice II resume los resultados de estas investigaciones.

De los elementos conocidos para producir grafito esferoi-

dal solo el magnesio y en menor proporción el cerio, se utilizan en la práctica de la fundición. Los demás elementos se eliminan debido a su alto costo, o bien, porque son incapaces de desarrollar todas las funciones que lleva a cabo el magnesio, tales como la desoxidación y la desulfurización, aparte, por supuesto, de la nodulización.

Magnesio. Actualmente y desde su introducción, el magnesio ha sido el nodulizante principal. Como se muestra en el apéndice II, son varios los elementos que promueven la formación de grafito esferoidal; algunos de ellos forman parte de las aleaciones utilizadas en la práctica, normalmente, para disminuir la violencia de la reacción. El magnesio tiene una presión de vapor alta con un punto de ebullición de 1107°C y también una baja solubilidad en el hierro. Como resultado, la adición de magnesio en el metal fundido produce una violenta reacción y una baja recuperación.

En la producción de hierro nodular, el magnesio residual está normalmente en el rango de 0.02% a 0.05%.

Los niveles de adición del magnesio se basan en la eficiencia de la recuperación, que es función, a su vez, de algunos factores tales como: el tipo de aleación adicionada, temperatura de tratamiento, método de tratamiento, azufre en el metal líquido y nivel de oxígeno en el metal

a ser tratado.

Otro factor que influye en la adición de magnesio es el excesivo tiempo de permanencia, ya que a una temperatura de 1485°C la pérdida de magnesio está en el rango de 0.001% por minuto (2).

El magnesio es un potente desoxidante, por ejemplo, un hierro no tratado con un contenido de oxígeno de 135 PPM, cuando es tratado, muestra una reducción en oxígeno a niveles tan bajos como 30 PPM (2).

Por otra parte, el magnesio se combina con el azufre para formar sulfuros de magnesio. Esta es la razón por la cual el magnesio residual se reporta más alto en hierros con azufre alto que en hierros con bajo nivel de azufre. Se requiere de un contenido de magnesio residual de 0.03 a 0.06% para producir una buena estructura de grafito esferoidal.

Contenidos más bajos de magnesio resultan en formas de grafito intermedias entre escamas y esferoidal, con propiedades de resistencia y ductilidad inferiores a las que debe presentar un hierro nodular. En caso de que el magnesio residual sea superior a 0.06% se formarán carburos de hierro que, como se mencionó ya, disminuyen las propiedades de tenacidad principalmente. Un contenido excesivo de magnesio (superior a 0.1%) provoca formas insatisfactorias o degeneradas de grafito.

Para determinar la cantidad de magnesio residual que debe agregarse a un hierro para una nodulización efectiva, se debe tomar en cuenta la cantidad de magnesio necesario para desoxidar y desulfurar al hierro y adicionarla al magnesio residual requerido para la nodulización y a las pérdidas de magnesio como resultado de la evaporación. La cantidad de magnesio requerido para desoxidación es relativamente pequeña y puede ser despreciada en el cálculo (3):

$$Mg_a = Mg_s + Mg_r + Mg_v \text{ ----- (1)}$$

donde:

Mg_a = magnesio adicionado (%)

Mg_s = magnesio usado para desulfurar (%)

Mg_r = magnesio residual requerido para nodulización (%)

Mg_v = pérdidas de magnesio por vaporización.

La cantidad de magnesio usado (Mg_u) es la cantidad adicionada menos la cantidad de pérdidas por evaporación:

$$Mg_u = Mg_a - Mg_v$$

El porcentaje de magnesio recuperado, Mg_{rc} , es el cociente entre la cantidad usada y la cantidad adicionada, multiplicada por 100:

$$Mg_{rc} = Mg_u / Mg_a \times 100$$

pero de (1):

$$Mg_a - Mg_v = Mg_s + Mg_r \text{ ----- (4)}$$

de (2):

$$Mg_a = Mg_s + Mg_r \text{ ----- (5)}$$

y de (3):

$$Mg_{rc} = Mg_s + Mg_r/Mg_a \times 100 \text{ ----- (6)}$$

arreglando:

$$Mg_a = Mg_s + Mg_r/Mg_{rc} \times 100 \text{ ----- (7)}$$

$$Mg_s = 0.76 (s_b - S_t) \text{ ----- (8)}$$

S_b = contenido de azufre en el hierro líquido (%)

S_t = contenido de azufre en el metal tratado (%)

0.76 = razón de los pesos atómicos del magnesio y del azufre.

de aquí, la ecuación (7):

$$Mg_a = 0.76 (S_b - S_t) + Mg_r/Mg_{rc} \times 100 \text{ ----- (9)}$$

para los propósitos prácticos:

$$Mg_a = (S_b - S_t) + Mg_r/Mg_{rc} \times 100$$

En el análisis final, el magnesio residual incluye al magnesio disuelto en el hierro, más el magnesio combinado con el azufre y que queda en el hierro.

Hay algunas otras formas de calcular la cantidad de magnesio necesaria. Sin embargo, en las fundiciones es una práctica común valerse de tablas que indican la cantidad de magnesio que se debe agregar para un determinado peso de las piezas coladas.

Cerio. La primera publicación de la producción de grafito esferoidal en hierros colados, estaba basada sobre un

trabajo en el cual, el cerio era adicionado al hierro - por intermedio del mishmetal, cuyo análisis típico era:

Elemento	%
Cerio	50
Lantano	25
Niodimio	16
Praseodimio	6
Samarario	2
Ytrio	1

En la actualidad, el cerio es el único elemento de tierras raras reconocido como nodulizante efectivo. De hecho, el principal uso del cerio es el controlar o minimizar los efectos dañinos de ciertos elementos.

1.3.4.2 MATERIALES NODULIZANTES. En ésta parte se tratará sobre los materiales utilizados para la adición de los elementos nodulizantes al metal fundido.

Magnesio metálico. El magnesio metálico se ha utilizado en muchas formas y generalmente cada forma ha requerido de una técnica específica de adición. Estas técnicas tienen como objetivo principal minimizar la violencia de la adición del magnesio.

Las formas de magnesio metálico que se han empleado son:

- magnesio en granalla o pulverizado.
- lingote de magnesio.
- aglomerados compactos de viruta de hierro con magnesio.

La adición de magnesio metálico tiene sus principales ventajas en:

- Uso de la forma de magnesio de más bajo costo.
- Adición sin la introducción de elementos portadores.

Las desventajas estriban en el requerimiento de equipo especial y mano de obra extra, además de altas pérdidas por volatilización.

Aleaciones de magnesio. Reconociendo que la adición de magnesio metálico al hierro fundido es difícil y aún azarosa, se han buscado aleaciones de magnesio y elementos portadores con el propósito de mejorar la facilidad y la seguridad de la operación y al mismo tiempo obtener una mayor consistencia del producto.

En el apéndice III se presentan las principales aleaciones de magnesio utilizadas en la industria de la fundición.

Aleaciones de base níquel. Los primeros experimentos y la primera producción comercial utilizaron aleaciones de base níquel. Las aleaciones níquel-magnesio dan una alta recuperación y una baja reacción. Las aleaciones níquel-magnesio se ennumeran a continuación:

- 1) 85% níquel - 15% magnesio, utilizada en el proceso de cuchara abierta.
- 2) 50% níquel - 30% silicio - 15% magnesio, también utilizada en el proceso de cuchara abierta, obtenida al más bajo costo por la adición reducida de níquel.

- 3) 70% níquel - 30% magnesio, utilizada en el proceso de inmersión.
- 4) 95% níquel - 5% magnesio; 60% níquel - 35% fierro - 4% magnesio, aleaciones desarrolladas recientemente para proveer una baja reactividad.

Aleaciones de base silicio. Las primeras aleaciones de este tipo fueron introducidas en 1950. Consistían en 9% magnesio y 45% silicio y su uso estaba limitado a tratamientos de hierros con bajo azufre y bajo silicio. Un cambio importante consistió en disminuir el nivel de magnesio, obteniendo con esto una mayor eficiencia de las aleaciones. Disminuyendo el contenido de magnesio a niveles inferiores al 5%, la recuperación es superior al 50% comparada con el 30% de eficiencia obtenida con aleaciones con 9% de magnesio (2).

La aleación de 5% magnesio y 45% silicio complementa al proceso sandwich y ésta combinación es, probablemente, la más usada en la producción de hierro nodular.

Aleaciones más recientes de base silicio tiene 3% de magnesio y son menos violentas que las aleaciones que contienen 5 y 9% de magnesio. En general, la relación silicio-magnesio requiere complementación de tierras raras en alguna forma. El primer refinamiento de éstas aleaciones viene con la inclusión de aproximadamente 0.5% de cerio -

(1% total de tierras raras). La adición de tierras raras es con el fin de neutralizar los efectos nocivos de algunos elementos.

