

# ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DOS PARÂMETROS TEMPERATURA, AGITAÇÃO DO BANHO E MASSA DE MISTURA NA DESFOSFORAÇÃO DO FERRO-GUSA \*

Raphael Mariano de Souza<sup>1</sup>  
Anna Paula Littig Berger<sup>2</sup>  
Rodrigo de Oliveira Pezzin<sup>3</sup>  
Heitor Cristo Clem de Oliveira<sup>4</sup>  
Caio Vaccari Silva<sup>5</sup>  
José Roberto de Oliveira<sup>6</sup>

## Resumo

Neste trabalho foram estudadas as influências de temperatura, massa de mistura e agitação do banho metálico na eficiência da desfosforação. Para isto, foram realizados testes com três diferentes misturas, variando esses parâmetros, coletando amostras do metal ao longo do tempo e realizando análises químicas. A eficiência nos experimentos foi limitada pela aglomeração da mistura, devido à baixa granulometria. Assim, as influências esperadas, com base na literatura, da temperatura e da massa de mistura para este caso foram determinadas. O grau de agitação do banho metálico se mostrou um parâmetro notavelmente relevante no processo, bem como a granulometria dos reagentes da mistura.

**Palavras-chave:** Desfosforação; Pré-Tratamento; Ferro Gusa.

## ANALYSIS OF THE INFLUENCE OF TEMPERATURE, METAL MIXING AND DEPHOSPHORIZING MIXTURE MASS IN HOT METAL DEPHOSPHORIZATION

## Abstract

This work aims to analyze the influence of temperature, mixture mass and metal mixing in the efficiency of the dephosphorization. The tests were carried out with three different mixtures, varying these parameters, collecting samples of the metal over a determined time of process and performing chemical analyzes. The efficiency in the experiments was limited by the agglomeration of the mixture, due to the low granulometry. Thus, the expected influences, based on the literature, on the temperature and mass of the mixture for this case were determined. The degree of agitation of the metal bath proved to be a remarkably relevant parameter in the process, as well as the granulometry of the reactants.

**Keywords:** Dephosphorization; Steelmaking; Hot Metal.

<sup>1</sup> Graduando em Engenharia Metalúrgica, Instituto Federal do Espírito Santo, Vitória, ES, Brasil.

<sup>2</sup> Mestre em Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Instituto Federal do Espírito Santo, Vitória, ES, Brasil.

<sup>3</sup> Mestre em Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Instituto Federal do Espírito Santo, Vitória, ES, Brasil.

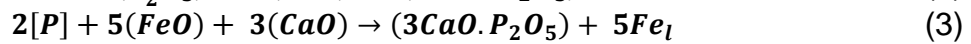
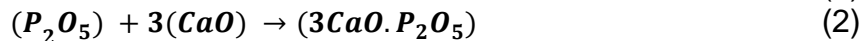
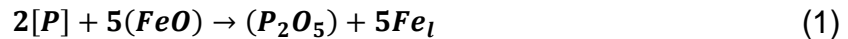
<sup>4</sup> Mestre em Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Instituto Federal do Espírito Santo, Vitória, ES, Brasil.

<sup>5</sup> Engenheiro Metalurgista e Mestrando em Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Instituto Federal do Espírito Santo, Vitória, ES, Brasil.

<sup>6</sup> Prof. Dr. do Instituto Federal do Espírito Santo, IFES, dos cursos de graduação e pós-graduação em Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Instituto Federal do Espírito Santo, Vitória, ES, Brasil.

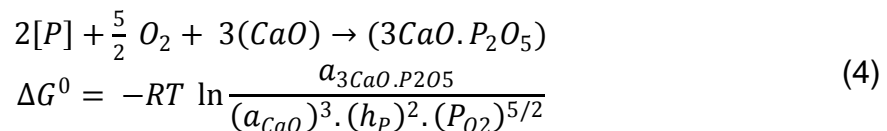
## 1 INTRODUÇÃO

A desfosforação de ferro-gusa é o processo de remoção de fósforo deste através de reações sequenciais com outros compostos. O FeO da mistura desfosforante é responsável por oxidar o fósforo presente no gusa, formando  $P_2O_5$ , enquanto o CaO é responsável por diminuir a atividade do  $P_2O_5$  formando a fase  $3CaO.P_2O_5$ , permitindo que mais fósforo seja removido do banho metálico e seja estabilizado na escória, evitando a reversão do fósforo. Esse processo é representado pelas equações 1 e 2 respectivamente ou pela reação global (Equação 3) [1][2]:



$$\Delta G^0 = (-204.450 + 83,55 T) \text{ cal/mol}$$

Para uma avaliação termodinâmica qualitativa, é assumido que a remoção do fósforo ocorre na interface metal escória, com a formação do  $3CaO.P_2O_5$ . Tendo em vista que a oxidação do fósforo ocorre pela reação com o FeO e que o FeO vem da oxidação do Fe pelo oxigênio dissolvido proveniente do sopro de gás oxigênio, pode-se alternativamente descrever o processo pela Equação 4:



