

Tema: Iniciação Científico-Tecnológica

## ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DE PARÂMETROS DE ESCÓRIAS DE REFINO SECUNDÁRIO E DE PROCESSO NA LIMPEZA INCLUSIONÁRIA DE AÇOS\*

Franciele de Almeida Silva<sup>1</sup>  
Wagner Viana Bielefeldt<sup>2</sup>  
Antônio Cezar Faria Vilela<sup>3</sup>

### Resumo

A escória utilizada no refino secundário deve possuir propriedades adequadas para que auxilie no controle inclusionário dos aços. Tendo isto em vista, há vários parâmetros que devem ser levados em conta para se obter uma escória ótima que irá auxiliar na limpeza dos aços. Como uma técnica de medição, o valor de oxigênio total no banho está diretamente relacionado com o número de inclusões óxidas presentes no aço líquido. O presente trabalho tem como objetivo geral o acompanhamento da limpeza inclusionária por meio dos teores de oxigênio total presentes nos aços, para variáveis selecionadas de escória e de processo. A partir das análises químicas de amostras de um aço alto carbono acalmado ao alumínio, foram gerados gráficos com os valores de oxigênio total em função dos parâmetros %CaO/%Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, %FeO+%MnO, basicidade binária, tempo de flotação na torre do lingotamento contínuo e pick-up de nitrogênio; seguido da análise dos resultados obtidos e sua comparação com os dados da literatura. Pode-se então concluir que, para as análises anteriormente citadas, o aço apresentou resultados coerentes com a literatura para todas as análises.

**Palavras-chave:** Escórias; Composição química; Oxigênio total; Flotação.

### ANALYSIS OF THE INFLUENCE OF SECONDARY REFINING SLAGS AND PROCESS PARAMETERS IN INCLUSIONS CLEANLINESS OF STEELS

#### Abstract

The slag utilized in the secondary refining must possess adequate properties so that assist in the control of the inclusions of steel. With this in view, there are various parameters that must be taken in account to obtain an optimal slag that will go assist in the cleaning of the steel. As a technical for measuring, the total oxygen content in the bath is directly related with the number of the oxides inclusions presents in the liquid steel. The present work aims as general objective the accompaniment of the cleaning of the inclusions by means of the levels of the total oxygen presents in steels, for variables selected of the slag and of process. From chemistry analysis of the samples of the a steel high carbon aluminum killed, were generated graphics with the values of the total oxygen in function of the parameters %CaO/%Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, %FeO+%MnO, %CaO/%SiO<sub>2</sub>, time of flotation in the continuous casting turret and pick-up of nitrogen; followed by analysis of the results obtained and comparison with data of the literature. Can be concluded, considering the analysis previously mentioned, steel has shown results consistent with the literature for all analysis.

**Keywords:** Slag; Chemistry composition; Total oxygen; Flotation.

<sup>1</sup> Graduanda em Engenharia Metalúrgica, Laboratório de Siderurgia (Lasid), Depto. de Metalurgia, UFRGS, Porto Alegre, RS, Brasil.

<sup>2</sup> Dr., Laboratório de Siderurgia (Lasid), Depto. de Metalurgia, UFRGS, Porto Alegre, RS, Brasil.

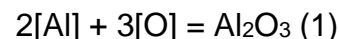
<sup>3</sup> Dr.-Ing., Laboratório de Siderurgia (Lasid), Depto. de Metalurgia, UFRGS, Porto Alegre, RS, Brasil.

\* 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

A fabricação de aços especiais tem se tornado cada vez mais complexa devido à engenhosidade de suas características específicas exigidas pelo mercado. É também um desafio para a indústria siderúrgica, quando se trata do controle inclusionário desses aços, sendo imprescindível a limpeza mínima para que não haja um comprometimento das propriedades e do desempenho do produto final. O que exige um maior entendimento dos fenômenos metalúrgicos envolvidos durante o processo, sendo necessário um rígido controle de todo o processo de produção.

De acordo com a norma ASTM E-45, que normatiza métodos para a determinação de inclusões, para aços rolamento o tamanho crítico de inclusão é da ordem de 10  $\mu\text{m}$ . O alto índice inclusionário nesses aços compromete, principalmente, a vida do componente em fadiga, visto que trincas podem ser induzidas a partir das inclusões, ocasionando uma série de falhas. Quanto maior o tamanho das inclusões presentes em aços rolamento, menor a vida em fadiga do componente [1]. O uso de elementos desoxidantes ao banho acarreta na reação dos mesmos com o oxigênio dissolvido, formando as chamadas inclusões óxidas. O uso do alumínio como desoxidante principal resulta na formação de inclusões de alumina, de acordo com a equação (Equação 1):



A escória utilizada no refino deve possuir propriedades adequadas para que auxilie no controle inclusionário, tendo isto em vista, há vários parâmetros que devem ser levados em conta para que se obtenha uma escória ótima que irá auxiliar na limpeza dos aços. Como o valor de oxigênio total consiste no oxigênio dissolvido no banho mais o oxigênio presente nas inclusões óxidas, tal valor está diretamente relacionado com o número de inclusões óxidas presentes no banho.