Las aleaciones base silicio vienen a ser los nodulizantes principales en la producción de hierro nodular. Ambas aleaciones del 5% y del 9% de magnesio, son disponibles libres de tierras raras, o bien, con niveles específicos de cerio.

Metales de tierras raras. Se revisará a continuación el papel de los elementos de tierras raras como materiales nodulizantes.

Aunque los primeros intentos para producir grafito esférico en hierro fundido, estaban basados en la utilización de metales de tierras raras (Mishmetal), principalmente cerio, las limitaciones químicas por una parte y económicas por otra que se hicieron evidentes rápidamente y el anuncio que se hizo poco después del magnesio como nodulizante, permitieron entrever que este último sería el agente dominante.

Sin embargo la mejora económica y de proceso, resultante de la adición de metales de tierras raras ha sido un incentivo para la reexaminación de su uso en la producción de hierro nodular.

Hay algunas consideraciones: se ha encontrado que adicionando cerio en condiciones convenientes, es posible inhi-

bir la formación de carburos y además promover un alto cómputo de nódulos y una buena nodularidad. Por otro lado, sus óxidos y sulfuros son estables y tienden a ser pequeños y globulares. En la actualidad la razón principal del uso de tierras raras en la producción de hierro nodular, es que se combinan con elementos que promueven la formación de laminillas, tales como: plomo, antimonio, arsénico, bismuto, aluminio y titanio, formando compuestos estables que no toman parte en la formación de los nódulos de grafito.

El uso de metales de tierras raras presenta ventajas y desventajas, mismas que se ennumeran a continuación:

- a) Sustituyen parte del magnesio con menor reactividad, disminuyendo la flama, humos y violencia de la reacción.
- b) Los sulfuros y óxidos estables formados por el cerio y otros elementos de tierras raras, junto con su comparativamente alto punto de ebullición, favorecen la disminución del grado de desvanecimiento del efecto nodulizante. Por otra parte, cerio y otras tierras raras, se pueden combinar con el magnesio en el tratamiento, para prolongar el tiempo de permanencia del hierro tratado, sin causar deterioro del nódulo.
- c) En la producción del hierro nodular, las inclusiones han sido una seria causa de rechazo en ciertos tipos de hierros de secciones pesadas principalmente. Las inclu-

siones son causadas por la formación de silicatos, sulfuros y óxidos de magnesio resultantes del tratamiento con magnesio. Si aproximadamente el 40% del magnesio adicionado se sustituye con cerio y otras tierras raras, la condición para la formación de inclusiones se reduce, ya que los óxidos y sulfuros formados tienen gravedades específicas que hacen posible su eliminación en la escoria.

Las desventajas que se presentan con el uso de estos elementos son las siguientes:

- a) Los procedimientos analíticos son inexactos para la determinación de los niveles de tierras raras obtenidos.
- b) Tratamientos basados en tierras raras pueden conducir a la flotación de carbón y al aumento de carburos, por tanto, es necesario tener conocimiento del nivel de elementos nocivos en orden a determinar la cantidad de tierras raras que es necesario adicionar.

1.3.5 INOCULACION

La inoculación es la parte esencial del proceso en la producción de hierro nodular.

El propósito de la inoculación es ayudar a proveer los suficientes lugares de nucleación para que el carbono precipite exactamente como grafito y no como carburo de hierro; en otras palabras, la inoculación es una forma de promover la cristalización o la formación de esferoides

de grafito resultantes del tratamiento con magnesio. - - Hierros tratados son casi completamente carbúricos (blancos) si no se inoculan adecuadamente. Por tanto, la inoculación se debe llevar a cabo con la misma precisión y cuidado que el tratamiento con magnesio.

Materiales para la inoculación. Ferrosilicio de un grado u otro es, de hecho, el agente de inoculación utilizado.

La naturaleza exacta del efecto de inoculación en hierro gris y hierro nodular y el papel desempeñado por el inoculante no está completamente entendido y es aún investigado. Sin embargo, se ha reconocido que el ferrosilicio no aleado es totalmente inefectivo como agente inoculante en algunos tipos de fundiciones. Esto sugiere que el elemento activo de inoculación no es solamente el silicio, sino cualquiera de los elementos contenidos en la aleación o bien, alguno de los elementos formados o compuestos generados cuando la aleación se añade al metal fundido. Se cree que los agentes inoculantes activos en la aleación son el calcio y el aluminio (4).

El inoculante más ampliamente utilizado es ferrosilicio al 75%, su composición, así como la de los otros agentes inoculantes comunes se muestran a continuación:

	% Si	% Ca	% al
FeSi al 75%	73-78	0.5-1.5	1.5 máx.

FeSi al 85%	83-88	0.5-1.5	1.75 máx.
calcio-silicio	63	31	0.75% máx.

Para asegurar la máxima consistencia se recomienda usar estos inoculantes en tamaño de partícula de 3/8 de pulgada para que fácilmente vayan dentro del metal líquido.- El inoculante debe estar distribuido de tal forma que el metal, en su totalidad sea afectado.

Una buena práctica de inoculación que se ha desarrollado últimamente, consiste en añadir pequeñas cantidades de inoculante de tamaño de partícula más pequeño siguiendo a la inoculación inicial, como una forma de asegurar estructuras. La eficacia de la inoculación disminuye al aumentar la temperatura a la cual se realiza. De aquí que la post o reinoculación sea más efectiva simplemente porque se lleva a cabo a una temperatura disminuida por el efecto enfriador de la inoculación inicial.

En la práctica, algunas medidas que se llevan a cabo con objeto de mejorar la inoculación son las siguientes:

a) La inoculación del hierro nodular es siempre llevada a cabo después del tratamiento con magnesio, usualmente adicionando el inoculante al chorro de metal que va cayendo a la olla de vaciado para prevenir el efecto de desvanecimiento.

Otra práctica consiste en agregar las dos aleaciones juntas; la alta temperatura de nodulización y la violenta

agitación disipan el efecto de la inoculación.

Sin embargo, la diferencia entre las dos prácticas no es considerable y alguna desventaja puede compensarse por la subsecuente reinoculación.

b) El ferrosilicio con 50% y 75% de silicio es tan efectivo como la aleación original de 85% de silicio. Una consideración importante es su menor costo.

c) La adición usual de inoculante está dentro de los rangos de 0.5 a 1% del metal a tratar. La reinoculación emplea menos material.

Por último, algunas variables que afectan la acción y el resultado de la inoculación son: temperatura del metal, tiempo de permanencia, cambio de la olla de vaciado y manera de adicionar el inoculante.

Hasta aquí se han tratado las tres etapas de que consta el proceso de producción del hierro nodular; desulfurización, nodulización e inoculación. Sin embargo, la exposición resulta incompleta ya que aún no se ven los aspectos que se presentan y los controles que normalmente se efectúan en la práctica diaria.

En el siguiente inciso se intentará centrarnos en estos puntos de especial importancia.

1.3.6 PRACTICAS DE CONTROL EN LA PRODUCCION DE HIERRO NODULAR.

Existe un cierto número de factores que influyen en la

obtención de un hierro nodular con estructura aceptable. Por tanto es imprescindible establecer una serie de controles que nos aseguren de alguna forma, que dichos factores están dentro de los límites establecidos. Entre los factores a considerar están: composición química del metal, temperatura, método de tratamiento, tipo y cantidad de aleación utilizada, etc.

Así mismo, es importante mencionar la supervisión en el tren de moldeo, en el área de vaciado y en el área de fu si ón, ya que del factor humano depende en gran parte, el lograr una buena práctica de tratamiento que repercutirá en la obtención de un hierro nodular de buena calidad.

De los factores mencionados, la composición química del metal líquido merece especial atención, ya que determina r á el tipo de estructura obtenida en la pieza en estado bruto de colada y, por tanto, sus propiedades mecánicas. Hay un grupo de elementos, cuya fuente normal es el hie rr o líquido, que causan la formación de un grafito no aceptable y disminuyen o cambian drásticamente las propie dades mecánicas del metal.

Algunos de estos elementos son el aluminio, plomo, titanio y bismuto. Cuando se da la debida consideración a la influencia de los elementos estabilizadores de carburos y a los elementos que forman grafito laminar, estrellado o alguna otra forma degenerada, se hace evidente que la com

posición química del metal líquido requiere un control muy estrecho si se pretende obtener propiedades mecánicas consistentes en la fundición. La fuente principal de contaminación son los materiales de carga. Deberán tener un alto grado de pureza y poseer un bajo nivel de elementos que actúen en detrimento de la formación de grafito esferoidal. Esta práctica debe seguirse aún cuando el uso de tierras raras reduce considerablemente la influencia de los elementos promotores de hierro con grafito vermicular.

