

00522
4 A



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA
DE MEXICO**

FACULTAD DE QUIMICA

**RELACION AZUFRE-MAGNESIO EN HIERROS
VERMICULARES**

T E S I S
QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:
INGENIERO QUIMICO METALURGICO
P R E S E N T A:
LUIS DARIO ESCOBAR MEJIA



EXAMENES PROFESIONALES
MEXICO, D.F. FACULTAD DE QUIMICA

2003



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

PAGINACIÓN DISCONTINUA

B

JURADO ASIGNADO

PRESIDENTE	PROF. EUSEBIO CANDIDO ATLATENCO TLAPANCO
VOCAL	PROF. JOSE ALEJANDRO GARCIA HINOJOSA
SECRETARIO	PROF. CARLOS GONZALEZ RIVERA
1er SUPLENTE	PROF. ADRIAN MANUEL AMARO VILLEDA
2º SUPLENTE	PROF. HECTOR CRUZ MEJIA

SITIO DONDE SE DESARROLLO EL TEMA:

LABORATORIO DE FUNDICION.
DEPARTAMENTO DE INGENIERIA METALURGICA.
FACULTAD DE QUIMICA, EDIFICIO D., CIUDAD UNIVERSITARIA, UNAM.

ASESOR DE TEMA: _____

I. Q. M. EUSEBIO CANDIDO ATLATENCO TLAPANCO

SUPERVISOR TÉCNICO: _____

I. Q. M. ADRIAN MANUEL AMARO VILLEDA

SUSTENTANTE: _____

LUÍS DARIO ESCOBAR MEJIA

Envío a la Dirección General de Bibliotecas para difundir en formato electrónico e imprimir ante el Departamento de mi trabajo recepcionado.

NOMBRE: LUIS DARIO ESCOBAR MEJIA

FECHA: 11/03/03

FIRMA: [Firma]

C

DEDICATORIAS

A MI MADRE:

Eleuteria Mejia Anzures.

Por que eres de esa clase de personas que todo lo comprenden y dan lo mejor de si mismos sin esperar nada a cambio. Por que supiste escucharme y brindarme ayuda cuando la necesite.

A MI PADRE:

Que donde quiera que este, lo recuerdo con mucho cariño.

A MIS HERMANOS:

Roman, Evelio, Margarita y Alfonso. Por la amistad y el apoyo que me han brindado.

A LA FACUTAD DE QUIMICA:

Que me brindo una formación profesional excelente.

AGRADECIMIENTOS

PARA MI ASESOR DE TEMA:

I.Q.M. Eusebio Candido Atlatenco Tlapanco. Por la paciencia, el apoyo, la confianza y los consejos brindados para realizar este trabajo.

PARA EL Dr. CARLOS GONZALEZ RIVERA Y EL Dr. JOSE ALEJANDRO GARCIA HINOJOSA:

Por haber compartidos sus conocimiento y hacer posible que este trabajo sea una realidad.

PARA MI SUPERVISOR TÉCNICO:

I.Q.M. Adrian Manuel Amaro Villeda. Por la ayuda incondicional, para el desarrollo experimental de este trabajo.

PARA EL I.Q.M. IGNACIO BELTRAN PIÑA:

Por su amistad y consejos dados para el desarrollo de este trabajo.

PARA MIS AMIGOS:

Verónica, Baudelio, Agustín, David, Sergio, Juan Luis y Andrés. Por todos esos momentos y experiencias que pasamos juntos.

PARA EMMA TORRES MENDOZA:

Por su cariño y esos grandes momentos que hemos pasado.

CONTENIDO.

INTRODUCCIÓN	3
CAPITULO I	
1. FUNDAMENTOS TEÓRICOS	5
1.1 Tipo de fundiciones.	5
1.1.1 Fundición blanca.	5
1.1.2 Fundición gris.	5
1.1.3 Fundición nodular.	6
1.1.4 Fundición Vermicular.	6
1.2 Propiedades de la fundición vermicular.	9
1.2.1 Propiedades de tensión y dureza.	9
1.2.2 Propiedades de impacto.	10
1.3 Usos de la fundición vermicular.	12
1.4 Proceso de Solidificación para hierros colados.	14
1.4.1 Diagramas ternarios Fe-C-Si.	17
1.5 Efectos de los elementos aleantes.	19
1.6 Influencia del magnesio y azufre en la forma del grafito en la fundición vermicular.	21
1.7 Teorías del crecimiento del grafito compacto.	25
1.7.1 Hipótesis en las cuales se toma en cuenta el papel de pequeñas partículas de grafito.	26
1.8 Métodos de tratamiento para la nodulización con magnesio.	31
1.8.1 Método sándwich.	31
1.8.2 Método de la campana de inmersión.	33
1.8.3 Tratamiento dentro del molde.	34
1.9 Tipos de nodulizantes.	35

CAPITULO II	
2. DESARROLLO EXPERIMENTAL	37
2. 1 Materiales y equipos utilizados.	37
2. 2 Composición química.	40
2. 2. 1 Balance de carga para la primera muestra.	40
2.3 Método de tratamiento de nodularización utilizado en este trabajo.	45
2. 4 Fusión.	47
2. 5 Inoculación y pos-inoculación.	48
2. 6 Evaluación de muestras obtenidas.	48
CAPITULO III	
3. RESULTADOS	50
CAPITULO IV	
4. Análisis de resultados.	58
4. 1 Recuperación de magnesio.	58
4. 2. Por ciento de grafito vermicular en función del magnesio residual.	59
4. 3 Relación azufre magnesio.	61
CAPITULO IV	
4. CONCLUSIONES	62
BIBLIOGRAFÍA	63
APÉNDICE A	65
APÉNDICE B	87

INTRODUCCION

En metalurgia se identifican una gran familia de aleaciones industriales base hierro, como el acero y las fundiciones férricas coladas con grafito precipitado. En las fundiciones férricas coladas el contenido de carbono es alto, por ejemplo, en la fundición gris el contenido de carbono va desde 2% hasta 4.5% en peso, por otro lado, el contenido de Si esta en el rango de 1% hasta 3% en peso¹. Los altos contenidos de carbono y silicio originan, como consecuencia, la formación de precipitados de grafito durante la solidificación. En contraste, con respecto al acero, que tiene como máximo 2% de carbono en peso, este bajo contenido en carbono tiene como consecuencia la formación de una aleación continua, esto significa que no contiene grafito precipitado. Este grafito empieza a formarse cuando el contenido de carbono en la fundición líquida es de aproximadamente de 2% en peso^(2, 3).

La variedad de propiedades de las fundiciones férricas con grafito precipitado esta en función de la combinación de los porcentajes de C y Si, de los elementos de aleación metálicos o no metálicos que estén presentes, así como de las condiciones en las cuales fue fundida, tratada en su estado líquido, velocidad de vaciado, condiciones de enfriamiento y solidificación, etc.

Se tienen cuatro tipos de fundiciones férricas, estas son:

- Fundición blanca
- Fundición gris
- Fundición nodular
- Fundición vermicular

Este último tipo es la fundición férrica de más reciente desarrollo, la cual se conoce con el nombre de Fundición vermicular o Fundición con grafito compacto (CGI).

En este trabajo se trata de estudiar, analizar y explicar el efecto del magnesio en las fundiciones vermiculares, como elemento modificador del grafito precipitado para obtenerlo en forma de vermiculos o grafito compacto. Por otra parte el azufre, cuando se encuentra en cantidades apreciables, disminuye el efecto modificador del Mg, ya que forma el sulfuro de magnesio como resultado de una reacción entre estos, bajando la cantidad de Mg efectivo (Mg residual) y por tanto su poder de modificación. La literatura no distingue entre los dos tipos de Mg; Mg total y Mg residual, éste último es el remanente de la reacción con el S y es el responsable de la modificación del grafito hacia formas vermiculares o esferoidales.

El objetivo de este trabajo es determinar la relación existente entre el azufre y el magnesio para obtener fundición vermicular a través de las técnicas ya conocidas para la producción de fundición nodular, ya que en EEUU muchas industrias producen fundición vermicular para la industria automotriz preferentemente. Actualmente la tendencia es desplazar la fundición dúctil en algunas aplicaciones por la fundición vermicular; por ejemplo para partes de motores de barcos, calderas, en las turbinas de las termoeléctricas, etc.

CAPITULO I

1. FUNDAMENTOS TEORICOS

1.1 TIPOS DE FUNDICIONES^(3 4,7)

La clasificación de las diferentes fundiciones se debe principalmente a la forma del grafito precipitado en la microestructura. La fundición blanca deriva su nombre por la apariencia y color de la superficie de fractura, la cual es blanca. Así también se le da el nombre a la fundición gris por el color de la fractura que es gris, la fundición dúctil su nombre se deriva por que presenta una moderada ductilidad y por la forma en que se presenta el grafito que es en forma de esferoides. La fundición vermicular se deriva su nombre también por la forma del grafito, que son en forma de vermiculos o también conocido como hierro de grafito compacto (CGI) por sus siglas en ingles.

1.1.1 FUNDICION BLANCA

La fundición blanca se forma cuando el carbono, en solución en el metal fundido, no forma o precipita grafito durante la solidificación siempre y cuando haya una combinación de C y Fe para formar carburos de hierro (cementita). Esto se debe principalmente al contenido de Si presente ya que este es el promotor para que precipite el grafito, sin embargo si el contenido de Si es bajo no se podrá precipitar, en consecuencia se tendrá una fundición blanca, esta fundición es muy dura y frágil, presenta una alta resistencia a la compresión, una buena retención de esfuerzos, una alta dureza a elevadas temperaturas en las tablas No. 1, 2 y 3 se enumeran las propiedades mecánicas y físicas para esta fundición. Sus usos más comunes se deben a su excelente resistencia al desgaste y a la abrasión. Estas propiedades son debidas a la presencia de carburos contenidos en su microestructura, uno de sus principales usos es para la manufactura de la fundición maleable.

1.1.2 FUNDICION GRIS

Cuando la composición química de la fundición (principalmente C y Si) y la velocidad de enfriamiento es adecuada, una porción sustancial del volumen de carbono tiende a precipitar en forma de hojuelas de grafito. Cuando una pieza de fundición gris se rompe, el desarrollo de la fractura sigue las hojuelas de grafito y la superficie de fractura es de color gris debido a la

predominancia de grafito. Por tanto, la presencia de una considerable cantidad de silicio hace que la grafitización sea posible, las diferentes formas, tamaños y distribuciones de las hojuelas de grafito en la solidificación de la fundición gris, tiene como consecuencia la clasificación de grafito adoptada por la ASTM y AFS.

La fundición gris tiene varias propiedades únicas derivadas de la existencia de hojuelas de grafito en la microestructura, la fundición gris puede ser maquinada fácilmente y por su dureza se aplica a la resistencia al desgaste, esta resistencia puede ser modificada bajo condiciones de lubricación. Tiene excelentes propiedades en la aplicación donde se involucra la vibración de componentes, tablas No. 1, 2 y 3.

1.1.3 FUNDICION NODULAR

La fundición nodular o dúctil también conocida como fundición grafiesferoidal, es muy similar a la fundición gris en composición, pero durante la solidificación de esta fundición, el grafito precipita en forma de partículas esferoidales, esto es posible por la adición de pequeñas cantidades definidas de magnesio, cerio y tierras raras al metal líquido, esta etapa es conocida como nodularización. La fundición dúctil presenta las mejores propiedades de la familia de las fundiciones coladas tablas, No. 1, 2, 3, por ejemplo; bajo punto de fusión, buena fluidez, excelente maquinabilidad, alta ductilidad, etc., por sus propiedades tiene un gran número de usos como son: partes de motores de vehículos, maquinaria para la industria del papel, para la combustión interna en automotores, compresoras, en maquinaria para la construcción.

1.1.4 FUNDICION VERMICULAR (CGI) ^(1,3,4,5,7,12)

La fundición Vermicular fue descubierta al final de los 40's, durante el desarrollo de la técnica de producción de la fundición nodular. Esto se realizó cuando el tratamiento con magnesio fue insuficiente para estabilizar totalmente la forma del grafito esferoidal, y se obtuvo un grafito precipitado en forma de gusano o vermicular. Por muchos años esta forma de fundición de grafito compacto se presentó en la producción de fundición nodular considerándola una falla en la producción, subsecuentemente se observó que las propiedades de este material tenían una excelente combinación de propiedades tanto mecánicas como físicas, tablas No 1, 2 y 3. Al saber de sus propiedades mecánicas en los años 60's se optó por desarrollar técnicas de producción del CGI en respuesta a la demanda de materiales especiales para el diseño de mejores motores para

la industria automotriz. Desafortunadamente la producción de CGI en el ámbito industrial no sucedió por que la microestructura es solamente estable en un nivel de 0.03% de magnesio residual, de igual manera a principios de los años 70's y 80's la producción de CGI fue infructuosa por lo cual se dice que la técnica de producción no era lo suficientemente reproducible para asegurar una alta calidad de fundición de grafito compacto.

El grafito compacto (CG) se caracteriza por estar interconectado como celdas eutécticas, similares a las hojuelas de grafito en la fundición gris, sin embargo el grafito de la fundición vermicular es más burdo y más grande, similar a la apariencia metalográfica del grafito tipo IV ASTM para fundición gris, la microestructura es intermedia entre la fundición gris y la fundición nodular, las propiedades son superiores que las de la fundición gris e inferiores a las de la fundición nodular.

La fundición Vermicular se obtiene controlando la cantidad de magnesio adicionado al momento de nodularizar, este proceso es muy similar al utilizado para producir una fundición nodular, desafortunadamente cuando el proceso no se efectúa adecuadamente, por no controlar la cantidad de Mg, se obtiene fundición gris o fundición nodular. La producción de fundición con grafito compacto se logra por la nodularización con magnesio, para dar un contenido residual de éste de 50 a 600 ppm.

COMPOSICIONES, PROPIEDADES MECANICAS Y FÍSICAS DE LAS FUNDICIONES NODULAR, GRIS Y VERMICULAR^(3,7,10,11,12)

Tipo de fundición	matriz	Esfuerzo de tensión (MPa)	Modulo de Young (GPa)	Esfuerzo de fatiga (MPa)	Dureza HB	Esfuerzo de fluencia al 0.2% MPa
Fundición gris	Perlitica	200-270	105-115	95-110	175-230	115-210
Fundición nodular	Ferritica	400-600	155-165	185-210	140-200	285-315
Fundición nodular	Perlitica	600-700	160-170	245-290	240-300	375-482
Fundición Vermicular	Ferritica	330-410	130-150	155-185	130-190	240-305
Fundición Vermicular	Perlitica	410-580	130-155	190-225	200-250	345-415

Tabla No.1. Diferentes propiedades mecánicas para las fundiciones gris, vermicular y nodular.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Tipo de fundición	Carbono total	Silicio	Fósforo	Manganeso	Azufre
Gris clase 25	3.3-3.5	2.2-2.4	0.20-0.50	0.50-0.80	0.08-0.13
Gris clase 30	3.2-3.4	2.1-2.3	0.15-0.30	0.50-0.80	0.08-0.13
Nodular 60-40-18	3.0 min.	2.5	0.08	-	-
Vermicular 70% perlítica	3.6-3.8	2.1-2.5	-	0.20-0.04	0.005-0.022
Vermicular 100% perlítica	3.6-3.8	2.1-2.5	-	0.20-0.04	0.005-0.022

Tabla No. 2. Composiciones de las fundiciones gris, nodular y vermicular.

Tipo de fundición	Tipo de matriz	Carbono equivalente	Esfuerzo de fluencia	Esfuerzo de tensión
Fundición gris 25	Perlítica	4.4	110	183
Hierro gris 30	Perlítica	4.2	147	221
Fundición gris 45	Perlítica	3.6	184	331
Fundición nodular 60-40-18	Ferrítica	3.8	276	414
Fundición nodular 65-45-12	Ferrítica	-	310	448
Fundición nodular 70-50-05	Ferrítica	-	345	485
Fundición vermicular	60% Ferrítica	-	425	330

Tabla No. 3. Esfuerzos de tensión y fluencia para fundiciones gris, nodular y vermicular con diferente matriz.

Propiedades	Fundición gris con 100% de perlita	Fundición vermicular con 95% de ferrita y 95% de CG	Fundición nodular con 100% de ferrita y 80 % de SG
Composición química en %	3.61C, 2.49Si, 0.05Mn	3.61C, 2.54Si, 0.05Mn	3.56C, 2.72Si, 0.05Mn
Esfuerzo de tensión (MPa)	110	336	438
Esfuerzo de fluencia al 0.2% (MPa)		257	285
% de elongación		6.7	25.3
Módulo de elasticidad (GPa)	96.9	158	176
Dureza Brinell (HB)	156	150	159
Energía absorbida en el ensayo Charpy (J)			
A 20 °C	2.0	32.07	176.5
A -20 °C		26.48	148.1
A -40 °C		26.67	121.6
Esfuerzo de fatiga en una barra rotatoria (MPa)	49.0	210.8	250
Conductividad térmica (W / cm °K)	0.423	0.356	0.327

Tabla No. 4. Diferentes propiedades mecánicas para las fundiciones gris, vermicular y nodular, con una composición y tipo de matriz dada.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

1.2 PROPIEDADES DE LA FUNDICIÓN VERMICULAR (CGI)^(4,5,6,12,16,17,22)

Como es conocido, las propiedades físicas y mecánicas de este material dependen primeramente de la forma del grafito formado durante la solidificación, por lo cual es fácil entender que las propiedades de la fundición vermicular (CGI) están entre las de la fundición gris y la de la fundición nodular por la forma del grafito, lo cual también significa que algunas propiedades pueden ser similares a la fundición gris y otras a la fundición nodular, por lo tanto la fundición vermicular (CGI) se puede desarrollar para ciertas aplicaciones prácticas de acuerdo a propiedades como el esfuerzo de tensión, esfuerzo de fluencia, conductividad térmica, impacto, etc. La matriz puede ser ferrítica, perlítica o una mezcla de ambas como en la fundición gris y en la fundición nodular (tablas No. 5, 6).

Dependiendo de la composición y la cantidad de perlita en la microestructura, el esfuerzo de tensión de la fundición vermicular puede ser alto por ejemplo de 520 MPa; usualmente la ductilidad es de 1 a 6%. Los esfuerzos de tensión y fluencia son casi iguales a las fundiciones grises de alto valor de esfuerzo, en los más bajos valores de carbono equivalente del rango de la fundición gris. Las propiedades de impacto y fatiga no son similares a las de la fundición dúctil, son sustancialmente mejores que las de la fundición gris, la combinación de un alto esfuerzo y una buena resistencia al impacto, acoplada con una buena capacidad para la dispersión de calor, hace que la fundición vermicular tenga una gran aplicación donde el uso de la fundición gris y la fundición nodular no son completamente satisfactorias. Esta superioridad de la fundición vermicular en las propiedades mecánicas sobre la fundición gris se debe a que los precipitados de grafito son redondeados en la fundición vermicular, constituidos por muescas inferiores menos severas y más angulares que las hojuelas de la fundición gris.

1.2.1 PROPIEDADES DE TENSION Y DUREZA

La fundición con grafito compacto tienen esfuerzos de fluencia y tensión similares a los de la fundición dúctil ferrítica y a los de la fundición maleable, tiene un comportamiento elástico a un bajo nivel de proporcionalidad como la fundición dúctil, para una matriz perlítica los esfuerzos de tensión y fluencia son altos. Por lo tanto las propiedades de tensión y dureza están directamente relacionadas con el tipo de microestructura que presenta ésta fundición y más aun de la cantidad y distribución del grafito; así se puede ver que si se tiene una matriz ferrítica, los esfuerzos disminuirán así como la dureza, pero se tendrá una alta elongación, y al contrario conforme se

aumente el porcentaje de perlita los esfuerzos aumentarán la dureza también pero la elongación disminuirá. El valor más bajo de esfuerzo se obtiene con alto carbón equivalente y con una matriz ferrítica.

