

# INFLUÊNCIA DE PARÂMETROS OPERACIONAIS E DA MISTURA DESSULFURANTE NA DESSULFURAÇÃO DE FERRO GUSA\*

Flaviani Marculano Marchesi<sup>1</sup>  
Caio Vaccari Silva<sup>2</sup>  
Heitor Cristo Clem de Oliveira<sup>3</sup>  
Silas Gambarine Soares<sup>4</sup>  
José Roberto de Oliveira<sup>5</sup>

## Resumo

Neste trabalho foi estudado a influência da variação da quantidade de fundente, da granulometria e da temperatura em misturas dessulfurantes a base de CaO (cal). Para a realização dos testes experimentais realizados no IFES foram utilizados algumas variáveis presentes no processo industrial, dentre elas: a temperatura padrão para os testes de 1370°C e uma mistura base denominada KR3. A partir dos resultados, pode-se observar que: o aumento da quantidade de fundente melhorou a eficiência do processo, a granulometria que se mostrou mais eficaz foi a de 0,5 a 2mm e o aumento de temperatura eleva a eficiência de dessulfuração.

**Palavras-chave:** Dessulfuração; KR; Refino Primário.

## THE INFLUENCE OF OPERATIONAL PARAMETERS AND THE DIFFUSERING MIXTURE OF PIG IRON

### Abstract

In this experience, it was studied the influence of amount of flux, particle size and temperature of CaO - based desulphurising mixtures (lime) was studied. In order to perform the experimental tests performed at IFES, some variables were used in the industrial process, among them: the standard temperature for the tests of 1370 °C and a base mixture called KR3. After the results, it was observed that: the amount of flux increased the efficiency of the process, the particle size that was the most effective was 0.5 to 2 mm and the temperature increases the desulphurization efficiency.

**Keywords:** Desulphurization; KR; Steelmaking.

<sup>1</sup> Engenheira Metalurgista e Mestranda em Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Instituto Federal do Espírito Santo, Vitória, ES, Brasil.

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

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

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

<sup>5</sup> Engenheiro Metalurgista e Prof. Dr. do Instituto Federal do Espírito Santo, IFES, dos cursos de graduação e pós-graduação em Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Vitória, ES, Brasil.

## 1 INTRODUÇÃO

O enxofre é considerado uma impureza prejudicial, pois causa fragilidade a quente nos aços, exceto para aços usináveis. A reação da cal com o enxofre presente no ferro-gusa é dada pela Equação 1.



Além do agente dessulfurante e do desoxidante, as misturas comumente utilizadas, tanto para uso em carros-torpedos como em panela, são compostas também por um fundente.

A granulometria é um fator importante que afeta a cinética da dessulfuração pelo CaO [1]. Segundo Kirmse [2] a granulometria também influencia a taxa de reação, devendo ser a menor possível para aumentar a área superficial, e conseqüentemente, a interação entre o metal e a massa de cal.

Pode presumir-se que menores partículas de CaO gerem taxas de dessulfuração maiores, no entanto, nem sempre é o que acontece. Por exemplo, quando comparada a cal normal com ESM (que apresenta uma maior porosidade) na mesma faixa granulométrica, a taxa de dessulfuração foi maior para a que apresentava uma maior porosidade. De acordo com McFeaters e Frhuehan [3] com a utilização de uma CaO com baixa porosidade, as fases líquidas da escória pode promover a aglomeração das partículas de cal, o que prejudica a remoção de enxofre no processo.

Yang e colaboradores [4] realizaram experimentos à base de CaO, os quais relatam que para melhorar a dissolução do CaO é normalmente feita a adição de SiO<sub>2</sub> e Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> para aumentar a taxa de reação entre escória e metal líquido, devido a redução do ponto de fusão do CaO. Entretanto, a adição de sílica e alumina pode gerar outros problemas durante a dessulfuração de ferro gusa, que é a formação da camada sólida de silicato de cálcio (3CaO.SiO<sub>2</sub>) e aluminato de cálcio (3CaO.Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) sobre a superfície de CaO, podendo inutilizar por completo a partícula de cal [5].

De acordo com vários autores entre eles Mitsuo e colaboradores [6], a dessulfuração de ferro gusa tem uma maior eficiência caso haja adição prévia de alumínio. Segundo esses autores, quando o CaO e Al são adicionados juntos, o Al não é tão eficiente como quando é adicionado antes da injeção de CaO. Caso ele seja adicionado junto a cal, não haverá uma desoxidação prévia do banho metálico. Isso se deve porque a adição de alumínio pode ajudar a dessulfuração por abaixar a atividade do oxigênio, favorecendo a termodinâmica da reação de dessulfuração.

## 2 MATERIAIS E MÉTODOS

Os procedimentos experimentais e os materiais utilizados são expostos abaixo.

