

# **AVALIAÇÃO DAS INCLUSÕES ENCONTRADAS DURANTE O REFINO SECUNDÁRIO DE AÇOS PARA CONSTRUÇÃO MECÂNICA ACALMADOS AO ALUMÍNIO COM ENXOFRE CONTROLADO<sup>1</sup>**

Marcelo Carboneri Carboni<sup>2</sup>  
Ivan Luiz de Matos Scripnic<sup>3</sup>  
José Roberto Bolota<sup>4</sup>

## Resumo

Na produção de aços para a indústria automobilística, o controle das inclusões presentes no aço desempenha papel fundamental nas propriedades do produto final. Estas inclusões são bastante influenciadas pelos teores de alumínio, silício, cálcio e enxofre presentes no aço.

Este trabalho tem por objetivo caracterizar os resultados de inclusões obtidos durante o refino secundário em forno panela, e compará-las com inclusões encontradas em produto final.

A proposta deste trabalho é a análise da seqüência de processo de produção de aços especiais, avaliando-se e comparando-se resultados sob o ponto de vista de evolução das inclusões presentes no aço. A metodologia consiste em retirada de amostras durante o refino secundário e avaliação da composição química e morfologia das inclusões por microscopia eletrônica de varredura, analisando do caminho percorrido pelas inclusões durante as etapas de processo.

Como resultados deste estudo caracteriza-se tipos e morfologias de inclusões presentes durante o refino secundário de aços para a construção mecânica, fornecendo uma base de dados para análise de parâmetros de processo e avaliação e implementação de contra medidas que controlem a presença destes tipos de inclusões no produto final.

Palavras chave: inclusão, metal escória, tratamento com cálcio

---

<sup>1</sup> Contribuição Técnica enviada ao XXXV Seminário de Fusão, Refino e Solidificação dos Metais, ABM, Salvador, Maio 2004

<sup>2</sup> Engenheiro Metalurgista, Supervisor Técnico de Processos, Aços Villares S/A, Usina Mogi das Cruzes

<sup>3</sup> Engenheiro Metalurgista, Supervisor Técnico de Aciaria, Aços Villares S/A, Usina Mogi das Cruzes

<sup>4</sup> Engenheiro Metalurgista, Gerente de Aciaria, Aços Villares S/A, Usina Mogi das Cruzes

## Introdução

Há muito tempo o nível de limpeza do aço em termos de inclusões tem sido visto como uma preocupação dos produtores de aço. Atualmente, porém esta preocupação tem sido transferida também aos consumidores de aço, dada a influência das inclusões no desempenho dos produtos finais e inclusive nos processos produtivos ligados à elaboração de peças. Para diversos tipos de aço, como por exemplo aços de alta limpeza para indústria automobilística, é exigido um balanço entre as propriedades mecânicas necessárias à performance da peça, bem como um bom desempenho em usinabilidade. Desta maneira é necessária uma análise de processo, objetivando conhecer as diferentes reações envolvidas entre aço, escória e refratários e suas implicações em termos de formação, modificação e eliminação de inclusões presentes no produto final. Para tanto é necessário também o conhecimento dos mecanismos de formação de inclusões.

Para este tipo de aço acalmado ao alumínio, com diferentes teores de enxofre visando melhora no processo de usinagem posterior, e com inclusões modificadas por injeção de cálcio, existe uma janela ótima de processo<sup>[5]</sup> para garantir limpeza do aço e inclusões de óxidos e sulfetos modificadas para morfologias que não prejudiquem a performance do produto final.

O tratamento com cálcio é uma prática amplamente difundida para controle de forma e composição química de inclusões em aços acalmados ao alumínio. O cálcio reage com as inclusões de  $Al_2O_3$ , produto da desoxidação do aço, produzindo aluminatos de cálcio de mais baixo ponto de fusão. O ponto crítico para este tratamento é que parte do cálcio adicionado para a modificação das inclusões de  $Al_2O_3$  pode reagir com o enxofre dissolvido no aço, formando sulfetos.

O processo de lingotamento contínuo é fortemente afetado pelo tipo e quantidade de inclusões presentes no aço. Problemas de obstrução de válvulas submersas (fenômeno conhecido como clogging), estão bastante relacionados com a presença de  $Al_2O_3$  ou CaS que, na forma de inclusões sólidas nas temperaturas de lingotamento, podem formar depósitos nas válvulas, causando sua obstrução. Como resultado desta obstrução pode-se chegar a problemas de lingotabilidade<sup>[2,6]</sup>, que causam descontrole de nível de aço no molde e podem resultar em macro inclusões indesejáveis no produto.