La fundición con grafito compacto observa un comportamiento elástico lineal, para matriz perlítica y ferrítica la relación del esfuerzo de fluencia-esfuerzo de tensión esta en el rango de 0.72 a 0.82, la cual es mas alta que para la fundición dúctil en algunas composiciones. El límite de proporcionalidad es de 125 MPa para matrices tanto ferríticas como perlíticas este valor es ligeramente mas bajo que para la fundición dúctil. La razón de esto es el alto efecto de muesca en la morfología afilada del grafito compacto. En la proporción más alta de perlita / ferrita se observa cuando la dureza se incrementa y el esfuerzo de tensión también, la elongación disminuye, en general la fundición vermicular tiene una baja dureza como la fundición gris y en algunas veces la relación de esfuerzo de tensión-dureza Brinell en la fundición vermicular es mas alta que en la fundición gris.

El modulo de elasticidad varia de 138-165 GPa, esta variación se produce por las diferentes formas y cantidades de grafito, espesor de pieza y tipo de matriz, los altos valores del modulo de elasticidad son obtenidos con un incremento en la nodularización, con la sección más delgada y una matriz perlítica, el modulo de elasticidad decrece ligeramente a altos niveles de esfuerzo. Dependiendo de la composición química y la cantidad de perlita en la microestructura, el esfuerzo de tensión de la fundición con grafito compacto puede ser de 520 MPa (75 ksi), la ductilidad es aproximada de 1 a 6 %, por lo tanto los esfuerzos de tensión y fluencia son mucho más altos que los de la fundición gris, la conductividad térmica es también mucho más alta que la de la fundición gris, con respecto al impacto y la fatiga no es muy recomendable como la fundición nodular pero es sustancialmente mejor que la fundición gris.

1.2.2 PROPIEDADES DE IMPACTO

Mientras que la fundición dúctil presenta substancialmente una alta dureza a altos contenidos de perlita, la fundición vermicular perlítica tiene un esfuerzo de impacto equivalente la fundición dúctil, los valores de la energía de impacto a 21°C y -41°C se observa que la fundición vermicular producido a partir de una fundición dúctil absorbe una gran energía como si se hubiera obtenido a partir de una fundición gris. Los estudios realizados en la iniciación y crecimiento de la fractura bajo

condiciones de impacto muestran que, en general, la iniciación de la fractura de la matriz es precedida por la fractura del grafito, por la interfase grafito-matriz o a través del grafito o ambas.

PROPIEDADES DE LA FUNDICION VERMICULAR

Propiedad	Método de prueba	Temperatura (°C)	70% perlitá	100% perlitá
Esfuerzo de tensión (MPa)	ASTM E8M (25°C) ASTM E 21 (100°C Y 300°C)	25	420	450
		100	415	430
		300	375	410
Esfuerzo de fluencia al 0.2% (MPa)	ASTM E8M (25°C) ASTM E 21 (100°C Y 300°C)	25	315	370
		100	295	335
		300	284	320
Módulo elástico (GPa)	ASTM E8M (25°C) ASTM E 21 (100°C Y 300°C)	25	315	145
		100	140	140
		300	130	130
Elongación (%)	ASTM E8M (25°C) ASTM E 21 (100°C Y 300°C)	25	1.5	1.0
		100	1.5	1.0
		300	1.0	1.0
Unnotched Limite de fatiga (MPa)	Girado-doblado a 3000rpm	25	195	210
		100	185	190
		300	165	175
Proporción de endurecimiento	Limite de fatiga / UTS	25	0.46	0.44
		100	0.45	0.44
		300	0.44	0.43
Conductividad térmica (W / m°C)	Flujo de calor axial ASTM E 1225	25	37	36
		100	37	35
		300	36	35
Coeficiente de expansión térmica (µm / m°C)	Dilatómetro Pushrod DIN 51 045	25	11.0	11.0
		100	11.5	11.5
		300	12.0	12.0
Radio de Poisson	ASTM E 132	25	0.26	0.26
		100	0.26	0.26
		300	0.27	0.27
Esfuerzo de compresión al 0.02% (MPa)	ASTM E 9 (longitud mediana)	25 400	400 300	430 370
Esfuerzo de fatiga factor de reducción	Depende de la geometría de la muesca	25	1.40-1.80	1.40-1.80
Densidad (g / cm ³)	Desplazamiento: (750x25x25)mm	25	7.0-7.1	7.0-7.1
Dureza Brinell (BHN)	Penetrador de 10 mm, 3000 Kg de carga	25	183-235	207-255

Tabla No. 5. Propiedades físicas y mecánicas para una fundición vermicular con 10% de nodularidad.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Propiedades (25°C)	% de Grafito Compacto				
	90	70	50	30	10
Esfuerzo de tensión (MPa)	450	520	590	640	700
Esfuerzo de fluencia al 0.2% (MPa)	370	390	410	440	490
Límite de fatiga (MPa)	210	220	230	240	255
Modulo elástico (GPa)	145	150	155	155	160
Elongación (%)	1-2	1-3	2-4	2-5	3-6
Expansión térmica ($\mu\text{m} / \text{m}^\circ\text{C}$)	11.0	11.0	11.0	11.5	12.0
Conductividad térmica ($\text{W} / \text{m}^\circ\text{C}$)	36	33	31	30	28

Tabla No. 6. Propiedades de fundición vermicular perlítica en función del porcentaje de grafito compacto.

1.3 USOS DE LA FUNDICION VERMICULAR(CGI)^(1,15,18,21)

La aplicación de la fundición vermicular proviene de su relativa posición entre la fundición gris y la dúctil. Comparada la fundición vermicular con la fundición gris tiene ventajas, por ejemplo:

- Altos niveles de resistencia a la tensión con un contenido similar de carbón equivalente, esto reduce la necesidad de agregar elementos aleantes tales como Níquel, Cromo, Cobre y Molibdeno.
- Una alta relación de esfuerzo de tensión-dureza.
- Una mejor ductilidad y dureza con lo cual se tiene una gran margen de seguridad contra una posible fractura.
- Baja oxidación a alta temperatura.

Comparado con la fundición nodular tiene ventajas como:

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**

- Bajo coeficiente de expansión térmica.
- Alta conductividad térmica.
- Mejor resistencia al choque térmico.
- Mejor maquinabilidad.

La fundición vermicular puede sustituir, con buen resultado, en casi todos los casos cuando el esfuerzo que soporta la fundición gris es insuficiente. Como por ejemplo para grande artefactos de diesel, en cigüeñales, para anaqueles de carga, poleas para camiones, ruedas con engrane.

Como se mencionó la conductividad térmica de la fundición vermicular es mas alta que la de la fundición dúctil por lo tanto se prefiere para usos a alta temperatura y bajo condiciones de fatiga térmica, estas aplicaciones son en lingoteras, en cigüeñales, en las cabezas de los cilindros de carro y en frenos de disco.

La gran aplicación industrial que se tiene con esta fundición es, por ejemplo, para modernos carros o partes para camiones, se requiere que el monoblock trabaje en temperaturas alrededor de 500°C, a esta temperatura los monoblocks de fundición gris se rompen, la fundición dúctil tiende a torcerse y al contrario si son de fundición vermicular la oxidación y el efecto de que se tuerza es muy baja. Otras aplicaciones son: lingoteras, componentes de frenos de automóviles, monoblocks en la industria automotriz tanto para carros como para maquinaria pesada. En partes de combustión interna en la industria marítima, turbinas de la industria termoeléctrica, para frenos de disco en trenes.

1.4 PROCESO DE SOLIDIFICACION PARA HIERROS COLADOS^(3,10)

La influencia de la composición química en las propiedades, en los usos de las fundiciones grises esta fuertemente relacionada a dos elementos que son el carbono y el silicio, ambos elementos promueven la formación de grafito conforme los porcentajes de los dos aumentan en la fundición, también el carbono puede presentarse como carburo de hierro (cementita). La grafitización es el proceso por el cual el carbono libre es precipitado, al incrementar el porcentaje de carbono en la fundición después del 2.0%, aumenta la probabilidad de grafitización, además la presencia de ciertos elementos en la fundición como el silicio causa que el carburo de hierro sea poco estable y esto promueve la formación de grafito.

Las diferencias entre las fundiciones gris, vermicular, blanca y nodular se deben grandemente al proceso de solidificación de cada una de ellas, los fundamentos del proceso de solidificación están fuertemente relacionados con el equilibrio ternario hierro-carbono-silicio, sin embargo se puede simplificar también presentando ideas generales en un diagrama de fases Fe-C-Si, figura No. 1.

Tomando una composición "A" la solidificación se puede describir con las etapas siguientes:

- A. El metal líquido se enfría hasta que empiece el proceso de solidificación en el punto 1, en este punto las dendritas de austenita empiezan a formarse y crecen hasta el punto 2. Este paso es omitido cuando la composición es eutéctica (composición B).
- B. El eutéctico (líquido saturado con respecto a dos sólidos) empieza a solidificar en el área cuando la temperatura llega al punto 2. la forma de los sólidos eutécticos pueden ser una mezcla de austenita con cementita, esto quiere decir que fue solidificada como fundición blanca ó bien austenita con grafito la cual fue solidificada como fundición gris, vermicular ó nodular. El grafito puede prevalecer si hubo factores grafitizantes, tales como altos contenidos de Si y bajas velocidades de enfriamiento. Cuando se tiene bajo contenido de silicio y velocidades de enfriamiento altas puede haber una mezcla de austenita y cementita. Cuando la temperatura llega hasta el punto 3 la solidificación ha terminado. Esto quiere decir que la fundición solidificó como fundición blanca, gris, vermicular o nodular. Es

decir que la presencia de grafito esta en función de la velocidad de enfriamiento y de la presencia de elementos grafitizantes.

- C. Al final de la solidificación la estructura consiste de sólidos generados durante los pasos A y B. En las fundiciones gris, nodular y vermicular dichos sólidos serán austenita y grafito, mientras que en la fundición blanca serán austenita y cementita.
- D. Además, del enfriamiento entre los puntos 3 y 4 resulta la precipitación de carbono a partir de la austenita presente la cual tiene un máximo de carbono de 2.0% y al final del enfriamiento ésta austenita tendrá un contenido de 0.60 %C a 0.80 %C, cuando la temperatura decrece al punto 4. El carbono rechazado de la austenita se combina con hierro para formar cementita en la fundición blanca y como grafito precipitado en las fundiciones gris, vermicular, y nodular.
- E. Entre los puntos 4 y 5 la última transformación es sólido-sólido durante el enfriamiento. La austenita se transforma en este rango de temperaturas. En condiciones favorables de grafitización se precipita la ferrita y carbono grafito en las fundiciones gris, vermicular y nodular. Con condiciones menos severas de grafitización se forma perlita y ferrita o sólo perlita. En la fundición nodular, la mezcla de estructuras de ferrita y perlita conducen a la estructura típica de ojo de buey, es decir ferrita alrededor del esteroide de grafito. En la fundición blanca sólo se forma perlita.
- F. Abajo del punto 5, el enfriamiento hasta temperatura ambiente no produce cambios significativos en la estructura.

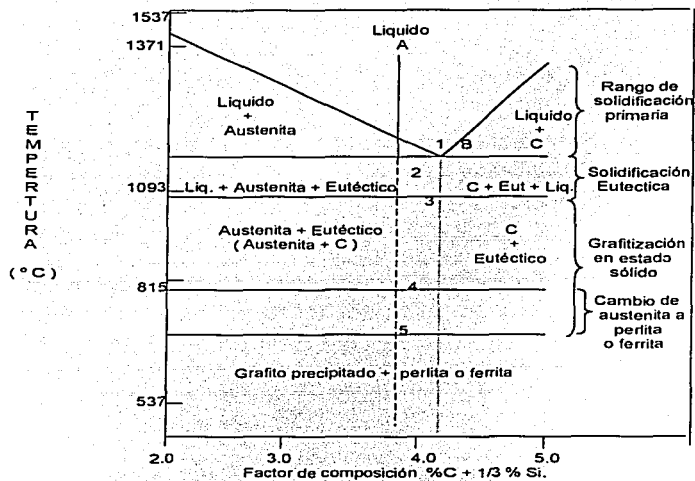


Figura No. 1. Diagrama semántico que muestra esquemáticamente el rango de temperatura aproximada de solidificación y grafitización en los ferrosos colados⁽³⁾.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

1.4.1 DIAGRAMAS TERNARIOS Fe-C-Si⁽³⁾

De lo anterior se puede ver que ya sea fundición gris, vermicular, nodular o blanca, su formación dependerá de los procesos de solidificación y enfriamiento del sólido, además de las temperaturas de transformación. Las propiedades dependerán de los cambios térmicos y químicos ocurridos durante las transformaciones líquido-sólido y sólido-sólido. De igual forma hay otro tipo de diagramas de fases que involucran y demuestran como un solo elemento como el silicio promueve la formación de estructuras y la precipitación del grafito.

La presencia de silicio en una aleación ternaria Fe-C-Si, es el factor más importante que da origen a la grafitización en las fundiciones férreas. El efecto del silicio se puede visualizar con la ayuda de las secciones verticales del diagrama ternario Fe-C-Si de la figura No. 2.

Considerando el proceso de solidificación de la aleación Fe-C-Si con 2% Si y 3.5% C. Bajo condiciones de solidificación normal las dendritas de austenita primaria se forman en el rango de temperaturas desde la temperatura líquidus hasta la temperatura donde empieza la solidificación del eutéctico, es decir entre 1247 a 1115 °C. Simultáneamente la solidificación de la austenita eutéctica más carbono grafito completan dicho proceso de solidificación. La solidificación del eutéctico ocurre en el rango de temperaturas de 1115 a 1087 °C. Cuando la solidificación termina en la aleación, la microestructura consiste de 20 % de dendritas de austenita primaria y 80 % del eutéctico austenita-carbono grafito. A la temperatura solidus la austenita esta saturada con carbono, al bajar la temperatura hay un rechazo de carbono de la austenita en forma de grafito, además se tiene la presencia de hojuelas de grafito eutéctico, la precipitación del grafito continua también en el rango de temperaturas de formación del eutectoide que es de 793 a 752 °C aproximadamente con 2% de Si. A la temperatura eutectoide de este corte del diagrama Fe-C-Si (2% Si) la austenita contiene 0.6% C.

En el enfriamiento al equilibrio hay una transformación de austenita a ferrita acompañada de una precipitación de carbono remanente sobre las hojuelas de grafito, la microestructura final consiste de áreas aisladas de ferrita originadas de las dendritas de austenita primaria y en otras áreas hay una mezcla de ferrita con hojuelas de grafito teniendo como origen el eutéctico austenita-carbono grafito.

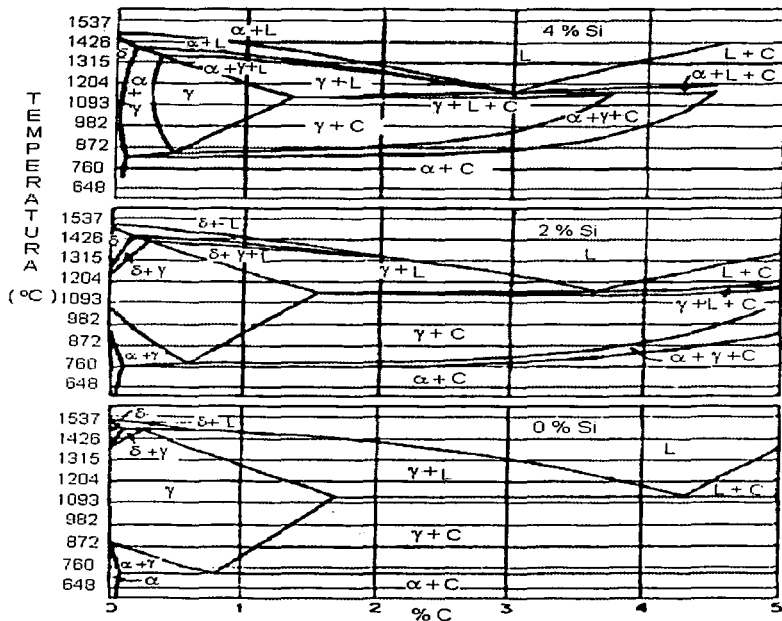


Figura No. 2. Sección transversal del diagrama de fases de un sistema ternario Fe-C-Si en equilibrio, con 0%, 2% y 4% de Si.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

1.5 EFECTOS DE LOS ELEMENTOS ALEANTES^(6,8,9,10,11)

CARBONO

El carbono es muy importante ya que tiene un gran efecto en las propiedades mecánicas y físicas de las fundiciones férreas, el carbono puede existir como carbono libre conocido como carbono grafito este es muy suave y poco tenaz, aparece en forma de hojuelas, vermiculos y esferoides (fundición nodular). Puede aparecer como carbono combinado, conocido como cementita la cual es muy dura, tiene baja ductilidad y puede descomponerse en ferrita y grafito, la estructura de estas fundiciones depende de la cantidad de carbono presente, la forma, tamaño y distribución de las partículas de carbono grafito. Tiene una gran influencia en las propiedades mecánicas, la maquinabilidad es alta debido a la presencia de las partículas de carbono ya que representan discontinuidad de la matriz, la contracción se reduce si se tiene la presencia de carbono grafito.

El carbono esta en cantidades de 2.5 a 4.5% en peso. El porcentaje de carbono total en la fundición puede determinarse por análisis químico o por el grado de grafitización asumiendo la siguiente relación:

% de carbono total = % carbono grafito + % carbono combinado

Si la grafitización es total el porcentaje de carbono total y el porcentaje de carbono grafito es igual.

Si la grafitización no ocurre el porcentaje de carbono grafito es cero.

SILICIO

El silicio actúa como elemento grafitizante (precipita al carbono), al tener una cantidad cerca del 3% reduce parcialmente el rango de formación de austenita durante la solidificación y también causa que se precipite grafito en lugar de cementita a 690 °C cuando ocurre la descomposición eutectoide, la máxima precipitación de grafito ocurre cuando tenemos de 2.5 % a 3% de silicio, esto es si se parte de 2% y se sigue aumentando la cantidad de silicio, se podrá aumentar la cantidad de grafito precipitado, pero si la cantidad de silicio es mayor del 3% tiene efectos reversibles, como son en el incremento en la proporción de carbono combinado o de silicio combinado con hierro (Fe_2Si , Fe_3Si_3 , etc.). Esto se puede observar en la fractura ya que aparece con un aspecto brillante. El silicio permite la liberación de óxidos y sopladuras, hace que las fundiciones férreas tengan mayor fluidez.

MANGANESO

El manganeso incrementa la proporción de carbono que esta en forma combinada (cementita), pero su influencia esta delimitada por la cantidad de azufre presente, ya que se formara MnS . El manganeso es un agente formador de carburos (perlitzante), por lo cual si se incrementa el contenido de Mn se tendrá un incremento en los valores de los esfuerzos de tensión y fluencia.

El manganeso se encuentra en una proporción de 0.5 a 0.75 % para obtener una matriz perlítica; es un agente desulfurante esto es, se combina con el azufre, para formar sulfuro de manganeso y desoxidante, debido a estos dos efectos el metal líquido tiene una mejor fluidez.

FOSFORO

Cuando la cantidad de fósforo es muy alta tiende a formar un microconstituyente llamado esteadita (ferrita y fosforo de hierro), la cual es un precipitado eutéctico que solidifica a temperaturas entre 982 °C a 954 °C, al observar la microestructura de las fundiciones, la esteadita tiene una forma triangular cóncava. Este microconstituyente es duro debido a que el fosforo de hierro es un compuesto intermetálico. En grandes cantidades decrece la maquinabilidad, incrementa la fragilidad, incrementa la fluidez, el fósforo en solución tiende a estabilizar la perlita.

