

QUANTIFICAÇÃO DA INFLUÊNCIA DA COMPOSIÇÃO QUÍMICA DO FERRO-GUSA SOBRE A SUA VISCOSIDADE¹

Emanoel Nascimento Junior²
Fernando Tadeu Pereira de Medeiros³
Sidiney Nascimento Silva⁴
Fernando Vernilli Junior⁵
Sebastião Jorge Xavier Noblat⁶

Resumo

O presente trabalho visa a quantificar a influência da composição química e da temperatura do ferro-gusa na sua viscosidade, através de experimentos conduzidos em aparato montado neste mesmo projeto e do tratamento matemático dos dados com o uso de redes neurais artificiais. As amostras utilizadas foram coletadas nos canais de corridas dos altos-fornos da CSN e algumas tiveram suas composições químicas modificadas em laboratório para criar as condições de avaliação da influencia do silício, manganês, fósforo, enxofre e titânio, além da temperatura. Os resultados foram satisfatórios para as condições disponíveis e as relações desejadas foram obtidas com sucesso. A viscosidade foi, neste trabalho, indicada pela corrente elétrica consumida pelo motor que acionava um rotor girando a velocidade constante em uma amostra de ferro-gusa fundido. O trabalho abre um campo de estudos pouco explorado apesar de sua importância para a operação e para a longevidade da campanha dos altos-fornos.

Palavras-chave: siderurgia; ferro-gusa; viscosidade.

QUANTIFICATION OF THE INFLUENCE OF CHEMICAL COMPOSITION ON THE HOT METAL VISCOSITY

Abstract

The present work aims at quantifying the influence of chemical composition and temperature on the hot metal viscosity. The experiments were conducted on specially assemble apparatus and data were analyzed with the help of artificial neural networks. Samples utilized were collected from CSN's blast furnaces main runners and some had their chemical composition modified to allow the evaluation of silicon, manganese, phosphorus and titanium, besides temperature, on the hot metal viscosity. Results were satisfactory for the available conditions. The viscosity was, in this work, indicated by the electric current through the motor, rotating which drove at constant speed, the spindle immersed in a molted iron sample. The work opens the field that is a little explored in spite of its importance for blast furnace operation and campaigns term.

Key words: Ironmaking; Hot-metal; Viscosity.

¹ Contribuição técnica ao 40º Seminário de Redução de Minério de Ferro e Matérias-primas e 11º Seminário Brasileiro de Minério de Ferro, 19 a 22 de setembro de 2010, Belo Horizonte, MG.

² Aluno de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica, Universidade Federal Fluminense.

³ Professor do Curso de Engenharia Metalúrgica, Universidade Federal Fluminense.

⁴ Gerente da Companhia Siderúrgica Nacional.

⁵ Engenheiro Químico, FACTER, Companhia Siderúrgica Nacional

⁶ Engenheiro Metalurgista, Especialista em Siderurgia da Companhia Siderúrgica Nacional

1 INTRODUÇÃO

No processo produtivo em altos-fornos, estratégias de operação que buscam alta produtividade comparadas àquelas que visam ao prolongamento das campanhas dos altos-fornos divergem entre si em suas conseqüências. Alta produtividade subentende elevado número de corridas e altas taxas de escoamento no cadinho dos altos-fornos, acarretando solicitações térmicas e mecânicas maiores sobre o refratário do mesmo. Sabe-se que um fator determinante para encerramento das campanhas dos altos-fornos é o desgaste do revestimento refratário do cadinho. Portanto, diversas ferramentas operacionais são utilizadas para prevenir ou até mesmo controlar desgastes prematuros do refratário do cadinho, quando submetidos a elevadas taxas de produção.