### 2.1 Análise Química

As matérias primas e o ferro gusa utilizados neste estudo foram cedidas por uma empresa da região, conforme Tabela 1 e 2, respectivamente.

**Tabela 1** - Composição química dos reagentes utilizados nos testes de dessulfuração

	Composição química %											
	Al	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	K <sub>2</sub> O	MgO	MnO	Na <sub>2</sub> O	S	SiO <sub>2</sub>	CaF <sub>2</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Outros
<b>Cal 0-2mm</b>	0.00	0.24	88.74	0.00	0.75	0.03	0.00	0.11	1.31	0.00	0.00	8.82
<b>Cal 0.5-2mm</b>	0.00	0.27	88.15	0.00	1.49	0.03	0.00	0.08	1.53	0.00	0.00	8.46
<b>Cal 1-3mm</b>	0.00	0.22	88.40	0.00	1.27	0.03	0.00	0.11	1.50	0.00	0.00	8.47
<b>Borra de alumínio</b>	15.51	22.37	3.80	3.06	1.74	0.32	26.37	0.03	26.80	0.00	0.00	0.01

Fonte: Empresa da região, 2016

**Tabela 2** - Composição química do ferro-gusa

% Fe	% C	% Si	% Mn	% P	% S
94.2	4.5	0.27	0.17	0.08	0.06

Fonte: Empresa da região, 2016

## 2.2 Definição das Misturas Dessulfurantes

A definição das misturas dessulfurantes foi realizada baseada na mistura (KR3: 7kg Cal + 12% Borra de alumínio) sendo proposto a variação dos seguintes parâmetros: % de fundente, granulometria e temperatura, mostrado nas Tabelas 3, 4 e 5:

**Tabela 3** - Condições experimentais para avaliar a variação da concentração de fundente

Misturas	Massa de Cal (kg/ton)	% de Fundente	Granulometria (mm)	Rotação (rpm)	Temperatura (°C)
<b>KR1</b>	7	8	0-2	500	1370
<b>KR2</b>	7	10	0-2	500	1370
<b>KR3</b>	7	12	0-2	500	1370

Fonte: Autor.

**Tabela 4** - Condições experimentais para avaliar a variação da granulometria da Cal utilizada

Misturas	Massa de Cal (kg/ton)	% de Fundente	Granulometria (mm)	Rotação (rpm)	Temperatura (°C)
<b>KR4</b>	6,5	12	0-2	500	1370
<b>KR6</b>	6,5	12	2-3	500	1370
<b>KR7</b>	6,5	12	1-3	500	1370
<b>KR8</b>	6,5	12	0,5-2	500	1370

Fonte: Autor.

**Tabela 5** - Condições experimentais para avaliar a influência da variação de temperatura

Misturas	Massa de Cal (kg/ton)	% de Fundente	Granulometria (mm)	Rotação (rpm)	Temperatura (°C)
<b>KR3</b>	7	12	0-2	500	1370
<b>KR10</b>	7	12	0-2	500	1320
<b>KR11</b>	6.5	12	0-2	500	1420
<b>KR12</b>	7	12	0-2	500	1420

Fonte: Autor.

A Tabela 6 mostra as composições químicas de cada mistura e suas respectivas massas.

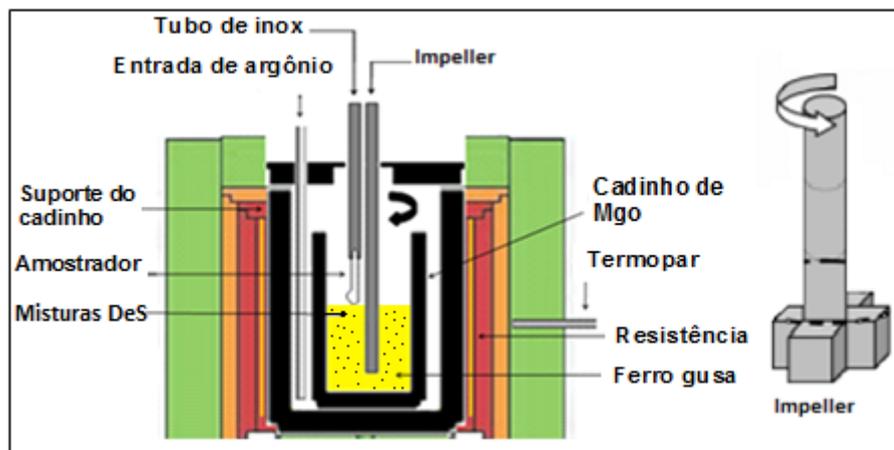
**Tabela 6** - Composição química das misturas dessulfurantes utilizadas

