

REMOÇÃO DE INCLUSÕES ATRAVÉS DO USO DE ESCÓRIAS SINTÉTICAS *

*Estéfano Aparecido Vieira¹
Henrique Silva Furtado²
José Roberto de Oliveira³
Rodrigo de Oliveira Pezzin⁴
Heitor Cristo Clem de Oliveira⁵
Bruno Abreu Louzada⁶*

Resumo

O presente trabalho busca desenvolver métodos de estudo de remoção de inclusões de aço em escala de laboratório relacionando propriedades como viscosidade e composição química das escórias com a capacidade de remoção de inclusões. Com esse fim, foram desenvolvidas cinco escórias usando como referência a viscosidade da fase líquida assim como o percentual da fase líquida. As escórias foram adicionadas sobre o aço fundido e comparou-se o nível de inclusões antes e depois dos experimentos. As escórias também foram analisadas após os experimentos através da difratometria de raios-x para identificação das fases formadas. Os resultados apontam que as escórias testadas possuem a capacidade de remover inclusões. Porém escórias com elevado teor de CaO tem maior eficiência na remoção das inclusões.

Palavras-chave: Inclusão; Escória; Viscosidade; Aço

INCLUSION WITHDRAW USING SYNTHETIC SLAGS

Abstract

The aim of this work was to reach methods to study inclusion removal from steels relating properties such as viscosity and chemical composition of slags with their ability to remove inclusions from steels. Therefore, five slags were developed using as reference the viscosity of the liquid phase as well as the percentage of the liquid phase. Slags were added over the melted steel and the level of inclusions before and after the experiments were compared. The slags were also analyzed after the experiments using x-ray diffraction to identify the formed phases. The results indicate that the slags tested can remove inclusions. However, slag with high content of CaO has greater efficiency in inclusion removal.

Keywords: Inclusion; Slag; Viscosity; Steel

¹ *Engenheiro Metalurgista, Doutor, Pesquisador, Instituto Federal do Espírito Santo – IFES, Vitória, ES, Brasil.*

² *Engenheiro Metalurgista, Doutor, ArcelorMittal Tubarão, Vitória, ES.*

³ *Engenheiro Metalurgista, Doutor, Pesquisador, Instituto Federal do Espírito Santo – IFES, Vitória, ES, Brasil.*

⁴ *Engenheiro Metalurgista, Mestre, Pesquisador, Instituto Federal do Espírito Santo – IFES, Vitória, ES, Brasil.*

⁵ *Engenheiro Metalurgista, Mestre, Pesquisador, Instituto Federal do Espírito Santo – IFES, Vitória, ES, Brasil.*

⁶ *Graduando em Engenharia Metalúrgica, Pesquisador, Instituto Federal do Espírito Santo – IFES, Vitória, ES, Brasil.*

1 INTRODUÇÃO

A importância de se buscar aços com níveis de limpeza cada vez maior é uma preocupação que vem já de muitas décadas atrás nos processos de fabricação e, em geral, os fenômenos que governam estes processos são de grande complexibilidade. Durante a desoxidação dos aços, ocorre a formação das inclusões não metálicas, e a presença destas causam diversos problemas tanto nas etapas de produção como nas propriedades do aço produzido. Devido a esses problemas, as inclusões devem ser removidas quando possível [1].

De acordo com a literatura [1-3] a remoção de inclusões se dá em três estágios. No primeiro, flotação, onde a inclusão é transportada para a interface aço/escória. No segundo, separação, ocorre ao rompimento da tensão superficial do aço permitindo a chegada da inclusão a escória. E o terceiro, a dissolução, é o mais importante para inclusões sólidas que têm solubilidade limitada em escórias e são, portanto, sensíveis às características físicas e químicas, aos gradientes de temperatura e ao volume da escória em questão.

Resultados obtidos por Choi *et al* [1] e utilizado por Reis *et al* [4] destacam que a redução da viscosidade da escória favorece a dissolução da alumina sendo sua influência mais importante que o potencial termodinâmico para dissolução conforme mostra a Figura 1.