A partir de manipulações algébricas da Equação 4, utilizando conceitos de potencial de oxigênio e atividade henriana, temos que:

$$\ln(\%P)_{eq} = \frac{1}{2} \ln(a_{3CaO.P_2O_5}) + \frac{\Delta G^0}{2RT} - \frac{5\mu_{O_2}}{4RT} - \frac{3}{2} \ln(a_{CaO}) - \ln(f_P) \quad (5)$$

Onde temos que  $a$ : Atividade raoultiana dos compostos presentes na escória;  $R$ : Constante universal dos gases (J/mol.K);  $T$ : Temperatura (K);  $\mu_{O_2}$ : Potencial de oxigênio,  $f_P$ : Coeficiente de atividade henriano do fósforo no metal e  $\Delta G^0$ : Energia livre de Gibbs no estado padrão.

A partir da Equação 5, pode-se realizar a análise da influência de alguns fatores na porcentagem de fósforo de equilíbrio para a desfosforação (objetiva-se o menor valor possível), cujo resultado é apresentado na Tabela 1:

**Tabela 1.** Influência de alguns fatores termodinâmicos sobre  $\%P_{eq}$  na desfosforação do ferro-gusa

FATOR	INFLUÊNCIA
$T$	Quanto mais baixa, maior o valor negativo para o termo $(\Delta G^0/2RT)$ , visto que $\Delta G^0 < 0$ , e maior o valor negativo para o termo $(5\mu_{O_2}/4RT)$ , logo menor o valor de $\%P_{eq}$
$a_{CaO}$	Deve ser a maior possível, o que corresponde ao aumento da basicidade, e menor $\%P_{eq}$
$\mu_{O_2}$	Quanto mais alto, menor o valor de $\%P_{eq}$ . Como a reação ocorre na interface metal-escória, o $\mu_{O_2}$ que comanda a desfosforação é o estabelecido pelo equilíbrio Fe/FeO na

Fonte: Autor, 2018

Da Tabela 1, depreende-se que, do ponto de vista termodinâmico, o ambiente ideal para a desfosforação é aquele de baixa temperatura, alto potencial de oxigênio e alta basicidade de escória.

Analisando o processo sob a óptica da cinética aplicada à desfosforação, a Figura 1 (a) mostra uma curva típica de desfosforação em ferro-gusa (adaptado de Wei e colaboradores, 1993 e Nasu e colaboradores, 1999), onde os compostos simbolizados por ( ) estão presentes na escória e por [ ] no metal. Já (b) mostra o comportamento cinético dos óxidos na escória.

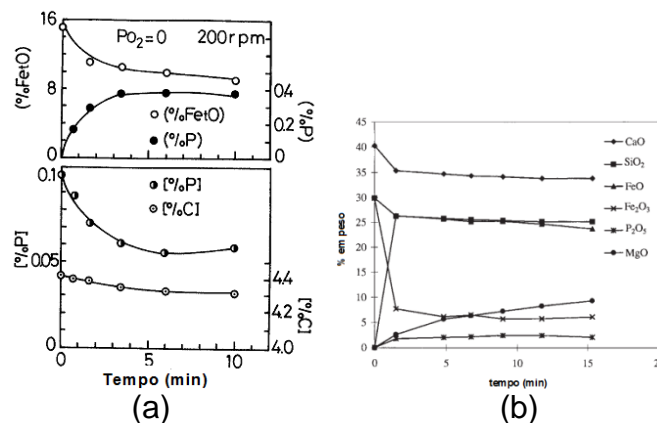


Figura 1. Comportamento (a) do fósforo no metal e (b) dos óxidos na escória com o tempo.

Wei e colaboradores [3] investigaram os parâmetros cinéticos da oxidação do fósforo do ferro-gusa mediante utilização de mistura CaO-Li<sub>2</sub>O-SiO<sub>2</sub>-Fe<sub>t</sub>O a 1.300°C sob atmosfera de Ar-O<sub>2</sub> e condições de agitação mecânica. De acordo com o autor, sob atmosfera de gás inerte, considera-se as seguintes etapas de controle da cinética da reação de oxidação do fósforo. A Figura 2 [4] ilustra as etapas descritas nos itens (a) a (d).

- Transferência do fósforo dissolvido no metal para a interface metal-escória;
- Transferência do FeO contido na escória para a interface metal-escória;
- Reação de oxidação do fósforo na interface metal-escória;
- Transferência do óxido (P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>) a partir da interface metal-escória para a escória.

