

Metalurgia del Hierro Nodular

Fundamentos de la producción y el control

Eduardo de S. Moreira – Ago/2010

ver. Dez/2011

eduardo@eduardomoreira.eng.br

Visite my sitio en:

www.eduardomoreira.eng.br

Tópicos

- **Presentación**
 - La Fundação Ícaro Ltda (Fundición Ícaro)
 - Los procesos de la fundición Ícaro
- **Objetivo**
- **Introducción**
 - Hierros Gris, Nodular y Vermicular
 - Propiedades de hierro fundido gris
 - Propiedades de hierro Nodular
 - Comparación de las propiedades mecánicas
 - Diagrama Fe-C (Hierro Carbono)
- **Nucleación**
 - De estado líquido a estado sólido
 - Nucleación Homogénea
 - Nucleación Heterogénea
 - Estructuras de Solidificación
 - Estructuras de Formación de Eutécticos
 - Solidificación de Hierro Gris y Nodular
 - Hierro Nodular
 - Grados de nodulización
 - Tamaño de Grafitos
 - Número de Nodos
 - Matriz

- **Obtención de Hierro Nodular (Teoría)**
 - Obtención de Hierro Nodular
 - FeSiMg (Hierro SilicioMagnesio)
 - Tratamiento de Nodulización
 - Forma Sándwich
 - Forma "Girar la cuchara"
- **Defectos de Nodulización**
 - Baja Nodulización
 - Cementita y Grafito Degenerado
- **Defectos Mas Comunes en Hierro Nodular**
 - Defectos Mas Comunes – Carburos
 - Defectos Mas Comunes – Carburos Directos
 - Defectos Mas Comunes – Carburos Axiales
 - Defectos Mas Comunes – Flotación de Grafito
 - Diagrama de Henderson
- **Obtención de Matriz Ferrítica y Perlítica**
 - Obtención de matriz ferrítica
 - Obtención de matriz perlítica
 - Efecto de los elementos de aleación
 - Efecto de los elementos – Carbono
 - Efecto de los elementos – Silicio
 - Efecto de los elementos – Manganeso

- **Control de Nodularización**
- **Obtención de Hierro Nodular (Prácticas)**
 - Práctica de nodulización en la función
- **Bibliografía**

Presentación

- Nombre: Eduardo de S. Moreira
- Empresa: Fundação Ícaro Ltda (Fundición Ícaro)

Fundação Ícaro Ltda

5



Empresa



- La Fundición Ícaro Ltda esta en el mercado de fundición de hierro hace más de 15 años.
- Su producción predominante es el hierro nodular 80%, y los otros 20% de Hierro Gris.
- Tenemos una capacidad productiva de 200Ton al mês por turno
- La Fundición Ícaro tiene la calidad ISO9001:2008

Fundação Ícaro Ltda

6

Empresa

- Nuestro proceso de fundición tiene:

Fusión:

Hornos a inducción

Moldeos:

En arena en verde, 1 máquina automática Vick
GCM 50-60-18.

Empresa

Machos:

Shell (Caliente) y ColdBox (Frío)

Laboratorio:

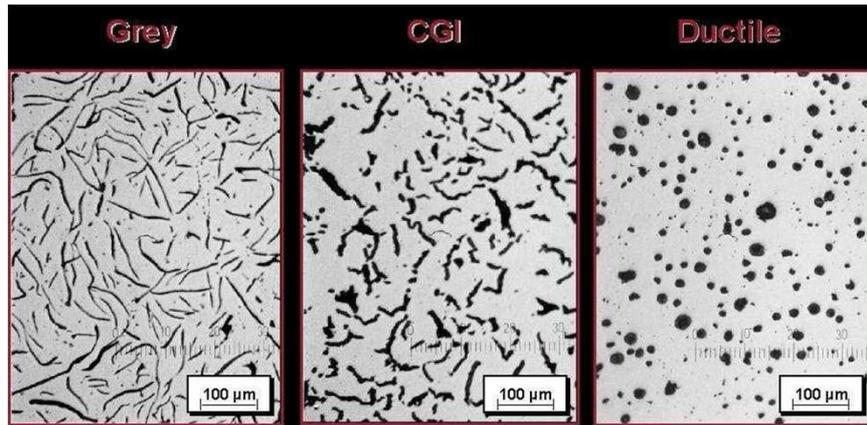
Espectrómetro
Microscopio Metalográfico
Durometro
Etc;

Objetivo

- El propósito de este material es la comprensión de:
 - ➔ Los mecanismos de solidificación de los Hierros Gris y Nodular.
 - ➔ Las diferencias Física/Química entre los Hierros Gris y Nodular.
 - ➔ La fabricación, en teoría y la práctica de los Hierros Nodulares.

Introducción

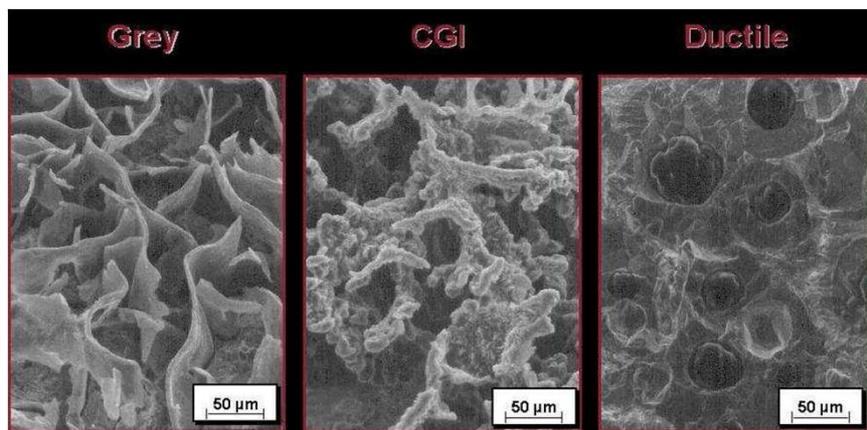
Hierros Gris, Vermicular y Nodular



Fundição Ícaro Ltda

11

Hierros Gris, Vermicular y Nodular



Fundição Ícaro Ltda

12

Propiedades de los Hierros Gris

Propriedades de ferros fundidos cinzentos. Adaptado de Goodrich-2003 e Rocha Vieira et all-1974.

FC 100	FC 150	FC 200	FC 250	FC 300	FC 350	FC 400
					→	
					→	
	←					
					→	
	←				→	
					→	
	←					→
						→
	←					→
					→	

Fundição Ícaro Ltda

13

Propiedades de los Hierros Nodulares

Propriedades de ferros fundidos nodulares.

FE 38017	FE 42012	FE 50007	FE 60003	FE 70002	FE80002	FE 90002
					→	
	←					
				→		
	←					
				→		
				→		
	←					→
					→	
	←					→

Fundição Ícaro Ltda

14

Comparación de las Propiedades

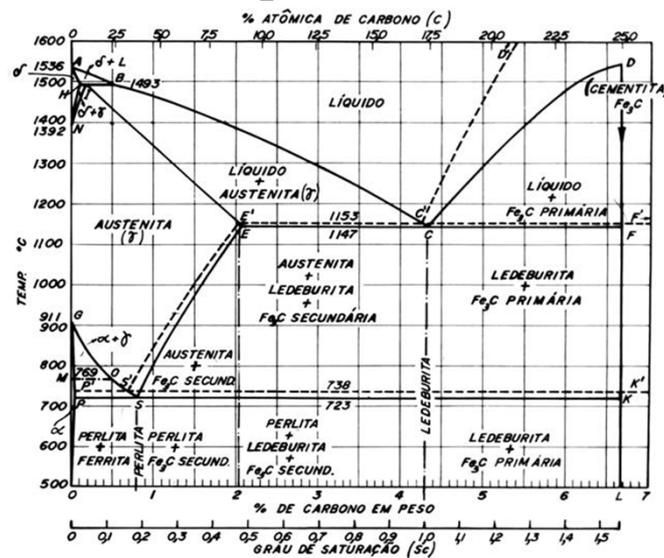
Comparação de propriedades entre ferros fundidos cinzento, nodular e vermicular, com matriz perlítica. Norma SAE J1887/2002.