Misturas	Composição química %												Massa da mistura (g)
	Al	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	K <sub>2</sub> O	MgO	MnO	Na <sub>2</sub> O	S	SiO <sub>2</sub>	CaF <sub>2</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Outros	
KR1	1.24	2.02	81.93	0.25	0.83	0.05	2.11	0.11	3.35	0.00	0.00	8.11	7.61
KR2	1.55	2.46	80.23	0.31	0.85	0.06	2.64	0.10	3.86	0.00	0.00	7.93	7.78
KR3	1.87	2.91	78.50	0.37	0.87	0.06	3.18	0.10	4.38	0.00	0.00	7.75	7.96
KR4	1.87	2.91	78.51	0.37	0.87	0.06	3.18	0.10	4.38	0.00	0.00	7.76	7.39
KR6	1.87	2.89	78.21	0.37	1.33	0.06	3.18	0.10	4.54	0.00	0.00	7.45	7.39
KR7	1.87	2.93	77.99	0.37	1.52	0.06	3.18	0.07	4.57	0.00	0.00	7.44	7.39
KR8	1.87	2.91	78.51	0.37	0.87	0.06	3.18	0.10	4.38	0.00	0.00	7.76	7.39
KR10	1.87	2.91	78.50	0.37	0.87	0.06	3.18	0.10	4.38	0.00	0.00	7.75	7.96
KR11	1.87	2.91	78.51	0.37	0.87	0.06	3.18	0.10	4.38	0.00	0.00	7.76	7.39
KR12	1.87	2.91	78.50	0.37	0.87	0.06	3.18	0.10	4.38	0.00	0.00	7.75	7.96

Fonte: Autor.

### 2.3 Procedimentos Experimentais

Na realização dos experimentos foram utilizados cadinhos de MgO-C, produzidos com tijolos de magnésio carbono (MgO-C) normalmente usados no Convertedor LD e forno de resistência elétrica, modelo MEV 1500/V, fabricante FORTELAB (Indústria de Fornos Elétricos LTDA) com potência de 12kW, tensão de 220 volts, corrente de 55 amperes, quatro entradas de Termopar tipo "S", conforme desenho esquemático Figura 1.



**Figura 1** Diagrama esquemático dos experimentos realizados. Fonte: Autor.

O argônio foi injetado a uma vazão de aproximadamente 4 NI/min com a finalidade de deixar o ambiente inerte dentro do forno. A injeção de argônio foi iniciada no aquecimento e permaneceu durante todo o tempo dos experimentos e também durante o resfriamento para que o carbono do cadinho não fosse consumido pela reação com o oxigênio do ar.

Uma vez atingida e estabilizada a temperatura de trabalho foram realizadas adições dos materiais dessulfurantes. O tempo de reação passou a ser contado imediatamente após o carregamento usando-se um cronômetro digital. Foram retiradas amostras antes das adições e nos tempos de 2, 5, 8, 12, 15 e 20 minutos após as adições, sendo que cada amostra pesava aproximadamente 10 gramas.

Nos experimentos a agitação foi realizada por agitador mecânico com rotação constante de 500rpm, o qual foi posicionado em cima do forno e sua haste passada pela entrada secundária após a adição da mistura dessulfurante. A agitação foi interrompida a cada retirada de amostra e, logo após, reiniciada.

A simulação do equilíbrio das misturas dessulfurantes foi realizada utilizando a termodinâmica computacional por meio do programa Factsage 7.0 para determinação das fases presentes na escória e características termodinâmicas. O cálculo da energia de ativação foi calculado seguindo modelos propostos na literatura e a eficiência do processo de dessulfuração foi calculado com base nos valores iniciais e finais do enxofre presente no metal, via Equação 2:

$$\eta (\%) = \frac{[S]_{inicial} - [S]_{final}}{[S]_{inicial}} \times 100 \quad (2)$$

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados dos procedimentos experimentais e as análises realizadas serão aqui discutidos.

#### 3.1 Influência da quantidade de fundente

Para avaliar uma possível redução na quantidade de fundente utilizado, os experimentos de KR1, KR2 e KR3 tiveram como objetivo verificar a influência da variação da quantidade de fundente (Borra de alumínio) na reação de dessulfuração, sendo a mistura base utilizada a KR3 com 12% de fundente e granulometria de 0 a 2mm. A Tabela 7 relaciona parâmetros das misturas em função da variação da concentração de fundente.

**Tabela 7** - Basicidade Ótica, capacidade de sulfeto (Cs) e Coeficiente de partição de enxofre (Ls) das misturas para avaliar a variação na concentração do fundente.

	Basicidade ótica ( $\Lambda$ )	Sosinsky e Sommerville (Log (Cs))	Young Log(Cs)	Inuoe e Suito Log(Ls)	Eficiência (%)
<b>KR1</b>	0,957	-1,490	1,217	6,973	24,44
<b>KR2</b>	0,951	-1,551	1,210	6,912	36,21
<b>KR3</b>	0,945	-1,612	1,203	6,851	40,98

Fonte: Autor.

