



## ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DO TEMPO E TEMPERATURA NA PERDA DO MAGNÉSIO EM FERRO FUNDIDO NODULAR

**Jonas Renato Dias**

**Amir Rivaroli Junior**

**Marcelo Bergamini de Carvalho**

FATEC - Rod. Vereador Abel Fabrício Dias, 4010, Água Preta, Pindamonhangaba/SP

jonas-prea@hotmail.com.br

amir.rivaroli@fatec.sp.gov.br

marcelo.carvalho30@fatec.sp.gov.br

**Emerson Augusto Raymundo**

FATEC - Rod. Vereador Abel Fabrício Dias, 4010, Água Preta, Pindamonhangaba/SP

SENAI - Rua São Tomas, 01 - Jardim São José - Cruzeiro/SP

emersonaugustoray@gmail.com

**Resumo.** *O ferro fundido nodular, é um material que está sendo muito utilizado na indústria automotiva e cada vez se torna mais competitivo, com isso a importância de se ter processos mais robustos e mais capazes passa a ser uma necessidade no dia a dia. Neste trabalho foi estudada a importância da cobertura da superfície do metal na panela de fundição em relação a perdas de temperatura, bem como a influência do tempo e da temperatura na perda do magnésio e da nodulização. Pode-se verificar também que quanto melhor a cobertura da superfície do metal, menor a perda em função do tempo, isso aconteceu quando utilizado palha calcinada como cobertura da superfície ao invés de palha comum. No estudo da perda do magnésio pode-se concluir que ocorre de fato uma perda gradativa por vaporização bem como uma perda na nodulização, seja por temperaturas mais altas ou por tempos excessivos de espera entre vazamento e fundição.*

**Palavras chave:** *Ferro fundido, nodulização, perda de magnésio, temperatura.*

### 1. INTRODUÇÃO

O ferro fundido nodular é uma liga composta de, basicamente, carbono e silício, com o carbono (grafite) livre na matriz metálica, porém em forma esferoidal e passou a ser empregado industrialmente a partir da década de 70, ampliando o campo de aplicação dos ferros fundidos. Devido à combinação de propriedades como elevada tenacidade, resistência à tração, ductilidade, resistência ao desgaste e à fadiga, tornando-se um material de engenharia competitivo, combinando propriedades antes encontradas somente nos aços. (Santos, A.B. de S., Branco, C.H.C, 1991).

O processo de nodulização consiste na obtenção do ferro fundido com grafita na forma esferoidal, ou nodular. Este processo é conseguido graças ao efeito nodulizante de alguns elementos como o magnésio, cálcio, cério e outros do grupo das terras raras. A inoculação é um tratamento realizado no metal líquido, visando adicionar ao metal partículas termodinamicamente favoráveis à fase que se quer nuclear, no caso a grafita, diminuindo o super-resfriamento para a solidificação.

Skaland (2005), demonstrou que essas adições promovem reações entre os elementos químicos presentes nos inoculantes (silício, cálcio, alumínio, zircônio, bário, terras raras, estrôncio, entre outros) com o oxigênio e/ou enxofre dissolvidos no metal líquido, formando substratos efetivos para a nucleação. A nucleação da grafita é uma etapa bastante complexa, uma vez que muitas são as variáveis que interferem nesse processo. O tempo de atuação do inoculante é conhecido como Fading, que tem como importância controlar o tempo decorrido entre a inoculação e o início de solidificação. No processo de produção do ferro fundido nodular os processos de nodulização e inoculação são etapas críticas e determinantes na obtenção da qualidade final objetivada no produto, portanto, um aprimoramento destes controles pode resultar em aumento de qualidade e diminuição do custo fabril dos mesmos.