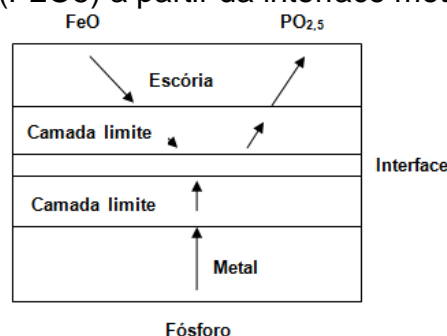


Figura 2. Ilustração esquemática do mecanismo de desfosforação

Assumindo que a reação desfosforação é controlada pelo transporte de massa do fósforo no metal e na escória [3], temos que a equação da velocidade representada pela Equação 6:

$$-\frac{d[\%P]}{dt} = k' \frac{A\rho_m}{W_m} ([\%P] - [\%P_{eq}]) \quad (6)$$

Sendo  $k'$ : Coeficiente de transferência de massa global, que inclui, dentre outros fatores,  $k_m, k_s, \rho_s$ ;  $m, s$ : Denotam fase metal e fase escória, respectivamente;  $\rho$ : Densidade ( $\text{kg/m}^3$ );  $A$ : Área interfacial ( $\text{m}^2$ );  $W_m$  = Massa de metal (kg).

A incorporação de fósforo no aço requer o controle adequado de teor devido aos potenciais problemas aos quais o produto final está sujeito, como fragilidade a frio [5], fragilização ao revenido em aços de baixa liga tratados termicamente, propensão à formação de trincas transversais em regiões de segregação durante a solidificação [6], dentre outros, devido à formação de compostos eutéticos e precipitação nos contornos de grãos. Justifica-se, portanto, a importância do estudo analítico da influência de parâmetros operacionais como quantidade de mistura desfosforante (massa), temperatura e agitação do banho na desfosforação do gusa, correlacionando-os com a eficiência do processo, a fim de contribuir com o aprimoramento dos processos de fabricação do aço, a fim de obter produtos com qualidade satisfatória aos os fins desejados, produtividade e baixo custo.

Nesse estudo, junto aos experimentos, foi utilizado o pacote de *software* termodinâmico FactSage versão 7.0, que pode ser usado para prever composição do líquido e do sólido formado em variadas temperaturas e outros parâmetros correlacionados. Tal abordagem foi escolhida pela boa correlação apresentada entre os parâmetros calculados pelo software e os dados reais obtidos experimentalmente, comprovado por estudos já publicados, como SAMPAIO [4] e OLIVEIRA [7].

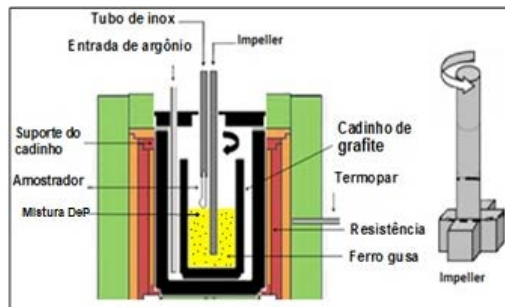
## 2 DESENVOLVIMENTO

### 2.1 MATERIAIS E MÉTODOS

Para realizar os testes foi utilizado um forno de resistência elétrica, da fabricante FORTELAB (Indústria de Fornos Elétricos LTDA), modelo MEV 1500/V, potência de 12000 W, tensão de 220 volts, corrente de 50 ampéres, quatro entradas de Termopar tipo “S” e temperatura máxima de trabalho de 1650°C.

Após atingida a temperatura de 1400°C do forno, o gusa sólido foi carregado em cadinho feito de MgO, com auxílio de uma tenaz e colocado dentro do forno para ser feita a fusão do material. Então, foi injetado gás argônio, na vazão de 4 NI/min, a fim de manter inerte a atmosfera para evitar a oxidação do metal, e em nenhum dos experimentos foi observada a formação de escória antes da adição dos agentes desfosforantes, comprovando que o ambiente estava inerte e controlado. Nessas condições, o gusa leva, em média, 40 minutos para fundir totalmente. Depois de constatado que o ferro-gusa estava totalmente fundido, foi retirada uma amostra do metal (tempo “zero”) a fim de analisar a composição química inicial do mesmo. As amostras foram retiradas com o uso de amostrador a vácuo acoplado a uma haste de aço inoxidável.

