

# ESTUDO DO EFEITO DA COMPOSIÇÃO QUÍMICA DO GUSA NO BLOCO DE CARBONO PARA CADINHO VISANDO AO AUMENTO DA VIDA ÚTIL DOS ALTOS-FORNOS \*

Beatriz Fausta Gandra<sup>1</sup>  
Marco Antônio Quintela<sup>2</sup>  
Leonardo José Silva de Oliveira<sup>3</sup>

## Resumo

A preservação do refratário do cadinho é fator determinante para o prolongamento da vida útil de altos-fornos. Assim, o presente estudo teve por objetivo avaliar o efeito da variação da composição química do gusa (silício, manganês e enxofre) sobre o bloco de carbono do cadinho, com foco na obtenção de informações que permitiram inferir sobre a viscosidade e a tensão superficial do gusa. Isto foi realizado por meio de análises via microscopia de aquecimento e ensaios para determinar a penetração de gusa em bloco de carbono a altas temperaturas. Os resultados indicaram a tendência de elevação do ângulo de contato entre o gusa e o bloco de carbono a partir do aumento do silício e do enxofre no gusa. Por outro lado, verificou-se que o ângulo de contato reduz com o aumento do manganês no gusa. Dessa forma, o gusa contendo maiores teores de silício e enxofre penetrou de forma menos significativa no bloco de carbono, enquanto que o gusa com altos teores de manganês penetrou de forma mais intensa no bloco de carbono. Esses resultados permitem estabelecer faixas de controle da composição química do gusa, em consonância com as necessidades de preservação dos altos-fornos e de sua estabilidade operacional.

**Palavras-chave:** Alto-Forno; Cadinho; Gusa.

## STUDY OF HOT METAL'S CHEMICAL COMPOSITION EFFECT IN HEARTH CARBON BLOCK AIMING BLAST FURNACE LIFE INCREASE

### Abstract

The hearth's refractory preservation is a determining factor in the longevity of the blast furnace campaign. Thus, a study developed at Usiminas evaluate the effect of the hot metal's chemical composition on the hearth carbon block, with a focus on obtaining information that allowed to infer about the viscosity and surface tension of the hot metal, by means of heating microscopy and tests to determine the hot metal's penetration in carbon block at high temperatures. The results indicated the tendency of elevation of the contact angle between the hot metal and the carbon block, associated with less penetration into the carbon block, from with the increase of the silicon and the sulfur. They also showed that the contact angle reduces with the increase of the manganese in the hot metal, that penetrated more intensively into the carbon block.

**Keywords:** Blast Furnace; Hearth; Hot metal.

<sup>1</sup> Membro da ABM; Engenheira Metalurgista, M. Sc., Pesquisadora, Centro de Pesquisa e Desenvolvimento da Usiminas; Ipatinga, MG, Brasil

<sup>2</sup> Membro da ABM; Engenheiro Mecânico, M. Sc., MBA, Pesquisador, Centro de Pesquisa e Desenvolvimento da Usiminas; Ipatinga, MG, Brasil.

<sup>3</sup> Membro da ABM; Engenheiro Metalurgista, M. Sc., Pesquisador, Centro de Pesquisa e Desenvolvimento da Usiminas; Ipatinga, MG, Brasil.

## 1 INTRODUÇÃO

No atual cenário econômico mundial, é cada vez maior a necessidade de redução contínua nos custos de produção de aço. Também tem sido observada, atrelada às demandas do mercado, maior diversificação da composição química do gusa exigida pela aciaria, o que impacta diretamente a operação dos altos-fornos. Esses fatores evidenciam a importância de temas ligados ao aumento da vida útil dos equipamentos siderúrgicos e dos ganhos de produtividade. Nesse contexto, a preservação do refratário do cadinho de alto-forno é motivo de preocupação constante da equipe técnica operacional, tendo em vista que é uma região determinante na longevidade da campanha do forno. Alguns fatores podem contribuir para que haja desgaste prematuro deste tipo de refratário, a saber:

- qualidade dos blocos de carbono;
- descontrole térmico do cadinho, em consequência de variações localizadas de temperatura, em função de deficiência de resfriamento do refratário;
- variações constantes na temperatura do alto-forno, fazendo com que reações indesejáveis ocorram no cadinho;
- composição química do gusa;
- presença de elementos catalisadores do desgaste em teores indesejáveis na carga e/ou gusa;
- retenção de gusa no cadinho decorrente da deficiência no esgotamento do alto-forno.

