

# ***Caracterização e estudo termodinâmico de inclusões do aço SAE 8620 produzido via Aciaria Elétrica***

**Wagner Viana Bielefeldt**

Eng. Metalúrgico, MSc. e doutorando do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica, de Minas e Materiais/PPGEM - Universidade Federal do Rio Grande do Sul/UFRGS.

Porto Alegre, RS, Brasil CEP 91501-970

wagner@ct.ufrgs.br

**Carlos Alberto Mendes Moraes**

Prof. Dr. Curso de Engenharia Mecânica – Núcleo de Caracterização de Materiais – Universidade do Vale do Rio dos Sinos.

São Leopoldo, RS, Brasil CEP 93022-000

cmoraes@unisinos.br

**Antonio Cezar Faria Vilela**

Prof. Dr. Ing. DEMET e PPGEM/UFRGS.

Porto Alegre, RS, Brasil CEP 96745-000

vilela@ufrgs.br

**Luis Augusto Colemborgue Klujzso**

Ph.D. - Desenvolvimento de Processos e Produtos - GERDAU Aços Especiais Piratini.

Charqueadas, RS, Brasil CEP 96745-000

colemborgue.klujzso@gerdau.com.br

**Paulo Carvalho Fernandes**

Eng. Metalúrgico - Aciaria - GERDAU Aços Especiais Piratini.

Charqueadas, RS, Brasil CEP 96745-000

paulo.fernandes@gerdau.com.br

---

## **Resumo**

O conceito de qualidade está fortemente relacionado à limpeza micro-inclusionária dos aços. Através de práticas corretas de refino procura-se: 1) adequar a quantidade de inclusões não-metálicas a valores aceitáveis e; 2) que as inclusões remanescentes não sejam muito prejudiciais às propriedades mecânicas dos aços. Para alcançar esses objetivos, neste trabalho será abordada a análise de inclusões não-metálicas ao longo do processo de fabricação do aço SAE 8620 via aciaria elétrica. A caracterização de inclusões consistiu na coleta de amostras de aço ao longo do processo de sua produção. Esse aço é utilizado na fabricação de componentes para a indústria automotiva. Foram analisados 1) área ocupada e tamanho das inclusões e 2) composição química. Os resultados obtidos foram plotados em diagramas de fase ternários e pseudo-ternários. Adicionalmente, foram realizadas correlações entre

## **Abstract**

The concept of quality is strongly linked to the steel micro-inclusionary cleanness. The aims of the correct refining practices are: 1) to adequate the non-metallic inclusions amount to acceptable values; and 2) to guarantee that the remaining inclusions will not be detrimental to the mechanical properties of steels. To reach such aims, the present work will evaluate the non-metallic inclusions analysis during steel making via EAF process. The characterization of inclusions consisted in the sampling of steel during the SAE 8620 refining. This steel is used in the production of automotive components industry. The characterization of steel inclusions consisted in analyzing 1) area occupied by inclusions and their size and; 2) chemical composition. The results were analyzed via ternary and pseudo-ternary phase diagrams. Some correlations between inclusion composition and steel making process were also done. The inclusions appear mainly as Si/Mn oxides in the beginning of the ladle furnace

composição das inclusões e o processo de fabricação na aciaria. As inclusões apresentam-se como óxidos de Si/Mn no início do processamento no forno-painel e como cálcio-aluminatos no início do lingotamento contínuo. O tamanho médio das inclusões está na faixa de 4 a 10µm, observando-se ainda uma queda gradativa na área ocupada pelas inclusões ao longo do processo, que é um dos objetivos da prática de refino. Também foi realizado um estudo termodinâmico onde o resultado da análise de inclusões foi comparado com simulações via FactSage. Verificou-se que os resultados são compatíveis. O resultado deste trabalho mostra que a aplicação de diferentes técnicas torna possível o estudo e desenvolvimento de aços de alta qualidade.

processing, and as Ca-Al oxides in the beginning of the continuous casting. The inclusions medium size was determined in the range of 4 to 10µm. It was also observed a gradual decreasing of the occupied area by inclusions during the process, which is an important aim of the refining practices. A thermodynamic study was carried out where the results of inclusion analysis was compared with FactSage simulations and the results are compatible. The results of this work shown that the application of different techniques becomes possible the study and development of high quality steels.

**Palavras-chave:** aço SAE 8620, caracterização, inclusões, FactSage.

**Key words:** SAE 8620 steel, characterization, inclusions, FactSage

## 1. Introdução

A tecnologia de fabricação do aço tem tido um grande avanço nos últimos 25 anos, resultando em notável redução de suas impurezas (Holappa e Helle, 1995). Além disso, a idéia de aço limpo muitas vezes inclui requisitos especiais para as inclusões com respeito a sua composição, morfologia, tipo, tamanho e distribuição no aço líquido, na solidificação dos lingotes ou placas e no produto final.