A Figura 3 ilustra esquematicamente o sistema de coleta das amostras de metal líquido utilizado durante os testes:



**Figura 3.** Esquema de retirada das amostras durante os testes experimentais

As massas sólidas de gusa foram pesadas utilizando uma balança BEL Engineering modelo SSR-3000, e as composições iniciais do ferro-gusa, obtida a partir das análises químicas das amostras coletados no tempo “zero” de cada experimento, são expostas na Tabela 2:

**Tabela 2.** Composição inicial do gusa para cada experimento, obtida por análise química

Experimento	%C	%P	%S	%Si	%Mn
1	4,3728	0,0592	0,0438	0,2571	0,2049
2	4,4856	0,0582	0,0349	0,289	0,213
3	4,5	0,0598	0,0431	0,2914	0,2928
4	4,4706	0,0655	0,0335	0,27	0,209
5	4,4649	0,0618	0,0273	0,2925	0,2149
6	4,369	0,0612	0,0423	0,2852	0,2227
7	4,3309	0,0649	0,0447	0,2838	0,2224
8	4,4461	0,0617	0,0403	0,2961	0,2199
9	4,3926	0,0621	0,0337	0,3023	0,2222
10	4,4593	0,064	0,0387	0,2978	0,2328
11	4,4628	0,063	0,0312	0,2823	0,2208
12	4,2803	0,0612	0,0325	0,3313	0,2245

**Fonte:** Autor, 2018

Após a retirada da amostra inicial, adicionou-se mistura desfosforante no banho metálico, com auxílio de um funil acoplado a um tubo de aço inoxidável, visando direcionar a mistura para dentro do cadinho. E o tempo de reação passou a ser contado imediatamente após o carregamento, utilizando-se um cronômetro digital. Foram retiradas amostras antes das adições e nos tempos de 3, 6, 9, 15 e 20 minutos após as adições.

Foi, feita agitação através de um agitador mecânico posicionado em cima do forno, e sua haste passada pela abertura deste após a adição da mistura desfosforante. A agitação foi interrompida a cada retirada de amostra e, logo após, reiniciada.

Foram utilizadas misturas contendo FeO, CaO, SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> e MgO em pureza de padrão analítico e granulometria 100% abaixo de 1mm do experimento 1 ao 11, e cal granulada e pellet feed, de granulometria mais grosseira, no experimento 12. As composições estão contempladas na Tabela 3:

**Tabela 3.** Definição das misturas desfosforantes e condições dos experimentos

Experimento	Mistura	FeO (%)	CaO (%)	SiO <sub>2</sub> (%)	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	MgO (%)	Temperatura (°C)	Massa (g)	Rotação (RPM)
1	60FeO	60,28	37,40	1,51	0,63	0,18	1400	70	450

2	65FeO	65,00	32,68	1,51	0,63	0,18	1400	70	450
3	56FeO	56,35	41,33	1,51	0,63	0,18	1400	70	450
4	60FeO	60,28	37,40	1,51	0,63	0,18	1400	70	550
5	60FeO	60,28	37,40	1,51	0,63	0,18	1400	70	350
6	65FeO	65,00	32,68	1,51	0,63	0,18	1400	65	450
7	56FeO	56,35	41,33	1,51	0,63	0,18	1400	65	450
8	65FeO	65,00	32,68	1,51	0,63	0,18	1400	60	450
9	56FeO	56,35	41,33	1,51	0,63	0,18	1400	60	450
10	65FeO	65,00	32,68	1,51	0,63	0,18	1350	70	450
11	56FeO	56,35	41,33	1,51	0,63	0,18	1350	70	450
12	60FeO+	60,28	37,40	1,51	0,63	0,18	1400	70	450

Fonte: Autor, 2018

Os procedimentos descritos foram repetidos para as três diferentes misturas, com variação de massa para 65FeO e 56FeO, de temperatura para 65FeO e 56FeO e da agitação do banho para a mistura 60FeO. O experimento 12 foi conduzido da mesma maneira que o número 1, mas com uma mistura de diferente granulometria.

Após os experimentos realizados, as amostras retiradas foram enviadas para análise química e feitas pelo Laboratório de Ensaio e Análise em Materiais (LAMAT) do SENAI FIEMG, em Itaúna (Minas Gerais), com o equipamento Analisador Automático Simultâneo para Carbono e Enxofre, marca Quimitron QCS 2010 (técnica de combustão direta infravermelho) e Espectrômetro ICP Spectroflame nº 86350. Sendo que a análise para o experimento 12 foi feita apenas para composição inicial e final. E a eficiência do processo foi então calculado de acordo com a Equação 10:

$$\eta (\%) = \frac{[P]_{\text{inicial}} - [P]_{\text{final}}}{[P]_{\text{inicial}}} \times 100 \quad (10)$$

Utilizou-se então o software FactSage 7.0 com fim de simular o aquecimento da mistura desfosforante e compreender melhor as condições termodinâmicas operacionais às quais o processo de desfosforação está submetido. Os dados da simulação considerados relevantes para os fins do presente trabalho foram: atividade do CaO, atividade do FeO e porcentagem de fase sólida e líquida na escória.