### 2. MATERIAS E MÉTODOS

Os estudos foram realizados em uma empresa de fundição de ferro fundido, utilizando uma panela de fundição revestida com tijolo refratário e com capacidade de 3200 Kg de metal. Para cobertura do metal evitando a perda térmica foram utilizados 7 Kg de palha de arroz comum e 7 Kg de palha de arroz calcinada. As temperaturas foram determinadas por meio de sensores descartáveis para metal líquido "Termotip" a uma profundidade de 300mm no metal líquido. As amostras foram preparadas no laboratório de metalografia da Fatec de Pindamonhangaba, para revelar as fases foi utilizado o reagente nital 2%. Após cada ataque por imersão durante 15 segundos nesta solução, efetuou-se um repolimento com solução aquosa 1:10 de alumina 0,25 micron. As imagens microscópicas para as análises foram

Jonas Renato Dias; Amir Rivaroli Junior; Marcelo Bergamini de Carvalho; Emerson Augusto Raymundo. Análise da Influência do Tempo e Temperatura na Perda do Magnésio em Ferro Fundido Nodular obtidas por meio do microscópio óptico, marca Olympus, modelo BX51M.

As análises da composição química foram feitas na empresa de fundição de ferro fundido, em um espectrômetro de emissão ótica ARL (Applied Reserach Laboratories) modelo 3460. Para análise do carbono e enxofre, foi utilizado um equipamento da marca Leco, modelo CS 230. Foram analisadas as perdas térmicas em 03 amostras de ferro fundido nodular especial ao longo do tempo em uma panela de fundição com capacidade de 3200 Kg de metal revestida com tijolo refratário. Duas destas três amostras foi trabalhada a influência da adição de palha de arroz comum e casca de arroz calcinada na superfície do metal verificar as eventuais perdas térmicas.

Na primeira amostra com ferro fundido nodular especial do tipo ligado, foi trabalhado 3000 Kg de metal, a uma temperatura de vazamento no forno de 1570°C. Após esta etapa o metal foi nodulizado para obtenção de ferro fundido nodular e inoculado com ferro silício 75%. Neste teste não foi adicionado nenhum tipo de material como cobertura, ficando o metal dentro da panela com a superfície superior exposta ao ar. Para essa análise da perda térmica foram medidas quinze temperaturas em um tempo de quarenta e dois minutos. Na segunda amostra, também com ferro fundido nodular especial do tipo ligado, foi utilizado 2800 Kg de metal com uma temperatura de vazamento no forno de 1593°C, após esta etapa o metal foi também nodulizado e inoculado com ferro silício 75%. Após este processo, o metal da panela foi coberto com 7 Kg de palha de arroz comum. Para análise da perda térmica foram medidas quatorze temperaturas em um tempo de trinta e nove minutos. Na terceira amostra com ferro fundido normal foi utilizado 2500 kg de metal com uma temperatura de vazamento no forno de 1592°C. Após esta etapa o metal foi nodulizado e inoculado nas mesmas condições das duas anteriores, neste caso, o metal da panela foi coberto com 7 kg de casca de arroz calcinada. Para análise de perda térmica foram medidas treze temperaturas em quarenta e oito minutos.

Para estudo da perda da nodulização (magnésio) em função do tempo e temperatura foram utilizados dois tipos de ferro fundido nodular, um ferro fundido comum e um ferro fundido ligado. Foram retiradas amostras dos metais líquidos ao longo do tempo e verificado a microestrutura para se verificar a perda do magnésio por vaporização. Foi analisada também a composição química para se verificar o comportamento do magnésio em função do tempo de exposição da superfície. Para o ferro fundido comum foram retiradas duas amostras após nodulização e inoculação, sendo a primeira na temperatura de 1459°C e a outra depois de dezessete minutos na temperatura de 1379°C, já para o ferro fundido ligado foram retiradas duas amostras após nodulização e inoculação, sendo a primeira na temperatura de 1438°C e a outra depois de quinze minutos na temperatura de 1351°C. Em ambos os casos foram verificados a composição química inicial e final para checar a perda do magnésio por vaporização.