Neste contexto, foi desenvolvido um estudo de pesquisa na Usiminas para avaliar o efeito da variação da composição química do gusa sobre o bloco de carbono de cadinho, com foco na obtenção de informações que permitam o prolongamento da campanha do alto-forno. Para tanto, foi avaliada a influência dos elementos manganês, enxofre e silício sobre as características de penetração do gusa no bloco de carbono. O manganês e o enxofre foram escolhidos devido à possibilidade de sua alteração no gusa, em função de necessidade da aciaria. Por outro lado, a escolha do silício é função de sua possível interação com estes dois elementos e por estar presente em quantidade considerável na composição do gusa.

## 2 MATERIAIS E MÉTODOS

### 2.1 Obtenção do Gusa e Preparação dos Corpos de Prova

As amostras de gusa, com as composições apresentadas na tabela 1, foram produzidas a partir de ferro eletrolítico e de elementos de liga (figura 1), utilizando-se forno laboratorial (Tammann).

**Tabela 1.** Composição química do gusa, % em peso

Identificação da amostra de gusa	C	Si	S	Mn	P	Ti
1	4,20 a 4,80 (saturação)	0,16	0,02	0,19	0,10 a 0,13	~0,010
2		0,70	0,01	0,22		
3		0,24	0,01	0,59		
4		0,23	0,07	0,70		
5		0,75	0,02	0,60		
6		0,67	0,06	0,61		
7		0,22	0,07	0,21		
8		0,66	0,06	0,20		

Foram visados dois níveis de variação para o silício (0,2% e 0,6%), o enxofre (0,02% e 0,07%) e o manganês (0,2% e 0,6%). Para o fósforo e o titânio, foram visados valores similares àqueles obtidos industrialmente. O carbono foi aquele de saturação do gusa.



**Figura 1.** Fotografia dos materiais utilizados na produção das amostras de gusa.

Uma vez obtido o gusa, o passo seguinte foi sua pulverização para posterior análise em microscópio de aquecimento (cerca de 20 g, 100% < 200#) e ensaios de penetração em bloco de carbono a alta temperatura. Sua preparação foi realizada inicialmente por meio de prensa hidráulica com capacidade de 30 t, seguida de moagem em moinho de anéis. As amostras foram separadas em alíquotas de 30 g e armazenadas a vácuo no intuito de se evitar reoxidação do gusa por ar atmosférico.

Para a confecção dos cadinhos para teste de penetração do gusa, foram utilizados blocos de carbono supermicroporo CBD-2RG, mesmo tipo aplicado industrialmente.

## 2.2 Ensaios de Penetração de Gusa no Bloco de Carbono

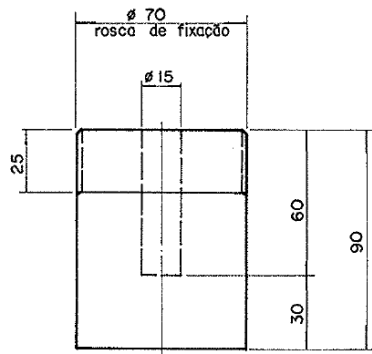
No intuito de se identificar a condição de penetração de gusa no cadinho de carbono, foram realizados experimentos em forno Tammann. Na figura 2, é mostrado o desenho esquemático do teste. O sistema envolve um dispositivo, desenvolvido na Usiminas, para aplicação de pressão no gusa por meio de gás inerte introduzido em orifício do corpo de prova após alcançar as temperaturas próximas às de operação dos altos-fornos.



**Figura 2.** Representação esquemática do ensaio de penetração de gusa.

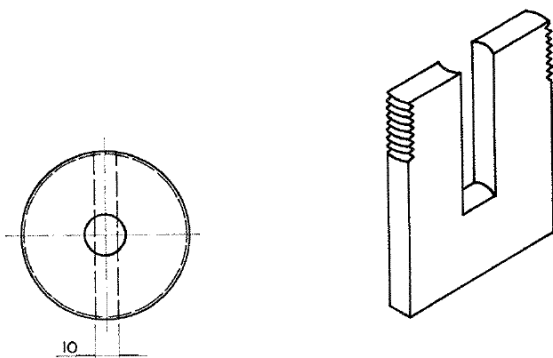
Os ensaios de penetração no bloco de carbono foram realizados controlando-se as seguintes variáveis: peso do gusa = 25 g; temperatura de encharque = 1550°C; pressão = 4 kgf/cm<sup>2</sup> e tempo = 5 min. O objetivo é provocar a penetração do gusa nos poros do refratário, de modo que se possa avaliar parcialmente o efeito da composição química do gusa nessa penetração.