Los materiales de carga utilizados en la producción de hierro nodular son: arrabio, chatarra de acero, retornos de hierro nodular, ferroaleaciones y carburo de silicio. El arrabio, aunque relativamente caro, contribuye significativamente a la regulación de la composición química. Con el arrabio se tiene además, otras ventajas como son: buena respuesta a la inoculación, estructura microscópica y propiedades invariablemente buenas.

Otro componente de la carga es la chatarra de acero. Algunas consideraciones acerca de su utilización como material de carga son las siguientes:

- a) Pérdidas por manipulación y oxidación.
- b) Menor duración del refractario en los hornos debido al aumento de escoria.
- c) Menor velocidad de fusión.

d) Mayor cantidad de rechazos.

A pesar de éstas desventajas, el uso de la chatarra de acero se incrementará ya que su oferta es abundante y, esto es discutible, resulta más barata que el arrabio. Normalmente la carga consiste de arrabio y de chatarra de acero y la proporción de cada una se fija de acuerdo a estándares internos para obtener una adecuada composición química.

Las ferroaleaciones (ferrocromo, ferrosilicio y ferromanganeso) y el carburo de calcio, son componentes normales en la carga durante la fabricación del hierro nodular. Las ferroaleaciones se adicionan para ajustar el análisis químico dentro del baño líquido, por tanto, es necesario que se obtengan del proveedor con un análisis químico completo. El empleo del carburo del calcio reduce la probabilidad de que aparezcan carburos en la colada.

Otro factor importante, que se ha tratado anteriormente es la temperatura. Una alta temperatura favorece la formación de grafito no esferoidal, mientras que una temperatura demasiado baja resulta en la formación de inclusiones de escoria como consecuencia de la mayor cantidad de magnesio retenido. La elección de la temperatura, depende del tipo, tamaño y forma de las piezas producidas. Generalmente, piezas de tamaño considerable y de forma relativamente complicada, requieren de una temperatura de

vaciado alta.

La pérdida de temperatura depende, entre otras cosas, del método de tratamiento empleado: los métodos de cuchara - abierta y sandwich causan bajas pérdidas de temperatura, mientras que en el método de inmersión hay una severa - caída de temperatura.

La recuperación del magnesio para aleaciones Mg-Ni-Si, - es aproximadamente 60% a 1380°C, mientras que a 1490°C, - la recuperación es de 40% aprox. Ya que el nivel de mag- nesio necesario para producir un hierro con 90% o más de grafito esferoidal es de 0.03 a 0.04%, se puede deducir - la gran importancia que tiene un adecuado control de la - temperatura.

El control, en la práctica diaria de la fundición, inclu- ye también el tiempo. Es una consideración muy importan- te por el efecto de desvanecimiento o pérdidas graduales. Son tres tipos de desvanecimiento que se experimentan du- rante la producción de hierro nodular:

- a) Desvanecimiento del magnesio.
- b) Desvanecimiento del efecto nodulizante.
- c) Desvanecimiento del efecto de inoculación.

Aunque los tres son afines, el efecto de cada uno se pue- de evaluar o determinar en forma independiente.

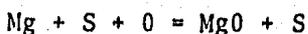
Desvanecimiento de magnesio. La proporción de pérdidas de magnesio para metal fundido se reporta como 0.001% por mi-

nuto a 1480°C (2). A mayor temperatura, el desvanecimiento del magnesio ocurre más rápidamente. La pérdida gradual del magnesio se relaciona directamente con el desvanecimiento del efecto nodulizante.

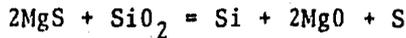
Aunque todavía no se ha establecido un método aceptable de medición del grado de nodulización se ha encontrado (3) que la pérdida de nodularidad del grafito esferoidal y su transformación a grafito vermicular no ocurre gradualmente con el tiempo de permanencia, de una manera similar a la pérdida de magnesio. Se ha encontrado que la pérdida de nodularidad se mantiene hasta que la disminución del nivel de magnesio rebasa un nivel crítico y en éste punto la nodularidad decrece rápidamente a cero. Este efecto aún no se estudia con gran detalle, pero el nivel crítico de magnesio se cree que está entre 0.015 y 0.025%.

En la práctica de fundición, tanto el desvanecimiento del efecto nodulizante como el de inoculación, suceden al mismo tiempo por estar íntimamente ligados.

Investigaciones recientes indican que el desvanecimiento es un fenómeno bastante complicado (2). Su componente más simple es la pérdida de magnesio por oxidación o por combinación con el azufre. La reacción más probable sería:



Si la fuente de oxígeno fuera un óxido, por ejemplo, sílice, las reacciones serían:



En la velocidad de desvanecimiento influyen algunos factores:

- a) El contenido inicial de magnesio: cuanto más alto, más rápido es el desvanecimiento.
- b) Alta temperatura implica más rápido desvanecimiento.
- c) La manipulación de la escoria: con cuanto mayor rapidez se retire la escoria, menor será el grado de desvanecimiento.

Desvanecimiento del efecto de inoculación. El desvanecimiento del efecto inoculante se manifiesta por una disminución del número de nódulos por mm^2 y por el deterioro de la forma del grafito.

Este desvanecimiento no puede explicarse por un contenido demasiado alto de azufre o por un contenido inadecuado de magnesio, ya que empieza después de haberse completado el tratamiento y prosigue hasta que aparece el grafito vermicular.

En la práctica diaria, la determinación de la estructura del grafito es el instrumento de control más importante e ineludible.

Se han presentado ya los factores que afectan, de alguna

manera, la obtención de una estructura aceptable. Se debe vigilar que no se mezclen piezas de diferentes coladas hasta que no se haya comprobado que la estructura del grafito es satisfactoria. Esto quiere decir que en cada colada se debe tomar una muestra representativa para su examen metalográfico; generalmente la muestra se toma cuando se ha vaciado una tercera parte del metal fundido, de la olla a los moldes.

Una buena estructura de grafito esferoidal en la muestra, es garantía de la misma en la pieza colada. El porcentaje de grafito de forma aceptable, o nodularidad, se exige que sea como mínimo 90%, el resto puede ser de forma II y III, según norma ASTM. La presencia de un 5% o menos de grafito laminar intercelular es muy nociva para las propiedades mecánicas y la colada, por tanto, deberá rechazarse.

El número de nódulos es un buen indicador de la calidad de la pieza. Un recuento de 100 nódulos por mm^2 se considera un promedio aceptable. Por medio de un método comparativo puede determinarse rápidamente la cantidad de nódulos utilizando láminas patrones de la AFS, que representan un número de nódulos que va desde 25 a 250 nódulos por mm^2 .

Como es de esperarse, en la producción diaria de hierro nodular, ocurren siempre problemas, algunos sencillos y

otros de difícil solución, que es imperativo resolver sobre la marcha. No debe olvidarse que el volúmen de producción no está reñido de ninguna manera con la calidad del producto obtenido. De aquí que el proceso debe llevarse a cabo, en todas sus operaciones, desde la más simple hasta la más complicada con una sola idea: productividad.

De esto es responsable todo el personal ligado de alguna forma a la producción.

2.1 HIERROS VERMICULARES

En la introducción de este trabajo se dijo que los hierros vermiculares eran considerados intermedios entre los hierros grises y los hierros nodulares. Se mencionó que actualmente son considerados como una alternativa para ciertas aplicaciones en la industria, ésto como consecuencia de los estudios realizados en distintos centros de investigación.

En las siguientes líneas se tratará sobre la estructura, propiedades y métodos de producción de los hierros vermiculares, basándose exclusivamente, en la revisión de los artículos especializados en el tema. Al final del trabajo se proporciona la bibliografía consultada.

2.2 ESTRUCTURA

La estructura del hierro vermicular consiste en hojuelas o laminillas acortadas y gruesas con terminaciones redondeadas, de aquí que se les conozca también como hierros con grafito compacto.

La verdadera naturaleza de la estructura solo puede ser apreciada utilizando un microscopio electrónico de barrido. P.C. Liu Y C.R. Loper (ref. 10) observaron que las partículas de grafito están interconectadas a una estructura ramificada, de alguna manera similar a las hojuelas en las fundiciones grises. Así mismo, han observado que las partículas de grafito no están separadas unas de otras

como sucede con los esferoides en el hierro nodular.

Como ya se mencionó, el grafito vermicular es corto, fragmentado y de forma irregular con los bordes redondeados. El cociente longitud / anchura es de 2 a 10. En cambio, el grafito en hierro gris es largo y recto, con orillas delineadas y con un cociente de longitud a grosor superior a 50.

