



UTILIZAÇÃO DE MISTURAS DESSULFURANTES A BASE DE RESÍDUO DE MÁRMORE E BARRILHA¹

*Felipe Nylo de Aguiar²
Heitor Cristo Clem de Oliveira³
Jorge Alberto Soares Tenório⁴
Estéfano Aparecido Vieira⁵
José Roberto de Oliveira⁶*

Resumo

O objetivo deste trabalho é estudar a utilização de resíduo de mármore na dessulfuração de ferro-gusa. Para a isto foi feito um estudo comparativo da dessulfuração utilizando cal e misturas contendo resíduo de mármore, fluorita e barrilha na temperatura de 1450°C. Estes materiais foram adicionados em um banho de ferro-gusa líquido com composição conhecida, o qual foi agitado através de um agitador mecânico. Amostras do metal foram retiradas por meio de amostradores à vácuo, nos tempos de 5, 10, 15, 20 e 30 minutos e feitas análises da variação do teor de enxofre no banho. Os resultados apontam para uma boa dessulfuração por parte do resíduo, já que as características analisadas estão de acordo com dados levantados na bibliografia como ideais para a dessulfuração.

Palavras-chave: Dessulfuração de ferro-gusa; Resíduo de mármore; Cal; Barrilha.

MARBLE WASTE AND SODA ASH DESULFURIZER MIXTURES UTILIZATION

Abstract

The objective of this study is to analyze the marble waste utilization in the hot metal desulphurisation. To achieve it, were made a desulphurization comparative study using lime and mixtures with marble waste, fluorspar, and soda ash at the temperature of 1450°C. These materials were added in a hot metal bath with known chemical composition and stirred by mechanical stirrer. Samples were collected by vacuum sampling at the time of 5, 10, 15, 20, and 30 minutes, and made analysis to check the variation of sulfur in the bath. The results indicate a good marble waste desulphurization, since the analyzed characteristics are in agreement with data observed in the bibliography as ideal for desulphurisation.

Key words: Hot metal desulphurisation; Marble waste; Lime; Soda ash.

¹ Contribuição técnica ao 42º Seminário de Aciaria – Internacional, 15 a 18 de maio de 2011, Salvador, BA, Brasil.

² Mestrando do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Materiais - IFES

³ Estudante de graduação do curso de Engenharia Metalúrgica - IFES

⁴ Professor Doutor e Titular do Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais - USP

⁵ Professor Doutor do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e Materiais - IFES

⁶ Professor Doutor e Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e Materiais - IFES



1 INTRODUÇÃO

O enxofre é considerado um elemento indesejável no aço por ser prejudicial à algumas de suas propriedades mecânicas, sendo benéfico apenas no caso de aços usináveis, mas como ele está contido nas matérias-primas utilizadas na fabricação do aço, sua presença no fluxo de produção é inevitável.⁽¹⁾

Algumas décadas atrás, para classes comuns de aços moldados através de lingotes, o enxofre máximo permissível era 0,04%. Com o lingotamento contínuo, este teor teve de ser reduzido a 0,02%. Em chapas (grossas) de aço especiais, a especificação normal para enxofre é atualmente 0,005%; mas existe uma demanda para aços ultra baixo enxofre com teores tão pequenos quanto 10 ppm (0,001%).⁽²⁾

O processo de dessulfuração mais usado tem o CaO como agente dessulfurante, devido a sua boa eficiência e seu baixo custo, acontecendo de acordo com a reação $[S] + (CaO) = (CaS) + [O]$.

No caso do presente trabalho foi usado resíduo de mármore como agente dessulfurante, pois este contém em sua composição CaO.

Este trabalho estuda a possibilidade da reutilização do citado resíduo como material dessulfurante de ferro-gusa em substituição à cal, na busca de uma utilização deste resíduo no processo de fabricação de aços.

1.1 Resíduo de Mármore

Em seu setor específico, o termo mármore é utilizado para designar todas as rochas carbonáticas capazes de receber polimento e lustro. As principais abrangem calcários e dolomitos, sendo os mármore os seus correspondentes metamórficos. Os calcários e os dolomitos são rochas compostas principalmente de calcita ($CaCO_3$) e dolomita ($CaMg(CO_3)_2$). Nas rochas carbonáticas, calcita e dolomita constituem 50% ou mais dos minerais.⁽³⁾ Um exemplo de análise química de mármore é apresentado na Tabela 1, do mármore da empresa capixaba Marsal S/A.