Propriedade	Cinzeno	Vermicular	Nodular
Limite de Resistência	55	100	155
Limite de Escoamento 0,2	-	100	155
Módulo de Elasticidade	75	100	110
Alongamento	0	100	200
Limite de Fadiga – flexão rotativa	55	100	125
Dureza	85	100	115
Condutividade Térmica	130	100	75
Amortecimento de vibrações	285	100	65

Fundição Ícaro Ltda

15

Diagrama Fe-C



Fundição Ícaro Ltda

16

Nucleación

Fundição Ícaro Ltda

17

Estado Líquido

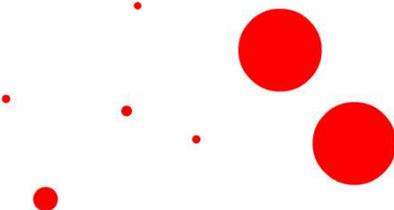
La estructura del metal líquido se caracteriza por un estado desordenado de átomos, donde pueden aparecer y desaparecer al azar regiones de ordenación de corto alcance (Núcleos de solidificación que aparecen y desaparecen).

Fundição Ícaro Ltda

18

Estado Líquido

MECANISMO DA FORMAÇÃO DE UM NÚCLEO




 UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL - UFRGS
 Escola de Engenharia/Departamento de Metalurgia/Centro de Tecnologia
 Av. Bento Gonçalves 9500 - Cx.P. 11.201
 91501-970 - Porto Alegre - RS - Brasil
 Fone / FAX: (51) 3316-4142

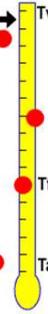
En esta animación se pode mirar cómo los núcleos aparecen y desaparecen

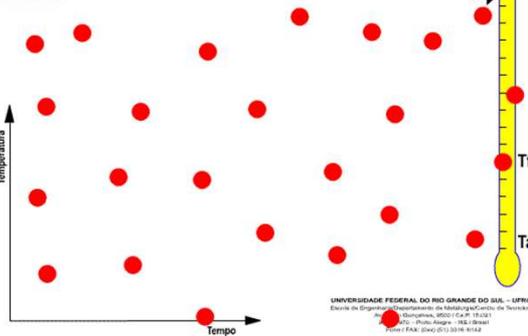
Fundação Ícaro Ltda 19

De estado Líquido a estado Sólido



DESORDEM E AGITAÇÃO ATÔMICA
ESTRUTURA DO LÍQUIDO





UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL - UFRGS
 Escola de Engenharia/Departamento de Metalurgia/Centro de Tecnologia
 Av. Bento Gonçalves 9500 - Cx.P. 11.201
 91501-970 - Porto Alegre - RS - Brasil
 Fone / FAX: (51) 3316-4142

Fundação Ícaro Ltda 20

Estado Sólido

En metal sólido, los átomos presentan una orden de estructura cristalina. Sin embargo, están en el espacio como una orden definida y regular.

Nucleación

La nucleación puede ser homogénea o heterogénea

Nucleación Homogénea

Son núcleos que aparecen en medio líquido, y se superan el radio crítico, se convierten en núcleos efectivos y crecen, si no, vuelven a desaparecer en medio líquido.

Nucleación Heterogénea

Se produce por la influencia de un sustrato (Arena del moldeo, inclusiones sólidas, inoculación, etc;) Lo embrión del primer hierro sólido se forma en la superficie del sustrato.

Mecanismo de Crecimiento del Núcleo

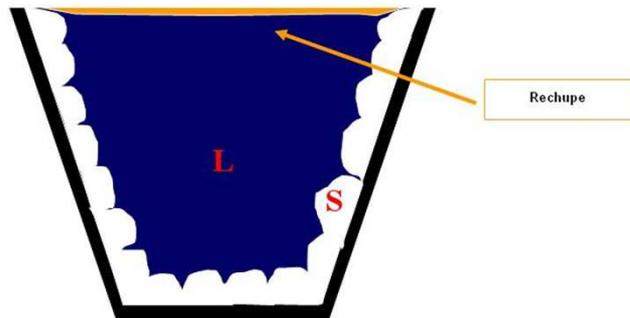
Quando el núcleo estable se forma, el recibe los átomos del líquido.

Estructuras de Solidificación

Pueden ser Sólido / Planar o

Sólido/líquido Dendrítica

Interface Sólido/Planar:



- Aceros, Hierro Blanco, Algunas aleaciones de Al

Fundição Ícaro Ltda

27

Interface Sólido/Líquido Dendrítica



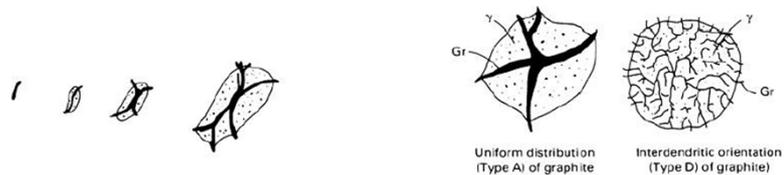
Hierros Gris y Nodular (Solidificación Pastosa)

Fundição Ícaro Ltda

28

Estructura de solidificación del eutectico irregular de Cooperación

- Este eutectico se produce cuando una das fases que precipita es un compuesto del metal con no metal.
- Cuando esas fases se solidifican, ellas crecem en direcciones preferidas determinadas por los planes atómicos y no paralelo al flujo de calor.
- En general muestran morfología Laminar.



Fundição Ícaro Ltda

29

Estructura de formación del eutectico divorciado

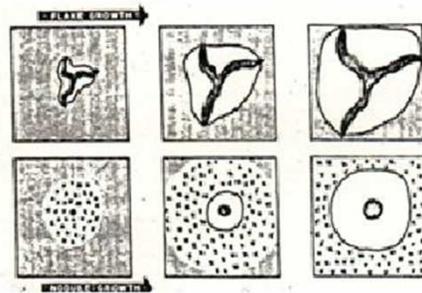
- Este eutectico se produce cuando una fase solidifica antes de la nucleación de otra fase.
- Cuando eso se produce, una fase no sirve como sustrato para outra fase, ocurriendo la encapsulación de otra fase.
- Generalmente muestra morfologia Nodular (El grafito es encapsulado pela austenita).

Fundição Ícaro Ltda

30

Estructura de formación de los eutecticos

- La siguiente muestra la formación de un eutectico de Cooperación (Hierro Gris), y de un eutectico Divorciado (Hierro Nodular).



Fundição Ícaro Ltda

31

Solidificación de Hierro Gris

- Generalmente tienen composiciones químicas que van de hipoeutectico hasta el eutectico, en función de las propiedades mecánicas que lo quieras.
- Cuanto más hipoeutectica la composición, mayor la cantidad de austenita que se tiene antes del eutectico.
- Lo Eutectico de los hierros Gris es Cooperativo

Fundição Ícaro Ltda

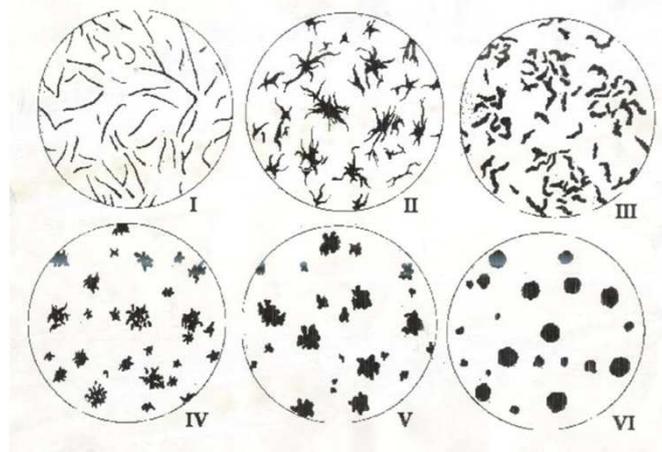
32

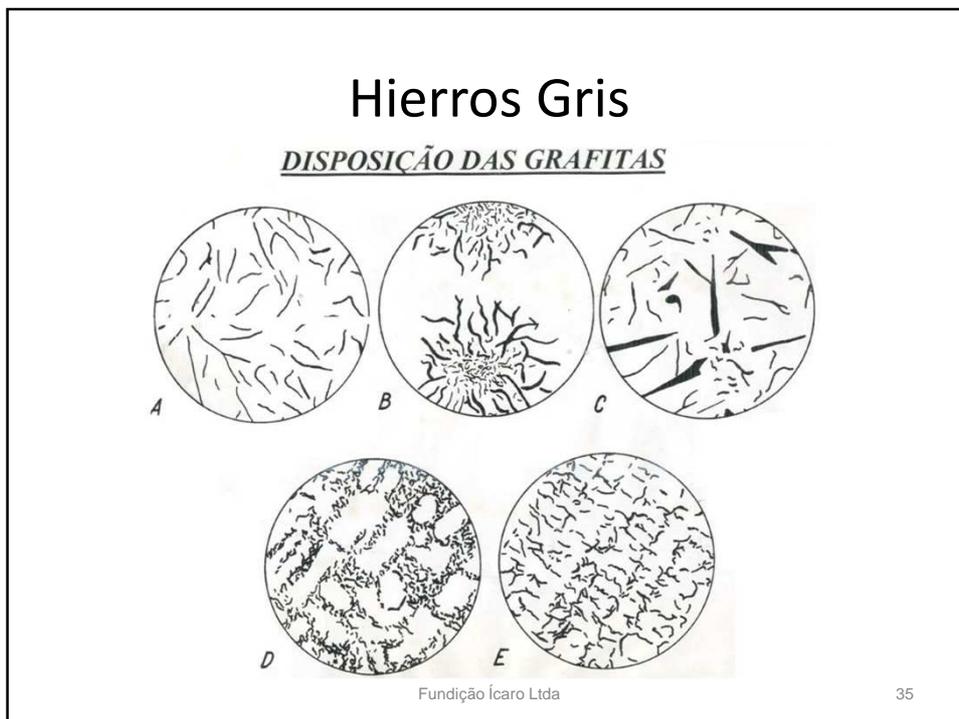
Hierros Gris

- Son Hierros en que la mayor parte del carbono de su microestructura esta en forma de laminas de grafito, obteniéndose en estado natural de fundición.