Por otra parte, se debe mencionar que las estructuras con grafito vermicular no son nuevas, ya que se han producido de varias formas, siendo descritas con diferentes nombres. La primera referencia se tiene en 1948, cuando Morrogh, investigando la producción de grafito esferoidal por cerio, produjo grafito vermicular por la adición de este elemento a hierros hipo e hipereutécticos y describió la estructura como grafito casi laminar.

Por lo que respecta al mecanismo de crecimiento para grafito vermicular, diferentes autores (10 - 12) han propuesto sus teorías sin llegar a un acuerdo. Las hipótesis varían desde las que afirman que el crecimiento del grafito empieza cuando hay un contacto con el líquido, hasta las que sugieren que el crecimiento del grafito ocurre debido a una disolución parcial de la capa austenítica alrededor de los esferoides de grafito.

Uno de los métodos de obtención de estructuras con grafito vermicular se basa en adicionar una aleación magnesio-

-titanio.

Se cree ⁽¹¹⁾ que la superficie altamente activa del titanio, en contacto con las partículas de grafito, evita la formación de nódulos y promueve la forma vermicular standard. La influencia del titanio sobre la forma del grafito puede explicarse por su adsorción sobre la superficie del mismo, oponiéndose con esto al efecto nodulizante del magnesio. La modificación se manifiesta primero como una redondez de las orillas del grafito en hojuelas, seguido por un engrosamiento y acortamiento general, resultando todo esto en hojuelas muy compactas mientras permanecen interconectadas dentro de la celda autéctica. La teoría anterior, al igual que las demás, no tiene plena aceptación. Surgen discusiones en relación a ciertos aspectos, sobre todo en lo que se refiere a mecanismo de crecimiento del grafito y a la influencia de la morfología del grafito sobre el comportamiento de las piezas de hierro vermicular.

Sin embargo, se tiene definida y caracterizada la estructura de los hierros vermiculares, esto representa una base para investigaciones posteriores que lleven a entender completamente el comportamiento de éstos materiales, principalmente en condiciones normales de trabajo. Esto es necesario para descubrir nuevas aplicaciones que hagan posible el uso generalizado de las fundiciones con grafito

vermicular.

2.3 PROPIEDADES MECANICAS

Las propiedades mecánicas de los hierros con grafito vermicular normalmente se sitúan como intermedias entre las propiedades del hierro gris y del hierro nodular.

Esto obedece al hecho de que las partículas de grafito son compactas y tienen bordes redondeados y confieren, para una composición dada, una mayor resistencia a la tracción y una más alta resistencia a la fractura, además de una mayor ductilidad que la de los hierros grises. Por otro lado, ya que el grafito está interconectado, no es tan resistente y tan dúctil como el hierro nodular.

El engrosamiento y la redondez del grafito en el hierro vermicular reducen la concentración de tensiones internas desarrolladas en la interfase matriz-grafito, resultando, en propiedades de tracción más altas que las logradas en el hierro gris de matriz similar.

Sin embargo, la naturaleza interconectada del grafito vermicular resulta en una menor continuidad de la estructura de la matriz que la alcanzada en los hierros nodulares. Por consiguiente, mientras que las propiedades físicas y mecánicas del hierro vermicular, podrían esperarse más dependiente de la estructura de la matriz que en el hierro gris, no son tan independientes del grafito como en el hierro nodular.

Resultados de pruebas (9) indican que los hierros vermiculares comparados con los hierros grises, exhiben no solamente una mayor resistencia a la tracción, tenacidad y ductilidad, sino también superior tiempo de fatiga, resistencia al impacto y propiedades a altas temperaturas.

Con respecto a los hierros nodulares, mientras la resistencia a la tracción y el límite elástico de los hierros vermiculares pueden alcanzar los niveles del hierro nodular grado ferrítico, exhiben una resistencia al impacto y a la fatiga considerablemente menores. Sin embargo, el hecho de que el hierro vermicular suministre una mayor capacidad de amortiguamiento y una mayor conductividad térmica que el hierro nodular, la hace conveniente para ciertas aplicaciones.

Las siguientes tablas (8) muestran una comparación de las propiedades del hierro vermicular, hierro gris y hierro nodular.

HIERRO CON GRAFITO

VERMICULAR	PROPIEDAD	HIERRO GRIS
*	Resist. a la tracción	
*	Límite elástico	
*	Ductilidad	
*	Módulo de elasticidad	
*	Fatiga	

	*	Resis. al impacto	
	*	Prop. a temp. ele vadas	
		Conductividad tér mica	*
		Capacidad de amor tiguamiento	*
		Dureza Brinell	*
HIERRO CON GRAFITO VERMICULAR		PROPIEDAD	HIERRO NODULAR
		Resistencia a la tracción	*
		Límite elástico	*
		Ductilidad	*
	*	Módulo de elasti cidad	
		Fatiga	*
	*	Resistencia al im pacto	*
	*	Prop. a temp. ele vadas	
	*	Conductividad tér mica	
	*	Capacidad de amor tiguamiento	

El hierro vermicular exhibe una interrelación directa entre las propiedades mecánicas y la estructura de la matriz, que ha sido determinada como una función de la composición química y del tamaño de sección de la pieza colada.

Experimentos y pruebas realizadas (8) muestran que los hierros con grafito vermicular pueden producirse a partir de hierros base con composición química de hierro nodular, teniendo un apropiado control de azufre. Variaciones en los niveles de manganeso, fósforo, níquel, cromo y molibdeno dentro de los siguientes rangos no afectan significativamente la facilidad para formar grafito con estructura vermicular:

Mn:	0.26 - 0.31%
P:	0.035 - 0.045%
Ni:	0.10 - 0.11%
Cr:	0.04 - 0.08%
Mo:	0.02 - 0.03%

El silicio es un elemento de gran importancia en las fundiciones con grafito vermicular. A altos niveles de silicio (2.95%) se alcanza una alta nodularidad y a contenidos bajos de silicio (1.5%) aparecen carburos. En el primer caso, la mayor nodularidad alcanzada se traduce en una disminución de la cantidad de grafito vermicular.

En piezas coladas con tamaños de sección de 13 mm. (1/2 pulg.) y mayores, la solidificación de la estructura es relativamente insensible al tamaño de sección (excepto para los efectos del silicio mencionados anteriormente). La estructura de la matriz es igualmente dependiente del contenido de silicio, excepto cuando se agrega algún ele-

mento estabilizador de perlita, cobre, por ejemplo. Por tanto, es importante controlar el contenido de silicio y el nivel de elementos estabilizadores de perlita para lograr una buena estructura de matriz en la condición de colada.

Los valores de dureza de los hierros vermiculares en la condición ferrítica son inferiores a los mostrados por los hierros nodulares, pero, en la condición perlítica, los valores de dureza son equivalentes.

PROPIEDADES DE TRACCION. Relacionando las propiedades de tracción con la estructura de la matriz, se pueden agrupar como sigue:

- A) Estructura de matriz de 14 - 50% de perlita:
- | | | |
|---------------------------|---|---------------------|
| Resistencia a la tracción | = | 50,000 - 60,000 PSI |
| Límite elástico | = | 37,500 - 50,000 |
| Elongación | = | 2 - 4.5% |
| Dureza | = | 145 - 180 HB |
- B) Estructura de matriz de 88 - 97% de perlita:
- | | | |
|---------------------------|---|---------------------|
| Resistencia a la tracción | = | 73,000 - 75,000 PSI |
| Límite elástico | = | 54,000 - 56,000 |
| Elongación | = | 2% |
| Dureza | = | 226 - 229 HB |

Como se ha mencionado, estas propiedades de tracción son intermedias entre las del hierro nodular y las del hierro gris de matriz equivalente.

PROPIEDADES DE IMPACTO. En comparación con los hierros nodulares, los hierros vermiculares presentan una resistencia al impacto aproximadamente igual, en la condición perlítica.

MAQUINABILIDAD. Los valores de maquinabilidad para hierros vermiculares son intermedios entre los valores del hierro gris y del hierro nodular. El grado de maquinabilidad parece ser más influenciado por la dureza que por la morfología del grafito.

PROPIEDADES DE FATIGA. La fatiga se define como el número de ciclos a los cuales un material es capaz de resistir bajo condiciones de tensión axial. La estructura ferrítica (20% de perlita) exhibe una resistencia de - - aproximadamente 0.45, mientras que la estructura perlítica (97% de perlita) exhibe una resistencia a la fatiga de aproximadamente 27,750 PSI o una relación de resistencia de 0.37. Estas relaciones de resistencias son similares a las presentadas por los hierros nodulares.