AZUFRE

El contenido de azufre en los hierros vermiculares y nodulares se encuentra entre 0.005% a 0.015%, la razón fundamental de tener bajos contenidos de azufre es que antes de realizar el tratamiento de nodularización con magnesio, este se combina con el azufre, y hasta que termine la formación de MgS se tendrá el efecto de nodularización, por lo tanto esta combinación hace que el magnesio no cumpla con su cometido haciendo que se alimente más magnesio para que se tenga una buena nodularización. El producto de esta combinación, sulfuro de magnesio, solidifica a temperaturas alrededor de la de solidificación de la fundición. Debido a lo anterior, para fundiciones vermiculares y nodulares el contenido de azufre debe ser bajo.

1.6 INFLUENCIA DEL MAGNESIO Y AZUFRE EN LA FORMA DEL GRAFITO EN LA FUNDICIÓN VERMICULAR^(5,8,9,10)

El contenido de magnesio para producir grafito esferoidal y vermicular en las fundiciones se encuentra en el rango típico es de 0.025 a 0.08% en peso de magnesio total y esto también depende del contenido de azufre. Cuando se adiciona el magnesio en la fundición líquida actúa como desoxidante, desulfurante y altera la forma del grafito así como también promueve la formación de carburos eutécticos. Si no se controla el tratamiento de esferoidización o hay un contenido alto de oxígeno y / o azufre la cantidad de esferoidizante será baja la cual afectara a que no se efectuó la transformación a grafito vermicular o esferoidal, al contrario si la cantidad de magnesio en forma de sulfuro de magnesio es excesiva habrá una cantidad alta de ledeburita en la fundición, debido a que el sulfuro es antigrafitizante.

Como se menciono el magnesio es un excelente desoxidante, por lo tanto, se produce MgO el cual es muy estable y tiene una temperatura elevada de fusión, por la baja densidad del MgO flota en la superficie de la fundición líquida incorporándose a la escoria. También el MgS tiene una baja solubilidad en la fundición líquida, y baja densidad por lo cual flota en la superficie incorporándose a la escoria.

El magnesio es un excelente modificador de la forma del grafito durante la solidificación, con pequeñas cantidades de Mg como por ejemplo de 0.018% se presenta una estructura con grafito esferoidal con contenidos bajos de oxígeno y azufre.

En el proceso de nodularización se tiene una bajo rendimiento de magnesio, esto se debe a que este tiene un punto de ebullición de 1107 °C, lo cual al tener contacto con la fundición líquida que esta aproximadamente a 1500°C se volatiliza, a esta temperatura del baño líquido la presión de vapor es de 9 Kg / cm².

El magnesio se integra al seno de la solución fácilmente porque tiene un bajo punto de fusión y de ebullición con respecto al hierro, el bajo punto de ebullición es el causante principal de que se difunda a lo largo del líquido a muy bajas temperatura del metal líquido. Así debido al bajo punto de ebullición, la alta presión de vapor, la alta temperatura del metal líquido y el límite de solubilidad, el magnesio se consume mas fácilmente. El magnesio puede combinarse con oxígeno o azufre el

producto de estas combinaciones tiene un alto punto de fusión, con lo cual flotarían en la superficie del material integrándose así a la escoria y al tener un contenido mayor de azufre en la escoria, que en el metal líquido, este azufre se integrara al seno del metal líquido teniendo como consecuencia un exceso de azufre. Este exceso puede modificar la reacción de nodularización ya que se necesita una pequeña cantidad de magnesio para poder obtener fundición vermicular o nodular, con ello se tendrá una forma de grafito diferente al deseado o en su defecto como se observa en el diagrama de Ellingham figura No. 3, al no tener más magnesio que reaccione con azufre este reaccionara con el manganeso formando un precipitado de MnS .

El azufre es soluto en las fundiciones en estado líquido, al igual que el oxígeno, a la temperatura del metal líquido el azufre se encuentra en estado gaseoso y así el mantenimiento de los porcentajes sustanciales de azufre en las disoluciones metálicas requiere un fuerte enlace químico, pero la solubilidad en el hierro en estado sólido es muy baja; éste precipita en forma de sulfuros (MnS , FeS) durante la solidificación, esta precipitación esta influenciada por su alta tendencia a la segregación. La estabilidad de los diferentes sulfuros formados durante la solidificación esta influenciada por la energía libre de formación, que se puede observar en la figura No. 3. La cual indica la energía libre estándar de formación para algunos sulfuros a una temperatura dada, en el equilibrio en estado estándar (por ejemplo sustancias puras) y la actividad de los elementos se considera uno. En la cual se observa que al tener una estabilidad alta (baja energía libre de formación) reaccionara el azufre primero con el magnesio, después con el manganeso y al último con el hierro.

Esta grafica (diagrama de Ellingham) como se enuncio anteriormente son para sustancias puras, pero los hierro colados son soluciones diluidas que contienen un gran número de elementos, lo cual esta muy lejos del punto de saturación y de una actividad igual a uno, pero este tipo de diagramas puede dar una orientación de la tendencia general de los diferentes elementos para formar sulfuros.

El diagrama de Ellingham para sulfuros es similar en la forma al de los óxidos, esto es que la afinidad de los diferentes metales decrece con la temperatura y aumenta cuando disminuye la energía libre de formación, en la mayoría de los casos. Como se observa en la tabla No. 7. Donde la tendencia a formar sulfuros es mayor de abajo hacia arriba.

Sulfuro	ΔG (Kcal / g mol)	Punto de fusión (°C)
FeS	-25	1190
MnS	-71	1620
Na ₂ S	-80	1175
MgS	-95	2000
CaS	-172	2450
CeS	-195	2100

Tabla No. 7. Energías libres de formación para algunos sulfuros a 1482°C, con sus temperaturas de fusión. Donde la tendencia a formar sulfuros aumenta conforme disminuye la energía libre de formación.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

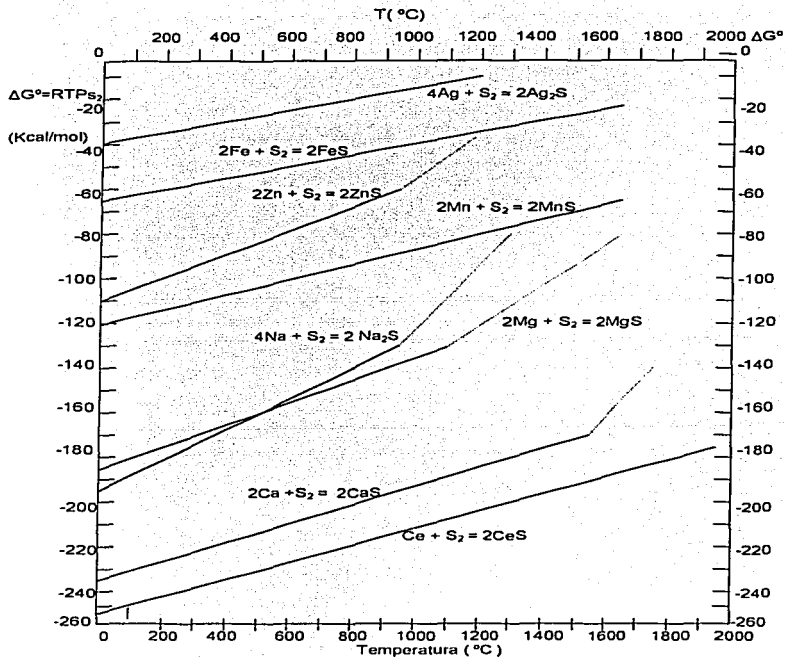


Figura No. 3. Diagrama de Ellingham para algunos sulfuros en estado estándar.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

1.7 TEORÍAS DEL CRECIMIENTO DEL GRAFITO COMPACTO

No hay una simple teoría para explicar el mecanismo por el cual los elementos modificadores cambian la forma del grafito, hay un gran número de hipótesis que se dividen en muchos grupos; por ejemplo:

- 1) La hipótesis en la cual toma en cuenta el papel de pequeñas partículas de grafito, la cual se basa en la desintegración de los núcleos de grafito; la transformación de éstas en núcleos amorfos.
- 2) La hipótesis en la cual toma en cuenta la influencia de los núcleos heterogéneos; que es la influencia del sistema de cristalización de las inclusiones de grafito.
- 3) La hipótesis en la cual toma en cuenta la influencia de los modificadores en la velocidad de crecimiento del núcleo del grafito, en esta hay que tomar en cuenta tres mecanismos que son: la adsorción de los elementos modificadores en la superficie del núcleo de grafito, penetración de los elementos modificadores en la red cristalina del grafito, incremento de la superficie de tensión de la fundición líquida.

En microscopía electrónica de barrido se ha observado que el grafito compacto, en fundiciones nodulares, se presenta debido a bajos contenidos de agentes esferoidizantes o alto contenido de antisferoidizantes, el grafito está interconectado dentro de celdas eutécticas, pero el crecimiento ocurre tanto en la dirección "c" como en la dirección "a", figura No. 4. La morfología de las celdas es similar a la de las hojuelas presentes en la fundición gris, pero el modo de crecimiento es diferente. El grafito compacto puede permanecer en contacto con el líquido o puede encapsularse en la "cáscara" de austenita.

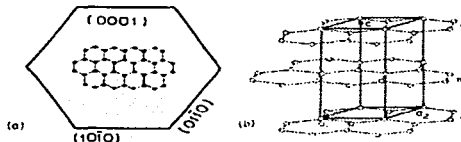


Figura No. 4. Crecimiento del grafito tanto en la dirección "a" como en la dirección "c" ⁽¹²⁾.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Como se mencionó anteriormente hay muchas hipótesis que describen el mecanismo de crecimiento del grafito compacto a continuación se enuncian algunas teorías más relevantes que describen este crecimiento.

1.7.1 HIPOTESIS EN LAS CUALES SE TOMA EN CUENTA EL PAPEL DE PEQUEÑAS PARTÍCULAS DE GRAFITO

- El grafito compacto de celdas eutécticas se desarrolla a partir de hojuelas o por la presencia de altos contenidos de elementos esferoidizantes, o por la degeneración de pequeños esferoides. El balance de elementos en la fundición con grafito compacto influye para que la zona bifásica se modifique creando una zona en la que el metal líquido en conjunto con el metal ya solidificado genere canales por los cuales el grafito compacto se interconecta desarrollando la estructura vermicular o de gusanos.

La fundición vermicular aparece en secciones gruesas de una fundición dúctil, incluso con suficientes cantidades de agentes esferoidizantes, se ha sugerido que este fenómeno ocurre porque al tener una velocidad baja de enfriamiento se tendrá una formación incompleta de la "cáscara" de austenita alrededor del esferoide y las corrientes térmicas pueden disolver una porción de la "cáscara" de austenita. Exponiendo el grafito al líquido, ciertamente el crecimiento de grafito compacto requiere un balance entre los elementos promotores de hojuelas como el S y O, elementos esferoidizantes como Mg, Ce o La y agentes antiesferoidizantes como son Ti y Al.

La morfología del grafito compacto se puede relacionar con la concentración de impurezas solubles en las fundiciones que solidifican con una pequeña intercalación de grafito subenfriado (hojuelas y grafito compacto), cuando la adsorción de impurezas sobre la intercalación controla el crecimiento del grafito.

- En las fundiciones hipereutécticas, el grafito es el primero en precipitar a partir de la solución líquida, desde la temperatura líquida hasta alcanzar la temperatura eutéctica. En las fundiciones eutécticas e hipoeutécticas, la nucleación y crecimiento del grafito no ocurre hasta que se haya alcanzado la temperatura eutéctica en el proceso de solidificación, por lo tanto el crecimiento del grafito requiere dos pasos que son nucleación

y crecimiento; la nucleación puede ocurrir homogéneamente o heterogéneamente, se piensa que la nucleación es heterogénea y que los sitios de nucleación del grafito son introducidos durante el tratamiento de esferoidización y durante la inoculación. Una de las explicaciones mas aceptadas son que el crecimiento es favorablemente dendrítico, esto significa que el cristal inicial de grafito desarrolla varias ramas, estas ramas generan otras ramas y así sucesivamente, si la frecuencia de ramificación es relativamente baja se forma una típica red interconectada de hojuelas de grafito, por lo tanto se forma fundición gris. Pero si la frecuencia de ramificación es alta se forma grafito esferoidal la figura No. 5 muestra el mecanismo de crecimiento del grafito esferoidal.

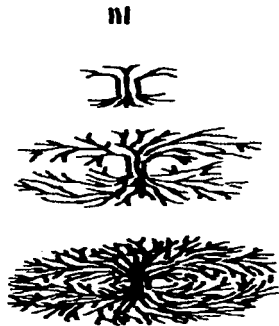


Figura No. 5. Diferentes formas del grafito en función de la frecuencia de ramificación⁽⁶⁾.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

- La siguiente teoría toma en cuenta que la nucleación tiene lugar fuera del esferoide y el crecimiento de grafito es hacia el interior. Se postula que para formar el grafito deben presentarse primero espacios con superficies libres y el grafito nuclea sobre estas superficies libres. El mecanismo propuesto es el siguiente.

- ✓ A temperaturas aproximadas a la temperatura de solidificación la mayoría del oxígeno disuelto en solución molecular combinado con Si, precipita como inclusiones microscópicas de SiO_2 .
- ✓ Óxidos de Ca, Al, Ba, Sr, etc., adicionados en la inoculación sirven como núcleos para la precipitación de SiO_2 y resulta una alta relación de dispersión.
- ✓ Tan pronto como una partícula distinta de SiO_2 aparece, el equilibrio entre Si, O y C se perturba se produce la siguiente reacción.



- ✓ Esta reacción conduce a la formación de burbujas de CO.
- ✓ El grafito nuclea sobre la superficie de las burbujas de gas CO.
- ✓ La principal dirección de crecimiento de los cristales individuales no es a lo largo del plano basal (el cual es el caso de la fundición gris) sino que es perpendicular a él.
- ✓ El crecimiento continua hasta que la burbuja esta llena de grafito figura No. 6.

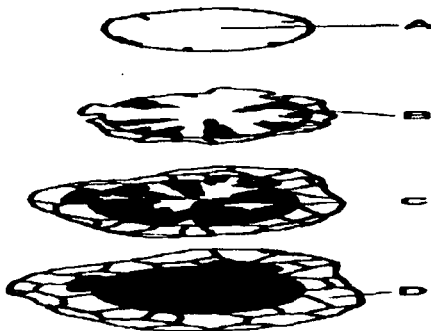


Figura No. 6. Crecimiento a partir de una burbuja en A se forma la burbuja de CO, B empieza el crecimiento, C el crecimiento es hacia el centro de la burbuja y D termina el crecimiento⁽⁹⁾.

TEORIA DE LA ENERGIA SUPERFICIAL

Esta teoría se basa en el hecho de que la energía superficial entre el grafito y el líquido es más alta en la fundición nodular que en la fundición gris. Se ha encontrado una energía superficial de 800-1100 dinas / cm para el grafito laminar y de 1400 dinas / cm para el grafito esferoidal.

Esta teoría sugiere que la alta energía interfacial puede curvar el crecimiento del cristal con el fin de reducir la relación energía / volumen, resultando un grafito esferoidal más que laminar.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Este modelo de crecimiento del grafito postula que el cambio de la forma laminar a esferoidal es debido a un cambio en la relación de crecimiento del plano (10T0) al plano (0001), es decir, un cambio en la dirección de crecimiento del cristal de grafito cambiando de la dirección a a la dirección c .

Bajo condiciones de equilibrio, el plano cristalográfico con la mayor densidad de átomos tiene una baja energía interfacial y una mínima velocidad de crecimiento en la dirección perpendicular al plano, sin embargo bajo condiciones de no equilibrio que prevalecen durante la solidificación de las fundiciones son importantes las siguientes consideraciones cinéticas de crecimiento.

Asumiendo crecimiento bidimensional, la mayor velocidad de crecimiento es en la fase con mayor densidad de átomos, donde la probabilidad de nucleación es mayor.

Impurezas reactivas como magnesio, cerio, lantano, en un ambiente metálico líquido libre de elementos que activan la superficie (como S, O₂, Pb, Sb, Ti), después de que estos elementos reactivos bloquean el crecimiento en la intercara del plano (10T0), resulta la formación de esferoides de grafito policristalinos.

1.8 METODOS DE TRATAMIENTO PARA LA NODULIZACION CON MAGNESIO^(5,7,8,9,22)

La adición de agentes esferoidizantes en la fundición líquida es el paso más importante para la producción tanto de la fundición nodular como de la fundición vermicular. El magnesio se usa exclusivamente como elemento esferoidizante y es frecuentemente adicionado con cerio o tierras raras, estos agentes tienen baja temperatura de vaporización, consecuentemente se deben adicionar con mucho cuidado.

El objetivo de los fundidores es producir fundiciones con la calidad requerida a bajo costo, por lo tanto la eficiencia en el tratamiento es una de las más importantes consideraciones que se deben de tomar en cuenta, ya que es el factor más inconsistente del proceso de nodularización, las lista de variables que influyen en la recuperación de magnesio es muy amplia. Por mencionar algunas como la temperatura del metal, tipo y tamaño del material nodulizante, calidad del metal a tratar y método de tratamiento; a continuación se enuncian los métodos más comunes para el tratamiento con magnesio.

1.8.1. METODO SANDWICH

El método Sándwich se derivó del llamado método de adición simple: El método Sándwich consiste en colocar el agente nodulizante (ferroaleación de Mg) en el fondo de la olla de tratamiento y debido a su reactividad con el oxígeno y con el fin de reducir la pérdida de magnesio por oxidación, se optó por poner un desnivel (escalón) dentro de la olla, en el cual se coloca el agente nodulizante cubierto con rebaba de acero o de fundición colada. Se cuida que éstos materiales no contengan cantidades significativas de Cr, Ti, Zr y V, ya que estos producen un efecto contrario. Así también elemento como Pb, Sn, Sb y Cd tienen un efecto perjudicial sobre la forma y tamaño del grafito.

La olla de tratamiento debe tener ciertas características como es la relación altura:diámetro, que va desde 1.5:1 hasta 3:1, el desnivel donde se coloca el agente nodulizante debe tener de radio igual a 1/3 del diámetro de la olla (D/3) y la altura igual a 1/6 del diámetro de la olla (D/6), como se observa en la Fig. No. 7. La eficiencia que presenta el magnesio en este tratamiento esta en el rango de 40 al 50 %.

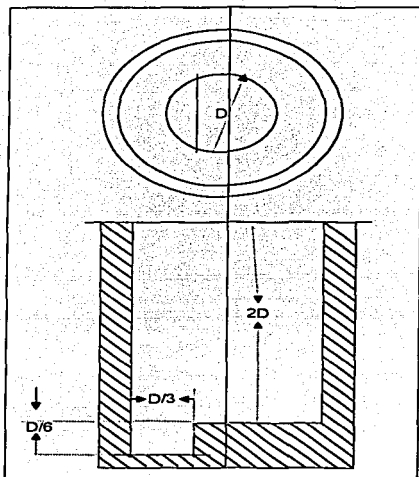


Figura No. 7. Esquema con dimensiones para la olla de tratamiento por el método sándwich.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

1.8.2. METODO DE LA CAMPANA DE INMERSION

Este método consiste de una campana, que esta formada de placas de acero recubiertas de refractario, dentro de ésta se coloca el agente nodulizante. Una vez que el agente nodulizante se encuentra dentro de la campana, ésta se sumerge en la olla de tratamiento. Con esto se evita que el agente flote y que por consecuencia se tenga un mayor porcentaje de magnesio recuperado. El agente puede ser granular o en forma de bloques aglutinados. En este método se pueden colectar los humos y tener mecanismos de autocontrol del desplazamiento del pistón.