Para as análises da perda da nodulização (magnésio) em função apenas do tempo foi utilizado o ferro fundido comum. Neste caso foram retiradas quatro amostras após nodulização e inoculação em tempos diferentes, sendo intervalo entre a primeira e a última amostra de trinta e três minutos. Neste teste também foram realizados em todas as amostras análise química para se verificar a perda ao longo do tempo do magnésio por vaporização.

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Foram analisados os valores das temperaturas ao longo do tempo nas 03 amostras de ferro fundido, em função dos mesmos estarem com e sem cobertura na superfície quando adicionados na panela após nodulização e inoculação.

Por meio da imagem da “Fig. 1” pode ser visualizado os resultados das perdas térmicas da amostra 01. Neste caso, descrevem os valores encontrados de temperatura ao longo do tempo na panela sem cobertura.

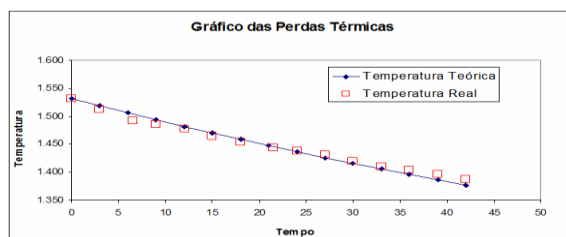


Figura 1. Gráfico das perdas térmicas do ferro fundido ligado apenas em contato com a superfície

Após o cálculo das perdas de temperatura e análise do gráfico em função do tempo, pode-se observar uma perda média 3,4°C/min do metal na panela sem cobertura, ou seja, onde a superfície do metal está totalmente exposta para atmosfera. O gráfico da “Fig. 2” mostra os resultados de perdas térmicas da amostra 02, descrevem os valores encontrados de temperatura ao longo do tempo na panela com cobertura de fardos de palha normal.

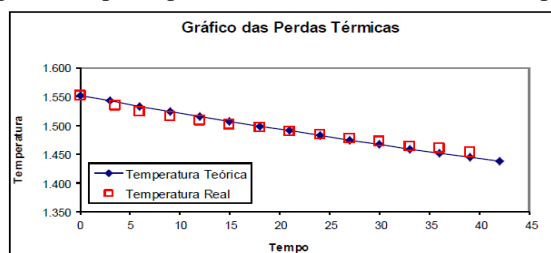


Figura 2. Gráfico das perdas térmicas do ferro fundido ligado coberto com fardos de palha normal.

Com a finalizações das medições, realizou-se o cálculo das perdas de temperatura e análise do gráfico em função do tempo, observou uma perda média de 2,5°C/min do metal na panela com a cobertura palha de arroz, resultado melhor

que o da panela sem cobertura, mas não expressivo. O gráfico da “Fig. 3” representa os resultados de perdas térmicas da amostra 03, nesta relação descreve os valores encontrados de temperatura ao longo do tempo na panela com cobertura de 7 kg de casca de arroz calcinada.

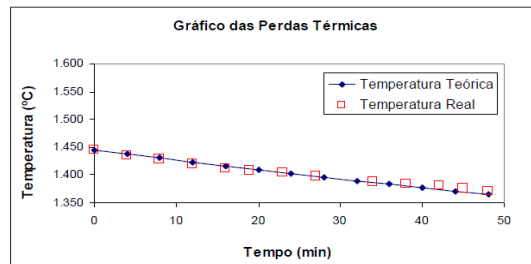


Figura 3. Gráfico das perdas térmicas do ferro fundido normal coberto com casca de arroz calcinada

Por meio dos cálculos das perdas de temperatura e análise do gráfico em função do tempo, pode observar uma perda média 1,5°C/min do metal na panela com cobertura de palha calcinada, melhor resultado apresentado, ou seja, foi o que apresentou menor perda de temperatura, isto possivelmente se deve ao fato de uma cobertura total, evitando uma troca de calor muito rápida da superfície exposta com a atmosfera. Para melhor visualização dos resultados das 03 amostras de perdas térmicas na superfície, sem cobertura, com cobertura de palha de arroz e com cobertura de palha calcinada, foi proposto um gráfico plotado com os 03 resultados juntos. Portanto, a imagem do gráfico da “fig. 4” representa as três curvas de perdas das amostras.

Apesar da temperatura inicial ter sido menor para amostra 03, percebe-se pela inclinação da curva que ocorreu uma menor queda com a adição de palha calcinada, apesar da taxa de resfriamento da amostra 02 ser menor que a amostra 01 a inclinação da curva foi mais acentuada perante as outras duas amostras. Uma outra observação foi o range entre as medidas a amostra 01 apresentou-se quase que constante as diferenças entre as medidas, já a amostra 03 principalmente variou mais perante as outras mostrando que as coberturas não se apresentam de forma uniforme com relação a sua distribuição e espessura. Uma forma de explicar esse fenômeno seria que quando o material se encontra no estado líquido por conta da energia fornecida o sistema passa estar em turbulenta troca de calor por conta dinâmica da convecção isto pode fazer com a cobertura se movimente e mudasse o range das medidas efetuadas nas amostras com coberturas.

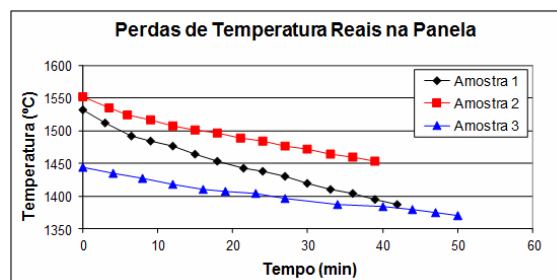


Figura 4. Comparação entre perdas na temperatura reais na panela.

No entanto, com a adição da palha calcinada se apresentou melhor com relação a proteção da superfície do metal contra a retirada de calor pela atmosfera. Foi importante para se verificar qual tipo de material pode ser adicionado durante a fundição de peças quando se precisa de maior tempo de exposição do metal na panela antes da projeção no molde. Com relação a perda da nodulização em função do tempo e da temperatura a composição química evidenciando o valor de magnésio são mostrados por meio das tabelas 1, 2 e 3 e as microestruturas correspondentes de cada etapa do processo são representadas pelas imagens das “Fig. 5 e 6”. A Tabela 1 apresenta duas amostras do ferro fundido comum onde foram retiradas duas amostras (A1 e A2) após nodulização e inoculação, onde A1 foi obtida após nodulização e inoculação a temperatura de 1459 °C, já a amostra A2 após fundição a temperatura de 1379 °C, com intervalo de 17 min da amostra A1.

Tabela 1- composição química das amostras A1 e A2.

Amostras	Elementos de liga %							
	C	Si	Mn	P	Cr	S	Ni	Mg
A1	3,37	1,96	0,35	0,049	0,1	0,005	0,91	0,066
A2	3,37	1,94	0,36	0,048	0,1	0,006	0,92	0,063

Como pode se observar na “Tab. 1” anterior houve uma levíssima perda de magnésio com relação ao tempo de exposição da superfície, ou seja, não houve uma vaporização neste item e com relação a análise microestrutural não se percebeu visualmente diferenças significativas que possa interferir nas propriedades mecânicas do material. As imagens a seguir como mencionado anteriormente representam as microestruturas das amostras A1 e A2. Como já descrito no item materiais e métodos, uma das imagens representa a amostra sem ataque, ou seja, polida. O objetivo neste caso foi para verificar as características morfológicas da grafita, conseqüentemente as outras imagens representam as amostras atacadas com nital 2% para discussão das fases presentes.

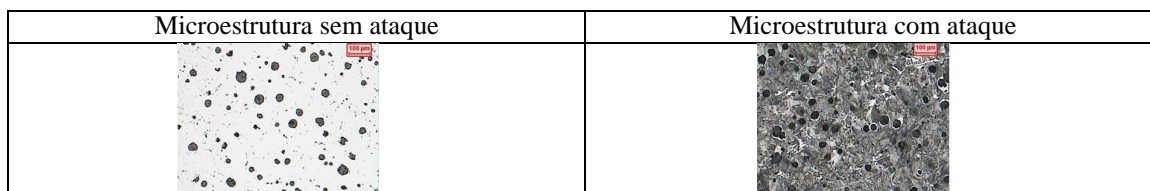


Figura 5. Imagens da microestrutura polida e com ataque da amostra A1

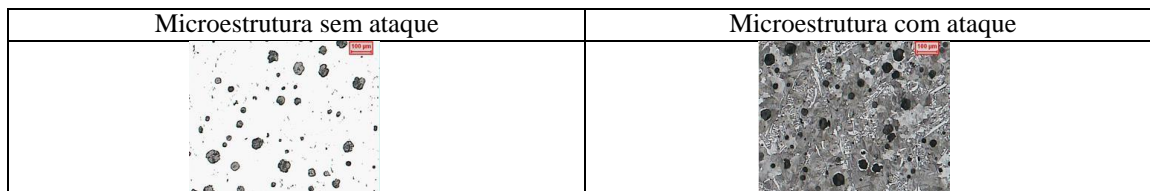


Figura 6. microestrutura polida e com ataque da amostra A2.

Com relação as fases reveladas, a imagem do ferro fundido comum apresenta um ferro fundido cinzento nodular em matriz perlítica (áreas mais escuras) com regiões mais clara de ferrita, isto pode ser evidenciado com mais clareza na última imagem da figura 6, pode ser visualizados também em torno dos nódulos austenita típico do processo de globularização e ainda aspectos dendríticos e widmstättten da austenita. Segundo a classificação pela norma ASTM A247, as grafitas apresentadas assemelham-se ao tipo IV. Por meio dessa análise, pode revelar uma dureza elevada, alta resistência mecânica ao desgaste e menor tenacidade.

Para as amostras de ferro fundido ligado foram obtidas duas amostras (B1 e B2) após nodulização e inoculação. A amostra B1 representa a nodulização e inoculação à temperatura de 1438 °C, a amostra B2 foi obtida após fundição à temperatura de 1351 °C. (intervalo de 15 min da amostra B1). A Tabela 2 descreve a composição química das amostras B1 e B2.

Tabela 2. composição química da amostra B1 e B2.

Amostras	Elementos de liga %							
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mg
B1	3,34	2,12	0,67	0,046	0,006	0,40	1,72	0,081
B2	3,34	2,08	0,67	0,047	0,007	0,41	1,73	0,064

As microestruturas das amostras B1 e B2 são mostradas por meio das imagens das Fig. 7 e 8 e seguindo o mesmo padrão de análise com e sem ataque.

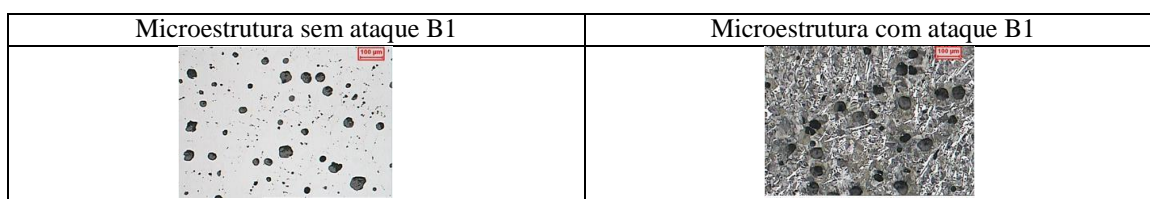


Figura 7. Amostra de microestrutura B1 sem ataque e com ataque de nital 2%

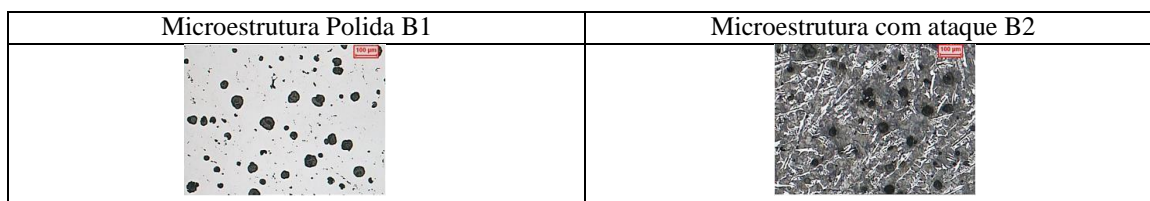


Figura 8. Amostra de microestrutura B2 sem ataque e com ataque de nital 2%.

Nesse ferro fundido ligado a queda de magnésio feita pela análise química indicou uma perda ainda maior em comparação com o ferro fundido comum, e assim como na experiência anterior os nódulos praticamente se mantiveram constante. Com a perda do magnésio, se esperava a diminuição do tamanho do glóbulo de grafita e da quantidade principalmente e visualmente isto não ocorreu talvez pelo fato de se ter o dobro de silício perante o ferro fundido comum e também com a maior concentração de níquel.

O silício é grafitizante e o níquel gamagênico acima de 5%, neste caso este elemento ampliaria o campo da austenita, porém na concentração apresentada ele diminui o efeito do coquilhamento assim pode ajudar a aglomerar de forma média o grafite. Um outro fator a ser analisado perante ao ferro fundido ligado é a perda mais acentuada do magnésio, esse fator pode estar associado ao tempo de exposição da superfície, ocorrendo talvez uma maior

vaporização sendo também mais efetiva quanto maior for o seu teor. Sempre se deve ficar atento em relação a esse elemento durante a fundição de ferro fundido nodular, pois sem ele não ocorre a nodulização do ferro fundido.

Com relação as análises propostas para as quatro amostras de ferro fundido comum, relacionado as perdas da Nodulização (magnésio) em função apenas do tempo, a “tab. 3” representa suas composições química e as imagens das “fig. 9 a 12” descrevem as microestruturas das amostras retiradas.

Tabela 3. Composição química da amostra C1 a C4.

Amostras	Elementos%							
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mg
C 1	3,30	1,94	0,53	0,048	0,004	0,08	1,08	0,065
C 2	3,32	2,00	0,55	0,051	0,006	0,09	1,08	0,069
C 3	3,32	1,99	0,53	0,051	0,006	0,08	1,08	0,057
C 4	3,35	1,99	0,53	0,047	0,005	0,08	1,09	0,059

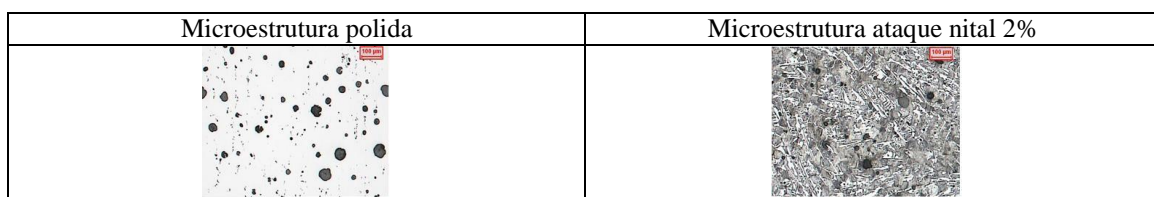


Figura 9. Amostra de microestrutura C1 polida e com ataque de nital 2%.

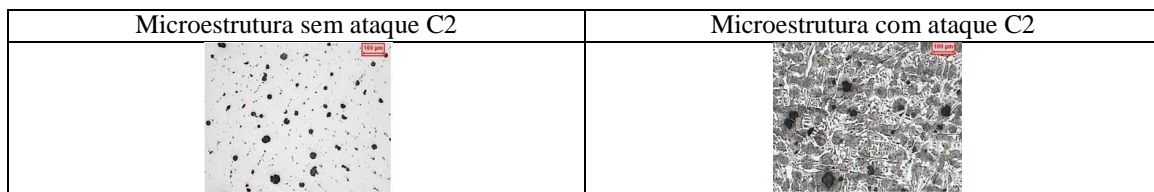


Figura 10. Amostra de microestrutura C2 polida e com ataque de nital 2%.

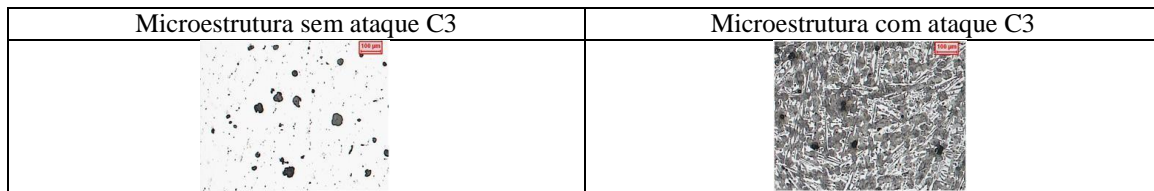


Figura 11. Amostra de microestrutura C3 sem ataque e com ataque de nital 2%.

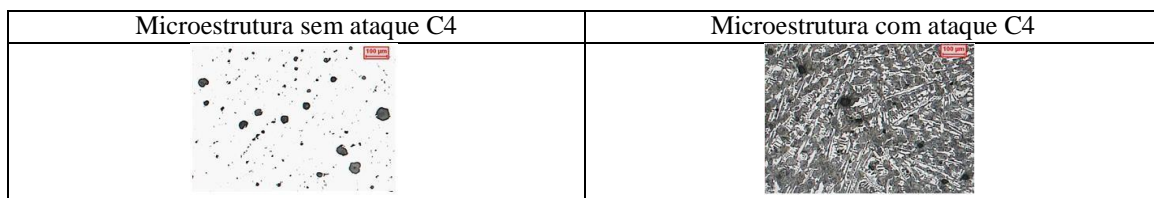


Figura 12. Amostra de microestrutura C4 polida e com ataque de nital 2%.

Nessa experiência com ferro fundido comum percebeu-se que ocorreu uma perda do magnésio ao longo do tempo por vaporização, conforme demonstrado na tabela 3 de composição química com pequenas variações. A variação dos valores do magnésio dá-se devido esse elemento ser muito instável e devido poder haver uma concentração do teor de magnésio na superfície do banho. Pode ser destacado também neste evento proposto as características microestruturais resultantes, ou seja, além da matriz perlítica percebeu-se visualmente que se aumentou a quantidade de ripas de austenita widmanstätten e também frações de ledeburita.

#### 4. CONCLUSÃO

Pode-se afirmar após a realização dos testes que tanto a temperatura bem como o tempo de espera favoreceu a perda do magnésio, com conseqüente diminuição do número de nódulos. Após estas análises pode-se reafirmar a importância do controle dessas variáveis na qualidade e propriedades mecânicas desses materiais.

Contudo, após as experiências analisadas com o ferro fundido nodular pode-se chegar em algumas considerações.

Jonas Renato Dias; Amir Rivaroli Junior; Marcelo Bergamini de Carvalho; Emerson Augusto Raymundo.

Análise da Influência do Tempo e Temperatura na Perda do Magnésio em Ferro Fundido Nodular

Com relação ao proposto de utilizar a cobertura da superfície do metal dentro da panela, foi importante para se garantir a temperatura do material antes da fundição. A escolha do material ideal para cobertura da superfície teve influência direta na perda de temperatura por exposição na atmosfera. O melhor resultado apresentado foi a palha calcinada, com a menor perda de temperatura, sendo uma cobertura mais eficiente, evitando maior troca de calor da superfície exposta perante a atmosfera.

