



Tema: Iniciação Científico-tecnológica

ESTUDO DE CARACTERIZAÇÃO DE INCLUSÕES DE ÓXIDOS EM AÇO ALTO CARBONO*

Caroline Almeida Santos Fraga¹

Wagner Viana Bielefeldt²

Antônio Cezar Faria Vilela³

Resumo

Aços com elevada qualidade microestrutural cada vez mais são requeridos pela indústria, devido as suas propriedades mecânicas e metalúrgicas superiores. O conceito de qualidade microestrutural está relacionado à presença de inclusões não metálicas. Para atingir uma limpeza inclusionária efetiva é importante o conhecimento de como cada etapa do processo influencia no comportamento inclusionário. Sendo assim, o objetivo deste trabalho é caracterizar as inclusões no processo de lingotamento contínuo, bem como estudar os efeitos de algumas variáveis do processo sobre as mesmas. Amostras de aço alto carbono foram retiradas no distribuidor do lingotamento contínuo em uma planta siderúrgica e foram submetidas à análise via MEV/EDS automatizado e medições de oxigênio total. O posicionamento da composição química das inclusões varridas em diagramas ternários remetidas às análises de morfologia e a correlação do nível inclusionário com parâmetros do processo e escórias, possibilitou entender o comportamento das inclusões. Como resultado parcial é observado a transferência de elementos da escória para as inclusões por intermédio do banho, por exemplo, devido à geração de espinélios ao final do processo. Percebe-se também que, além do efeito da diminuição da temperatura na geração de novas inclusões, alguma reoxidação deve ser considerada. O resultado esperado é obter maior conhecimento do processo, contribuindo no desenvolvimento de aços especiais.

Palavras-chave: Caracterização; Inclusões de óxidos; Oxigênio total.

STUDY OF CHARACTERIZATION OF OXIDE INCLUSIONS IN HIGH CARBON STEEL

Abstract

Steels with high microstructural quality are increasingly required by industry due its superior mechanical and metallurgical properties. The concept of microstructural quality is related to the presence of non-metallic inclusions. To achieve effective treatment of inclusions is important to know how each step of the process influences the inclusion behavior. Thus, the aim of this work is to characterize the inclusions in the continuous casting process, as well as studying the effects of some variables on them. High carbon steel samples were taken from distributor in continuous casting steel plant and were subjected to analysis via SEM / EDS and measurements of the total oxygen. The positioning of the chemical composition of the inclusions analyzed in ternary diagrams sent to analyzes of morphology and correlation of inclusionary level with process parameters and slag promoted the understanding of the behavior of the inclusions. As a partial result, is observed the transfer of slag elements to the inclusions through the bath, for example, due to the generation of spinel phase at the end of the process. It is also evident that, besides the effect of the temperature decrease in the generation of new inclusions, some reoxidation should be considered. The expected result is to obtain greater knowledge of the process contributing to the development of special steels.

Keywords: Characterization; Oxide inclusions; Total oxygen.

¹ Graduanda em Engenharia Metalúrgica, Laboratório de Siderurgia, UFRGS, Porto Alegre, RS, Brasil.

² Dr., Laboratório de Siderurgia, LASID, Depto. de Metalurgia, UFRGS, Porto Alegre, RS, Brasil.

³ Dr.-Ing., Laboratório de Siderurgia, LASID, Depto. de Metalurgia, UFRGS, Porto Alegre, RS, Brasil.

* Contribuição técnica ao 69º Congresso Anual da ABM – Internacional e ao 14º ENEMET - Encontro Nacional de Estudantes de Engenharia Metalúrgica, de Materiais e de Minas, 21 a 25 de julho de 2014, São Paulo, SP, Brasil.



1 INTRODUÇÃO

Aços com características específicas e com qualidade microestrutural superiores são um desafio para a siderurgia, que cada vez mais necessita do conhecimento aprofundado dos fenômenos metalúrgicos envolvidos em cada etapa do processo. Sendo assim, o estudo de inclusões de óxido nos aços torna-se necessário, tanto para a indústria siderúrgica, interessada na elaboração de procedimentos de controle visando a redução destes defeitos, quanto para o cliente cujas exigências aumentam à medida que aumenta a tecnologia.

A presença de inclusões de óxidos pode causar esfoliações e trincas, comprometer as propriedades mecânicas dos aços, podendo também comprometer o processo de fabricação [1]. De acordo com a norma para métodos de determinação de inclusões, ASTM E-45, o tamanho crítico para aços usados em rolamentos, como o SAE 52100 usado neste estudo, é da ordem de 10 μ m. Para inclusões maiores, a norma recomenda uma distância mínima entre as inclusões de 40 μ m. Em rolamentos, a falta de controle inclusionário compromete, principalmente, a vida do componente em fadiga, já que trincas podem ser induzidas a partir de inclusões, ocasionando uma série de falhas [2]. À medida que o tamanho das inclusões em aços para rolamento é maior, a vida em fadiga do componente diminui. Na literatura, diversos autores correlacionam diretamente o tamanho de inclusão com o nível de tensões responsáveis pela geração de falhas por fadiga [1,2].