O presente trabalho tem como objetivo geral, o acompanhamento da limpeza inclusionária por meio dos teores de oxigênio total presentes nos aços, com base em um banco de dados históricos de um aço alto carbono. Visando a obtenção de faixas de valores adequados em comparação com os dados presentes na literatura para as seguintes variáveis de escória: %CaO/%Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, %FeO+%MnO, basicidade binária. Também o tempo de flotação na torre do lingotamento contínuo e pick-up de nitrogênio.

## 2 MATERIAIS E MÉTODOS

Para o estudo neste trabalho, foram utilizados dados de um aço de alto carbono, que obedece a norma SAE 52100 com aplicação na confecção de componentes para rolamentos, para a indústria automotiva. Classificado como um aço com alta temperabilidade, alta dureza, alta resistência ao desgaste e baixa soldabilidade. A tabela 1 apresenta a composição básica do aço analisado.

**Tabela 1** – Faixa de composição química do aço SAE 52100 em % mássica [2]

(%)	C	Si	Mn	P	S	Cr
Mínimo	0,98	0,15	0,25	-	-	1,30
Máximo	1,10	0,35	0,45	0,025	0,025	1,60

Além do aço em questão, as escórias utilizadas na produção do mesmo também foram objetos deste estudo. Foram retiradas amostras do final do processo de refino

\* 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.

secundário. A composição química empregada em cada escória é empírica e sua eficácia será analisada nos resultados. A tabela 2 apresenta a composição química bruta das escórias do processo.

**Tabela 2** – Faixa de composição química bruta da escória do aço SAE 52100 em % mássica.

(%)	CaO	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	FeO	MnO
Mínimo	42,04	8,65	15,43	6,28	0,31	0,07
Máximo	57,22	20,04	27,95	20,70	6,95	0,39

## 2.1 Abordagem Experimental

A coleta das amostras do material e suas respectivas análises foram realizadas em uma planta siderúrgica. Os dados obtidos foram armazenados em um banco de dados históricos ao longo de um ano, para posterior análise das variáveis e comparação com a literatura.

As amostras de aço das barras laminadas foram submetidas à análise de oxigênio total em um Determinador Simultâneo de Nitrogênio e Oxigênio. As amostras de escória tiveram sua composição química definida via espectrometria por fluorescência de Raios-X (XRF). Maiores informações sobre a técnica de análise podem ser encontradas no trabalho de Reis [2]. As composições químicas da escória foram utilizadas para a análise das principais variáveis de escória que influenciam na absorção das inclusões pela escória. Devido ao grande número de corridas representadas, foi utilizada uma análise estatística a fim de se obter o maior número de corridas correspondentes às variáveis analisadas, onde se puderam encontrar as faixas ideais de composição de escória. Por sua vez foram fixadas e comparadas com os dados iniciais. Foram plotados os valores de oxigênio total, %CaO/%Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, %FeO+%MnO, %CaO/%SiO<sub>2</sub>, tempo de flotação na torre do lingotamento contínuo e pick-up de nitrogênio, em gráficos numa planilha Excel, a fim de se observar a linha de tendência das relações das variáveis com os valores de oxigênio total.

## 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados das análises possibilitaram um maior entendimento dos fenômenos físicos e químicos que ocorrem na escória, a fim de se obter um padrão ótimo de escória, propícia à remoção de inclusões para o aço analisado.

### 3.1 Influência da Porcentagem de CaO/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Sobre o Teor de Oxigênio Total do Aço SAE 52100

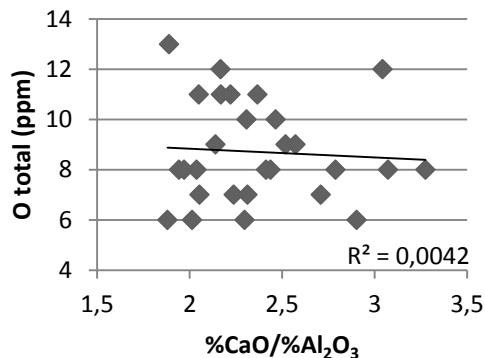
Quatro tipos de análises foram feitas para analisar a influência da porcentagem de CaO/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> na escória sobre o valor de oxigênio total.

A figura 1 apresenta o gráfico onde estão presentes os dados de vinte e oito corridas que foram analisados para a primeira análise, onde se fixou o teor de MgO na escória entre 6 a 8%. Obteve-se então uma média de 8,71 ppm de oxigênio total e uma baixa tendência do valor de oxigênio total.

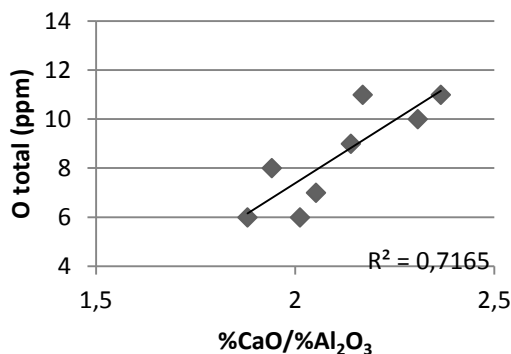
A figura 2 apresenta o gráfico onde os dados de oito corridas foram analisados para a segunda análise, onde se manteve fixo o teor de MgO na escória entre 6 a 8% e fixou-se apenas os valores de basicidade binária maiores que 4. Obteve-se então

\* 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.

uma média de 8,50 ppm de oxigênio total e uma elevada tendência do valor de oxigênio total.