CONDUCTIVIDAD TERMICA. A causa de la red interconectada de partículas de grafito en hierros con grafito vermicular, su conductividad térmica es solo ligeramente inferior a la de los hierros grises, pero mayor que la de los hierros nodulares. La combinación de una buena conductividad térmica y una relativamente alta resistencia del hierro vermicular, lo hacen valioso para ciertas aplicacio-

nes que involucran servicios a altas temperaturas, tales como lingoteras, y por tanto, considerable resistencia a la oxidación. Pruebas ⁽¹⁴⁾ han demostrado que su resistencia es casi igual a la de los hierros grises de composición similar, a una temperatura de 500°C. A 600°C, su resistencia a la oxidación es superior a la de los hierros grises.

2.4 PRODUCCION

Los hierros vermiculares se han producido de manera experimental (7,8,9) en los laboratorios de experimentación - desde hace algunos años, pero un examen completo de la estructura y las propiedades del material, no fué hecho sino hasta hace poco tiempo.

Desde su descubrimiento ⁽⁷⁾ se reconoció que poseían una mayor resistencia comparada con los hierros grises y un poco menor que la de los hierros nodulares. Debido, principalmente, a un mejor estudio de las propiedades de los hierros vermiculares y de sus potenciales aplicaciones, se ha intentado producirlos comercialmente. La habilidad para producir fundiciones de hierro con grafito vermicular es, en muchos aspectos, similar a la de otros tipos de fundiciones de hierro. Actualmente, hay cierto número de métodos de producción de hierro vermicular, siendo los más importantes los siguientes:

a) subtratamiento de hierro nodular.

- b) tratamiento con aleaciones de tierras raras.
- c) tratamiento con aleaciones de magnesio-titanio, usando chatarra de hierro nodular.

De estos, los dos últimos son los más aceptados. En ambos procesos se obtiene una buena estructura de grafito vermicular si se sigue la práctica establecida. Cualquier introducción de elementos nocivos hace necesaria una post-inoculación para suprimir carburos.

Debido a la relativa facilidad de producción y de obtención de microestructuras, el tratamiento con aleación de magnesio-titanio se prefiere sobre el tratamiento que usa aleación de tierras raras. Sin embargo, en la práctica - hay algunos detalles, por ejemplo, debido al bajo punto de vaporización del magnesio, la reacción es altamente - exotérmica y, en consecuencia, el tratamiento va acompañado de una llama profusa. Esta desventaja se recompensa - por la relativamente pobre habilidad o facilidad de las - aleaciones de tierras raras para convertir grafito en hojuelas a grafito vermicular, además de que las tierras - raras son potentes promotores de carburos y tienen un limitado rango de tratamiento.

Hierros vermiculares tratados con aleaciones de tierras raras muestran ⁽¹⁵⁾ trazas de carburos en secciones delgadas, mientras que en las secciones medias y gruesas - muestran dendritas aisladas y cerca de la superficie apa-

rece grafito esferoidal.

Por otra parte, el tamaño y distribución del grafito no es uniforme. Debe considerarse que el nivel de la aleación de tierras raras requerido es función del contenido de azufre del metal tratado. De lo anterior se deduce que los hierros vermiculares tratados con aleaciones de tierras raras son muy sensibles al tamaño de sección y presentan, además, una fuerte tendencia a formar carburos. En el tratamiento con aleación base mangesio-titanio, el tamaño y la distribución del grafito es regularmente uniforme.

En baños con bajo azufre inicial puede resultar un exceso de magnesio, el cual tiende a formar nódulos en cantidad que depende del nivel de azufre. Estos hierros se consideran sobretratados.

Por otro lado, hierros con alto contenido de azufre solidifican con casi un 100% de grafito vermicular. Esto es causado por una casi completa utilización del magnesio para reaccionar con el azufre, de tal manera que no hay magnesio suficiente para promover nódulos. Los hierros en este caso, se consideran subtratados.

El tratamiento con altos niveles de azufre incrementa la probabilidad de producir grafito compacto o vermicular y no obtener hierro gris o hierro nodular cuando el azufre está fuera de especificaciones. Un tratamiento incompleto

de nodulización provee un rango muy pequeño de formación de grafito vermicular y es, por tanto, una situación muy inestable, puesto que las transiciones estructurales pueden ocurrir aún más fácilmente con solo ligeras fluctuaciones en el contenido de azufre o en la adición de aleaciones.

La producción de hierro nodular y la de hierro vermicular, ésta, muy someramente, se han tratado por separado. Pocas diferencias, en cuanto a la práctica normal de tratamiento, saltan a la vista.

Es un hecho que cualquier método de producción requiere un control estrecho sobre las variables del proceso, de tal forma que éste sea consistente y confiable. Es también cierto que una práctica eficiente se obtiene solo después de haber controlado las variables mencionadas, y esto, por lo general, implica una serie de ensayos y ajustes en la práctica diaria. Relacionando las consideraciones anteriores con los métodos de producción de hierro vermicular, se puede suponer que estos no alcanzan aún la consistencia y confiabilidad necesarias. El conocimiento del comportamiento de las piezas con grafito vermicular bajo condiciones normales de trabajo es relativo y una mejora solo se podría conseguir como se mencionó antes, con una práctica continua. Por tanto, se hace necesario encontrar las interrelaciones entre la teoría -

y la práctica para hacer posible el reconocimiento de los hierros vermiculares como un material útil y confiable.

2.4.1. CONTROL DE CALIDAD DE LA FUNDICION

La producción de piezas coladas de hierro con grafito - vermicular requiere de un control en el proceso, similar al aplicado en la producción del hierro nodular o del - - hierro gris. Los principales requerimientos son:

- 1) Selección de materiales de carga adecuados y de origen conocido.
- 2) Control de contenidos de carbón y silicio para asegurar los requerimientos del nivel del carbón equivalente.
- 3) Exacto conocimiento del peso del metal a tratar y de su contenido de azufre.
- 4) Cálculo y pesado exacto de la adición de la aleación - apropiada de acuerdo con el contenido de azufre y con el peso del material a ser tratado.
- 5) Control de la temperatura de tratamiento. Muy alta temperatura resulta en una menor recuperación de magnesio. Muy baja temperatura puede inducir la formación de escoria y una estructura con grafito esferoidal.
- 6) Uso de moldes de buena calidad y núcleos de alta rigidez, con provisión de una adecuada alimentación del metal líquido.
- 7) No usar materiales de chatarra de diferente composición.

3. PARTE EXPERIMENTAL

3.1 EXPLICACION

En la parte experimental se intentará determinar el efecto que tienen sobre la estructura y sobre las propiedades de las piezas coladas, factores tales como la temperatura del metal líquido, tiempo de tratamiento, cantidad de agente nodulizante, etc. Es de notar que los factores a analizar son cuantificables, es decir, se manejan en la práctica diaria y pueden corregirse en caso necesario.

Para evaluar el efecto de los factores mencionados se siguieron varios tratamientos o coladas en el departamento de fundición de la planta de Automanufacturas, S.A. En cada tratamiento se hicieron las observaciones y se recabaron los datos de proceso, tales como, temperatura, composición química del metal líquido, tiempo de reacción, etc. De cada colada se tomó una muestra tal como lo señala la norma AFS y se realizó el estudio metalográfico correspondiente. Los datos que se obtuvieron en la metalografía (tipo de grafito, porcentaje de nódulos, carburos, etc.) se anotaron en una tabla.

Interrelacionando los datos y observaciones de proceso con los datos del estudio metalográfico se obtienen las condiciones de proceso que resultan en una estructura conocida. De los ocho tratamientos seguidos, dos resultaron con estructura vermicular.

Por otra parte se hace necesario determinar en que medida

cambian las propiedades mecánicas en las piezas que resultaron con estructura vermicular. Para ésto, se realizó el ensayo de tracción a las piezas que presentaban estructura vermicular y los resultados de las pruebas (límite elástico, resistencia a la tracción, elongación y dureza se comparan con los valores correspondientes para piezas con grafito esferoidal.

Por último se encontró conveniente presentar los datos y resultados en tablas para una mejor y más rápida visualización de los tratamientos estudiados.

3.2 LA ESTRUCTURA VERMICULAR EN LA PRODUCCION DEL HIERRO NODULAR

En la práctica de la fundición de piezas con grafito esferoidal, es posible obtener piezas con estructura vermicular si se manejan adecuadamente algunas condiciones de proceso.

Ahora bien, hay que aclarar que es lo que se pretende: - por una parte tenemos que las piezas con grafito vermicular son rechazables en la producción de hierro nodular. - Por otra parte se desea determinar las condiciones de proceso que nos lleven a obtener una estructura vermicular de manera consistente. De aquí que el enfoque de esta cuestión sea dirigido precisamente al estudio de estas condiciones de operación, mismas que pueden ser deducidas de lo tratado de la primera parte de la tesis. En

síntesis, los factores que pueden afectar la forma del grafito esferoidal y promover la estructura vermicular, son los siguientes:

- a) elementos de carga.
- b) tiempo de permanencia.
- c) temperatura.
- d) adición del agente nodulizante.
- e) contenido de azufre.