Em agosto de 2005, após cinco anos de seu *revamp* em 2000, o cadinho do Alto-Forno nº 2 da CSN apresentou uma elevação excessiva das temperaturas dos termopares localizados na região entre os furos de gusa, que comprometia em parte o desempenho operacional do equipamento. Para evitar um prematuro encerramento da campanha para reparo do cadinho, foram adotadas algumas ações operacionais. Dentre as ações realizadas, pode-se citar o carregamento de ilmenita na carga metálica, aumento no comprimento dos furos de gusa, injeção de massa carbonácea entre a carcaça do forno e o tijolo refratário do cadinho, redução da produção, redução nas taxas de injeção de carvão pulverizado, redução do oxigênio para enriquecimento do ar soprado, isolamento de 3 ventaneiras e a elevação dos teores de silício incorporados ao ferro-gusa. Esta última tem o intuito de elevar a viscosidade do gusa causando a formação de uma camada de gusa sólido como proteção da superfície interna do cadinho, contribuindo assim para a redução do fluxo de calor do revestimento. Com base nisto foi alterada a faixa de incorporação do silício no ferro-gusa, passando de 0,40% para 0,60%.

Do ponto de vista operacional, o conjunto de ações foi benéfico para a preservação da campanha do alto-forno, mas especificamente para a ação de elevação do silício, existem conseqüências causadas pela sua implantação, que influenciam no custo operacional dos altos-fornos e da aciaria. Portanto, é necessário que seja avaliada a efetividade da ação de elevação do silício no gusa, com intuito de aumentar sua viscosidade.

O presente trabalho tem como propósito buscar, através de ensaios laboratoriais com ferro-gusa líquido e com auxílio das redes neurais artificiais, avaliar e influência da composição química e da temperatura do gusa sobre sua viscosidade.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

O motor de corrente contínua - CC - tem seu funcionamento baseado no princípio de indução eletromagnética, com o qual transforma energia elétrica em mecânica. O motor CC gira com velocidade angular, que é proporcional à tensão aplicada em suas bobinas.⁽¹⁾

A finalidade deste sistema é oferecer a energia mecânica na forma de torque para execução de infinitas atividades, só que existem leis físicas que interferem constantemente no sistema: *Lei 1. $T = 1/V$*

O torque - T - em um eixo qualquer é inversamente proporcional à velocidade - V - de rotação do eixo, ou seja, caso duplicarmos a velocidade seu torque será reduzido pela metade. O inverso também é válido: *Lei 2. $I \propto V$ e $I \propto T$*

Ao aplicar carga ao eixo, ou seja, aumentar o torque, a rotação não varia acentuadamente, mas, uma maior potência será solicitada da fonte de alimentação, (aumentando a intensidade de corrente de alimentação do motor). Resumidamente, ao ser solicitada um maior torque, é necessária a elevação da intensidade de corrente.

Ao ser exigida uma maior carga, o aparelho diminui a rotação (torque se eleva - Lei 1), o qual provoca a elevação da corrente e, baseado na Lei 2, oferece um maior torque, já que a situação exige força e não velocidade. Assim, a medida que se aumenta a carga, exige-se um torque maior e conseqüentemente, uma maior intensidade de corrente.

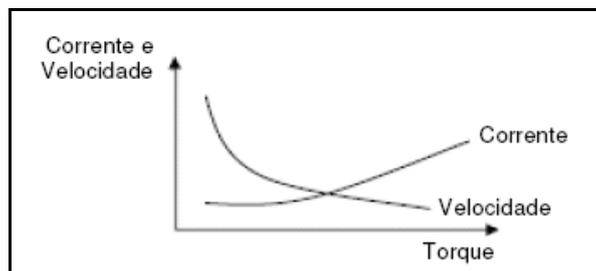


Figura 1: Comportamento das variáveis de controle de um motor de corrente contínua (CC).⁽²⁾

A Figura 1 representa o comportamento das principais variáveis elétricas de um motor CC, quando submetido a aumento de carga em seus rotores. Percebe-se com clareza que o acréscimo da corrente e o decréscimo da velocidade, são diretamente proporcionais ao aumento do torque no motor.

Para medir e avaliar a viscosidade do gusa, para diferentes composições químicas a diferentes temperaturas, foram realizados ensaios utilizando-se o conjunto de equipamentos apresentados nas Figuras 2 e 3.