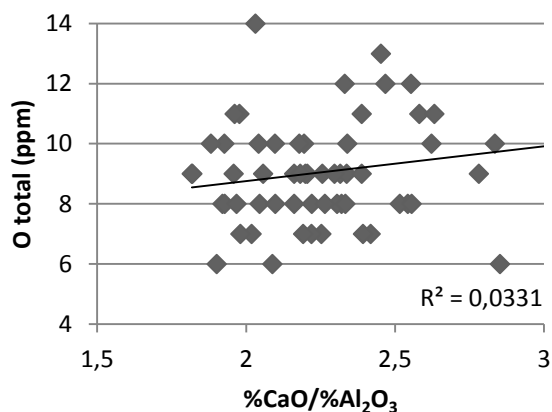
**Figura 1** – Evolução do teor de oxigênio total de acordo com o aumento do teor de CaO/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, com MgO fixo na faixa entre 6 a 8%.



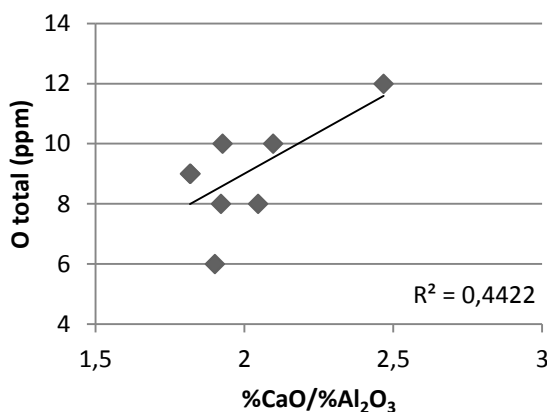
**Figura 2** – Evolução do teor de oxigênio total de acordo com o aumento do teor de CaO/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, com MgO fixo na faixa entre 6 a 8% e basicidade binária maior que 4.

A figura 3 apresenta o gráfico onde foram analisados os dados de cinquenta e oito corridas para a terceira análise, onde se fixou o teor de MgO na escória entre 8 a 12%. Obteve-se então uma média de 9,05 ppm de oxigênio total e uma baixa tendência do valor de oxigênio total.

A figura 4 apresenta o gráfico onde foram analisados os dados de oito corridas para a quarta análise, onde se manteve fixo o teor de MgO na escória entre 8 a 12% e fixaram-se apenas os valores de basicidade binária maiores que 4. Obteve-se então uma média de 9,00 ppm de oxigênio total e uma tendência elevada do valor de oxigênio total.



**Figura 3** – Evolução do teor de oxigênio total de acordo com o aumento do teor de CaO/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, com MgO fixo na faixa de 8 a 12%.



**Figura 4** – Evolução do teor de oxigênio total de acordo com o aumento do teor de CaO/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, com MgO fixo na faixa de 8 a 12% e basicidade binária maior que 4.

Sabe-se com base na literatura [3], que a capacidade da escória de absorver inclusões esta diretamente relacionada com a fluidez desta escória.

\* 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.

CaO e Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> são os componentes que afetam mais seriamente a basicidade da escória, o que refletiu num impacto significativo nas análises efetuadas neste trabalho. Além disso, escórias saturadas em CaO na fase líquida seriam melhores por diversos fatores, entre eles, a maior oferta do próprio CaO que fornecerá o cálcio necessário para posterior transformação das inclusões. No entanto, pode aumentar teoricamente a viscosidade da escória, quando ultrapassa seus limites de solubilidade [1].

Ao analisarem-se as figuras 1 e 2, observou-se que, ao elevar-se o teor de basicidade em maiores do que 4, obteve-se uma melhor tendência nos resultados estudados, de acordo com o descrito na literatura. Comparando-se as figuras 3 e 4, observa-se que o melhor teor de MgO da escória se dá entre 6 e 8%, o que também confere com o descrito na literatura. De acordo com Ma [5], a eficiência da escória no refino secundário se dá com melhores resultados para teores mais baixos de MgO. Ma observou que, baixando-se a relação CaO/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> obteve-se uma melhoria no teor de oxigênio total, resultando em teores mais baixos. Sendo assim, o diagrama é consistente com a literatura, tendo em base que maiores ofertas de CaO/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> resultam em teores mais altos de oxigênio total.

### 3.2 Influência da Porcentagem de CaO/SiO<sub>2</sub> Sobre o Teor de Oxigênio total do Aço SAE 52100

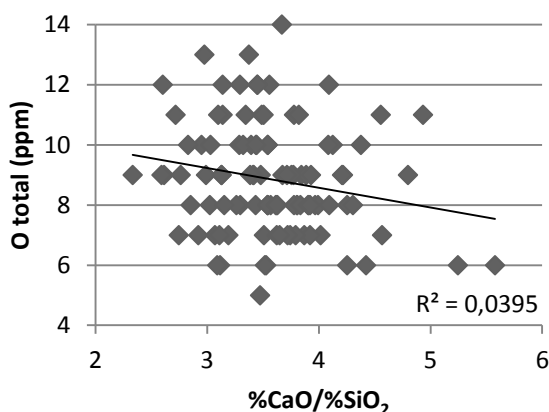
Três tipos de análises foram feitas para analisar a influência da porcentagem de basicidade binária (CaO/SiO<sub>2</sub>) sobre o valor de oxigênio total.