Silva (2002) relata que, nas últimas três décadas, três importantes ocorrências caracterizaram a questão da limpeza (ou limpidez) interna dos aços: a) o conceito que determinadas inclusões são resultado inevitável do processo de elaboração, proposto há várias décadas, foi assimilado, resultando na chamada "engenharia de inclusões", isto é, no controle de processos de modo a obter inclusões adequadas à aplicação prevista para o aço; b) o nível aceitável de inclusões foi reduzido drasticamente e; c) a conjugação destas duas ocorrências e das ações daí decorrentes impôs a obsolescência das metodologias clássicas de medição de limpeza interna e fomentou o desenvolvimento de grande número de novas técnicas para a medição desta característica.

Embora seja muito comum na literatura o uso do termo *clean steel* para designar aços de elevada limpeza interna, deve-se ter uma exata compreensão deste termo. Cramb (1997) analisa em seu trabalho que o termo *clean steel*, em uma visão abrangente, descreve aços que possuem baixos níveis de elementos como: enxofre, fósforo, nitrogênio, oxigênio e hidrogênio; níveis controlados de elementos residuais como: cobre, chumbo, zinco, níquel, cromo, bismuto, estanho, antimônio e magnésio; e uma baixa frequência de defeitos no produto final que possam ser atribuídos à formação de óxidos durante a fabricação do aço.

Cramb (1997) relata ainda que, devido à natureza abrangente do termo *clean steel*, pode-se fazer uma divisão em:

- a) Aços de alta pureza ou *high purity steels*: aços com baixos níveis de soluto, por exemplo, carbono < 30 ppm em chapas para a indústria automotiva;

- b) Aços de baixo residual ou *low residual steels*: aços com baixos níveis de impurezas originadas das matérias-primas, por exemplo, cobre e estanho na sucata;
- c) Aços limpos ou *clean steel*: baixa frequência de defeitos no produto final que possam ser atribuídos à formação de óxidos durante a fabricação do aço.

Os aços limpos são o enfoque deste trabalho. Atribuindo também o conceito de aços limpos à quantidade mínima de inclusões, Holappa e Helle (1995) definem em seu trabalho os conceitos de controle de inclusões e limpeza inclusionária como: “o controle de inclusões em aços está intimamente ligado ao conceito de aços limpos, chamados comumente de *clean steel* ou ainda *ultra-clean steel*”.

Holappa e Helle (1995) afirmam ainda que a tecnologia de fabricação do aço teve um grande avanço durante os últimos 25 anos, que resultou em notável redução das impurezas no aço. Além disso, a idéia de aço limpo muitas vezes inclui requisitos especiais para as inclusões com respeito a sua composição, morfologia, tipo, tamanho e distribuição no aço líquido, na solidificação dos lingotes ou placas e no produto final.

Na produção de aços limpos, especificações de teor e tamanho de inclusões em aços comerciais variam com o produto, por exemplo, de <5µm de diâmetro em aços ultra-limpos para <100µm de diâmetro na fabricação de chapas. Uma meta comum, todavia, é minimizar a quantidade e tamanho das inclusões e controlar sua distribuição no produto final (Beskow *et. al.*, 2002). Eles relatam ainda que numerosas investigações têm sido realizadas há algumas décadas para atingir essa meta, e podem ser classificadas em três grupos: estudos laboratoriais, investigações industriais e modelos matemáticos.

Levando-se em consideração os requisitos mencionados acima, o presente trabalho tem como objetivo principal correlacionar as principais características do processo de fabricação do aço em estudo com as inclusões resultantes. A partir deste entendimento, será possível fazer ajustes no processo visando a obtenção de produtos com menor nível inclusionário, bem como com inclusões com composições químicas específicas para posterior conformação.

## 2. Materiais e Métodos

### 2.1. Processo de elaboração na Gerdau - Aços Especiais Piratini

A empresa Aços Especiais Piratini, siderúrgica do Grupo Gerdau, produz aços longos especiais destinados principalmente à indústria automotiva. A aciaria é composta de: forno elétrico a arco, forno-panela, sistema de desgaseificação do tipo tanque VD (VD - desgaseificação a vácuo), lingotamento contínuo de três veios de tarugos de seção quadrada e lingotamento convencional (lingoteiras de dimensões especiais). Atualmente, 95% da produção de aço da Aços Especiais Piratini passa pelo Lingotamento Contínuo. A aciaria da Aços Especiais Piratini possui capacidade de produção ao redor de 500.000 t/ano.

### 2.2. Amostragem

Neste trabalho foi escolhido para estudo o aço SAE 8620, classificado como aço-liga de baixo teor de liga para cementação. A composição química típica do aço é mostrada na tabela 1.