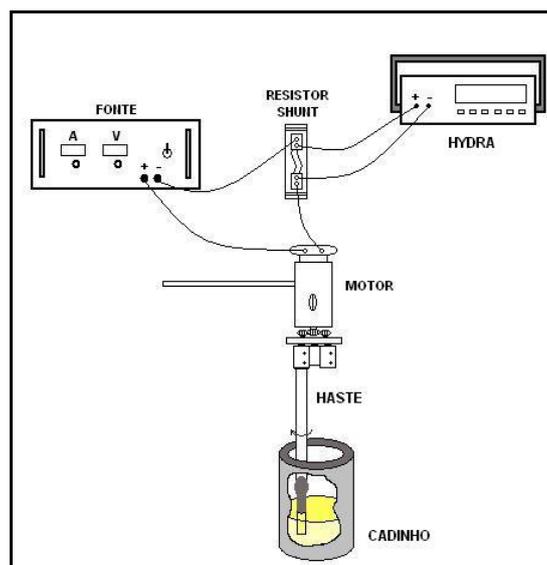


Figura 2: Desenho esquemático dos equipamentos utilizados para realização dos Ensaios.

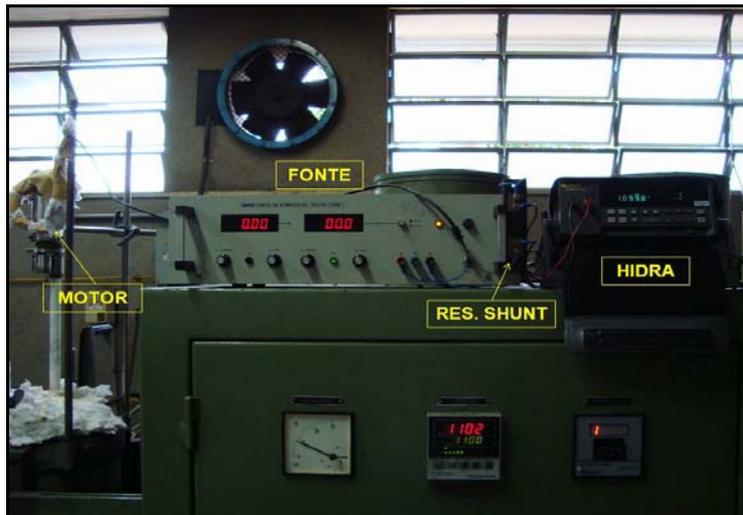


Figura 3: Foto ilustrativa dos equipamentos utilizados para realização dos ensaios.

Foi utilizada uma fonte regulável para fornecimento de uma tensão constante ao motor possibilitando obter uma velocidade constante e igual para todos os ensaios. Em série ao circuito, foi ligado um resistor *shunt* (Figura 2), possibilitando os registros dos valores de corrente, exigidos pelo motor durante a realização dos ensaios. Os resistores *shunt* são grandes componentes metálicos com baixíssima resistência à passagem da corrente em sua estrutura, permitindo a medição da corrente que por ele percorre.⁽³⁾ Em função da lei de Ohm, toda variação de tensão, gerará uma corrente, podendo esta ser medida.

Os sinais de corrente eram conseqüentemente armazenados no *Fluke- Hydra* (equipamento de armazenamento de dados). As correntes eram lidas e armazenadas durante a realização dos ensaios, em intervalos de 2 em 2 segundos. Posteriormente, a média dos valores armazenados durante cada ensaio foi utilizada para realização dos gráficos comparativos nos resultados.

O movimento giratório da haste de alumina com o *spindle* de grafite diretamente com o banho de gusa líquido fundido no cadinho (Figura 2), foi realizado pelo motor de corrente contínua (CC), ilustrado na Figura 4. O contato com o gusa líquido no cadinho foi realizado através de um *spindle* de grafite, fixado a haste de alumina. A massa de gusa utilizada em todos os ensaios foi calculada de modo que o *spindle* ficasse distando 15 mm do fundo do cadinho e imerso em 45 mm no banho de gusa. A não padronização da altura de imersão do *spindle* no gusa líquido poderia causar uma variação na medição dos valores reais de corrente, durante os ensaios.