Os corpos de prova para o cadinho foram confeccionados nas dimensões externas de 70 mm de diâmetro por 90 mm de altura. O cadinho propriamente dito (orifício) possui de 15 mm de diâmetro por 60 mm de altura, figura 3.

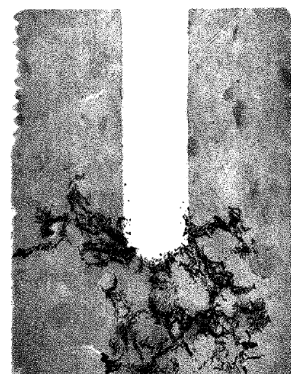


**Figura 3.** Representação esquemática e foto ilustrativa do corpo de prova de bloco de carbono para o teste de penetração.

Após a realização dos testes de penetração, foram retiradas amostras na direção longitudinal do corpo de prova, figura 4, as quais foram radiografadas, figura 5, para a determinação da intensidade de penetração de gusa no refratário. A quantidade da penetração de gusa foi determinada a partir da quantidade remanescente de gusa no interior do cadinho (orifício), por meio de análise de imagens (área residual) utilizando-se o software *Solid Edge*®.



**Figura 4.** Representação esquemática da seção transversal e seção longitudinal do corpo de prova para simular a penetração de gusa.



**Figura 5.** Radiografia da seção longitudinal de um corpo de prova após o experimento evidenciando a penetração de gusa nos poros do bloco de carbono.

### 2.3 Ensaio para determinar o amolecimento e a fusão do gusa

Considerando a influência dos elementos avaliados na tensão superficial do gusa, foram realizados ensaios para a determinação do seu ângulo de molhabilidade por meio de microscopia de aquecimento, figura 6.

Foram confeccionados corpos de prova cúbicos (3 mm de aresta) de gusa, utilizando álcool absoluto para auxiliar na aglomeração. As amostras foram aquecidas à taxa de 2°C/min a 3°C/min até a sua temperatura de fusão (máximo de 1700°C), em atmosfera oxidante.

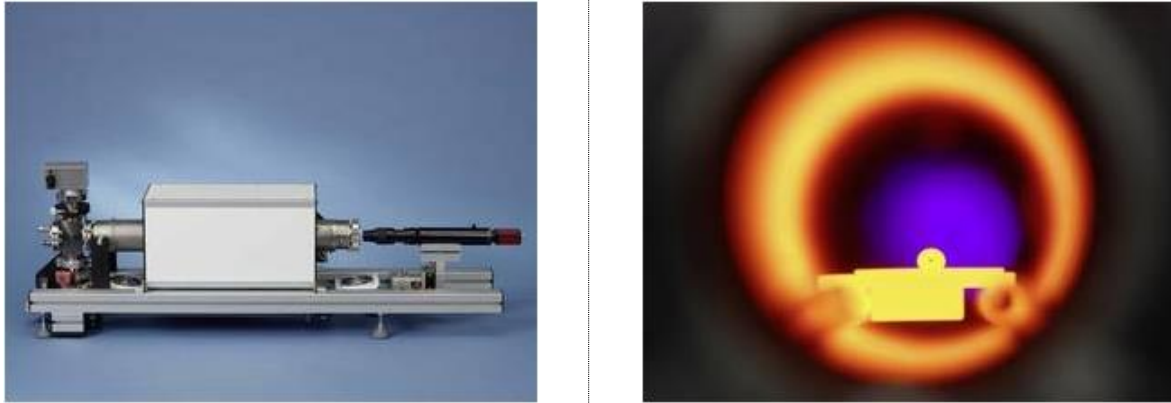


Figura 6. Imagem da microscopia de aquecimento.

Conforme a norma DIN 51730<sup>(1)</sup>, algumas temperaturas e faixas características devem ser observadas e registradas durante o experimento. São elas: (i) temperatura de deformação, quando o corpo de prova apresenta início da deformação caracterizada por uma pequena variação na forma; (ii) temperatura de esfera, quando o corpo de prova começa a apresentar características arredondadas; (iii) temperatura de hemisfério, na qual o corpo de prova já tomou forma arredondada, assemelhando-se à forma hemisférica; (iv) temperatura de fluidez (*flow point*), na qual o corpo de prova apresenta início de escoamento caracterizando o surgimento das fases líquidas. A temperatura de fluidez é aquela na qual o corpo de prova encontra-se a 1/3 de sua altura inicial. As demais temperaturas não são abordadas, ficando a cargo da observação e interpretação do executante do teste. A molhabilidade é avaliada pelo ângulo de contato do líquido com a superfície sólida conforme indicado na figura 7<sup>(2)</sup>, sendo este ângulo medido na temperatura de fluidez.