Tabela 1. Resultado da análise química dos mármore da Marsal S/A⁽⁴⁾

	CaO	MgO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	RI	R ₂ O ₅	TiO ₂	CO ₂
%	38,0 a 49,8	3,6 a 13,6	0,20	0,06	1,50	0,03	0,01	44,60

No mercado mundial de rochas ornamentais e de revestimento existe atualmente uma produção de mais de 90 milhões de t/ano, sendo os mármore responsáveis por aproximadamente 45% dessa produção mundial. O Brasil se encontra entre os 10 principais países produtores, tendo o Espírito Santo como principal estado produtor.⁽⁵⁾

Porém, com uma grande produção, há também uma grande geração de resíduos. Considerando a produção brasileira 2008 (7,8 milhões de toneladas)⁽⁶⁾ e que os mármore correspondem a 20% dessa produção,⁽⁷⁾ tivemos um total de 1,56 milhões de toneladas de mármore produzidos no Brasil. Considerando ainda que a taxa de geração de resíduos nas instalações de mármore é de cerca de 30%,⁽³⁾ chegamos a uma quantidade de 468 mil toneladas de resíduos de mármore gerados em 2008.

1.2 Dessulfuração de Ferro-gusa

Na dessulfuração, a remoção do enxofre se dá por um processo de redução, onde o enxofre a ser removido do banho é convertido em um sulfeto, acompanhado pela mudança em sua valência, conforme Reação [1].⁽⁸⁾



O doador de elétrons geralmente é o íon O^{2-} , chegando-se então a Reação [2]. No caso da dessulfuração com CaO, obtem-se a Reação [3].



Entretanto, o oxigênio elementar que resulta da transferência de elétrons, se dissolve no banho e retarda a dessulfuração, devendo ser quimicamente ligado por meio de um desoxidante (Si, Al ou C) de modo a removê-lo do sistema, como mostrado na Reação [4] considerando o carbono como desoxidante.⁽⁸⁾



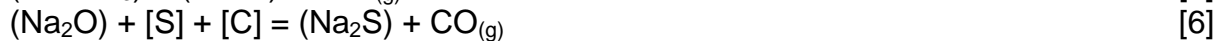
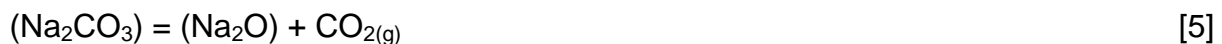
Além do agente dessulfurante e do desoxidante, as misturas comumente utilizadas, tanto para uso em carros-torpedos como em panela, são compostas também por um fundente, caso da fluorita (CaF_2), que aumenta a dessulfuração através da redução da viscosidade da escória e faz com que a camada de CaS formada fique líquida, não impedindo o contato do S^{2-} com a CaO.

Então, de modo geral, podemos dizer que a dessulfuração do gusa tem como premissa básica, criar condições nas quais ocorra a formação do sulfeto em detrimento a formação de óxido, de maneira a permitir a remoção do enxofre do banho. Existem vários sulfetos relativamente estáveis (CaS, MgS, Na_2S , CeS), todos viáveis de serem formados e separados do gusa através da escória, onde são parcialmente solúveis.

Como citado anteriormente, o Ca, na forma de CaO, é o agente dessulfurante mais utilizado, devido ao seu baixo custo e por já estar presente no processo de refino do gusa, além de ser, depois do Cério (Ce), o elemento químico mais efetivo na formação de sulfetos.⁽⁹⁾

1.3 Barrilha

Além do CaO, um outro agente dessulfurante que pode ser usado é a barrilha (Na_2CO_3). Com o uso desse agente, primeiramente ocorre sua calcinação através da Reação [5], e, só então, a dessulfuração segundo a Reação [6]. A Reação global é apresentada na Reação [7].⁽¹⁰⁾



Na dessulfuração através do uso do Na_2CO_3 , uma vantagem associada é a simultânea desfosforação. Porém, a utilização deste material causa desgaste do refratário, assim como no caso do CaF_2 , pois este material também diminui acentuadamente a viscosidade da escória.

Segundo Barão,⁽¹¹⁾ esse material já foi usado no processo *Carbocal* (em uma mistura com calcário), entretanto deixou de ser adequado à dessulfuração devido ser extremamente poluidor.



1.4 Utilização do Resíduo de Mármore na Dessulfuração

Devido aos altos teores de CaO presentes em sua composição, o resíduo de mármore apresenta potencialidade para utilização na fabricação de aço como agente dessulfurante.