O ponto chave para medição da viscosidade do gusa, portanto, está na corrente medida durante a realização dos ensaios com o gusa líquido, para as temperaturas desejadas. Um gusa mais viscoso fornecerá uma maior resistência ao movimento do *spindle*, o qual transmitirá esta carga ao motor e, conseqüentemente, uma maior intensidade de corrente será exigida pelo motor. Os valores posteriormente apresentados no trabalho são referentes às médias das correntes medidas durante os ensaios.

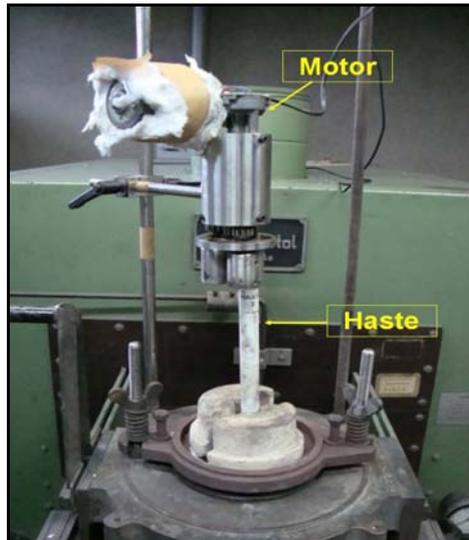


Figura 4: Motor e a Haste de alumina.

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1 Resultados com a Variação da Temperatura e Teor de Silício

Os resultados dos ensaios realizados somente com a adição de silício são apresentados na Tabela 1. Os valores de corrente medidos durante os ensaios mostraram que a temperatura e os teores de silício no gusa possuem direta correlação com a viscosidade.

Constatou-se que os valores de corrente solicitados pelo motor aumentaram em função do acréscimo do teor de silício no gusa e diminuíram quando avaliados em função da temperatura.

A Figura 5 mostra os resultados dos ensaios realizados para as três temperaturas, 1.400°C, 1.450/C e 1.500 °C, respectivamente, onde é comprovada a real influência do teor de silício na viscosidade do gusa.a correlação da temperatura e dos teores de silício nos valores de corrente medidos. Evidenciam-se os valores de R² das linhas de tendências exponenciais plotadas para cada temperatura. Os valores são satisfatórios para atestar que os parâmetros analisados nos ensaios influenciam significativamente na viscosidade do gusa.

Tabela 1: Resultados dos ensaios com adição de silício.

Ensaio	% Si	Valores de Corrente Medidos (mA)		
		1400 °C	1450 °C	1500 °C
1° Ensaio	0,22	757,6	745,3	740,4
2° Ensaio	0,41	761,1	747,5	745,3
3° Ensaio	0,59	802,1	774,9	760,6
4° Ensaio	0,80	820,5	797,3	778,2

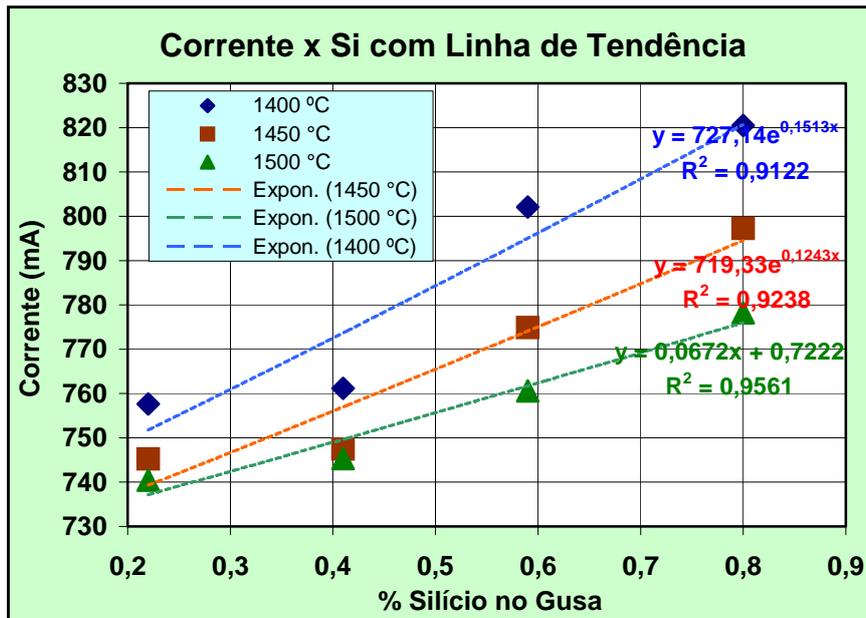


Figura 5 - Apresentação dos 3 ensaios com linha de tendência.