Hierros Gris

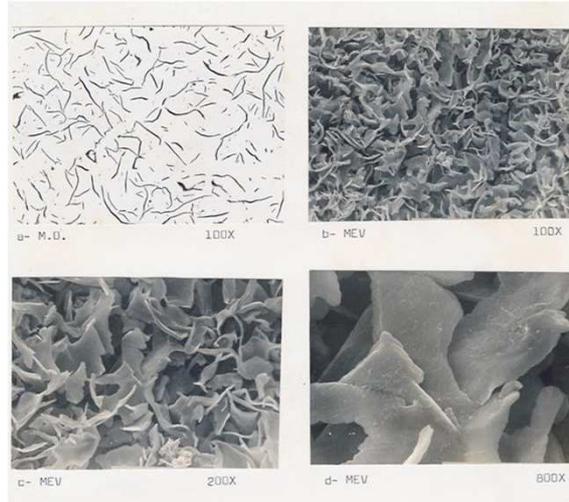
FORMAS DA GRAFITA





Hierros Gris

Grafita Tipo A

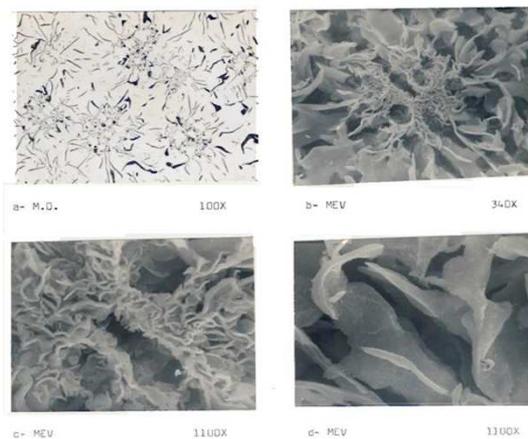


Fundação Ícaro Ltda

37

Hierros Gris

Grafita Tipo B



Fundação Ícaro Ltda

38

Hierros Gris

Grafita Tipo C



a- M.O. 100X



b- M.E.V. 80X



c- M.O. 250X



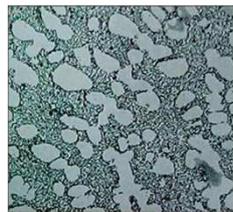
d- M.E.V. 450X

Fundição Ícaro Ltda

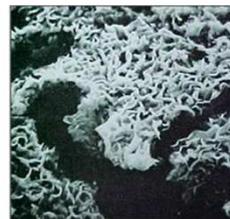
39

Hierros Gris

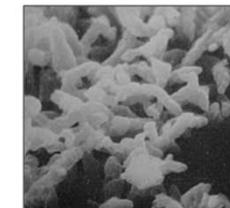
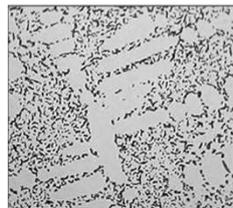
Grafita Tipo D



100X



100X

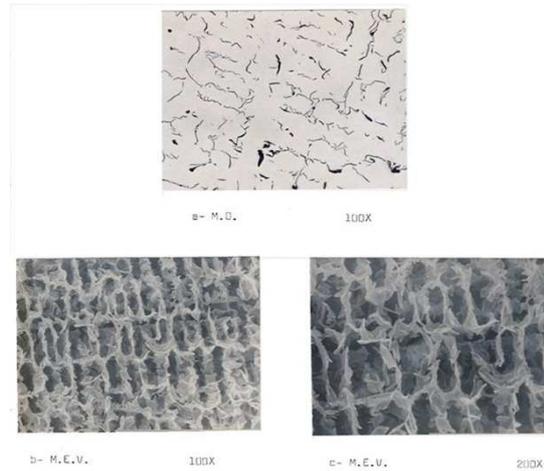


Fundição Ícaro Ltda

40

Hierros Gris

Grafita Tipo E



Fundição Ícaro Ltda

41

Solidificación del Hierro Nodular

- Generalmente tienen composiciones químicas que van de eutectico hasta el hipereutectico.
- Cuanto más hipereutectica la composición, mayor la cantidad de grafito que aparece en el líquido.
- El Eutectico del hierro nodular es Divorciado.

Fundição Ícaro Ltda

42

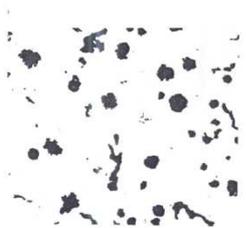
Hierro Nodular

- Son hierros en que la mayor parte del carbono de su microestructura esta en forma de grafito esferoidal, obteniéndose en estado natural de fundición.

Fundição Ícaro Ltda

43

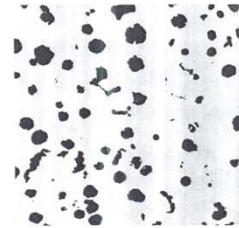
Grau de Nodularização - Aumento de 100x



60 %



70 %



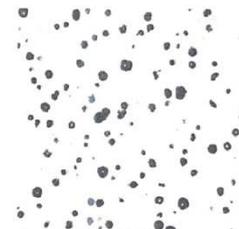
80 % - a



80 % - b



90 %



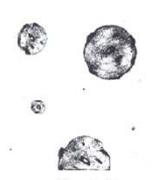
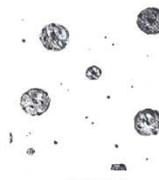
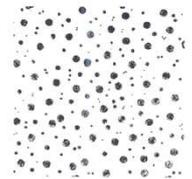
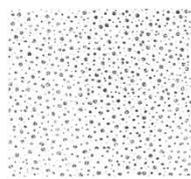
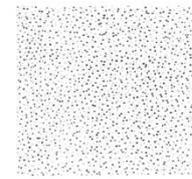
100%

Fundição Ícaro Ltda

44

Hierros Nodulares

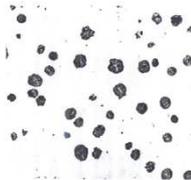
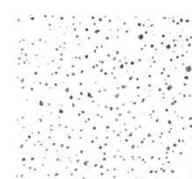
Tamanho das Grafitas - Aumento de 100x

 <p>Tamanho 3 32mm de diâmetro</p>	 <p>Tamanho 4 16mm de diâmetro</p>	 <p>Tamanho 5 8mm de diâmetro</p>
 <p>Tamanho 6 4mm de diâmetro</p>	 <p>Tamanho 7 2mm de diâmetro</p>	 <p>Tamanho 8 1mm de diâmetro</p>

Fundição Ícaro Ltda 45

Hierros Nodulares

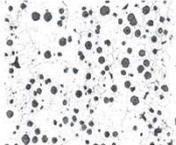
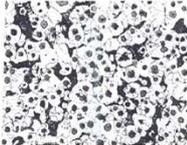
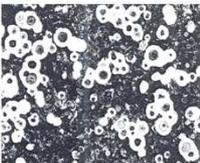
Número de Nódulos - Aumento de 100x

 <p>25 Nódulos/mm²</p>	 <p>50 Nódulos/mm²</p>	 <p>100 Nódulos/mm²</p>
 <p>150 Nódulos/mm²</p>	 <p>200 Nódulos/mm²</p>	 <p>300 Nódulos/mm²</p>