Este processo normalmente é feito com a utilização de uma mistura CaO e CaF₂, que são matérias primas extraídas da natureza, e que portanto, geram degradação ao meio ambiente. Entretanto, a utilização do CaF₂ causa danos ao processo, uma vez que aumenta o desgaste do refratário do equipamento onde esta operação é realizada, o mesmo acontecendo no uso do Na₂CO₃, pois estes materiais diminuem acentuadamente a viscosidade da escória.

Este problema aponta para a vantagem da utilização do resíduo de mármore, pois para diminuir o desgaste do refratário da panela (a base de MgO), é preciso adicionar MgO à escória, o que é conseguido com a adição do resíduo, uma vez que este possui altos teores de MgO na forma de MgCO₃.

Uma possível restrição ao resíduo de mármore seria a presença de MgO e CaO na forma de carbonatos. Contudo nas temperaturas reais do processo, que giram em torno de 1450°C, acontecem as reações de decomposição dos carbonatos de acordo com as Reações [8], [9] e [10].⁽¹²⁾ Estas reações causam a agitação do banho, e podem melhorar o processo de dessulfuração:



Os pontos tratados acima são indicativos favoráveis à utilização do resíduo como agente dessulfurante.

2 MATERIAL E MÉTODOS

Para o desenvolvimento do presente estudo sobre dessulfuração utilizando misturas à base de resíduo de mármore foram desenvolvidas as seguintes etapas:

- aquisição de material;
- caracterização dos materiais;
- preparação das misturas; e
- realização dos experimentos.

2.1 Aquisição de Material

Os materiais necessários para a realização dos experimentos de dessulfuração estão listados a seguir:

- resíduo de Mármore doado pela empresa Sulcamar;
- cal virgem e fluorita fornecidos pela ArcelorMittal Cariacica;
- barrilha;
- ferro-gusa fornecido pela empresa ArcelorMittal Tubarão (AMT), sendo sua composição química também informada pela empresa; e
- cadinhos de grafite puro, adquiridos junto à empresa Egyper.



2.2 Caracterização dos Materiais

Antes da realização dos experimentos, foi realizada uma caracterização do resíduo utilizado neste trabalho. Foram feitas análises granulométrica, térmica, química e mineralógica.

Uma amostra de resíduo de 250 g foi separada e encaminhada ao Laboratório do Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais da Epusp onde foram realizadas todas as análises.

A análise granulométrica foi feita através de difração a laser em um *Malvern*. As propriedades térmicas foram avaliadas por uma análise térmica diferencial (DTA).

A análise química do resíduo de mármore foi realizada por meio de uma espectrometria de fluorescência de raios-X em, e a análise mineralógica foi feita por uma difração de raios-X.

2.3 Preparação das Misturas

A partir do resumo de operação do reator Kambara (KR) entre os dias 3 de outubro de 2007 e 3 de outubro de 2008 (Tabela 2), fornecido pela AMT, foi possível definir a massa de cal necessária para os experimentos de dessulfuração. Essa massa ficou definida como o valor do consumo específico médio por dessulfuração, sendo este valor igual a 9,62 Kg/ton, ou 0,962% da massa do gusa.

Tabela 2. Dados fornecidos pela ArcelorMittal Tubarão

RESUMO DE OPERAÇÃO DO KR		
Peso médio de reagente por dessulfuração	2.946,71	Kg
Consumo específico médio por dessulfuração	9,62	Kg/ton
Enxofre inicial médio por dessulfuração	0,03251	%
Enxofre final médio por dessulfuração	0,00251	%
Tempo médio de tratamento por dessulfuração	29,35	Min
Tempo médio de agitação por dessulfuração	7,83	Min
Total de gusa tratado	919.401,50	Ton
Total de consumo de cal	7.435.592,50	Kg
Total de consumo de fluorita	243.308,14	Kg
Total de cal recebido no período	3.621.227,50	Kg
Total de fluorita recebida no período	591.280,81	Kg
Total de material de teste recebido no período	591.280,81	Kg
Número total de tratamentos	3.063,00	-

Nos experimentos realizados neste estudo, foram feitas as quatro adições apresentadas na Tabela 3. É importante deixar claro que mesmo através dessas diferentes adições, a quantidade de CaO sempre foi proporcional à massa do gusa.

Tabela 3. Adições utilizadas neste trabalho

- 1) CaO + CaF₂
- 2) Resíduo puro
- 3) Resíduo + CaF₂
- 4) Resíduo + Na₂CO₃

Também com dados fornecidos pela AMT, quando o CaF₂ foi utilizado juntamente com o CaO, a proporção destes materiais foi de 92% de CaO e 8% de CaF₂. Exceção foi a adição 4, que utilizou uma proporção de 90% de CaO, 5% de CaF₂ e 5% de Na₂O.