A figura 5 apresenta o gráfico onde estão presentes os dados de cento e três corridas que foram analisados para a primeira análise, onde não se fixou nenhum teor de nenhuma variável, a fim de se observar a influência que estas causam na análise. Obteve-se então uma média de 8,84 ppm de oxigênio total e uma baixa tendência do valor de oxigênio total.

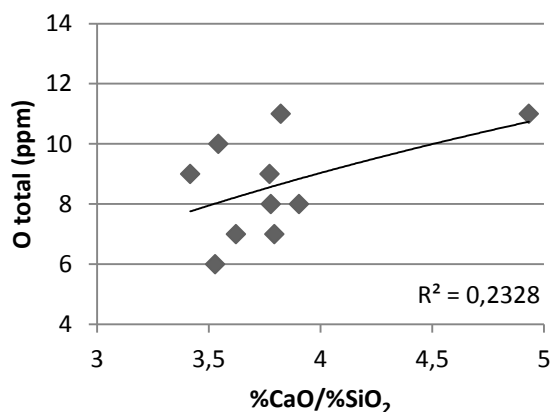
A figura 6 apresenta o gráfico onde os dados de dez corridas foram analisados para a segunda análise, onde se fixou o teor de MgO na escória entre 6 a 8%, e teor de alumina de 20 a 23%. Obteve-se então uma média de 8,6 ppm de oxigênio total e uma tendência do valor de oxigênio total superior à analisada anteriormente.

A figura 7 apresenta o gráfico onde foram analisados os dados de dez corridas para a terceira análise, onde se fixou o teor de MgO na escória entre 6 a 8%, e teor de alumina de 23 a 26%. Obteve-se então uma média de 9,6 ppm de oxigênio total e uma tendência do valor de oxigênio total superior às analisadas anteriormente e condizente com a literatura.

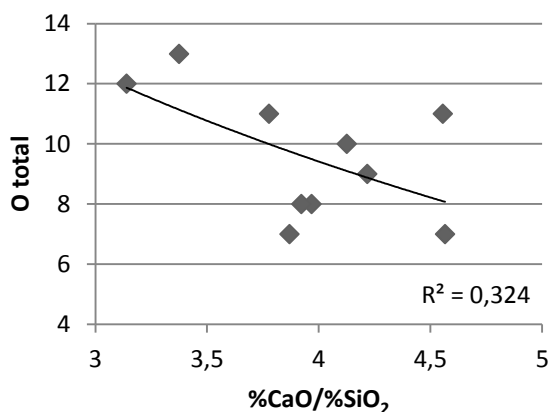
\* Contribuição técnica ao 69º Congresso Anual da ABM – Internacional e ao 14º ENEMET - Encontro Nacional de Estudantes de Engenharia Metalúrgica, de Materiais e de Minas, 21 a 25 de julho de 2014, São Paulo, SP, Brasil.



**Figura 5** – Evolução do teor de oxigênio total de acordo com o aumento do teor de CaO/SiO<sub>2</sub> sem variáveis fixadas.



**Figura 6** – Evolução do teor de oxigênio total de acordo com o aumento do teor de CaO/SiO<sub>2</sub>, com MgO fixo na faixa de 6 a 8%, alumina fixa na faixa de 20 a 23%.



**Figura 7** – Evolução do teor de oxigênio total de acordo com o aumento do teor de CaO/SiO<sub>2</sub>, com MgO fixo na faixa de 6 a 8%, alumina fixa na faixa de 23 a 26%.

O índice de basicidade binária (%CaO/%SiO<sub>2</sub>) é de fácil regulagem, pois é controlado pela quantidade de CaO adicionado, este é o principal parâmetro controlado pelas indústrias, já que, a basicidade pode ajustar vários parâmetros da escória, como sua viscosidade. Elevados teores de basicidade levam a um aumento da fração de fase sólida da escória, deixando-a mais espessa e por consequência, torna a capacidade de absorver inclusões prejudicada [3].

De acordo com Yoon [3], a basicidade da escória afeta mais fortemente o conteúdo de oxigênio total do que outros fatores tais como a razão %CaO/%Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> na escória da panela. Um elevado teor de basicidade binária é bom para o tratamento de inclusões e para o controle de espinélios (pois fornece o cálcio necessário para o tratamento das inclusões), porém, deve-se considerar que a obtenção de uma fase líquida abundante é de importância para a absorção de inclusões. Devido a isto, ocorre a adição de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> na escória dos aços rolamento, pois esta atua como fluidizante na escória, permitindo que a basicidade seja elevada.