La desventaja más importante de este método, es que al introducir la campana dentro del metal liquido, éste pierde temperatura antes de tener contacto con la campana, por tanto se debe tener un control estricto de la temperatura de la campana. Uno de los dispositivos se muestra en la figura No. 8. La eficiencia de magnesio en este tratamiento es de 50%.

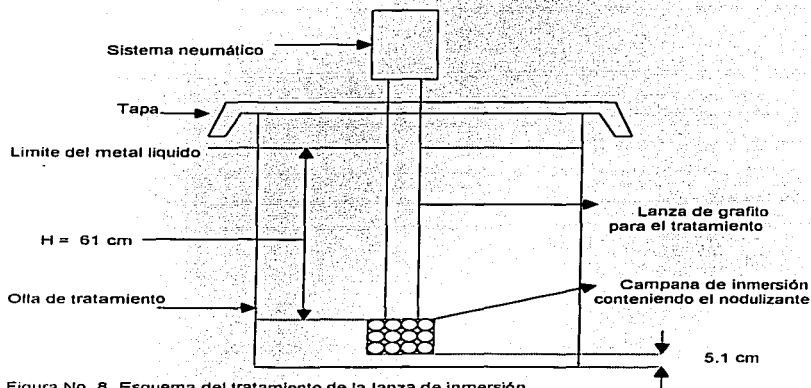


Figura No. 8. Esquema del tratamiento de la lanza de inmersión.

TES...
FALLA DE ORIGEN

2.6.3. TRATAMIENTO DENTRO DEL MOLDE

Este proceso toma como principio que la disolución del Mg se efectúa en los corredores y en las entradas del sistema de colada del molde. La aleación nodulizante que se utiliza es aproximadamente 1% del peso de la pieza, esta se pone dentro de la cámara de reacción y la incorporación de magnesio ocurre durante el proceso de flujo del metal líquido a través de la cámara. Esta se muestra en la figura No. 9.

Las ventajas de este método son: eliminación de humos productos de la reacción ya que son absorbidos por el molde, tiene de 70 % a 80 % de recuperación de magnesio, eliminación de la postinoculación, bajas temperaturas relativas de colada.

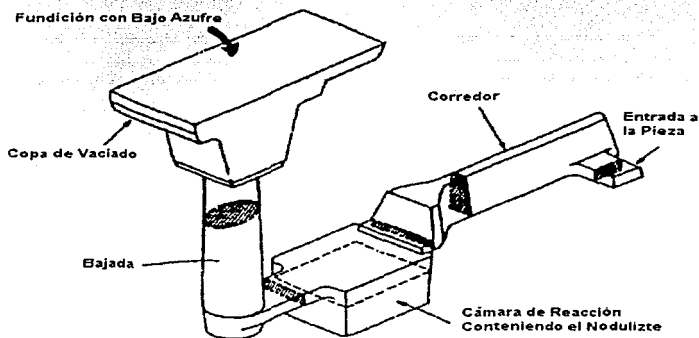


Figura No. 9. Esquema para el tratamiento en el molde donde se observa la cámara de reacción conteniendo al agente nodulizante.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

1.9 TIPOS DE NODULIZANTES⁽⁹⁾

Los materiales como nodulizantes mas ampliamente usado son aquellas aleaciones que contienen magnesio con otros elementos, estos elementos pueden determinar, beneficiar la formación del vermiculo o nódulo a su vez también para controlar la reacción del magnesio, estas aleaciones se clasifican como aleaciones base Níquel o base Silicio tabla No. 8.

La aleación base Níquel se ha estado usando desde 1949 en un gran numero de métodos de nodularización desde el método sándwich hasta el método dentro del molde, la recuperación de Mg en función del método utilizado es desde un 50% hasta un 70%; el Níquel actúa como grafitante y un buen estabilizador de la perlita y ayuda a minimizar la variación de las propiedades mecánicas entre el espesor y lo ancho de la pieza obtenida.

Las aleaciones base Silicio son las mas comúnmente usadas para el tratamiento de nodularización, llamadas comúnmente ferroaleaciones o también llamada ferrosiliciomagnesio (FeSiMg), hay una gran variedad de industrias productoras de esta aleación por lo tanto también hay una gran variedad de composiciones químicas, en la tabla No. 8, se observa que la variación en composición se encuentra mayormente en los elementos como magnesio, calcio, aluminio, cerio y tierras raras, el uso de estas aleaciones esta determinado por el tipo de método o aplicación en la fabricación de la fundición vermicular o nodular; por ejemplo, el calcio actúa como un nucleante, ayuda que la reacción del magnesio no sea tan violenta, aumenta la recuperación del magnesio, ya que reacciona primeramente el calcio con el azufre contenido en el metal liquido; el Cerio y tierras raras ayudan a minimizar la variación del tamaño, forma, cantidad y distribución del grafito precipitado. El aluminio promueve la nucleación del grafito.

Base Niquel									
Aleación	% Mg	% Si	% Ce	% Ni	% TRE	% Ca	% Al	% C	% Fe
1	13-16	-	-	balance	-	-	-	2.0	-
2	13-16	26-33	-	balance	-	-	-	-	5max
3	4.2	-	-	balance	-	-	-	2.0max	-
Base Silicio									
Aleación	% Mg	% Si	% Ce	% Ni	% TRE	% Ca	% Al	% C	% Fe
0.3%Ce	5-6.5	43-48	0.25-4	-	-	0.8-1.3	1.2max	-	balance
0.5Ce	5-6.5	43-48	0.5-0.75	-	-	0.8-1.3	1.2max	-	balance
0.5TRE	5-6.5	43-48	0.3-0.45	-	0.5-0.75	0.8-1.3	1.2max	-	balance
1.75TRE	5-6.5	43-48	0.85-1.0	-	1.5-2.0	0.8-1.3	1.2max	-	balance
Alto Ca	5-6.5	43-48	0.3-0.6	-	0.6-1.0	1.5-2.25	1.2max	-	balance

Tabla No. 8. Composiciones nominales de aleaciones nodulizantes.

CAPITULO II

2. DESARROLLO EXPERIMENTAL

En este trabajo se evaluó la relación existente entre el Magnesio y Azufre, para obtener una fundición vermicular, por lo tanto, este se basa en la cantidad de magnesio residual obtenido al final del tratamiento de nodularización, los experimentos se realizaron variando el nivel de magnesio residual, por consiguiente el magnesio residual es la única variable considerada, los niveles teóricos de magnesio residual evaluados son:

Corrida	Magnesio residual Teórico.
1	0.02%
2	0.03%
3	0.04%
4	0.05%
5	0.06%
6	0.07%
7	0.08%

Tabla No. 9. Porcentajes de Magnesio residual teóricos.

Las variables como son: materia prima, composición química de la fundición final, temperatura de vaciado tanto en el reactor como en molde, método de tratamiento, tipo de nodulizante, tipo de arena, pieza a producir, tiempo de reacción de nodulizante en el metal líquido permanecieron constante.

2.1 MATERIALES Y EQUIPOS UTILIZADOS

- Arena de moldeo en verde. Arena sílica, con 4 % de humedad, 10% de bentonitas (6% Cálctica, 4% sódica).

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

- Ferroaleación base silicio utilizada para el tratamiento de nodulización, con la siguiente composición química.

Mg	Si	Ce	Ca	Al
4.75-6.25%	44.0-48.0%	0.5-0.7%	1%	0.7%

- Recarburante, con la siguiente composición química.

Carbono	Cenizas	Azufre
99.8 %	0.1	0.008%

- Escorificante: silicato de sodio granulado

- Inoculante FeSi, con la siguiente composición química.

Silicio	Zirconio	Calcio	Manganeso	Aluminio
65%	5%	1.5%	3.5 %	1.5 % max.

Los equipos utilizados son:

- Espectrómetro de emisión marca espectrolab M8B.
- Horno de inducción de 75 KWatts, con capacidad de 100Kg de ferrosos.
- Microscopio Metalográfico.
- Analizador de imágenes.

Para poder llegar a la composición química requerida previamente se hizo un balance de carga con los diferentes tipos de chatarras tanto de fundición gris, nodular y acero con bajo contenido de azufre, las composiciones de las diferentes chatarras se observan en la tabla No. 10 y en la tabla No. 11. se observan los kilogramos utilizados para cada nivel de magnesio residual teórico.

Tipo de chatarra (acero o fundición)	Elemento					
	Carbono	Silicio	Manganeso	Fósforo	Azufre	Magnesio
Chatarra 1	3.577	2.061	0.705	0.0188	0.0149	-
Chatarra 2	3.487	2.15	0.318	0.03	0.05	-
Chatarra 3	3.531	1.831	0.613	0.0252	0.0181	-
Chatarra 4	2.853	1.768	0.413	0.0315	0.0397	-
Chatarra 5	3.615	1.920	0.534	0.0258	0.0227	-
Chatarra 6	0.0979	0.1815	1.135	0.0134	0.0127	-

Tabla No. 10. Composición química de las chatarras que se utilizaron para el desarrollo del tema, en las cuales de la chatarra 1 a la 5 son de hierros colados y la chatarra 6 es de acero 1010.

Corrida	Mg residual teórico	Kg de carga	Chatarras de Hierros colados		Chatarra de acero 1010
1	0.02%	18	chatarra 4= 9 Kg	-	chatarra 6= 9 Kg
2	0.03%	18	chatarra 2= 9 Kg	-	chatarra 6= 9 Kg
3	0.04%	18	chatarra 1= 4 Kg	chatarra 4 = 5 Kg	chatarra 6= 9 Kg
4	0.05%	18	chatarra 3= 4 Kg	chatarra 1 = 11 Kg	chatarra 6= 3 Kg
5	0.06%	18	chatarra 2= 2.5 Kg	-	chatarra 6= 15.5 Kg
6	0.07%	17	chatarra 5= 7 Kg	-	chatarra 6= 10 Kg
7	0.08%	18	chatarra 5= 7 Kg	-	chatarra 6= 10 Kg

Tabla No. 11. Kilogramos utilizados de las chatarras para cada uno de los niveles de magnesio residual teórico.

Para obtener las fundiciones vermiculares, primero se definió el tipo de materia prima a utilizar, composición química de la fundición vermicular que se producirá, balances de carga pertinentes, tipo de horno, método de tratamiento de nodularización, facilidad para poder realizar el tratamiento en el laboratorio de fundición, pieza a producir y evaluación de las piezas obtenidas.

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**

2.2 COMPOSICIÓN QUÍMICA

En esta parte se opto por tener un rango constante de composición durante el desarrollo del trabajo, por lo tanto la composición nominal de la fundición es:

% Carbono	% Silicio	% Manganeso	% Fósforo	% Azufre
3.5 a 3.8	2.2 a 2.7	0.6 max.	0.05max.	0.015 max.

2.2.1 BALANCE DE CARGA PARA LA PRIMERA MUESTRA

OBTENER UN MATERIAL CON 0.015 % MAX. DE AZUFRE PARA OBTENER UNA FUNDICION CON UN MAGNESIO RESIDUAL DE 0.02 %

En esta parte se presenta un balance de carga para el primer nivel de 0.02% de magnesio residual. Los restantes balances se describen en el apéndice A.

Composición requerida:

C = 3.6, Si = 2.2, Mn = 0.6 max. P = 0.05 max. S = 0.15 max.

Materias primas utilizadas con una base de calculo de 18 Kg.

9 Kg de chatarra # 4 con una composición de:

Carbono	Silicio	Manganeso	Fósforo	Azufre	Magnesio
2.853	1.768	0.413	0.0315	0.0397	-

9 Kg de chatarra # 6 con una composición de:

Carbono	Silicio	Manganeso	Fósforo	Azufre	Magnesio
0.0979	0.1815	1.135	0.0134	0.0127	-

**CALCULO DE LOS KILOGRAMOS DE LOS ELEMENTOS REQUERIDOS PARA UNA
COMPOSICIÓN REQUERIDA**

Composición requerida

C =3.6%, Si =2.2%, Mn =0.6, P =0.05%, S =0.015%

La eficiencia que se tomo para los elementos en un horno de inducción se baso en pruebas hechas anteriormente, así dando como resultado una eficiencia para el carbono de 80%, para el Silicio del 95%, para el manganeso, fósforo y azufre del 100%.

$$\text{Kg elemento} = \frac{\text{Kg Carga} \frac{\% \text{ del elemento en la chatarra}}{100}}{\frac{\% \text{ eficiencia}}{100}}$$

$$\text{Kg } C' = \frac{18 \left(\frac{3.6}{100} \right)}{\frac{80}{100}} = 0.81 \text{ Kg} \quad , \quad \text{Kg } Si = \frac{18 \left(\frac{2.2}{100} \right)}{\frac{95}{100}} = 0.416 \text{ Kg}$$

$$\text{Kg } Mn = \frac{18 \left(\frac{0.6}{100} \right)}{\frac{100}{100}} = 0.108 \text{ Kg} \quad , \quad \text{Kg } P = \frac{18 \left(\frac{0.05}{100} \right)}{\frac{100}{100}} = 0.009 \text{ Kg}$$

$$\text{Kg } S = \frac{18 \left(\frac{0.015}{100} \right)}{\frac{100}{100}} = 0.0027 \text{ Kg}$$

CALCULO DE LOS KILOGRAMOS DE ELEMENTOS QUE APORTA CADA CHATARRA, EN FUNCION DE LOS KILOGRAMOS QUE SE ALIMENTAN DE ESTAS AL HORNO DE INDUCCIÓN.

Para calcular los kilogramos aportados no se toma en cuenta la eficiencia por lo tanto el calculo se realiza de la siguiente manera:

$$\text{Kg } C' = \text{Kg Carga} \left(\frac{\% \text{ del elemento en la chatarra}}{100} \right) =$$

Para la chatarra # 4

$$Kg\ C' = 9 \left(\frac{2.853}{100} \right) = 0.256\ Kg, \quad Kg\ Si = 9 \left(\frac{1.768}{100} \right) = 0.159\ Kg$$

$$Kg\ Mn = 9 \left(\frac{0.413}{100} \right) = 0.037\ Kg, \quad Kg\ P' = 9 \left(\frac{0.0315}{100} \right) = 0.003\ Kg$$

$$Kg\ S' = 9 \left(\frac{0.0397}{100} \right) = 0.003\ Kg$$

Para la chatarra # 6

$$Kg\ C' = 9 \left(\frac{0.0979}{100} \right) = 0.008\ Kg, \quad Kg\ Si = 9 \left(\frac{0.1815}{100} \right) = 0.016\ Kg$$

$$Kg\ Mn = 9 \left(\frac{1.135}{100} \right) = 0.102\ Kg, \quad Kg\ P' = 9 \left(\frac{0.0134}{100} \right) = 0.001\ Kg$$

$$Kg\ S' = 9 \left(\frac{0.0127}{100} \right) = 0.001\ Kg$$

CALCULO DE LOS KILOGRAMOS QUE APORTAN LAS 2 CHATARRAS PARA CADA ELEMENTO.

Chatarra 4 + Chatarra 6 = Kg que aportan las dos chatarras

CARBONO

$$0.256\ Kg + 0.008\ Kg = 0.264\ Kg\ C'$$

SILICIO

$$0.159\ Kg + 0.016\ Kg = 0.0319\ Kg\ Si$$

MANGANESO

$$0.037\ Kg + 0.102\ Kg = 0.139\ Kg\ Mn$$

FÓSFORO

$$0.003\ Kg + 0.001\ Kg = 0.004\ Kg\ P'$$

AZUFRE

$$0.003\ Kg + 0.001\ Kg = 0.004\ Kg\ S'$$

CALCULO DE KILOGRAMOS REQUERIDO PARA PODER OBTENER UNA COMPOSICIÓN DE 3.6% EN PESO DE CARBONO, YA QUE LOS KILOGRAMOS APORTADOS DE LAS DOS CHATARRAS SON MENORES AL REQUERIDO.

Kg requeridos - Kg aportados por las dos chatarras = Kg a adicionar

$$0.81 K_{Cr} - 0.264 K_{Cr} = 0.546 K_{Cr}$$

Para el Silicio el calculo se realiza después de obtener la composición preliminar, esta composición se obtiene antes de realizar el tratamiento de nodularización, ya que con esta se obtiene el azufre final, el cual sirve como base para el calculo del nodulizante que se adicionara en el reactor para poder obtener al final una fundición vermicular con 0.02 % Mg residual.

Composición preliminar.

Corrida	Mg residual teórico	% C	% Si	% Mn	% P	% S	% Mg
1	0.02%	3.957	1.572	0.736	0.02	0.021	-

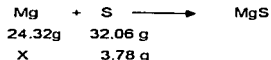
CALCULO DE LOS GRAMOS REQUERIDOS DE FeSiMg PARA OBTENER UNA FUNDICIÓN VERMICULAR CON 0.02 % Mg RESIDUAL.

Gramos de azufre de la composición preliminar

$$\text{Gramos de S} = \left(\text{Kg de Carga} \left(\frac{\% \text{ S}}{100} \right) \right) * 1000 =$$

$$\text{Gramos de S} = \left(18 \left(\frac{0.021}{100} \right) \right) * 1000 = 3.78 \text{ g}$$

CALCULO DEL MAGNESIO QUE REACCIONA ESTEQUEOMETRICAMENTE CON EL AZUFRE



Magnesio que se necesita para reaccionar con el azufre es de 2.86 g

CALCULO DE LOS GRAMOS DE MAGNESIO REQUERIDOS PARA OBTENER UN Mg_{RESIDUAL} DE 0.02%

$$\text{Gramos de Mg}_{\text{res}} = \left(\frac{(\% \text{ Mg} * \text{ Kg de Carga})}{100} \right) * 1000$$

$$\text{Gramos de Mg}_{\text{res}} = \left(18 \left(\frac{0.02\%}{100} \right) \right) * 1000 = 3.6 \text{ g}$$

CALCULO DEL MAGNESIO REQUERIDO

$$\text{Gramos de Mg}_{\text{requerido}} = \text{Gramos de Mg}_{\text{reaccionado}} + \text{Gramos de Mg}_{\text{residual}}$$

$$\text{Gramos de Mg}_{\text{requerido}} = 2.86 + 3.6 = 6.46 \text{ g}$$

CALCULO DEL FERROSILICIOMAGNESIO (FeSiMg5%) NECESARIOS, YA QUE LA FERROALECIÓN CONTIENE 5% DE Mg, TOMANDO UNA EFICIENCIA EN LA RECUPERACIÓN DE 100% DE Mg.

$$\text{Gramos de Fe Si 5 \% Mg} = \frac{\text{Gramos Mg}_{\text{res}}}{5} * 100$$

$$\text{Gramos de Fe Si 5 \% Mg} = \frac{6.46}{5} * 100 = 129.2 \text{ g}$$

$$\text{Gramos de Fe Si 5 \% Mg} = 129.2 \text{ g}$$

CALCULO DE SI QUE APORTA EL NODULIZANTE (FeSiMg) QUE CONTIENE 46% DE SI EN PESO.

$$\text{Kilogramos de Si que aporta el nodulizante} = \left(129.2 * \frac{46}{100} \right) / 1000 = 0.059 \text{ Kg}$$

$$\text{Kilogramos requeridos} = 0.416 \text{ Kg}$$

CALCULO DE FeSi65% REQUERIDO PARA OBTENER 2.2 % DE SI.

calculo del Si que se tienen en la composición química preliminar

$$\text{Kg Si} = 18 \left(\frac{1.572}{100} \right) = 0.282 \text{ Kg}$$

Calculo que aporta la inoculación y pos inoculación con un porcentaje de 0.01% en peso respectivamente para cada caso.

$$Kg Si = 18 \left(\frac{0.01}{100} \right) = 0.018 Kg$$

Por lo tanto la inoculación y la pos inoculación aportan 0.0036 Kg

Por lo tanto para los Kilogramos requeridos de FeSi es igual a:

$$Kg Si_{requeridos} - Kg Si_{de la Composicion preliminar} - Kg Si_{del nodulizante} - Kg Si_{de la inoculacion y pos-inoculacion} = Kg Si_{faltante}$$

$$0.416 Kg - 0.282 Kg - 0.059 Kg - 0.0036 Kg = 0.07 Kg$$

El Si faltante se adiciona al horno con la ferroaleación de FeSi, con un contenido de 65% en peso de Si.