Então, na realização dos experimentos, o gusa foi dividido em porções de mesma massa (750 g), sendo feitas as considerações acima no cálculo da quantidade de agente dessulfurante. Antes de serem pesados, os materiais ficaram em uma estufa a 105°C para retirar a umidade. Os materiais utilizados neste trabalho foram adicionados na forma de pó.

2.4 Realização dos Experimentos

Na realização dos experimentos, foram usados cadinhos de grafite de alta pureza (99,9%C) com 70 mm de diâmetro interno e 128 mm de altura útil.

O ferro-gusa foi carregado nos cadinhos e então iniciado o aquecimento. Este, por sua vez, foi feito em um forno resistência FEE-1700/V da Maitec. Inicialmente, a massa de gusa sólida foi colocada no cadinho e este inserido no forno. Foi inserido um tubo de alumina para a injeção de argônio com a finalidade de deixar o ambiente inerte dentro do forno, sendo usado argônio comercial a uma vazão de 6 NI/min. Em nenhum dos experimentos foi observada a formação de escória antes da adição dos agentes dessulfurantes, o que mostra que o ambiente estava inerte. A injeção de argônio foi iniciada junto com o início do aquecimento e permaneceu durante todo o tempo dos experimentos.

Uma vez atingida a temperatura de trabalho (1.450°C), foi verificada a completa fusão do gusa e, em seguida, feitas as adições das misturas dessulfurantes. Para auxiliar nas adições, foi utilizado um tubo de aço inoxidável visando direcionar o material para dentro do cadinho. A extremidade inferior ficava dentro do cadinho, mas sem tocar o banho.

O tempo de reação passou a ser contado imediatamente após a adição da mistura e amostras foram retiradas nos tempos de 5 minutos, 10 minutos, 15 minutos, 20 minutos e 30 minutos. As retiradas de amostras foram feitas por meio de amostradores à vácuo, pesando cada amostra cerca de 12 g.

A agitação do banho foi feita através de um agitador mecânico, posicionado acima do forno e com sua haste descendo até o banho. A haste foi inserida no banho sempre após a adição da mistura dessulfurante.

Para definir a velocidade de rotação do agitador, foi feita uma simulação com água em um Becker. Partindo da rotação mais baixa, esta foi aumentada até ser formado um vórtice abaixo da haste, o que aconteceu a 1.200 rpm.

Então, após os experimentos, foi determinada a variação do teor de enxofre no metal, por meio de análise química por combustão direta infravermelho. Esta análise foi realizada na AMT, através de um LECO.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Caracterização do Material

A análise granulométrica mostrou um tamanho médio das partículas do resíduo de aproximadamente 69µm e que o resíduo tem uma distribuição granulométrica heterogênea, onde quase 43% das partículas tem tamanho até 38 µm (Figura 1).

Como pode ser observado na Figura 1, todo o material tem grãos menores que 1 mm, sendo mais de 40% do material com tamanho inferior a 400 mesh (0,038 mm).

Segundo Shevchenko, Kiyashko e Mal'Kov,⁽¹³⁾ o diâmetro ótimo para a injeção de CaO não é maior que 0,1 mm; condição essa satisfeita com a utilização do resíduo.



Através do resultado obtido no DTA (Figura 2), nota-se um pico endotérmico entre 750°C e 870°C (menor valor em 840°C), que corresponde às decomposições da calcita e dolomita com a liberação de CO₂ por meio das reações apresentadas na própria figura.