Dessa forma, uma das maneiras de diminuir os efeitos nocivos causados pelas inclusões de óxidos é anular ou minimizar suas ações. Para isto, é essencial o conhecimento do tipo de inclusões que estão sendo formadas ao longo do processamento de aços.

Este trabalho se propõe a caracterizar as inclusões geradas no lingotamento contínuo de um aço alto carbono, especificamente a qualidade SAE 52100, utilizada principalmente para a confecção de rolamentos. Além disso, entender os efeitos das etapas de refino secundário nas inclusões geradas no distribuidor de uma usina siderúrgica. Os resultados das análises químicas via MEV/EDS possibilitaram a caracterização das inclusões com relação à distribuição, tamanho, composição química e morfologia. Todos os dados serviram para avaliar a influência das condições do processo na formação de inclusões ricas em MgO e de maneira a agitação do banho pode influenciar na composição das inclusões.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

Para o estudo de caracterização de inclusões de óxidos no aço para rolamento foi utilizada metodologia baseada em Bartosiaki [1]. Resultados de análises químicas elementares de amostras de aço e escórias foram usados, além de valores de oxigênio total de amostras de aço. A amostragem foi realizada com intuito de estudar os efeitos dos parâmetros do processo de refino secundário no distribuidor do lingotamento contínuo em uma usina siderúrgica. Os dados obtidos foram correlacionados e diagramas ternários das inclusões foram plotados via planilha Excel.

O aço estudado é o SAE 52100, classificado pela SAE-AISI como um aço de alto carbono, com baixo teor de inclusões e normalmente acalmado ao alumínio.

* *Contribuição técnica ao 69º Congresso Anual da ABM – Internacional e ao 14º ENEMET - Encontro Nacional de Estudantes de Engenharia Metalúrgica, de Materiais e de Minas, 21 a 25 de julho de 2014, São Paulo, SP, Brasil.*



Apresenta após a têmpera, elevada dureza e resistência ao desgaste, com moderada temperabilidade. É comumente utilizado na construção mecânica para fabricação de rolamentos. Na Tabela 1 verifica-se a faixa de concentração dos principais elementos de liga do aço em questão.

Tabela 1. Composição química para o aço SAE 52100 em % em massa [11]

C	Cr	Si	Mn	S	P
0,98-1,10	1,30-1,60	0,15-0,35	0,25-0,45	0,025 máx	0,025 máx

2.1 Procedimento Experimental

Para a obtenção dos dados necessários para a caracterização de inclusões, foram adotadas uma série de operações em planta siderúrgica e em laboratório. A figura 1 expõe o fluxograma de operações adotadas. Primeiramente, houve a amostragem da qualidade de aço estudada e de escórias ao longo do processo na planta industrial. As amostras de aço foram analisadas via microscopia eletrônica de varredura automatizada acoplada à espectrometria de energia dispersiva (MEV/EDS) para a obtenção de imagens e composição química elementar das inclusões. Além da utilização de um determinador simultâneo de nitrogênio e oxigênio para os valores de oxigênio total. As amostras de escória tiveram sua composição química determinada via fluorescência de raios-x. As composições químicas das escórias foram utilizadas para simulação termodinâmica no software FactSage. As composições químicas das inclusões possibilitaram o estudo em diagramas ternários obtidos por plotagem em planilha Excel. Na Figura 1, tem-se o fluxograma com a metodologia utilizada neste estudo.

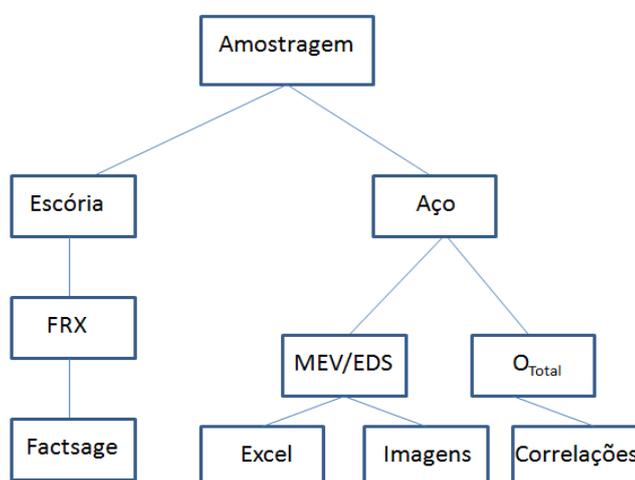


Figura 1. Fluxograma da metodologia utilizada neste estudo.

2.1.1 Amostragem

A caracterização de inclusões de óxidos foi feita através da análise de dez corridas em sequência (C1 a C10), das quais diversas amostras de aço e escórias foram retiradas. Contudo, este estudo concentra-se em caracterizar as inclusões no lingotamento contínuo (amostras A4). Sendo assim, apenas as amostras de aço no

* Contribuição técnica ao 69º Congresso Anual da ABM – Internacional e ao 14º ENEMET - Encontro Nacional de Estudantes de Engenharia Metalúrgica, de Materiais e de Minas, 21 a 25 de julho de 2014, São Paulo, SP, Brasil.



distribuidor foram consideradas para resultados e discussões. A Figura 2 mostra o fluxo de amostragem utilizada neste trabalho.