Nota-se que quanto menor a porcentagem de fundente, maior é o valor da  $\Lambda$ , Cs e Ls. Entretanto, a remoção de enxofre foi maior quando se elevou os teores do fundente. Isto é um indício de que fatores cinéticos estão diretamente ligados com a eficiência da dessulfuração. Este fato pode ser comprovado analisando a Tabela :

**Tabela 8** - Resultados da simulação no software FactSage de equilíbrio da escória e Enxofre de equilíbrio para as misturas feitas para avaliar a variação na concentração de fundente

Mistura	Fases sólidas formadas (%)				% de sólidos	% de líquidos	%Seq	Eficiência (%)
	CaO	Ca <sub>3</sub> SiO <sub>5</sub>	CaS	MgO				
<b>KR1</b>	76,60	2,95	0,26	0,42	80,23	19,77	3,649E-05	24,44
<b>KR2</b>	70,61	10,08	0,26	0,23	81,18	18,82	3,630E-05	36,21
<b>KR3</b>	65,74	12,72	0,25	0,00	78,72	21,28	3,611E-05	40,98

Fonte: Autor.

De acordo com as simulações de equilíbrio metal/escória, pode-se notar que o aumento da quantidade de fundente proporcionou uma pequena redução no enxofre

de equilíbrio. Entretanto, gerou uma elevação na quantidade de escória líquida (ao simular o equilíbrio apenas da escória na temperatura de trabalho). O CaS formado é oriundo de contaminação das matérias primas.

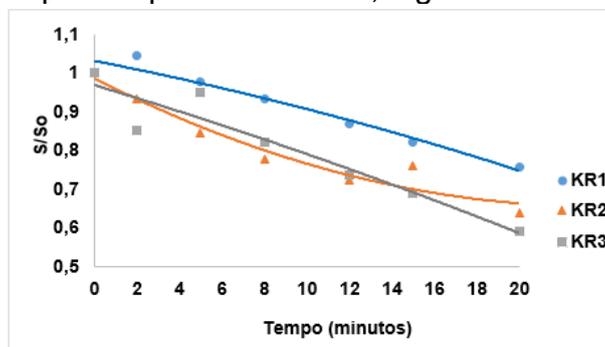
De posse dos resultados dos testes experimentais, foi então gerada a Tabela , onde está apresentada a variação de enxofre para cada tempo de retirada de amostra.

**Tabela 9** - Variação de enxofre com o tempo de amostragem das misturas para avaliar a variação da concentração de enxofre pelo tempo

Mistura	Variação da %S pelo tempo (minutos)						
	0	2	5	8	12	15	20
KR1	0,045	0,047	0,044	0,042	0,039	0,037	0,034
KR2	0,058	0,054	0,049	0,045	0,042	0,044	0,037
KR3	0,061	0,052	0,058	0,05	0,045	0,042	0,036

Fonte: Autor.

Para uma melhor visualização dos resultados, os gráficos da variação de enxofre pelo tempo foram feitos em função de S/So, uma vez que houve uma grande variação do enxofre de partida para cada teste, Figura 2.



**Figura 2** - Variação do enxofre S/So em função do tempo para as misturas KR1, KR2 e KR3. Fonte: Autor.

Analisando a Tabela e a Figura 2, observa-se que a mistura mais eficiente foi a KR3. Isto porque, mesmo a mistura KR1 ter chegado a um valor de enxofre final menor, 340ppm (ante aos 360ppm da KR3), a eficiência de remoção de enxofre foi maior para a mistura KR3, chegando a 40,98% (contra 24,44% da KR1 e 36,21% da KR2). Esse fato ocorre, pois a utilização de 12% de fundente, na mistura KR3, gerou uma maior quantidade de líquido, como pode ser visto na Tabela . Além disso, o enxofre de partida da mistura KR1 foi menor que os da KR2 e KR3, o que proporciona uma menor força motriz para velocidade cinética da reação.

### 3.2 Influência da variação da granulometria

Os experimentos KR4, KR6, KR7 e KR8 tiveram como objetivo verificar a influência da variação da granulometria na reação de dessulfuração, mostrado na Tabela 10.

**Tabela 10** - Basicidade Ótica, capacidade de sulfeto (Cs) e Coeficiente de partição de enxofre (Ls) para avaliar a variação da granulometria da Cal utilizada

	Basicidade ótica	Sosinsky e Sommerville (Log (Cs))	Young Log(Cs)	Inuoe e Suito Log(Ls)	Eficiência (%)
KR4	0,945	-1,611	1,203	6,851	19,61
KR6	0,943	-1,638	1,200	6,825	20,00
KR7	0,942	-1,648	1,199	6,814	26,42
KR8	0,945	-1,611	1,203	6,851	31,11

Fonte: Autor.