\* 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 os estudos realizados por Ma [5] e por Yoon [3] para os aços rolamento, o aumento do índice de basicidade binária leva a uma diminuição dos teores de oxigênio total. Ao analisar-se a figura 5, sem que nenhuma variável tivesse sido fixada, observa-se a tendência descrita na literatura. Porém, ao analisar-se a figura 6 observa-se o inverso do esperado, e na figura 7 a tendência esperada volta a aparecer. Analisando-se as faixas dos teores de alumina, temos que, na figura 5 abrangem-se todas as faixas de alumina, sem que se tenha fixado quaisquer valores; na figura 6 essa faixa é de 20 a 23% e na figura 7 tem-se a faixa de 23 a 26%. O que explica o comportamento dos gráficos obtidos, onde a figura 5 nos dá a tendência esperada devido a media de alumina inserida em todas as corridas analisadas; a figura 6 nos dá o inverso do esperado devido ao baixo teor de alumina inserido, o que não possibilita uma fluidez adequada da escória, elevando-se a fração de fase sólida com o aumento da basicidade; e na figura 7 pode-se observar claramente o resultado esperado de acordo com a literatura, devido ao elevado teor de alumina inserido e baixo teor de MgO controlado, deixando a escória próxima a saturação do MgO e fluida, devido ao elevado teor de alumina adicionado, o que possibilita uma maior remoção das inclusões aluminosas resultando num baixo teor de oxigênio total.

### 3.3 Influência da Porcentagem de FeO + MnO Sobre o Teor de Oxigênio total do Aço SAE 52100

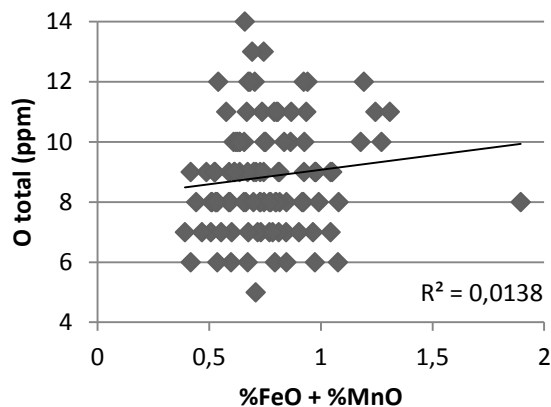
Três tipos de análises foram feitas para analisar a influência da porcentagem de FeO + MnO sobre o valor de oxigênio total.

A figura 8 apresenta o gráfico onde estão presentes os dados de cento e três corridas que foram analisados para a primeira análise, onde não se fixou nenhum teor de nenhuma variável, a fim de se observar a influência que estas causam na análise. Obteve-se então uma média de 8,84 ppm de oxigênio total e uma baixa tendência do valor de oxigênio total.

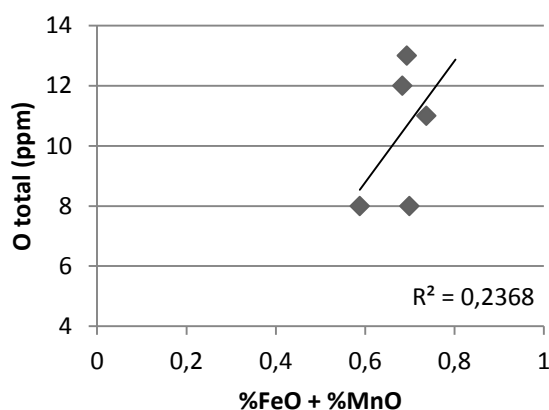
A figura 9 apresenta o gráfico onde os dados de seis corridas foram analisados para a segunda análise, onde se fixou o teor de MgO na escória entre 6 a 8%, e teor de alumina de 23 a 26%, e manteve-se apenas os valores de basicidade binária menores que 4. Obteve-se então uma média de 9,83 ppm de oxigênio total e uma tendência do valor de oxigênio total superior à analisada anteriormente.

A figura 10 apresenta o gráfico onde foram analisados os dados de quatro corridas para a terceira análise, onde se fixou o teor de MgO na escória entre 6 a 8%, e teor de alumina de 23 a 26%, e manteve-se apenas os valores de basicidade binária maiores que 4. Obteve-se então uma média de 9,25 ppm de oxigênio total e uma tendência do valor de oxigênio total superior às analisadas anteriormente.

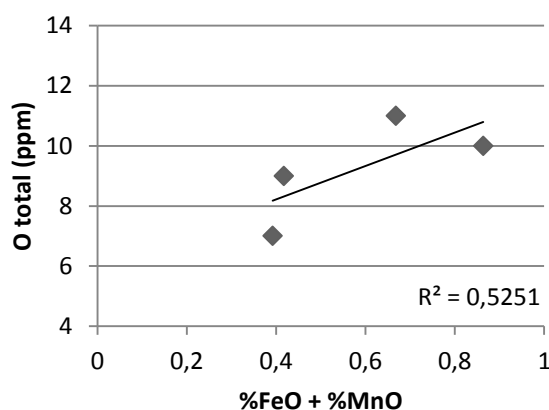
\* Contribuição técnica ao 69º Congresso Anual da ABM – Internacional e ao 14º ENEMET - Encontro Nacional de Estudantes de Engenharia Metalúrgica, de Materiais e de Minas, 21 a 25 de julho de 2014, São Paulo, SP, Brasil.



**Figura 8** – Evolução do teor de oxigênio total de acordo com o aumento do teor de FeO+MnO sem variáveis fixadas.

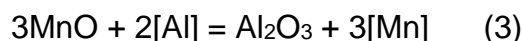


**Figura 9** – Evolução do teor de oxigênio total de acordo com o aumento do teor de FeO+MnO, com MgO fixo na faixa de 6 a 8%, alumina fixa na faixa de 23 a 26% e basicidade menor que 4.