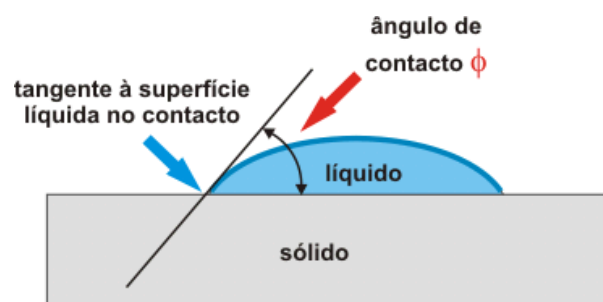


Figura 7. Indicação da medição do ângulo de contato<sup>(2)</sup>.

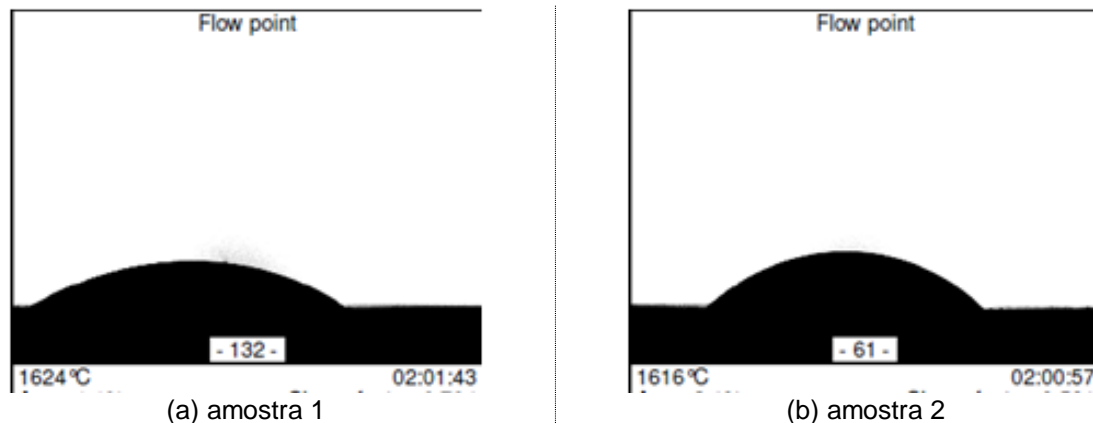
## 2.4 Análise dos dados

Os dados foram analisados estatisticamente, considerando as variáveis individualmente, bem como o efeito da interação entre elas, por meio do *software Statigraphics*<sup>®</sup>.

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

#### 3.1 Ensaio por Microscopia de Aquecimento

Na figura 8, são apresentados exemplos do aspecto visual do gusa na temperatura de fluidez. Na tabela 2, são apresentados os resultados de temperatura de fluidez e de ângulo de contato.



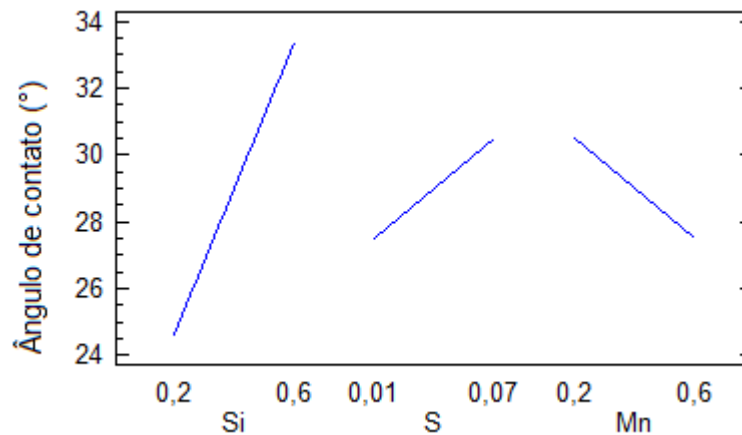
**Figura 8.** Aspecto do gusa sobre um amostra de bloco de carbono após a fusão em microscópio de aquecimento.