### Tratamento com Cálcio

Durante o tratamento com cálcio de aços acalmados ao alumínio, o cálcio adicionado reage com as inclusões de  $Al_2O_3$  presentes no banho formando cálcio aluminatos<sup>[1]</sup>. Com o aumento da adição de cálcio, as inclusões tendem a ficar mais ricas em CaO, baixando seu ponto de fusão de acordo com o diagrama de fases binário CaO  $Al_2O_3$  apresentado na figura 1<sup>[7]</sup>.

Parte do cálcio adicionado, porém, reage com o enxofre dissolvido no banho, podendo formar CaS ou sulfetos de Ca-Mn, que podem se formar a temperaturas mais baixas<sup>[3]</sup>. De acordo com Engh<sup>[4]</sup>, o teor de enxofre de equilíbrio para a precipitação de CaS, ou seja, para atividade de CaS atingir 1, é de 35 ppm de enxofre dissolvido no aço. Isto considerando-se o equilíbrio entre CaS, CaO,  $Al_2O_3$ , alumínio e enxofre presentes no aço e escória. Este cálculo leva em consideração uma atividade muito baixa de oxigênio na escória, típica de final de processo de

refino para aços especiais. Considerando-se este ponto, é muito importante o teor de enxofre dissolvido no aço no momento da injeção de cálcio.

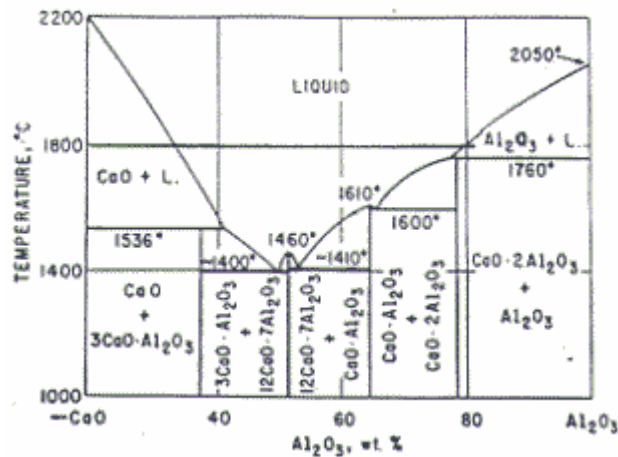


Figura 1 – Diagrama de equilíbrio Binário CaO - Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>

### Procedimento Experimental

A linha de produção da aciaria da Usina Mogi das Cruzes de Aços Villares S/A, conta com um forno elétrico a arco de 70 t de capacidade, equipado com três injetores CoJet™ seguida de uma estação de refino secundário composta por um forno panela também de 70t de capacidade e um desgaseificador a vácuo do tipo VD, e uma máquina de lingotamento contínuo de 4 veios capaz de lingotar as bitolas quadradas de 155 e 185 mm. Sua capacidade anual é de cerca de 250.000 toneladas, e a linha de produtos é de aços para construção mecânica, sendo que cerca de 90% de sua produção é direcionada para a indústria automobilística. Um esquema simplificado do fluxo de produção da aciaria é apresentado na figura 2.

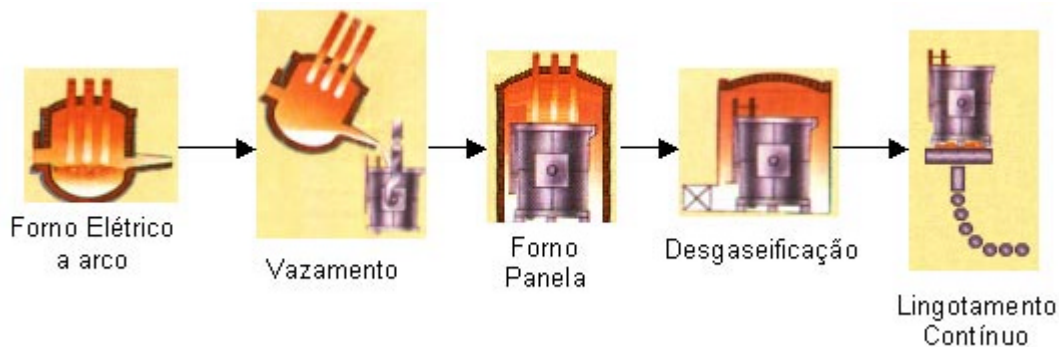


Figura 2 – Fluxograma de Produção da Aciaria de Aços Villares – Usina Mogi das Cruzes.