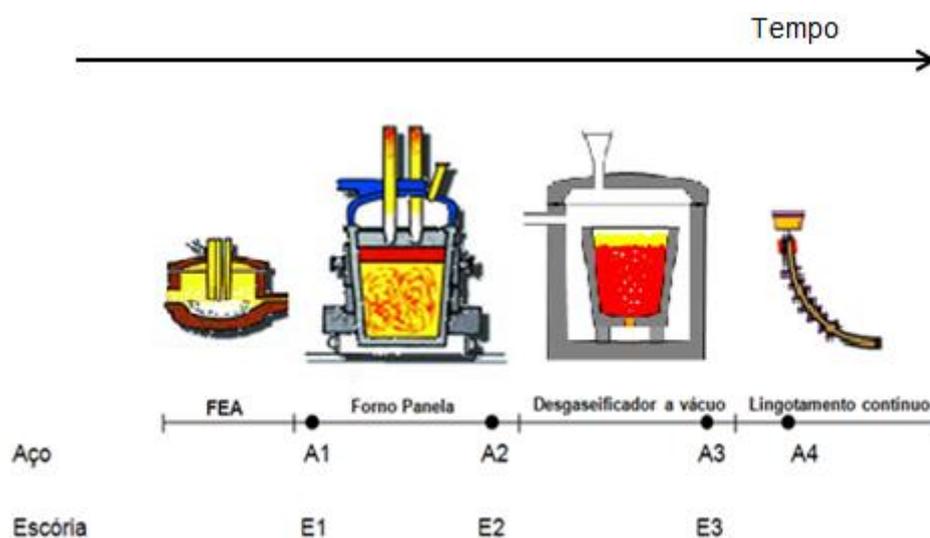


Figura 2. Fluxograma esquemático com as operações adotadas para retirada de amostras

Onde:

A1- amostra de aço retirada na chegada ao forno-panela.

A2- amostra de aço retirada antes de tratamento no desgaseificador a vácuo.

A3- amostra de aço retirada após o tratamento no desgaseificador a vácuo.

A4- amostra de aço retirada no distribuidor de lingotamento contínuo.

E1- amostra de escória retirada na chegada ao forno-panela.

E2- amostra de escória retirada antes de tratamento no desgaseificador a vácuo.

E3- amostra de escória retirada após tratamento no desgaseificador a vácuo.

2.1.2 Técnicas de análise utilizadas

As amostras de aço foram analisadas via microscopia eletrônica de varredura automatizada acoplada à espectrometria de energia dispersiva (MEV/EDS), pelo equipamento ASPEX-PSEM explorer, para a obtenção de imagens micrográficas e da composição química elementar das inclusões. Como o equipamento utilizado é automatizado, foi possível analisar todas as inclusões encontradas na área da amostra varrida. O método automatizado é o mais recomendado para a identificação de microinclusões (inclusões menores que $20\mu\text{m}$), já que, tanto a capacidade de detecção de intervalos de tamanhos, quanto o número de inclusões detectáveis são grandes [3]. As faixas de tamanho estratificadas pelo equipamento ASPEX-PSEM explorer compreendem as faixas definidas entre $(0,5-2,5)\mu\text{m}$, de $(2,5-5)\mu\text{m}$, de $(5-15)\mu\text{m}$ e diâmetros iguais e maiores (\geq) a $15\mu\text{m}$. Entretanto, a faixa de $(0,5-2,5)\mu\text{m}$ não foi considerada neste estudo para o cálculo de fração de área. Além disso, houve a utilização de um determinador simultâneo de nitrogênio e oxigênio (equipamento LECO modelo 436) para os valores de oxigênio total nas provas de aço.

As composições químicas das amostras de escória foram determinadas via fluorescência de raios-x (equipamento CW2600 – PHILIPS). Estas composições

* Contribuição técnica ao 69º Congresso Anual da ABM – Internacional e ao 14º ENEMET - Encontro Nacional de Estudantes de Engenharia Metalúrgica, de Materiais e de Minas, 21 a 25 de julho de 2014, São Paulo, SP, Brasil.



químicas foram utilizadas para simulação termodinâmica no software FactSage, versão 6.4, utilizando o banco de dados FToxid sólidos puros estequiométricos e soluções para temperatura de 1600°C. As composições químicas das inclusões possibilitaram o estudo em diagramas ternários obtidos por plotagem em planilha Excel. A escolha dos sistemas ternários adotados foi feita considerando quais sistemas melhor representariam a composição química das inclusões em determinada etapa, como mostra a Tabela 2.

Tabela 2. Esquematização das amostras de aço com suas respectivas origens e sistemas ternários adotados.

Amostra de aço	Origem no processo	Sistema ternário adotado
A1	Chegada ao FP	MnO-SiO ₂ -Al ₂ O ₃
A2	Antes de tratamento no VD	CaO-SiO ₂ -Al ₂ O ₃
A3	Após o tratamento no VD	CaO-SiO ₂ -Al ₂ O ₃
A4	Distribuidor no LC	CaO-Al ₂ O ₃ -MgO

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste estudo, primeiramente buscou-se entender a distribuição das inclusões de óxidos de acordo com as faixas de tamanho encontradas nas amostras retiradas no distribuidor. A Figura 3 mostra a relação entre as frações de área de (a) inclusões menores e (b) inclusões maiores que 15µm para cada corrida, nas amostras A3, depois do tratamento com vácuo e A4, no início do lingotamento. O cálculo de fração de área utilizado para obter os valores usados na figura 3 envolve a razão entre a soma da área das inclusões encontradas e a área total varrida pelo equipamento.