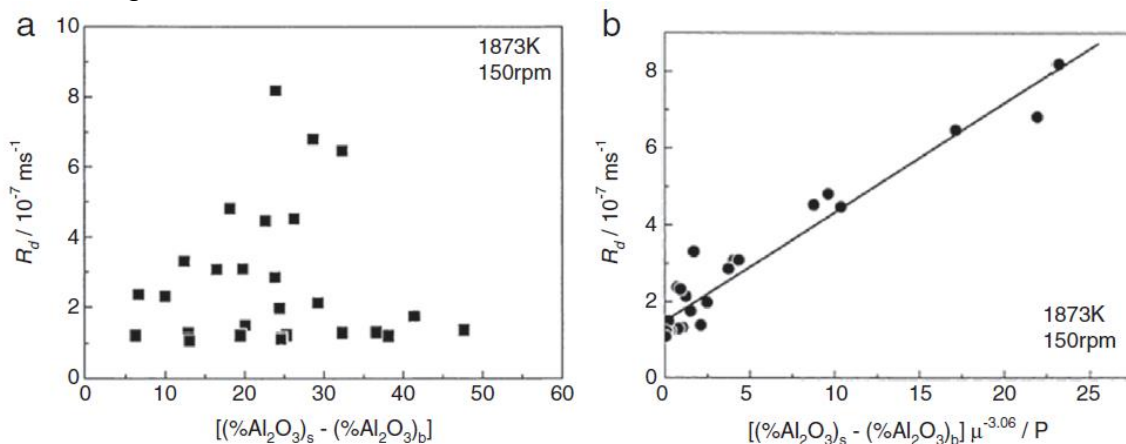


Figura 1. Dependência da dissolução da alumina nas escórias do sistema CaO-SiO₂-Al₂O₃; a) potencial termodinâmico; b) devido a viscosidade [1].

A viscosidade para uma escória com alto grau de polimerização é mais alta do que uma escória com alto teor de componentes que exibem caráter iônico. Portanto, quanto menor a basicidade da escória, maior é seu grau de polimerização, com SiO₂ e Al₂O₃ contribuindo para altos valores de viscosidade. De forma contrária, alta basicidade em escórias, devido ao comportamento iônico de componentes como CaO e MgO diminuem drasticamente a sua viscosidade [5].

O estudo apresentado a seguir, teve como objetivo criar um método para avaliar a remoção de inclusões de alumina em aço, em laboratório. Para isso utilizou como parâmetro a viscosidade da fase líquida da escória, correlacionando-a com a composição química, basicidade e com a porcentagem de fase líquida da escória.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

Para o presente estudo foi utilizado 500 g de aço desoxidado ao alumínio para cada experimento e a Tabela 1 mostra a composição química do aço.

Tabela 1. Composição química do aço utilizado.

Fe	C	Si	Mn	P	S
98.6	0.03	0.006	0.2	0.007	0.006

A Figura 2 mostra duas típicas micrografias do aço antes dos experimentos. As imagens foram obtidas para o mesmo material e percebe-se que a quantidade de inclusões muda bastante de uma microrregião para outra. Inicialmente acreditava-se que a caracterização de uma única amostra seria capaz de definir o nível de inclusões inicial para o presente estudo. Contudo, os resultados mostraram que cada amostra tinha sua característica particular onde os níveis de inclusões variavam de 56 a 729 inclusões/mm². Assim, para ter-se o real desempenho dos experimentos, para cada um deles, os níveis de inclusões foram medidos seguindo as diretrizes da norma (ASTM E45-13, 2017) [6].

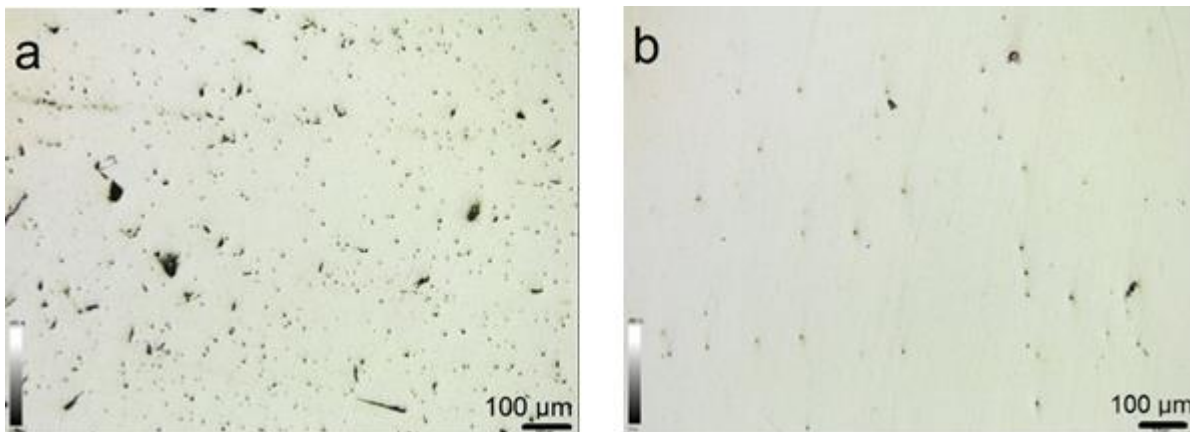


Figura 2. Micrografia mostrando as inclusões presentes no aço, onde em a) região com grande quantidade de inclusões 326u/mm² e em b) região com baixo nível de inclusões 51u/mm².

2.1 Escolha da composição química das escórias

As escórias foram elaboradas baseando-se em composições típicas encontradas nos processos industriais de fabricação de aços. Assim, a partir destas composições e com o auxílio do software FactSage 6.4 foram feitas simulações que permitiram calcular a viscosidade e a quantidade de líquido inicial das escórias em função da basicidade binária e da relação Al₂O₃/CaO, no total foram feitas 160 simulações. A Figura 3a correlaciona a basicidade binária com a viscosidade da fase líquida. Percebe-se que a presença de MgO parece não afetar significativamente a viscosidade das escórias estudadas. Além disso, comparando-se a Figura 3a com a Figura 3b temos que quando se busca maior fração líquida tem-se aumento da viscosidade da fase líquida e diminuindo-se a viscosidade provoca-se a formação de sólidos. Já a Figura 4 correlaciona viscosidade e a porcentagem de fase líquida com a relação CaO/Al₂O₃. Neste caso o aumento da Al₂O₃ tende a aumentar a fase líquida e a viscosidade. Novamente temos uma situação que ajuda por um lado e prejudica por outro.