**Tabela 2.** Resultados do ensaio de microscopia de aquecimento

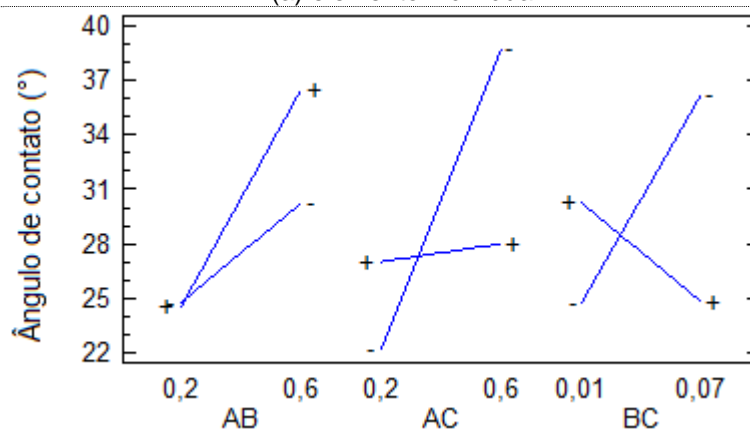
Amostra	Temperatura de fluidez (°C)				Ângulo de contato (°)			
	Ensaio 1	Ensaio 2	Média	DESVPAD	Ensaio 1	Ensaio 2	Média	DESVPAD
1	1624	1615	<b>1620</b>	4	18	22	<b>20</b>	2
2	1616	1603	<b>1610</b>	6	33	26	<b>30</b>	4
3	1618	1620	<b>1619</b>	1	30	29	<b>30</b>	0
4	1613	1612	<b>1612</b>	0	20	29	<b>24</b>	4
5	1607	1623	<b>1615</b>	8	39	23	<b>31</b>	8
6	1603	1629	<b>1616</b>	13	32	18	<b>25</b>	7
7	1629	1614	<b>1622</b>	7	23	26	<b>24</b>	2
8	não determinado por problema na amostra							

Esperava-se temperatura mais baixa para fluidez uma vez que a fusão do gusa acontece próximo de 1300°C, conforme o diagrama Fe-Fe<sub>3</sub>C. Acredita-se que a atmosfera oxidante predominou durante a análise tenha afetado os resultados. Além disso, não houve variação considerável na temperatura de fluidez para as diferentes composições químicas de gusa avaliadas.

Para inferir sobre a tensão superficial do gusa, foi investigado o ângulo de contato, pelo qual se observou uma tendência de elevação com o aumento do silício e do enxofre, e de queda com o aumento do manganês, figura 9 (a). Uma análise combinada destes três elementos, figura 9 (b), indicou que: (i) o enxofre potencializou o efeito do silício (AB); (ii) quando se avaliou o manganês junto ao silício (AC), se observou que o manganês alto não teve muito efeito na variação da tensão superficial. Mas, o manganês baixo potencializou o efeito do silício; e (iii) ambos (enxofre e manganês - BC) baixos ou altos refletiram em baixa tensão superficial.



(a) elemento individual

(b) elementos combinados<sup>1</sup>

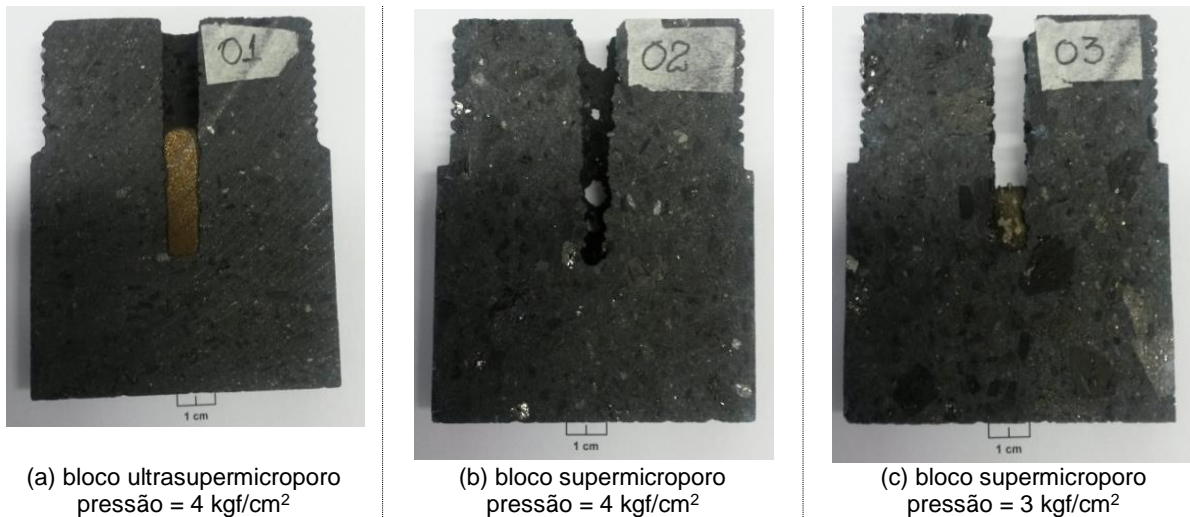
**Figura 9.** Efeito do silício (A), enxofre (B) e manganês (C) no ângulo de contato do gusa ( $R^2 = 74,54\%$ ).