## 2.2 RESULTADOS

A seguir estão apresentados, na forma de tabelas, os resultados obtidos a partir dos experimentos e análises químicas feitas nas amostras, além das simulações computacionais anteriormente descritas.

### 2.2.1 RESULTADOS - QUANTO À AGITAÇÃO

A Tabela 4 apresenta a composição química das misturas, condições experimentais e a eficiência de desfosforação de cada experimento de avaliação da agitação do metal.

**Tabela 4:** Resultados experimentais da eficiência em função da variação da agitação do metal

Experimento	Mistura	Rotação (RPM)	%P inicial	%P final	$\eta$ (%)
1	60FeO	450	0,0592	0,0429	27,53
4	60FeO	550	0,0655	0,0421	35,73
5	60FeO	350	0,0618	0,0484	21,68

Fonte: Autor, 2018

## 2.2.2 RESULTADOS - QUANTO À TEMPERATURA

A Tabela 5 apresenta a composição química das misturas, condições experimentais e a eficiência de desfosforação de cada experimento de avaliação da temperatura.

**Tabela 5:** Resultados experimentais da eficiência em função da variação da temperatura

Experimento	Mistura	Temperatura (°C)	%P inicial	%P final	$\eta$ (%)
2	65FeO	1400	0,0582	0,0442	24,05
3	56FeO	1400	0,0598	0,0476	20,40
10	65FeO	1350	0,0640	0,0459	28,28
11	56FeO	1350	0,0630	0,0468	25,71

Fonte: Autor, 2018

## 2.2.3 RESULTADOS - QUANTO À MASSA DE MISTURA

A Tabela 6 apresenta a composição química das misturas, condições experimentais e a eficiência de desfosforação de cada experimento de avaliação da massa de mistura.

**Tabela 6:** Resultados experimentais da eficiência em função da variação da massa de mistura

Experimento	Mistura	Massa (g)	%P inicial	%P final	$\eta$ (%)
2	65FeO	70	0,0582	0,0442	24,05
3	56FeO	70	0,0598	0,0476	20,40
6	65FeO	65	0,0612	0,0469	23,37
7	56FeO	65	0,0649	0,0513	20,96
8	65FeO	60	0,0617	0,0471	23,66
9	56FeO	60	0,0621	0,0503	19,00

Fonte: Autor, 2018

## 2.2.4 RESULTADOS – EFICIÊNCIA PARA CADA EXPERIMENTO

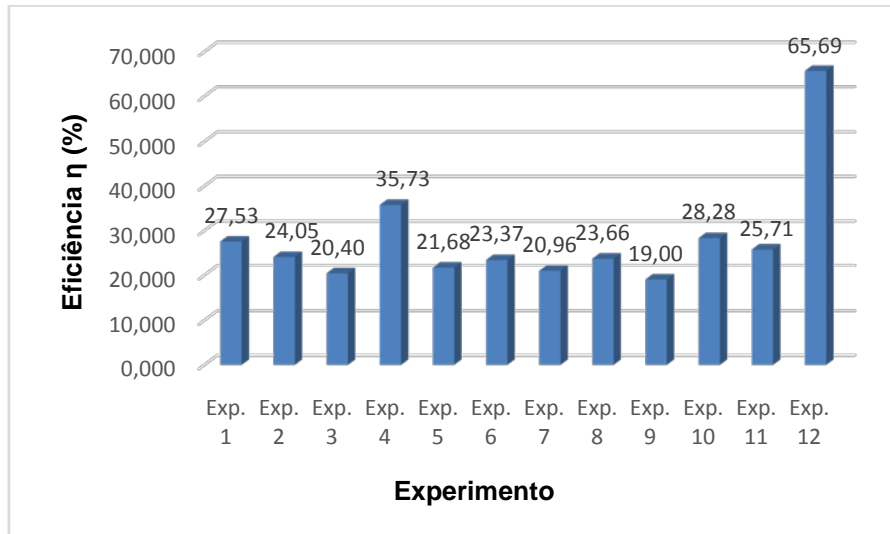


Figura 4. Eficiência de remoção do fósforo para cada experimento

## 2.2.5 RESULTADOS - SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL

A Tabela 7 apresenta os dados obtidos via termodinâmica computacional.