3.2 Resultados com Amostras Aleatórias Utilizando Redes Neurais

A Tabela 2 apresenta os dados dos ensaios realizados com as amostras de gusa variando a composição química dos seus elementos aleatoriamente.

Tabela 2: Resultados dos ensaios com amostras aleatórias

Amostras	Composição Química - %					Valores de Corrente Medidos (mA)		
	Si	Mn	P	S	Ti	1400 °C	1450 °C	1500 °C
1	0,22	0,41	0,071	0,02	0,022	757,6	745,3	740,4
2	0,45	0,51	0,069	0,012	0,036	801,1	767,6	744,1
3	0,51	0,54	0,093	0,010	0,049	840,0	813,0	795,9
4	0,76	0,48	0,092	0,032	0,085	958,9	921,5	915,3
5	1,06	0,40	0,086	0,052	0,056	982,4	949,5	940,0
6	1,63	0,49	0,102	0,031	0,074	989,2	965,9	956,0
7	2,28	0,45	0,099	0,053	0,093	1,005	981,5	942,6

Uma rede neural, com arquitetura desenvolvida para problemas dessa natureza⁽⁴⁾ associou os valores de corrente aos teores dos elementos. O treinamento foi desenvolvido através do *Matlab*®. Os parâmetros encontrados são apresentados na Tabela 3. Os valores W_{1ij} e b_{1j} são referentes aos pesos representativos das variáveis consideradas na primeira camada e os valores de suas respectivas *bias*. Os valores W_{2j} e b_2 são referentes aos pesos finais de cada variável e incremento escalar, respectivamente, da segunda camada. A Figura 6 apresenta os valores de corrente estimados contra a corrente real medida. Mostrando-se satisfatórios para que se pudesse estimar os valores de corrente medidos.

Tabela 3: Parâmetros encontrados com a rede neural

1ª Camada					
W1 i j	1	2	3	4	5
1	-0,7632	-0,9335	-0,3429	1,2898	0,7624
2	1,1014	-0,7758	1,3701	2,9660	0,2236
b1 j	-1,5782		2,3186		
2ª Camada					
W2 j	0,8702		0,0989		
b2	-0,2404				

A Figura 7 apresenta os resultados estimados pela rede neural. Os valores das outras variáveis não apresentadas nos gráficos foram fixados para avaliação da influência isolada da variável em análise somente. As variáveis consideradas foram: o silício, manganês, enxofre, titânio e temperatura.

Percebe-se que os valores de corrente aumentam com a elevação dos teores de Si, Mn, S e Ti, e decrescem com o aumento da temperatura. Porém, para o enxofre, esperava-se que sua influência na viscosidade fosse no sentido de diminuí-la. Provavelmente, existiu algum outro elemento que acompanhou a variação do enxofre nas taxas de incorporação, interferindo no resultado quando analisado separadamente.

