

Metalurgia dos Ferros Fundidos Nodulares

Aspectos fundamentais na produção e controle

Eduardo de S. Moreira – Ago/2010

Ver. Jul./2011

eduardo@eduardomoreira.eng.br

Tópicos

- **Apresentação**
 - A Fundição Ícaro Ltda
 - Processos da Fundição Ícaro Ltda
- **Objetivo**
- **Introdução**
 - Ferros Fundidos Cinzentos, Vermiculares e Nodulares
 - Propriedades dos Ferros Fundidos Cinzentos
 - Propriedades dos Ferros Fundidos Nodulares
 - Comparativo entre as propriedades
 - Diagrama Fe-C
- **Nucleação**
 - Estado Líquido para o Sólido
 - Nucleação Homogênea
 - Nucleação Heterogênea
 - Estruturas de Solidificação
 - Estruturas de Formação dos Eutéticos
 - Solidificação dos Ferros Fundidos Cinzentos e Nodulares
 - Ferros Fundidos Nodulares
 - Grau de Nodularização
 - Tamanho das Grafitas
 - Número de Nódulos
 - Matriz

- **Obtenção de Ferro Fundido Nodular (Teoria)**
 - Como Obter Ferro Fundido Nodular
 - FeSiMg
 - Tratamento do Banho para que ocorra Nodularização
 - O processo Sanduiche
 - O processo de Panela Rotativa
- **Defeitos Causados na Nodularização**
 - Baixa Nodularização
 - Coquilhamento e Grafita Explodida
- **Defeitos Mais Comuns em Ferros Fundidos Nodulares**
 - Defeitos Mais Comuns – Carbonetos
 - Defeitos Mais Comuns – Coquilhamento Direto
 - Defeitos Mais Comuns – Coquilhamento Inverso
 - Defeitos Mais Comuns – Flotação de Grafita (Ou Flutuação de Grafita)
 - Diagrama de Henderson
- **Obtenção de Matriz Ferrítica ou Perlítica**
 - Obtenção de matriz ferrítica
 - Obtenção de matriz perlítica
 - Efeito dos elementos de liga
 - Efeito dos elementos – Carbono
 - Efeito dos elementos – Silício
 - Efeito dos elementos – Manganês

- **Controle de Nodularização**
- **Obtenção de Ferro Fundido Nodular (Prática)**
 - Sequência de Nodularização na pratica
- **Bibliografia**

Apresentação

- Nome: Eduardo de S. Moreira
- Empresa: Fundação Ícaro Ltda



Empresa



- A Fundação Ícaro Ltda está no mercado de fundição a mais de 15 anos.
- Sua produção predominante é de Ferro Fundido Nodular 80%, sendo os outros 20% de Ferro Fundido Cinzento.
- Nossa capacidade produtiva atual é de 200Ton/Mês por turno
- A Fundação Ícaro é Certificada ISO9001:2008

Empresa

- Nosso processo é composto por:

Fusão:

Fornos a indução

Moldagem:

Em areia a verde, 1 Linha automática Vick.

Empresa

Macharia:

Shell e ColdBox

Laboratório:

Espectrômetro

Microscópio Metalográfico

Durômetro

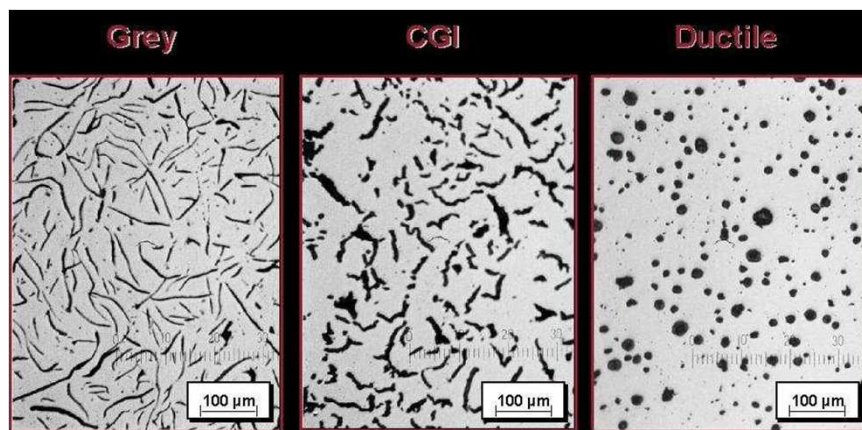
Etc;

Objetivo

- O Objetivo deste material é compreender:
 - ➔ Os mecanismos de solidificação dos Ferros Fundidos Cinzentos e Nodulares.
 - ➔ As diferenças Físico/Químicas entre os Ferros Fundidos Cinzentos e Nodulares
 - ➔ A fabricação, na teoria e prática dos Ferros Fundidos Nodulares.

Introdução

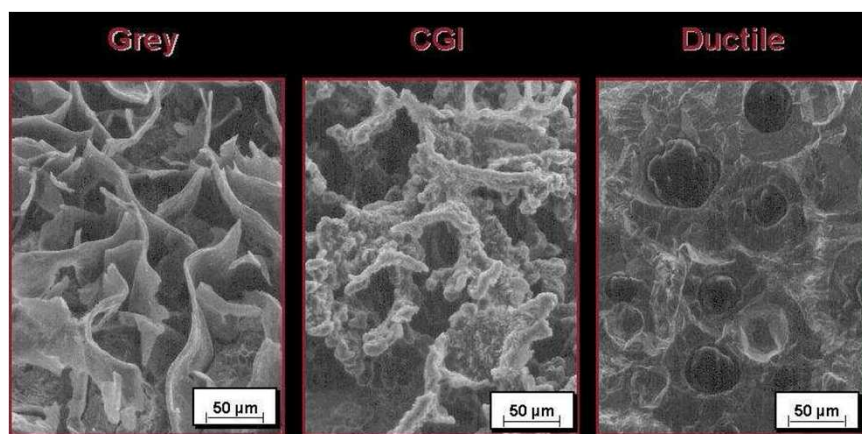
Ferros Fundidos Cinzentos, Vermiculares e Nodulares



Fundição Ícaro Ltda

11

Ferros Fundidos Cinzentos, Vermiculares e Nodulares



Fundição Ícaro Ltda

12

Propriedades dos Ferros Fundidos Cinzentos

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

Propriedades dos Ferros Fundidos Nodulares

Propriedades de ferros fundidos nodulares.

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

Fundição Ícaro Ltda

14

Comparativo de Propriedades

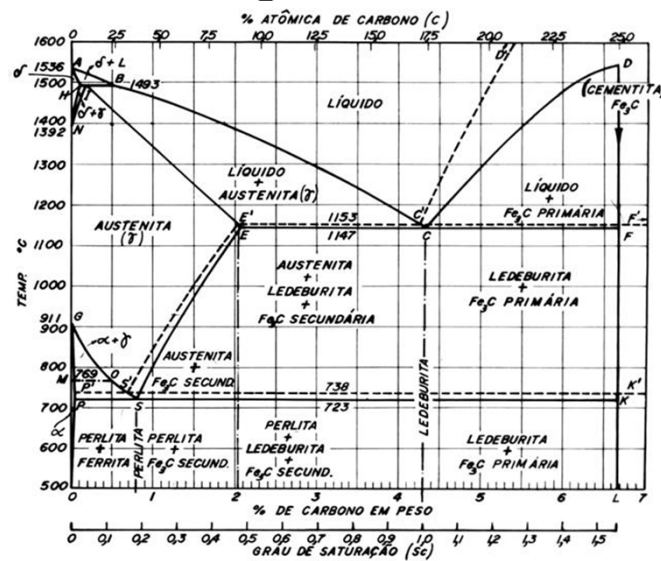
Comparação de propriedades entre ferros fundidos cinzento, nodular e vermicular, com matriz perlítica. Norma SAE J1887/2002.

Propriedade	Cinzento	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

Nucleação

Fundição Ícaro Ltda

17

Estado Líquido

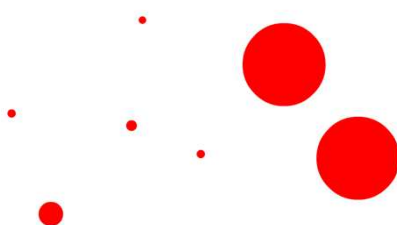
A estrutura do metal líquido se caracteriza por um estado desordenado de átomos, onde ocorrem e desaparecem aleatoriamente regiões de ordenação de curto alcance (Núcleos de solidificação que aparecem e desaparecem).