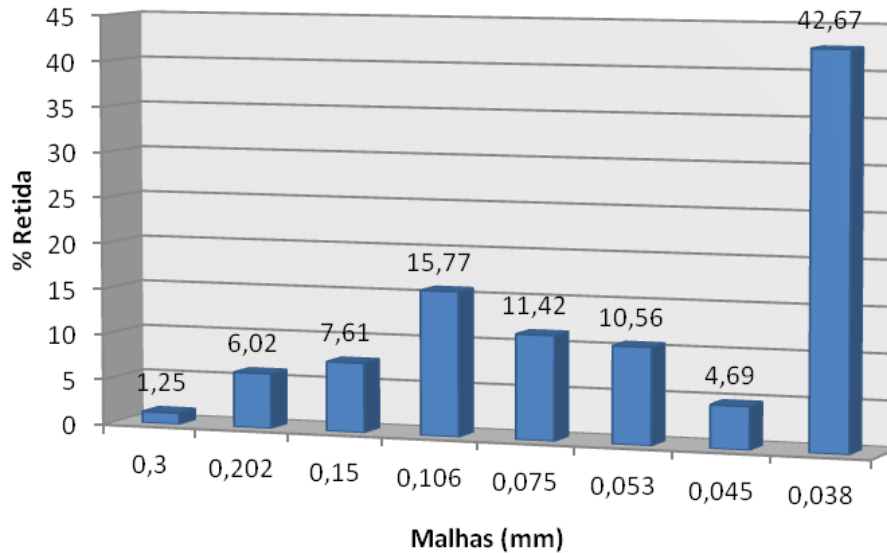


Figura 1. Distribuição granulométrica do resíduo de mármore.

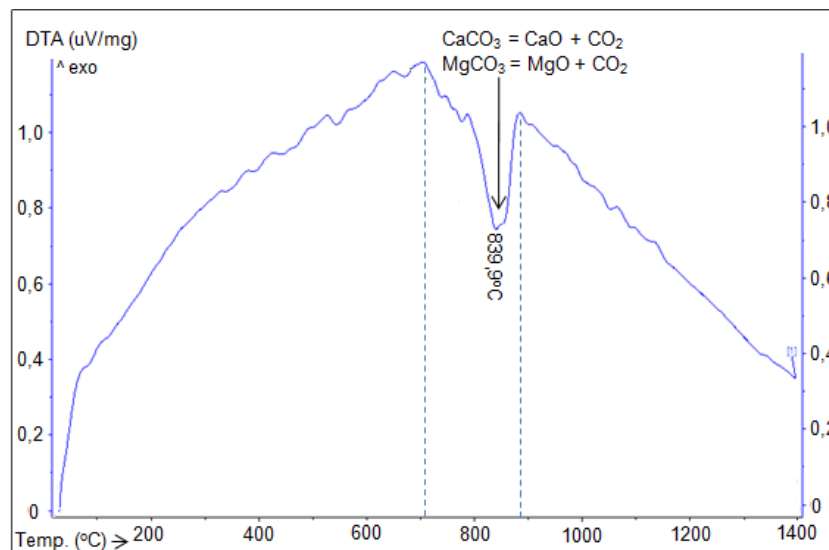


Figura 2. DTA do resíduo de mármore.

Após a análise química do resíduo de mármore, chegou-se à composição apresentada na Tabela 4. Nesta tabela, a coluna “perda ao fogo”, significa a perda de massa devido a calcinação dos carbonatos e liberação de CO₂. A quantidade de CaO indicada nesta tabela é que foi usada nos cálculos das misturas dessulfurantes.

Tabela 4. Composição química do resíduo de mármore

Composto	CaO	MgO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	SO ₃	Fe ₂ O ₃	P ₂ O ₅	Na ₂ O	K ₂ O	PF*
Teor (%)	39,8	14,4	3,33	0,11	0,09	0,07	0,05	0,04	0,03	42,1

* Perda ao fogo



Considerando apenas a massa de resíduo que chega ao banho (57,9% da massa total), ou seja, desconsiderando a perda ao fogo, temos a composição do resíduo conforme apresentada na Tabela 5.

Tabela 5. Composição química do resíduo que chega ao banho

Composto	CaO	MgO	SiO ₂	Outros
Teor (%)	68,7	24,9	5,8	0,6

Além da considerável quantidade de CaO, o resíduo também apresenta uma quantidade de aproximadamente 15% de MgO, o qual é normalmente adicionado à escória para reduzir o desgaste do refratário da panela ou carro-torpedo, não sendo necessário no caso da utilização do resíduo de mármore como dessulfurante.

A análise mineralógica realizada no resíduo de mármore mostrou que o mesmo é composto por CaMg(CO₃)₂ (dolomita), CaCO₃ (calcita) e SiO₂ (quartzo). Este resultado confirma a análise química realizada anteriormente onde o resultado mostrou que a maior parte do resíduo era composto por CaO, presente na calcita e dolomita, mas também com MgO, presente na dolomita, e SiO₂, na forma de quartzo.

3.2 Realização dos Experimentos

A Figura 3 apresenta a variação de enxofre com o tempo para cada um dos experimentos realizados.