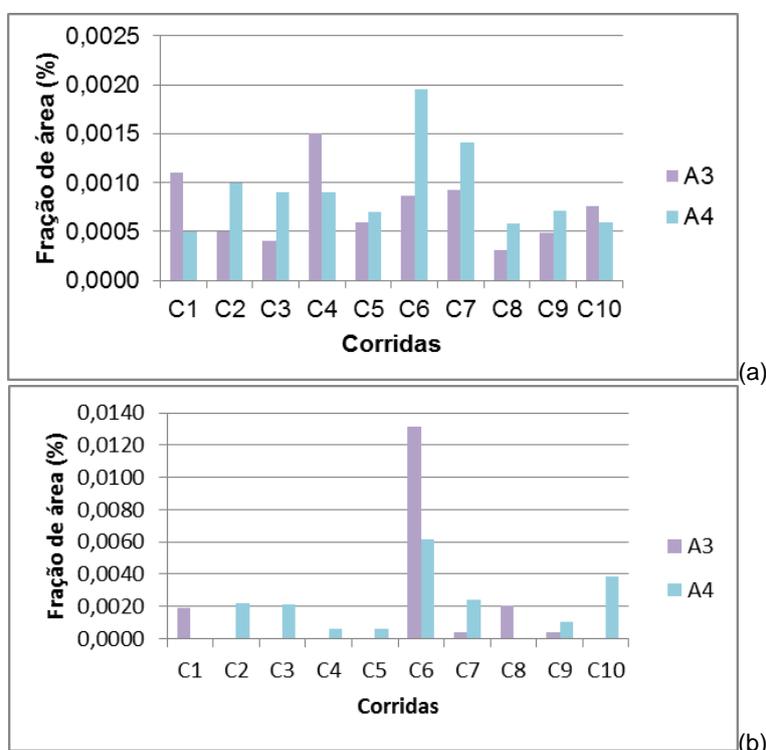


Figura 3. Evolução da fração de área das inclusões. a) menores do que 15µm e b) maiores do que 15µm.

* Contribuição técnica ao 69º Congresso Anual da ABM – Internacional e ao 14º ENEMET - Encontro Nacional de Estudantes de Engenharia Metalúrgica, de Materiais e de Minas, 21 a 25 de julho de 2014, São Paulo, SP, Brasil.



Para inclusões menores que $15\mu\text{m}$ (figura 3a), observa-se um aumento na fração de área entre as provas para a maioria das corridas. É muito provável que este fenômeno esteja associado principalmente a diminuição de temperatura, ou devido a alguma reoxidação, fazendo com que novas inclusões sejam geradas. Após a saída da panela do forno-panela, não existe nenhum equipamento que forneça temperatura ao banho. Analisando isoladamente as inclusões maiores que $15\mu\text{m}$ (Figura 3b), nota-se em praticamente todas as corridas a diminuição da fração de área, o que denota sua remoção progressiva durante todas as etapas de processamento.

A utilização de métodos indiretos para a verificação da quantidade de inclusões é comumente usado industrialmente. Um dos mais utilizados é a medida dos níveis de oxigênio total, que é diretamente relacionado à presença de inclusões [4,5].

A Figura 4 correlaciona, a média do oxigênio total medido em todas as provas e o número de inclusões encontradas por área de amostra varrida, para cada faixa de tamanho.

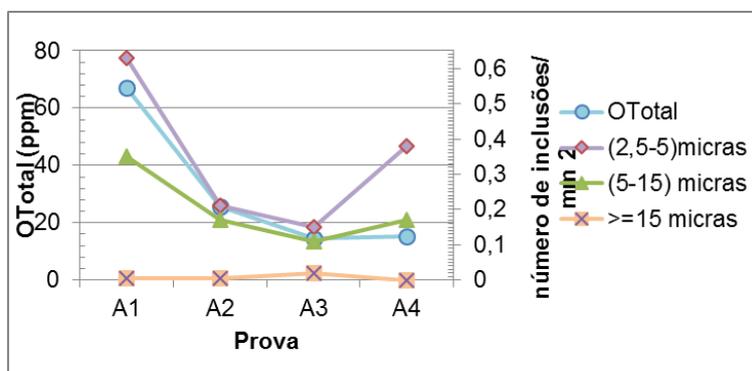


Figura 4. Evolução do O_{total} e densidade média de inclusões ao longo das provas.

Novas inclusões menores que $15\mu\text{m}$ surgem no final do processo, sendo que o aumento é maior para inclusões menores na faixa de tamanho entre $2,5\mu\text{m}$ e $5\mu\text{m}$. Isto também explica o pequeno aumento nos valores de oxigênio total medido na prova A4. Também se pode observar uma relação entre o oxigênio total ao longo das provas e o número de inclusões por mm^2 , quando considerada a faixa de $2,5\mu\text{m}$ até $15\mu\text{m}$. Dessa maneira, o oxigênio total no aço pode ser usado como uma medida das microinclusões [5,6].