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. 15.071
 91501-970 - Porto Alegre - RS - Brasil
 Fone: F. (51) 3308.4142

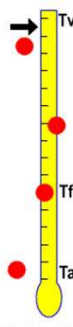
Nesta animação é mostrado como os núcleos aparecem e desaparecem

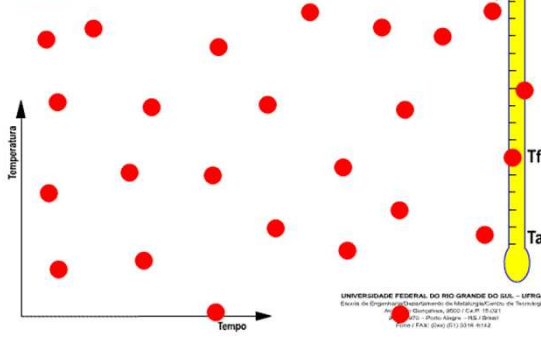
Fundição Ícaro Ltda 19

Estado Líquido para 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. 15.071
 91501-970 - Porto Alegre - RS - Brasil
 Fone: F. (51) 3308.4142

Fundição Ícaro Ltda 20

Estado Sólido

No metal sólido, os átomos apresentam uma ordenação segundo uma estrutura cristalina. Ou seja, se posicionam no espaço conforme uma ordem definida e regular.

Nucleação

A nucleação pode ser homogênea ou heterogênea

Nucleação Homogênea

São núcleos que aparecem no meio líquido, e se, ultrapassarem o raio crítico, se tornam núcleos efetivos e crescem, caso contrário, voltam a se diluir no meio líquido.

Nucleação Heterogênea

Ocorre sob a influência de um substrato (Areia do molde, inclusões sólidas, inoculantes, etc;)
O embrião se forma na superfície do substrato.

Mecanismo de Crescimento do Núcleo

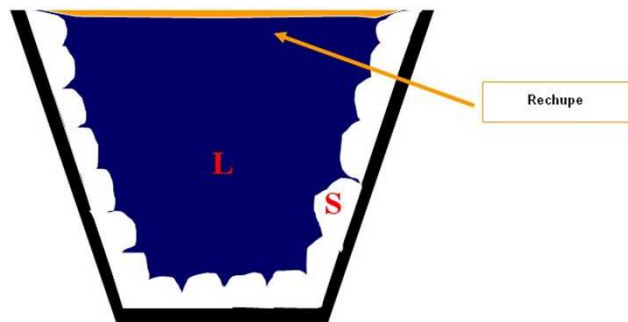
Quando o núcleo estável se forma, ele recebe átomos a partir do líquido.

Estruturas de Solidificação

Podem Ser Sólido / Planar ou

Sólido/líquido Dendrítica

Interface Sólido/Planar:



- Aços, FoFo Branco, Latões, Algumas Ligas de Al

Fundição Ícaro Ltda

27

Interface Sólido/Líquido Dendrítica



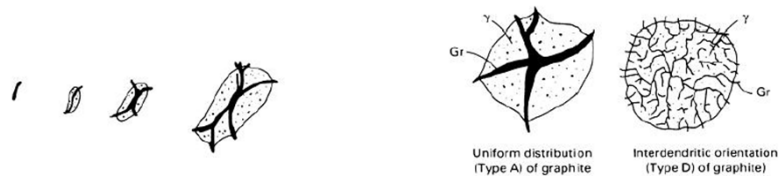
Ferros Fundidos Cinzento e Nodular
(Solidificação Pastosa)

Fundição Ícaro Ltda

28

Estrutura da solidificação do eutético Irregular Cooperativo

- Este eutético ocorre quando uma das fases que precipita é um composto metal com não metal.
- Quando essas fases solidificam, elas crescem em direções preferenciais determinadas pelos planos atômicos e não paralela ao fluxo de calor.
- Normalmente apresenta morfologia Lamelar.



Fundição Ícaro Ltda

29

Estrutura da formação do eutético divorciado

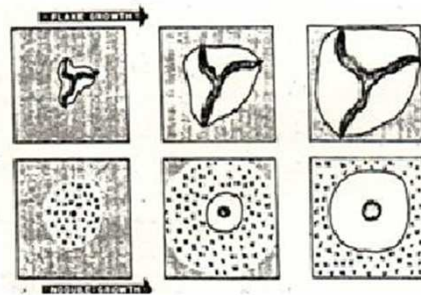
- Este eutético ocorre quando uma fase solidifica antes da nucleação da outra fase.
- Quando isso ocorre, uma fase não serve de substrato para a outra, ocorrendo o encapsulamento da outra fase.
- Normalmente apresenta morfologia Nodular (A grafita é encapsulada pela austenita).

Fundição Ícaro Ltda

30

Estrutura de formação dos eutéticos

- A figura a seguir mostra a formação de um eutético Cooperativo (Ferro Cinzento), e de um eutético Divorciado (Ferro Nodular).



Fundição Ícaro Ltda

31

Solidificação dos Ferros Fundidos Cinzentos

- Geralmente, possuem composições químicas que vão do hipoeutético ao eutético, conforme as propriedades mecânicas requeridas.
- Quanto mais hipoeutética é a composição, maior a quantidade de austenita que se formam antes do eutético.
- O Eutético dos ferros fundidos cinzentos é Cooperativo

Fundição Ícaro Ltda

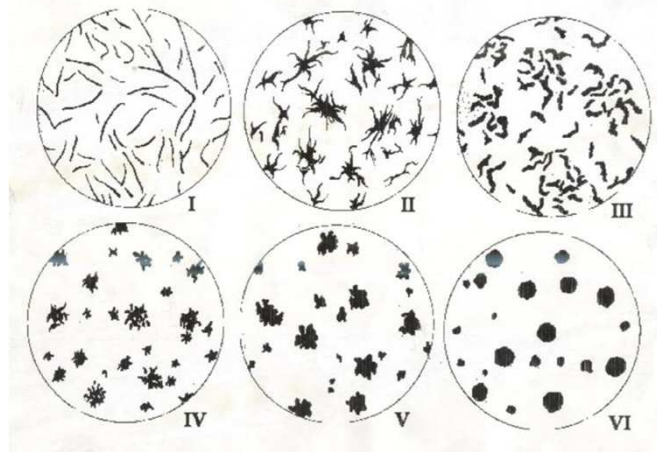
32

Ferros Fundidos Cinzentos

- São ferros Fundidos em que a maior parte do carbono de sua microestrutura está na forma de lamelas de grafita, sendo obtido no estado bruto de fundição.