Como el FeSi contiene solamente 65% en peso de Silicio se tiene que:

$$Kg requeridos = \frac{0.07}{65} * 100 = 0.108 Kg = 108 g de Fe 65% Si$$

Por lo tanto se necesitan agregar 108 gramos de FeSi65 %, antes del tratamiento de nodularización.

2.3 METODO DE TRATAMIENTO DE NODULARIZACION UTILIZADO EN ESTE TRABAJO

El método de nodularización utilizado para obtener la fundición vermicular fue el de las dos cámaras, este método es nuevo, por lo cual la razón para la utilización de este método fue proponer un diferente camino para obtener una fundición vermicular.

El método de las dos cámaras consiste en un reactor con dos cámaras. La primera cámara sirve para vaciar el metal líquido desde el horno y la segunda cámara de reacción, contiene tanto al agente nodulizante (Fe / 65% Si / 0.5% Mg) como al inoculante (Fe / 65% Si), en ésta se lleva acabo la reacción del Magnesio con el metal líquido, como se observa en la figura No. 10.

Para poder poner en contacto el metal líquido con el agente nodulizante, previamente vaciado en la primera cámara, se gira el reactor 90° y así el metal líquido pasa de la primera cámara a la

segunda cámara, donde se realiza la reacción entre el metal líquido y el agente nodulizante, el tiempo de reacción fue de 1 minuto, sé descorifica y después se vacía en los moldes previamente preparados.

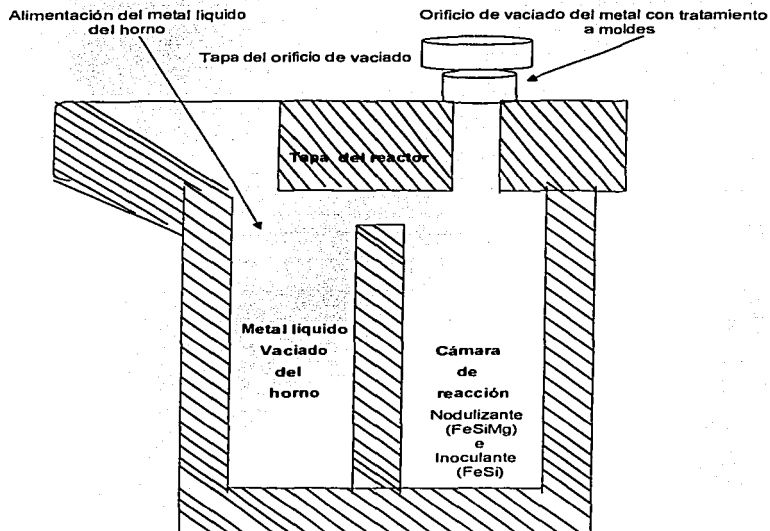


Figura No. 10. Reactor de las dos cámaras utilizado para el tratamiento de nodularización.

2.4 FUSION

La fusión se llevo a cabo en un horno de inducción, al cargar los materiales o chatarras se tenía cuidado de que no tuvieran grasas, arena u otro material extra que pudiera afectar el resultado de la composición química final de la fusión.

La secuencia de fusión para obtener una fundición con una composición definida fue de la siguiente manera:

- ✓ Alimentación de chatarras de fundición gris, nodular, fundición blanca.
- ✓ Al tener el primer material en estado liquido se adiciona el carbono en forma de recarburante, para que el material a tratar tenga la composición requerida.
- ✓ El siguiente paso es la alimentación de chatarras de acero para evitar que el carbono se queme, con esto se garantiza que el acero sumerja el recarburante al seno del baño liquido y así también se disuelva más rápido.
- ✓ Por ultimo se alimenta al baño liquido las ferroaleaciones (FeSi, FeMn).
- ✓ El siguiente paso fue elevar la temperatura a 1400 °C para poder obtener una muestra preliminar y analizarla a través del espectrómetro de emisión, con esto se garantiza que se tiene la composición requerida antes de hacer el tratamiento de nodularización para obtener una fundición vermicular, por el contrario si en el análisis químico preliminar no se tiene la composición requerida, se tendrán que hacer los cálculos pertinentes hasta tener la composición requerida.
- ✓ Al tener la composición requerida, el siguiente paso es elevar la temperatura en un rango de 1640 °C a 1660 °C, la razón de esta temperatura es por que al vaciar en la primera cámara y después pasar el metal liquido a la segunda cámara se pierden 200 °C aproximadamente, con esto se garantiza que la temperatura de tratamiento este en un rango de 1440 °C-1460 °C.

2.5 INOCULACION Y POSTINOCULACION

La adición de partículas en cantidades de 0.1% de FeSi al momento de estar vaciando el material del horno y en el momento de vaciar a los moldes de arena se les llama inoculación y post-inoculación respectivamente.

Este proceso es con la finalidad de promover una nucleación heterogénea y así tener una distribución de tamaño de grafito uniforme en toda la matriz principalmente, como así también evitar que no se forme la fase cementita, ya que en el presente caso se quiere obtener una matriz perlítica en todos los niveles de magnesio.

La inoculación se lleva a cabo antes de bascular el material, el inoculante se agrega en la segunda cámara junto en el agente nodulizante en un porcentaje de 0.1% en peso con respecto al total de la carga, la post inoculación se lleva a cabo al momento de vaciar a los moldes y también previamente se adiciona una cierta cantidad en los moldes; esto es que el inoculante se adiciona directamente en el chorro del material líquido. Con esto se garantiza que el grafito precipitado tenga un tamaño uniforme en la matriz y así también se evita la formación de la fase cementita.

2.6 EVALUACION DE MUESTRAS OBTENIDAS

- La pieza diseñada para evaluar tanto la composición química como la microestructura se muestra en la figura No. 11, las cuales se colaron en moldes de arena en verde.
- A las piezas obtenidas se les hizo un corte transversal en el centro de la probeta.
- A esta muestra se le hizo una metalografía de la siguiente manera: desbaste grueso (lija 80), desbaste fino (lija 240, 320, 400, 600), pulido grueso (Alumina de 1.0 μ m), pulido fino (1.0 μ m y 0.05 μ m).
- Se analizó en microscopio metalográfico, para así poder evaluar: tipo de matriz, tipo de grafito precipitado y porcentaje, utilizando el patrón de comparación de T. Kimura¹⁵, el cual se muestra en el apéndice B.

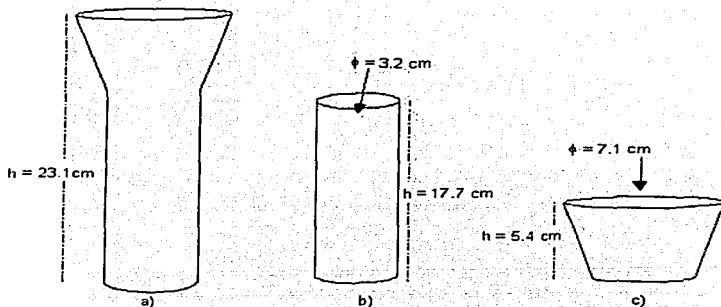


Figura No. 11. a) Pieza completa obtenida en molde de arena, b) Muestra cilíndrica para su evaluación, c) Alimentador de la muestra.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

CAPITULO III

3. RESULTADOS

En la tabla No. 12, se presentan las composiciones químicas preliminares obtenidas antes del tratamiento de nodularización, para así adicionar la cantidad correcta de nodulizante para obtener un nivel de magnesio residual teórico, en función del porcentaje de azufre que contiene el metal a tratar.

Corrida	Mg residual teórico	% C	% Si	% Mn	% P	% S	% Mg
1	0.02%	3.957	1.572	0.736	0.02	0.021	-
2	0.03%	3.917	1.632	0.723	0.213	0.0221	-
3	0.04%	3.987	1.624	0.723	0.0226	0.0214	-
4	0.05%	3.833	1.517	0.684	0.0182	0.0151	-
5	0.06%	3.924	1.514	0.597	0.0212	0.0179	-
6	0.07%	3.976	0.711	0.753	0.0163	0.0149	-
7	0.08%	3.882	0.949	0.695	0.0155	0.0129	-

Tabla No. 12. Composiciones químicas preliminares antes del tratamiento de nodularización.

En la siguiente tabla, se presentan las composiciones químicas finales obtenidas para la obtención de una fundición vermicular con diferentes niveles de magnesio residual, estas composiciones fueron obtenidas por medio del espectrómetro de emisión.

Corrida	Mg residual teórico	% C	% Si	% Mn	% P	% S	% Mg
1	0.02%	3.452	2.678	0.692	0.0164	0.0114	0.0143
2	0.03%	3.583	2.457	0.688	0.0202	0.0148	0.0113
3	0.04%	3.667	2.387	0.696	0.0197	0.0133	0.015
4	0.05%	3.461	2.430	0.653	0.0192	0.0112	0.0197
5	0.06%	3.459	2.575	0.577	0.0194	0.0148	0.0210
6	0.07%	3.717	2.179	0.658	0.0198	0.0146	0.0315
7	0.08%	3.533	2.469	0.662	0.0192	0.0129	0.0365

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**

EL CALCULO PARA OBTENER EL PORCENTAJE DE Mg RESIDUAL SE REALIZA DE LA SIGUIENTE MANERA Y LOS RESULTADOS SE PRESENTAN EN LA TABLA No. 14.

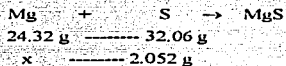
CORRIDA No. 1.

Gramos de azufre de la composición preliminar con un %S = 0.0114 y un %Mg total = 0.0143

$$\text{Gramos de S} = \text{Car} \left(\frac{\%S_{\text{analisis}}}{100} \right) * 1000$$

$$\text{Gramos de S} = 18 \left(\frac{0.0114}{100} \right) * 1000 = 2.052 \text{ g se tienen en la fundición}$$

CALCULO DEL MAGNESIO QUE REACCIONA ESTEQUEOMETRICAMENTE CON EL AZUFRE



Se necesita para reaccionar estequeometricamente con el azufre = 1.55 g de Mg.

CALCULO DE LOS GRAMOS DE MAGNESIO TOTALES QUE SE TIENEN EN LA FUNDICIÓN

$$\text{Gramos de Mg}_{\text{total}} = \left(\text{Carga} \left(\frac{\% \text{Mg}_{\text{analisis}}}{100} \right) \right) * 1000$$

$$\text{Gramos de Mg}_{\text{total}} = \left(18 \left(\frac{0.0143}{100} \right) \right) = 2.574 \text{ g de Mg que se tienen}$$

CALCULO DEL MAGNESIO RESIDUAL DESPUÉS DE LA REACCIÓN CON AZUFRE

$$\text{Gramos de Mg}_{\text{residual}} = \text{Gramos de Mg}_{\text{total}} - \text{Gramos de Mg}_{\text{reaccionado}}$$

Gramos de Mg_{residual} = 2.574 - 1.55 = 1.024 g se tienen después de la reacción con azufre

Por lo tanto se tiene un porcentaje de magnesio residual de 0.006 % ya que:

$$\begin{aligned} 18 \text{ Kg de Carga} & \text{-----} 100\% \\ 0.001024 \text{ Kg de Mg} & \text{-----} X \\ X & = 0.006\% \text{ de Mg residual} \end{aligned}$$

Haciendo los cálculos pertinentes se obtienen el porcentaje de magnesio residual experimental para los diferentes niveles, estos porcentajes se muestran en la siguiente tabla.

Corrida	% S de análisis químico final	% Mg de análisis químico final	% Mg residual teórico	% Mg residual al final del tratamiento
1	0.0114	0.0143	0.02	0.006
2	0.0148	0.0113	0.03	0.0001
3	0.0133	0.015	0.04	0.005
4	0.0112	0.0197	0.05	0.011
5	0.0148	0.0210	0.06	0.009
6	0.0146	0.0315	0.07	0.020
7	0.0129	0.0365	0.08	0.026

Tabla No. 14. Porcentajes de Mg residual en función del % de azufre del análisis químico final.

MICROESTRUCTURAS OBTENIDAS DESPUES DEL TRATAMIENTO DE NODULARIZACIÓN

La evaluación de la proporción de grafito vermicular en cada Corrida se baso en los patrones de T. Kimura^(15, 23), presentados en el apéndice B, basándose al mismo tiempo en la figura No. 12, donde se muestran las diferentes formas de grafito precipitado. De la figura No. 13 a la figura No. 19 se presentan las microestructuras obtenidas después del tratamiento de nodulización, a través del analizador de imágenes a 100X, sin atacar. Todas las Corridas presentan una transición grafito vermicular-nodular.

TESIS
FALLA DE ORIGEN



Figura No. 12: Diferentes formas del grafito precipitado.

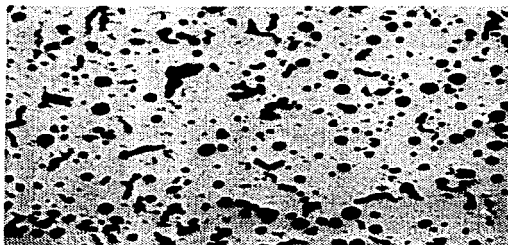


Figura No. 13. Microestructura de la corrida # 1 con 0.006 % de Mg residual, con 73 % de grafito vermicular y 27% de grafito nodular, sin ataque a 100X.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

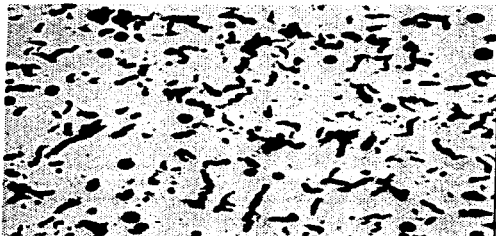


Figura No. 14. Microestructura de la corrida # 2 con 0.0001 % de Mg residual, con 95% de grafito vermicular y 5% de grafito nodular, sin ataque a 100X.

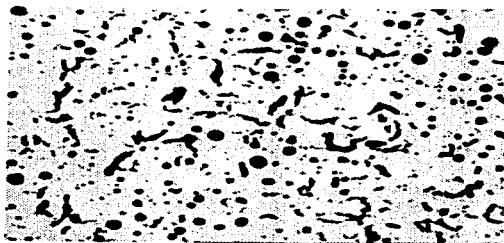


Figura No. 15. Microestructura de la corrida # 3 con 0.005 % de Mg residual, con 85 % de grafito Vermicular y 15% de grafito nodular, sin ataque a 100X.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

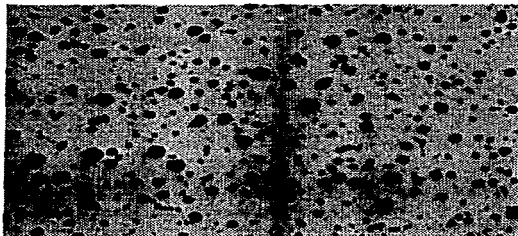


Figura No. 16. Microestructura de la corrida # 4 con 0.011 % de Mg residual, con 10% de grafito vermicular y 90% de grafito nodular, sin ataque a 100X.

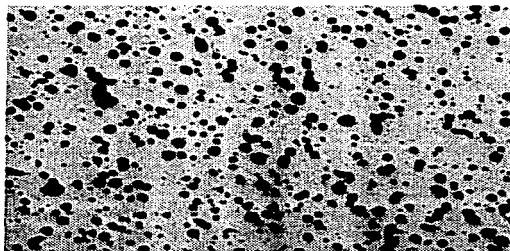


Figura No. 17. Microestructura de la corrida # 5 con 0.009 % de Mg residual, con 20 % de grafito vermicular y 80% de grafito nodular, sin ataque a 100X.

TESTS CON
FALLA DE ORIGEN

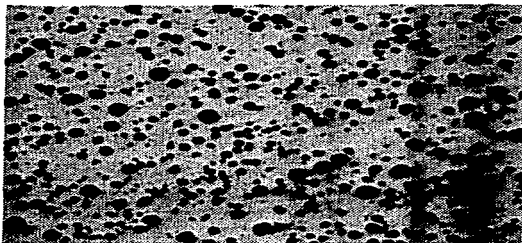


Figura No. 18. Microestructura de la corrida # 6 con 0.02 % de Mg residual, con 100% de grafito nodular, sin ataque a 100X.

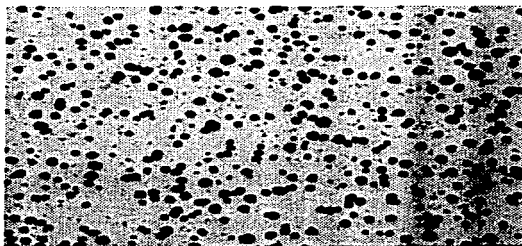


Figura No. 19. Microestructura de la corrida # 7 con 0.026% de Mg residual y con 100% de grafito nodular, sin ataque a 100X.

FALLA DE ORIGEN

La obtención del porcentaje de Grafito Vermicular se baso en patrones establecidos de T. Kimura^(15, 23), este patrón toma como referencia la cantidad de grafito en forma de vermiculos y esferoides en la estructura en una transición Vermicular-Nodular. En la tabla No 15. Se presentan para cada una de las Corridas obtenidas, estructura, el tipo de grafito, porcentaje de grafito compacto y porcentaje de grafito esferoidal.

Corrida	% Mg total en la Corrida	% S en la Corrida	% Mg Residual	Estructura	% Grafito Vermicular	% Grafito Esferoidal
1	0.0143	0.0114	0.006	Transición Vermicular-Nodular	73	27
2	0.0113	0.0148	0.0001	-	95	5
3	0.015	0.0133	0.005	-	85	15
4	0.0197	0.0112	0.011	-	10	90
5	0.021	0.0148	0.009	-	20	80
6	0.0315	0.0146	0.02	-	-	100
7	0.0365	0.0129	0.026	-	-	100

Tabla No. 15. Porcentajes de grafito vermicular obtenidos a partir de los patrones propuestos por T. Kimura^(15, 23).

Corrida	% Mg Residual	% Grafito Vermicular	% Grafito Esferoidal
2	0.0001	95	5
3	0.005	85	15
1	0.006	73	27
5	0.009	20	80
4	0.011	10	90
6	0.02	-	100
7	0.026	-	100

Tabla No. 16. Porcentajes de grafito vermicular y nodular en función del contenido del Mg residual obtenidos a partir de los patrones propuestos por T. Kimura^(15, 23).

TRABAJO
FALLA DE ORIGEN

CAPITULO IV

4. ANALISIS DE RESULTADOS

4.1 RECUPERACION DE MAGNESIO

En el análisis de resultados para la cantidad de Magnesio residual obtenidos experimentalmente se observa que hay una diferencia en los valores del Magnesio residual teóricos y experimentales, esto se debe principalmente a la baja eficiencia en la recuperación del magnesio, que presenta el reactor de las dos cámaras utilizado en el tratamiento de nodulización, esta eficiencia se debe principalmente a que el magnesio se volatiliza al entrar en contacto con el metal líquido produciéndose MgO (por la reacción con el oxígeno disuelto en el hierro líquido y el oxígeno atmosférico).