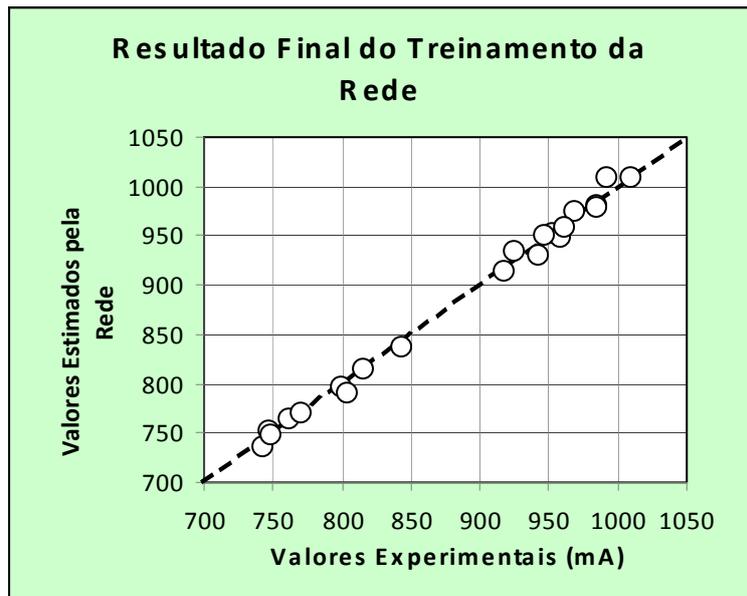


Figura 6 - Resultado do treinamento da rede.