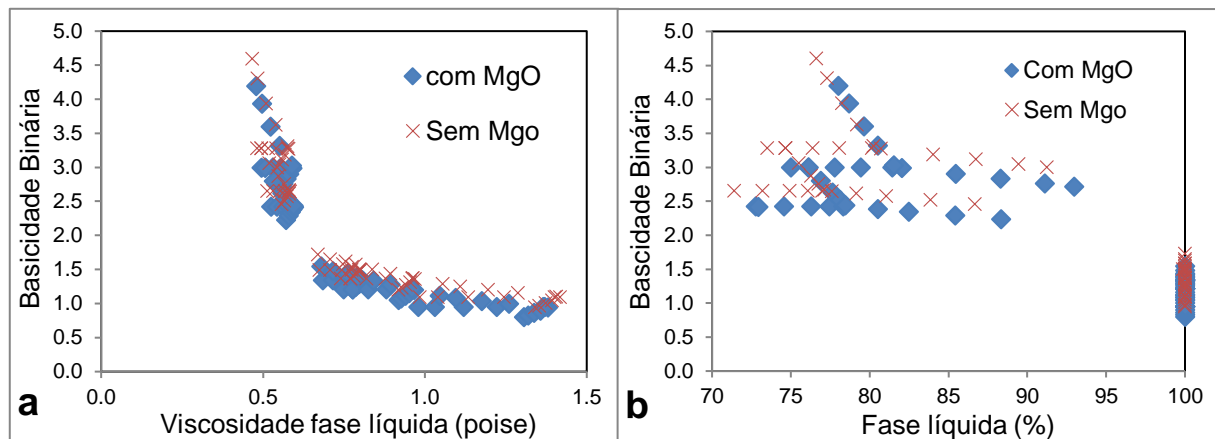


Figura 3. Viscosidade da fase líquida (a) e % de Fase Líquida (b) em função da basicidade binária.

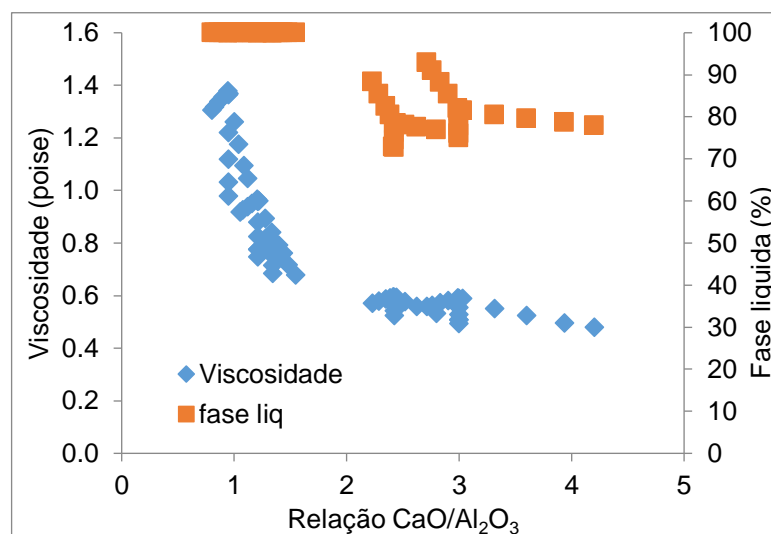


Figura 4. Correlação da viscosidade e a porcentagem de fase líquida com a relação $\text{CaO}/\text{Al}_2\text{O}_3$.

Assim, estes resultados permitiram selecionar escórias com maior fração de fase líquida e com a menor viscosidade. Portanto, foram formuladas composições na base $\text{SiO}_2\text{-CaO-Al}_2\text{O}_3$ e outros compostos, visando-se a máxima quantidade de líquido e minimizando-se a viscosidade logo, provavelmente, mais eficientes para a fixação das inclusões. A Tabela 2 apresenta a faixa de composições escolhidas bem como as viscosidades esperadas e o índice de basicidade. Nas simulações visou-se escórias com e sem a presença de MgO, alto e baixo FeO, bem como, com o mínimo de viscosidade e o máximo de líquido. A Tabela 3 mostra a fração de líquido presente para todas as simulações termodinâmicas. Como referência para as simulações escolheu-se a temperatura de 1600°C .

Tabela 2. Composição química (%), viscosidade da fase líquida e índice de basicidade das escórias A, B, C, D e E.