Tabela 1 - Composição química típica do aço SAE 8620 em % em massa.

|     | C    | Si   | Mn   | P     | S     | Cr   | Ni   | Mo   | Al    |
|-----|------|------|------|-------|-------|------|------|------|-------|
| Mín | 0,18 | 0,15 | 0,70 | -     | 0,020 | 0,40 | 0,40 | 0,15 | 0,025 |
| Max | 0,23 | 0,35 | 0,90 | 0,030 | 0,035 | 0,60 | 0,70 | 0,25 | 0,040 |

O enriquecimento superficial de carbono nos aços proporcionado pela cementação visa produzir uma superfície de alta dureza e resistência ao desgaste, suportada por um núcleo tenaz. Para que o aço produzido atenda esses requisitos, diversos fatores são importantes durante a etapa de fabricação na aciaria. Por exemplo:

- Controle dos teores de FeO e MnO na escória da panela (Zhang e Thomas, 2003).
- Efeito do tratamento de vácuo e da agitação com gás na panela, além do uso de refratários quimicamente estáveis (Cicutti *et al.*, 1997).
- Adição de cálcio para modificar as inclusões provenientes da reação entre o oxigênio dissolvido no aço e o alumínio. O cálcio reage com as inclusões de alumina, gerando cálcio-aluminatos de baixo ponto de fusão (Han *et al.*, 2006; Silva, 2006).

Face ao exposto, a fabricação deste aço mostra-se tarefa complexa, justificando um estudo detalhado do processo de produção, objetivando a otimização do processo para a obtenção de inclusões de tamanho, forma e quantidade controladas.

Após o detalhamento do processo de produção, realizou-se a amostragem em corridas que representassem o padrão normal de operação para esta qualidade de aço.

Foram retiradas amostras de aço e escória em diversas etapas do processo de refino secundário de duas corridas denominadas "A" e "B", listadas abaixo:

- Antes da primeira adição de ligas no forno-panela (FP) (P1) e após adição de ligas no vazamento;
- Antes da segunda adição de ligas no forno-panela (P2);
- Após a etapa de degaseificação do aço (VD) (P3);
- Amostra do aço final no distribuidor (P4).

Utilizou-se para a retirada de amostras de aço um amostrador apropriado (tipo "lollipop") disponível comercialmente. O tipo de amostrador utilizado não contém desoxidante, para evitar a modificação das inclusões. A figura 1 detalha os pontos onde foram coletadas as amostras.

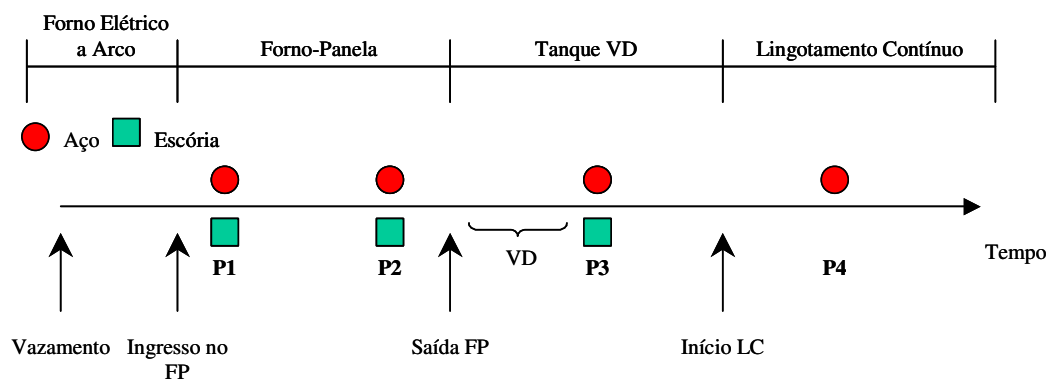


Figura 1 - Localização dos pontos de amostragem ao longo do processo.

## 2.3. Técnicas utilizadas

### 2.3.1 Análises químicas

#### a) Aço e escória

As análises químicas foram realizadas pelos seguintes métodos:

- Análises de aço via espectrômetro de emissão ótica ARL modelo 3560;
- Análises de escória via espectrômetro de fluorescência de raios-x Philips PW-2600;
- Análises de enxofre, nitrogênio e oxigênio total via determinador de C e S modelo CS 444 LS.

#### b) Inclusões

As amostras utilizadas na análise são as mesmas do item 2.3.2 a seguir. As inclusões foram analisadas em um microscópio eletrônico de varredura (MEV) Philips CDU-LEAP-DETECTOR, no qual, através da utilização da microsonda EDS acoplada, modelo EDAX XL-20, realizou-se a análise dos elementos químicos das inclusões. Foram analisadas via MEV/EDS cerca de 10 inclusões por amostra.

### 2.3.2 Tamanho médio e área ocupada pelas inclusões

Existem diversos métodos para avaliar a distribuição de tamanho e, principalmente, a quantidade de inclusões (Zhang e Thomas, 2003; Zhang, 2006). As normas comumente aplicadas para avaliação de inclusões em produtos laminados (ASTM E-45) não podem ser aplicadas em amostras retiradas ao longo do processo, pois as inclusões dos produtos laminados estão deformadas, diferentemente das amostras retiradas ao longo do processo de elaboração do aço. Além disso, a análise realizada pela norma é meramente comparativa (Moraes *et. al.*, 2006).