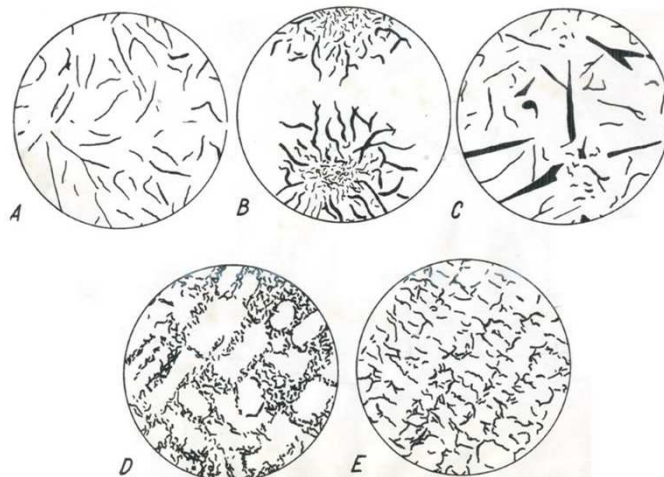
Ferros Fundidos Cinzentos

FORMAS DA GRAFITA



Ferros Fundidos Cinzentos

DISPOSIÇÃO DAS GRAFITAS

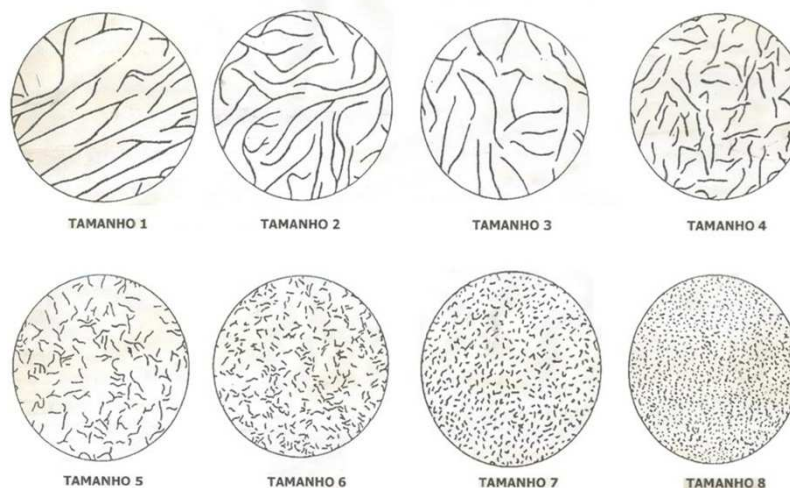


Fundição Ícaro Ltda

35

Ferros Fundidos Cinzentos

TAMANHO DE GRAFITAS

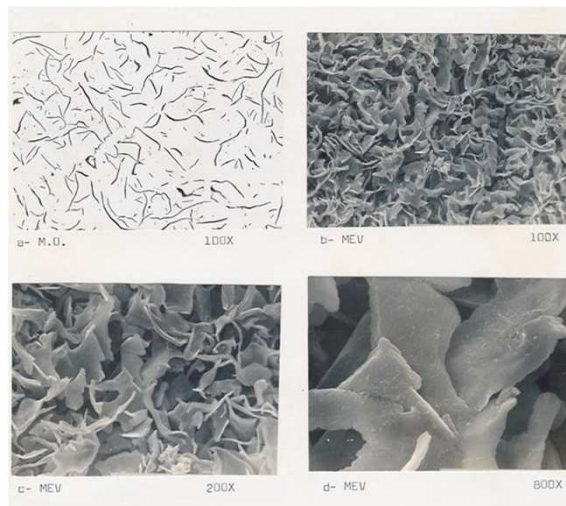


Fundição Ícaro Ltda

36

Ferros Fundidos Cinzentos

Grafita Tipo A

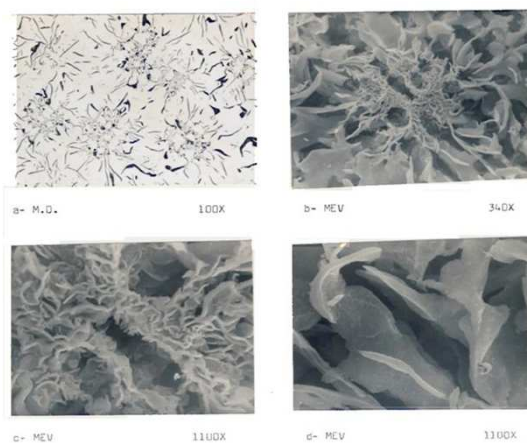


Fundição Ícaro Ltda

37

Ferros Fundidos Cinzentos

Grafita Tipo B



Fundição Ícaro Ltda

38

Ferros Fundidos Cinzentos

Grafita Tipo C



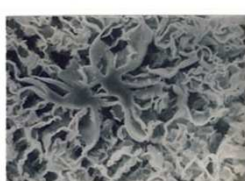
a- M.O. 100X



b- M.E.V. 80X



c- M.O. 250X



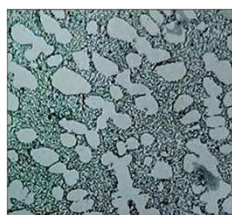
d- M.E.V. 450X

Fundição Ícaro Ltda

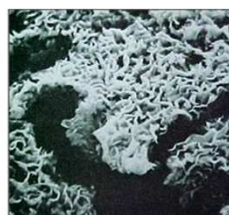
39

Ferros Fundidos Cinzentos

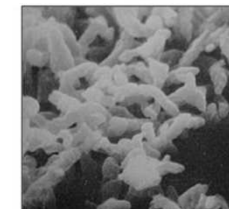
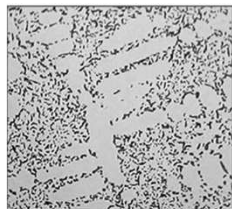
Grafita Tipo D



100X



100X

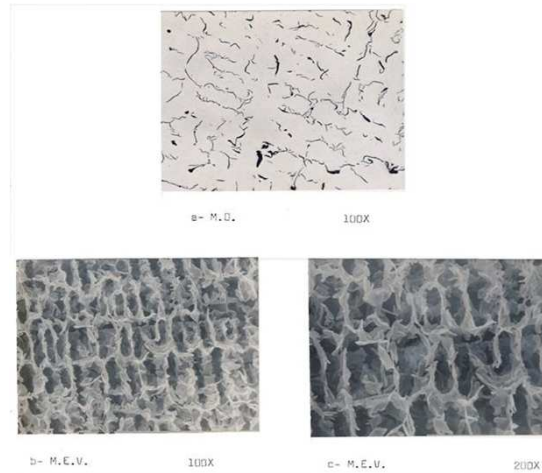


Fundição Ícaro Ltda

40

Ferros Fundidos Cinzentos

Grafita Tipo E



Fundição Ícaro Ltda

41

Solidificação dos Ferros Fundidos Nodulares

- Geralmente, possuem composições que vão do eutético ao hipereutético.
- Quanto mais hipereutética é a composição, maior a quantidade de grafita que se precipita no líquido.
- O Eutético dos ferros fundidos Nodulares é Divorciado.

Fundição Ícaro Ltda

42

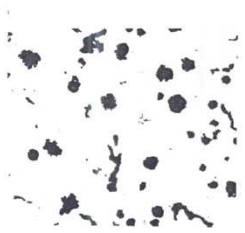
Ferros Fundidos Nodulares

- São ferros Fundidos em que a maior parte do carbono de sua microestrutura está na forma de grafita esferoidal, sendo obtido no estado bruto de fundição.

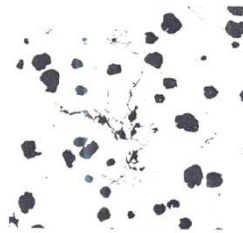
Fundição Ícaro Ltda

43

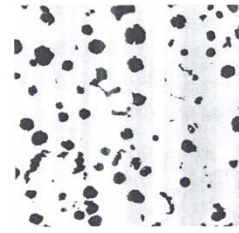
Grau de Nodularização - Aumento de 100x



60 %



70 %



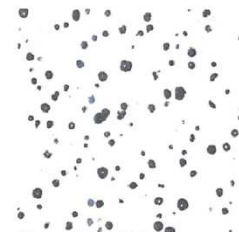
80 % - a



80 % - b



90 %



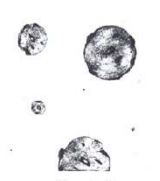
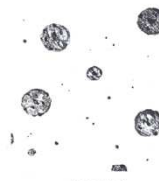

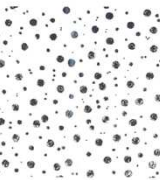
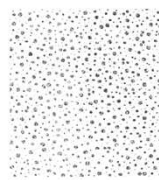
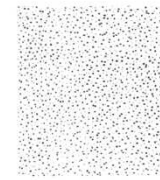
100%

Fundição Ícaro Ltda

44

Ferros Fundidos Nodulares


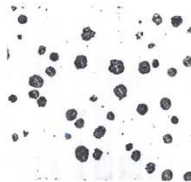
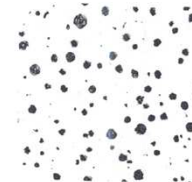
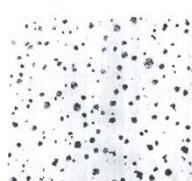