Escórias	Al_2O_3	SiO_2	CaO	FeO	MgO	Viscosidade da fase líquida (P)	Basicidade Binária
A	17- 21	9-14	50-65	3-8	>3	0,480	3 - 5
B	17-21	9-14	50-65	3-8	0	0,467	3 - 5
C	25-29	8-12	55-65	<1	0	0,973	5 - 10
D	25-29	8-12	50-65	<1	>3	0,993	5 - 10
E	25-29	8-12	55-65	1-4	0	0,871	5 - 10

Tabela 3. Percentual de fase líquida.

Escória	%fase líquida	%fase sólida
A	100	0
B	100	0
C	94,8	5,2
D	96,3	3,7
E	92,5	7,5

3 EXPERIMENTOS

Com a composição das escórias definidas, então realizou-se os experimentos. A Figura 5 mostra esquematicamente o aparato experimental.

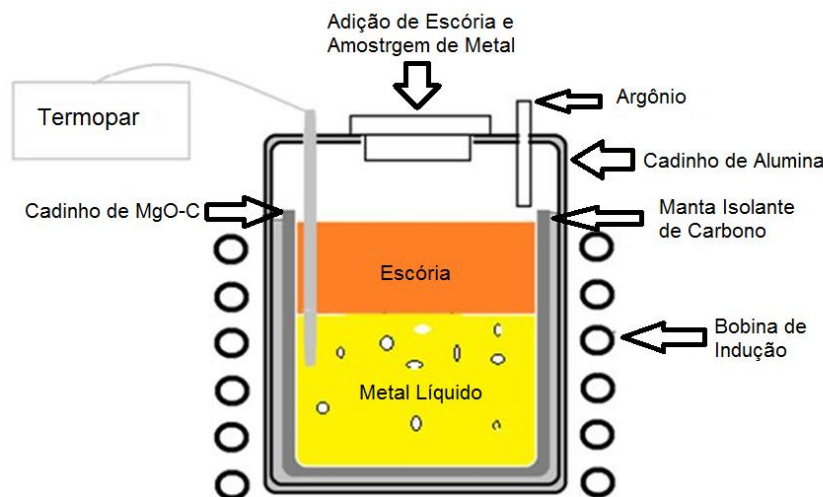


Figura 4. Croqui esquemático do processo experimental para estudo de remoção de inclusões.

Para os experimentos, o aço foi colocado em um cadinho de magnésio carbono (MgO-C) com diâmetro interno de aproximadamente 35mm e 70mm de altura e inserido em um cadinho de alumina. Os cadinhos foram produzidos com tijolos normalmente usados em linha de escória de conversores LD. Durante os experimentos, a temperatura foi medida e aferida com um termopar posicionado no interior do metal e mantida a 1600°C. Além disso, foi mantido um fluxo de argônio para evitar a oxidação do aço. Após atingir a temperatura, foi adicionado a escória que foi mantida sobre o banho por um tempo de 5 min. A agitação do sistema foi fornecida pelo forno de indução. Ao final do experimento o cadinho de MgO com aço foi retirado do forno e resfriado em água. O aço foi cortado longitudinalmente para análise e contagem das inclusões. Para cada escória foram feitos pelo menos 3 experimentos. No total foram feitos 22 experimentos.

Após os experimentos, o índice de remoção de inclusões (I) foi calculado seguindo-se a equação 1:

$$I = \left(1 - \frac{n_f}{n_i}\right) \cdot 100 \quad (1)$$

Onde n_i é o número de inclusões/mm² inicial e n_f é o número de inclusões/mm² final.

3.1 Difração de raios-X

As escórias dos 22 experimentos foram analisadas através da técnica de Difração de Raios-X, com o objetivo de correlacionar as fases formadas com a eficiência de

remoção das inclusões. A análise foi realizada com os seguintes parâmetros: 2θ variando de 10° até 100° ; tensão em 40 kV e corrente em 40 mA; abertura do emissor em 0,681mm e do receptor de 4,5 mm; velocidade de rotação de $10^\circ/\text{min}$; incremento de $0,02^\circ$. Cada escória foi moída para que atingisse granulometria inferior a 200 mesh necessária para análise.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

As Figuras 6 e 7 comparam os níveis iniciais médio das inclusões do aço utilizado que foi 175 unidades/ mm^2 como os níveis de inclusões final médio que foi cerca de 69 unidades/ mm^2 respectivamente. Assim, conclui-se que os experimentos em linhas gerais favorecem a remoção das inclusões. Contudo, não foi possível estabelecer como que cada variável estudada (tipo de escória, nível FeO e de MgO) atua sobre a capacidade das escórias removerem as inclusões conforme será apresentado a frente.