Foi desenvolvido então um método alternativo: os corpos de prova foram preparados por método metalográfico tradicional (corte, lixamento em lixas de granas de 100 até 1000 e polimento com pasta de diamante de 4 $\mu$ m e 1 $\mu$ m). Em seguida, foram analisados via microscópio óptico (MO) Union Versamet 3 onde realizou-se a contagem das inclusões, em um aumento de 500x (campo total de cerca de 50mm<sup>2</sup>). As inclusões foram separadas por tom e classificadas como óxidos e sulfetos. Como o objetivo é avaliar a limpeza interna, somente os óxidos serão considerados neste trabalho. As inclusões também foram

classificadas por tamanho: 4-10 $\mu$ m, 10-20 $\mu$ m, 20-50 $\mu$ m e >50 $\mu$ m. Foram analisadas via MO cerca de 50 inclusões por amostra.

Com os dados de quantidade e tamanho médio das inclusões, é possível calcular a área ocupada pelas mesmas. Desta forma, pode-se estimar a fração de inclusões no banho. Como grande parte das inclusões observadas possui a forma esférica, essa forma foi considerada no cálculo da área ocupada.

### 2.3.3 Análise de oxigênio total

Uma forma de se avaliar a limpeza do aço, em termos de inclusões, é a análise de oxigênio total durante a etapa de refino secundário (Zhang, 2006). O oxigênio total é a soma do oxigênio ativo e o combinado sob a forma de inclusões não-metálicas. O oxigênio ativo pode ser medido utilizando sensores. O oxigênio ativo não varia muito, desta forma, o oxigênio total pode ser utilizado como medida indireta da quantidade total de inclusões. Devido à pequena população de inclusões grandes, a medida de oxigênio total representa ainda a população de microinclusões no aço líquido (Zhang e Thomas, 2003). Essa medida é utilizada por algumas empresas produtoras de aço para indicar o índice de limpeza dos seus produtos (Zhang e Thomas, 2003)(Zhang, 2006).

### 2.3.4 Termodinâmica computacional

Para o estudo termodinâmico foi utilizado o software comercial FactSage, versão 5.4.1. A descrição das suas principais funções e aplicações foi apresentada por (Bale *et. al.*, 2002). A aplicação de bancos de dados termodinâmicos (utilizando programas computacionais) em engenharia de inclusões foi apresentada por (Jung *et. al.*, 2004a). Para o cálculo do equilíbrio aço-inclusões foram utilizados:

- O banco de dados para aço líquido, que se baseia no modelo associado (Jung *et. al.*, 2004b);
- O banco de dados de escórias, para simular a formação de inclusões, que se baseia no modelo quase-químico modificado por Pelton. Este modelo foi descrito por (Eriksson e Pelton, 1993), entre outros trabalhos.

## 3. Resultados e Discussão

### 3.1 Tamanho médio e área ocupada

Serão apresentados os resultados de tamanho médio das inclusões de óxido somente para a prova P4, pois essa prova representa as inclusões no distribuidor (que podem ter impacto no produto final). Os resultados são mostrados na figura 2.

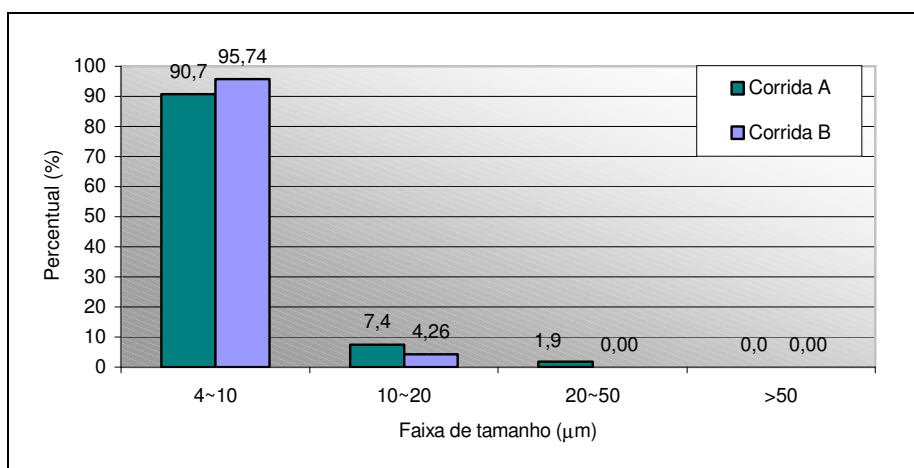


Figura 2 - Tamanho médio das inclusões para a prova P4.

O gráfico da figura 2 mostra principalmente a presença majoritária de microinclusões no banho, o que se verifica também nas outras provas coletadas.

No gráfico da figura 3 pode-se avaliar a área ocupada pelas inclusões de óxido ao longo das provas para as corridas A e B.