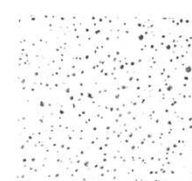
Tamanho das Grafitas - Aumento de 100x

 <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

Ferros Fundidos Nodulares

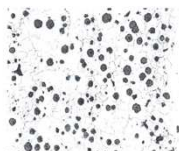
Número de Nódulos - Aumento de 100x

 <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>

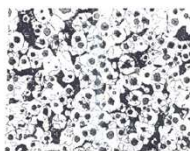
Fundição Ícaro Ltda 46

Ferros Fundidos Nodulares

Matriz (Nital 3%) - Aumento de 100x



100% Ferrita



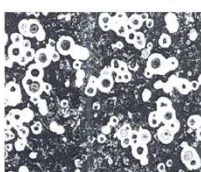
85% Ferrita - 15% Perlita



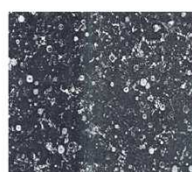
75% Ferrita - 25% Perlita



50% Perlita - 50% Ferrita



75% Perlita - 25% Ferrita



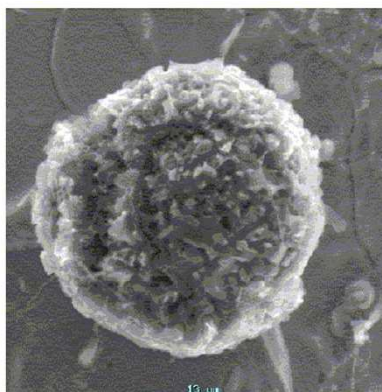
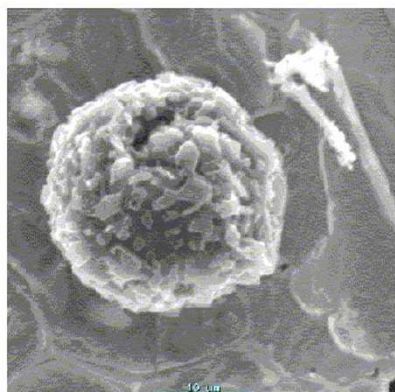
100% Perlita

Fundição Ícaro Ltda

47

Ferros Fundidos Nodulares

Grafita Nodular com depósitos de Carbono sobre a grafita

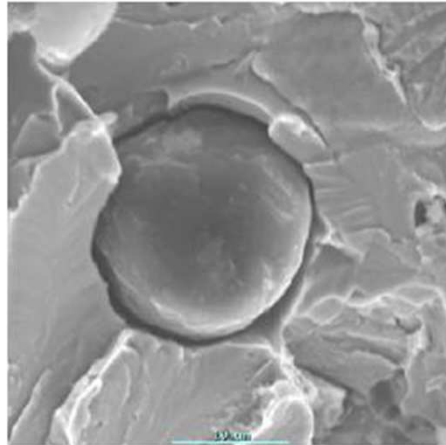


Fundição Ícaro Ltda

48

Ferros Fundidos Nodulares

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



Fundição Ícaro Ltda

49

Obtenção de Ferro Fundido Nodular Teoria

Fundição Ícaro Ltda

50

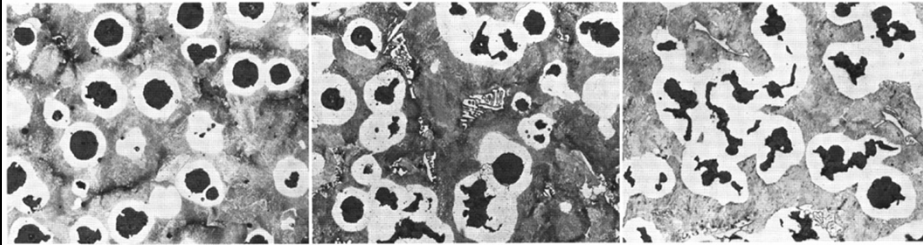
Como Obter Ferro Fundido Nodular

- A grafita esferoidal é obtida através da adição de elementos nodulizantes, que impedem que o S e o O modifiquem a forma de crescimento da grafita.
- Os nodulizantes mais comuns são, Mg, Ce, Ca e terras raras. O mais utilizado é o Mg, através de uma liga de FeSiMg

FeSiMg

- Muito conhecido comercialmente como "Liga IV", "Liga I", etc;
- É uma liga composta por Fe, Si, Mg, Ca, Al, e Terras raras sendo que o Mg deve ser no mínimo de 5% para liga IV, e de no mínimo 8% para a liga I.
- O Mg possui ponto de ebulição de aproximadamente 1100C, como a reação de nodulização é feita no ferro líquido a temperaturas de aproximadamente 1500C (Dependendo do processo), a ebulição do Mg provoca uma "explosão", ou faz o "ferro ferver".
O Mg reage com outros elementos, principalmente O e S, sendo perdido na forma de sulfetos e óxidos, além da vaporização devido a temperatura acima do ponto de ebulição.
Com isso, o teor de Mg vai caindo no decorrer do tempo, e portanto, o S e o O podem se aproximar das grafitas, provocando a degeneração da grafita, ou seja, o crescimento da grafita ocorre de maneira descontrolada.

Fading do Mg



2% nital 250×
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 250×
 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 250×
 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.

Com o passar do tempo, o teor de Mg diminui, e com isso, a grafita se degenera.

Teores de Mg

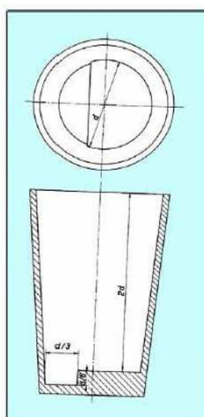
- O teor residual desejável de Mg depende do teor de S e O e das dimensões da peça.
- Na maioria dos casos, se deseja um teor de Mg de 0,03 a 0,06 e que o S não ultrapasse 0,015% (Teoria).

Tratamento do banho para que ocorra nodularização

Pode ser na panela, no molde (in mold) ou no jato de ferro.

Vamos abordar somente o tratamento na panela, que é o mais simples e mais utilizado.

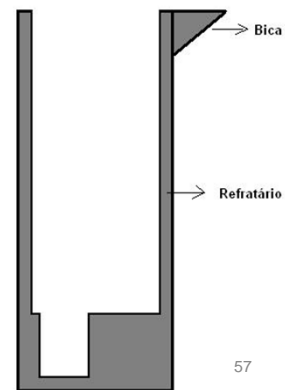
Processo Sanduiche



Dimensionamento: $H/D = 2/1$

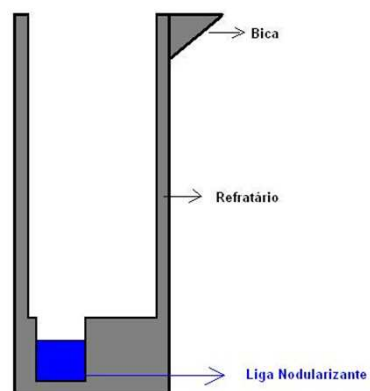
Processo Sanduiche

- Após a panela de reação estar devidamente aquecida, é adicionado a liga nodularizante no recipiente localizado no fundo (e deslocado para trás) da panela



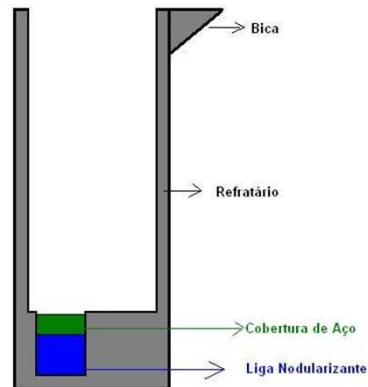
Processo Sanduiche

- Então, se coloca a liga nodularizante. Como na figura a seguir.



Processo Sanduiche

- Depois a liga nodularizante deve ser coberta com sucata de aço.



Fundição Ícaro Ltda

59

Processo Sanduiche

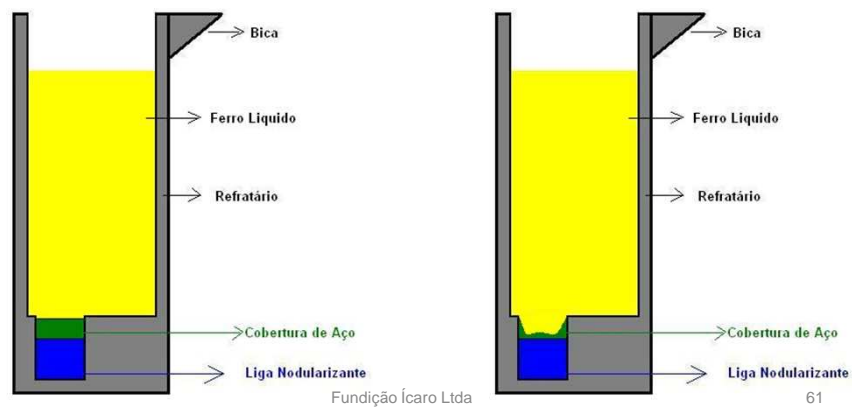
- Porque cobrir a liga com sucata de aço?
A sucata de aço serve para retardar o inicio da reação, pois se a reação iniciar muito rapidamente, já começará o fading do Mg.
O ideal é que a reação só se inicie depois que a panela já esteja com a quantidade de ferro liquido desejada.