Para as inclusões menores do que $15\mu\text{m}$, ao final do processo, as inclusões se encontram nas regiões de cálcio-aluminatos e de espinélios, como pode ser observado na Figura 5. Isto acontece pois ao final do tratamento no forno-panela há o deslocamento das inclusões para as regiões mais ricas em cálcio e em sílica. Pode-se considerar nesta etapa, uma interação maior entre escória e o banho e sendo assim, ocorre alguma transferência de elementos como cálcio e magnésio ao banho. Analisando os diagramas ternários plotados na Figura 5, onde estão representadas as amostras A4 (no distribuidor), conclui-se que a corrida C3 possui o desempenho desejado, pois praticamente todas as inclusões são 100% líquidas e as que não estão nessa região estão posicionadas no triângulo das fases sólida e líquida em equilíbrio. Mesmo que as demais corridas não apresentem a grande maioria das inclusões na região líquida, muitas delas são parcialmente líquidas a 1600°C .

* Contribuição técnica ao 69º Congresso Anual da ABM – Internacional e ao 14º ENEMET - Encontro Nacional de Estudantes de Engenharia Metalúrgica, de Materiais e de Minas, 21 a 25 de julho de 2014, São Paulo, SP, Brasil.

Segundo evidenciado na literatura, a maioria dos problemas de lingotabilidade acontecem quando a proporção de inclusões sólidas é maior que 60-70%.

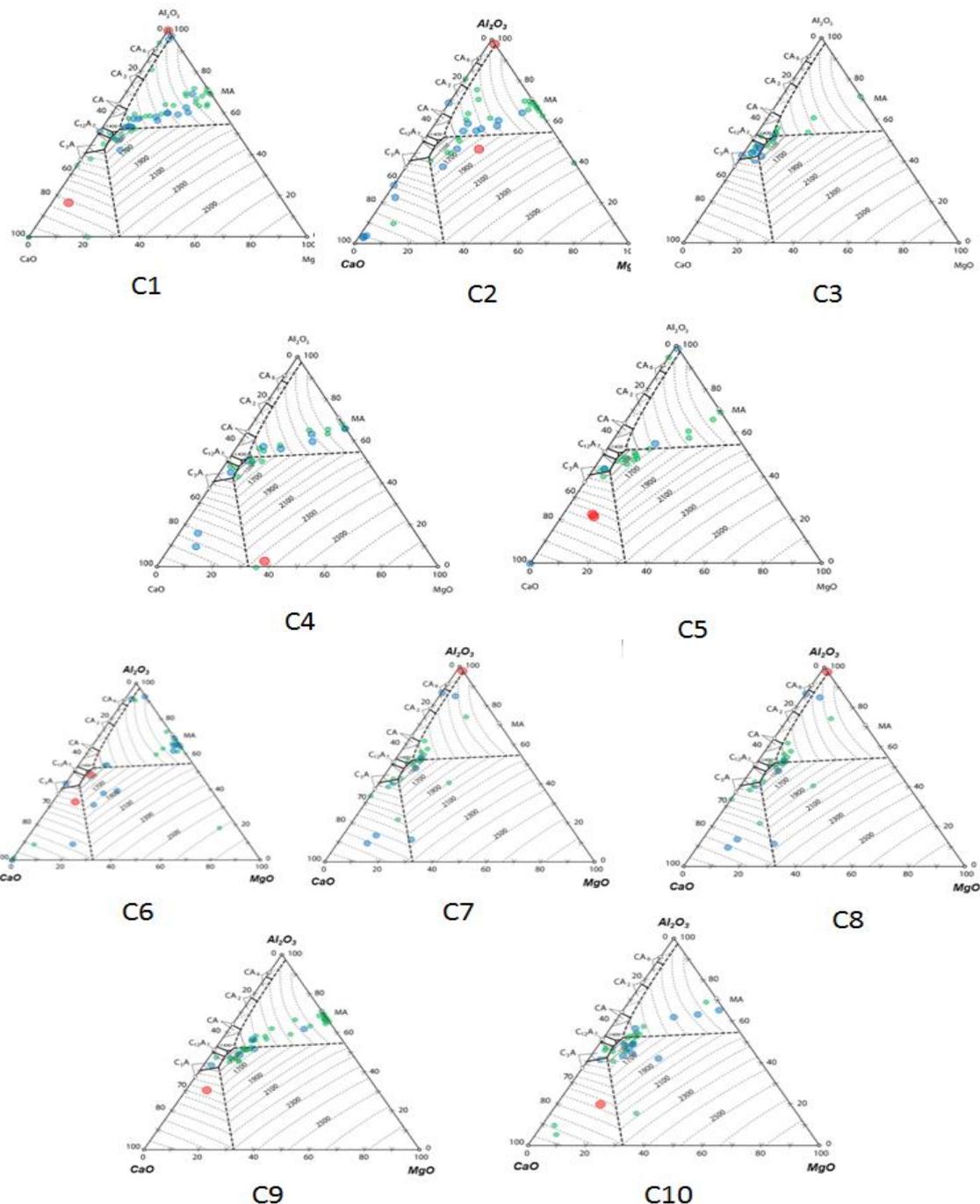


Figura 5. Composição química das inclusões das amostras A4 plotadas em seus respectivos diagramas ternários.