O procedimento experimental utilizado para a caracterização de inclusões consiste na retirada de amostras em diversos momentos durante a etapa de refino secundário no forno panela e posterior análise por microscopia eletrônica.

Estas amostras abrangem etapas de todo o processo de refino secundário, desde a chegada da panela ao forno panela, até a liberação desta para o lingotamento contínuo, passando por etapas de adição de ligas, desgaseificação à vácuo e tratamento com injeção de arames para modificação de inclusões.

A amostragem é feita com a utilização de amostradores de imersão do tipo padrão disponível no mercado, constituído de coquilha selada à vácuo em cartucho. Após a retirada da amostra, esta é enviada ao laboratório químico para análise de composição química por espectrometria. Da mesma amostra é retirada uma peça na forma de um cubo de 1cm de aresta para ser enviada para a microscopia eletrônica. No mesmo instante em que são retiradas amostras de aço, também são retiradas amostras de escória e medida de oxigênio dissolvido no aço, para que se possa estabelecer relações de equilíbrio entre metal escória e inclusões.

A amostra na forma de cubo de 1cm de aresta tem uma das faces preparadas e tem toda extensão de sua superfície observada por microscopia eletrônica de varredura em busca de inclusões. As inclusões encontradas são caracterizadas por EDS e fotografadas, para que se tenha tanto análise química da inclusão quanto sua morfologia e tamanho. Em termos de população de inclusões a análise feita é qualitativa, objetivando-se determinar os tipos de inclusões presentes e não quantitativa em relação à frequência ou tamanho de cada tipo de inclusão encontrada.

Os resultados encontrados são tabelados e colocados em diagrama  $\text{CaO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ , objetivando avaliar o caminho percorrido pelas inclusões durante o processo de refino no forno panela.

#### Resultados obtidos

A seguir apresenta-se os resultados obtidos para as corridas nas quais foi realizado este estudo de caracterização de inclusões. Todas as corridas envolvidas são de aços carbono SAE 1045 com modificações, seguindo a faixa de composição química apresentada na tabela 1:

Tabela 1: Faixa de composição química dos aços das corridas analisadas:

	C	Si	Mn	S	Al
Mínimo	0,40 %	0,15 %	0,75 %	0,025 %	0,015 %
Máximo	0,50 %	0,30 %	0,85 %	0,035 %	0,025 %

Foram avaliadas inclusões de três etapas do processamento da corrida em forno panela, cujos resultados de análise de escória, oxigênio ativo e inclusões são apresentados a seguir:

#### Primeira análise

Os resultados de oxigênio ativo para esta fase de análise de processamento foram encontrados na faixa de 20 a 30 ppm. Os resultados de escória encontrados para estas corridas estão listados na tabela 2.

Tabela 2: Resultados de análise de escória encontrados na etapa 1

	CaO	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	FeO	S
Mínimo	40,0 %	25,0 %	2,0 %	10,0 %	1,5 %	0,7 %
Máximo	60,0 %	35,0 %	10,0 %	15,0 %	3,0 %	1,0 %

A seguir apresenta-se resultados obtidos de inclusões típicas encontradas na primeira etapa do processo analisada. Neste resultados estão apresentadas fotos de microscópio eletrônico de varredura e resultados da análise por EDS da inclusão.