**Figura 10** – Evolução do teor de oxigênio total de acordo com o aumento do teor de FeO+MnO, com MgO fixo na faixa de de 6 a 8%, alumina fixa na faixa de 23 a 26% e basicidade maior que 4.

A transferência de FeO e MnO do refino primário para a panela através da escória pode resultar na reoxidação, sendo estes compostos fontes de oxigênio para a geração de novas inclusões não-metálicas, que reagem com o alumínio dissolvido para formar as inclusões de alumina no aço líquido [3,4], conforme as equações 2 e 3:



Segundo Zhang [4], muitas trincas obtidas no produto final são resultados da reoxidação originada pelo FeO na escória da panela. Zhang e Thomas (2002) também mostram que, quanto maior for o teor de FeO e MnO na escória, maior o número de inclusões de alumina detectadas no banho, consequentemente, maior será o teor de oxigênio total observado.

Ao observar-se a figura 8, onde nenhuma variável foi fixada, nota-se que o diagrama é consistente com a literatura. O mesmo ocorre para as figuras 9 e 10, onde se pode observar mais claramente a tendência devido às variáveis fixadas. Nota-se que,

\* 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.



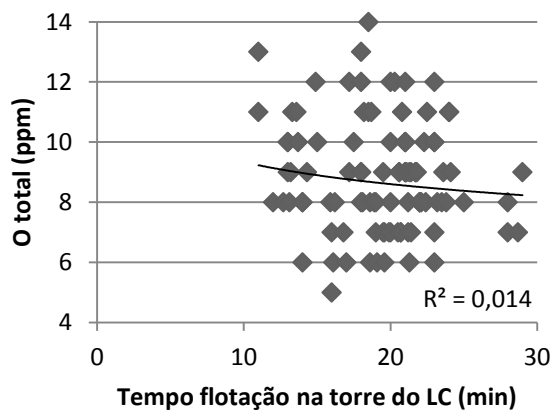
fixando-se os melhores padrões de escória (teor de alumina entre 23 e 26% e teor de MgO entre 6 e 8%) e variando-se a basicidade, encontrou-se uma melhor tendência de acordo com a literatura e, se conseguiu baixar a média de oxigênio total encontrada, que era de 9,83 na figura 9 baixando para 9,25 na figura 10.

### 3.4 Influência do Tempo de Flotação das Inclusões na Torre do Lingotamento Contínuo Sobre o Teor de Oxigênio Total do Aço SAE 52100

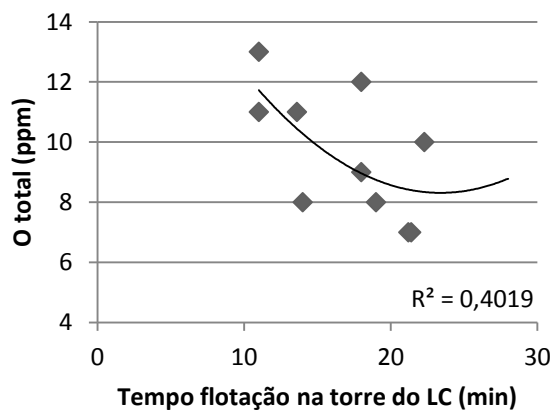
Dois tipos de análises foram realizados para analisar a influência do tempo de flotação das inclusões na torre do lingotamento contínuo sobre o valor de oxigênio total.

A figura 11 apresenta o gráfico onde estão presentes os dados de cento e uma corridas que foram analisados para a primeira análise, onde não se fixou nenhum teor de nenhuma variável, a fim de se observar a influência que estas causam na análise. Obteve-se então uma média de 8,84 ppm de oxigênio total e uma baixa tendência do valor de oxigênio total.

A figura 12 apresenta o gráfico onde os dados de dez corridas foram analisados para a segunda análise, onde se fixou o teor de MgO na escória entre 6 a 8%, e teor de alumina de 23 a 26%. Obteve-se então uma média de 9,6 ppm de oxigênio total e uma tendência mais visível do valor de oxigênio total comparada à analisada anteriormente.



**Figura 11** – Evolução do teor de oxigênio total de acordo com o aumento do tempo de flotação na torre do lingotamento contínuo.



**Figura 12** – Evolução do teor de oxigênio total de acordo com o aumento do tempo de flotação na torre do lingotamento contínuo, com MgO fixo na faixa de 6 a 8% e alumina fixa na faixa de 23 a 26%.

A agitação da panela no processo de refino promove o crescimento e a remoção das inclusões. Algumas reações metalúrgicas requerem uma forte interação entre metal e escória, enquanto que outras requerem uma mistura mais suave na interface metal/escória além de uma manutenção da camada de escória ininterrupta, como é o caso da remoção de inclusões. As operações de transferência do aço, da panela para o distribuidor e do distribuidor para o molde são muito importantes para a limpeza inclusionária dos aços. A presença de inclusões causa problemas como o entupimento da válvula (clogging), o que gera defeitos no produto final [4].

\* 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.

Este fenômeno é minimizado através da injeção de argônio a fim de facilitar a remoção das inclusões, promovendo a agitação necessária para que haja o coalescimento e flotação das inclusões para a escória.