Fundição Ícaro Ltda 46

Hierros Nodulares

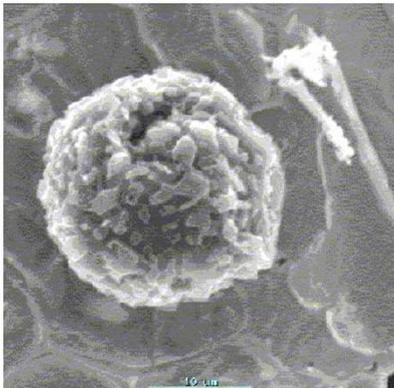
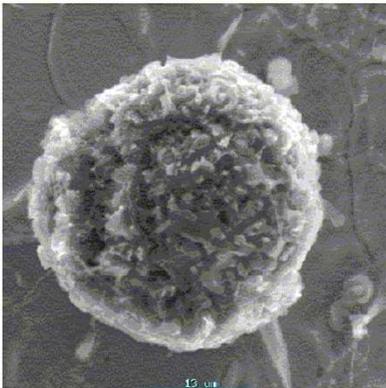
Matriz (Nital 3%) - Aumento de 100x

 100% Ferrita	 85% Ferrita - 15% Perлита	 75% Ferrita - 25% Perлита
 50% Perлита - 50% Ferrita	 75% Perлита - 25% Ferrita	 100% Perлита

Fundição Ícaro Ltda 47

Hierros Nodulares

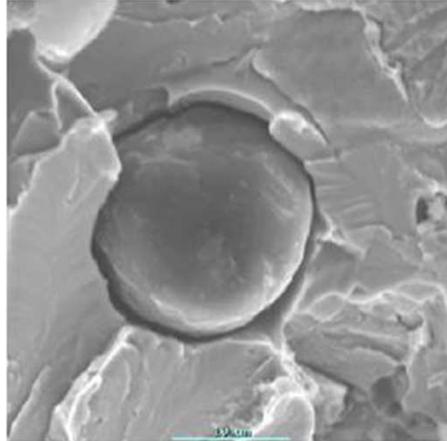
Grafita Nodular com depósitos de Carbono sobre a grafita

 10 µm	 10 µm
--	---

Fundição Ícaro Ltda 48

Hierros Nodulares

Grafita Nodular sem depósitos de Carbono sobre a grafita (Grafita Lisa)



Fundição Ícaro Ltda

49

Obtención del Hierro Nodular

Teoria

Fundição Ícaro Ltda

50

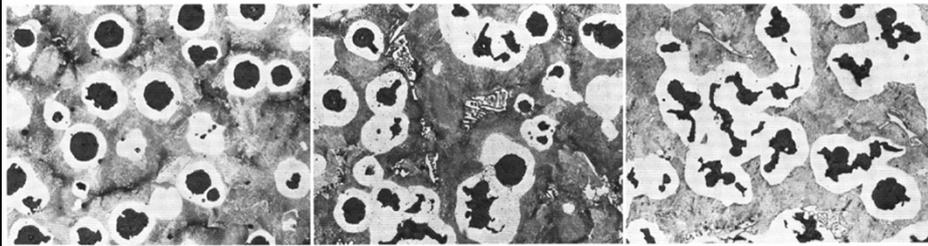
Como Obtener Hierro Nodular

- El grafito esferoidal es obtenida mediante la adición de elementos nodulizantes, que evitan que el S y el O cambien la forma de crecimiento del grafito.
- Los nodulizantes más comunes son, Mg, Ce, Ca y tierras raras. Lo más utilizado es lo Mg, a través de una aleación del FeSiMg

FeSiMg

- Más popular comercialmente como "Aleación nodulizante";
- Es una aleación que tiene Fe, Si, Mg, Ca, Al, y Tierras raras siendo que el Mg depende da aleación deseada (Sistema de colada, precio, etc;)
- El Mg tiene punto de ebullición alrededor de 1100C, como la reacción de nodulización se hace em hierro líquido con la temperaturas alrededor de los 1500C (Depende del proceso), la ebullición del Mg causa una "explosión", o hace el hierro "hervir".
El Mg reacciona con otros elementos, principalmente con O y S, perdiendose en forma de sulfuros y óxidos, allá de la vaporización devido la temperatura encima del punto de ebullición.
Con eso, la cantidad de Mg se reducirá con el tiempo, y entonces, el S y O pueden acercarse de los grafitos, causando la degeneración del grafito, entonces, el crecimiento del grafito se produce de forma incontrolada, producindose grafitos vermiculares.

Fading do Mg



2% nital 250x
Ferro fundido nodular 80-S5-06 bruto de fundição. Antes do vazamento, o banho metálico foi mantido a 1343°C por 1 min após a nodulização. A microestrutura apresenta nódulos de grafita normais envolvidos por ferrita e matriz perlítica.

2% nital 250x
Antes do vazamento, o banho metálico foi mantido a 1343°C durante 10 min. A microestrutura apresenta grafitas degeneradas provocadas pela ineficiência da nodulização após este tempo.

2% nital 250x
Antes do vazamento, o banho metálico foi mantido a 1345°C por 24 min. O incremento no tempo após a nodulização diminuiu sua eficiência, provocando a degeneração da grafita e a ocorrência de cementita.

Con el tiempo, la cantidad del Mg se reduce, y con eso, el grafito se degenera.

Teores de Mg

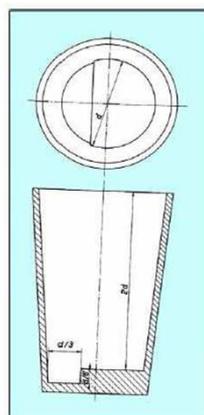
- La concentración que se desea del Mg depende de la concentración del S y O y del tamaño de las piezas.
- Em la mayoría de los casos, se desea uma concentración de Mg de 0,03 hasta 0,06 y que el S no se adelante de 0,015% (Teoria).

Tratamiento del caldo para se producir nodulización

Puede ser en la cuchara, en moldeo (in mold), por hilo, etc;

Vamos a hablar solo del tratamiento en cuchara, que es lo más simples y de mayor uso.

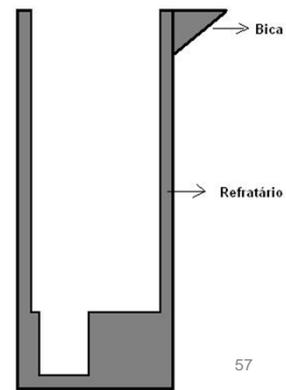
Proceso Sándwich



Dimensionamento: $H/D = 2/1$

Proceso Sándwich

- Con la cuchara caliente, se pone el FeSiMg en el agujero en la parte inferior de la cuchara.

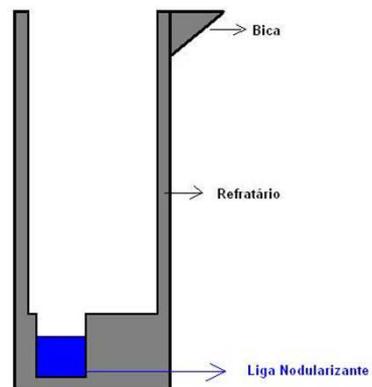


Fundição Ícaro Ltda

57

Proceso Sándwich

- Entonces, se pone el FeSiMg. Como en la siguiente figura.

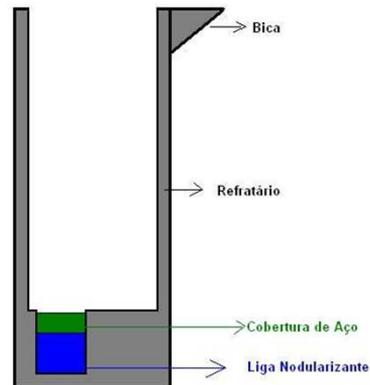


Fundição Ícaro Ltda

58

Proceso Sándwich

- Después el FeSiMg es cubierto por una chatarra de acero delgada.



Fundição Ícaro Ltda

59

Proceso Sándwich

- Porque cubrir com chatarra de acero delgada?
La chatarra de acero es para que la reacción sea más lenta en su principio, porque se la reacción es muy rápida, ya comenzara el fading del Mg.
Lo ideal sería que la reacción solo tenga inicio después que la cuchara ya estea con la cantidad del hierro liquido que se desea.

Fundição Ícaro Ltda

60

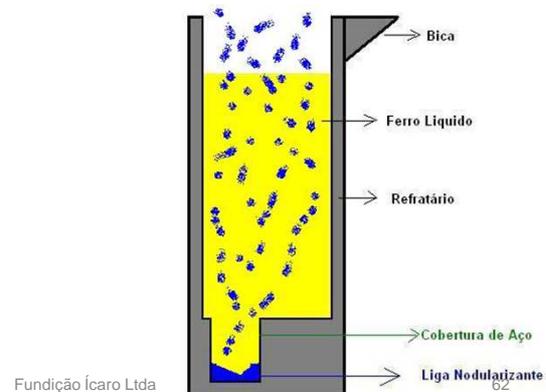
Proceso Sándwich

- Después de la cuchara de reacción recibir el hierro líquido, la cobertura de acero se derrite



Proceso Sándwich

- Cuando la cobertura se derrite, lo hierro líquido alcanza lo nodulizante, y la reacción empieza.