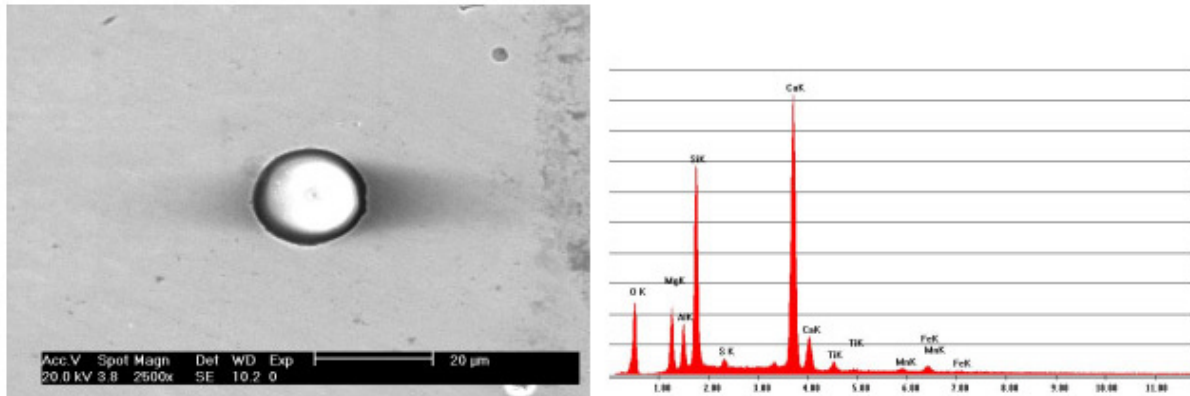


Figura 3 - Inclusão contendo Ca, Si, Al, Mg e O, aumento 2500X

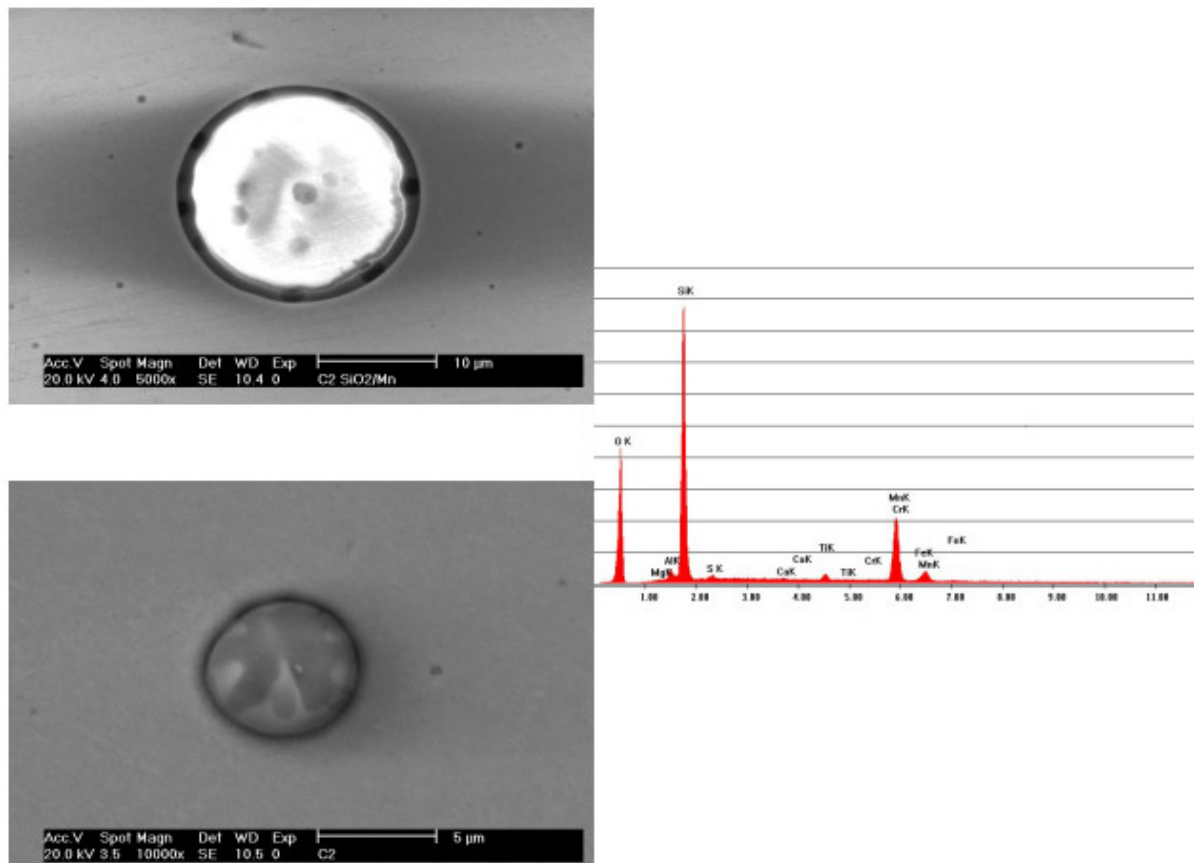


Figura 4 - Inclusões contendo Si, Mn e O, aumentos de 5000X e 10000X, respectivamente

## Segunda análise

Os resultados de oxigênio ativo para esta fase de análise de processamento foram encontrados na faixa de 10 a 20 ppm. Os resultados de escória encontrados para estas corridas estão listados na tabela 3.

Tabela 3: Resultados de análise de escória encontrados na etapa 2

	CaO	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	FeO	S
Mínimo	35,0 %	25,0 %	15,0 %	12,0 %	-	0,4 %
Máximo	45,0 %	35,0 %	25,0 %	18,0 %	0,7 %	0,9 %

A seguir apresenta-se resultados obtidos de inclusões típicas encontradas na primeira etapa do processo analisada. Neste resultados estão apresentadas fotos de microscópio eletrônico de varredura e resultados da análise por EDS da inclusão.