Como era de se esperar, os valores da  $\Lambda$ , Cs e Ls, são praticamente os mesmos, uma vez que as composições químicas das cales, separadas por granulometrias diferentes, são praticamente as mesmas. Sendo assim, suas propriedades termodinâmicas são praticamente as mesmas, diferenciando apenas na cinética da reação para cada tamanho de partícula. A Tabela 1 mostra os resultados das simulações das misturas iniciais no FactSage.

**Tabela 1** - Resultados da simulação no software FactSage para avaliar a variação da granulometria da Cal utilizada

Mistura	Fases sólidas formadas (%)				% de sólidos	% de líquidos	%Seq	Eficiência (%)
	CaO	Ca <sub>3</sub> SiO <sub>5</sub>	CaS	MgO				
KR4	65,90	12,29	0,25	0,00	78,43	21,57	3,618E-05	19,61
KR6	65,00	12,69	0,25	0,40	78,34	21,66	3,618E-05	20,00
KR7	64,67	12,83	0,18	0,57	78,25	21,75	3,617E-05	26,42
KR8	65,90	12,29	0,25	0,00	78,43	21,57	3,618E-05	31,11

Fonte: Autor.

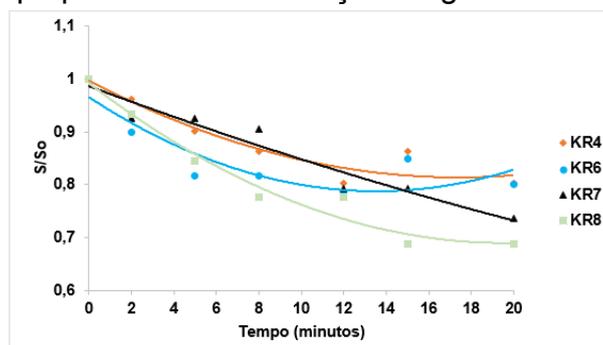
Como pode ser visto na Tabela , os resultados as simulações pelo FactSage também apresentaram praticamente os mesmos valores. Então, de posse dos resultados dos testes, pode-se gerar a Tabela .

**Tabela 12** - Variação de enxofre com o tempo de amostragem para avaliar a variação da granulometria da Cal utilizada

Mistura	%S						
	0	2	5	8	12	15	20
KR4	0,051	0,049	0,046	0,044	0,041	0,044	0,041
KR6	0,06	0,054	0,049	0,049	0,047	0,051	0,048
KR7	0,053	0,049	0,049	0,048	0,042	0,042	0,039
KR8	0,045	0,042	0,038	0,035	0,035	0,031	0,031

Fonte: Autor.

Para uma melhor visualização dos resultados, foi gerada a Figura 3 com a variação de enxofre com o tempo para avaliar a variação da granulometria da Cal utilizada.



**Figura 3** - Variação do enxofre S/So em função do tempo de experimento para avaliar a variação da granulometria da Cal utilizada. Fonte: Autor.

Analisando a

Tabela e Figura 3, observa-se que a mistura mais eficiente foi a KR8, com granulometria de 0,5 a 2mm chegando a 310ppm de enxofre e 31,11% de eficiência

de dessulfuração, seguido pela KR7 (390ppm e 26,42% de eficiência), KR6 (480ppm e 20% de eficiência) e a KR4 (410ppm e 19,61% de eficiência).

Mesmo a mistura KR4 apresentando uma maior área superficial, devido a sua menor granulometria (0 a 2 mm, sendo mais de 90% abaixo de 0,5mm), seu resultado foi o pior entre as 4 misturas. Este fato ocorreu, pois, durante os testes houve uma grande aglomeração e empelotamento da escória, fato esse observado e descrito por Fruehan em seus testes experimentais para cales de menor granulometria. Já para a faixa granulométrica utilizada na mistura KR8 (0,5 a 2mm), este fato foi minimizado, garantindo uma maior área de contato entre escória e banho metálico.

Grillo [7] também encontrou um melhor resultado de dessulfuração quando utilizado a faixa granulométrica de 0,5 a 1mm, tendo observado e descrito que para faixas granulométricas abaixo de 0,5mm pode ocorrer aglomeração da escória.

Oliveira [8] chegou a resultados experimentais onde a faixa granulométrica de 0,5 a 1 mm apresentou um melhor resultado quando comparado com a faixa de 1 a 3mm, sendo que não foi observado aglomeração ou empelotamento da escória. Este resultado condiz com os apresentados nos testes, uma vez que a mistura KR8 foi melhor que a KR7. Já a mistura KR6 (2 a 3mm), que foi a que obteve pior resultado, mesmo não apresentando aglomeração da escória, mostrou que a menor área superficial influenciou no resultado do teste.