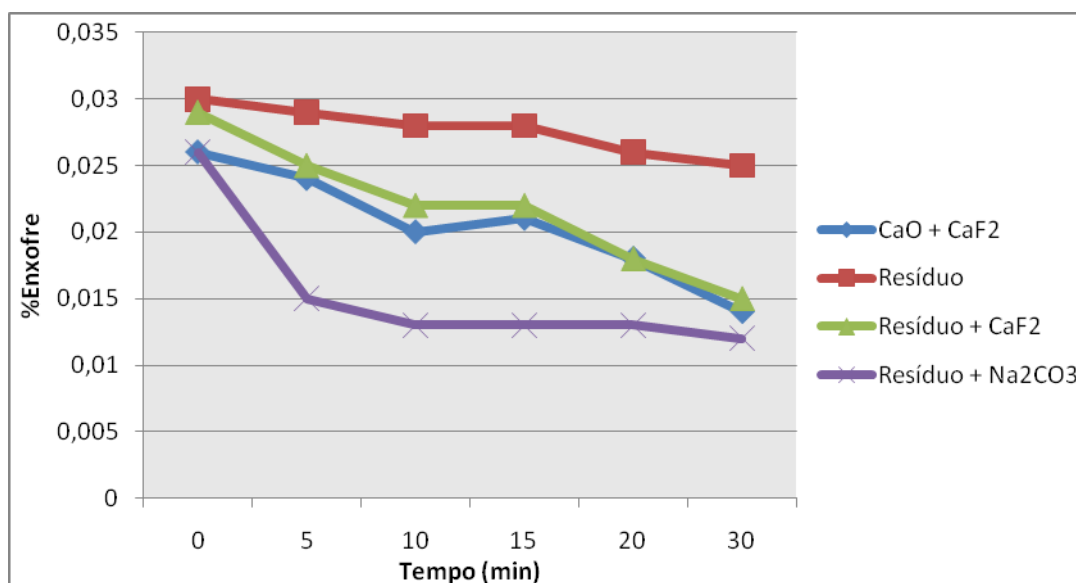


Figura 3. Variação do teor de enxofre em relação ao tempo.

A Tabela 6 mostra os teores iniciais e finais para cada experimento, os quais foram usados para elaborar a Figura 4. Através desta figura é possível visualizar o nível de dessulfuração atingido em cada experimento. Para efeito de comparação, também foram inseridos dois experimentos realizados com as mesmas condições, entretanto sem agitação do banho.⁽⁴⁾



Tabela 6. Teores inicial e final de cada experimentos

Tipo de reagente	Peso de reagente (g)	%S Inicial	%S Final
*CaO + CaF ₂	3,88	0,028	0,022
CaO + CaF ₂	7,22	0,026	0,014
Resíduo	21,22	0,030	0,025
*Resíduo + CaF ₂	11,57	0,028	0,019
Resíduo + CaF ₂	20,10	0,029	0,015
Resíduo + Na ₂ CO ₃	20,51	0,026	0,012

*Experimentos de Arrivabene e Alves.

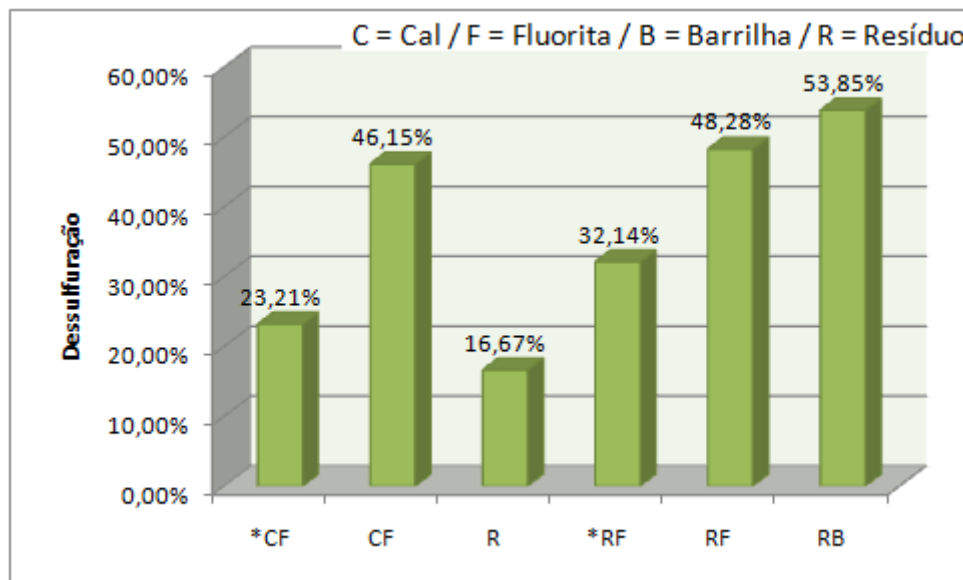


Figura 4. Nível de dessulfuração em cada mistura.