A partir das análises químicas das escórias E3, que se trata da última amostragem antes do tratamento em desgaseificador a vácuo, pôde-se simular via software FactSage a proporção das fases presentes na escória (Tabela 3).

* Contribuição técnica ao 69º Congresso Anual da ABM – Internacional e ao 14º ENEMET - Encontro Nacional de Estudantes de Engenharia Metalúrgica, de Materiais e de Minas, 21 a 25 de julho de 2014, São Paulo, SP, Brasil.



Tabela 3. Composição química das amostras de escória E3 e a proporção das fases calculadas via FactSage versão 6.4.

	%Fração Líquida	%Fração Sólida	%S	%CaO	%SiO ₂	%Al ₂ O ₃	%MgO
Mín.	85,37	3,06	0,82	47,25	13,56	18,23	9,24
Máx.	96,94	14,62	1,49	52,02	17,08	24,95	15,79

	%FeO	%MnO	%FeO+%MnO	%CaO/%SiO ₂	%CaO/%Al ₂ O ₃
Mín.	0,55	0,09	0,64	2,81	1,96
Máx.	1,14	0,22	1,27	3,62	3,13

Apesar desta qualidade de aço adotar uma basicidade elevada na última prova de escória, nota-se que a fração líquida presente é bastante alta (na ordem de 90%). Neste caso, a presença de grandes teores de alumina contribui para fluidizar a escória. Além disso, deve-se manter uma basicidade elevada para que haja o tratamento adequado das inclusões [7].

Com relação à formação de inclusões de espinélio, foram analisados a influência da quantidade de fase líquida (Figura 6a), a de %FeO + %MnO (Figura 6b) na escória e, a influência da agitação do banho na modificação da composição das inclusões (Figura 7).

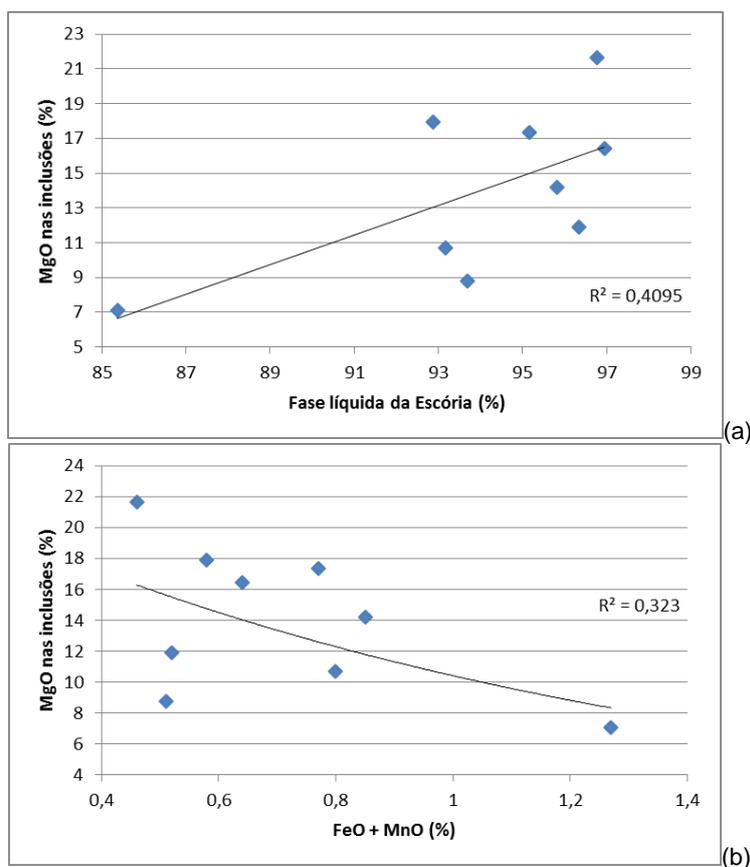


Figura 6. Influência (a) da quantidade de fase líquida e de (b) %FeO+%MnO na quantidade de MgO nas inclusões.

* Contribuição técnica ao 69º Congresso Anual da ABM – Internacional e ao 14º ENEMET - Encontro Nacional de Estudantes de Engenharia Metalúrgica, de Materiais e de Minas, 21 a 25 de julho de 2014, São Paulo, SP, Brasil.



Embora uma fase líquida abundante facilite a absorção de inclusões, sabe-se também que ela facilita diversas reações. As reações químicas entre banho e escória ocorrem, principalmente, entre as fases líquidas. Ou seja, dependendo da composição química de cada escória, o MgO de saturação (teor de MgO presente na fase líquida) permanece o mesmo, entretanto, quanto maior a massa de líquido (maior % de líquido), maior a massa de MgO para ser reduzido e dissolver magnésio no banho (figura 6a). Na Figura 6b, nota-se que, à medida que aumentam os teores de %FeO + %MnO na escória, os teores de MgO nas inclusões diminuem. O fato de a escória estar mais oxidada diminui a interação com os refratários da panela [8].