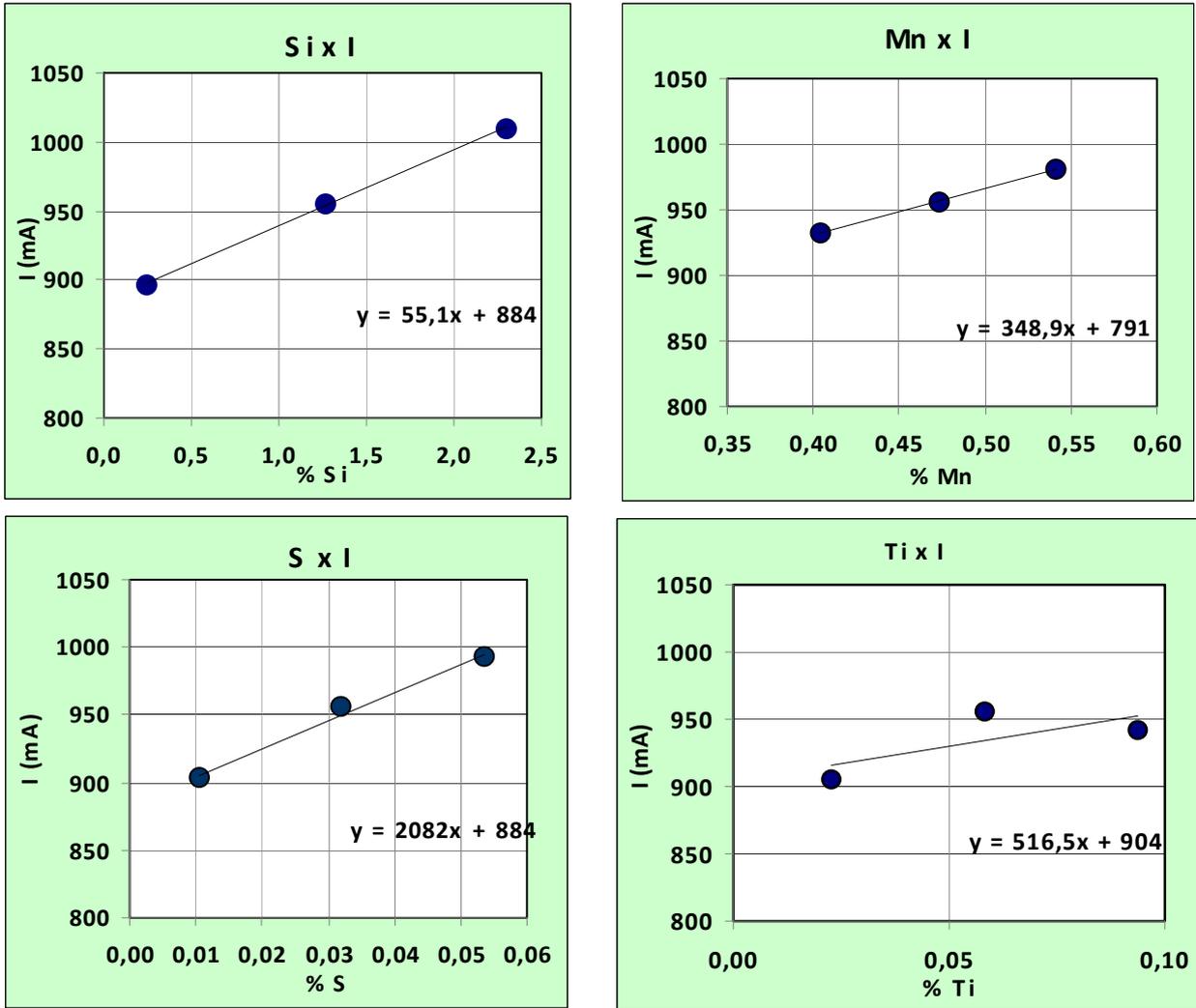


Figura 7 - Regressões entre corrente e os teores dos elementos dissolvidos no gusa.

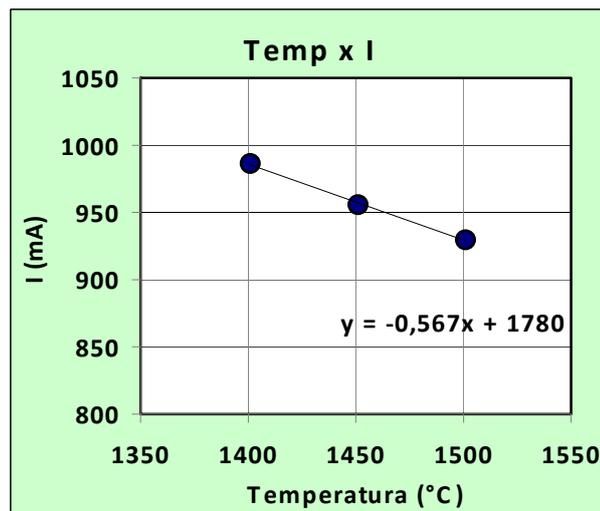


Figura 8 - Dados calculados pela rede para a temperatura.

A Figura 7 apresenta as correlações dos teores de silício incorporados nas amostras comparados aos outros elementos. Observa-se que com exceção somente para o

manganês, os outros valores sofreram uma covariância, ou seja, os valores acompanharam as taxas de incorporação do silício.