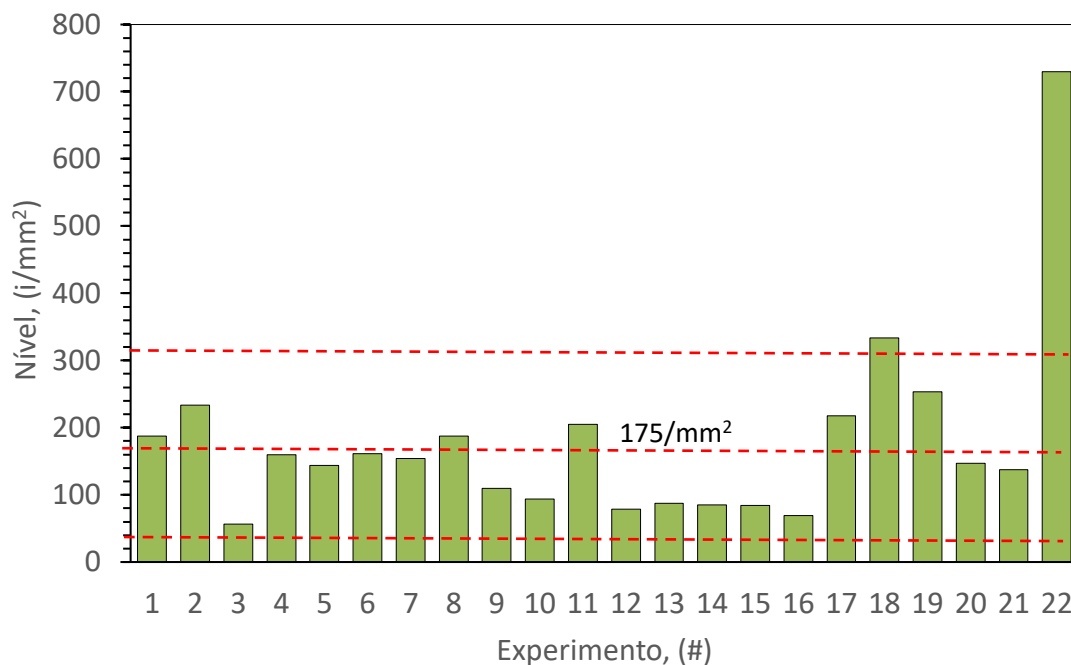


Figura 6. Concentração inicial de inclusões por unidade de área para todos os experimentos.

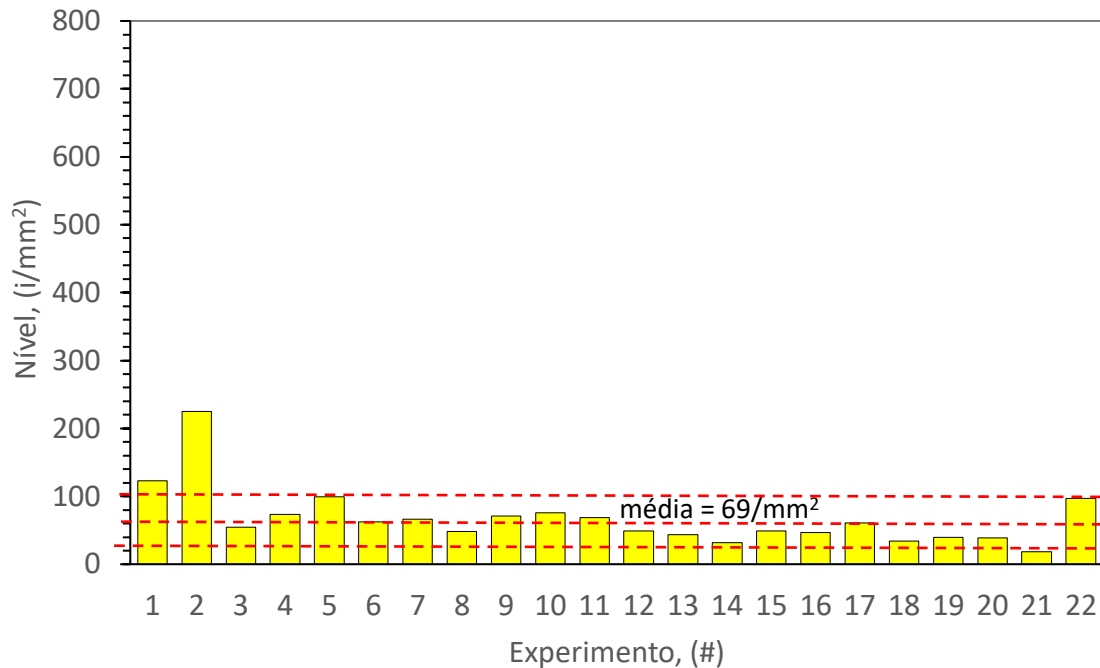


Figura 7. Concentração final de inclusões por unidade de área para todos os experimentos.

4.1 Influência do MgO e CaO em escórias com e sem FeO

A Figura 8 compara as escórias com MgO (A) e sem MgO (B). Percebe-se claramente uma grande variabilidade dos resultados de ambos os materiais o que impede a identificação de qualquer efeito significativo nesta faixa de MgO. Estas escórias apresentam, segundo cálculos termodinâmicos, as menores viscosidades, portanto teria de fato maior capacidade de remoção de inclusões de alumina conforme os estudos de Choi *et al* [1] e Reis *et al* [4].