### 3.3 Influência da variação de temperatura

Para avaliar a influência da oscilação de temperatura obtida durante a operação do KR, os experimentos KR3, KR10, KR11 e KR12 tiveram como objetivo verificar a variação da temperatura num gap de 50°C para mais e para menos da temperatura base, sendo elas de 1320°, 1370° e 1420°C. Além disso, foi testada uma mistura com menor massa e maior temperatura, com a finalidade de redução de consumo de mistura dessulfurante, uma vez que a reação de dessulfuração é melhorada com uma maior temperatura.

A Tabela apresenta a Basicidade Ótica, capacidade de sulfeto (Cs) e Coeficiente de partição de enxofre (Ls).

**Tabela 13** - Basicidade Ótica, capacidade de sulfeto (Cs) e Coeficiente de partição de enxofre (Ls) para avaliar a influência da variação de temperatura

	Basicidade ótica	Sosinsky e Sommerville (Log (Cs))	Young Log(Cs)	Inoue e Suito Log(Ls)	Eficiência (%)
<b>KR3</b>	0,945	-1,612	1,203	6,851	40,98
<b>KR10</b>	0,945	-2,165	1,164	6,278	14,29
<b>KR11</b>	0,945	-1,091	1,241	7,391	32,56
<b>KR12</b>	0,945	-1,091	1,241	7,391	56,10

Fonte: Autor.

Analisando a Tabela pode-se notar que os testes com maior temperatura apresentaram melhores condições termodinâmicas para remoção de enxofre, ou seja, maior Cs e Ls. Estes valores estão de acordo com os resultados obtidos nos

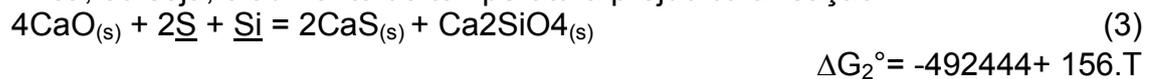
testes práticos. Na Tabela temos os resultados das simulações das misturas iniciais no FactSage.

**Tabela 14** - Resultados da simulação no software FactSage para avaliar a influência da variação de temperatura

Mistura	Fases sólidas formadas (%)				% de sólidos	% de líquidos	%Seq	Eficiência (%)
	CaO	Ca3SiO5	CaS	MgO				
<b>KR10</b>	65,31	15,24	0,25	0,00	80,81	19,19	1,889E-05	14,29
<b>KR3</b>	65,74	12,72	0,25	0,00	78,72	21,28	3,611E-05	40,98
<b>KR11</b>	66,93	7,33	0,25	0,00	74,51	25,49	6,592E-05	32,56
<b>KR12</b>	66,63	8,32	0,25	0,00	75,20	24,80	6,580E-05	56,10

Fonte: Autor.

Através da Tabela , podemos verificar que o aumento de temperatura eleva o valor do enxofre de equilíbrio ( $_{1320^{\circ}\text{C}}\text{KR10}=1,889\text{E}^{-05} < _{1370^{\circ}\text{C}}\text{KR3}=3,611\text{E}^{-05} < _{1420^{\circ}\text{C}}\text{KR12}=6,580\text{E}^{-05}$ ). Porém, os resultados experimentais e os obtidos industrialmente não correspondem a essa piora de rendimento. Isso acontece porque na dessulfuração em ferro gusa, com presença de silício, a reação de remoção do enxofre ocorre pela Equação 3, que para a temperatura de trabalho, é exotérmica, ou seja, o aumento de temperatura prejudica a reação.



Entretanto, ao verificar Tabela , nota-se que há uma redução na quantidade de fases sólidas formadas e uma maior porcentagem de líquidos. Sendo assim, a melhora do processo de remoção de enxofre ocorre devido à melhora cinética do processo, por reduzir os silicatos de cálcio formados, e maior fase líquida.

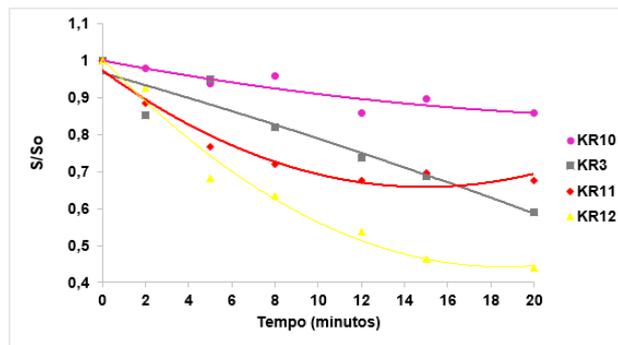
Já na Tabela , podemos notar a variação de enxofre com o tempo para os experimento com variação de temperatura

**Tabela 15** - Variação de enxofre com o tempo de amostragem para avaliar a influência da variação de temperatura

Mistura	%S						
	0	2	5	8	12	15	20
<b>KR10</b>	0,049	0,048	0,046	0,047	0,042	0,044	0,042
<b>KR3</b>	0,061	0,052	0,058	0,05	0,045	0,042	0,036
<b>KR11</b>	0,043	0,038	0,033	0,031	0,029	0,03	0,029
<b>KR12</b>	0,041	0,038	0,028	0,026	0,022	0,019	0,018

Fonte: Autor.