**Nota 1:** a leitura deste gráfico deve ser feita considerando o eixo x referente à variação da primeira letra dos elementos combinados (primeiro elemento) e o sinal '+' ou '-' referente à variação do segundo elemento.

Os resultados do enxofre divergiram daquele encontrado para o aço na literatura<sup>(3)</sup>. Contudo, especialistas em redução sugerem que o gusa com baixo enxofre 'suja' mais o canal de corrida. Ou seja, a elevação do teor de enxofre aumenta a tensão superficial do gusa, o que foi evidenciado pelos resultados obtidos neste estudo.

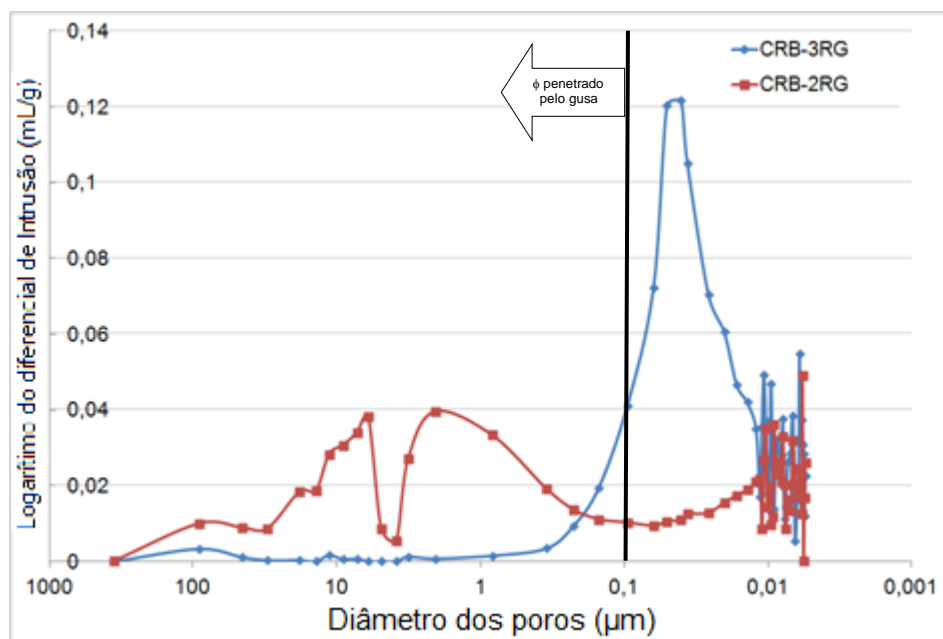
### 3.2 Ensaios para Simular a Penetração de Gusa em Bloco de Carbono

O primeiro ensaio de penetração do gusa foi realizado em cadinho de bloco ultrasupermicroporo (CRB-3RG) com uma amostra teste. No entanto, não se verificou penetração, conforme pode ser visto na figura 10 (a). Utilizando a mesma amostra, foram realizados outros dois ensaios em cadinho de bloco supermicroporo (CRB-2RG), figuras 10 (b) e (c), sendo o último com a redução na pressão aplicada para 3 kgf/cm<sup>2</sup>. Foi possível observar claramente o efeito da pressão aplicada no comportamento de penetração do gusa nos diferentes blocos de carbono, o que pode ser explicado pela porosidade e permeabilidade do bloco de carbono.