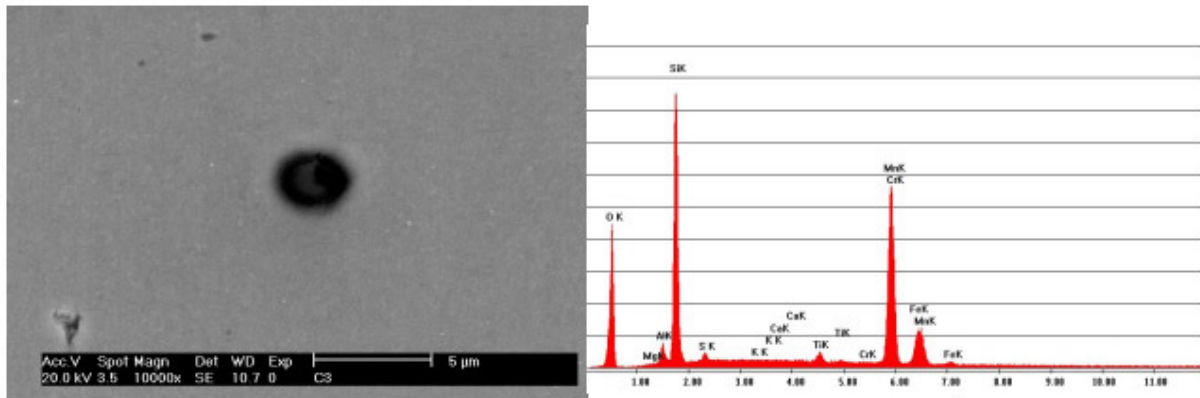


Figura 5 - Inclusão contendo Mn, Si e O, aumento de 10000X

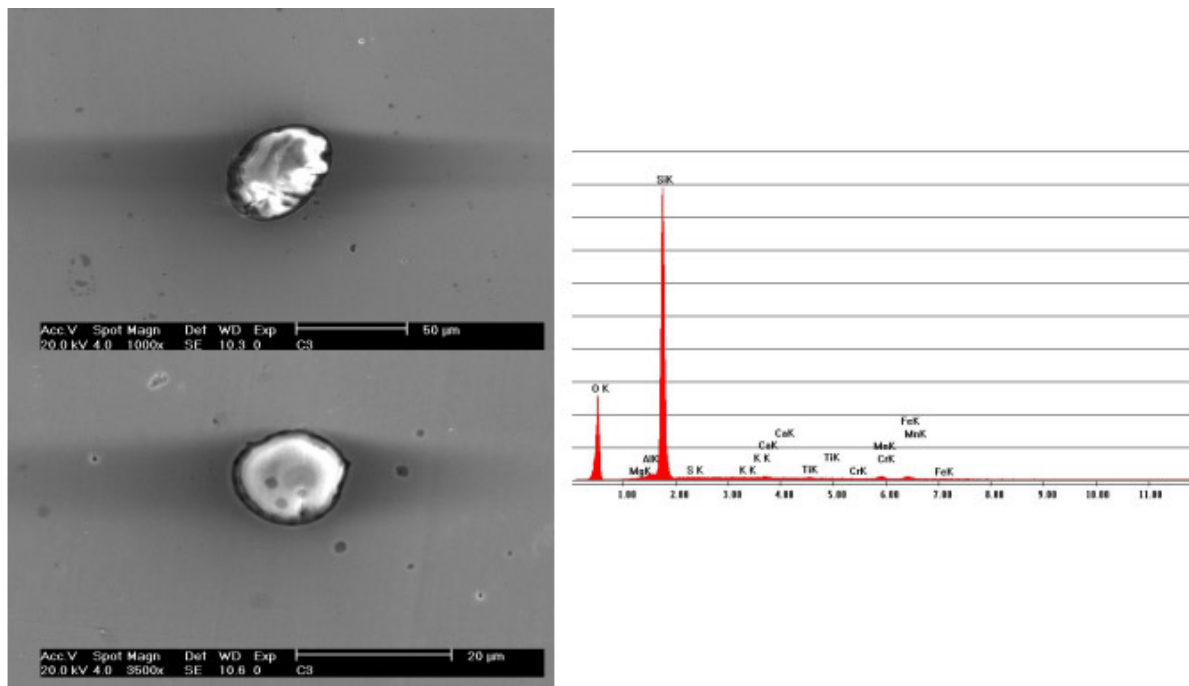


Figura 6 - Inclusões contendo Si e O, aumentos de 1000X e 3500X, respectivamente

### Terceira análise

Os resultados de oxigênio ativo para esta fase de análise de processamento foram encontrados na faixa de 5 a 8 ppm. Os resultados de escória encontrados para estas corridas estão listados na tabela 4.