A Figura 4 mostra a variação S/So em função do tempo, para exemplificar os resultados obtidos.



**Figura 4** - Variação do enxofre S/So em função do tempo de experimento para avaliar a influência da variação de temperatura. Fonte: Autor.

Na Figura 4, observa-se que a maior temperatura da mistura KR12 (1420°C) proporcionou um menor teor de enxofre final, de 180ppm e 56,1% de eficiência de dessulfuração. Em seguida, a mistura KR3 (1370°C) obteve 360ppm de enxofre final e 40,98% de eficiência enquanto a mistura KR10, de menor temperatura (1320°C), os valores foram de 420ppm e 14,29% de remoção de enxofre.

Já a mistura KR11 (1420°C e 6,5kg/ton de gusa), que tinha como objetivo avaliar a redução de massa (em 0,5kg/ton) de mistura dessulfurante para temperaturas de processo mais elevadas, mostrou-se mais eficaz para tempos de tratamento até 12 minutos, chegando a níveis de 32,56% de eficiência de dessulfuração, contra 26,23% da mistura KR3 (que corresponde a um aumento de 24,13%).

Já para o tempo total de teste, 20 minutos, a maior massa do experimento KR3 acabou influenciando diretamente no resultado final (40,98% para KR3 contra 32,56% para KR11). Uma possível causa para este fato seria que, devido ao grande número de amostras retiradas e a menor massa utilizada na mistura KR11, houve uma redução no volume de escória do processo, sendo que, analisando a Tabela , houve uma estabilização do enxofre a partir dos 12 minutos para a KR11, enquanto a KR3 não houve essa estabilização.

Para a mistura KR10, também foi percebida uma estabilização dos níveis de enxofre após os 12 minutos de processo. Para esse caso, a maior formação de compostos sólidos e menor formação de fase líquida pode ter agido diretamente em retardar a cinética do processo.

A baixa eficiência de remoção do enxofre, nos processos acima mencionados, quando comparado ao Reator Kambara (KR), ocorreu devido a massa de mistura dessulfurante *utilizada* (7kg/ton). Esta massa foi usada, pois partiu-se do princípio que o gusa apresentava 300ppm de enxofre. Entretanto, o enxofre de partida foi de 500 a 600ppm, sendo que para esses níveis se utiliza de 11 a 13kg de mistura por tonelada de gusa (segundo informações fornecidas pela empresa).

### 3.4 Influência da agitação

Para o cálculo da energia de agitação foram considerados os valores das variáveis do impeller utilizado no projeto e em empresas do ramo são apresentados na Tabela 17.

**Tabela 17-** Parâmetros utilizados no cálculo da energia de agitação.

Parâmetro	Símbolo	Unidade	Dado real KR	Dado modelo
Altura do Impeller	b	m	1	0,01
Diâmetro médio da panela	D	m	3,83	0,07
Altura da coluna de líquido na panela	Z	m	4	0,031
Densidade	ro	Kg/m3	7000	6300
Velocidade de rotação	n	1/s	2,417	6,667
Diâmetro do impeller	d	m	1,441	0,03
Viscosidade do aço	mi	Pa.s	0,007	0,006
Velocidade de rotação	N	RPM	145	400
Peso de gusa típico	Q	t	322,59	0,00075

**Fonte:** Autor

Onde:  $N_p$ : número de potência (-), P: energia de agitação (W), a, B, P: constante proporcional (-).

A partir dos dados acima expostos foi possível calcular a energia de agitação por agitação mecânica propostas por Nagata e colaboradores [9], Tabela 18.

**Tabela 18 -** Energia de agitação e energia de agitação específica para os dados reais do KR e o do impeller utilizado neste projeto.

Fórmulas	Res. Real	Res. Modelo	Unidade
$Re = ro.n.d^2/mi$	5018162	6300	
$p = 1.1 + 4.(2b/D) - 2.5.(d/D - 0.5)^2 - 7.(2b/D)^4$	2,63	2,18	
$B = 10^{**} \{1.3 - 4.(2b/D - 0.5)^2 - 1.14.(d/D)\}$	7,40	4,24	
$a = 14 + (2b/D). \{670.(d/D - 0.6)^2 + 185\}$	128,12	72,48	
$N_p = a/Re + B. [(10^3 + 1.2Re^{0.66}) / (10^3 + 3.2Re^{0.66})]. (Z/D)^{**} (0.35 + 2b/D)$	0,61	1,11	
$P = N_p.ro.n^3.d^{52}$	376168,377	0,050	W

**Fonte:** Autor.

Sendo assim, a energia de agitação específica utilizada no KR é quase duas ordens de grandeza menor que a utilizada neste projeto. Desta forma, foi testada a mistura padrão com a energia de agitação usada no KR e obteve-se uma eficiência de 69,70%, Tabela 19.