**Figura 10.** Resultados dos testes preliminares para a penetração de gusa em bloco de carbono.

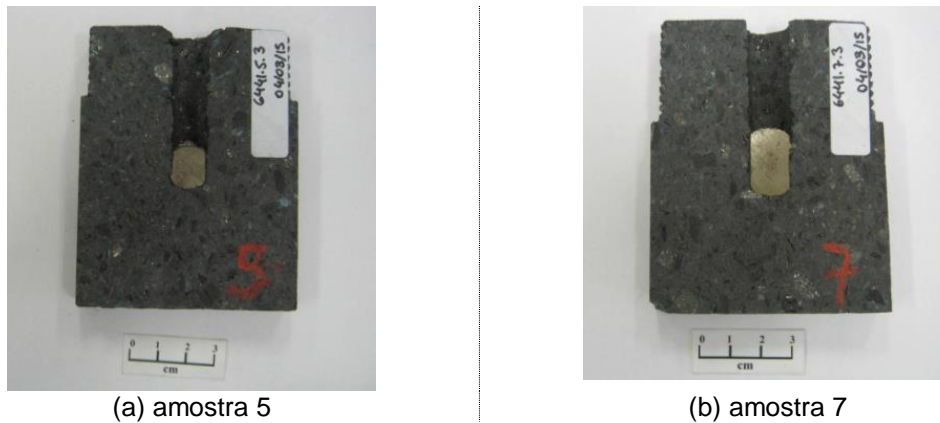
Apesar de possuírem porosidade aparentemente similar, os blocos CRB-2RG (13,6%) e CRB-3RG (16,3%) se diferem significativamente em termos de distribuição do tamanho dos poros, figura 11. Considerando que o gusa possa penetrar em poros com diâmetro de até 0,1  $\mu\text{m}$ , comprovou a característica superior do bloco de carbono ultrasupermicroporo (CRB-3RB).



**Figura 11.** Distribuição de tamanho de poros dos blocos de carbono.

Identificada essa diferença entre os blocos, foi dada sequência aos ensaios, que foram realizados em duplicata, utilizando o bloco refratário supermicroporo (CRB-2RG). Na figura 12, são apresentados os exemplos do aspecto final dos cadinhos, após ensaio de penetração de gusa (aplicação de pressão) e de corte para radiografia.





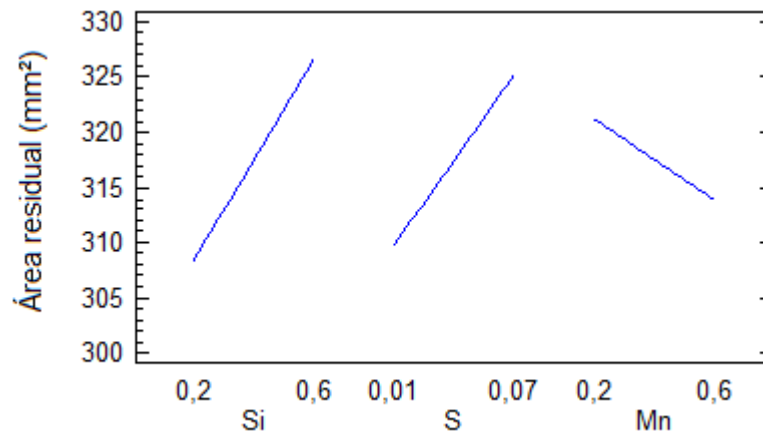
**Figura 12.** Exemplo de resultados dos testes para a penetração de gusa em bloco de carbono.

Na sequência, as amostras da seção transversal (figura 12) foram caracterizadas por meio de radiografias. Posteriormente, as imagens foram avaliadas utilizando-se o *software Solid Edge®* para quantificação do gusa residual no cadinho. A ideia é inferir sobre a viscosidade do gusa combinada com a tensão superficial e a molhabilidade a partir da quantidade de gusa que não penetrou nos poros das amostras. Os resultados são apresentados na tabela 3.

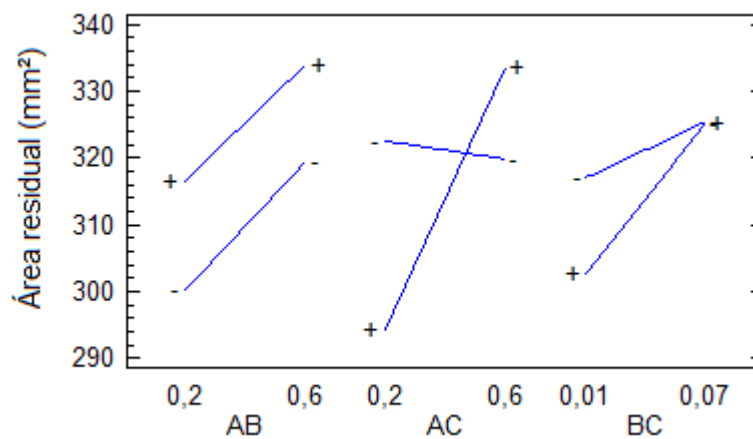
**Tabela 3.** Área ocupada pelo gusa residual no cadinho de carbono