Aunque todos estos factores se han tratado ya, se intentará explicar su efecto, estableciendo la relación con la transformación de grafito esferoidal a grafito vermicular. Como podrá notarse en las siguientes líneas, en la práctica de la fundición es muy importante la labor del personal encargado de las operaciones involucradas en el proceso.

a) Elementos de carga. Se ha mencionado que entre los materiales de carga se encuentran las pacas de acero. Estos materiales son la principal fuente de elementos promotores de grafito vermicular (aluminio, titanio, cobre, etc.). De aquí que sea necesario un control estrecho sobre los materiales de carga con objeto de tener una composición química del metal líquido acorde a lo que se desea obtener.

b) Tiempo de permanencia. Este factor es muy importante debido al efecto de desvanecimiento. En la práctica, las

distintas operaciones de vaciado se realizan en lapsos de tiempo relativamente cortos; sin embargo, en ocasiones surgen problemas en el tren de moleo que impiden efectuar el vaciado del metal, permaneciendo éste en la olla de vaciado durante más tiempo; se puede esperar que ocurra en este lapso una transición en la forma del grafito que puede resultar en forma degenerada del mismo. Es evidente la importancia de una correcta coordinación entre el área de fusión y el área de vaciado. Una deficiente coordinación resulta en un riesgo mayor de obtener piezas con alguna forma insatisfactoria de grafito.

c) Temperatura. Otro factor que debe controlarse durante todo el proceso es la temperatura. En el metal líquido (baño), la temperatura debe estar entre 1490 - 1520°C, aprox. Aunque se recomienda trabajar en el límite superior con objeto de tener una buena fluidez, la probabilidad de obtener piezas con grafito vermicular aumenta sobre todo si las demás variables del proceso no se manejan adecuadamente. Existen formas de controlar la temperatura dentro de límites confiables. El personal encargado no debe vaciar cuando no esté seguro de que la temperatura es la correcta, aun bajo presiones de producción. Es preferible retardar un poco el ritmo de vaciado, que sacar tinas que se rechazarán más tarde.

d) Adición del agente nodulizante. Este factor y los anteriores están ligados entre sí. De nuevo es importante señalar el papel que juega la supervisión encargada de coordinar fusión y vaciado. Bajo nivel de magnesio y temperatura de vaciado correcta resultan en una estructura vermicular casi invariablemente. Sin embargo, el manejo de éstas dos variables solamente, no garantiza, de ninguna manera, que la estructura vermicular obtenida sea adecuada. Para lograr esto, es preciso manejar correctamente la interrelación de las diversas variables de proceso. De esto, se tratará más tarde, en alguna de las conclusiones.

e) Nivel de azufre. Se recomienda un hierro líquido con altos niveles de azufre con objeto de asegurar una estructura 100% vermicular al solidificar las piezas.

DISEÑO DE EXPERIMENTO.

Se trata de evaluar y determinar las condiciones de proceso que influyen, individualmente o en forma conjunta, en la obtención de piezas con estructura vermicular durante la producción de piezas con grafito esferoidal.

En base a observaciones y estudios en la práctica y a la información consultada, se ha optado por manejar algunas

variables de proceso y en torno a éstas, efectuar una serie de pruebas cuyo resultado nos conduzca al entendimiento de problemas. Estas condiciones son: temperatura del metal líquido, cantidad de agente nodulizante agregado y el tiempo de reacción del magnesio en la olla de vaciado. El manejo de estas variables conducen a otros datos que aportan, a su vez, elementos suficientes para emitir juicios.

Se realizaron ocho pruebas en el momento de producción normal de la planta, por tanto, se considera que las condiciones son más que representativas. En una serie de pruebas se buscó mantener la temperatura del baño en el límite inferior del rango permitido (1470°C) y se relacionó con una cantidad de noduloy 9C (material nodulizante) considerada alta para la cantidad de metal líquido (10.0 Kg.) tratada, lo anterior con objeto de evaluar su interrelación y su influencia en la estructura obtenida. Esto mismo, se hizo para otra serie de pruebas: temperatura media (1500°C) y cantidad regular de noduloy (9.0 Kg.) y temperatura alta (1520°C) y baja cantidad de noduloy (8.0 Kg.).

Por otra parte, se efectuó un análisis químico en cada tratamiento para ver el contenido de algunos elementos promotores de grafito vermicular y su posible contribución a la formación de estructura vermicular.

En cada tratamiento se tomó una muestra en el momento de

vaciar el metal líquido de la olla al molde y se le realizó una metalografía. Los resultados de la metalografía se pueden relacionar con las condiciones en que se llevó a cabo cada tratamiento y de esta manera comprobar el comportamiento seguido.

Los datos recabados y los resultados obtenidos se presentan en las tablas 1, 2 y 3.

La discusión de resultados se anota en las páginas siguientes.

DISCUSION DE RESULTADOS.

Los resultados obtenidos en la experimentación se muestran en las tablas 1, 2 y 3.

En la tabla No. 1 se anotan las condiciones de operación. Hay dos diferencias significativas en los tratamientos 7 y 8: el tiempo de reacción del magnesio es menor comparado con los demás tratamientos; es posible que la cantidad de magnesio agregado haya sido insuficiente para la cantidad de metal líquido en la olla y, por consiguiente, para alcanzar una buena nodularidad. Además la temperatura del metal líquido en el horno durante el tratamiento No. 8 puede considerarse alta (1520°C).

En la tabla 2 se muestran los resultados de la metalografía practicada a probetas representativas de cada tratamiento. Los tratamientos 7 y 8 mostraron una estructura vermicular, aunque el No. 7 mostró cierta cantidad de nódulo, 20%, el No. 8 mostró una estructura completamente vermicular. Esto viene a corroborar que la observación referente a la temperatura alta en esta prueba ayudó a que la pérdida de magnesio fuese aún mayor y no permitiera siquiera una baja cantidad de nódulos.

La composición química del metal líquido de cada tratamiento se muestra en la tabla No. 3. Los niveles de aluminio en los tratamientos 7 y 8 se reportaron en 0,038% y aunque está dentro del rango permitido, es superior a

los mostrados en los otros tratamientos. El titanio es otro de los elementos promotores de grafito vermicular - se reporta con un bajo contenido. Se considera que ambos elementos, aluminio y titanio, no influyeron en la obtención de la estructura vermicular.

El azufre se reporta en 0.034%, nivel que está muy arriba de lo aceptable ($S=0.01\%$ máx.). Se sabe que el azufre se combina con el magnesio, razón por la cual, se busca - mantener bajo su contenido mediante una buena práctica de desulfurización, casi siempre utilizando carburo de calcio. Seguramente esto no ocurrió en los tratamientos 7 - y 8 y en consecuencia, la casi completa utilización del - magnesio para reaccionar con el azufre, no le permitió - llevar a cabo su función como nodulizante, lo que resultó en una estructura vermicular. Es de suponer que el alto nivel de azufre en el hierro líquido fue debido a un error del encargado de adicionar el agente desulfurante.

Por tanto, tenemos que hubo varios factores que influyeron, ya en forma individual, ya en conjunto, en la obtención de una estructura vermicular durante la producción - de piezas de hierro nodular: - factor humano.

- altos niveles de azufre.
- temperatura en el límite superior aceptable.

y alguna evidencia durante el proceso: el tiempo de reac-

ción del magnesio en la olla.

Se viene a confirmar experimentalmente lo que se ha mencionado en este trabajo. Las conclusiones se escriben a continuación.

C O N C L U S I O N E S.

En todo proceso intervienen una serie de factores que influyen en la eficiencia del mismo. Se puede afirmar que hay dos clases principales: los factores técnicos y los factores operativos.

En lo que se refiere a la producción de piezas de hierro nodular, se pueden mencionar como factores técnicos a la influencia de la temperatura, la composición química, tiempos de tratamiento, etc., es decir, a factores cuyo manejo implica un conocimiento teórico de la forma en que pueden influir sobre un proceso dado.

De esta manera, es posible dictar una serie de controles de proceso cuyo objetivo sea mejorar sustancialmente la calidad del producto obtenido y al mismo tiempo aumentar los índices de eficiencia del proceso.

Por otra parte se tienen los factores operativos. Estos involucran todas aquellas operaciones que requieren, en un momento dado, de una labor manual. Estas operaciones forman parte del proceso y son, por tanto, llevadas a cabo rutinariamente por el personal encargado.