**Tabela 7:** Comparação entre os dados das simulações computacionais fornecidos pelo software FactSage 7.0 e a eficiência calculada com base nas análises químicas

Experimento	Mistura	%liq	%sól	aFeO	aCaO	%P <sub>eq</sub>	η(%)
1	60FeO	99,562	54,151	0,385	1	2,73E-05	27,534
2	65FeO	100,000	32,724	0,487	0,692	2,92E-05	24,055
3	56FeO	93,492	64,963	0,384	1	3,29E-05	20,401
4	60FeO	99,562	52,584	0,385	1	2,76E-05	35,725
5	60FeO	99,562	53,126	0,385	1	2,77E-05	21,683
6	65FeO	100,000	43,146	0,487	0,692	3,20E-05	23,366
7	56FeO	93,492	65,738	0,384	1	3,30E-05	20,955
8	65FeO	100,000	66,13	0,487	0,692	3,53E-05	23,663
9	56FeO	93,492	59,55	0,384	1	3,43E-05	19,002
10	65FeO	96,545	28,809	0,398	0,890	1,17E-05	28,281
11	56FeO	86,587	57,43	0,371	1	1,08E-05	25,714
12	60FeO+	99,562	54,151	0,385	1	2,73E-05	65,686

Fonte: Autor, 2018

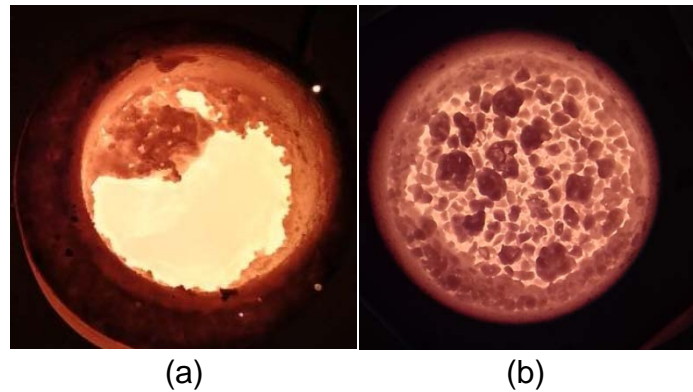
## 2.3 DISCUSSÃO

### 2.3.1 DISCUSSÃO - GRANULOMETRIA

Primeiramente, vale observar que os experimentos em questão apresentaram como resultado eficiências de desfosforação insatisfatórias a nível industrial. Essa baixa eficiência é justificada devido à granulometria excessivamente baixa dos componentes puros da mistura, que sofreram aglomeração e sinterização das partículas, subtraindo superfície de contato disponível para a reação com o fósforo do banho metálico. Objetivando a sustentação desta hipótese, foram realizados novos experimentos, com cal granulada e pellet feed (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), de granulometria mais grosseira e menor pureza. A partir da comparação entre a Figura 5 (a) e (b), feitas



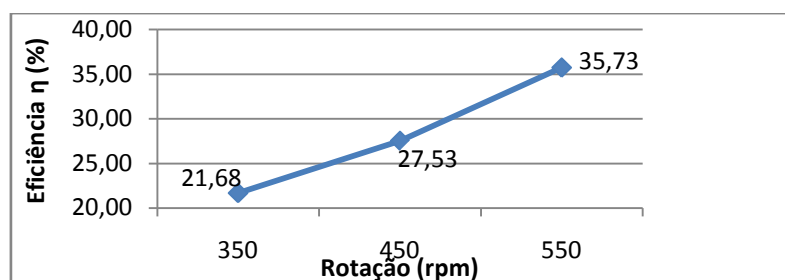
após adicionadas as misturas para o teste referente aos experimentos em discussão (60FeO) e para o novo teste, respectivamente, pode-se notar pela análise visual que, de fato, a escória formada pelo material fino se encontra em um grande aglomerado sólido, o que, explicitamente, não ocorre com a escória formada pela cal granulada e pellet feed, que apresenta sólidos dispersos. Pode-se ver em seguida as fotos supracitadas:



**Figura 5.** Escória formada (a) granulometria 100%<1mm por e (b) material de granulometria grossa

A comparação entre os experimentos 1 e 12 feita a partir da tabela 7 mostra que, pelos resultados da simulação termodinâmica computacional, não seria possível identificar a diferença entre as misturas 60FeO e 60FeO+, pois a composição química é exatamente a mesma. Entretanto, as análises químicas revelam que a mistura com granulometria grossa apresentou um ganho de eficiência, sendo esta de 65,686% para 27,534% da mistura com material fino, uma diferença de 38,152%; pode-se observar que apenas esta diferença já supera a eficiência da segunda mistura mais eficiente (Experimento 4). Portanto pode-se afirmar que a superfície da mistura aglomerada diminui a interface entre metal – escória líquida, diminuindo a velocidade de DeP de acordo com a Equação (6).