Analisando a Figura 4, podemos observar que o pior resultado foi obtido no experimento onde foi feita a adição apenas de resíduo.

Este resultado tem sua explicação, primeiramente, no fato de que o transporte dos reagentes desde o interior das fases até a interface de reação metal/escória, que poderia ser favorecido pela agitação do banho, não é a etapa controladora do processo. A etapa que controla a reação, no caso da adição do resíduo, é a camada de CaS sólida formada ao redor da partícula de CaO, a qual não sofre alteração com a agitação do banho.

Ohya⁽¹⁴⁾ ainda mostra que quando 15% de cada partícula de CaO é convertida em CaS, o poder dessulfurante do CaO é praticamente nulo. Após ter sido obtida certa espessura da camada de CaS a velocidade de difusão do enxofre se torna insignificante, não permitindo que todo volume de elemento dessulfurante seja utilizado, fazendo com que o rendimento do reagente seja relativamente baixo. Essa explicação elimina a possível vantagem da adição apenas de resíduo.

As misturas CaO+CaF₂ e Resíduo+CaF₂ apresentaram resultados semelhantes (46,15 e 48,28%, respectivamente) e melhores que a adição apenas de resíduo (16,67%). Este resultado foi conseguido, pois com a adição de CaF₂, a camada sólida de CaS formada quando da adição apenas de resíduo não ocorre, o que favorece a reação de dessulfuração, levando a um melhor resultado. Segundo Campos,⁽¹⁵⁾ com a adição dos fundentes, também não ocorre a formação de um possível cálcio-silicato que retardaria o processo de dessulfuração.

Isso acontece, pois o CaF₂ reduz o ponto de fusão da mistura, fazendo com que haja maior quantidade de fase líquida e, conseqüentemente, o transporte de massa seja



facilitado, o que favorece o processo da dessulfuração. Além de reduzir o ponto de fusão da mistura, ele também reduz a viscosidade da escória formada.

O resultado ligeiramente superior da mistura Resíduo+CaF₂ pode ser explicado pela existência de sílica (SiO₂) no resíduo (3,3%), que juntamente com o CaF₂, agem no sentido de aumentar a transferência de massa do CaS formado na escória. Niedringhaus e Fruehan⁽¹⁶⁾ explicam que isso ocorre, pois um aumento na adição de CaF₂ aumenta a quantidade de fase líquida, assim como o aumento de SiO₂ também aumenta a quantidade de fase líquida. Este processo facilita então a transferência de massa do CaS formado na escória, favorecendo assim a dessulfuração. Estes autores ainda mostram através de cálculos que 5% de CaF₂ a 1.450°C, formam 20% de fase líquida, que é suficiente para evitar a precipitação de silicato tricálcico (Ca₃SiO₅), que pararia a reação.

Comparando os experimentos realizados neste estudo com as adições CaO+CaF₂ e Resíduo+CaF₂ em relação aos experimentos sem agitação, é possível observar o incremento na dessulfuração graças ao aumento do transporte de massa promovido pela agitação. Esses dados comprovam que a dessulfuração é favorecida com a agitação.

A mistura Resíduo+Na₂CO₃ apresentou o melhor resultado deste estudo (~6% e 8% acima das adições de CaO+CaF₂ e Resíduo+CaF₂, respectivamente). Esse resultado pode ser atribuído às mesmas razões aplicadas à mistura Resíduo+CaF₂, entretanto sendo o Na₂O mais eficiente que o CaF₂.

Susaki, Maeda e Sano⁽¹⁸⁾ analisaram a dessulfuração para uma escória CaO_{sat}-SiO₂-CaF₂ em temperaturas de 1.200°C a 1.350°C, observando um aumento na capacidade de sulfeto pelo fator 9 com 3% (em massa) de Na₂O. Assume-se que a adição de Na₂O aumentaria a solubilidade de CaO resultando em uma maior capacidade de sulfeto, o que provavelmente resultou na maior dessulfuração da mistura em questão.