Como es de esperarse, una falla cualquiera en alguna de -

estas incide negativamente en el proceso provocando una disminución en la calidad del producto y en la eficiencia del proceso.

Es obvia la relación existente entre estas dos clases de factores; de aquí que las conclusiones a las que se ha llegado giren en torno a esta relación.

- 1a. El grafito vermicular es una estructura especial que puede aparecer durante el proceso de producción de hierro nodular como consecuencia de un manejo inadecuado de algunas variables de operación.
- 2a. Los factores técnicos que inciden, de alguna manera, en la formación de grafito vermicular durante la producción de hierro nodular son: alto nivel de azufre y de elementos promotores de grafito vermicular (titanio, aluminio, cobre, etc.) en el metal líquido, temperatura de tratamiento elevada, cantidad limitada de magnesio y tiempos de tratamiento demasiado largos.
- 3a. Durante la producción de piezas de hierro nodular, una estructura vermicular es indeseable, debido principalmente a que en esta condición, las piezas presentan distintas propiedades a las especificadas para la utilización, en condiciones normales de servicio, de las piezas con grafito esferoidal. En este caso, los factores operativos que pueden provocar una es-

estructura vermicular, son los siguientes: error en los análisis químicos de los materiales de carga, error en la medición de temperatura, vaciado precipitado del metal, por presiones de producción, práctica incorrecta de vaciado del metal del horno a la olla, práctica incorrecta de adición de nodulizante y mala coordinación entre las áreas de fusión y moldeo.

- 4a. Referente al segundo capítulo de la tesis, de la información consultada puede concluirse que, aunque los hierros con grafito vermicular o hierros vermiculares poseen algunas propiedades aceptables (capacidad de amortiguamiento, conductividad térmica, propiedades a temperaturas altas, etc.) aún no se define perfectamente su comportamiento bajo condiciones de servicio y son, por tanto, objeto de estudio, todavía en fase experimental. Por otra parte, no se ha establecido un método de producción suficientemente consistente y confiable y por tanto su producción comercial y su utilización son aún muy limitadas. Es de esperarse que esta situación se modifique sustancialmente a medida que el conocimiento sobre estos materiales sea más completo.

R E C O M E N D A C I O N E S . Tomando como base lo anteriormente expuesto se pueden dictar las siguientes recomendaciones:

1a. Sistematizar las operaciones. Esto puede conseguirse con la ayuda de un diagrama de operaciones. Este diagrama lo tendría que realizar un equipo técnico que conozca a fondo el proceso. Sería conveniente que este equipo estuviera asesorado por personal de la planta en el aspecto de viabilidad de alguna operación práctica. También es necesario concientizar a los operadores de tal forma que vean en su labor no como un trabajo rutinario e intrascendente, sino como una labor que forma parte de un proceso y cuya importancia es tal, que su correcta o incorrecta ejecución influye directamente en la calidad del producto y en la eficiencia del proceso.

2a. Automatizar las operaciones. Incluyen, por supuesto, las operaciones que sean susceptibles de ello. Con esto se consigue un aumento en la eficiencia del proceso.

Las anteriores recomendaciones podrían aplicarse a cualquier proceso. Ahora bien, las recomendaciones que se dan a continuación, involucran operaciones que pueden considerarse normales o rutinarias en algún proceso de obtención de piezas con grafito vermicular. Es de notarse que estas mismas pueden aplicarse para el proceso de fabricación de hierro nodular.

- 1a. Controlar debidamente la composición química de la materia prima y del metal en proceso.
- 2a. Controlar estrechamente las principales variables del proceso: temperatura del baño, tiempo de tratamiento, cantidad de magnesio, nivel de azufre y de elementos promotores de grafito vermicular.
- 3a. Es necesario tener una correcta coordinación entre las distintas áreas de fundición: fusión, vaciado y moldeo.

TABLA No. 1

PRUEBA	TEMP. DEL BAÑO (°C)	TEMP. DE VACIADO (°C)	TIEMPO DE REACCION (seg)*	TIEMPO DE REACCION (min)**	NODULOY (Kg)	INOCULANTE Fe-Si (Kg)
1	1490	1380	25	2'04"	10.0	4.0
2	1480	1390	15	2'	10.0	4.0
3	1510	1385	10	2'43"	9.0	4.5
4	1500	1375	07	2'	10.0	4.0
5	1490	1360	120	2'03"	9.0	4.5
6	1500	1365	10	2'02"	8.5	4.5
7	1510	1380	07	1'27"	8.5	4.5
8	1520	1385	12	1'25"	8.0	4.5

(*) Tiempo que tarda en empezar la reacción en la olla de vaciado.

(**) Tiempo que dura la reacción del magnesio en la olla.

TABLA No. 2

PRUEBA	% DE NODULOS	GRAFITO TIPO I	GRAFITO TIPO II	GRAFITO TIPO III	NODULOS/mm ²
1	92	80	12	8	125
2	93	83	10	7	125
3	95	85	9	6	125
4	93	83	10	7	175
5	92	80	11	9	120
6	94	85	10	5	150
7	PRESENTA GRAFITO VERMICULAR EN SU ESTRUCTURA, CON UN 20% DE NODULOS.				
8	PRESENTA GRAFITO VERMICULAR EN SU ESTRUCTURA.				

TABLA No. 3

PRUEBA	Cu	Cr	Al	Mo	Ti	C	Mn	Si	P	Mg	S
1	0.24	0.029	0.0018	0.0080	0.0019	3.84	0.34	1.25	0.026		
2	0.24	0.036	0.0018	0.0080	0.0019	3.84	0.34	1.25	0.026		
3	0.17	0.060	0.0022	0.0074	0.0019	3.68	0.32	1.26	0.020		
4	0.19	0.045	0.0016	0.0080	0.0017	3.96	0.30	1.28	0.026		
5	0.27	0.058	0.0028	0.0076	0.0012	3.92	0.34	2.58	0.034	0.048	
6	0.29	0.065	0.0020	0.0078	0.0020	3.98	0.30	1.39	0.034		
7	0.17	0.038	0.038	0.0060	0.0010	3.70	0.34	2.73	0.032	0.035 (final)	0.034
8	0.16	0.038	0.038	0.0060	0.0010	3.70	0.34	2.73	0.032	0.035 (final)	0.034

TABLA No. 4

PROPIEDADES MECANICAS

DATOS

Tratamiento	Carga	Area Probeta	Diámetro Probeta	Long. Inicial	Diámetro Huella
7	11,000 lbs.	0.194 in ²	498 milésimas	2.000 in	4.3 m.m.
8	11,700 lbs.	0.198 in ²	502 milésimas	2.000 in	4.2 m.m.

VALORES OBTENIDOS

Tratamiento	L.E.	R.T.	Elong.	Elong. %	Dureza
7	44,587 PSI	56,701 PSI	60 milésimas	3.0	197 HB
8	40,150 PSI	59,100 PSI	70 milésimas	3.5	207 HB

COMENTARIOS: Los valores obtenidos para las propiedades mecánicas corresponden aproximadamente a los tomados de la literatura para hierros vermiculares ferrítico-perlíticos. Estos valores son:

RT = 50,000 - 60,000 PSI

L.E. = 37,500 - 50,000 PSI

Elongación = 2 - 4.5 %

Dureza = 145 - 180

Si se comparan con las propiedades que deben presentar las piezas de hierro nodular grado D 4512:

RT = 65,000 PSI

Dureza = 150 - 217

L.E. = 45,000 PSI

(4.8 - 4.1 D.H)

Elong. = 12 %

Vemos que a excepción de los valores de dureza que son equivalentes las demás propiedades son inferiores a las exigidas para piezas de hierro nodular para condiciones normales de servicio.

APENDICE I: EFECTOS DE ALGUNOS ELEMENTOS DE ALEACION
ELEMENTOS CON TENDENCIA A FORMAR ESFEROIDES

ELEMENTO	LIMITE GRADO FERRITICO	LIMITE GRADO PERLITICO	FUNCION	OBSERVACIONES
Mg	Suficiente para asegurar esferoides.		Produce grafito esferoidal.	Forma carburos y grafito acicular.
Ce	Aprox. 0.02% máx.		Promueve la formación de grafito esferoidal solo o combinado con Mg.	El exceso promueve la formación de carburos.- Contraresta los efectos dañinos de los elementos Pb, Ti, Al, Bi, Sb.
La	Aprox. 0.02%		Promueve la formación de grafito esferoidal cuando se combina con magnesio.	Promueve la formación de ferrita.
Nd y Pr	No determinados.		Promueven la formación de grafito esferoidal compactado.	Estabilizadores de carburos.
Y	Aprox. 0.05%		Promueve la formación de grafito esferoidal.	Reacción moderada. Se piensa que promueve la formación de ferrita.
Ca	Ligeramente soluble en hierro.		Inocula. Promueve la formación de grafito esferoidal en combinación con magnesio.	Puede producir carburos.