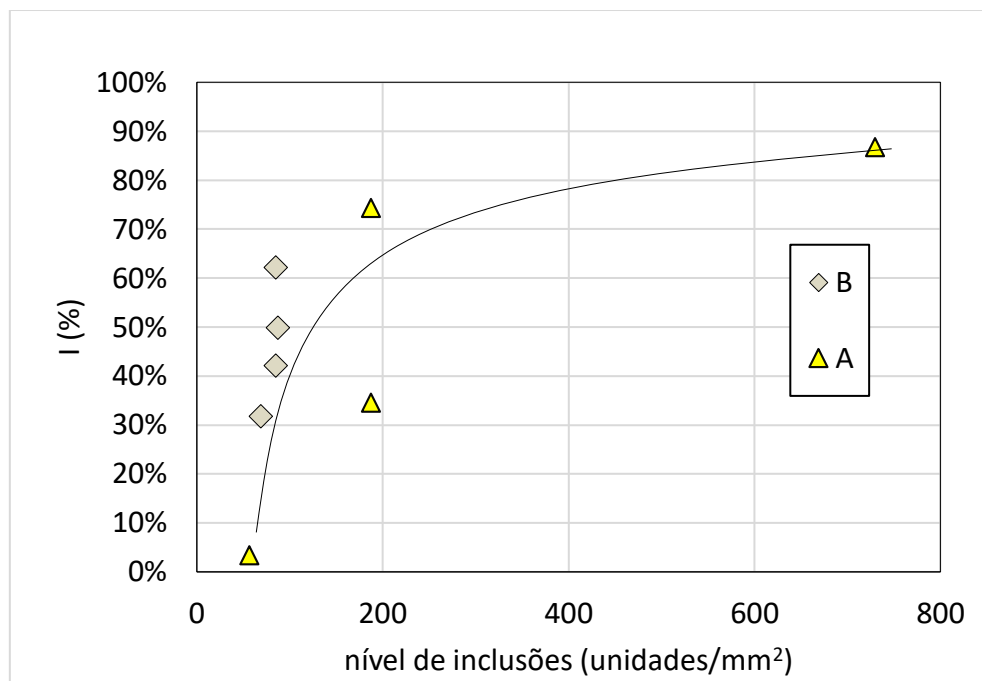


Figura 8. Influência do MgO no índice de remoção de inclusões em escórias com FeO. Escória A com MgO e escória B sem MgO.

Para verificar como o FeO atua no processo, temos a Figura 9a que compara os índices de remoção para as escórias C e D com baixo FeO. Podemos verificar, que ambas as misturas possuem capacidade de remoção das inclusões. Este resultado é muito importante do ponto de vista industrial, pois, é muito difícil obter escórias com baixo teor de FeO. Ele pode ser explicado pela maior taxa de absorção das inclusões em relação a geração delas pela reoxidação provocada pelo FeO. A primeira favorecida pela menor viscosidade [1]. Já a Figura 9b mostra resultados comparativos com escórias que não contém MgO. Percebe-se que a de melhor desempenho é a escória E onde atingiu-se os maiores níveis de remoção de inclusões que foi na média 81% de eficiência o qual corresponde a 38u/mm² para o nível final de inclusões. No caso da escória E a mesma possui o teor de CaO mais elevado e uma concentração intermediária de FeO conforme as faixas apresentadas na Tabela 2.

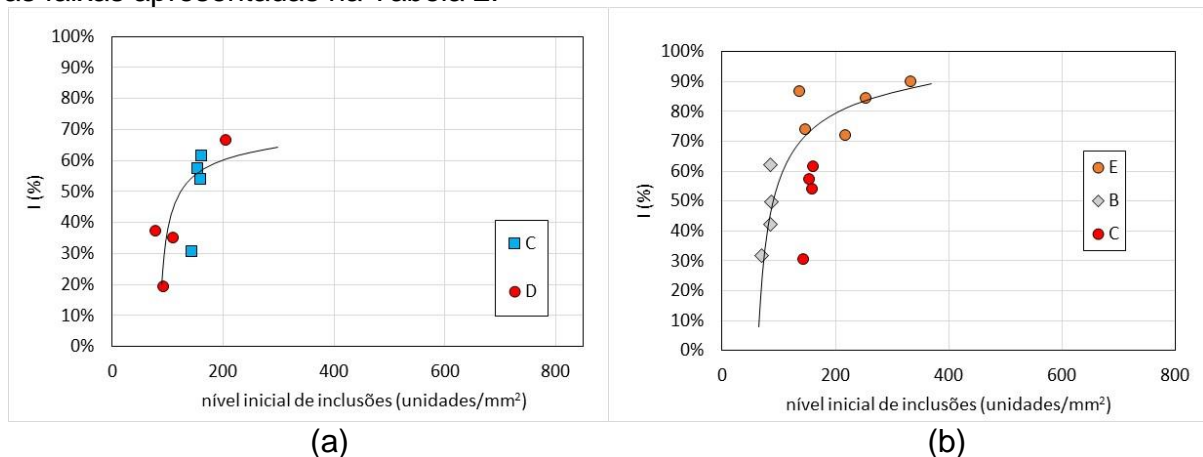


Figura 9. Influência do MgO no índice de remoção de inclusões (a) em escórias sem FeO (b) Em escórias sem MgO.