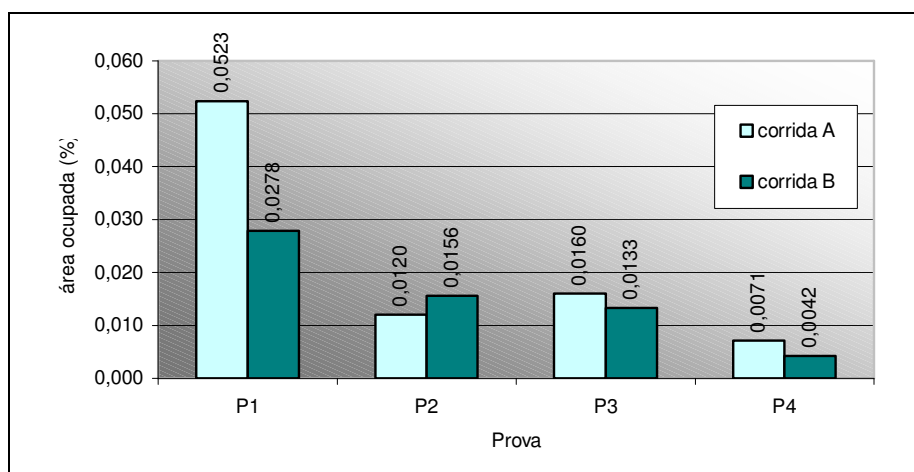


Figura 3 - Evolução da área ocupada pelas inclusões de óxidos.

As duas corridas tiveram comportamento semelhante com relação à área ocupada pelas inclusões de óxidos, com exceção da prova P1 da corrida A. Essa prova se caracterizou por ter inclusões de maior tamanho, que influíram no cálculo da área ocupada. A mesma tendência foi observada na análise de oxigênio total (268 ppm na corrida A e 142 ppm na corrida B).

Além disso, pode-se verificar o efeito do refino no forno-panela entre as provas P1 e P4 na limpeza do aço, pois a área ocupada diminui significativamente ao longo das provas analisadas. Isso se deve, principalmente, à absorção das inclusões pela escória da panela e distribuidor.

### 3.2 Análise de área ocupada x oxigênio total

Adicionalmente, realizou-se a comparação entre a medida de oxigênio total e a área ocupada pelas inclusões de óxido nas duas corridas, o que pode ser observado no gráfico da figura 4. O objetivo foi encontrar possíveis correlações entre as medidas.

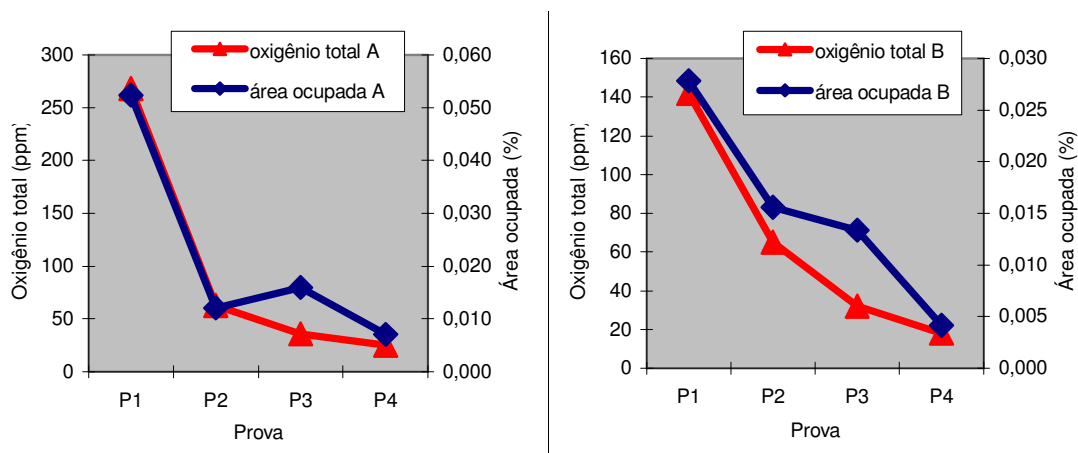


Figura 4 - Análise de oxigênio total x área ocupada para as corridas A e B.

Observou-se uma boa correlação entre as medidas de oxigênio total e a área ocupada, onde praticamente as mesmas tendências de queda foram encontradas, demonstrando uma melhor limpeza do aço. Observa-se nos dois gráficos uma mudança na inflexão na curva de área ocupada na prova P3. Possivelmente o tamanho médio das inclusões tornou-se maior em função da agitação sob o vácuo, o que facilita a remoção das inclusões (de acordo com a curva de oxigênio total).

### 3.3 Composição das inclusões

Aços semi-acalmados, com oxigênio residual na faixa de 25 a 40 ppm, são desoxidados com FeSi em combinação com pequenas quantidades de alumínio ou ainda pela combinação de FeSi e FeSiMn. Nessa situação, os produtos de desoxidação são formados no sistema  $\text{MnO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$  (Kang *et. al.*, 2006), o que foi o caso da prova P1 nas duas corridas.