Otro factor que afecta la eficiencia en la recuperación del magnesio, es por ejemplo, la reacción que se lleva a cabo entre el azufre y el magnesio, ya que como se observa en las composiciones preliminares, hay un porcentaje de azufre mayor que en la composición final después del tratamiento de nodulización, esta diferencia entre el Magnesio teórico y experimental podría estar en función de la reacción que ocurre entre el azufre y el magnesio, como producto de la reacción produciéndose sulfuro de magnesio e incorporándose una parte en la escoria y otra en el seno del metal líquido.

Con esto se observa que también no hay una tendencia regular en la pérdida de magnesio, este se puede ver con el nivel de magnesio residual teórico de 0.02%, el magnesio residual experimental es de 0.006 %, por otro lado, para el de 0.05% de Mg teórico el magnesio residual experimental es de 0.011% de la tabla No. 14 de resultados. Este comportamiento es consecuencia de la eficiencia en la recuperación del magnesio residual como se observa en la tabla No. 17, donde se muestra las eficiencias obtenidas, en la cual se observa que los valores más altos en la eficiencia son de la corrida 1, 6, 7 y los valores más bajos se presentan en las corridas 2, 3, 4 y 5 respectivamente. La eficiencia de estas últimas corridas pudo estar afectada por:

- Por un mal tratamiento de nodulización. Si el metal líquido pasa a la siguiente cámara del reactor lentamente, el nodulizante que se encuentra en esta cámara tendrá mayor tiempo para estar en contacto con el oxígeno, con esto se oxidara en mayor proporción el magnesio.
- Por mal pesado de nodulizante. Que el peso requerido para cada nivel sea menor al calculado.
- Que el nodulizante tenga un por ciento en peso de Mg menor del que cita la hoja técnica.

Corrida	Gramos de Mg adicionado	Gramos de Mg recuperado	Eficiencia del Mg recuperado
1	6.46	2.5	38.69 %
2	8.402	2.03	24.16 %
3	10.06	2.7	26.83 %
4	11	3.2	29.09 %
5	13.11	3.78	28.83 %
6	13.82	5.35	38.71 %
7	15.25	6.205	40.68 %

Tabla No. 17. Eficiencia en la recuperación del magnesio.

4.2. PORCIENTO DE GRAFITO VERMICULAR EN FUNCION DEL MAGNESIO RESIDUAL

Se observa que el contenido de magnesio residual tiene una gran influencia en la estructura de la fundición, como se observa en la tabla No. 16. Donde se observa que el mayor porcentaje de grafito vermicular (95%), se presenta con un nivel de magnesio residual de 0.0001 % y para un nivel de 0.005 % se tiene un 85 % de grafito vermicular, por el contrario al aumentar el contenido de magnesio residual, disminuye el porcentaje de grafito vermicular y aumenta el porcentaje de grafito esferoidal. Por ejemplo con un contenido de magnesio residual igual a 0.006% se presenta un porcentaje de grafito vermicular del 73 %, pero esta característica se observa mejor en los niveles de 0.02 % y 0.026 % donde el porcentaje de grafito vermicular es cero por consiguiente se tiene un 100 % de grafito esferoidal. Esto se debe principalmente a que al aumentar la proporción del magnesio en el metal disminuye la energía interfacial entre el grafito y el metal líquido, teniendo

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

como consecuencia un crecimiento tanto en la dirección A como en la dirección C. Esto se observa claramente en la figura No. 20, donde al disminuir el porcentaje magnesio residual aumenta el porcentaje del grafito vermicular, presentándose un 95% de este con un porcentaje de magnesio residual de 0.0001% y al aumentar este porcentaje se presenta un aumento de grafito esferoidal, presentándose un 100% de este con un porcentaje de magnesio residual igual a 0.02%.

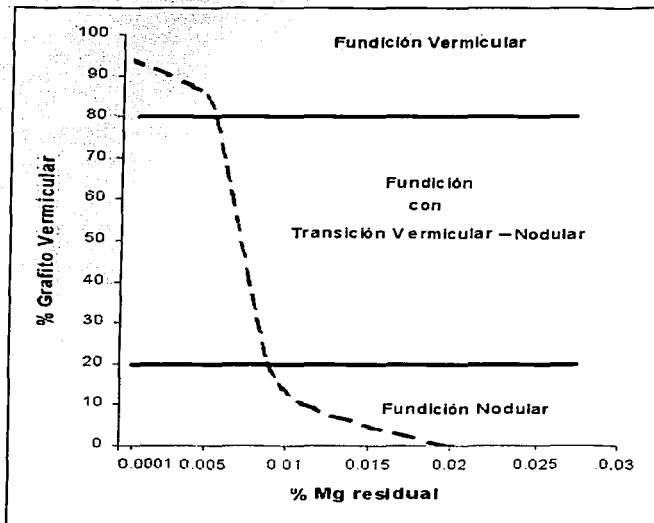


Figura No. 20. Efecto del porcentaje de magnesio residual en la forma del grafito precipitado.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

4. 3 RELACIÓN AZUFRE MAGNESIO

Del porcentaje del azufre obtenido a través del análisis químico de las fundiciones, se observa que no hay una gran variación (tabla No 14), ya que los niveles oscilan entre 0.0112 % a 0.0148 %, con esto se tiene un nivel casi constante. Por lo tanto principalmente tiene un efecto en la cantidad de magnesio que reacciona con este, este efecto se puede ver claramente en las corridas 2 y 3 que tienen la misma cantidad de azufre, pero la cantidad de magnesio total es diferente (corrida 2 con 0.0113% y corrida 5 con 0.02%), como consecuencia la corrida 5 tiene un porcentaje mayor en el magnesio residual que la corrida 2 y por consiguiente un efecto en la morfología de grafito precipitado, obteniéndose un mayor porcentaje de grafito vermicular en la corrida 2. Si se toma en cuenta que el azufre permanece constante en 0.01% se observa que con niveles de magnesio total altos, se tendrá una disminución en la cantidad de grafito vermicular y así obteniéndose al final una microestructura con una mayor proporción de grafito precipitado en forma de nódulos. Como se observa en la corridas 4, 5, 6, 7, en donde la cantidad de magnesio aumenta considerablemente en comparación de las otras corridas, donde se presenta un porcentaje de grafito vermicular del 20, 10, y cero por ciento en las dos últimas respectivamente. En comparación con las tres primeras corridas donde se presenta el mayor porcentaje de grafito vermicular.

CAPITULO V

5. CONCLUSIONES

En Base de los resultados obtenidos y analizados en este trabajo se puede llegar a las siguientes conclusiones.

- Con el método de las dos cámaras para el tratamiento de nodulización es posible obtener una fundición vermicular.
- En un rango de magnesio residual de 0.0001 % a 0.006 % se presenta un mayor porcentaje de grafito vermicular.
- El máximo de magnesio residual para obtener una fundición vermicular a través del método de las dos cámaras es de 0.006%.
- Con niveles mayores de 0.006% de magnesio residual se tiene una disminución del grafito vermicular y un aumento del grafito esferoidal.
- El Mg requerido para lograr que el grafito precipitado sea vermicular o esferoidal, es el Mg residual, debido a lo anterior hay un requerimiento mayor de Mg, ya que este reacciona con el azufre. Por tanto el Mg residual esta en función del contenido de azufre presente.
- De la anterior aseveración el requerimiento de magnesio total para obtener una fundición vermicular esta en función del contenido de azufre presente.

BIBLIOGRAFIA

1. Sintercast, *Historia del Hierro de Grafito Compacto.*, www.sintercast.se/egihist.htm, 1997
2. Boyer E. & Gall Timothy I., *Metals Handbook*, Desk edition. by American Society for Metals, USA, 1ª ed., 1984, pp 5.1-5.11.
3. Heine, Richard W., Loper Jr & Carl R. Rosenthal, Phillip C., *Principles of Metal Casting*, 2ª Edición, USA, 1967, pp 49-1 648.
4. Shao, S. & Dawson, S., *The Mechanical and Physical Properties of Compacted Graphite Iron*, www.sintercast.se/success.htm, 1997.
5. American Society for Metals, *Compacted Graphite Iron*, Metals Handbook, Vol. 15, Casting, USA, 9ª ed., 1992, pp 668-676.
6. American Society for Metals, *Compacted Graphite Iron Metals*, Metals Handbook, Vol. 1, Properties and selection: Iron, Steels and High Performance alloys, USA, 9ª ed., 1992, pp 56-70, 85-94.
7. American Society for Metals, *Cast Iron*, Metals Handbook Desk Edition, USA, 1ª ed., 1984 pp 5.1-5.12.
8. American Foundrymen's Society Inc., *Ductil Iron Handbook*, USA, 1ª ed., 1992, pp 1-8, 140-142, 148-153, 155-165, 167-168.
9. Stephen Istvan Karsay, *Ductile Iron Production Practices*, American Foundrymen's Society, USA, 1ª Ed., 1975, pp 24-30, 54-76.
10. Stoughton Bradley, *The Metallurgy of Iron and Steel*, Mac Graw -Hill, USA, 3ª ed., pp 350-369.
11. Ekey D. C. & Winter W. P., *Introduction to Foundry Technology*, Mac Graw-Hill, USA, 1ª ed., 1958, pp 124-130.

12. Elliott Bsc. Roy, *Cast Iron Technology*, Butterworths, USA, 1st ed., 1988, pp11-109.
13. Walton Charles F., *Grey and Ductil Iron*, Casting Handbook, Iron Foundry's Society Inc. USA, 1971, pp 100-120.
14. Bettelle Geneva Research Center, *The Metallurgy of Cast Iron*, pp. 179-195.
15. Kimura T. & Lopper Jr. C. R., *Rare Earth Silicide Additions to Cast Iron*, AFS Transactions, (1980), pp 67-76.
16. Altstetter J. D., Nowicki R. M., *Compacted Graphite Iron: Its Properties and Automotive Applications*, AFS Transactions, (1982), pp 959-970.
17. Monroe R. W., Bates C. E., *Some Thermal and Mechanical Properties of Compacted Graphite Iron*, AFS Transactions (1982), pp 615-619.
18. Liu J., Ding N. X. & Mercer J. L., *Effect of Type Amount of Treatment Alloy on Compacted Graphite Produced by the Flotret Process*, AFS Transactions, (1985), pp 675-684.
19. Dawson Steve., *Process Control for Production of Compacted Graphite Iron*, 102nd AFS Congress Atlanta, 10-13 April de1998.
20. Skaland Tobjom, *Ductile Iron a Comparion of Alternative Treatment Methods*, Foundry Ferroalloys, 2000.
21. Dawson Steve., *Compacted Graphite Iron: Mechanical and Physical Proprieties for Engine Design*, Werkstoff und Automobiltrieb, Dresden, Germany, 28-29 October 1999.
22. Cuevas Ayala Carlos, *Métodos de Producción de Hierro Compacto y Nodular*, Tesis de Licenciatura, Facultad de Química, UNAM, pp 27-28., 1997
23. Cornell H. H. & Loper Jr. C. R., *Variables Involved in the Production of Compacted Graphite Cast Iron Using Rare Earth-Containing Alloys*, AFS Transactions (1985), pp 435-442.

APENDICE A

CALCULO DE LOS KILOGRAMOS DE LOS ELEMENTOS REQUERIDOS PARA UNA COMPOSICIÓN NOMINAL

Composición requerida

C = 3.6%, Si = 2.2%, Mn = 0.6, P = 0.05%, S = 0.015%

La eficiencia que se tomo para los elementos en un horno de inducción se baso en pruebas hechas anteriormente, así dando como resultado una eficiencia para el carbono de 80%, para el Silicio del 95%, para el manganeso, fósforo y azufre del 100%.

$$\text{Kg elemento} = \frac{\text{Kg Carga} \times \frac{\% \text{ del elemento en la chatarra}}{100}}{\frac{\% \text{ eficiencia}}{100}}$$

$$\text{Kg C} = \frac{18 \left(\frac{3.6}{100} \right)}{\frac{80}{100}} = 0.81 \text{ Kg} \quad , \quad \text{Kg Si} = \frac{18 \left(\frac{2.2}{100} \right)}{\frac{95}{100}} = 0.416 \text{ Kg}$$

$$\text{Kg Mn} = \frac{18 \left(\frac{0.6}{100} \right)}{\frac{100}{100}} = 0.108 \text{ Kg} \quad , \quad \text{Kg P} = \frac{18 \left(\frac{0.05}{100} \right)}{\frac{100}{100}} = 0.009 \text{ Kg}$$

$$\text{Kg S} = \frac{18 \left(\frac{0.015}{100} \right)}{\frac{100}{100}} = 0.0027 \text{ Kg}$$

BALANCE DE CARGA PARA LA CORRIDA 2

Materias primas utilizadas con una base de calculo de 18 Kg.

9 Kg de chatarra # 2 con una composición de:

Carbono	silicio	manganeso	fósforo	azufre	magnesio
3.487	2.15	0.318	0.03	0.05	-

9 Kg de chatarra # 6 con una composición de:

Carbono	silicio	manganeso	fósforo	azufre	magnesio
0.0979	0.1815	1.135	0.0134	0.01272	-

CALCULO DE LOS KILOGRAMOS DE ELEMENTOS QUE APORTA CADA CHATARRA, EN FUNCION DE LOS KILOGRAMOS QUE SE ALIMENTAN DE ESTAS AL HORNO

$$K_G C = K_G \text{ Carga} \left(\frac{\% \text{ del elemento en la chatarra}}{100} \right) =$$

Para la chatarra # 2

$$K_G C = 9 \left(\frac{3.487}{100} \right) = 0.313 K_G, \quad K_G Si = 9 \left(\frac{2.15}{100} \right) = 0.193 K_G$$

$$K_G Mn = 9 \left(\frac{0.318}{100} \right) = 0.028 K_G, \quad K_G P = 9 \left(\frac{0.03}{100} \right) = 0.002 K_G$$

$$K_G S = 9 \left(\frac{0.05}{100} \right) = 0.004 K_G$$

Para la chatarra # 6

$$K_G C = 9 \left(\frac{0.0979}{100} \right) = 0.008 K_G, \quad K_G Si = 9 \left(\frac{0.1815}{100} \right) = 0.016 K_G$$

$$K_G Mn = 9 \left(\frac{1.135}{100} \right) = 0.102 K_G, \quad K_G P = 9 \left(\frac{0.0134}{100} \right) = 0.001 K_G$$

$$K_G S = 9 \left(\frac{0.0127}{100} \right) = 0.001 K_G$$

CALCULO DE LOS KILOGRAMOS QUE APORTAN LAS 2 CHATARRAS PARA CADA ELEMENTO.

Chatarra 2 + Chatarra 6 = Kg que aportan las dos chatarras

$$\text{CARBONO} \text{-----} 0.313 K_g + 0.008 K_g = 0.321 K_g C'$$

$$\text{SILICIO} \text{-----} 0.193 K_g + 0.016 K_g = 0.209 K_g Si$$

$$\text{MANGANESO} \text{-----} 0.028 K_g + 0.102 K_g = 0.13 K_g Mn$$

$$\text{FÓSFORO} \text{-----} 0.002 K_g + 0.001 K_g = 0.003 K_g P'$$

$$\text{AZUFRE} \text{-----} 0.004 K_g + 0.001 K_g = 0.005 K_g S$$

CALCULO DE KILOGRAMOS REQUERIDO PARA PODER OBTENER UNA COMPOSICIÓN DE 3.6% EN PESO DE CARBONO

Kg requeridos - Kg aportados por las dos chatarras = Kg a adicionar

$$0.81 K_g - 0.321 K_g = 0.489 K_g C'$$

CALCULO DE LOS GRAMOS REQUERIDOS DE FeSiMg PARA OBTENER UNA FUNDICIÓN VERMICULAR CON 0.03 % Mg RESIDUAL.

Composición preliminar.

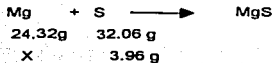
Corrida	Mg residual teórico	% C	% Si	% Mn	% P	% S	% Mg
2	0.03%	3.917	1.632	0.723	0.213	0.0221	-

Gramos de azufre de la composición preliminar

$$\text{Gramos de S} = \left(\text{Car} \left(\frac{\% S}{100} \right) \right) * 1000$$

$$\text{Gramos de S} = \left(18 \left(\frac{0.022}{100} \right) \right) * 1000 = 3.96 \text{ g}$$

CALCULO DEL MAGNESIO QUE REACCIONA ESTEQUEOMETRICAMENTE CON EL AZUFRE



Magnesio que se necesita para reaccionar con el azufre = 3.0 g

CALCULO DEL LOS GRAMOS DE MAGNESIO PARA OBTENER UN Mg RESIDUAL DE 0.03%

$$\text{Gramos de Mg}_{\text{res}} = \left(\frac{(\% \text{ Mg} * \text{Kg de Carga})}{100} \right) * 1000$$

$$\text{Gramos de Mg}_{\text{res}} = \left(18 \left(\frac{0.03\%}{100} \right) \right) * 1000 = 5.4 \text{ g}$$

CALCULO DEL MAGNESIO REQUERIDOS

$$\text{Gramos de Mg}_{\text{requerido}} = \text{Gramos de Mg}_{\text{reaccional n}} + \text{Gramos de Mg}_{\text{residual}}$$

$$\text{Gramos de Mg}_{\text{requerido}} = 3 + 5.4 = 8.4 \text{ g}$$

CALCULO DEL FERROSILICIOMAGNESIO (FeSiMg5%Mg) TOMANDO UN EFICIENCIA EN LA RECUPERACIÓN DE 100% DE Mg.

$$\text{Gramos de Fe Si 5 \%Mg} = \frac{\text{Gramos Mg}_{\text{res}} * 100}{5}$$

$$\text{Gramos de Fe Si 5 \%Mg} = \frac{8.4}{5} * 100 = 168 \text{ g}$$

$$\text{Gramos de Fe Si 5 \%Mg} = 168 \text{ g}$$

CALCULO DE SI QUE APORTA EL NODULIZANTE (FeSiMg) CONTIENE 46% DE SI EN PESO.

$$\text{Kilogramos que aporta el nodulizante} = \left(168 * \frac{46}{100} \right) / 1000 = 0.077 \text{ Kg}$$

$$\text{Kilogramos requeridos} = 0.077 \text{ Kg.}$$

CALCULO DE Fe 65% Si REQUERIDO PARA OBTENER 2.2 % DE Si.

calculo del Si que se tienen en la composición química preliminar

$$\text{Kg Si} = 18 \left(\frac{1.632}{100} \right) = 0.29 \text{ Kg}$$

Calculo que aporta la inoculación y pos inoculación con un porcentaje de 0.01% en peso respectivamente para cada caso.

$$\text{Kg Si} = 18 \left(\frac{0.01}{100} \right) = 0.0018 \text{ Kg}$$

Por lo tanto la inoculación y la pos inoculación aportan 0.0036 Kg

$$\text{Kg requeridos} - \text{Kg de la Composición preliminar} - \text{Kg del nodulizante} - \text{Kg de la inoculación y pos-inoculación} = \text{Kg a adicionar de Fe 65\% Si}$$

$$0.416 \text{ Kg} - 0.29 \text{ Kg} - 0.077 \text{ Kg} - 0.0036 \text{ Kg} = 0.04 \text{ Kg}$$

Como el FeSi contiene solamente 65% en peso de Silicio se tiene que:

$$\text{Kg requeridos} = \frac{0.04}{65} * 100 = 0.061 \text{ Kg} = 61.5 \text{ g de Fe 65\% Si}$$

Por lo tanto se necesitan agregar de Ferrosilicio con 65 % Si 61.5 gramos, antes del tratamiento de nodulización.