Zhang [4] afirma em seus estudos que, para tempos curtos tal flotação não ocorre de forma eficiente e, adotando tempos muito longos há a perda de temperatura, eventualmente, pode ocorrer exposição do banho caso a escória esteja muito líquida, o que gera novas inclusões. Observa-se na figura 11 que não se pode observar com clareza a tendência descrita na literatura. Mas ao fixar-se os padrões de alumina e MgO na escória, tal tendência torna-se evidente, como pode ser visto na figura 12, onde pode-se observar que o oxigênio total possui uma grande variação ao longo do tempo de flotação, isso se dá ao fato de possuir um teor alto no início, cair e voltar a aumentar conforme o tempo de flotação, sendo este o efeito esperado de acordo com a literatura.

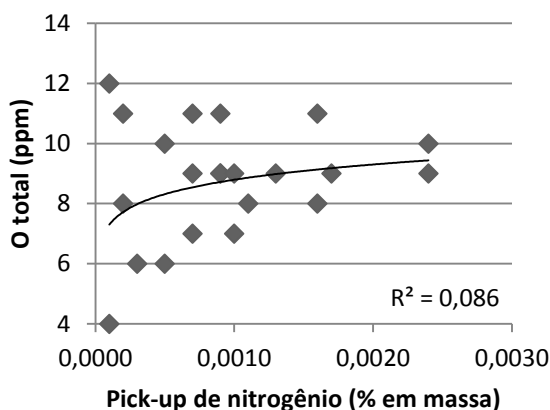
### 3.5 Influência do Teor de Pick-up de Nitrogênio Sobre o Teor de Oxigênio Total do Aço SAE 52100

Três tipos de análises foram feitos para analisar a influência do teor de pick-up de nitrogênio sobre o valor de oxigênio total, onde a melhor relação foi observada apenas para a primeira sequência de corridas.

A figura 13 apresenta o gráfico onde estão presentes os dados de vinte e duas corridas que foram analisados para a primeira análise, onde não se fixou nenhum teor de nenhuma variável, a fim de se observar a influência que estas causam na análise. Obteve-se então uma média de 8,77 ppm de oxigênio total e uma leve tendência do valor de oxigênio total.

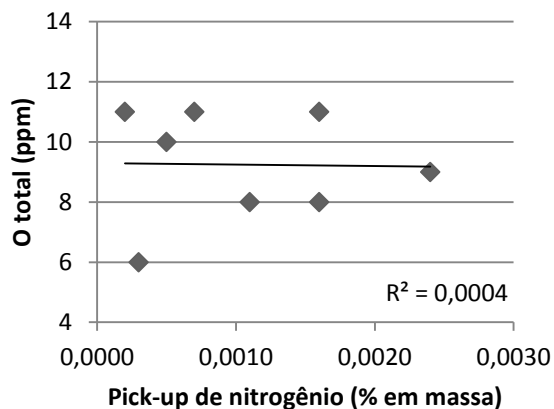
A figura 14 apresenta o gráfico onde os dados de oito corridas foram analisados para a segunda análise, onde se fixou o teor de alumina na faixa de 20 a 23%. Obteve-se então uma média de 9,25 ppm de oxigênio total e uma tendência muito baixa do valor de oxigênio total.

A figura 15 apresenta o gráfico onde foram analisados os dados de oito corridas para a terceira análise, onde se fixou o teor de alumina de 23 a 26%. Obteve-se então uma média de 8,37 ppm de oxigênio total e uma tendência do valor de oxigênio total superior às analisadas anteriormente.

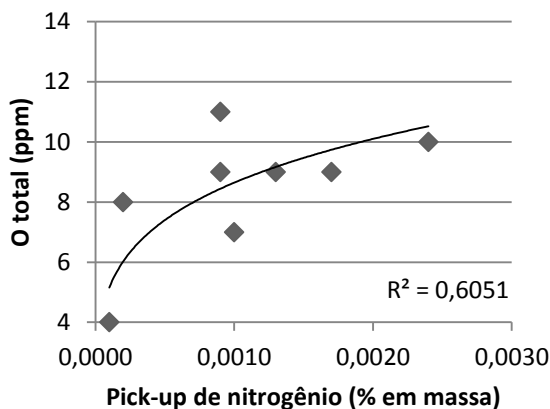


**Figura 13** – Evolução do teor de oxigênio total de acordo com o aumento do teor de pick-up de nitrogênio sem variáveis fixadas.

\* 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.



**Figura 14** – Evolução do teor de oxigênio total de acordo com o aumento do teor de pick-up de nitrogênio, com alumina fixa na faixa de 20 a 23%.



**Figura 15** – Evolução do teor de oxigênio total de acordo com o aumento do teor de pick-up de nitrogênio, com alumina fixa na faixa de 23 a 26%.

O uso do tubo longo no lingotamento contínuo tem se mostrado uma das práticas mais eficientes na limpeza inclusionária dos aços. Porém, manter a total vedação entre a panela e o distribuidor é uma tarefa praticamente impossível. A interação do aço com o ar atmosférico resulta na reoxidação do mesmo, o uso da análise do pick-up de nitrogênio serve como uma medida indireta desta reoxidação [6].

O pick-up de nitrogênio nada mais é do que a medida da diferença entre o nitrogênio dissolvido entre provas do aço em etapas distintas do processo [1].