O tipo de inclusão preferido no sistema  $\text{MnO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$  é a espessartita. Inclusões de espessartita apresentam baixa dureza, são deformáveis e possuem excelentes características de flotação. No diagrama ternário  $\text{MnO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ , a espessartita existe somente em uma estreita faixa de composição. Porém, com um controle rígido da prática de desoxidação, é possível produzir inclusões de espessartita ( $3\text{MnO-Al}_2\text{O}_3\text{-3SiO}_2$  contendo 43% MnO, 20,6%  $\text{Al}_2\text{O}_3$  e 36,4%  $\text{SiO}_2$ ) em aços desoxidados com Mn-Si-Al (Choudhary *et. al.*, 2002).

O diagrama ternário que representa as inclusões da prova P1 para as duas corridas é mostrado na figura 5. Nesta figura, também está em destaque (em amarelo) a região da espessartita.



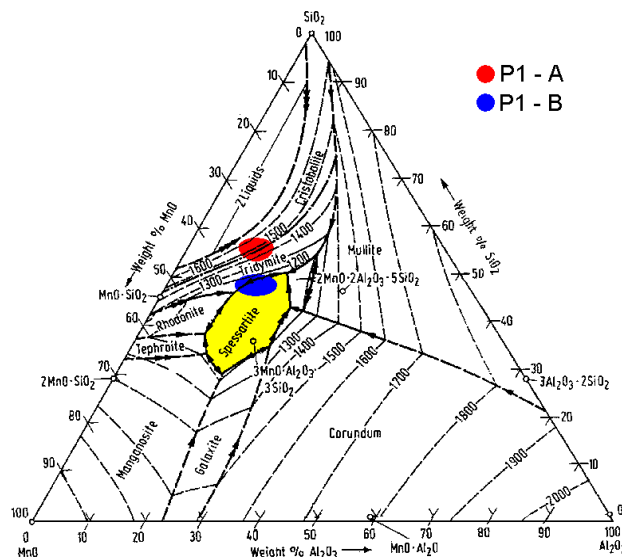


Figura 5 - Diagrama ternário do sistema MnO - Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> - SiO<sub>2</sub> (Slag Atlas, 1995) para a prova P1.

As provas P2 (antes do vácuo) e P3 (pós-vácuo) podem ser agrupadas no sistema CaO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-2SiO<sub>2</sub>, considerando-se ainda o teor fixo de 10% de MgO. Para este sistema, a região da anortita (CaO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-2SiO<sub>2</sub> contendo 43% CaO, 37% Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> e 20% SiO<sub>2</sub>) é a de menor ponto de fusão (inclusões líquidas) (Faulring, 1999). As inclusões da prova P2 e P3 apresentaram grande heterogeneidade na composição química. As inclusões nesta etapa do processo possuem essa característica, provavelmente, ao fato de que a adição da maior parte dos elementos de liga ser realizada após a P1 e pouco antes da P2. Também deve ser considerada a forte interação da escória com o banho de aço líquido resultante da agitação com gás antes e durante o vácuo. A influência desses fatores na composição das inclusões foi observada em outros trabalhos (Velasques *et. al.*, 2003).

Para a prova P4, existem inclusões com 80% Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> até inclusões próximas a região do C<sub>12</sub>A<sub>7</sub> (12CaO - 7Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), inclusões líquidas com 48% de CaO e 52% de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. O diagrama ternário (em corte) para a prova P4 pode ser observado na figura 6, que mostra em destaque (em amarelo) a região de inclusões líquidas na temperatura de trabalho de aço.

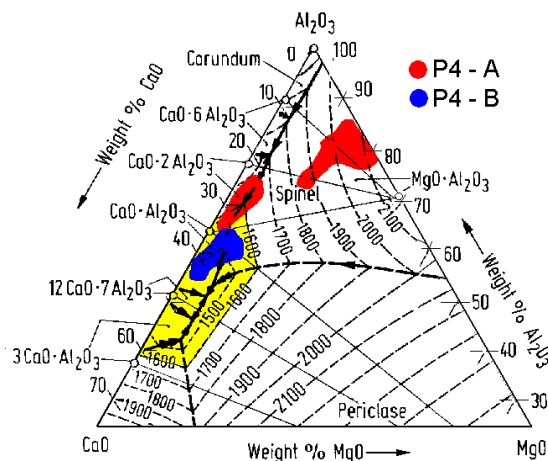


Figura 6 - Diagrama ternário do sistema CaO - Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> - MgO (Slag Atlas, 1995) para a prova P4.

À medida que avança o processo, observa-se um enriquecimento em MgO nas inclusões. O incremento de MgO pode estar associado a dois fatores: interação do aço com a escória da panela e reação do aço com os materiais refratários da panela (Cicutti *et al.*, 2003).

Pode-se observar que, a princípio, a quantidade de cálcio adicionado não foi suficiente para modificar a composição de todas as inclusões até a região do cálcio-aluminato de baixo ponto de fusão ( $12\text{CaO}7\text{Al}_2\text{O}_3$ ). Um fato relevante é que não ocorreram problemas de lingotabilidade nas duas corridas. Outro fato é a pequena população de inclusões medida neste estágio do processo.