BALANCE DE CARGA PARA LA CORRIDA 3

Materias primas utilizadas con una base de calculo de 18 Kg.

4 Kg de chatarra # 1 con una composición de:

carbono	silicio	Manganeso	fósforo	Azufre	magnesio
3.577	2.061	0.705	0.0188	0.0149	-

5 Kg de chatarra # 4 con una composición de:

carbono	silicio	Manganeso	fósforo	azufre	magnesio
2.853	1.768	0.413	0.0315	0.0397	-

9 Kg de chatarra # 6 con una composición de :

carbono	silicio	Manganeso	fósforo	azufre	magnesio
0.0979	0.1815	1.135	0.0134	0.0127	-

CALCULO DE LOS KILOGRAMOS DE ELEMENTOS QUE APORTA CADA CHATARRA, EN FUNCION DE LOS KILOGRAMOS QUE SE ALIMENTAN DE ESTAS.

$$Kg C = Kg Carga \left(\frac{\% \text{ del elemento en la chatarra}}{100} \right) =$$

Para la chatarra # 1

$$K_G C = 4 \left(\frac{3.577}{100} \right) = 0.143 K_G, \quad K_G Si = 4 \left(\frac{2.061}{100} \right) = 0.082 K_G$$

$$K_G Mn = 4 \left(\frac{0.705}{100} \right) = 0.028 K_G, \quad K_G P = 4 \left(\frac{0.018}{100} \right) = 0.0007 K_G$$

$$K_G S = 4 \left(\frac{0.014}{100} \right) = 0.0005 K_G$$

Para la chatarra # 4

$$K_G C = 5 \left(\frac{2.853}{100} \right) = 0.142 K_G, \quad K_G Si = 5 \left(\frac{1.768}{100} \right) = 0.088 K_G$$

$$K_G Mn = 5 \left(\frac{0.413}{100} \right) = 0.02 K_G, \quad K_G P = 5 \left(\frac{0.031}{100} \right) = 0.001 K_G$$

$$K_G S = 5 \left(\frac{0.039}{100} \right) = 0.001 K_G$$

Para la chatarra # 6

$$K_G C = 9 \left(\frac{0.0979}{100} \right) = 0.008 K_G, \quad K_G Si = 9 \left(\frac{0.1815}{100} \right) = 0.016 K_G$$

$$K_G Mn = 9 \left(\frac{1.135}{100} \right) = 0.102 K_G, \quad K_G P = 9 \left(\frac{0.0134}{100} \right) = 0.001 K_G$$

$$K_G S = 9 \left(\frac{0.0127}{100} \right) = 0.001 K_G$$

CALCULO DE LOS KILOGRAMOS QUE APORTAN LAS 3 CHATARRAS PARA CADA ELEMENTO.

Chatarra 1 + Chatarra 4 + Chatarra 6 = Kg que aportan las dos chatarras

CARBONO----- $0.143 K_G + 0.0142 K_G + 0.008 K_G = 0.293 K_G C$

SILICIO----- $0.082 K_G + 0.088 K_G + 0.016 K_G = 0.186 K_G Si$

MANGANESO--- $0.028 K_G + 0.02 K_G + 0.102 K_G = 0.15 K_G Mn$

FÓSFORO----- $0.0007 K_G + 0.001 K_G + 0.001 K_G = 0.0027 K_G P$

AZUFRE----- $0.0005 K_G + 0.001 K_G + 0.001 K_G = 0.0025 K_G S$

CALCULO DE KILOGRAMOS REQUERIDO PARA PODER OBTENER UNA COMPOSICIÓN DE 3.6% EN PESO DE CARBONO

Kg requeridos - Kg aportados por las tres chatarras = Kg a adicionar

$$0.81 \text{ Kg} - 0.293 \text{ Kg} = 0.517 \text{ Kg } C$$

CALCULO DE LOS GRAMOS REQUERIDOS DE FeSiMg PARA OBTENER UNA FUNDICIÓN VERMICULAR CON 0.04 % Mg RESIDUAL.

Composición preliminar.

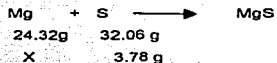
Muestra	Mg residual teórico	% C	% Si	% Mn	% P	% S	% Mg
3	0.04%	3.987	1.624	0.723	0.0226	0.0214	-

Gramos de azufre de la composición preliminar

$$\text{Gramos de S} = \left(\text{Car} \left(\frac{\% S}{100} \right) \right) * 1000$$

$$\text{Gramos de S} = \left(18 \left(\frac{0.021}{100} \right) \right) * 1000 = 3.78 \text{ g}$$

CALCULO DEL MAGNESIO QUE REACCIONA ESTEQUIOMETRICAMENTE CON EL AZUFRE



Magnesio que se necesita para reaccionar con el azufre = X = 2.86 g

CALCULO DEL LOS GRAMOS DE MAGNESIO PARA OBTENER UN Mg_{RESIDUAL} DE 0.04%

$$\text{Gramos de Mg}_{\text{res}} = \left(\frac{(\% \text{Mg} * \text{Kg de Carga})}{100} \right) * 1000$$

$$\text{Gramos de Mg}_{\text{res}} = \left(18 \left(\frac{0.04\%}{100} \right) \right) * 1000 = 7.2 \text{ g}$$

CALCULO DEL MAGNESIO REQUERIDOS

$$\text{Gramos de Mg}_{\text{requerido}} = \text{Gramos de Mg}_{\text{reaccionado}} + \text{Gramos de Mg}_{\text{residual}}$$

$$\text{Gramos de Mg}_{\text{requerido}} = 2.86 + 7.2 = 10.06 \text{ g}$$

CALCULO DEL FERROSILICIOMAGNESIO (FeSiMg5%Mg) TOMANDO UN EFICIENCIA EN LA RECUPERACIÓN DE 100% DE Mg.

$$\text{Gramos de Fe Si 5 \%Mg} = \frac{\text{Gramos Mg}_{\text{req.}} * 100}{5}$$

$$\text{Gramos de Fe Si 5 \%Mg} = \frac{10.06}{5} * 100 = 201.2 \text{ g}$$

$$\text{Gramos de Fe Si 5 \%Mg} = 201.2 \text{ g}$$

CALCULO DE SI QUE APORTA EL NODULIZANTE(FeSiMg) CONTIENE 46% DE SI EN PESO.

$$\text{Kilogramos que aporta el nodulizante} = \left(201.2 * \frac{46}{100} \right) / 1000 = 0.092 \text{ Kg}$$

$$\text{Kilogramos requeridos} = 0.092 \text{ Kg.}$$

CALCULO DE Fe 65% Si REQUERIDO PARA OBTENER 2.2 % DE SI.

calculo del Si que se tienen en la composición química preliminar

$$K_{\text{g}} \text{ Si} = 18 \left(\frac{1.624}{100} \right) = 0.29 \text{ Kg}$$

Calculo que aporta la inoculación y pos inoculación con un porcentaje de 0.01% en peso respectivamente para cada caso.

$$K_{\text{g}} \text{ Si} = 18 \left(\frac{0.01}{100} \right) = 0.0018 \text{ Kg}$$

Por lo tanto la inoculación y la pos inoculación aportan 0.0036 Kg

$$K_{\text{g}} \text{ requeridos} - K_{\text{g}} \text{ de la Composición preliminar} - K_{\text{g}} \text{ del nodulizante} - K_{\text{g}} \text{ de la inoculación y pos-inoculación} = K_{\text{g}} \text{ a adicionar de Fe 65\% Si}$$

$$0.416 \text{ Kg} - 0.29 \text{ Kg} - 0.092 \text{ Kg} - 0.0036 \text{ Kg} = 0.03 \text{ Kg}$$

Como el FeSi contiene solamente 65% en peso de Silicio se tiene que:

$$K_{\text{g}} \text{ requeridos} = \frac{0.03}{65} * 100 = 0.046 \text{ Kg} = 46 \text{ g de Fe 65\% Si}$$

Por lo tanto se necesitan agregar de Ferrosilicio con 65 % Si 46 gramos, antes del tratamiento de nodulización

BALANCE DE CARGA PARA LA CORRIDA 4

Materias primas utilizadas con una base de calculo de 18 Kg.

4 Kg de chatarra # 3 con una composición de:

Carbono	silicio	manganeso	fósforo	azufre	magnesio
3.531	1.831	0.613	0.0252	0.0181	-

11 Kg de chatarra # 1 con una composición de:

Carbono	silicio	manganeso	fósforo	azufre	magnesio
3.577	2.061	0.705	0.0188	0.0149	-

3 Kg de chatarra # 9 con una composición de:

Carbono	silicio	manganeso	fósforo	azufre	magnesio
0.0979	0.1815	1.135	0.0134	0.0127	-

CALCULO DE LOS KILOGRAMOS DE ELEMENTOS QUE APORTA CADA CHATARRA, EN FUNCION DE LOS KILOGRAMOS QUE SE ALIMENTAN DE ESTAS.

$$K_{gr} C' = K_{gr} \text{Carga} \left(\frac{\% \text{ del elemento en la chatarra}}{100} \right) =$$

Para la chatarra # 3

$$K_{gr} C' = 4 \left(\frac{3.531}{100} \right) = 0.141 K_{gr}, \quad K_{gr} Si = 4 \left(\frac{1.831}{100} \right) = 0.073 K_{gr}$$

$$K_{gr} Mn = 4 \left(\frac{0.613}{100} \right) = 0.024 K_{gr}, \quad K_{gr} P = 4 \left(\frac{0.025}{100} \right) = 0.001 K_{gr}$$

$$K_{gr} S = 4 \left(\frac{0.0181}{100} \right) = 0.0007 K_{gr}$$

Para la chatarra # 1

$$K_{gr} C' = 11 \left(\frac{3.577}{100} \right) = 0.393 K_{gr}, \quad K_{gr} Si = 11 \left(\frac{2.061}{100} \right) = 0.226 K_{gr}$$

$$K_g Mn = 11 \left(\frac{0.705}{100} \right) = 0.077 K_g, K_g P = 11 \left(\frac{0.018}{100} \right) = 0.001 K_g$$

$$K_g S = 11 \left(\frac{0.0149}{100} \right) = 0.001 K_g$$

Para la chatarra # 6

$$K_g C = 3 \left(\frac{0.0979}{100} \right) = 0.002 K_g, K_g Si = 3 \left(\frac{0.1815}{100} \right) = 0.0005 K_g$$

$$K_g Mn = 3 \left(\frac{1.135}{100} \right) = 0.034 K_g, K_g P = 3 \left(\frac{0.0134}{100} \right) = 0.0004 K_g$$

$$K_g S = 3 \left(\frac{0.0127}{100} \right) = 0.0003 K_g$$

CALCULO DE LOS KILOGRAMOS QUE APORTAN LAS 3 CHATARRAS PARA CADA ELEMENTO.

Chatarra 3 + Chatarra 3 + Chatarra 6 = Kg que aportan las tres chatarras

CARBONO ----- 0.141 K_g + 0.393 K_g + 0.002 K_g = 0.536 K_g C

SILICIO ----- 0.073 K_g + 0.226 K_g + 0.0005 K_g = .299 K_g Si

MANGANESO-----0.024 K_g + 0.077 K_g + 0.034 K_g = 0.135 K_g Mn

FÓSFORO-----0.01 K_g + 0.01 K_g + 0.0004 K_g = 0.0204 K_g P

AZUFRE-----0.0007 K_g + 0.001 K_g + 0.0003 K_g = 0.002 K_g S

CALCULO DE KILOGRAMOS REQUERIDO PARA PODER OBTENER UNA COMPOSICIÓN DE 3.6% EN PESO DE CARBONO.

K_g requeridos - Kg aportados por las tres chatarras = Kg a adicionar

$$0.81 K_g - 0.536 K_g = 0.274 K_g C$$

CALCULO DE LOS GRAMOS REQUERIDOS DE FeSiMg PARA OBTENER UNA FUNDICIÓN VERMICULAR CON 0.05 % Mg RESIDUAL

Composición preliminar.

Muestra	Mg residual teórico	% C	% Si	% Mn	% P	% S	% Mg
4	0.05%	3.833	1.517	0.684	0.0182	0.0151	-

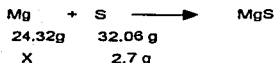
TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Gramos de azufre de la composición preliminar

$$\text{Gramos de S} = \left(\text{Car} \left(\frac{\% \text{ S}}{100} \right) \right) * 1000$$

$$\text{Gramos de S} = \left(18 \left(\frac{0.015}{100} \right) \right) * 1000 = 2.7 \text{ g}$$

CALCULO DEL MAGNESIO QUE REACCIONA ESTEQUIOMETRICAMENTE CON EL AZUFRE



Magnesio que se necesita para reaccionar con el azufre = X = 2.04 g

CALCULO DEL LOS GRAMOS DE MAGNESIO PARA OBTENER UN Mg_{RESIDUAL} DE (0.05%)

$$\text{Gramos de Mg}_{\text{res}} = \left(\frac{(\% \text{ Mg} * \text{Kg de Carga})}{100} \right) * 1000$$

$$\text{Gramos de Mg}_{\text{res}} = \left(18 \left(\frac{0.05\%}{100} \right) \right) * 1000 = 9 \text{ g}$$

CALCULO DEL MAGNESIO REQUERIDOS

$$\text{Gramos de Mg}_{\text{requerido}} = \text{Gramos de Mg}_{\text{reaccionado}} + \text{Gramos de Mg}_{\text{residual}}$$

$$\text{Gramos de Mg}_{\text{requerido}} = 2.04 + 9 = 11.04 \text{ g}$$

CALCULO DEL FERROSILICIOMAGNESIO (FeSiMg5%Mg) TOMANDO UN EFICIENCIA EN LA RECUPERACIÓN DE 100% DE Mg.

$$\text{Gramos de Fe Si 5 \%Mg} = \frac{\text{Gramos Mg}_{\text{res}} * 100}{5}$$

$$\text{Gramos de Fe Si 5 \%Mg} = \frac{11.04}{5} * 100 = 220.8 \text{ g}$$

$$\text{Gramos de Fe Si 5 \%Mg} = 220.8 \text{ g}$$

CALCULO DE SI QUE APORTA EL NODULIZANTE(FeSiMg) CONTIENE 46% DE SI EN PESO.

$$\text{Kilogramos que aporta el nodulizante} = \left(220.8 * \frac{46}{100} \right) / 1000 = 0.101 \text{ Kg}$$

$$\text{Kilogramos requeridos} = 0.101 \text{ Kg.}$$

CALCULO DE Fe 65% SI REQUERIDO PARA OBTENER 2.2 % DE SI.

calculo del Si que se tienen en la composición química preliminar

$$Kg \text{ Si} = 18 \left(\frac{1.517}{100} \right) = 0.27 \text{ Kg}$$

Calculo que aporta la inoculación y pos inoculación con un porcentaje de 0.01% en peso respectivamente para cada caso.

$$Kg \text{ Si} = 18 \left(\frac{0.01}{100} \right) = 0.0018 \text{ Kg}$$

Por lo tanto la inoculación y la pos inoculación aportan 0.0036 Kg

$$Kg \text{ requeridas} - Kg \text{ de la Composición preliminar} - Kg \text{ del nodulizante} - Kg \text{ de la inoculación y pos-inoculación} = Kg \text{ a adicionar de Fe 65\% Si}$$

$$0.416 \text{ Kg} - 0.27 \text{ Kg} - 0.101 \text{ Kg} - 0.0036 \text{ Kg} = 0.041 \text{ Kg}$$

Como el FeSi contiene solamente 85% en peso de Silicio se tiene que:

$$Kg \text{ requeridos} = \frac{0.041}{85} * 100 = 0.063 \text{ Kg} = 63 \text{ g de Fe 65\% Si}$$

Por lo tanto se necesitan agregar de Ferrosilicio con 65 % Si 32.3 gramos, antes del tratamiento de nodulización

BALANCE DE CARGA PARA LA CORRIDA 5

Materias primas utilizadas con una base de calculo de 18 Kg.

2.5 Kg de chatarra # 2 con una composición de:

Carbono	silicio	manganeso	Fósforo	azufre	magnesio
3.487	2.15	0.318	0.03	0.05	-

15.5 Kg de chatarra # 6 con una composición de:

carbono	silicio	manganeso	Fósforo	azufre	magnesio
0.0979	0.1815	1.135	0.0134	0.0127	-

CALCULO DE LOS KILOGRAMOS DE ELEMENTOS QUE APORTA CADA CHATARRA, EN FUNCION DE LOS KILOGRAMOS QUE SE ALIMENTAN DE ESTAS.

$$K_g C = K_g \text{ Carga} \left(\frac{\% \text{ del elemento en la chatarra}}{100} \right) =$$

Para la chatarra # 2

$$K_g C = 2.5 \left(\frac{3.487}{100} \right) = 0.08 K_g, \quad K_g Si = 2.5 \left(\frac{2.15}{100} \right) = 0.053 K_g$$

$$K_g Mn = 2.5 \left(\frac{0.318}{100} \right) = 0.007 K_g, \quad K_g P = 2.5 \left(\frac{0.03}{100} \right) = 0.0007 K_g$$

$$K_g S = 2.5 \left(\frac{0.05}{100} \right) = 0.001 K_g$$

Para la chatarra # 6

$$K_g C = 15.5 \left(\frac{0.0979}{100} \right) = 0.0151 K_g, \quad K_g Si = 15.5 \left(\frac{0.1815}{100} \right) = 0.028 K_g$$

$$K_g Mn = 15.5 \left(\frac{1.135}{100} \right) = 0.175 K_g, \quad K_g P = 15.5 \left(\frac{0.0134}{100} \right) = 0.002 K_g$$

$$K_g S = 15.5 \left(\frac{0.0127}{100} \right) = 0.001 K_g$$

CALCULO DE LOS KILOGRAMOS QUE APORTAN LAS 2 CHATARRAS PARA CADA ELEMENTO.

Chatarra 2 + Chatarra 6 = Kg que aportan las dos chatarras

CARBONO $0.08 K_g + 0.0151 K_g = 0.095 K_g C$

SILICIO $0.053 K_g + 0.028 K_g = 0.081 K_g Si$

MANGANESO $0.007 K_g + 0.175 K_g = 0.182 K_g Mn$

FÓSFORO $0.0007 K_g + 0.002 K_g = 0.0027 K_g P$

AZUFRE $0.001 K_g + 0.001 K_g = 0.002 K_g S$

CALCULO DE KILOGRAMOS REQUERIDO PARA PODER OBTENER UNA COMPOSICIÓN DE 3.6% EN PESO DE CARBONO

Kg requeridos - Kg aportados por las dos chatarras = Kg a adicionar

$$0.81 K_g - 0.095 K_g = 0.715 K_g C$$

CALCULO DE LOS GRAMOS REQUERIDOS DE FeSiMg PARA OBTENER UNA FUNDICIÓN VERMICULAR CON 0.06 % Mg RESIDUAL.

Composición preliminar.