Tabela 4: Resultados de análise de escória encontrados na etapa 3

	CaO	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	FeO	S
Mínimo	35,0 %	25,0 %	15,0 %	12,0 %	-	0,2 %
Máximo	45,0 %	35,0 %	25,0 %	18,0 %	0,5 %	0,4 %

A seguir apresenta-se resultados obtidos de inclusões típicas encontradas na primeira etapa do processo analisada. Neste resultados estão apresentadas fotos de microscópio eletrônico de varredura e resultados da análise por EDS da inclusão.

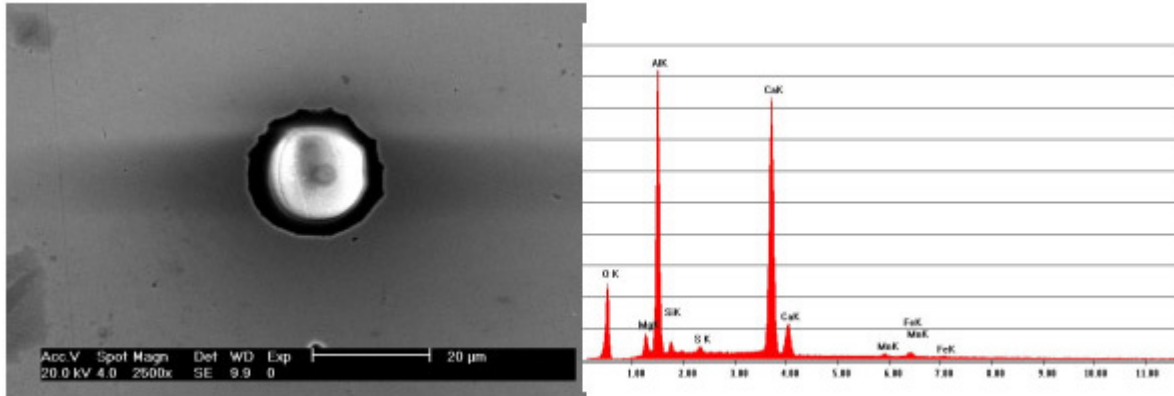


Figura 7 - Inclusão contendo Ca, Al e O, aumento de 2500X

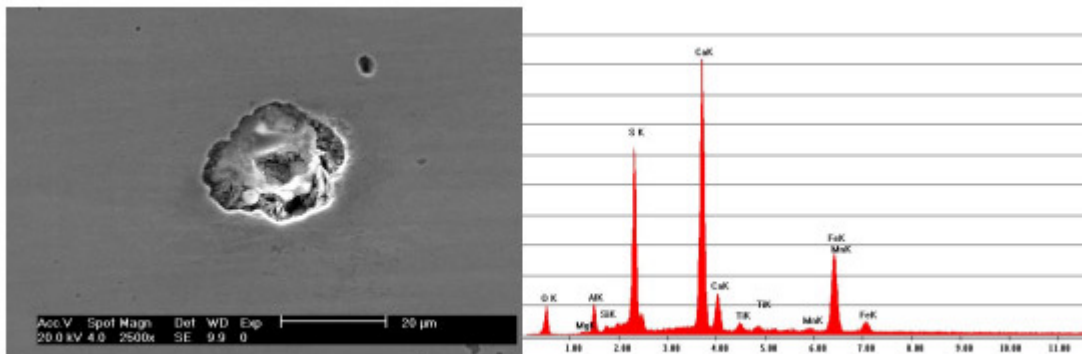


Figura 8 - Inclusão contendo Ca, Al, O e S, aumento de 2500X

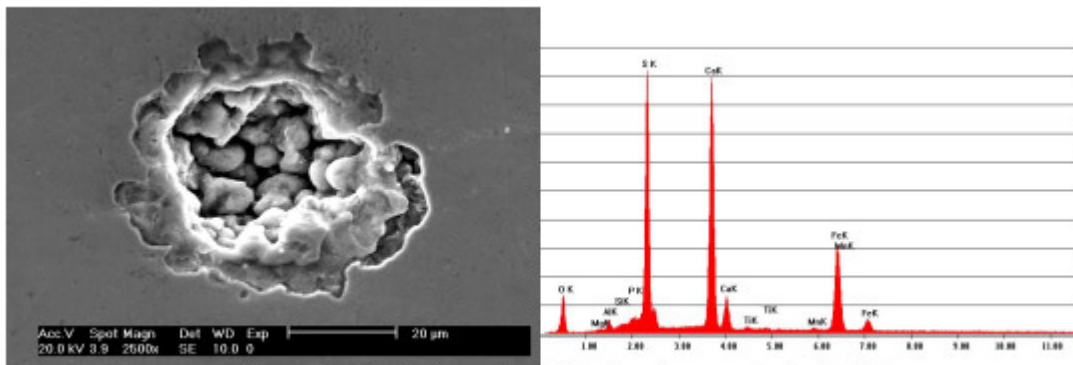


Figura 9 - Inclusão contendo Ca, S e O, aumento de 2500X

## Discussão dos resultados

Este trabalho tem por objetivo caracterizar os resultados de inclusões obtidos durante o refino secundário em forno panela, e compará-las com inclusões encontradas em produto final.

Analisando-se os resultados característicos de inclusões para cada etapa do processo de refino em forno panela considerada, observa-se que há similaridade entre as corridas analisadas e diferenças entre as etapas de processo consideradas. Na primeira etapa é comum encontrar-se inclusões de diversos