Considerando-se o conjunto testado (Figura 10), parece de fato haver um efeito da densidade inicial das inclusões no processo de remoção, ou seja: quanto mais limpo o aço, mais difícil limpá-lo.

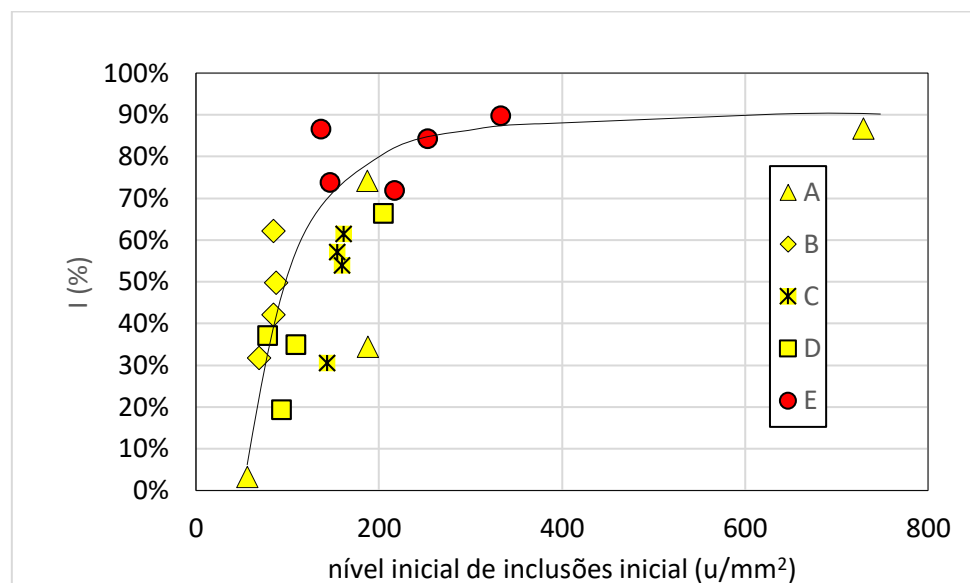


Figura 10. Influência do tipo de escória na eficiência de remoção de inclusões. Resultado mostrando o melhor desempenho para escória E.

Na faixa de densidade de inclusões iniciais em torno de 200 u/mm², observa-se um melhor resultado da escória (E), que não apresenta a menor viscosidade logo,

contrariando a literatura [1,2,7]. De fato, a Figura 11 não mostra nenhuma tendência neste sentido. Portanto, deve haver outras variáveis igualmente importantes para a absorção das mesmas, possivelmente associadas às fases presentes na escória e ao tipo de inclusão, um aspecto importante é que a escória (E) é a que possui a maior concentração de CaO entre todas e conforme a literatura [1], o aumento de CaO na escória favorece a remoção das inclusões.

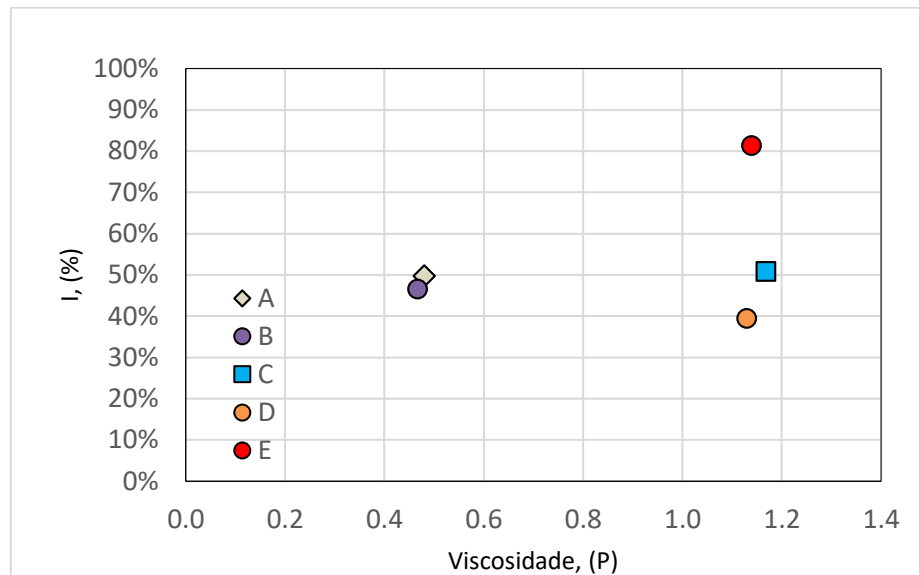


Figura 11. Correlação da viscosidade das escórias o índice de remoção médio.

Observa-se na Figura 12 as intensidades medidas pela difratometria, onde foram detectadas as fases Ca_3SiO_5 ou $(\text{CaO})_3\text{SiO}_2$ e $\text{Ca}_{54}\text{MgAl}_2\text{Si}_{16}\text{O}_{90}$ ou $(\text{CaO})_{54}(\text{SiO}_2)_{16}\text{MgOAl}_2\text{O}_3$ e a densidade de inclusões final. Apesar da grande dispersão observada nota-se uma tendência de elevadas taxas de remoção estar associadas a elevadas intensidades, ou melhor, a elevadas ocorrências destas fases, que podem ter surgido durante o resfriamento rápido das amostras. A ausência de fases com elevada concentração de Al_2O_3 sugere que as escórias, mesmo após absorverem as inclusões não ficaram saturadas ao final dos mesmos. Estas informações são importantes para simulações termodinâmicas futuras, pois podem estar indicando quais são de fato as escórias que podem remover as inclusões.