**Tabela 19 –** Influência da energia de agitação na eficiência do processo

Parâmetros	Res. Real	Res. Modelo	Unidade
P	376,1683766	0,0000504	kW
P específico	1,166	0,067	kW/t
Eficiência	69,7	40,98	%

**Fonte:** Autor.

### 3 CONCLUSÃO

-A redução da quantidade de fundente quando comparado com a mistura padrão não se mostrou eficaz ou viável, uma vez que reduziu significativamente a eficiência

de dessulfuração do processo de 40,98% (12% de fundente) para 24,44% (8% de fundente).

-A granulometria que se mostrou mais eficaz para o processo foi a de 0,5 a 2mm (KR8), uma vez que apresentou um menor nível de aglomeração durante os testes experimentais. Quando comparada com a granulometria aplicada na empresa (0 a 2mm da mistura KR4), aos 12 minutos de teste a mistura KR8 foi 13,31% mais eficiente.

O aumento de temperatura eleva a eficiência de dessulfuração, mesmo prejudicando as condições termodinâmicas (para o ferro-gusa, que apresenta silício em sua composição). Isto ocorre porque a redução dos compostos sólidos formados melhora a cinética de tal ponto que compensa este fato. Assim, mesmo com a redução de 0,5kg de cal na mistura (KR11), para 12 minutos de processo obteve uma melhora de 24,13% quando comparado com a mistura base KR3.

A baixa eficiência de remoção do enxofre, quando comparado ao Reator Kambara (KR), ocorreu por duas variáveis:

-a massa de mistura dessulfurante utilizada (7kg/ton) foi partindo do princípio que o gusa apresentasse 300ppm de enxofre. Entretanto, o enxofre de partida foi de 500 a 600ppm,

-e a energia de agitação proporcionada pelo KR ser 1,74 vezes maior que a gerada pelo modelo de impeller utilizado nesse projeto.

## Agradecimentos

Agradecimentos a CAPES e a FAPES pelos financiamentos das bolsas de pesquisa e ao Ifes – Campus Vitória pelos equipamentos e conhecimento especializado.

## REFERÊNCIAS

- 1 CAMPOS, V. F. Curso sobre Pré-refino de Ferro-Gusa. 1. ed. Belo Horizonte: Universidade Federal de Minas Gerais, 1984. 31p.
- 2 KIRMSE, O. J. Estudo do Comportamento Metalúrgico do "Reator Kambara" através de Modelagem Física. Dissertação de Mestrado Submetida a REDEMAT: UFOP-CETEC-UEMG. Ouro Preto, 2006.
- 3 McFEATERS, L.B.; FRUEHAN, R.J. Desulfurization of Bath Smelter Metal. Metallurgical and Materials Transactions B. v. 24B, p. 441-447, 1993.
- 4 YANG, J.; KUWABARA, M.; ASANO, T.; CHUMA, A.; DU, J. Effect of lime particle size on melting behavior of lime-containing flux. ISIJ International, p.1401-1408, 2007.
- 5 NIEDRINGHAUS, J. C.; FRUEHAN, R. J. Reaction Mechanism for the CaO-Al and CaO-CaF<sub>2</sub> Desulfurization of Carbon-Saturated Iron. Metallurgical Transactions B, v. 19B, p. 261-268, 1988.
- 6 MITSUO, T.; SHOJI, T.; HATTA, Y.; ONO, H.; MORI, H.; KAI, T. Improvement of desulfurization by addition of aluminum to hot metal in the lime injection process. Transactions of the Japan Institute of Metals, n. 12, v. 23, p. 768-779, 1982
- 7 GRILLO, F. F. ESTUDO DA SUBSTITUIÇÃO DA FLUORITA POR ALUMINA OU SODALITA E DE CAL POR RESÍDUO DE MÁRMORE EM ESCÓRIAS SINTÉTICAS DESSULFURANTES. Tese de Doutorado em Metalurgia e Materiais. USP, São Paulo, 2015.

- 8 OLIVEIRA, H.C.C. Estudo comparativo de diferentes misturas dessulfurantes de ferro-gusa. Dissertação de Mestrado em Metalurgia e Materiais. PROPEMM, Instituto Federal do Espírito Santo, Vitória, (pp.87-100), 2016.
- 9 S. Nagata, K. Yamamoto, T. Yokoyama and S. Shiga: Memoris Fac. Eng., Kyoto Univ., 19 (1957), 274.