tipos e composições de óxidos, uma vez que nesta etapa de processo ainda têm um nível relativamente elevado de oxigênio ativo, considerando-se aços para construção mecânica com os teores de carbono considerados.

Já na segunda etapa, com um nível de oxidação mais baixo, observa-se fundamentalmente os produtos de desoxidação presentes em maior quantidade, com teores de Si, Mn e Al. Finalmente na terceira etapa considerada, observa-se principalmente produtos resultantes do tratamento com Ca, uma vez que as inclusões mais fáceis de serem eliminadas por flotação e dissolução na escória já foram removidas. Assim restam os cálcio aluminatos, que em geral são líquidos e os sulfetos de cálcio, que pela morfologia apresentada indicam estarem em estado sólido no momento de retirada da amostra. As inclusões sólidas serão as causadoras do clogging caso não sejam eliminadas antes do lingotamento.

Este comportamento das inclusões encontradas está esquematizado no diagrama ternário<sup>[7]</sup> CaO-SiO<sub>2</sub>-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> da figura 10, representando o caminho percorrido pelas inclusões.



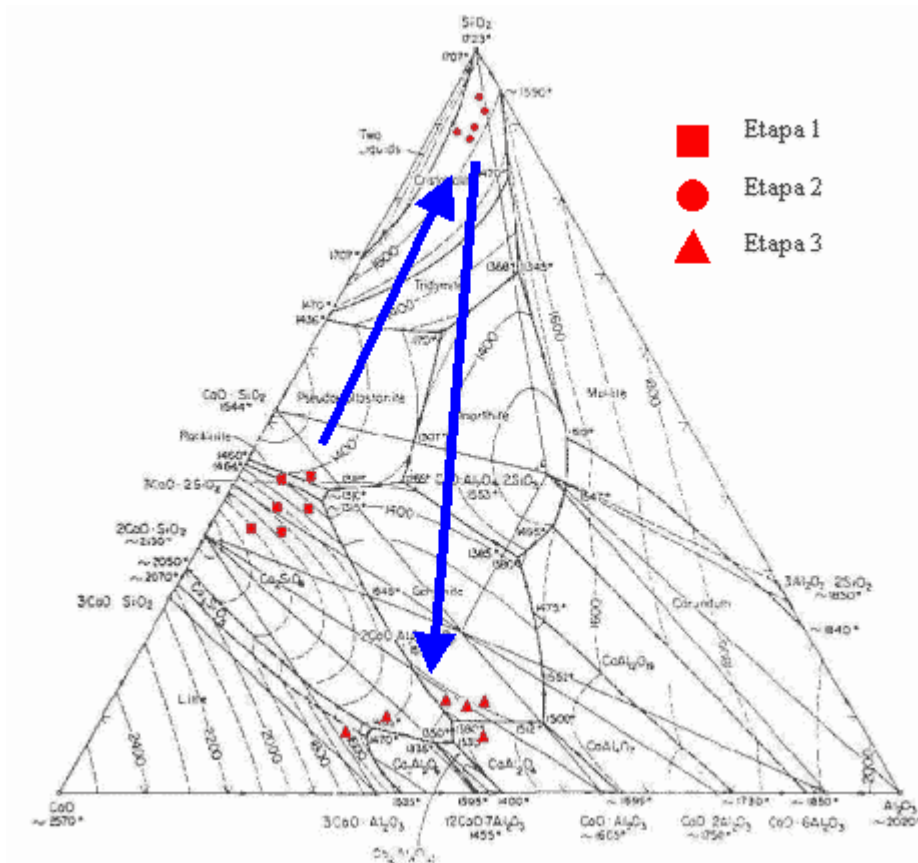


Figura 10 – Caminho percorrido pelas inclusões durante o processo de refino em forno panela.