Atualmente, existe uma forte demanda por aços para construção mecânica de usinabilidade melhorada, como o SAE 8620 por exemplo. Esses aços contêm teores de enxofre, por exemplo, entre 0,030-0,040%, mais altos do que o "normal" (por exemplo, 0,010-0,015%). Esses aços são cada vez mais desoxidados com Al, para garantir uma baixa população de inclusões no produto final e, conseqüentemente, melhores propriedades mecânicas. No entanto, as aciarias enfrentam diversos problemas em relação a lingotabilidade desses aços. O controle dos teores de Al, Ca, S e O passa a ser crítico, pois um teor baixo de cálcio, por exemplo, implica em problemas de "clogging" por inclusões de  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . Altos teores de cálcio podem implicar em problemas de "clogging" pela formação de inclusões de CaS (Bielefeldt *et al.*, 2005). Por isso a necessidade de ferramentas que possam estudar a influência da temperatura e composição do aço de forma rápida e precisa.

### 3.3 Estudo termodinâmico

Foram realizadas simulações utilizando como dados de entrada: a composição química e a temperatura do aço na prova P4 para as corridas A e B. As figuras 7 e 8 mostram gráficos comparando os resultados da média e seu desvio-padrão (barras verticais) das análises de MEV/EDS das inclusões com os resultados obtidos via simulação termodinâmica.

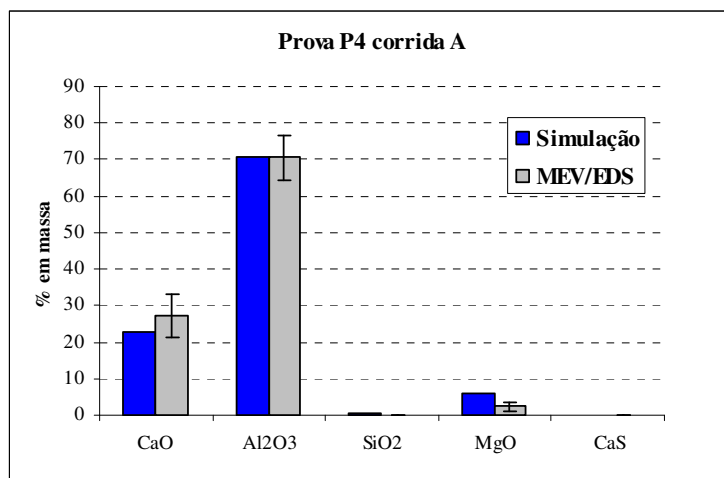


Figura 7 - Resultados de MEV/EDS e simulação para a prova P4 corrida A.

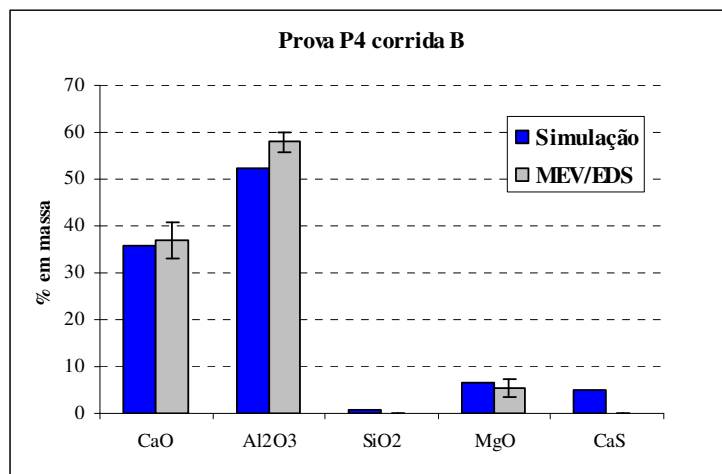


Figura 8 - Resultados de MEV/EDS e simulação para a prova P4 corrida B.

As figuras 7 e 8 mostram que os resultados encontrados na análise via MEV/EDS e os simulados via FactSage concordam entre si. Desta forma, para o aço SAE 8620 é possível prever em que condições de composição química e temperatura se formarão inclusões que não sejam prejudiciais aos processos de produção em aciaria e posterior conformação do aço.

#### 4. Conclusões

Nas duas corridas, em todas as provas, a forma predominante das inclusões é a esférica e o tamanho médio está na faixa de 4 a 10  $\mu\text{m}$ .

Pode-se observar o efeito do refino no forno-panela ao longo das provas na limpeza interna do aço, pois a área ocupada pelas inclusões diminui significativamente.

A análise via MO e de oxigênio total são técnicas complementares, enquanto a primeira contempla a determinação do tamanho médio e do número de inclusões, que são medidas úteis no estudo de inclusões, a segunda pode fornecer com maior precisão a fração de inclusões de óxidos no banho. As inclusões da prova P1 são produtos de desoxidação formados no sistema  $\text{MnO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$  devido a reações com as ligas adicionadas no vazamento.

As inclusões das provas P2 e P3 são provenientes da interação entre a escória da panela e o banho metálico formadas no sistema ternário  $\text{CaO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ .

As inclusões da prova P4 são formadas no sistema ternário  $\text{CaO-Al}_2\text{O}_3\text{-MgO}$ . Embora parte das inclusões estejam afastadas da região do cálcio-aluminato líquido, problemas de lingotabilidade não foram registrados. O controle dos teores de Al, Ca, S e O passa a ser crítico, pois um teor baixo de cálcio, por exemplo, implica em problemas de "clogging" por inclusões de  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . Altos teores de cálcio podem implicar em problemas de "clogging" pela formação de inclusões de CaS.

A partir dos resultados obtidos neste trabalho e de outros que estão sendo realizados, somado ao desenvolvimento de modelo termodinâmico via software FactSage para estudar o comportamento das

inclusões no refino secundário, modificações no processo podem ser implementadas para a melhoria dos processos de refino dos aços.

## 5. Referências

BALE, C.W. *et al.* 2002. FactSage Thermochemical Software and Databases. *Calphad*, **26**:189-228.

BESKOW, K. *et al.* 2002. Chemical Characteristics of Inclusions Formed at Various Stages During the Ladle Treatment of Steel. *Ironmaking and Steelmaking*, vol. 29, nº 6, p. 427-435.

CICUTTI, C.; MADIAS, J. e GONZALEZ, J. 1997. Control of Microinclusions in Calcium- Treated, Aluminum-Killed Steels. *Ironmaking and Steelmaking*, **24**(2):155-159.

CICUTTI, C. *et al.* 2003. Evolución de las Inclusiones y la Composición de la Escoria a lo Largo del Proceso en Tenaris-Tamsa. 14<sup>th</sup> IAS Steelmaking Conference, Argentina.

CHOUDHARY, S.K. *et al.* 2002. Thermodynamic Model for Deoxidation and Inclusion Precipitation in Liquid Steel. *Tata Search*, p. 95-102.

CRAMB, A.W. 1997. High Purity, Low Residual and Clean Steels. *Continuous Casting of Steel Billets, Blooms and Slabs*, p. 1-43.

ERIKSSON, G. e PELTON, A.D. 1993. Critical Evaluation and Optimisation of the Thermodynamic Properties and Phase Diagrams of the CaO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub> and CaO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub> Systems. *Metallurgical and Materials Transaction B*, **24B**:807-816.

FAULRING, G. 1999. Inclusions Modifications in Semi-Killed Steels. *Ironmaking and Steelmaking*, Feature:29-36.

HAN, Z.J.; LIU, L.; LIND, M. e HOLAPPA, L. 2006. Mechanism and Kinetics of Transformation of Alumina Inclusions by Calcium Treatment. *Acta Metallurgica Sinica (English Letters)*, **19**(1):1-8.

HOLLAPA, L.E.K. e HELLE, A.S. 1995. Inclusion Control in High-Performance Steels. *Journal of Materials Processing Technology*, **53**:177-186.

JUNG, IN-HO *et al.* 2004a. Computer Applications of Thermodynamic Databases to Inclusion Engineering. *ISIJ International*, **44**(3):527-536.

JUNG, IN-HO *et al.* 2004b. A Thermodynamic Model for Desoxidation Equilibria in Steel. *Metallurgical and Materials Transaction B*, **35B**:493-507.

Kang, Y-B. *et al.* 2006. Thermodynamic of Inclusions Engineering in Steelmaking and Refining. *Iron Steel Technology*, **??**:154-162.

MORAES C.A.M.; BIELEFELDT, W.V.; FONTANA, W.A.; DUTRA, L.; DUTRA, C.R.; MARCON, L. e VILELA, A.C.F. 2006. Caracterização de Inclusões de Diferentes Aços Laminados via Microscopia Ótica e MEV. 61º Congresso Anual da ABM.

SILVA, A.C. 2002. Refino dos Aços - Avanços e Perspectivas. Simpósio Aços: Perspectivas para os próximos 10 anos, p. 55-62, Rio de Janeiro.

SILVA, A.C. 2006. Thermodynamic aspects of inclusion engineering in steels. *Rare Metals*, **25**(5):412-419.

Slag Atlas. 1995. 2ª ed., Verlag Stahleisen, Düsseldorf.

VELAZQUEZ, V.H.; ORTEGA, L.; BIELEFELDT, W.V.; MORAES, C.A.M.; VILELA, A.C.F. e SOARES, R.B. 2002. Caracterização de Inclusões Formadas Durante o Processo de Fabricação de Aço. Sulmat 2002 - Congresso em Ciência de Materiais do Mercosul; p. 467-475; UDESC Joinville - SC.

ZHANG, L.; THOMAS, B. 2003. State of the Art in Evaluation and Control of Steel Cleanliness. *ISIJ International*, vol. 43, nº 3, p. 271-291.

ZHANG, L. 2006. Indirect Methods of Detecting and Evaluating Inclusions in Steel – A Review. *Journal of Iron and Steel Research, International*, **13**(4):356-363.