CONT. APEND. No. 1

ELEMENTO	LIMITE GRADO FERRITICO	LIMITE GRADO PERLITICO	FUNCION	OBSERVACIONES
Mn	0.2 máx. en fundición de molde	0.65% máx.	Estabilizador de perlita.	Arriba de 0.65% promueve carburos aciculares que resisten en recocido.

ELEMENTOS DE ALEACION

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 templeabilidad.	Promueve intercelular en piezas gruesas de enfriamiento lento.
Cu	0.03%	A especificación.	Aumenta la resistencia a la tensión.	Estabiliza perlita.

ELEMENTOS QUE ESTABILIZAN PERLITA Y PRODUCEN CARBUROS

Cr	0.04% máx.	0.09% máx.	Fuerte promotor de carburos.	Alarga recocido.
V	0.03% máx.	0.05% máx.	Forma carburos estables.	Demora recocido.
Sn	0.01% máx.	0.05% máx.	Potente estabilizador de perlita.	0.05% produce 100% de perlita en todas las secciones.
As	0.02% máx.	0.05% máx.	Reduce alargamiento.	Estabilizador de perlita.

CONT. APEND. No. 1

ELEMENTO	LIMITE GRADO FERRITICO	LIMITE GRADO PERLITICO	FUNCION	OBSERVACIONES
B	0.002% máx.	0.002%	Forma borocarburos muy estables.	Los carburos resisten fuertemente el recocido.
ELEMENTOS RESIDUALES Y ELEMENTOS PARA PROPOSITOS ESEPECIALES				
Pb	0.002% máx.	0.002% máx.	Ocasiona la degeneración de los esferoides grafiticos en laminilla.	Es el más potente elemento subversivo. Su influencia se elimina con 0.02% de tierras raras.
Ti	0.03% máx.	0.03% máx.	Promueve la formación de grafito vermicular.	Su influencia se elimina con 0.02% de tierras raras.
Al	0.04% máx.	0.04% máx.	Promueve la formación de grafito vermicular.	Ocasiona microporosidad por hidrógeno. Su influencia se elimina con 0.02% de tierras raras.
Sb	0.003% máx.	0.003% máx.	Limita el efecto del magnesio libre ocasionando grafito tipo laminilla.	Su influencia se elimina con 0.02% de tierras raras.
Bi	0.002% máx.	0.002% máx.	Ocasiona la formación de grafito laminar. Estabiliza los carburos.	Su influencia se elimina con 0.02% de tierras raras.
Zr	0.100% máx.	0.100% máx.	Ocasiona la formación de grafito vermicular.	Actúa como inoculante.

CON. APEND. No. 1

ELEMENTOS GASEOSOS

ELEMENTO	LIMITE GRADO FERRITICO	LIMITE GRADO PERLITICO	FUNCION	OBSERVACIONES
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.	Su fuente es la humedad en la arena.
N	Aprox. 0.009%	Aprox. 0.009%	Estabilizador de perlita. Causa microporos.	Su fuente es la resina de corazones y aglutinantes de moldes.

ELEMENTOS PRIMARIOS

C	3.6 - 4.0%	3.0 - 3.8%	Material primario de los esferoides de grafito.	El exceso promueve flotación. Carbón equiv. arriba de 4.3 en secciones de 1/2 pulg. causa flotación de carbón.
Si	1.8 - 2.9%	1.8 - 2.75	Grafitizante y ferritizante.	Promueve la formación de ferrita. Arriba de 2.5% - refuerza la ferrita y reduce la resistencia al impacto.
P	0.03% máx.	0.05% máx.	Reduce alargamiento.	Estabilizador de perlita.
S	0.01% máx.	0.01% máx.	Se combina con magnesio.	Es imprescindible la eliminación de azufre.

Fuente: Memorias del Curso sobre Hierro Dúctil, por Stephen I. Karsay.

AFM 1978.

APENDICE II APTITUD DE ALGUNOS ELEMENTOS PARA FORMAR
GRAFITO ESFEROIDAL EN ALEACIONES Fe-C-Si.

ELEMENTO	P.E. °C	P.F. °C	ENFRIAMIENTO	
			LENTO	RAPIDO
Li	1370	1430	+	+
Na	883	920	-	+
K	762	-	-	+
Rb	680	400	?	?
Cs	670	360-400	?	?
Mg	1120	2640	+	+
Ca	1440	2500	+	+
Sr	1385	2430	(+)	+
Ba	1537	1923	(+)	+
Al	2057	2050	-	-
Ga	1457	759	?	?
Y	2500	2410	+	+
La	-	2315	+	+
Ce	280	2600	+	+
Th	4500	350	?	?
Si	2350	1710	?	?
Sn	907	1800	?	?
Pb	1620	888	?	?
P	280	24	-	-
As	810	313	-	-
Sb	1635	sublimación	-	-
Bi	1420	820	-	-

- Negativo (laminar o anormal); + Positivo; ? Desconocido
() Dato no confirmado.

Fuente: Memorias del Curso sobre Hierro Ductil.
Stephen I. Karsay. AMF 1978.

APENDICE III

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

TIPO	ELEMENTOS = PORCIENTO						
	Mg	Ni	Si	Ca	Ce	Al	Fe
Incomag alloy 1	13-16	Bal.					2.0
Incomag alloy 2	13-16		26-33				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		44-48	0.8-1.3		1.20 máx.	Bal.
Noduloy 3R	2.8-3.3		44-48	0.8-1.3	0.3-0.5	1.20 máx.	Bal.
Noduloy 5	5-6		44-48	0.8-1.3		"	"
Noduloy 5C	5-6		44-48	0.8-1.3	0.5-0.7	"	"
Noduloy 5LC	5-6		44-48	0.8-1.3	0.3-0.48	"	"
Noduloy 5R-1	5-6		44-48	0.8-1.3	0.3-0.48	"	"
Noduloy 5R-2	5-6		44-48	0.8-1.3	0.85-1.0	"	"
Noduloy 5R-3	5-6		44-48	0.8-1.3		"	"
Noduloy 9	8.5-10		44-48	1.0-1.5	0.3-0.4	"	"

TIPO	ELEMENTOS = PORCIENTO						
	Mg	Ni	Si	Ca	Ce	Al	Fe
Noduloy 9LC	8.5-10		44-48	1.0-1.5	0.3-0.4	1.20 máx.	Bal.
Noduloy 9C	8.5-10		44-48	1.0-1.5	0.5-0.75	"	"

FUENTE:

Karsay Stephen: Producción de Hierro Nodular. Ontario Canadá 1976.

BIBLIOGRAFIA:

- 01.- Karsay Stephen, 1976. Producción de Hierro Nodular, Ontario, Canadá.
- 02.- Karsay Stephen, 1978, Memorias del Curso sobre Hierro Dúctil, Asociación Mexicana de Fundidores.
- 03.- American Foundrymen's Society, 1978, Ductil Iron Metal Processing.
- 04.- Taylor F Howard, Fleming C. Hertton and Wulff John, - 1959, Foudry Engineering, Ed. John villey & Sons.
- 05.- Wieser P. F., Bates C.E., and Wallace J.F., 1967, - Mechanism of Graphite Formation in Iron-Silicon-Carbon Alloy, Cleveland Ohio, por Maleable Founder Society.
- 06.- American Foudrymen's Society, 1968, Metal Casting - Dictionary, 1a. Edición.
- 07.- Green P. A., Thomas A. J., Production, Properties - and Applications of Compacted Graphite Iron, AFS - Transactions, Vol. 87, 1979, págs. 569-572.
- 08.- Cooper K.P., Loper Jr. C.R., Some Properies of Com-
pacted Graphite Cast Iron, AFS Transactions, Vol. -
86, 1978, Págs. 241-248.
- 09.- Ruff G. F., Verk T.C., Investigation of Compacted -
Graphite Iron Using a High Sulfur Gray Iron Base, -
AFS Transactions, Vol. 87, 1979, Págs. 459-464.
- 10.- Liu P.C., Kimura T. adn Loper Jr. C. R., Observations

on the Graphite Morphology in Cast Irons, AFS - -
Transactions, Vol. 88, 1980, Págs. 97-118.

- 11.- Loper Jr. C. R., Lalich M. S., The Relationships of
Microestructure to Mechanical Properties in Compac-
ted Graphite Cast Iron, AFS Transactions Vol. 88,
1980, Págs. 313-330.
- 12.- Cooper K. P., Loper Jr. C.R., A critical Evaluation
of the Production of Compacter Graphite Cast Iron, -
AFS Transactions Vol. 86, 1978, págs. 267-272.