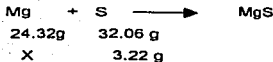
Muestra	Mg residual teórico	% C	% Si	% Mn	% P	% S	% Mg
5	0.06%	3.924	1.514	0.597	0.0212	0.0179	-

Gramos de azufre de la composición preliminar

$$\text{Gramos de S} = \left(\text{Car} \left(\frac{\% S}{100} \right) \right) * 1000$$

$$\text{Gramos de S} = \left(18 \left(\frac{0.0179}{100} \right) \right) * 1000 = 3.22 \text{ g}$$

CALCULO DEL MAGNESIO QUE REACCIONA ESTEQUEOMETRICAMENTE CON EL AZUFRE



Magnesio que se necesita para reaccionar con el azufre = X = 2.44 g

CALCULO DEL LOS GRAMOS DE MAGNESIO PARA OBTENER UN Mg_{RESIDUAL} DE (0.06%)

$$\text{Gramos de Mg}_{\text{rea}} = \left(\frac{(\% \text{Mg} * \text{Kg de Carga})}{100} \right) * 1000$$

$$\text{Gramos de Mg}_{\text{rea}} = \left(18 \left(\frac{0.06\%}{100} \right) \right) * 1000 = 10.8 \text{ g}$$

CALCULO DEL MAGNESIO REQUERIDOS

$$\text{Gramos de Mg}_{\text{requerido}} = \text{Gramos de Mg}_{\text{reaccional}} + \text{Gramos de Mg}_{\text{residual}}$$

$$\text{Gramos de Mg}_{\text{requerido}} = 2.44 + 10.8 = 13.24 \text{ g}$$

CALCULO DEL FERROSILICIOMAGNESIO (FeSiMg5%Mg) TOMANDO UN EFICIENCIA EN LA RECUPERACIÓN DE 100% DE Mg.

$$\text{Gramos de Fe Si 5 \%Mg} = \frac{\text{Gramos Mg}_{\text{rest.}} * 100}{5}$$

$$\text{Gramos de Fe Si 5 \%Mg} = \frac{13.24}{5} * 100 = 264.8 \text{ gr}$$

$$\text{Gramos de Fe Si 5 \%Mg} = 264.8 \text{ g}$$

CALCULO DE SI QUE APORTA EL NODULIZANTE (FeSiMg) CONTIENE 46% DE SI EN PESO.

$$\text{Kilogramos que aporta el nodulizante} = \left(264.8 * \frac{46}{100} \right) / 1000 = 0.121 \text{ Kg}$$

$$\text{Kilogramos requeridos} = 0.121 \text{ Kg.}$$

CALCULO DE Fe 65% SI REQUERIDO PARA OBTENER 2.2 % DE SI.

calculo del Si que se tienen en la composición química preliminar

$$\text{Kg Si} = 18 \left(\frac{1.514}{100} \right) = 0.27 \text{ Kg}$$

Calculo que aporta la inoculación y pos inoculación con un porcentaje de 0.01% en peso respectivamente para cada caso.

$$\text{Kg Si} = 18 \left(\frac{0.01}{100} \right) = 0.0018 \text{ Kg}$$

Por lo tanto la inoculación y la pos inoculación aportan 0.0036 Kg

$$\text{Kg}_{\text{requeridos}} - \text{Kg}_{\text{de la Composición preliminar}} - \text{Kg}_{\text{del nodulizante}} - \text{Kg}_{\text{de la inoculación y pos-inoculación}} = \text{Kg}_{\text{a adicionar de Fe 65\% Si}}$$

$$0.416 \text{ Kg} - 0.27 \text{ Kg} - 0.121 \text{ Kg} - 0.0036 \text{ Kg} = 0.0214 \text{ Kg}$$

Como el FeSi contiene solamente 65% en peso de Silicio se tiene que:

$$\text{Kg requeridos} = \frac{0.0214}{65} * 100 = 0.032 \text{ Kg} = 32.9 \text{ g de Fe 65\% Si}$$

Por lo tanto se necesitan agregar de Ferrosilicio con 65 % Si 32.9 gramos, antes del tratamiento de nodulización

**ESTA TESIS NO SALE
DE LA BIBLIOTECA**

BALANCE DE CARGA PARA LA CORRIDA 6

Materias primas utilizadas con una base de calculo de 17 Kg.

7 Kg de chatarra # 5 con una composición de:

carbono	silicio	manganeso	fósforo	Azufre	magnesio
3.615	1.920	0.534	0.0258	0.0227	-

10 Kg de chatarra # 6 con una composición de:

carbono	silicio	manganeso	fósforo	Azufre	magnesio
0.0979	0.1815	1.135	0.0134	0.0127	-

CALCULO DE LOS KILOGRAMOS DE ELEMENTOS QUE APORTA CADA CHATARRA, EN FUNCION DE LOS KILOGRAMOS QUE SE ALIMENTAN DE ESTAS.

$$K_{g} C = K_{g} \text{ Carga} \left(\frac{\% \text{ del elemento en la chatarra}}{100} \right) =$$

Para la chatarra # 5

$$K_{g} C = 7 \left(\frac{3.615}{100} \right) = 0.253 K_{g} . \quad K_{g} Si = 7 \left(\frac{1.92}{100} \right) = 0.134 K_{g}$$

$$K_{g} Mn = 7 \left(\frac{0.534}{100} \right) = 0.037 K_{g} . \quad K_{g} P = 7 \left(\frac{0.025}{100} \right) = 0.001 K_{g}$$

$$K_{g} S = 7 \left(\frac{0.022}{100} \right) = 0.0015 K_{g}$$

Para la chatarra # 6

$$K_{g} C = 10 \left(\frac{0.0979}{100} \right) = 0.009 K_{g} . \quad K_{g} Si = 10 \left(\frac{0.1815}{100} \right) = 0.018 K_{g}$$

$$K_{g} Mn = 10 \left(\frac{1.135}{100} \right) = 0.113 K_{g} . \quad K_{g} P = 10 \left(\frac{0.0134}{100} \right) = 0.001 K_{g}$$

$$K_{g} S = 10 \left(\frac{0.0127}{100} \right) = 0.0012 K_{g}$$

CALCULO DE LOS KILOGRAMOS QUE APORTAN LAS 2 CHATARRAS PARA CADA ELEMENTO.

Chatarra 5 + Chatarra 6 = Kg que aportan las dos chatarras

$$\text{CARBONO} \quad 0.253 \text{ Kg} + 0.009 \text{ Kg} = 0.262 \text{ Kg C'}$$

$$\text{SILICIO} \quad 0.134 \text{ Kg} + 0.018 \text{ Kg} = 0.151 \text{ Kg Si}$$

$$\text{MANGANESO} \quad 0.037 \text{ Kg} + 0.113 \text{ Kg} = 0.15 \text{ Kg Mn}$$

$$\text{FÓSFORO} \quad 0.001 \text{ Kg} + 0.00 \text{ Kg} = 0.002 \text{ Kg P}$$

$$\text{AZUFRE} \quad 0.0015 \text{ Kg} + 0.0012 \text{ Kg} = 0.0027 \text{ Kg S}$$

CALCULO DE KILOGRAMOS REQUERIDO PARA PODER OBTENER UNA COMPOSICIÓN DE 3.6% EN PESO DE CARBONO

Kg requeridos - Kg aportados por las dos chatarras = Kg a adicionar

$$0.72 \text{ Kg} - 0.262 \text{ Kg} = 0.448 \text{ Kg C'}$$

CALCULO DE LOS GRAMOS REQUERIDOS DE FeSiMg PARA OBTENER UNA FUNDICIÓN VERMICULAR CON 0.07 % Mg RESIDUAL.

Composición preliminar.

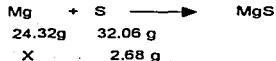
Muestra	Mg residual teórico	% C	% Si	% Mn	% P	% S	% Mg
6	0.07%	3.976	0.711	0.753	0.0163	0.0149	-

Gramos de azufre de la composición preliminar

$$\text{Gramos de S} = \left(\text{Car} \left(\frac{\% \text{ S}}{100} \right) \right) * 1000$$

$$\text{Gramos de S} = \left(17 \left(\frac{0.0149}{100} \right) \right) * 1000 = 2.533 \text{ g}$$

CALCULO DEL MAGNESIO QUE REACCIONA ESTEQUEOMETRICAMENTE CON EL AZUFRE



Magnesio que se necesita para reaccionar con el azufre = X = 1.92 g

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**

CALCULO DEL LOS GRAMOS DE MAGNESIO PARA OBTENER UN Mg_{RESIDUAL} DE (0.07%)

$$\text{Gramos de Mg}_{\text{res}} = \left(\frac{(\% \text{ Mg} * \text{ Kg de Carga})}{100} \right) * 1000$$

$$\text{Gramos de Mg}_{\text{res}} = \left(17 \left(\frac{0.07\%}{100} \right) \right) * 1000 = 11.9 \text{ g}$$

CALCULO DEL MAGNESIO REQUERIDOS

$$\text{Gramos de Mg}_{\text{requerido}} = \text{Gramos de Mg}_{\text{reaccional}} + \text{Gramos de Mg}_{\text{residual}}$$

$$\text{Gramos de Mg}_{\text{requerido}} = 1.92 + 11.9 = 13.82 \text{ g}$$

CALCULO DEL FERROSILICIOMAGNESIO (FeSiMg5%Mg) TOMANDO UN EFICIENCIA EN LA RECUPERACIÓN DE 100% DE Mg.

$$\text{Gramos de Fe Si 5 \%Mg} = \frac{\text{Gramos Mg}_{\text{res}} * 100}{5}$$

$$\text{Gramos de Fe Si 5 \%Mg} = \frac{13.82 * 100}{5} = 276.4 \text{ g}$$

$$\text{Gramos de Fe Si 5 \%Mg} = 276.4 \text{ g}$$

CALCULO DE Si QUE APORTA EL NODULIZANTE(FeSiMg) CONTIENE 65% DE Si EN PESO.

$$\text{Kilogramos que aporta el nodulizante} = \left(276.4 * \frac{46}{100} \right) / 1000 = 0.127 \text{ Kg}$$

CALCULO DE Fe 65% Si REQUERIDO PARA OBTENER 2.2 % DE Si.

calculo del Si que se tienen en la composición química preliminar

$$\text{Kg Si} = 18 \left(\frac{0.711}{100} \right) = 0.12 \text{ Kg}$$

Calculo que aporta la inoculación y pos inoculación con un porcentaje de 0.01% en peso respectivamente para cada caso.

$$\text{Kg Si} = 17 \left(\frac{0.01}{100} \right) = 0.0017 \text{ Kg}$$

Por lo tanto la inoculación y la pos inoculación aportan 0.0034 Kg

$$\text{Kg requeridos} - \text{Kg de la Composicion preliminar} - \text{Kg del nodulizante} - \text{Kg de la inoculacion y pos-inoculacion} = \text{Kg a adicionar de Fe 65\% Si}$$

$$0.393 \text{ Kg} - 0.12 \text{ Kg} - 0.127 \text{ Kg} - 0.0034 \text{ Kg} = 0.143 \text{ Kg}$$

Como el FeSi contiene solamente 65% en peso de Silicio se tiene que:

$$\text{Kg requeridos} = \frac{0.165}{65} * 100 = 0.22 \text{ Kg} = 220 \text{ g de Fe 65\% Si}$$

por lo tanto se necesitan agregar de Ferrosilicio con 65 % Si 220 gramos, antes del tratamiento de nodulización

BALANCE DE CARGA PARA LA CORRIDA 7

Materias primas utilizadas con una base de calculo de 17 Kg.

7 Kg de chatarra # 5 con una composición de:

carbono	silicio	manganeso	fósforo	azufre	magnesio
3.615	1.920	0.534	0.0258	0.0227	-

10 Kg de chatarra # 6 con una composición de:

carbono	silicio	manganeso	fósforo	azufre	magnesio
0.0979	0.1815	1.135	0.0134	0.0022	-

CALCULO DE LOS KILOGRAMOS DE ELEMENTOS QUE APORTA CADA CHATARRA, EN FUNCION DE LOS KILOGRAMOS QUE SE ALIMENTAN DE ESTAS.

$$\text{Kg elemento} = \frac{\text{Kg Carga} \frac{\% \text{ del elemento en la chatarra}}{100}}{\frac{\% \text{ eficiencia}}{100}}$$

Para la chatarra # 5

$$K_g C = 7 \left(\frac{3.615}{100} \right) = 0.253 K_g, \quad K_g Si = 7 \left(\frac{1.92}{100} \right) = 0.134 K_g$$

$$K_g Mn = 7 \left(\frac{0.534}{100} \right) = 0.037 K_g, \quad K_g P = 7 \left(\frac{0.025}{100} \right) = 0.001 K_g$$

$$K_g S = 7 \left(\frac{0.022}{100} \right) = 0.0015 K_g$$

Para la chatarra # 6

$$K_g C = 10 \left(\frac{0.0979}{100} \right) = 0.009 K_g, \quad K_g Si = 10 \left(\frac{0.1815}{100} \right) = 0.018 K_g$$

$$K_g Mn = 10 \left(\frac{1.135}{100} \right) = 0.113 K_g, \quad K_g P = 10 \left(\frac{0.0134}{100} \right) = 0.001 K_g$$

$$K_g S = 10 \left(\frac{0.0127}{100} \right) = 0.0012 K_g$$

CALCULO DE LOS KILOGRAMOS QUE APORTAN LAS 2 CHATARRAS PARA CADA ELEMENTO.

Chatarra 5 + Chatarra 6 = Kg que aportan las dos chatarras

CARBONO $0.253 K_g + 0.009 K_g = 0.262 K_g C$

SILICIO $0.134 K_g + 0.018 K_g = 0.151 K_g Si$

MANGANESO $0.037 K_g + 0.113 K_g = 0.15 K_g Mn$

FÓSFORO $0.001 K_g + 0.00 K_g = 0.002 K_g P$

AZUFRE $0.0015 K_g + 0.0012 K_g = 0.0027 K_g S$

CALCULO DE KILOGRAMOS REQUERIDO PARA PODER OBTENER UNA COMPOSICIÓN DE 3.6% EN PESO DE CARBONO.

Kg requeridos - Kg aportados por las dos chatarras = Kg a adicionar

$$0.72 K_g - 0.262 K_g = 0.458 K_g C$$

CALCULO DE LOS GRAMOS REQUERIDOS DE FeSiMg PARA OBTENER UNA FUNDICIÓN VERMICULAR CON 0.08 % Mg RESIDUAL.

Composición preliminar.

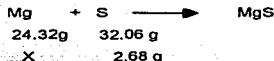
Muestra	Mg residual teórico	% C	% Si	% Mn	% P	% S	% Mg
7	0.08%	3.882	0.949	0.695	0.0155	0.0129	-

Gramos de azufre de la composición preliminar

$$\text{Gramos de S} = \left(\text{Car} \left(\frac{\% \text{ S}}{100} \right) \right) * 1000$$

$$\text{Gramos de S} = \left(17 \left(\frac{0.0129}{100} \right) \right) * 1000 = 2.19 \text{ g}$$

CALCULO DEL MAGNESIO QUE REACCIONA ESTEQUEOMETRICAMENTE CON EL AZUFRE



Magnesio que se necesita para reaccionar con el azufre = X = 1.661 g

CALCULO DEL LOS GRAMOS DE MAGNESIO PARA OBTENER UN Mg RESIDUAL DE (0.06%)

$$\text{Gramos de Mg}_{\text{res}} = \left(\frac{(\% \text{ Mg} * \text{Kg de Carga})}{100} \right) * 1000$$

$$\text{Gramos de Mg}_{\text{res}} = \left(17 \left(\frac{0.08\%}{100} \right) \right) * 1000 = 13.6 \text{ g}$$

CALCULO DEL MAGNESIO REQUERIDOS

$$\text{Gramos de Mg}_{\text{requerido}} = \text{Gramos de Mg}_{\text{reaccionado}} + \text{Gramos de Mg}_{\text{residual}}$$

$$\text{Gramos de Mg}_{\text{requerido}} = 1.66 + 13.6 = 15.26 \text{ g}$$

CALCULO DEL FERROSILICIOMAGNESIO (FeSiMg5%Mg) TOMANDO UN EFICIENCIA EN LA RECUPERACIÓN DE 100% DE Mg.

$$\text{Gramos de Fe Si 5 \%Mg} = \frac{\text{Gramos Mg}_{\text{req}}}{5} * 100$$

$$\text{Gramos de Fe Si 5 \%Mg} = \frac{15.26}{5} * 100 = 305.2 \text{ g}$$

$$\text{Gramos de Fe Si 5 \%Mg} = 305.2 \text{ g}$$

CALCULO DE SI QUE APORTA EL NODULIZANTE(FeSiMg) CONTIENE 65% DE SI EN PESO.

$$\text{Kilogramos que aporta el nodulizante} = \left(305.2 * \frac{46}{100} \right) / 1000 = 0.14 \text{ Kg}$$

$$\text{Kilogramos requeridos} = 0.14 \text{ Kg.}$$

CALCULO DE Fe 65% Si REQUERIDO PARA OBTENER 2.2 % DE Si.

calculo del Si que se tienen en la composición química preliminar

$$\text{Kg Si} = 18 \left(\frac{0.949}{100} \right) = 0.161 \text{ Kg}$$

Calculo que aporta la inoculación y pos inoculación con un porcentaje de 0.01% en peso respectivamente para cada caso.

$$\text{Kg Si} = 17 \left(\frac{0.01}{100} \right) = 0.0017 \text{ Kg}$$

Por lo tanto la inoculación y la pos inoculación aportan 0.0034 Kg

$$\text{Kg}_{\text{requeridos}} - \text{Kg}_{\text{de la Composicion preliminar}} - \text{Kg}_{\text{del nodulizante}} - \text{Kg}_{\text{de la inoculacion y pos-inoculacion}} = \text{Kg}_{\text{a agregar de Fe 65\% Si}}$$

$$0.393 \text{ Kg} - 0.161 \text{ Kg} - 0.14 \text{ Kg} - 0.0034 \text{ Kg} = 0.088 \text{ Kg}$$

Como el FeSi contiene solamente 65% en peso de Silicio se tiene que:

$$\text{Kg}_{\text{requeridos}} = \frac{0.088}{65} * 100 = 0.135 \text{ Kg} = 135 \text{ g de Fe 65\% Si}$$

por lo tanto se necesitan agregar de Ferrosilicio con 65 % Si 135 gramos, antes del tratamiento de nodulización

APENDICE B

Patrón Propuesto por T. Kimura y C. R. Loper Jr., en el que se presentan diferentes formas de grafito precipitado en una fundición colada, este grafito puede presentarse en forma de hojuelas, en forma de vermiculos, en forma esferoidal o una combinación de grafito vermicular y grafito esferoidal, este patrón tiene la siguiente clasificación a 100 aumentos, sin ataque.

De la Microestructura No. 1 a la No. 4 contiene 100% de grafito en forma de hojuelas.

La microestructura No. 5 y No. 6, contiene un 100% de grafito en forma Vermicular.

La microestructura No. 7, contiene un 96% de grafito en forma Vermicular y 4% de grafito esferoidal.

La microestructura No. 8, contiene un 91% de grafito en forma Vermicular y 9% de grafito esferoidal.

La microestructura No. 9 contiene un 85% de grafito en forma Vermicular y 15% de grafito esferoidal.

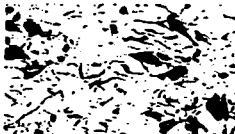
La microestructura No. 10 contiene un 75% de grafito en forma Vermicular y 25% de grafito esferoidal.

La microestructura No. 11 contiene un 65% de grafito en forma Vermicular y 35% de grafito esferoidal.

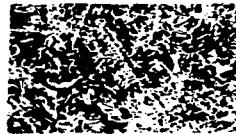
La microestructura No. 12 contiene un 10% de grafito en forma Vermicular y 90% de grafito esferoidal.



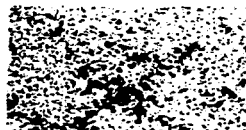
No. 1



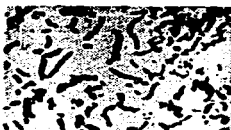
No. 2



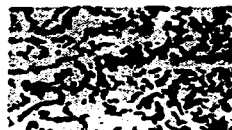
No. 3



No. 4



No. 5



No. 6



No. 7



No. 8



No. 9



No. 10



No. 11



No. 12

Figura No. 1. Clasificación y cantidad de grafito en forma de hojuelas, vermicular y esteroidal.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN