

# AVALIAÇÃO DA ADIÇÃO PADRÃO DO INOCULANTE (FeSi T2) NA TRANSFERÊNCIA FORNO-PANELA NA PRODUÇÃO DE FERRO FUNDIDO NODULAR\*

Luciano Lobo de Almeida Baracho<sup>1</sup>  
Andersan dos Santos Paula<sup>2</sup>  
Meire Figueira Mendes<sup>3</sup>  
Saulo Brinco Diniz<sup>4</sup>

## Resumo

O presente trabalho teve como foco principal à análise do efeito da adição padrão da liga inoculante (FeSi T2) no tratamento do ferro fundido nodular fabricado pela BR Metals Fundições (Barra do Pirai / RJ, Brasil). Avaliando-se assim, com análises químicas, as pastilhas retiradas associadas aos corpos de prova em formato de cunha, e análise metalográfica destes últimos, o efeito do processo de inoculação padrão através da correlação de amostras inicialmente não inoculadas e após o tratamento de inoculação e nodularização. Foi possível observar efeitos da inoculação em função do tempo de fading, que diminui a quantidade de nódulos (nódulos/mm<sup>2</sup>). Tendo como base os dados na literatura de produção de ferro fundido, onde indica que o tempo de fading faz com que ocorra a diminuição nas partículas ativas para nucleação de grafita livre.

**Palavras-chave:** Ferro fundido nodular; Inoculação; Cunha; *Fading*.

## (FeSi T2) STANDARD INOCULANT ADDITION EVALUTION ON THE FURNACE-CASTING LADLE FOR DUCTILE CAST IRON PRODUCTION

### Abstract

This work focuses on the analysis of the effect of standard addition of inoculant alloy (FeSi T2) in the treatment of nodular cast iron manufactured by BR Metals (Barra do Pirai / RJ – Brazil). Evaluating with chemical analysis, pellets withdrawn associated to chill wedge test, and metallographic analysis, the effect of the standard inoculation process was related by not initially inoculated samples and after treatment of inoculation and noduling samples. It was observed effects of inoculating as a function of time from fading, which reduces the number of nodules (nodes/mm<sup>2</sup>). Based on the study on the production of cast iron literature, that indicates that the time of fading causes a decrease in the quantity of active particles for nucleation of free graphite.

**Keywords:** Ductile cast iron; Inoculation; Chill wedge test; *Fading*.

<sup>1</sup> Engenheiro Metalurgista da UFF, Volta Redonda, RJ, Brasil.

<sup>2</sup> Engenheira Metalurgista, D.Sc em Ciência dos Materiais, Professora Adjunta, SE-4/IME, Rio de Janeiro, RJ, Brasil; e orientadora credenciada do PPGEM/UFF, Volta Redonda, RJ, Brasil.

<sup>3</sup> Engenheira de Fundição, Chefe de Seção / Coordenadora da Metalurgia, Engenharia de Processos, BR Metals Fundições, Barra do Pirai, RJ, Brasil.

<sup>4</sup> Engenheiro Metalurgista, M.Sc. em Engenharia Metalúrgica, Doutorando em Ciência dos Materiais, SE-4/IME; e Técnico de Educação - Soldagem, CTS-Solda, Rio de Janeiro, RJ, Brasil. Contato:saulo\_brinco@hotmail.com

## 1 INTRODUÇÃO

No contexto atual, as indústrias de fundição, no geral, têm sofrido maiores pressões para aumento de produtividade, diminuição de refugo, especificações cada vez mais exigentes quanto aos níveis de sanidade interna e externa, bem como propriedades mecânicas mais rigorosas das peças. As exigências crescentes em relação à competitividade e a processos com menores variabilidades, vêm a abordar todos os controles necessários para que se tenha um processo controlado e cada vez mais preciso e exato, garantindo a manutenção de bons resultados.

Baseando-se na competitividade e na produção de fundidos de qualidade se vê a necessidade em avaliar o elemento primordial e característico do ferro fundido em análise (ferro fundido nodular). A grafita, quanto a sua forma, estabelece e direciona as aplicações desses ferros fundidos, deve-se então se criar condições favoráveis para que o carbono se precipite da forma mais estável, como carbono livre (grafita). Dentre muitas etapas do processo para a produção de ferros fundidos nodulares, duas etapas são de suma importância: a inoculação e a nodularização. A inoculação dos ferros fundidos é feita através da adição de pequenas quantidades de material composto de partículas nucleantes no metal fundido, pouco antes ou durante o vazamento deste, buscando controlar a microestrutura final e, conseqüentemente, as propriedades mecânicas do material. Nos ferros fundidos a inoculação é utilizada primeiramente para evitar a formação de carbonetos na estrutura.

O objetivo da inoculação é fornecer núcleos extras ao banho [1]. A existência de um número maior de núcleos potenciais para a nucleação e crescimento da grafita permite a obtenção de uma estrutura mais refinada, que resulta em melhores propriedades físicas e mecânicas. Em ferros fundidos nodulares, onde o número de núcleos é extremamente importante para as propriedades do material, a adição de inoculantes ao banho tem por objetivo promover um aumento do número de nódulos de grafita e do grau de nodularização, que é uma medida da adequação da grafita à forma de uma esfera perfeita.

Comparando-se um ferro fundido inoculado com outro não inoculado, diferenças na microestrutura são facilmente notadas, as quais afetam fortemente as propriedades mecânicas finais dos fundidos.

Os inoculantes mais comuns são baseados em ligas de ferro silício 75% contendo pequenas e definidas quantidades dos elementos químicos cálcio, bário, estrôncio, zircônio, terras raras e alumínio. Hoje é possível encontrar-se inoculantes com composições químicas variadas, porém a grande maioria é baseada no FeSi75%. Alguns inoculantes podem ser utilizados para inoculação em ferros fundidos cinzentos e nodulares. Isto ocorre devido ao fato dos elementos químicos cálcio, bário, estrôncio e zircônio serem fortes formadores de óxidos, sulfetos e silicatos em ambos os ferros fundidos [2].

Dessa forma o objetivo do presente trabalho (desenvolvido no âmbito do Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação de Baracho [3]) se concentrou em avaliar a adição padrão do inoculante (FeSi T2) na transferência do forno para a panela e o grau de nucleação dos banhos no forno e consecutivamente na panela de vazamento para a produção de peças de ferros fundidos nodulares. As análises foram conduzidas a partir da observação microestrutural de cunhas vazadas em molde de areia *cold box*, a fim de determinar o efeito da inoculação no grau de nucleação de grafita e de coquilhamento, verificando em cada uma das amostras em estudo: a composição em função da temperatura; e a microestrutura, com auxílio da microscopia óptica, em função da grafita (presença, classificação e quantificação).

## 2 MATERIAIS E MÉTODOS

O material em estudo está associado a um ferro fundido nodular com composição química segundo as normas internas da BR Metals (Barra do Piraí, RJ / Brasil) BRM-IE-0041/08 (antes da inoculação) e BRM-IE-0044/08 (após inoculação e nodularização), conforme apresentado nas Tabelas 1 e 2. O Ferro Silício Tipo 2 (FeSi T2) utilizado passou por um controle interno para inspeção de recebimento, o relatório de controle (Tabela 3) apresenta a análise do lote utilizado no presente trabalho.

**Tabela 1.** Composição química especificada para o FBN(A) – BRM-IE-0041/08.

Composição Química (% em peso)									
C	Si	Mn	S	Cr	Cu	P	Sn	Al	Fe
3,700	1,275	0,275	0,016	0,020	0,150	0,025	0,005	0,020	Restante

**Tabela 2.** Composição química especificada do material NF – BRM-IE-0044/08.

Composição Química (% em peso)									
C	Si	Mn	S	Cr	Cu	Mg	P	Sn	Al
3,600	2,100	0,225	0,009	0,020	0,150	0,040	0,025	0,005	0,015
Ti	Bi	B	Zn	Zr	Ce	V	Pb	Fe	
0,010	0,002	0,001	0,050	0,018	0,013	0,025	0,003	Restante	

**Tabela 3.** Relatório de controle do lote de FeSi T2 utilizado.

Relatório de Controle		
Material	Ferro Silício Tipo 2	
Inspeção controle de recebimento		
Inspeção Visual	OK	
Granulometria		ESPECIFICADO
>10,0 mm	0%	0% a 5%
> 2,0 mm e <10,0 mm	90,45%	85% a 99,99%
<2,0 mm	9,55%	0% a 10%
Teor de Silício	73,33	73,3% a 99,99%
Teor de Alumínio	0,46%	0,3% a 1%
Teor de Cálcio	0,53%	0,3% a 1,5%

As etapas de processamento estão associadas ao carregamento, fusão, metalurgia de panela, vazamentos dos moldes e retirada das amostras.

Para a fusão da carga utilizou-se um forno elétrico a indução tipo cadinho, com capacidade de 14 toneladas, frequência de rede (60 Hz), potência de 3750 KW e revestimento refratário à base de sílica. A carga do forno foi composta de gusa, retorno de ferro nodular, sucata de aço, por vezes retorno de metálico líquido e para correção grafite, FeSi, etc. Após a fusão da carga registrou-se a temperatura e programou-se o forno para a temperatura de superaquecimento e vazamento especificada.

A primeira amostra foi retirada momentos antes do vazamento do forno para a panela, registrando a temperatura de vazamento e os números da corrida e do forno. A faixa da temperatura visada esteve no intervalo entre 1470 e 1490°C.

Na transferência do forno para a panela de vazamento, procedeu-se a técnica de inoculação, onde a adição foi feita em quilogramas por tonelada de metal vazado. Na metalurgia da panela foi também feita a adição da liga nodularizante FeSiMg e sucata de cobertura para a nodularização. As adições de liga nodularizante e de inoculantes foram registradas, bem como correções feitas na bica, sendo os

seguintes valores de cargas de adição objetivados no trabalho: 1,1 kg/ton e 4 kg/ton, respectivamente.

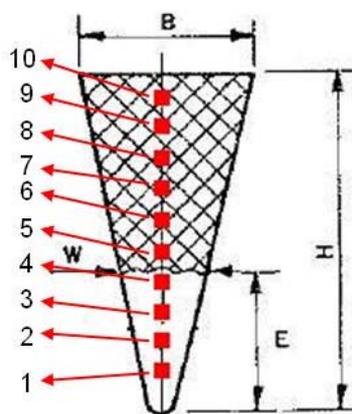
Com o vazamento do forno para a panela foi ativado um cronômetro na área pelo apontador. Este tempo foi usado para verificar o tempo de *fading*, o qual não pode exceder 15 minutos, pois a partir desse tempo a nodularização perde seu efeito. Logo foi fixada a retirada de amostras em dois tempos de fading, uma amostra aos 5 minutos e outra aos 10 minutos. Sendo que ao fim do estudo foram acompanhadas 10 panelas, gerando assim 30 cunhas e 30 pastilhas para caracterização.

Desta forma as amostras foram nomeadas segundo um código alfa-numérico (XPHY) da seguinte forma: X indica o número da corrida, podendo ser de 1 a 10; PH indica a origem de retirada de material para a pastilha e sua respectiva cunha em análise, podendo ser PF que significa no Forno e PA que significa na panela; e Y indica no caso de PF o número do forno podendo ser 3, 8 e 9, e no caso de PA, Y indica o tempo de *fading* podendo ser 5 e 10.

A análise da composição química quanto aos elementos presentes nas pastilhas foi realizada em distintos equipamentos instalados na BR Metals: Carbono e Enxofre - LECO CS 244; e demais elementos - Espectrômetro óptico – LAV 05.

As cunhas obtidas na etapa de retirada de amostras foram quebradas, e sua fratura foi analisada visualmente, e também foram registradas suas medidas, bem como possíveis áreas de coquilhamento (ferro fundido branco). Na Figura 1 são demonstradas as medidas realizadas, com base no aspecto da fratura, onde:

- B é a espessura superior da cunha;
- W é a espessura medida na altura de coquilhamento;
- E é a altura coquilhada (branca);
- H é a altura da cunha, estando a região mesclada em parte ou totalidade de “H – E”.



**Figura 1.** Medidas realizadas na superfície de fratura das cunhas após quebra e pontos onde foram realizadas as análises metalográfica polida e sem ataque.

As amostras em cunha após serem quebradas, passaram por processo de lixamento com lixas de carbetto de silício (granulometrias de 100, 220, 400, 600, 800, 1000 e 1200 mesh), seguido de polimento com alumina de granulometria de 1 e 0,5  $\mu\text{m}$ . Nesta condição, polida e sem ataque, foram registrados imagem em 100x aumento com auxílio de um microscópio óptico. Os campos selecionados para análise estavam associados a medida da linha longitudinal central da parte menos espessa para a mais espessa, com o intuito de definir a microestrutura quanto à presença ou não de grafita e sua respectiva quantificação em relação a tamanho e grau de nodularidade (condição sem ataque), em 10 pontos divididos nessa linha (conforme

números de 1 a 10 indicados na Figura 1). Sendo a captura das imagens realizadas com auxílio de uma câmera digital e um programa de aquisição/análise de imagem (*Image-Pro Plus*), acoplado a um microscópio óptico Leica instalado no laboratório de Metalografia e Microscopia Óptica da EEIMVR (Escola de Engenharia Industrial Metalúrgica de Volta Redonda) da UFF (Universidade Federal Fluminense).

Na Tabela 4 encontram-se descritas as codificações utilizadas para a definição da forma, distribuição e tamanho da grafita observadas, segundo a norma interna da BR Metals BRM-IM-0152/08. Com a finalidade de caracterizar a grafita observada foi utilizando a seguinte sequência de códigos, quanto à forma, distribuição e tamanho, respectivamente têm os códigos de algarismos romanos, letras maiúsculas, e números algébricos. Como exemplo se tem o código I A 4, que indicaria, forma I, distribuição A e tamanho 4, ou seja, forma lamelar ou em veios, distribuição homogênea e tamanho 4.

**Tabela 4.** Classificação da grafita quanto a Dimensão das partículas, forma e distribuição (esta última para a grafita lamelar ou em veios), em função da norma interna da BR Metals, BRM-IM-0152/08

Dimensão			
Número de Referência		Dimensões das partículas de grafita, 100x de aumento (mm)	Dimensão real das partículas de grafita (mm)
1		> 100	> 1
2		50 a 100	0,5 a 1
3		25 a 50	0,25 a 0,5
4		12 a 25	0,12 a 0,25
5		6 a 12	0,06 a 0,12
6		3 a 6	0,03 a 0,06
7		1,5 a 3	0,015 a 0,03
8		< 1,5	< 0,015
Forma		Distribuição	
I	Grafita lamelar ou em veios	A	Homogênea
II	Grafita esboroada ou roseta	B	Roseta
III	Grafita vermicular	C	Primária
IV	Grafita semicompacta ou de	D	Interdendrítica
V	Grafita compacta ou explodida	E	Interdendrítica
VI	Grafita esferoidal ou nodular		

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na Tabela 5 são apresentadas as composições das corridas analisadas e as temperaturas de retirada das cunhas e pastilhas associadas a um dado forno em relação à sua composição química naquele momento.

As corridas 4 e 5 (amostras “4P F9” e “5P F9” da Tabela 5) apresentam baixo teor de carbono, devido a isto foi feita uma adição de grafita na bica de vazamento para a correção do mesmo. A operação realizada conforme procedimento no qual é especificado o máximo de 4 kg por tonelada de metal vazado sendo assim corrigido para o vazamento.

As corridas 1 e 4 (amostras “1P F9” e “4P F9” da Tabela 5) apresentam Si abaixo do especificado, para corrigir estes valores foi adicionada 5 kg/ton de FeSi, pois este aumento na adição de FeSi na transferência veio a compensar esse pequeno déficit. Em relação às corridas 2 e 3 (amostras “2P F8” e “3P F8” da Tabela 5), estes apresentaram o Si acima do especificado, de modo a proceder a correção foi adicionado o mínimo de FeSi, ou seja, 4 kg/ton, pois um decréscimo na adição de FeSi, comparado ao anterior, propiciou a correção do Si.

Não houve outro elemento fora do especificado no ferro base nas corridas citadas acima, bem como as corridas restantes estavam dentro da faixa de composição para a especificação em estudo.

**Tabela 5.** Composições químicas das pastilhas extraídas das corridas analisadas associadas a um dado forno, em conjunto com a temperatura de retirada em °C.

Amostra	Temp.	CEQ	C	Si	Mn	S	Cr	Cu	Mg	P	Sn
1P F9	1478	4,04	3,65	1,14	0,22	0,013	0,026	0,14	0,001	0,03	0,0001
2P F8	1480	4,13	3,65	1,42	0,21	0,013	0,019	0,15	0,001	0,02	0,0049
3P F8	1477	4,13	3,65	1,42	0,21	0,014	0,020	0,14	0,001	0,03	0,0009
4P F9	1480	4,01	3,60	1,20	0,22	0,015	0,027	0,17	0,001	0,03	0,0021
5P F9	1480	4,06	3,61	1,32	0,22	0,014	0,028	0,19	0,001	0,03	0,0070
6P F9	1480	4,10	3,68	1,25	0,22	0,014	0,028	0,18	0,001	0,03	0,0048
7PF9	1480	4,18	3,73	1,31	0,24	0,013	0,024	0,17	0,001	0,03	0,0021
8PF9	1480	4,18	3,73	1,31	0,24	0,013	0,024	0,17	0,001	0,03	0,0021
9PF3	1480	4,16	3,74	1,21	0,26	0,018	0,035	0,14	0,001	0,04	0,0082
10PF9	1480	4,13	3,71	1,23	0,25	0,019	0,022	0,14	0,001	0,03	0,0049
ESPECIFICAÇÃO	INFERIOR	4,00	3,65	1,20	0,20	0,012	0,000	0,10	0,000	0,00	0,0000
	SUPERIOR	4,25	3,75	1,35	0,35	0,020	0,040	0,20	0,001	0,05	0,0100
<b>FBN(A)</b>						Dentro do especificado					
						<b>Fora do especificado</b>					
						Não avaliado					

Tão logo começou a transferência do metal do forno para a panela foi ativado o relógio cronômetro para registrar o tempo de *fading* da liga nodularizante, o mesmo foi utilizado para que se retirassem as amostras nos tempos de 5 minutos e 10 minutos. Na Tabela 6 são apresentadas as composições químicas oriundas das pastilhas retiradas das panelas que vão dar origem às cunhas.

Na corrida 2 (amostras “2P A5” e “2P A10” Tabela 6) o Cr se encontra alto, e em análise do forno que originou a corrida, o Cr se encontrava em níveis aceitáveis (amostra “2P F8” Tabela 6). O que leva a duas hipóteses para esse aumento do Cr, a primeira é a sucata de cobertura, e a segunda seria a panela utilizada na corrida estar com restos de uma corrida de cinzento de alto Cr.

Nas corridas 5, 7 e 10 (amostras “5P A5”, “5P A10”, “7P A5”, “7P A10”, “10P A5” e “10P A10” – Tabela 6), o Si se encontra abaixo de 2%, possivelmente pela reação do Si com escória no vazamento, e assim não sendo incorporado ao banho totalmente como calculado.

A corrida 10 (amostra “10P A5” e “10P A10” – Tabela 6), apesar de conter o percentual de Si abaixo de 2%, que é o limite da norma interna BR Metals para o material NF, atende a norma especificado pelo cliente, portanto será avaliada conforme as demais amostras.

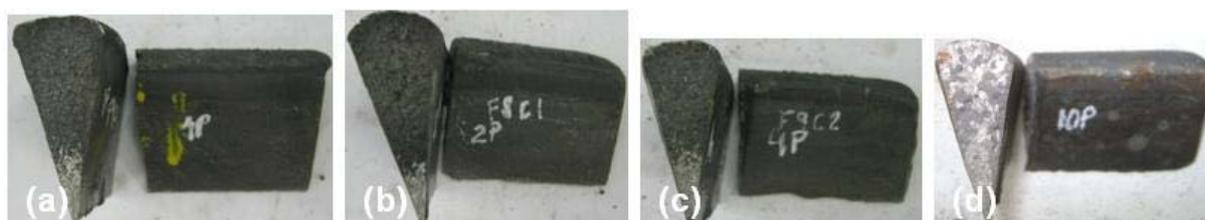
Nas corridas 8 e 9 (amostras “8P A5”, “9P A5” e “9P A10” – Tabela 6), apresentam composições que são aceitáveis devido a um erro que existe no próprio espectrômetro, e assim entram na faixa mínima.

Foi analisado o aspecto de fratura das amostras, em relação às amostras das corridas foi usado o parâmetro de área percentual coquilhada, e para a divisão dos grupos usou-se o seguinte critério, grupo 2 até 10% coquilhada, grupo 1 maiores que 10% e menores que 15%, grupo 3 maiores que 15% e menores que 20%, e por final o grupo 4 amostras superiores a 20%.

**Tabela 6.** Composições químicas das pastilhas extraídas das placas associadas aos tempos de *fading* de 5 e 10 minutos, em conjunto com a temperatura de retirada em °C.

AMOSTRA	TEMP.	CEQ	C	Si	Mn	S	Cr	Cu	Mg	P	Sn
1P A5	1388	4,23	3,56	2,02	0,23	0,012	0,038	0,17	0,049	0,025	0,0050
1P A10	1363	4,25	3,58	2,01	0,23	0,013	0,038	0,17	0,047	0,025	0,0043
2P A5	1378	4,27	3,55	2,15	0,22	0,010	<b>0,048</b>	0,15	0,047	0,027	0,0043
2P A10	1353	4,33	3,58	<b>2,25</b>	0,22	0,011	<b>0,051</b>	0,15	0,048	0,030	0,0053
3P A5	1388	4,33	3,64	2,06	0,22	0,009	0,022	0,14	0,047	0,027	0,0021
3P A10	1361	4,32	3,61	2,13	0,21	0,009	0,022	0,14	0,049	0,029	0,0016
4P A5	1372	4,29	3,61	2,03	0,22	0,011	0,029	0,14	0,045	0,033	0,0068
4P A10	1350	4,28	3,61	2,01	0,23	0,010	0,029	0,15	0,047	0,028	0,0030
5P A5	1421	4,25	3,61	<b>1,93</b>	0,24	0,013	0,032	0,17	0,034	0,030	0,0029
5P A10	1399	4,28	3,63	<b>1,94</b>	0,24	0,012	0,032	0,17	0,031	0,030	0,0042
6P A5	1425	4,35	3,65	2,09	0,24	0,012	0,036	0,17	0,033	0,030	0,0061
6P A10	1400	4,36	3,66	2,09	0,23	0,011	0,036	0,17	0,034	0,031	0,0056
7PA5	1425	4,30	3,66	<b>1,93</b>	0,25	0,012	0,024	0,16	0,036	0,035	0,0034
7PA10	1398	4,33	3,68	<b>1,96</b>	0,24	0,012	0,025	0,16	0,033	0,032	0,0052
8PA5	1423	4,35	3,70	<b>1,95</b>	0,24	0,011	0,026	0,16	0,043	0,035	0,0051
8PA10	1403	4,36	3,70	<b>1,99</b>	0,24	0,011	0,025	0,16	0,036	0,032	0,0057
9PA5	1382	4,33	3,67	<b>1,97</b>	0,27	<b>0,018</b>	0,035	0,19	0,049	0,033	0,0091
9PA10	1343	4,34	3,68	<b>1,97</b>	0,26	<b>0,015</b>	0,035	0,18	0,047	0,033	0,0090
10PA5	1385	4,27	3,63	<b>1,93</b>	0,25	0,013	0,023	0,19	0,050	0,031	0,0070
10PA10	1354	4,22	3,60	<b>1,87</b>	0,25	0,010	0,023	0,18	0,047	0,034	0,0051
ESPECIFICAÇÃO	INFERIOR	4,17	3,50	2,00	0,10	0,004	0,000	0,10	0,030	0,000	0,0000
	SUPERIOR	4,45	3,70	2,20	0,35	0,014	0,040	0,20	0,050	0,050	0,0100
<b>FBN(A)</b>		Dentro do especificado									
		<b>Fora do especificado</b>									
		Não avaliado									

A divisão por aspecto de fratura das corridas é apresentada na Tabela 7 e os aspectos típicos na Figura 2, assim ficaram divididos os grupos: (i) Grupo 1 as corridas 1P e 9P; (ii) Grupo 2 as corridas 2P, 6P, 7P e 8P; (iii) Grupo 3 as corridas 3P e 4P; e (iv) Grupo 4 as corridas 5P e 10P.



**Figura 2.** Aspecto macrográfico das superfícies de fratura das amostras representativas em função da área coquilhada: (a) Grupo 1; (b) Grupo 2; (c) Grupo 3; e (d) Grupo 4 – conforme Tabela 7.

**Tabela 7.** Medidas da quantificação da área coquilhada para seleção dos grupos das cunhas oriundas das coletas na transferência forno-placa

Cunha	1P F9	2P F8	3P F8	4P F9	5P F9	6P F9	7P F9	8P F9	9P F9	10P F3
<b>I</b>	42,2	40,7	38,9	37,9	36,8	41,8	41,2	42,5	45,7	37,15
<b>E</b>	14	10,25	16,1	15	-	10,7	8,65	11,9	10,1	-
<b>B</b>	19	18,2	17,9	17,3	16,1	18,7	18,25	17,6	18,75	16,1
<b>W</b>	6,8	6	8	7,7	-	6	5,45	5	10,3	-
<b>Seção</b>	400,9	370,37	348,16	327,84	296,24	390,83	375,95	374	428,44	299,06
<b>Área Coq.</b>	47,6	30,75	64,4	57,75	-	32,1	23,57	29,75	52,02	-
<b>% Coq.</b>	11,87	8,3	18,5	17,62	-	8,21	6,27	7,95	12,14	-
	<b>GRUPO 1</b>	<b>GRUPO 2</b>	<b>GRUPO 3</b>	<b>GRUPO 4</b>						

As amostras das panelas se apresentam todas na forma nodular, sendo assim em análise macroestrutural, o aspecto de fratura se assemelha para todas as amostras, logo, apenas a análise microestrutural pode identificá-las, sendo as amostras do Grupo 4 selecionadas para elucidar tal característica.

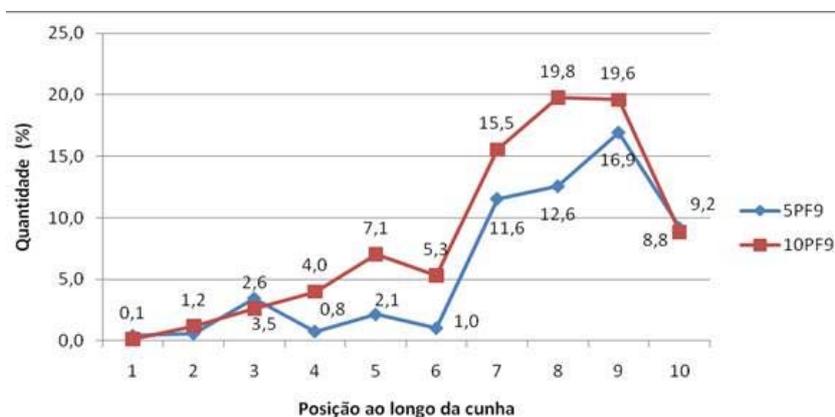
Com base na avaliação qualitativa (Tabela 8) quanto a presença e natureza da grafita para as amostras coletas na transferência forno-panela, somada a sua quantificação (Figura 3), caracteriza-se pela baixa quantidade de grafita presente (indicados por XXX, na Tabela 8), em análise quantitativa (Figura 3), onde se identificam os pontos nos quais se tem a ocorrência de grafitas com maior abundância com morfologia em veios, sendo eles os pontos 7, 8 e 9 em ambas as amostras. Porém no ponto 10 verifica-se que estas grafitas deixaram de existir (sendo indicado por XXX). A possibilidade para a ocorrência desse tipo de fenômeno é a baixa nucleação presente nos fornos que originaram as amostras 5PF9 e 10PF9. Esta redução na nucleação do forno pode ser ocasionada pelo alto tempo de espera, pela alta temperatura de manutenção ou por uma possível carga sem muitos núcleos efetivos. Sendo o mais provável é que ocorre uma soma destes fatores. Em concordância aos trabalhos de Skaland [4].

Logo, as partes de menor espessura, que são áreas críticas para a nucleação, e a parte que fica em contato com o ar, que também se torna crítica pela rápida extração de calor, ambas apresentam estrutura mal nucleada, com baixa quantidade percentual de grafita na estrutura, ao ponto de vista da análise sem ataque das amostras “5PF9” e “10PF9”. Similar ao visto por Nascimento [5].

Os processos de inoculação e nodularização vem a contribuir de maneira geral ao longo da cunha na nucleação e crescimento de grafita nodular, como é elucidado pela análise qualitativa (Tabela 8) e quantitativa (Figuras 4 e 5) para as amostras relativas ao Grupo 4 oriundas dos tempos de fading de 5 e 10 minutos. No entanto a temperatura elevada, o baixo teor de magnésio residual e uma pequena baixa na quantidade de silício, Tabela 6, são possíveis fatores que em um efeito sinérgico, teriam a grande possibilidade de acarretar grafita degenerada, má nucleação e falta de homogeneidade da grafita precipitada para as amostras “10PA5” e “10PA10”.

**Tabela 8.** Análise qualitativa da grafita nas amostras “5PF9” e “10PF9” (Grupo IV) oriundas das coletas na transferência forno-panela. XXX = ausência de grafita, de acordo com a Tabela 4.

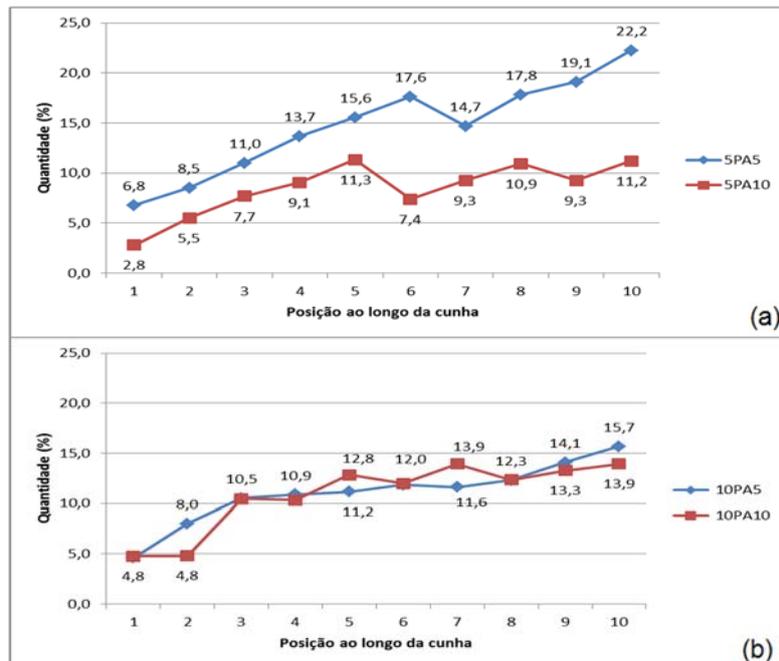
Amostra	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
5PF9	XXX	XXX	XXX	XXX	XXX	XXX	ID4-IC4	ID5	ID5	XXX
10PF9	XXX	XXX	XXX	XXX	XXX	XXX	ID5	ID4	ID4-IC4	XXX



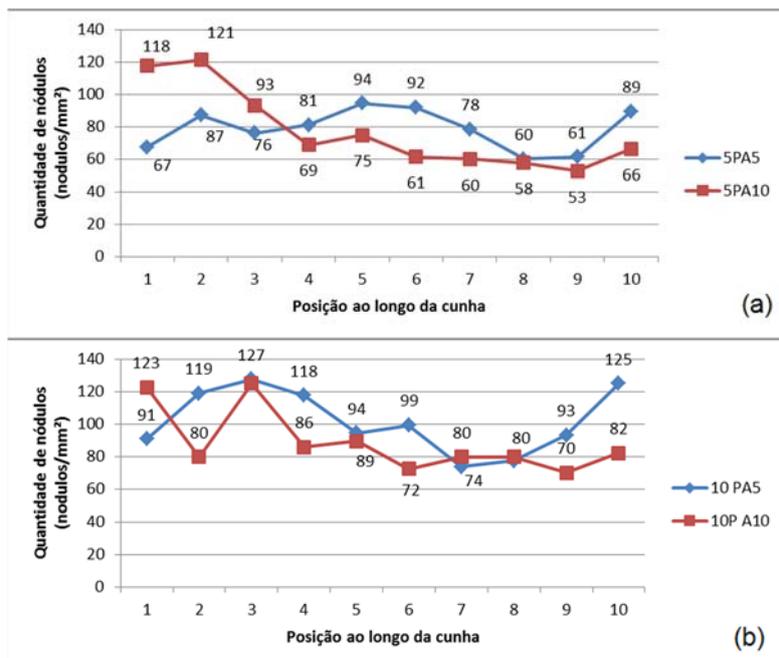
**Figura 3.** Gráfico da fração volumétrica de grafita presente ao longo da altura cunha das amostras “5P F9” e “10P F9”, referente ao Grupo IV, oriundas das coletas na transferência forno-panela.

**Tabela 9.** Análise qualitativa da grafita nas amostras “5PA5”, “5PA10”, “10PA5” e “10PA10” (Grupo IV) oriundas dos tempos de fading de 5 e 10 minutos

Amostras	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
5PA5	VI6	VI5	VI5	VI4						
5PA10	VI6	VI5								
10PA5	VI6	VI5								
10PA10	VI7	VI6	VI5							



**Figura 4.** Gráficos da fração volumétrica de grafita percentual presente na estrutura (Grupo IV). (a) comparativo das amostras da 5ª corrida, “5PA5” e “5PA10”, (b) comparativo das amostras da corrida 10, “10PA5” e “10PA10”, oriundas dos tempos de fading de 5 e 10 minutos.



**Figura 5.** Gráficos da quantidade de nódulos por milímetro quadrado (Grupo IV). (a) comparativo das amostras da corrida 5, “5PA5” e “5PA10”, (b) comparativo das amostras da corrida 10, “10PA5” e “10PA10”, oriundas dos tempos de fading de 5 e 10 minutos.

De acordo com a Figura 4, pode-se observar que a amostra 5PA5 apresentou uma maior fração volumétrica de grafita percentual do que a amostra 5PA10, e tal fração volumétrica aumentou de acordo com a evolução da medição ao longo da cunha. Já para as amostras 10PA5 e 10PA10, até a posição 3 houve um incremento mais significativo da fração volumétrica de grafita percentual, já para os demais pontos tal foi menor. Também se pode observar que o tempo de *fading* para as amostras 10P, não proporcionou uma diferença tão significativa fração volumétrica de grafita percentual quanto na amostra 5P.

Com base na Figura 5, observa-se que dentre as amostras da corrida 5, “5PA5” e “5PA10”, a amostra “5PA5” apresenta sua grafita com dimensão e fração volumétrica maiores. Em relação à quantidade de nódulos, a amostra “5PA5” tem menores quantidade de nódulos nos 3 primeiros pontos, e após o ponto 3 passa a ter maior quantidade de nódulos por área.

#### 4 CONCLUSÃO

Pode-se concluir que, a adição padrão de liga inoculante (FeSi T2) não garante sozinha a completa extinção de cementita, bem como a boa nucleação do material. O tempo de fading adotado afetou a quantidade de nódulos presentes na estrutura de ferro fundidos nodulares. Enquanto o Mg residual, quando no limite inferior, influenciou na degeneração da grafita nodular. Por outro lado, o Si enquanto elemento químico presente na composição do material influenciou na fração precipitada de grafita livre. Por fim, a possível atuação de elementos distintos em sinergia para um mesmo efeito, caso de elementos estabilizadores de carboneto que possivelmente diminuem a fração de grafita livre. Além de fatores de processo com aqueles associados a temperatura de sobreaquecimento/vazamento podem vir a influenciar nos resultados.

#### Agradecimentos

Os autores agradecem a BR Metals por toda a infraestrutura oferecida para realização deste trabalho, bem como a EEIMVR/UFF pela disponibilização de recursos do laboratório de Metalografia para as caracterizações conduzidas.

#### REFERÊNCIAS

- 1 Santos ABS, Branco CHC. Metalurgia dos ferros fundidos cinzentos e nodulares. São Paulo: IPT, 1991.
- 2 Elkem ASA, Inoculation Practices. Technical Information 4, 1997.
- 3 Baracho, L L A. Avaliação da Adição Padrão do Inoculante (FeSi T2) na Transferência Forno-Panela na Produção de Ferro Fundido Nodular, Trabalho de Conclusão de Curso, EEIMVR/UFF, Volta Redonda/RJ - Brasil, 2013.
- 4 Skaland T. A new method for chill and shrinkage control in ladle treated ductile iron. Foundry Trade Journal, 2004.
- 5 Nascimento D. Apostila de ferros fundidos, Sociedade Educacional de Santa Catarina, Joinville, setembro/2009.