Fundição Ícaro Ltda

60

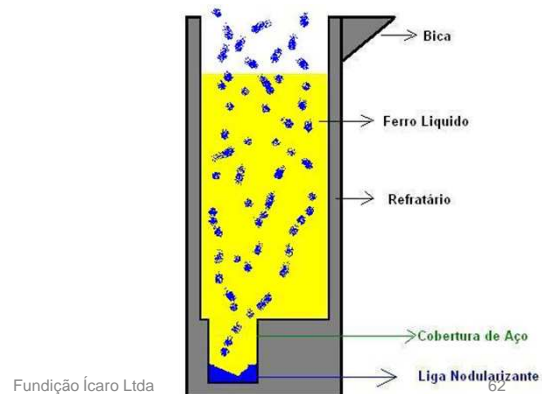
Processo Sanduiche

- Depois da panela de reação receber o ferro liquido, a cobertura começa a derreter.



Processo Sanduiche

- Quando a cobertura derrete, o ferro liquido atinge a liga nodularizante, e a reação inicia.



Processo Sanduiche

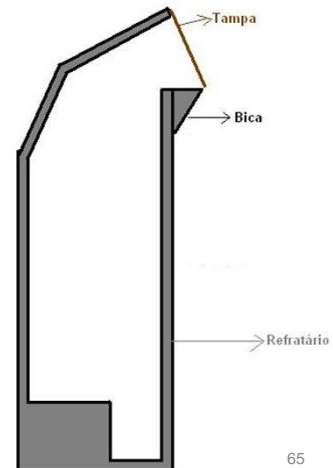
- Este é o processo utilizado atualmente na Fundação Ícaro Ltda, e será visto em detalhes na prática dentro da fundição e através de fotos ao final deste artigo.

Processo Panela Rotativa

- Este processo permite uma certa economia de liga nodularizante já que o vapor de Mg fica parcialmente retido dentro da panela, criando uma atmosfera mais rica em Mg e evitando o contato do ferro líquido com o oxigênio. Também evita respingos.
- Neste processo não é necessário cobertura da liga.
- A desvantagem é o custo do equipamento e dificuldade maior em fazer o refratário.

Processo Panela Rotativa

- Com a panela vazia, e devidamente aquecida

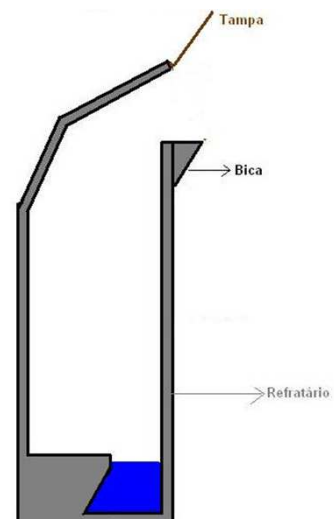


Fundição Ícaro Ltda

65

Processo Panela Rotativa

- A liga deve ser colocada em seu lugar no fundo do panelão, manualmente, ou com auxílio de uma calha.

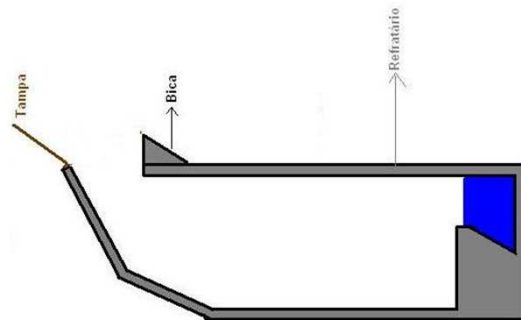


Fundição Ícaro Ltda

66

Processo Panela Rotativa

- Posteriormente, a panela é virada para a posição horizontal.

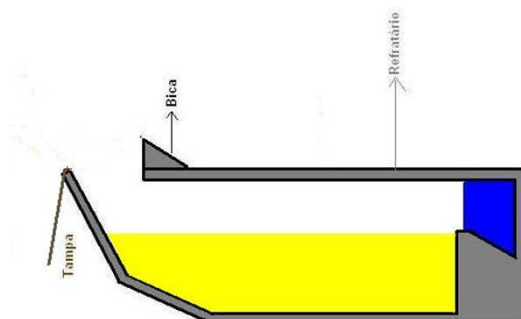


Fundição Ícaro Ltda

67

Processo Panela Rotativa

- Com a panela na horizontal, se pode preenche-la de ferro líquido até o limite em que o ferro não chegue até a liga nodularizante.



Fundição Ícaro Ltda

68

Processo Panela Rotativa

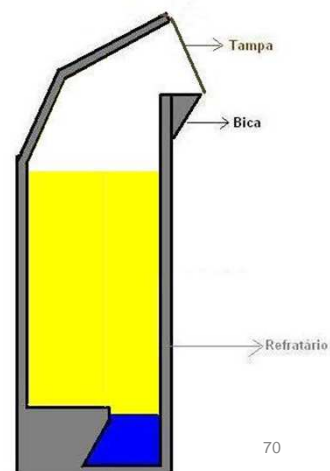
- Com a panela na horizontal, se pode levá-la até o local desejado para que a reação aconteça.

Fundição Ícaro Ltda

69

Processo Panela Rotativa

- No local desejado, a panela é virada novamente a posição vertical, quando o ferro entra em contato com a liga, a reação inicia.

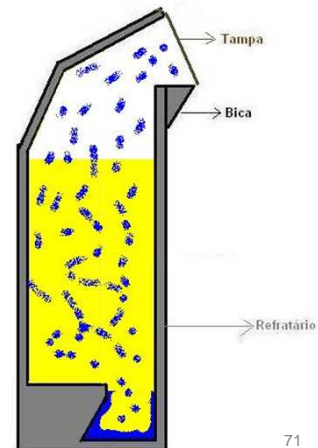


Fundição Ícaro Ltda

70

Processo Panela Rotativa

- Como esta panela possui tampa e pode ficar fechada, o Mg fica na atmosfera da panela.



Fundição Ícaro Ltda

71

Perda de temperatura

- Para fusão da liga, e cobertura, deve se considerar uma perda de 60C a 80C, isso dependerá do processo de cada fundição e deve ser observado na prática.
- Não é desejável temperaturas muito altas, pois diminuirá o tempo de vida do Mg, devido a evaporação. Também não é desejável temperaturas muito baixas, pois a fluidez do ferro fundido nodular é menor que a fluidez do ferro fundido cinzento, portanto, poderá provocar defeitos de solda-fria, flotação, etc.

Fundição Ícaro Ltda

72

Defeitos Causados na Reação de Nodularização

Fundição Ícaro Ltda

73

Defeitos Causados na reação de Nodularização

- Baixa Nodularização
- Coquilhamento
- Grafita Explodida

Fundição Ícaro Ltda

74

Baixa Nodularização

- Pode ocorrer pelos seguintes motivos:
 - Umidade na liga nodularizante
 - Tempo elevado até o vazamento no molde
 - Reação ocorreu muito cedo (Panela Sanduiche)
 - Composição química base com presença de elementos degeneradores da grafita.

Coquilhamento e Grafita Explodida

- O excesso de Mg pode causar coquilhamento, pois o Mg é um forte estabilizador da cementita (Diminui o intervalo entre o eutético estável e metaestável)
- O Coquilhamento inverso também pode ocorrer em peças de maior espessura, caso haja elementos de liga e Mg alto.
- E pode causar grafita explodida em conjunto com altos teores de carbono.