A influência da agitação na modificação da composição das inclusões pode ocorrer de duas formas quando um incremento na agitação do banho for observado.

Primeiramente, pode melhorar a transferência de Mg na interface aço/escória para o aço líquido através do aumento do coeficiente de transporte de massa.

Segundo, uma forte agitação favorece a redução do teor de FeO na escória devido a reação com o alumínio dissolvido no banho. Esta redução no teor de FeO induz um maior teor de Mg na interface aço/escória. [9]

Em fornos-panela onde a agitação é promovida com gás argônio, a energia causada pela agitação pode ser calculada através da taxa de argônio utilizada e a temperatura do aço líquido. No entanto, em sistemas industriais, a medida do fluxo de argônio não é totalmente confiável, devido a vazamentos no sistema de alimentação. Assim, um modo alternativo para estimar a energia cinética promovida pela agitação foi desenvolvido neste trabalho baseado no método utilizado por Capurro [10].

Considerando que a reação de dessulfuração é controlada pela transferência de massa na fase líquida, e que os parâmetros mais importantes, como a composição e densidade da escória e a temperatura do aço permanecem praticamente constante ao longo do processo, o teor de enxofre no decorrer do tempo pode ser estimado através da Equação 1.

$$[Mg] = \frac{a_{MgO}}{a_{FeO}} \quad [S] = \frac{[S]_0}{1+RL_S} \cdot \left[1 + RL_S \cdot \exp\left(-\frac{k_s (1+RL_S)}{RL_S} \cdot t\right) \right] \quad (1)$$

$$L_S = \frac{(S)}{[S]} = \frac{C'_S \cdot f_S}{a_O} \quad (2)$$

Onde $[S]_0$ é o teor inicial de enxofre no aço, R é a razão entre a escória e o peso de aço, k_s é o parâmetro cinético e L_S é o coeficiente de partição de enxofre, o qual pode ser calculado como mostra a Equação 2.

Na equação 2, f_S é o coeficiente de atividade de enxofre, que pode ser considerado em aços baixa liga igual a um, a_O é a atividade do oxigênio no aço líquido e C'_S é a capacidade de sulfeto, o qual é uma função da composição de escória e temperatura. C'_S pode ser calculado utilizando-se diferentes equações e modelos disponibilizadas na literatura.

Assim, sabendo que o teor de enxofre do aço, no início e no fim do processo, a composição da escória e o tempo decorrido, pode-se estimar os parâmetros cinéticos k_s para cada corrida. Como tem sido demonstrado em vários estudos, este parâmetro, ou o coeficiente de transferência de massa, que está diretamente relacionado a ele, está bem correlacionada com a energia de agitação. A

* Contribuição técnica ao 69º Congresso Anual da ABM – Internacional e ao 14º ENEMET - Encontro Nacional de Estudantes de Engenharia Metalúrgica, de Materiais e de Minas, 21 a 25 de julho de 2014, São Paulo, SP, Brasil.



capacidade de sulfeto foi calculada usando o modelo proposto por Zhang, Chou e Pal [11]. Com base nos valores típicos obtidos em medições de plantas, a atividade de oxigênio no banho líquido foi assumida como 3 ppm em todas as corridas. A composição do aço e da escória, bem como o peso de aço, foram tomados a partir de medições de rotina.

A Figura 7 mostra a relação entre os parâmetros cinéticos (k_s) e o teor de MgO de inclusões no final do processo. Uma boa correlação é observada, o que sugere que a energia de agitação aumenta a transferência de Mg da escória para o aço líquido, favorecendo a modificação de inclusões de alumina.

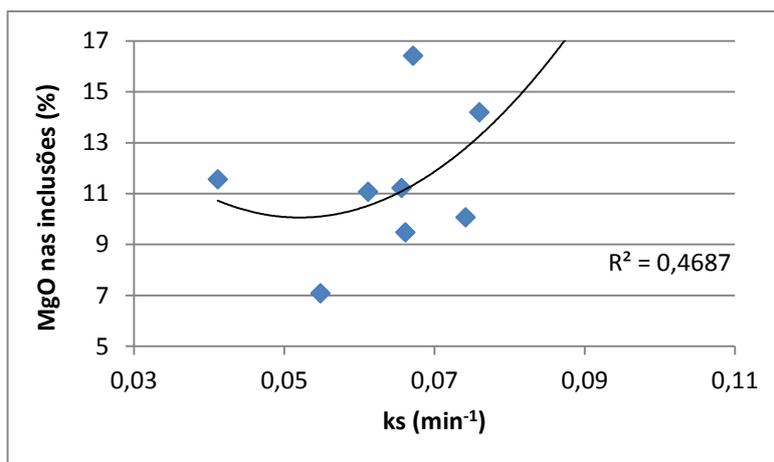


Figura 7. Relação entre teor de Mg nas inclusões com o fator cinético da reação de dessulfuração.