Proceso Sándwich

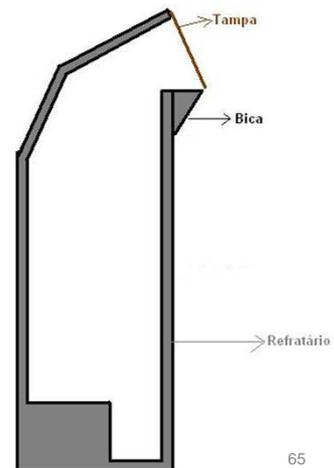
- Este proceso que se usa en la Fundición Ícaro Ltda, y se verá en detalle en la práctica dentro de la fundición y por fotos al final de este artículo.

Proceso Girar la Cuchara

- Este proceso permite una cierta economía de nodulizante ya que el vapor de Mg se ha mantenido parcialmente dentro de la cuchara, creando una atmósfera más rica en Mg evitando el contacto del hierro líquido con el O. También evita los derrames.
- En este proceso no es necesario que se cubre el Mg.
- La desventaja es el costo de los equipos y la mayor dificultad en hacer lo refractario.

Proceso Girar la Cuchara

- Con la cuchara vacía, y caliente

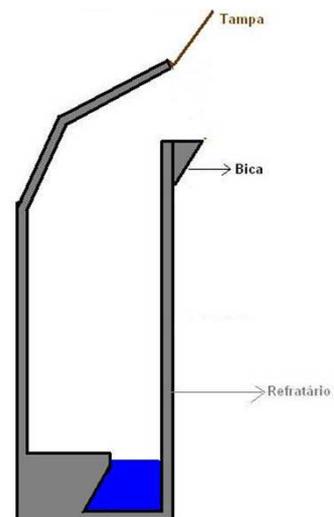


Fundição Ícaro Ltda

65

Proceso Girar la Cuchara

- Se debe colocar el FeSiMg en su lugar en la parte inferior De la cuchara.

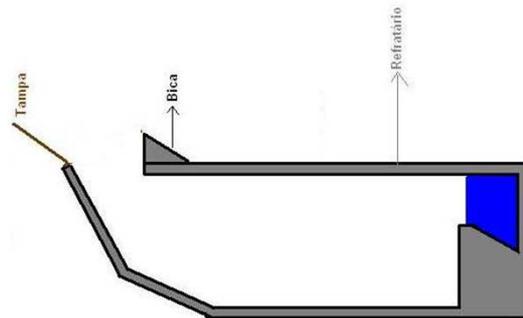


Fundição Ícaro Ltda

66

Proceso Girar la Cuchara

- Después, la cuchara se lanza a la posición horizontal.

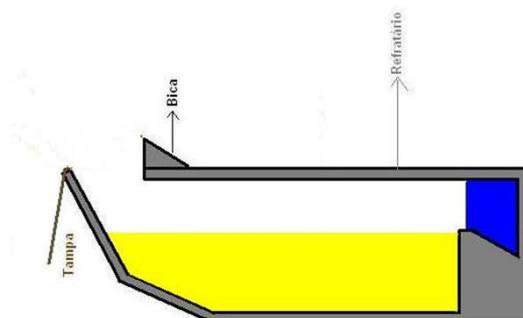


Fundição Ícaro Ltda

67

Proceso Girar la Cuchara

- Con la cuchara en la horizontal, se puede poner el hierro líquido.



Fundição Ícaro Ltda

68

Proceso Girar la Cuchara

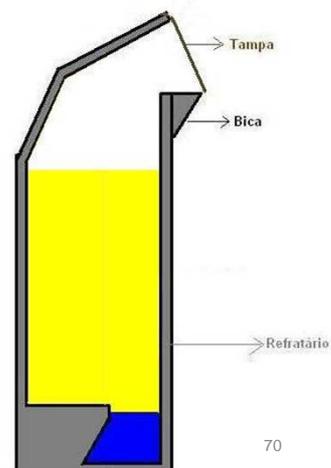
- Con la cuchara en la horizontal, se puede llevarla hasta onde se desea hacer la reacción.

Fundição Ícaro Ltda

69

Proceso Girar la Cuchara

- En lo local deseado, la cuchara es girada outra vez a su posición vertical, y cuando el hierro llega hasta a la FeSiMg, la reacción empieza.

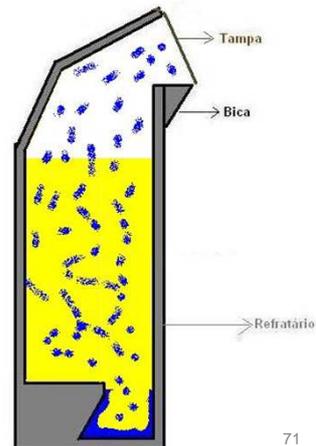


Fundição Ícaro Ltda

70

Proceso Girar la Cuchara

- Como esta cuchara tiene una tapa y puede quedarse cerrada, el Mg si quedara en la atmósfera de la cuchara.



Fundição Ícaro Ltda

71

Pérdida de calor

- Con la fusión de la aleación (FeSiMg), y su cubierta de acero, debe considerarse una pérdida de 60C hasta 80C, eso depende del proceso de fundición y deben ser observados en la práctica.
- No es deseable temperaturas muy altas, porque disminuye el tiempo de vida del Mg, debido a la evaporación. Tampoco se pretende temperaturas muy bajas, porque la fluidez del hierro nodular es mas baja que la fluidez del hierro gris, entonces, podrá causar defectos de hierro frío (Soldadura fría), flotación del grafito, y otros.

Fundição Ícaro Ltda

72

Defectos causados por la Reacción de Nodulización

Fundição Ícaro Ltda

73

Defectos Causados por la reacción de Nodulización

- Nodulización Baja
- Cementita
- Grafito Degenerado

Fundição Ícaro Ltda

74

Nodulización Baja

- Puede ocurrir por las siguientes razones:
 - Humedad en la aleación de FeSiMg
 - Mucho tiempo hasta la solidificación del hierro en el moldeo
 - Reacción se produjo muy temprano (Em la cuchara SandWich)
 - Composición química con elementos degeneradores del grafito.

Fundição Ícaro Ltda

75

Cementita y Grafito Degenerado

- Mucho Mg puede causar cementita, porque el Mg es un fuerte estabilizador de la cementita (Disminuye el rango entre el eutectico estable y metaestable)
- Lo carburos axiales tambien pueden ocurrir en piezas más gruesas, caso hay elementos de aleación y altos niveles de Mg.
- También puede causar grafito degenerado junto con altos niveles de C.

Fundição Ícaro Ltda

76

Defectos Mas Comunes en Hierros Nodulares

Fundição Ícaro Ltda

77

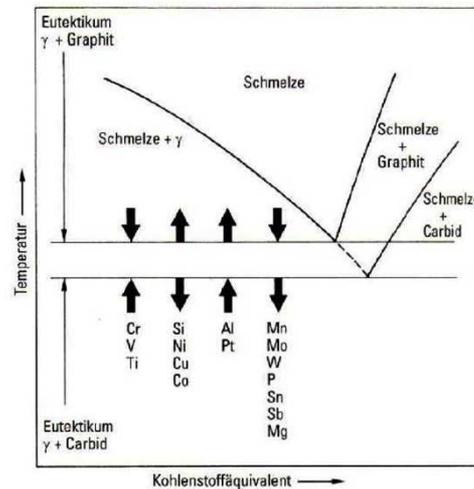
Defectos Mas Comunes - Carburos

- Como se muestra en la siguiente figura, algunos elementos de aleación cambian las temperaturas dos eutecticos estables y metaestables, con eso, favoreciendo la aparición de Carburos.
- Los Carburos de Fe, son los mas comunes y pueden descomponerse con tratamiento térmico, desde que no contenga elementos de aleación (Fe_3C).

Fundição Ícaro Ltda

78

Defectos Mas Comunes - Carburos



Efeitos de elementos de liga sobre a temperatura eutética estável (TEE) e sobre a temperatura eutética metaestável (TEM). (S Hasse).

Fundição Ícaro Ltda

79

Defectos Mas Comunes - Carburos

- Los carburos de Cr, V, etc; Son muy estables, y aparecen en las temperaturas mas altas, portanto, entonces, para descomponer estos carburos se requier uma temperatura mas alta que la propia temperatura de fusión del hierro nodular.