Em relação a perda do magnésio por temperatura e tempo de espera entre vazamento e fundição, não houve um resultado representativo quando comparado à perda do magnésio somente por temperatura de vazamento, neste caso, com devida observação, poderia ter sido adotado temperatura mais elevada para se verificar a diferença. Percebeu-se que quanto maior o resultado inicial, maior é a perda ao longo do tempo.

Com todos os resultados destas análises pode-se compreender melhor a importância de seguir a especificação de tempo e temperatura de cada material para se manter a composição química mais próxima do desejado.

Para ajudar o entendimento e discussões para trabalhos futuros, deverão acontecer a verificação da perda do magnésio, trabalhando-se com temperaturas mais elevadas de vazamento, avaliar as propriedades mecânicas em função das alterações das microestruturas e fazer do uso de um programa de processamento de imagens para ajudar a analisar os nódulos de forma estereológica, medir os contornos de grãos e analisar as fases. Além disto para avaliar as fases utilizar medidas de microdureza, medida de composição química por meio de EDS do microscópio eletrônico de varredura.

## 5. REFERÊNCIAS

Souza Santos, A.B. de, e Castello Branco, C.H.- Metalurgia dos Ferros Fundidos Cinzentos e Nodulares; São Paulo; IPT (1991);

American Society for Testing and Materials, A 247, Practice for evaluating the microstructure of graphite in gray cast iron, Philadelphia, 2006.

Elkem – Cast iron Inoculation, The technology of graphite shape control, Elkem A S Foundry Products, 04/2012.

Vicente Chiaverini – Aços e Ferros Fundidos, ABM – Associação Brasileira dos Metais, 8ª edição, 2012

Huerta, E / Popovski, V. – Study of hold time, fade effects and microstructure in ductile iron, proceeding of the AFS Cast Iron Inoculation Conference, Schaumburg, Illinois, 09/2005.

Skaland, T. Nucleation mechanisms in ductile iron, In: American Foundry Society Cast Iron Inoculation Conference, Illinois, September 29-30, Schaumburg IL, 2005, p.13-30.

## 6. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

Os autores são os únicos responsáveis pelas informações incluídas neste trabalho.

# Analysys of Time and Temperature Influence on the Loss of Magnesium Nodular Cast Iron

**Jonas Renato Dias**

**Amir Rivaroli Junior**

**Marcelo Bergamini de Carvalho**

FATEC - Rod. Vereador Abel Fabrício Dias, 4010, Água Preta, Pindamonhangaba/SP

jonas-prea@hotmail.com.br

amir.rivaroli@fatec.sp.gov.br

marcelo.carvalho30@fatec.sp.gov.br

**Emerson Augusto Raymundo**

FATEC - Rod. Vereador Abel Fabrício Dias, 4010, Água Preta, Pindamonhangaba/SP

SENAI - Rua São Tomas, 01 - Jardim São José - Cruzeiro/SP

emersonaugustoray@gmail.com

**Abstract.** Nodular cast iron is a material that is widely used in the automotive industry and is becoming more competitive, so the importance of having more robust and more capable processes becomes a necessity in everyday life. In this work the importance of covering the surface of the metal in the casting pan in relation to losses of temperature, as well as the influence of time and temperature on the loss of magnesium and nodulation was studied. It can also be verified that the better the surface coverage of the metal, the lower the loss as a function of time, this happened when using straw calcined as a surface cover instead of ordinary straw. In the study of the loss of magnesium, it can be concluded that there is in fact a gradual vaporization loss as well as a loss in nodulization, either by higher temperatures or by excessive wait times between casting and casting.

**Keywords:** Cast iron, nodulation, loss of magnesium, temperature

## RESPONSIBILITY NOTICE

The author(s) is (are) the only responsible for the printed material included in this paper.