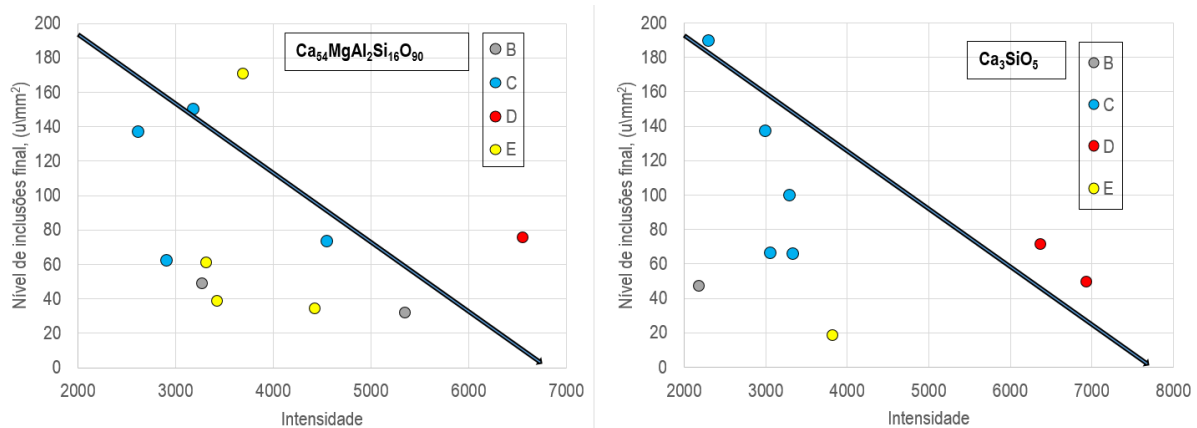


Figura 12. Correlação do nível de intensidade máximo de fases formadas com o nível de inclusão final.

4 CONCLUSÃO

A escória E com alto CaO e teor de FeO intermediário foi a que se mostrou como a de melhor desempenho, e esta por sua vez, não é a escória com o menor valor de viscosidade.

O nível médio de inclusões inicial para o aço é de 175 u/mm² e a média final obtida para todos os experimentos foi de 69 u/mm² e no caso da escória E o resultado médio final de eficiência foi de 38 u/mm² mostrando que seu efeito é bastante superior ao da média geral.

A formação das fases Ca₃SiO₅ e Ca₅₄MgAl₂Si₁₆O₉₀ parecem garantir menor nível de inclusões final, pois, para todos os experimentos onde foram encontradas estas fases o nível de inclusões tende a diminuir com o aumento da intensidade para uma mesma escória.

Mesmo com um teor de FeO mais elevado foi observado índices de remoção de inclusões significativos, na verdade o melhor resultado obtido neste trabalho foi justamente para a mistura contendo uma concentração intermediária de FeO entre 1 e 4%.

Agradecimentos

Os autores agradecem a Arcelor Mittal Tubarão pelo suporte deste projeto. Ao Instituto Federal de Ciência e Tecnologia do Espírito Santo – IFES pelo apoio. Agradecem também pelo apoio as agências de financiamento: FAPES – Fundação de Amparo a Pesquisa do Espírito Santo; CNPQ – Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico e a FINEP – Financiadora de Estudos e Projetos.

REFERÊNCIAS

- 1 Choi JY, Lee HG, Kim JS. Dissolution rate of Al₂O₃ into molten CaO-SiO₂-Al₂O₃ slags. ISIJ International. 2002;42(8):852-860.
- 2 Valdez M, Shannon GS, Sridhar S. The ability of slag to absorb solid oxide inclusions. ISIJ International, 2006;46(3):450-457.
- 3 Reis BH, Belefeldt WV, Vilela ACF. Absorption of non-metallc inclusions by steelmaking slags-a review. Journal of Material Research and Technology. 2014;3(2):179-185.
- 4 Reis BH, Biellefeldt WV, Vilela ACF. Efficiency of inclusion absorption by slags during secondary refining of steel. ISIJ international. 2014; 54(7):1584-1591.
- 5 Ferraro, BB. Estudo das propriedades termofísicas de escória metalúrgica e de escórias sintéticas de CaO-SiO₂-Al₂O₃-MgO. Trabalho de Conclusão de Curso. São Paulo. Universidade de São Paulo- Escola Politécnica. 2014.
- 6 ASTM E45-13 Standard Test Methods for Determining the Inclusion Content of Steel. 2017.
- 7 Qin Y, Wang X, Li L, Huang F. Effect of oxidizing slag on cleanliness of IF steel during ladle holding process. Steel Research International. 2015;86(9):1037-1045.