No estudo feito por Melville [6], foi provado que há um aumento do teor de oxigênio total, conforme é elevado o teor de pick-up de nitrogênio. Ele também mostra que a falta de limpeza do aço devido ao excesso do pick-up de nitrogênio é relativamente pequena se comparada à outras variáveis, tendo estipulado um máximo de 12 ppm para o pick-up de nitrogênio.

No estudo efetuado, foram retiradas as corridas que apresentaram variação negativa de nitrogênio. Sem fixar os valores de alumina, observa-se na figura 13 uma leve tendência a um aumento no teor de oxigênio total. Ao se analisar as figuras 14 e 15, onde foram fixados os teores de alumina, observa-se que, quanto maior for o teor de alumina na escória, maior será o teor de oxigênio total conforme o aumento do pick-up de nitrogênio. Tal efeito se deve ao fato de que um alto teor de alumina resulta em uma escória mais líquida, o que favorece mais facilmente a exposição do banho ao ar. Tendo assim, uma tendência positiva do aumento de oxigênio total, o que é de se esperar, já que, após a desoxidação, o baixo nível de oxigênio no banho permite rápida absorção de ar. A este comportamento se atribui à formação de mais inclusões no aço, produtos de reoxidação já mencionados anteriormente. Com base nos dados analisados, se observa uma tendência entre maior pick-up de nitrogênio e maior teor de oxigênio total, como descrito na literatura.

## 4 CONCLUSÕES

A partir das análises efetuadas e dos resultados obtidos, pôde-se fazer uma série de considerações a respeito das variáveis de escória e de processo adotadas neste estudo:

- i. A melhor eficiência para a absorção de inclusões da escória se dá com baixos teores de MgO e elevados teores de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.

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

- ii. Altas basicidades binárias correspondem a uma elevada viscosidade da escória, porém, altos teores de alumina inibem este efeito, sendo observados melhores resultados para basicidades em torno de 4.
- iii. Elevados teores de  $\text{CaO}/\text{Al}_2\text{O}_3$  fornecem o cálcio necessário para o tratamento das inclusões, porém, também resultam em uma escória de fase sólida elevada, o que implica em uma baixa capacidade de absorção de inclusões. Sendo assim, torna-se necessário o controle do teor de  $\text{CaO}$  para que se trabalhe com uma escória rica, tanto em fase líquida quanto em cálcio.
- iv. Altos teores de  $\text{FeO}$  e  $\text{MnO}$  na escória resultam na reoxidação do banho e, conseqüentemente, um aumento do número de inclusões de alumina presentes no aço.
- v. A agitação do banho feita por gases inertes auxilia na remoção das inclusões, sendo necessário o controle do tempo para que haja a devida flotação, e não se perca muita temperatura expondo o banho ao ar.
- vi. Elevados teores de pick-up de nitrogênio significam uma alta reoxidação do banho, o que implica em maiores quantidades de inclusões. Sendo a análise do pick-up a menos impactante com relação à limpeza inclusionária dos aços, devido ao enorme controle e baixos teores de pick-up de nitrogênio observados.

Como consideração final tem-se que, o conhecimento das variáveis de escória e de processo é de suma importância para que seja feito um controle inclusionário de qualidade. O completo entendimento dos fenômenos metalúrgicos envolvidos na produção de aços especiais, assim como a adequação dessas variáveis possibilita um produto final de qualidade, algo extremamente valorizado nos dias atuais.

## Agradecimentos

Ao Professor Dr. Wagner Viana Bielefeldt pela orientação, conselhos e amizade.

Ao Professor Dr-Ing. Antônio C. F. Vilela pela confiança.

Ao Laboratório de Siderurgia da UFRGS pelos recursos e pela bolsa de iniciação científica.

Ao Dr. Eng. Julio Aníbal Morales Pereira pela amizade, apoio e conselhos.

Aos colegas e amigos do Laboratório de Siderurgia pelo cooperativismo, em destaque à Caroline Almeida pelo companheirismo e amizade.

## REFERÊNCIAS

- 1 Bartosiaki BG. Caracterização de inclusões não metálicas de óxidos no aço SAE 52100. Trabalho de Diplomação, Escola de engenharia, UFRGS, 2013.
- 2 Reis BH. Estudo sobre a capacidade de absorção de inclusões pela escória de refino secundário na fabricação de aços. Trabalho de Diplomação, Escola de engenharia, UFRGS, 2013.
- 3 Yoon BH, Heo KH, Kim JS.; Sohn, H.S. Improvement of Steel cleanliness by controlling slag composition. Ironmaking and Steelmaking, v.29, n.3, p.215-218, 2002.
- 4 Zhang L, Thomas BG. State of the Art in Evaluation and Control of Steel Cleanliness. ISIJ International, 2002; 43(3): 271-291, 2002.
- 5 Ma JW, Bao PY, Wang M, Zhao WD. Influence of slag composition on bearing steel cleanliness. Ironmaking and Steelmaking, 2014; 4(1): 26-30.
- 6 Melville DS, Brinkmeyer L. Evaluating Steelmaking and Casting Practices Which Affect Quality, 78th Steelmaking Conf. Proc., ISS, Warrendale, PA, (1995), 563.

\* 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.