A queda de temperatura foi de 25°C, no caso das misturas com resíduo de mármore, e de 10°C, no caso das misturas com CaO, sendo a recuperação da temperatura em 5 minutos e 2,5 minutos, respectivamente. A maior queda de temperatura nas misturas com resíduo deve-se às reações de decomposição dos carbonatos e maior massa das misturas em relação à mistura com CaO. Mesmo assim, os resultados das misturas com resíduo foram melhores, o que mostra que neste caso, a pequena variação de temperatura não afetou a quantidade de fase líquida das escórias e, assim, o processo de dessulfuração.

4 CONCLUSÃO

Através dos resultados dos experimentos realizados podemos chegar às seguintes conclusões:

- a adição de Resíduo puro apresentou o baixo percentual de dessulfuração de 16,67%;
- as misturas CaO+CaF₂, Resíduo+CaF₂ apresentaram resultados semelhantes (46,15 e 48,28) conseguidos com a adição de CaF₂, que elimina a camada sólida de CaS formada quando da adição apenas de resíduo;
- que a agitação provocou um incremento de cerca de 23% em relação a experimentos sem agitação para a adição de CaO+CaF₂ e 16% para a mistura Resíduo+CaF₂;



- a adição de Resíduo+Na₂CO₃ apresentou o melhor resultado deste estudo (53,85%), devido à maior eficiência do Na₂O, em relação ao CaF₂, na formação de fase líquida.

Agradecimentos

Os autores agradecem à CAPES pela bolsa de mestrado, à ArcelorMittal Cariacica pela doação de fluorita e à ArcelorMittal Tubarão pelos dados fornecidos, pelo ferro-gusa e análises químicas.

REFERÊNCIAS

- 1 TURKDOGAN, E. T. Fundamentals of Steelmaking. The Institute of Materials, London, 1996.
- 2 GHOSH, A. Secondary Steelmaking: Principles and Applications. Boca Raton: CRC Press LLC, 2001.
- 3 CHIODI FILHO, Cid. Aspectos de interesse sobre rochas ornamentais e de revestimento. Disponível em: <http://www.abirochas.com.br/rochas_ornamentais_02.php> Acessado em 04/05/2009 às 09:43:32.
- 4 ARRIVABENE, D.; ALVES, G. (2008). Estudo da Utilização de Resíduos de Mármore como Dessulfurante de Ferro Gusa. Trabalho de Conclusão de Curso. Vitória, ES: CEFET-ES.
- 5 CESAR, C.; CHIODI FILHO, Cid. Rochas Ornamentais No século XXI: Bases para uma Política de Desenvolvimento Sustentado das Exportações Brasileiras. Rio de Janeiro - CETEM / ABIROCHAS, 2001.
- 6 ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DE ROCHAS ORNAMENTAIS. Informe nº 03/2009. Balanço das exportações e importações brasileiras de rochas ornamentais em 2008. ABIROCHAS, 2009.
- 7 ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DE ROCHAS ORNAMENTAIS. Informe nº 022/2006. Aspectos de interesse sobre o mercado interno de rochas ornamentais e de revestimento. ABIROCHAS, 2006.
- 8 OETERS, F. Metallurgy of Steelmaking. Berlin: Stahlelsen, 1994.
- 9 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.
- 10 KOROS, P. The Making, Shaping and Treating of Steel: Steelmaking and Refining Volume, Chapter 7. Pittsburg: The AISE Steel Foundation, 1998.
- 11 BARÃO, C. D. Fabricação de aço em forno básico a oxigênio - LD. ABM, 2008.
- 12 HINO, Y.; KIKUCHI, N.; NABESHINA, S.; TAKEUCHI, S. Effect of iron oxide feeding rate and hot metal temperature on dephosphorization rate in torpedo car. ISIJ International, 827-834, 2005.
- 13 SHEVCHENKO, A.; KIYASHKO, A.; MAL'KOV, A. Influence of particle size of lime on effectiveness of pig iron desulphurization. Steel in the USSR, 116-117, 1984.
- 14 OHYA, T. Desulfurization of Hot Metal with Burnt Lime. Steelmaking Proceedings. Vol. 60, 1977.
- 15 CAMPOS, V. F. Tecnologia de fabricação do aço líquido: Fundamentos, 3ª Ed., Belo Horizonte: UFMG, 1985.
- 16 NIEDRINGHAUS, J. C.; FRUEHAN, R. J. Reaction Mechanism for the CaO-Al and CaO-CaF₂ Desulfurization of Carbon-Saturated Iron. Metallurgical Transactions B, 261-268, 1988.
- 17 SUSAKI, K.; MAEDA, M.; SANO, N. Sulfide capacity of CaO-CaF₂-SiO₂ slags. Metallurgical Transactions B, Vol. 21B, 121, 1990.