4 CONCLUSÕES

A partir das análises dos resultados obtidos podem-se fazer algumas considerações com relação à caracterização das inclusões de óxidos no lingotamento contínuo:

- i. A formação das inclusões no distribuidor ocorre principalmente por ação da diminuição da temperatura e por alguma reoxidação, fato que foi observado pelas análises de distribuição das inclusões por faixa de tamanho entre as provas A3 e A4;
- ii. Analisando apenas as inclusões maiores que $15\mu\text{m}$, pode-se notar para a maioria das corridas uma diminuição da fração de área, o que evidencia a remoção progressiva durante o processo;
- iii. Os valores de oxigênio total podem ser usados como medida para microinclusões;
- iv. As inclusões menores que $15\mu\text{m}$ ao final do processamento, encontraram-se nas regiões de cálcio-aluminatos e espinélios;
- v. A corrida C3 apresentou o desempenho desejado, pois praticamente todas as inclusões são 100% líquidas e as que não estão nessa região, estão posicionadas no triângulo das fases sólida e líquida em equilíbrio;
- vi. Há dois fatores na escória que contribuem para o enriquecimento das inclusões em MgO: baixos teores de $\text{FeO} + \text{MnO}$ e uma alta fração líquida da escória;
- vii. O teor de MgO nas inclusões cresce com o aumento da energia de agitação do banho. Esta observação sugere que, para as condições de funcionamento presentes em uma usina siderúrgica, as reações entre metal/escória podem

* Contribuição técnica ao 69º Congresso Anual da ABM – Internacional e ao 14º ENEMET - Encontro Nacional de Estudantes de Engenharia Metalúrgica, de Materiais e de Minas, 21 a 25 de julho de 2014, São Paulo, SP, Brasil.



promover um incremento de MgO em inclusões. Escórias com baixo potencial de oxidação presente em um banho com forte agitação, facilita a transferência de Mg para o aço líquido, o qual pode reagir com inclusões de alumina modificando sua composição.

Como consideração final, destaca-se que para o sucesso do controle inclusionário é de extrema importância compreender as interações existentes entre escória e banho e inclusões. A obtenção de aços limpos e com elevada qualidade microestrutural está intimamente relacionado às práticas adotadas na aciaria e, principalmente, na obtenção de parâmetros mais adequados de escória.

Agradecimentos

A autora deste trabalho agradece ao Laboratório de Siderurgia da UFRGS pela bolsa de iniciação científica. Ao Professor Dr. Wagner Viana Bielefeldt pela oportunidade, orientação e amizade. A equipe do Laboratório de Siderurgia, em especial a Franciele Almeida, pelo apoio e amizade.

REFERÊNCIAS

- 1 Bartosiaki GB. Caracterização de inclusões não metálicas de óxidos no aço SAE 52100 [trabalho de diplomação]. Porto Alegre: Escola de engenharia, UFRGS; 2013.
- 2 Silva PRT. Análise do comportamento em fadiga do aço SAE 52100 sob diferentes condições microestruturais [tese de doutorado]. Porto Alegre: Escola de Engenharia, Departamento de Metalurgia, UFRGS; 2001.
- 3 Nuspl M, Wegscheider W, Angeli J, Posch W, Mayr M. Qualitative and quantitative determination of micro-inclusions by automated SEM/EDX analysis. Anal Bioanal. Chem., 2004;379:640-645.
- 4 Zhang L, Thomas BG, Wang X, Cai K. Evaluation and control of steel cleanliness - review. In: 85th Steelmaking Conference Proceedings; 2002; Nashville, EUA. Iron and Steel Society; 2002. p.431-452.
- 5 Zhang L, Thomas BG. State of the Art in Evaluation and Control of Steel Cleanliness. ISIJ International. 2003;43(3):271-291.
- 6 Bielefeldt WV, Moraes CAM, Vilela ACF, Fernandes PC, Klujzso LAC. Evolução das inclusões no processamento do aço SAE 8620 via aciaria elétrica. In: 59º Congresso Anual da ABM; 2004; São Paulo, Brasil. São Paulo: ABM; 2004. p.736-745.
- 7 Yoon BH, Heo KH, Kim JS, Sohn HS. Improvement of steel cleanliness by controlling slag composition. Ironmaking and Steelmaking. 2002;29(3):215-218.
- 8 Mendez J, Gómez A, Capurro C, Donayo R, Cicutti C. Effect of process conditions on the evolution of MgO content of inclusions during the production of calcium treated, aluminum killed steels. In: 8th Conference on Clean Steel; 2012; Budapest, Hungria.
- 9 Mendez A, Gómez C, Capurro C, Donayo R, Cicutti C. Effect of Process Conditions on the Evolution of MgO Content of Inclusions During the Production of Calcium Treated, Aluminium Killed Steels. Rosário: IAS; 2013.
- 10 Zhang GH; Chou KC, Pal U. Estimation of Sulfide Capacities of Multicomponent Slags using Optical Basicity. ISIJ International. 2013;53(5):761-767.
- 11 ASM Handbook. Properties and Selection: Irons Steels and High Performance Alloys. Ohio: ASM International; 1993. v.1.

* *Contribuição técnica ao 69º Congresso Anual da ABM – Internacional e ao 14º ENEMET - Encontro Nacional de Estudantes de Engenharia Metalúrgica, de Materiais e de Minas, 21 a 25 de julho de 2014, São Paulo, SP, Brasil.*