Fundição Ícaro Ltda

80

Defectos Mas Comunes – Carburos Directos (Hierro Blanco)

- Los carburos directos, pueden ocurrir debido a alguna, o algunas de las siguientes condiciones:
 - Piezas con pedazos fino y/o puntas.
 - Concentración de elementos formadores de carburos a más do que lo se recomienda (Mn, Cr, V, Mo, W, Ti, Nb)
 - Inoculación no efectiva
 - Alta velocidad de enfriamiento

Fundição Ícaro Ltda

81

Defectos Mas Comunes – Carburos Directos (Hierro Blanco)

- Baja temperatura de hierro y/o alta extracción de temperatura por lo moldeo
- Alta cantidad de elementos nodulizantes (Mg arriba de 0,06% o Ce arriba de 0,05%)

Fundição Ícaro Ltda

82

Defectos Mas Comunes – Carburos Axiales

- Pueden ocurrir en piezas de gran tamaño, y tienen forma de cilindro, o esférica en lo centro térmico de la pieza. Las piezas en nodular com elementos de aleación son mas sensibles a este defecto.
- Pueden ser causado por:
 - Alta cantidad de Ti, Mn, Cr, Mg.

Fundição Ícaro Ltda

83

Defectos Mas Comunes – Carburos Axiales

- Se puede evitar de la siguiente manera:
 - Evitar alta cantidad de Mg
 - Cambiar, si posible, la geometría de la pieza
 - Inoculación y enfriamiento rápido pueden reducir la aparición de este defecto.

Fundição Ícaro Ltda

84

Defectos Mas Comunes – Flotación del Grafito

- La flotación del grafito puede ocurrir en los hierros nodulares porque lo grafito es menos denso que el hierro. En los hierros gris, donde el crecimiento es cooperativo, el grafito se queda detenido en la austenita, mientras que en hierro nodular, como el grafito crece separado de la austenita (Crecimiento divorciado) el puede flotar hasta la superficie del moldeo.

Fundição Ícaro Ltda

85

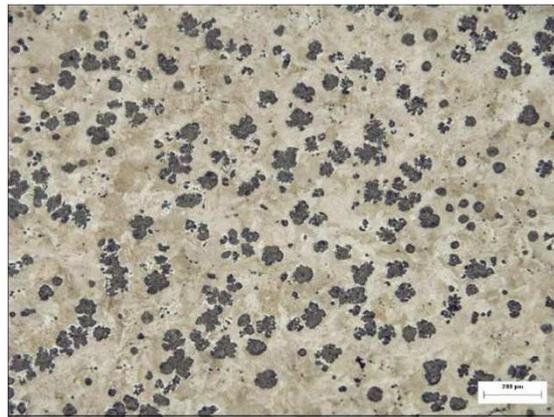
Defectos Mas Comunes – Flotación del Grafito



Fundição Ícaro Ltda

86

Defectos Mas Comunes – Flotación del Grafito



Fundição Ícaro Ltda

87

Defectos Mas Comunes – Flotación del Grafito

- Se presenta mas en piezas de gran tamaño
- Se presenta mas cuando C.E. alto (arriba de 4,5%)
- Se presenta mas cuando la velocidad de solidificación es lenta.
- La pieza estropeada presenta fractura negra en la región flotada (Alta cantidad de C libre)
- Su metalografía puede presentar grafito degenerado.

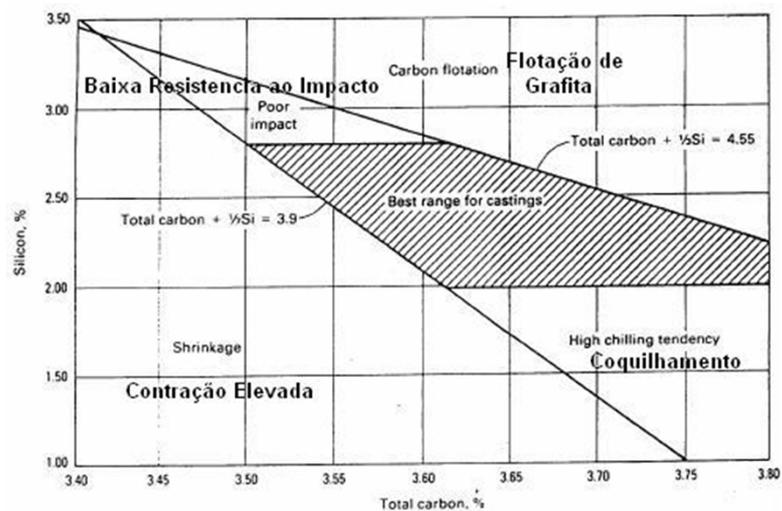
Fundição Ícaro Ltda

88

Defectos Mas Comunes – Flotación de Grafito

- Para prevenir la flotación de grafito:
 - Bajar lo C.E.
 - Aumentar la velocidad de solidificación.

Diagrama de Henderson



Obtención de matriz Ferrítica o Perlítica

Fundição Ícaro Ltda

91

- En los hierros gris, las propiedades físicas y mecánicas se definen mucho más por la forma del grafito, ya que se desea que su matriz siempre es perlítica.
- En los Hierros Nodular, las propiedades físicas y mecánicas se definen mucho más por la matriz, ya que se desea que el grafito siempre es esférica.

Fundição Ícaro Ltda

92

Ferríta

- En los hierros es responsable por menor LR;
- Dureza entre 70 y 150 Brinell - depende del %Si;
- Facilita el mecanizado.

Obtención de Matriz Ferrítica

- Para obtener una matriz ferrítica (predominante) debemos tener los elementos de aleación en bajos %, como %Mn < 0,20, %Sn residual, %Cu residual, %Ni Residual, etc.

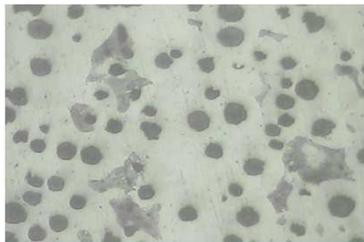
Para tener una matriz ferrítica, debemos dar las condiciones para que todo el C que estea en la austenita pueda migrar hasta el grafito.

Obtención de Matriz Ferrítica

- Para que eso ocurre:
 - La pieza no puede ser mucho delgada, porque la velocidad de enfriamiento es muy alta.
 - La pieza no puede ser desmoldeada mucho temprano, porque no hay tiempo para el C migrar hasta el grafito.
 - La cantidad de nódulos debe ser alta, porque cuanto más nódulos en un mm², más fácil para el C migrar hasta un grafito.

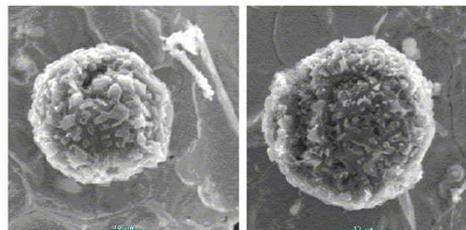
95

Obtención de Matriz Ferrítica



← Hierro Nodular con matriz de ferrita (mucho más ferrita que perlita)

Grafito con depósitos de carbono en su superficie →



Fundição Ícaro Ltda

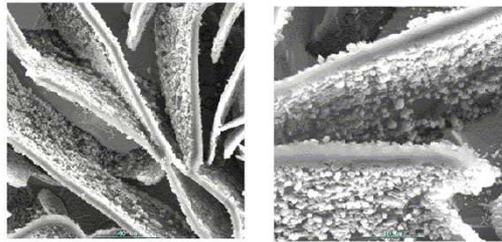
96

Obtención de Matriz Ferrítica



← Metalografía con ataque Nital 3%

Grafito en MEV →

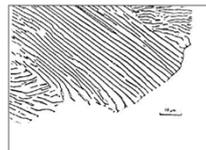
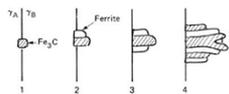


Fundição Ícaro Ltda

97

Perlita

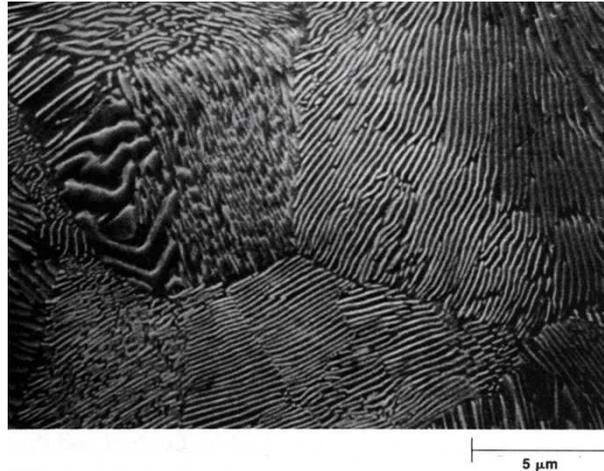
- Es responsable por la resistencia mecánica;
- Es una formación de venas alternas de ferrita y cementita;
- Su dureza y resistencia mecánica dependen del espacio entre sus venas: 170 a 330 Brinell.