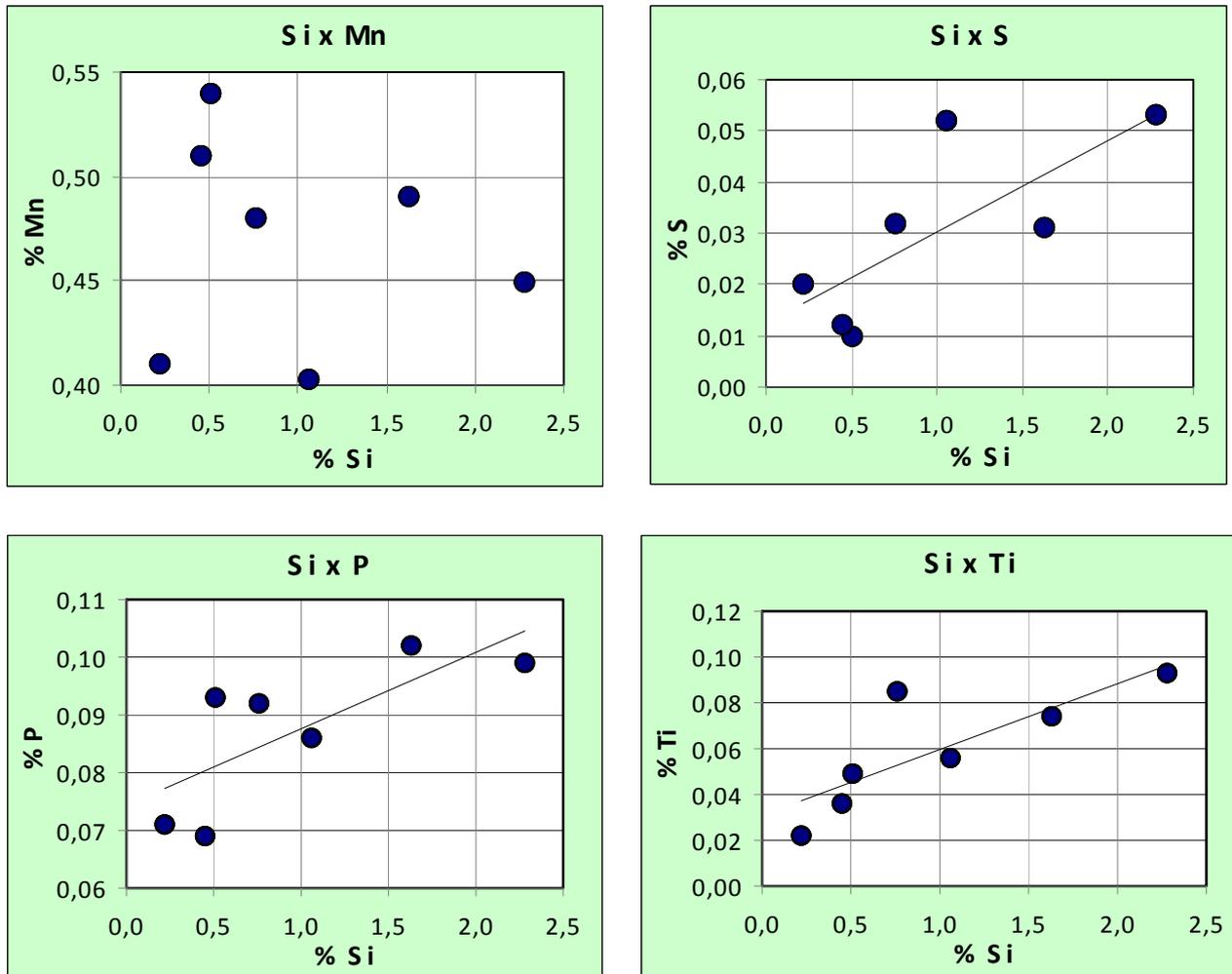


Figura 9 - Relações entre os elementos dissolvidos no gusa nas amostras usadas.

Não foram encontrados na literatura dados semelhantes que pusessem ser comparados.

5 CONCLUSÃO

Pôde-se comprovar a influência da composição química e da temperatura do ferro-gusa sobre sua viscosidade.

Confirmou-se a efetividade da ação de aumento do teor de silício com intuito de aumentar a viscosidade do gusa.

A temperatura mostrou forte influência na viscosidade, diminuindo-a com o seu aumento, conforme já era esperado.

Os resultados obtidos com a rede neural foram satisfatórios para as condições disponíveis. A técnica demonstrou ser efetiva para estimar os valores de correntes medidos para quantificar e avaliar a viscosidade do gusa. Porém, para o número de variáveis apresentadas, seria necessário um maior número de ensaios, para que pudesse ser avaliada a influência de um elemento sem a interferência de outro.



O trabalho abre um campo de estudos pouco explorado, apesar de sua importância, para a operação e para a longevidade da campanha dos altos-fornos.

Agradecimentos

Os autores agradecem à Companhia Siderúrgica Nacional pela oportunidade de realizar e apresentar este trabalho e a todos aqueles que colaboraram com seu desenvolvimento.

REFERÊNCIAS

- 1 DEL TORO, V. - *"Fundamentos de Máquinas Elétricas"* - Rio de Janeiro - LTC, 1994.
- 2 JIANG, X.; et al - *"High Efficient Technology of Steelmaking With Low Silicon Hot Metal on Large Converter"* - Journal of Iron And Steel Research, International, 2007, 14(6): 27-31, 52.
- 3 <http://pt.tech-faq.com/shunt.shtml&prev=hp&rurl=translate.google.com>, acessado em 08/11/2009.
- 4 MEDEIROS, F T P. *Desenvolvimento de um modelo de predição de condições operacionais de altos-fornos siderúrgicos com base em redes neurais artificiais*. Tese de Doutorado, FEQ/UNICAMP, 2006.