Defeitos Mais Comuns em Ferros Fundidos Nodulares

Fundição Ícaro Ltda

77

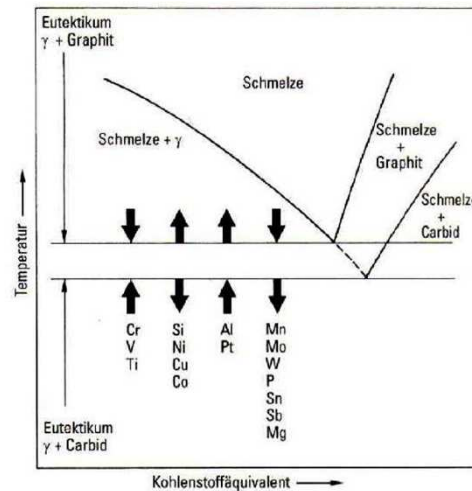
Defeitos Mais Comuns - Carbonetos

- Como será mostrado na figura a seguir, alguns elementos de liga modificam as temperaturas dos eutéticos estável e metaestável, com isso, promovendo o aparecimento de Carbonetos.
- Os Carbonetos de Fe, são os mais comuns e podem ser decompostos com tratamento térmico, não possuindo elementos de liga (Fe₃C).

Fundição Ícaro Ltda

78

Defeitos Mais Comuns - Carbonetos



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

Fundição Ícaro Ltda

79

Defeitos Mais Comuns - Carbonetos

- Os carbonetos de Cr, V, etc; São extremamente estáveis, e aparecem a altas temperaturas, portanto, para decompor estes carbonetos seria necessário uma temperatura maior que a própria temperatura de fusão do ferro nodular

Fundição Ícaro Ltda

80

Defeitos Mais Comuns – Coquilhamento Direto

- O coquilhamento direto, pode ocorrer devido a alguma, ou algumas condições a seguir:
 - Peça com seção fina e/ou cantos vivos
 - Concentração de elementos formadores de carbonetos acima do recomendado (Mn, Cr, V, Mo, W, Ti, Nb)
 - Inoculação Ineficiente
 - Alta velocidade de esfriamento

Fundição Ícaro Ltda

81

Defeitos Mais Comuns – Coquilhamento Direto

- Baixa temperatura de vazamento e/ou alta extração de temperatura pelo molde
- Alto teor residual de elementos nadularizantes (Mg acima de 0,06% ou Ce acima de 0,05%)

Fundição Ícaro Ltda

82

Defeitos Mais Comuns – Coquilhamento Inverso

- Ocorre em peças espessas, e possui forma cilíndrica, ou esférica no centro térmico da peça. As peças em nodulares ligados são mais sensíveis a este tipo de defeito.
- Pode ser causado por:
 - Alta concentração de Ti, Mn, Cr, Mg.

Fundição Ícaro Ltda

83

Defeitos Mais Comuns – Coquilhamento Inverso

- Pode ser evitado da seguinte maneira:
 - Evitar altos teores de Mg
 - Alterar se possível, a geometria da peça
 - Inoculação e esfriamento rápido podem minimizar a ocorrência deste defeito.

Fundição Ícaro Ltda

84

Defeitos Mais Comuns – Flotação de Grafita

- A flotação de grafita ocorre nos ferros fundidos nodulares porque a grafita é menos densa que o ferro. Nos ferros fundidos cinzentos, onde o crescimento é cooperativo, a grafita fica presa a austenita, enquanto que no ferro fundido nodular, como a grafita cresce separada da austenita (Crescimento divorciado) ela consegue boiar para a superfície do molde.

Fundição Ícaro Ltda

85

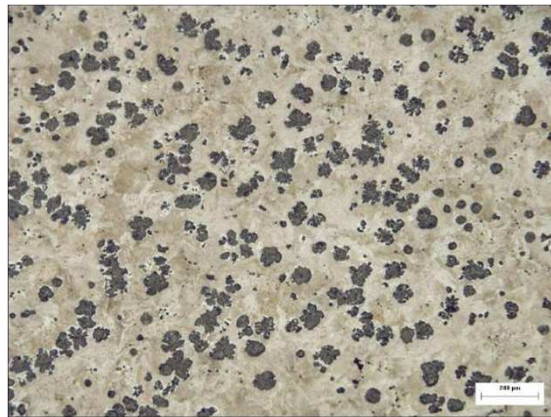
Defeitos Mais Comuns – Flotação de Grafita



Fundição Ícaro Ltda

86

Defeitos Mais Comuns – Flotação de Grafita



Fundição Ícaro Ltda

87

Defeitos Mais Comuns – Flotação de Grafita

- Ocorre em peças grossas
- Ocorre com C.E. alto (acima de 4,5%)
- Ocorre quando a velocidade de solidificação é lenta.
- A peça quebrada apresenta fratura escura na região flotada (Alta concentração de C livre)
- A metalografia pode apresentar grafita explodida.

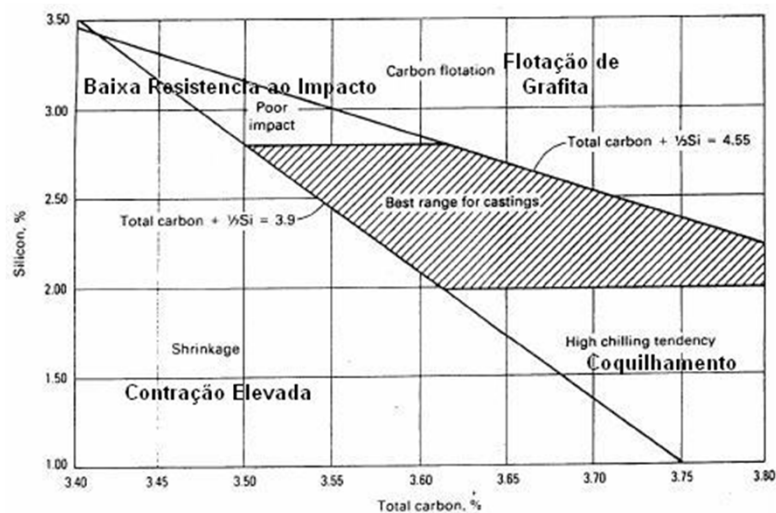
Fundição Ícaro Ltda

88

Defeitos Mais Comuns – Flotação de Grafita

- Para prevenir a flotação de grafita:
 - Diminuir o teor de C.E.
 - Aumentar a velocidade de solidificação.

Diagrama de Henderson



Obtenção de matriz Ferrítica ou Perlítica

Fundição Ícaro Ltda

91

- No Ferro Fundido Cinzento, as propriedades físicas e mecânicas são definidas predominantemente pela forma da grafita, já que se deseja que a matriz seja sempre perlítica.
- No Ferro Fundido Nodular, as propriedades físicas e mecânicas são definidas predominantemente pela matriz, já que se deseja que a grafita seja sempre esférica.

92

Ferrita

- Confere aos ferros fundidos menor LR;
- Dureza entre 70 e 150 Brinell - depende da %Si;
- Facilita usinagem.

Obtenção de Matriz Ferrítica

- Para obtenção de matriz ferrítica (predominante) deve se manter os elementos de liga em valores baixos, como %Mn < 0,20, %Sn residual, %Cu residual, %Ni Residual, etc.

Para que a matriz seja ferrítica, se deve dar condições para que todo o carbono que está na austenita possa migrar até a grafita.

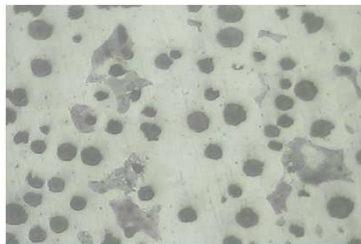
Obtenção de Matriz Ferrítica

- Para que isso ocorra:
 - A peça não pode ser muito fina, porque a velocidade de resfriamento será muito alta.
 - A peça não pode ser desmoldada prematuramente, pois não haverá tempo para que o carbono migre para a grafita.
 - A quantidade de nódulos deve ser alta, pois quanto mais nódulos por mm², mais fácil será para o carbono encontrar uma grafita.