Fundição Ícaro Ltda

98

Perlita



Fundição Ícaro Ltda

99

Obtención de Matriz Perlítica

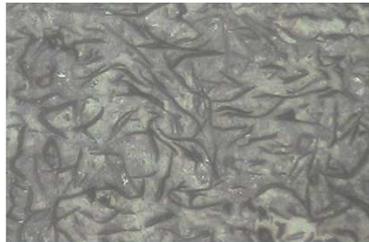
Para obtener matriz perlítica (predominante), debemos hacer uso de algunos elementos de aleación, dependiendo de las propiedades deseadas.

- Algunos elementos impiden un poco el tratamiento de ferritización, como en caso del Sn. Si eso es una propiedad determinante, debemos usar el Cu. O de otro modo, y la pieza debe ser resistente al tratamiento (Ferritización), si usa el Sn.

Fundição Ícaro Ltda

100

Obtención de Matriz Perlítica



← Hierro Gris con Matriz predominante de perlita

Grafito pegado en la Perlita →

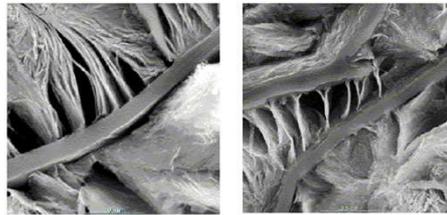
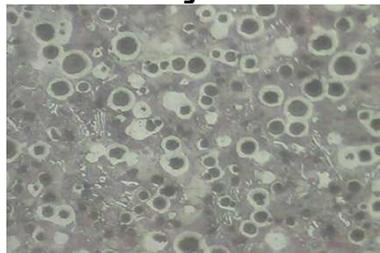


Figure 10. Microstructures of series IA showing direct contact between cementite and graphite flakes. Deep etched with 10% Nitral. SEM.

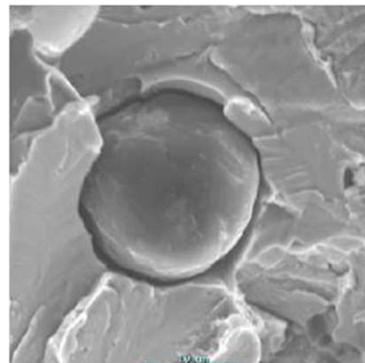
Fundição Ícaro Ltda

101

Obtenção de Matriz Perlítica



Grafito liso, cerca de la perlita →



Fundição Ícaro Ltda

102

Obtención de Matriz Perlítica

- Puede obtener una matriz perlítica, y endurecimiento de las piezas, haciendo un enfriamiento rápido. Sin embargo eso no debe ser usado ya que provoca muchas tensiones alrededor de los granos y puede causar la pérdida de las propiedades dimensionales de las piezas y hasta después de maquinadas.

Efecto de los elementos de aleación

- Cr e Si – Modifican el número de nódulos de grafito
- Ti – Modifican la forma del grafito
- Mn, Cr e Si – Modifican el rango de temperatura entre el eutéctico estable y metaestable.
- Si, Ni e Mo – Endurecimiento por solución sólida
- Cu, Mn, Sn – Promoción de perlita
- Si – Promoción de ferrita
- Nb, Ti, V e P – Formación de partículas duras
- Mn, P, Ti, V, Nb, Cr, Mo – Segregación para los contornos de las células eutécticas

Efecto dos elementos de aleación

- Mn, Cu, Mo e Ni – Más facilidad del tratamiento de enfriamiento (Têmpera, em português)

Efecto de los elementos de aleación

- Cu (< 1,0%): Es un grafitizante y es también un perlitizante.
- Mg (0,02 hasta 0,07%): Hace el grafito nodular, y disminuye los niveles de S y O.
- Mo (< 0,7%): Tiene ligera tendencia a formar carbonetos, promueve obtención de perlita delgada, segrega para los contornos de grano, aumenta el enfriamiento (Temperabilidade). Mucho utilizado en piezas con requisitos térmicos.

Efecto de los elementos de aleación

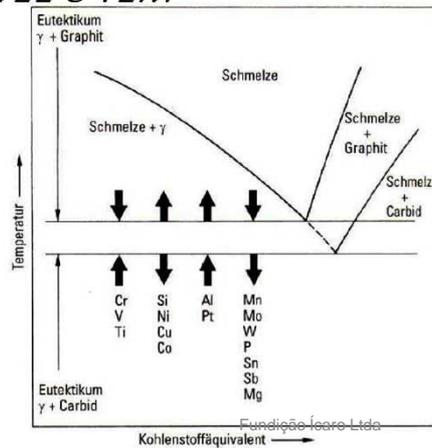
- Nb (< 0,15%): Perlitzante, promueve formación de carbonetos distribuidos en la matriz.
- W: Antigrafitizante y estabilizador de la ferrita.
- V: Forma carbonetos mucho estables (hasta 2,5x más poderoso que el Cr), tiende a delgar la perlita y promueve la perlita, favorece las propiedades en temperaturas altas.

Efecto de los elementos de aleación

- Sn: Estabiliza matriz perlítica, hace el grafito más esferoidal, en grandes cantidades debilita porque segrega para el contorno de grano (encima de 0,1%) Difícil de tratar para una ferritización, porque es un estabilizador de la perlita.

Efecto de los elementos de aleación

- Esta figura muestra el efecto de los elementos nas TEE e TEM



Efeitos de elementos de liga sobre a temperatura eutéctica estável (TEE) e sobre a temperatura eutéctica metaestável (TEM). (S Hasse).

109

Efecto de los Elementos - C

- C (3,30 hasta 3,90%): Cantidad mayor aumenta la fluidez, la cantidad del grafito, la % de ferrita, y la tendencia a flotación del grafito, disminuyendo la tendencia de caburos y las propiedades mecánicas del resistencia. En aleaciones ferríticas disminuye la dureza, resistencia a tracción y alargamiento.

Fundação Ícaro Ltda

110

Efecto de los Elementos - Si

- Es un fuerte desoxidante y endurece la ferrita por solución sólida. Para un mismo C.E., cantidad mayor de Si aumentan el límite de la resistencia, mientras que el aumento del C.E. debido al aumento del Si, causa la disminución del límite de resistencia si el carbono for mantenido constante.
- La disminución de la resistencia al impacto, también es asignado al Si

Fundição Ícaro Ltda

111

Efecto de los Elementos - Mn

- El Mn es un neutralizador del S, evitando la formación de sulfuro de manganeso (MnS). Lo Manganeso que no es utilizado en la neutralización del S, contribuye con la formación de carburos eutecticos, y entonces, es un perlitzante.
- De los elementos perlitzantes, es lo que menos afecta a la resistencia a los impactos, y es lo de menor precio.

Fundição Ícaro Ltda

112

Control de Nodulización

Fundição Ícaro Ltda

113

Control de nodulización

- Es un control simples
- Lo control de nodulización debe ser hecho en 100% de las reacciones.
- A través de una muestra recogida del hierro de la última cucharra que tiene el hierro de la reacción, es hecha una metalografía y comprobar solo si los nódulos son esféricos.
- No es para análisis de la matriz ferrítica/perlítica

Fundição Ícaro Ltda

114

Control de nodulización

- La muestra debe ser recogido del hierro del último moldeo, de la última cucharra que recibió el hierro de la cucharra de reacción.

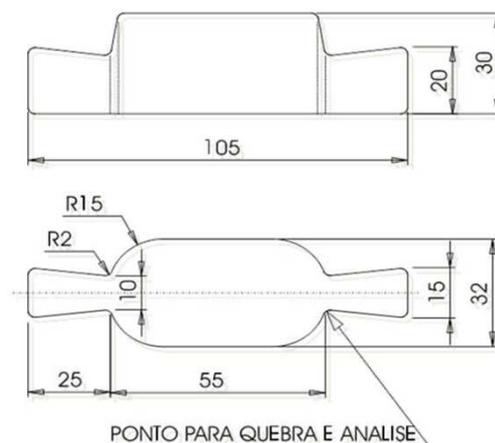
Esto asegura que se analizará la peor condición en relación a cantidad de Mg contenido en el hierro.

Porque como ya miramos, lo Mg se pierde con el tiempo. Este tiempo depende de la temperatura y cantidad inicial de Mg.