### Conclusões

As inclusões encontradas em amostras retiradas durante o processo de refino em forno panela para aços para construção mecânica com enxofre controlado e acalmados ao alumínio foram analisadas e suas características em termos de composição química e morfologia foram avaliadas.

Demonstrou-se um caminho percorrido pela composição química das inclusões dentro de um diagrama ternário CaO-SiO<sub>2</sub>-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Esta avaliação permitirá em trabalhos futuros a comparação em termos de inclusões durante o processo e no produto final em função da seqüência de operações de refino utilizadas na estação de metalurgia secundária.

As inclusões foram avaliadas também em termos do risco da formação de clogging durante o lingotamento contínuo, etapa subsequente ao refino do aço.

### Referências Bibliográficas

1 BESKOW, K.; JIA, J.; LUPIS, C.H.P.; SICHEN, D. Chemical characteristics of inclusions formed at various stages during the ladle treatment of steel. **Ironmaking and Steelmaking**, v. 29, n. 6, p. 427-435, 2002.

- 2 BOLENDER, T.; CAPPEL, J.; WÜNNENBERG, K.; PLUSCHKELL, W. Metallurgical process engineering for castability-improvement in steel with elevated sulfur contents. **Steel Research**, v. 72, n. 11+12, p. 477-483, 2001.
- 3 CICUTTI, C.E.; MADÍAS, J.; GONZÁLEZ, J. C. Control of microinclusions in calcium treated aluminium killed steels. **Ironmaking and Steelmaking**, v. 24, n. 2, p. 155-159, 1997.
- 4 ENGH, T. A. **Principles of Metal Refining**. McGraw Hill, 1992 p. 187-189
- 5 JANKE, D.; MA, Z.; VALENTIN, P.; HEINEN, A. Improvement of castability and quality of continuously cast steel. **ISIJ International**, v. 40, n. 1, p. 31-39, 2000.
- 6 KOROUSIC, B.; TEHOVNIK, F.; ARH, B. Production of aluminium killed steels with high sulphur contents for automotive industry. **Steel Research**, v. 72, n. 2, p. 35-39, 2001.
- 7 **SLAG ATLAS**, 2<sup>a</sup> ed. Verlag Stahleisen, Düsseldorf, 1995.

# EVALUATION OF THE INCLUSIONS FOUND DURING SECONDARY REFINING OF ALUMINIUM KILLED STEELS FOR THE AUTOMOTIVE INDUSTRY WITH CONTROLLED CONTENT OF SULPHUR<sup>1</sup>

Marcelo Carboneri Carboni<sup>2</sup>  
Ivan Luiz de Matos Scipnic<sup>3</sup>  
José Roberto Bolota<sup>4</sup>

## Abstract

In the production of steel for automotive industry, the control of inclusions plays a major role in the properties of the final product. These inclusions are mainly influenced by the contents of aluminium, silicon, calcium and sulphur in the steel.

The present paper aims to make a characterization of the results of inclusion obtained during the secondary refining in the ladle furnace, and to compare them to the inclusions found in the final product.

The purpose of this work is to analyse the steps of the process of the production of speciality steels, evaluating and comparing the results concerning the evolution of the inclusions in the steel. The methodology consists in taking samples during the secondary refining and to evaluate the chemical composition and morphology of the inclusions using scanning electron microscopy, analysing the path described by the inclusions along the steps of the process.

As result for this study types and morphologies of inclusions present during the secondary refining of steels for automotive industry are characterised, creating a background for the analysis of the process parameters and evaluation and implementation of counter measures which may control the existence of this types of inclusions in the final product.

**Keywords:** inclusion, slag metal, calcium treatment

---

<sup>1</sup> Technical Contribution sent to the XXXV Seminário de Fusão, Refino e Solidificação dos Metais, ABM, Salvador, Maio 2004

<sup>2</sup> Metalurgical Engineer, Melt Shop Process Supervisor, Aços Villares S/A, Usina Mogi das Cruzes

<sup>3</sup> Metalurgical Engineer, Melt Shop Supervisor, Aços Villares S/A, Usina Mogi das Cruzes

<sup>4</sup> Metalurgical Engineer, Melt Shop Manager, Aços Villares S/A, Usina Mogi das Cruzes