Fundição Ícaro Ltda

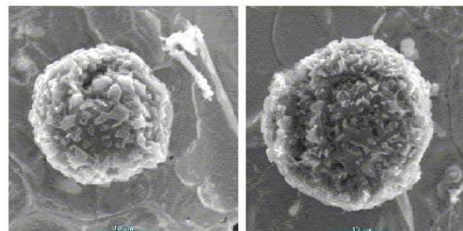
95

Obtenção de Matriz Ferrítica



← Nodular com matriz predominante de ferrita

Grafita com depósitos de carbono na superfície →



Fundição Ícaro Ltda

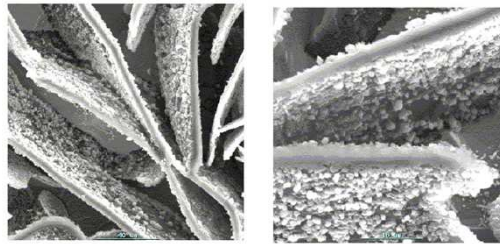
96

Obtenção de Matriz Ferrítica



← Metalografia com ataque Nital 3%

Grafita vista no MEV →

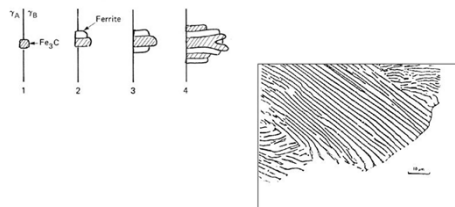


Fundição Ícaro Ltda

97

Perlita

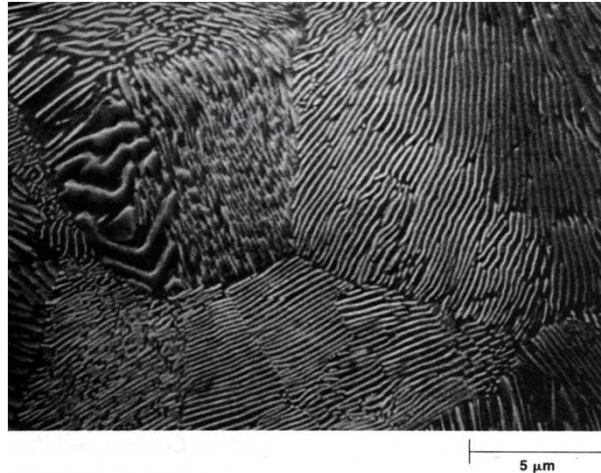
- responsável pela resistência mecânica;
- é formada de lamelas alternadas de ferrita e cementita;
- dureza e resistência mecânica variam com o espaçamento interlamelar: 170 a 330 Brinell.



Fundição Ícaro Ltda

98

Perlita



Fundição Ícaro Ltda

99

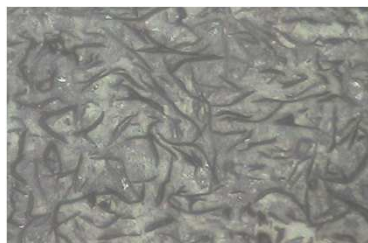
Obtenção de Matriz Perlítica

- Para obter matriz perlítica (predominante), devemos usar alguns elementos de liga, dependendo das propriedades desejadas.
- Alguns elementos dificultam um posterior tratamento de ferritização, como no caso do Sn. Se isso for uma propriedade determinante, deve ser usado o Cu. Ou se ocorrer o contrário, e a peça deva ser resistente ao tratamento, se deve optar pelo Sn.

Fundição Ícaro Ltda

100

Obtenção de Matriz Perlítica



← Ferro Fundido Cinzento com Matriz predominante de perlita

Grafita em Contato com a Perlita →

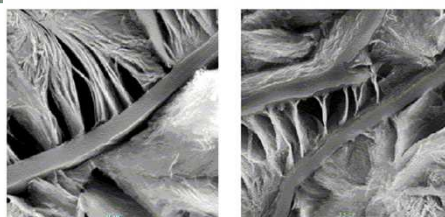
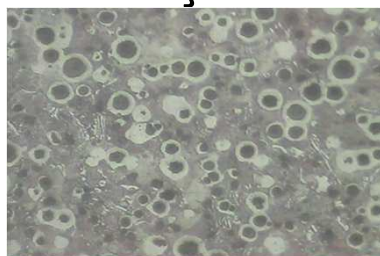


Figure 10. Microstructures of series IA showing direct contact between cementite and graphite flakes. Deep etched with 10% Nital. SEM.

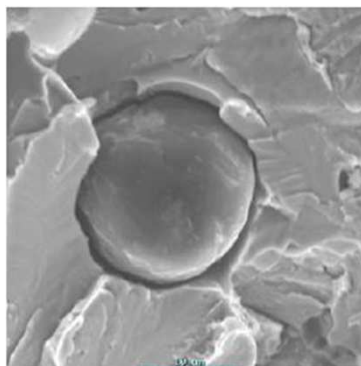
Fundição Ícaro Ltda

101

Obtenção de Matriz Perlítica



Grafita lisa, próxima a perlita →



Fundição Ícaro Ltda

102

Obtenção de Matriz Perlítica

- Pode se obter matriz perlítica, e endurecimento das peças, promovendo um resfriamento rápido. Porém, isso não deve ser utilizado uma vez que provoca muitas tensões nos contornos de grãos e pode causar a perda das propriedades dimensionais de peças até mesmo após usinadas.

Efeito dos elementos de liga

- Cr e Si – Alteram o número de nódulos de grafita
- Ti – Altera a forma da grafita
- Mn, Cr e Si – Altera o intervalo de temperatura entre o eutético estável e metaestável.
- Si, Ni e Mo – Endurecimento por solução sólida
- Cu, Mn, Sn – Promoção de perlita
- Si – Promoção de ferrita
- Nb, Ti, V e P – Formação de partículas duras
- Mn, P, Ti, V, Nb, Cr, Mo – Segregação para os contornos das células eutéticas

Efeito dos elementos de liga

- Mn, Cu, Mo e Ni – Aumento da Temperabilidade

Efeito dos elementos de liga

- Cu (até 1,0%): Tem ação grafitizante, age como perlitizante.
- Mg (0,02 a 0,07%): Promove formação de grafita nodular, e diminui os teores de enxofre e oxigênio.
- Mo (Até 0,7%): Leve tendência a formar carbonetos, promove obtenção de perlita fina, segrega para os contornos de grão, aumenta temperabilidade. Muito utilizado em peças com exigências térmicas.

Efeito dos elementos de liga

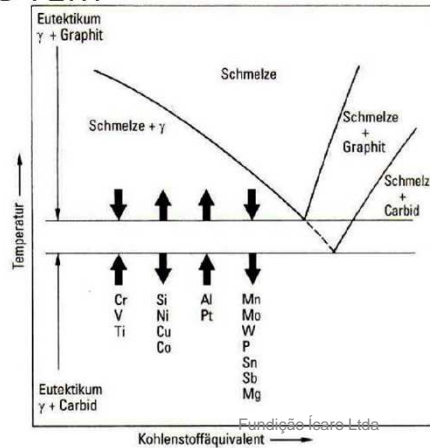
- Nb (Até 0,15%): Perlitizante, promove formação de carbonetos distribuídos na matriz.
- W: Antigrafitizante e estabilizador da ferrita.
- V: Forma carbonetos muito estáveis (até 2,5x mais poderoso que o Cr), tende a refinar a perlita e promovê-la, favorece as propriedades em temperaturas elevadas.

Efeito dos elementos de liga

- Sn: Estabiliza matriz perlítica, torna grafita mais esferoidal, em grandes quantidades fragiliza por segregar para o contorno de grão (Acima de 0,1%) Difícil tratar para ferritizar, pois é um estabilizador da perlita.

Efeito dos elementos de liga

- Esta figura mostra o efeito dos elementos nas TEE e TEM



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

109

Efeito dos Elementos - Carbono

- Carbono (3,30 a 3,90%): Teores crescentes aumentam a fluidez, a quantidade de grafita, a porcentagem de ferrita, e a tendência a flutuação de grafita, diminuindo a tendência ao coquilhamento e as propriedades mecânicas de resistência. Em ligas ferríticas reduz a dureza, resistência a tração e alongamento.