Fundição Ícaro Ltda

115

Muestra para analisis de la nodulización



Tolerancias - ± 0.2
 Ra os não cotados = 3
 Dimensões em milímetros

Fundição Ícaro Ltda

116

Muestra para analisis de nodulización

- Por estándar, la muestra de nodulización debe ser hecha en arena shell.
- No debe tener cualquier humedad, aceite o cualquier otros residuos.
- Se debe almacenar en pequeño invernadero.

Obtención de Hierro Nodular (Prácticas)

Secuencia de Nodulización en práctica

- 1º - la cuchara debe estar calentada.

- Mire que en el fondo se puede mirar el agujero donde se coloca la aleación FeSiMg



Fundição Ícaro Ltda

119

Secuencia de Nodulización en práctica

Los materiales utilizados en este proceso de nodulización son:

- "Aleación IV" Aleación de FeSiMg, con el mínimo de 5% de Mg. Con granos de 2 hasta 6mm.

- Chatarra de acero, pequeña

Obs.: Todo debe estar seco y sin ninguna oxidación.



Fundição Ícaro Ltda

120

Secuencia de Nodulización en práctica

- Después, la aleación es puesta en el fondo de la cucharra.

Aqui, se hizo la adición de 3,8Kg de FeSiMg, para nodulizar 350Kg de hierro.

- De la misma manera, después se pone la cubierta, que en este caso es chatarra de acero.



Fundição Ícaro Ltda

Secuencia de Nodulización en práctica

- Ahora la chatarra es lista para recibir el hierro líquido.



Fundição Ícaro Ltda

Secuencia de Nodulización en práctica

- Empeza el llenado de la cuchara de reacción.



Fundição Ícaro Ltda

123

Secuencia de Nodulización en práctica

Los problemas que pueden ocurrir ahora

- Poner poca chatarra para cubierta, hace la reacción ocurrir muy temprano, eso puede causar baja nodulización.
- Poner mucha chatarra de acero, hace la reacción ocurrir muy tarde, porque lo Fe liquido no logrará que ella se derrita.

Fundição Ícaro Ltda

124

Secuencia de Nodulización en práctica

Los problemas que pueden ocurrir ahora

Caso la reacción no se producir, se debe hacer lo siguiente:

- Con una lanza de acero maciva, perforar la cubierta de acero; o
- Devolver el hierro al horno, recalentar y devolver a la cuchara, **pero mucha atención!!!**.

Obs: Los dos casos tienen riesgo de quemaduras y debe ser hecho con mucho cuidado debido a las posibles "explosiones" del hierro que pueden salir de la cuchara de reacción.

Fundição Ícaro Ltda

125

Secuencia de Nodulización en práctica

- La reacción solo empieza después que la cuchara ya está con la cantidad de hierro Líquido deseado.



Fundição Ícaro Ltda

126

Secuencia de Nodulización en práctica

- La reacción llega a un momento de mayor actividad:



Fundição Ícaro Ltda

Secuencia de Nodulización en práctica

- Después de la reacción, el hierro está con escoria en la superficie.

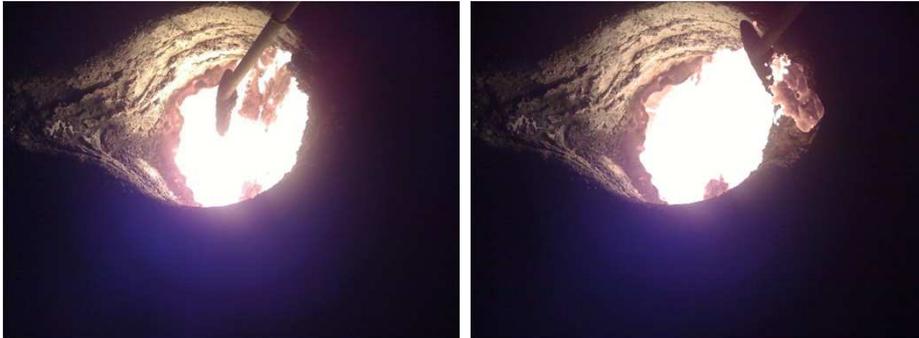


Fundição Ícaro Ltda

128

Secuencia de Nodulización en práctica

- La escoria debe ser retirada, de una forma rápida, porque se tiene poco tiempo para que el hierro llegue hasta el moldeo.



Fundição Ícaro Ltda

129

Secuencia de Nodulización en práctica

- Entonces se puede hacer la transferencia y inoculación del hierro para las cucharas pequeñas (esas son de 180Kg).



Fundição Ícaro Ltda

130

Secuencia de Nodulización en práctica

- Después, es hecho lo transporte hasta el moldeo, donde el Fe debe llegar en el moldeo antes que lo Mg llegue a una cantidad menor que 0,03%.

Obs: Lo tiempo cambia de acuerdo con % de S y O, y temperatura después de la reacción.



Fundição Ícaro Ltda

131

Secuencia de Nodulización en práctica

- En último moldeo, de la última cuchara de esta reacción, es tomada una muestra para analisis metalográfica de nodulización.

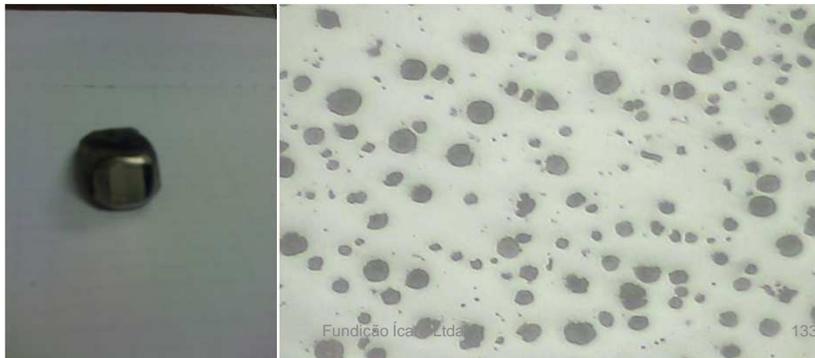


Fundição Ícaro Ltda

132

Secuencia de Nodulización en práctica

- La muestra debe ser rompida y pulida para analisis metalográfica.



Secuencia de Nodulización en práctica

- La muestra sólo sirve para verificar se la nodulización se produjo. No es necesariamente la condición de la pieza, siendo que la muestra enfriou muy rápido y tiene dimensiones diferentes de la pieza.
- No sirve para análisis de matriz.

Secuencia de Nodulización en práctica

- Puede ser cogida también en último moldeo de la última cuchara, una prueba para analisis en espectrómetro, donde se puede hacer la verificación de la cantidad de Mg en la peor condicione del hierro (último moldeo)

Bibliografia

- SANTOS, Adalberto B. de S. , BRANCO, Carlos H. C. - Metalurgia dos ferros fundidos cinzentos e nodulares - Ed. IPT São Paulo 1991
- CHIAVERINI, Vicente - Aços e Ferros Fundidos - 7 Edição, Ed. ABM São Paulo 2005
- ALBERTIN, Eduardo , SANTOS, Adalberto B. , COSTA, Pedro H. C. - Flutuação de grafita em ferros fundidos nodulares - Ed. IPT 1977
- VALLINA, José J. - Obtenção de Ferro Fundido Cinzento - Ed. ABIFA 2008
- ABREU, Alirio G. da S. - Alimentação e enchimento de peças fundidas vazadas em moldes de areia - Ed. SENAI, Itáúna 2007
- Tavares, Fernando C.L. - Fabricação de Ferros Fundidos Cinzentos e Nodulares – Etapas do Processo – Joinville- Abifa 2006
- American Foundry Society 5-L - Pour the perfect Cup. - Revista Modern Casting – Vol 97 Nº11, Committee, Schaumburg, illinois - Nov. 2007
- BEX, T. Chill Testing of Iron – Modern Casting – www.thefreelibrary.com
- PIESKE, A.; FILHO, L.M.C e REIMER, J.F. – Ferros Fundidos Cinzentos de Alta Qualidade – Sociedade Educacional Tupy – 2 edição – 1976
- SCHEID, H.;WEISSKOPF K.; BÄHR, R. – Revista Fundição e Serviços – Pg. 28 - Editora Aranda – Ano 18 – Nº 182 – Fev. 2008

Classes

- Este pequeño libro, yo hice para unas classes que algunas fabricas me preguntaron.
- Estas classes son en teoria y practica, en la fundición Ícaro, donde yo trabajo.
- Qualquer duda, pueden preguntar por correo.

Contato

- Esta traducción, yo hizo rapidamente em mi casa, a pedido de unos amigos.
- Los errores pueden me advertir por correo:
eduardo@eduardomoreira.eng.br

Yá que no conozco las pavabras más tecnicas.

Visite my sitio en www.eduardomoreira.eng.br

Gracias.