### 2.3.2 DISCUSSÃO - AGITAÇÃO



**Figura 6.** Variação da eficiência com a agitação do banho

A partir da perspectiva fornecida pelo Figura 6, a eficiência da mistura desfosforante cresce proporcionalmente ao aumento do grau de agitação do banho, demonstrando estar de acordo com o que é proposto pela cinética. O aumento da rotação do impeller agita o banho e diminui a espessura da camada limite do metal para a escória, diminuindo a resistência e facilitando a difusão do P para a interface metal-

escória. Expressando em termos matemáticos, ocorre o aumento do coeficiente de transferência de massa no metal  $k_m$  da desfosforação e, conseqüentemente, o coeficiente de transferência de massa global, apresentado e descrito pela Equação 6, assim subtraindo maior quantidade de fósforo em um mesmo tempo. O ganho de eficiência apresentado é de 5,85% com aumento de 350 para 450 rpm, e de 8,2% de 450 para 550 rpm, ou de 14,05% comparando 350 e 550rpm.

### 2.3.3 DISCUSSÃO - TEMPERATURA

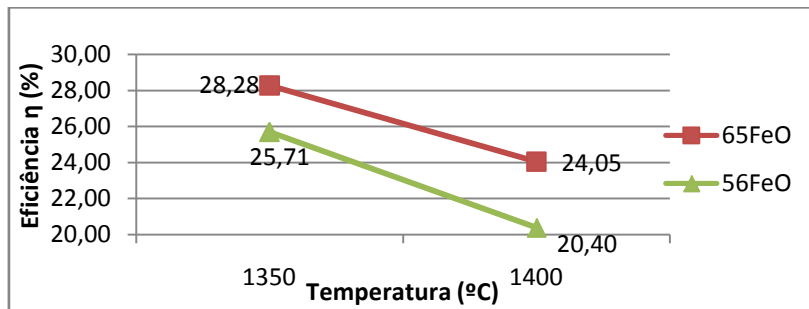


Figura 7. Variação da eficiência com a temperatura

Ao se analisar a Figura 7 do ponto de vista termodinâmico, os dados se encontram de acordo com o que se espera, visto que a reação global da desfosforação é exotérmica, e de acordo com a lei de Le Chatelier, reações exotérmicas são favorecidas pela diminuição de temperatura. Para a mistura 65FeO a eficiência decresce em 3,75% com a variação de 50°C e para 56FeO essa variação é de 5,31%.

Sob a óptica da cinética aplicada à desfosforação, com base na Equação 6, espera-se que a eficiência diminua com o aumento da temperatura, uma vez que o aumento da temperatura aumenta o valor de  $\%P_{eq}$ , diminuindo a drive force da reação ( $\%P - \%P_{eq}$ ), conforme sustentado pelos resultados da simulação computacional na Tabela 7 (experimentos 2 e 10, 3 e 11).

Por outro lado, ao analisarmos as simulações dos experimentos com aumento de temperatura nota-se que houve um aumento na quantidade de fase líquida. Analisando, portanto, a situação em paralelo à equação cinética, a maior porcentagem de fase líquida causa aumento da área interfacial disponível para a reação e diminui a viscosidade da escória, facilitando a difusão do fósforo na escória e assim aumentando o coeficiente de transporte de massa global. Deve-se tomar nota que a reação sólido-líquido é desprezível e que a desfosforação ocorre entre a escória e o banho na forma líquida (reação líquido-líquido). Pela Equação 6, este fato deveria aumentar a velocidade de desfosforação e conseqüentemente a eficiência. Entretanto, isto não ocorreu, provavelmente devido à aglomeração da mistura, e por isso não ocorreu de fato o aumento da fração de líquido com o aumento da temperatura. Neste caso, portanto, o que prevaleceu foi a diminuição da drive force (Equação 6), diminuindo a eficiência com o aumento da temperatura.

Em vista da definição real de porcentagem de fase sólida e líquida ser prejudicada devido à aglomeração da mistura (conforme fora também discutido no tópico 2.3.1),

a comparação entre as misturas de 1 a 11 é validada de forma qualitativa, pois os experimentos 1 a 11 são realizados com misturas de mesma granulometria. Ou seja, apesar de os números não serem necessariamente reais, a diferença qualitativa é real, pois o fator “diferença de granulometria” presente entre as misturas 60FeO e 60FeO+ não ocorre entre 60FeO, 65FeO e 56FeO, que estão submetidas às mesmas condições deste fator.