Fundação Ícaro Ltda

110

Efeito dos Elementos - Silício

- É um forte desoxidante e endurece a ferrita por solução sólida. Para um mesmo C.E., teores crescentes de Si aumentam o limite de resistência, enquanto que o aumento do C.E. devido ao aumento do Si, provoca a diminuição do limite de resistência se o carbono for mantido constante.
- A diminuição da resistência ao impacto, também é atribuído ao Si

Efeito dos Elementos - Manganês

- O manganês age como neutralizador do enxofre, evitando a formação de sulfeto de ferro. O Manganês que não é utilizado na neutralização do enxofre, contribui para a formação de carbonetos eutéticos, sendo um perlitizante.
- Dos elementos perlitizantes, é o que menos afeta a resistência ao impacto, sendo o de menor custo.

Controle de Nodularização

Fundição Ícaro Ltda

113

Controle de nodularização

- É um controle simples
- O controle de nodularização deve ser feito em 100% das reações.
- Através de um corpo de prova coletado no vazamento, é feita uma metalografia e verificado apenas se os nódulos estão esféricos.
- Não serve para análise de matriz ferrítica/perlítica

Fundição Ícaro Ltda

114

Controle de nodularização

- O corpo de prova deve ser coletado do ferro do ultimo molde, da ultima panela de vazamento que recebeu o ferro da panela de reação.

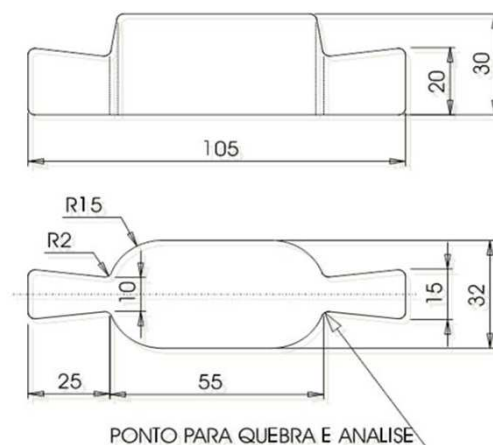
Isso garantirá que será analisada a pior condição em relação ao teor de Mg contido no ferro.

Pois como vimos, o Mg se perde com o passar do tempo. Este tempo depende da temperatura e teor inicial de Mg.

Fundição Ícaro Ltda

115

Corpo de prova para analise de nodularização



Tolerancias - ± 2
 Ra os não cotados = 3
 Dimensões em milímetros

Fundição Ícaro Ltda

116

Corpo de prova para análise de nodularização

- Por norma, o corpo de prova de nodularização deve ser feito em areia shell.
- Deve estar isento de qualquer umidade, óleo ou resíduos.
- Preferencialmente, guardado em pequena estufa.

Obtenção de Ferro Fundido Nodular Prática

Sequência de Nodularização na prática

- Primeiro, o panelão deve estar aquecido.

- Note que no fundo se pode ver o buraco onde a liga FeSiMg é colocada



Fundição Ícaro Ltda

119

Sequência de Nodularização na prática

Materiais utilizados neste processo de nodularização:

- “Liga IV” Liga de FeSiMg, contendo no mínimo 5% de Mg. Com granulometria de 2 a 6mm.
- Sucata de aço, pequena.

Obs.: Tudo deve estar seco e isento de oxidação.



Fundição Ícaro Ltda

120

Sequência de Nodularização na prática

- Depois, a liga é colocada no fundo do panelão. Aqui, foi adicionado 3,8Kg de FeSiMg, para uma nodularização de 350Kg de Fe

- Da mesma maneira, depois é colocado a cobertura da liga, que nesse caso é sucata de aço.



Fundição Ícaro Ltda

Sequência de Nodularização na prática

- Agora o panelão está pronto para receber o Fe líquido.



Fundição Ícaro Ltda

122

Sequência de Nodularização na prática

- Se inicia o enchimento do panelão.



Fundição Ícaro Ltda

123

Sequência de Nodularização na prática

Problemas que podem ocorrer agora

- Se for colocado pouca sucata de cobertura, a reação pode acontecer muito cedo, podendo causar baixa nodularização.
- Se for colocado muita sucata de aço, a reação pode não acontecer, pois o Fe líquido não conseguirá derrete-la.

Fundição Ícaro Ltda

124

Sequência de Nodularização na prática

Problemas que podem ocorrer agora

Caso a reação não aconteça, se deve tomar as seguintes providências:

- Com uma lança de aço maciço, perfurar a cobertura de aço; ou
- Devolver o ferro ao forno, reaquecer e devolver ao panelão.

Obs: Os dois casos representam risco de queimaduras e deve ser feito com muito cuidado devido as possíveis “explosões” de Ferro para fora do panelão de reação.

Fundição Ícaro Ltda

125

Sequência de Nodularização na prática

- Apenas depois do panelão estar com a quantidade de Fe Líquido desejado é que a reação deve iniciar.



Fundição Ícaro Ltda

126

Sequência de Nodularização na prática

- A reação chega a um momento de maior atividade:



Fundição Ícaro Ltda

Sequência de Nodularização na prática

- Depois da reação, o ferro estará com escória na superfície.

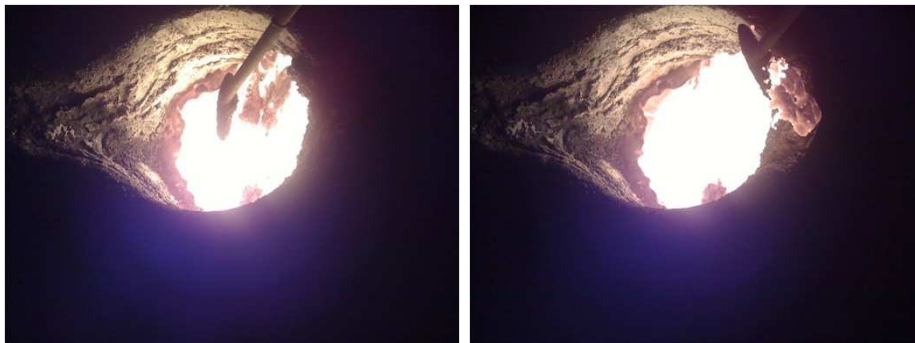


Fundição Ícaro Ltda

128

Sequência de Nodularização na prática

- A escória deve ser retirada, de maneira rápida, pois há pouco tempo para o vazamento.



Fundição Ícaro Ltda

129

Sequência de Nodularização na prática

- Se pode então fazer a transferência e inoculação do ferro para as panelas de vazamento.



Fundição Ícaro Ltda

130

Sequência de Nodularização na prática

- Depois, é feito o vazamento, onde o Fe deve estar no molde antes que o Mg atinja um nível inferior a 0,03%.

Obs: O tempo varia conforme % de S e O, e temperatura de vazamento.



Fundição Ícaro Ltda

131

Sequência de Nodularização na prática

- No último molde, da última panela desta reação, é retirado um corpo de prova para análise metalográfica de nodularização.

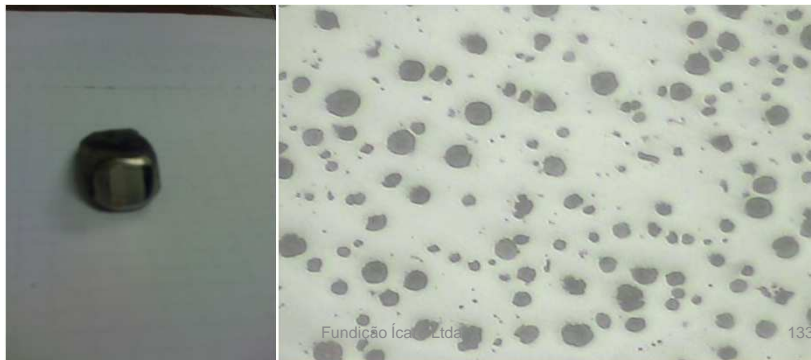


Fundição Ícaro Ltda

132

Sequência de Nodularização na prática

- O corpo de prova deve ser quebrado e polido para análise metalográfica.



Sequência de Nodularização na prática

- O corpo de prova serve apenas para verificar se a nodularização ocorreu. Não reflete necessariamente a condição da peça, tendo em vista que o corpo de prova esfriou rapidamente e possui dimensões diferentes da peça.
- Não serve para análise de matriz.

Sequência de Nodularização na prática

- Pode ser retida também no último molde da última panela, uma amostra para análise em espectrômetro, onde se pode verificar o teor de Mg na pior condição de vazamento (último molde)

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