Amostra	Área do gusa residual (mm <sup>2</sup> )			
	Ensaio 1	Ensaio 2	Média	DESVPAD
1	320	321	<b>321</b>	0
2	293	333	<b>313</b>	28
3	320	240	<b>280</b>	56
4	306	311	<b>309</b>	4
5	323	328	<b>325</b>	3
6	342	342	<b>342</b>	0
7	331	318	<b>324</b>	10
8	332	321	<b>326</b>	8

Os resultados foram coerentes com a expectativa e apresentaram baixo desvio padrão, à exceção das amostras 2 e 3. As análises estatísticas dos resultados são apresentadas na figura 13. Em princípio, quanto maior a quantidade de gusa remanescente no cadinho, maior a viscosidade do gusa e, conseqüentemente, menor a penetração de gusa nos poros do refratário. Portanto, houve redução da penetração do gusa com o aumento do silício (~ 5 pontos percentuais quando se passou de 0,2% para 0,6%) e do enxofre (~ 4 pontos percentuais quando se passou de 0,01% para 0,07%). Por outro lado, a penetração do gusa aumentou com a adição de manganês (~ 2,5 pontos percentuais quando se passou de 0,2% para 0,6%).



(a) elemento individual



(b) elementos combinados

**Figura 13.** Efeito do silício (A), enxofre (B) e manganês (C) na penetração do gusa em bloco de carbono, representado pela área residual (em mm<sup>2</sup>) de material no cadinho. ( $R^2 = 53,14\%$ ).

Uma análise combinada destes três elementos indicou que: (i) o enxofre potencializou o efeito do silício; (ii) quando se avalia o manganês juntamente com o silício, se observa que o teor baixo de manganês não tem muito efeito na variação da viscosidade, independente do teor de silício. Mas o manganês alto potencializou o efeito do silício. Ou seja, na operação real, se o gusa apresentar altos teores de manganês e silício, a penetração de gusa no bloco de carbono deverá ser reduzida. Mas, se o gusa exibir elevado teor de manganês e baixo teor de silício, a penetração de gusa no bloco de carbono pode ser mais intensa; e (iii) com enxofre elevado, ainda que o manganês esteja alto, houve baixa penetração. Já na situação de baixo enxofre, a elevação do teor de manganês implicou em maior penetração de gusa.

## 4 CONCLUSÃO

Os resultados dos ensaios de microscopia de aquecimento surpreenderam por apresentar valores de temperatura de fluidez muito elevados para o gusa (~ 1600°C). Possivelmente, este fato seja fruto do ambiente oxidante predominante no teste. Os resultados indicaram tendência de elevação do ângulo de contato entre o gusa e o bloco de carbono (pelo qual se tem a indicação da tensão superficial do gusa) com o aumento do silício e do enxofre, e de queda com o aumento do manganês.

Os ensaios de penetração em bloco de carbono, com as diferentes amostras de gusa, apresentaram resultados coerentes com a expectativa. Foi observada tendência de elevação do gusa residual no cadinho com o aumento do silício e do enxofre, e de queda com o aumento do manganês. Uma análise combinada destes elementos indicou que: (i) o enxofre potencializou o efeito do silício; (ii) o manganês baixo potencializou o efeito do silício no que se refere ao ângulo de contato, mas não teve muito efeito na variação do gusa residual. Já quando alto, potencializou o efeito do silício no que se refere ao gusa residual. Ou seja, na operação real do alto-forno, se o gusa apresenta alto manganês e alto silício, o dano ao cadinho deverá ser menor. Mas, se tiver elevado manganês e baixo silício, apresenta forte tendência de penetrar nos poros dos blocos de carbono do cadinho; e, (iii) ambos (enxofre e manganês) baixo ou alto refletiram em baixa tensão superficial. Além disso, com enxofre elevado, ainda que o manganês esteja alto, houve baixa penetração. Já na situação de baixo enxofre, a elevação no manganês implicou em maior penetração de gusa.

## Agradecimentos

Agradecimento especial aos profissionais do Centro de Tecnologia de Ferrosos (Vale).

## REFERÊNCIAS

- 1 DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG. DIN 51730-1998-04. Testing solid fuels. Determination of fusibility of fuel ash. Berlin, 1998.
- 2 ALHANATI, L. S.; Física - Conceitos Básicos. Disponível em : <<http://www.alfaconnection.pro.br/fisica/fisicoquimica/tensao-superficial/conceitos-basicos/>> Acesso em 16 de janeiro de 2017.
- 3 KUL'BOVSKII, I. K. Influence of Chemical Composition Temperature and Holding Time on Surface Tension of Molten Cast Iron. Steel in Translation. Vol. 22, pp. 389-391, 1992.