### 2.3.4 DISCUSSÃO - MASSA DE MISTURA

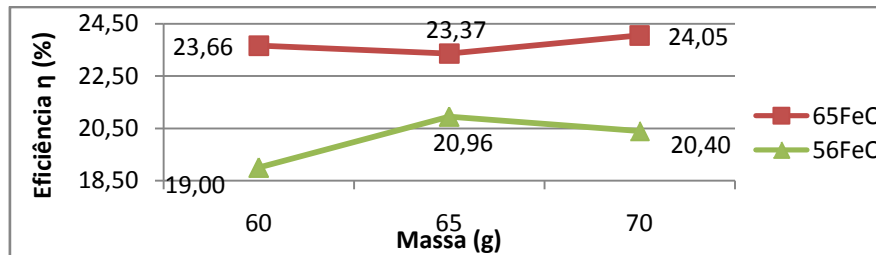


Figura 8. Variação da eficiência com a massa de mistura adicionada ao gusa

É esperado que o aumento da massa de escória melhore as condições para desfosforação, devido à maior disponibilidade de reagentes para a mesma quantidade de ferro-gusa, para que ocorram as reações químicas esperadas.

Contudo, a Figura 8, que mostra a relação entre a variação da massa de mistura e a eficiência para duas composições diferentes de mistura desfosforante, expõe dados que expressam baixa ou nenhuma correlação entre a massa de mistura e a eficiência da desfosforação.

Contudo, nem toda a massa de reagentes adicionada à mistura sofre dissolução e reage com o fósforo do banho, e tal fato é sustentado pelos resultados da simulação computacional apresentados na tabela 7, pela Figura 5 (a) e a discussão realizada no tópico 2.2.1.

Inferese-se que ocorreu aglomeração e sinterização das partículas de CaO e FeO, o que limitou a reação de desfosforação e tornou irrelevante a correlação entre a eficiência e a quantidade de mistura nas condições do presente estudo.

## 3 CONCLUSÃO

Pela análise crítica, realizada neste trabalho, a respeito dos dados obtidos nos experimentos, na literatura e nas simulações, concluiu-se que a eficiência do processo de desfosforação é notoriamente influenciado pelo grau de agitação do banho metálico e demais condições afins à perspectiva cinética, como a área interfacial disponível para reação, viscosidade e coeficiente de transferência de massa. As análises pretendidas em relação à temperatura e massa de mistura desfosforante foram limitadas pela aglomeração da mistura desfosforante, causada pela granulometria fina em excesso. Pode-se observar que, dentre os fatores que se esperava que melhorassem a eficiência da desfosforação, o único que sobrepujou a limitação sofrida foi a agitação mecânica do banho metálico, confirmando a

afirmação de que o transporte de massa no metal é uma etapa controladora do processo, e que os parâmetros associados às condições cinéticas prevalecem sobre aqueles associados às condições termodinâmicas.

A correlação entre fatores termodinâmicos e a eficiência da desfosforação se mostrou limitada e, portanto, não deve ser feita sem a adição de fatores cinéticos para a previsão de eficiência de misturas para a desfosforação. A simulação computacional para mistura desfosforante a partir do software FactSage 7.0 se mostra uma ferramenta útil à compreensão das condições termodinâmicas, auxiliando na compreensão do processo como um todo.

## Agradecimentos

Agradecimentos à FAPES e ao IFES pelo financiamento da bolsa de pesquisa, e ao IFES-Campus Vitória pelos equipamentos e conhecimento especializado.

## REFERÊNCIAS

- 1 TURKDOGAN, E. T. Fundamentals of steelmaking. London: The Institute of Material, 1996. 345p.
- 2 BARIN, I.; KNACKE, O.; KUBASCHEWSKI, O. Thermochemical properties of inorganic substances. Berlin: Springer-Verlag, 1977. 861p.
- 3 WEI, P. et al. Kinetics of phosphorous transfer between iron oxide containing slag and molten iron on high carbon concentration under Ar-O<sub>2</sub> atmosphere. ISIJ International, v. 33, p. 479-487, 1993.
- 4 SAMPAIO, R. A. Utilização da termodinâmica clássica e computacional no estudo das etapas de dessiliciação, desfosforação e dessulfuração do ferro-gusa em seu pré-tratamento. 2014. 149f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Materiais). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Instituto Federal do Espírito Santo, Vitória. 2014
- 5 HOILE, S. Processing and properties of mild interstitial free steels. Materials Science and Technology, out., p. 1079-1093, 2000.
- 6 MINTZ, B. The influence of composition on the hot ductility of steels and the problem of transverse cracking. ISIJ International, v. 39, No. 9. P 833-855, 1999.
- 7 OLIVEIRA, E. B. Utilização de resíduos gerados no beneficiamento de mármore e resíduos siderúrgicos como desfosforante de ferro-gusa. 2013. 160f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Materiais). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Instituto Federal do Espírito Santo, Vitória. 2013.