

PERFIL INCLUSIONÁRIO DURANTE A FABRICAÇÃO DE AÇOS CLEAN STEEL¹

Ana Caroline Kohler²
Wagner Viana Bielefeldt³
Paulo Leal⁴
Carlos Alberto Mendes Moraes⁵
Rodrigo Belloc Soares⁶
Antônio Cezar Faria Vilela⁷

Resumo

A tendência mundial da siderurgia é fabricar aços especiais cada vez mais limpos, de forma a garantir um alto nível de qualidade do produto e, conseqüentemente, melhores características mecânicas dos componentes fabricados a partir deste. A redução da quantidade e do tamanho das inclusões têm sido o grande foco do processamento destes aços. Este trabalho tem como objetivo apresentar os resultados obtidos no estudo de algumas características do processo de refino na aciaria para obtenção de aços mais limpos. Foi avaliado um aço 0,19%C - 0,21% Si - 1,1% Mn - 0,025% S - 0,025% Al - 0,020% P. Foram realizadas análises por Microscopia Ótica (MO), MEV/EDS, ensaio de ultra-som por imersão, oxigênio total e ativo. Foram analisadas amostras retiradas durante o refino secundário (forno-panela e degaseificador a vácuo), no distribuidor de lingotamento contínuo e de barras laminadas. Os resultados de análise via MO e MEV mostram de forma clara a evolução da composição química e distribuição das inclusões ao longo do processo. O MO mostra que inclusões maiores do que 10 µm foram praticamente eliminadas no distribuidor. Na análise de ultra-som por imersão, pode-se observar a melhoria da sanidade interna das barras. Como conclusão geral, deve-se destacar o aumento no nível de limpeza interna do aço, que teve a quantidade e tamanho de inclusões reduzidas ao nível de produtos extremamente competitivos.

Palavras-chave: Clean steel; Inclusões não-metálicas; MO; MEV; Ultra-som.

INCLUSIONARY PROFILE DURING CLEAN STEELMAKING

Abstract

The worldwide tendency is to produce cleaner special steels, to guarantee a high level product quality and consequently, better mechanical characteristics of the components manufactured from these steels. The reduction of the inclusion amount and size has been the great focus of these steels processing. The objective of this work is to present the results obtained from study of some characteristics in the refining process in the steel mill to produce clean steels. A steel was evaluated: 0,19%C - 0,21% Si - 1,1% Mn - 0,025% S - 0,025% Al - 0,020% P. Were carried out analyses by Optical Microscopy (OM), SEM/EDS, ultra-sound immersion, total and active oxygen. Samples were collected during the secondary refining (ladle furnace and vacuum degassing), continuous casting tundish and rolling mill bars. The OM and SEM results clearly show the evolution of the chemical composition and distribution of the inclusions along the process. The OM shows which inclusions bigger than 10 µm were fully eliminated in the tundish. In the ultra-sound analysis, it was possible to see the improvement of the internal quality in the bars. As a general conclusion, the increment of the steel cleanliness may be emphasized. This steel had the amount and size of the inclusions minimized at the level of extremely competitive products.

Key words: Clean steel; Non-metallic inclusions; OM; SEM; Ultra-sound.

¹ Trabalho apresentado no XXXVII Seminário de Aciaria - Internacional, 21 a 24 de maio de 2006, Porto Alegre, RS

² Eng. Mestranda do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e dos Materiais/PPGEM – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, anakohler@ig.com.br

³ Mestre em Engenharia e doutorando do PPGEM/UFRGS, wagner@ct.ufrgs.br

⁴ Eng. PL Tecnologia, pltec@terra.com.br

⁵ Prof. Dr. Curso de Engenharia Mecânica – Núcleo de Caracterização de Materiais – Universidade do Vale do Rio dos Sinos, cmoraes@unisinos.br

⁶ Gerente de Desenvolvimento Tecnológico da Gerdau Aços Especiais Piratini, rodrigo.soares@gerdau.com.br

⁷ Prof. Dr. Ing. DEMET/PPGEM – Centro de Tecnologia (Laboratório de Siderurgia)/UFRGS, vilela@ufrgs.br

1 INTRODUÇÃO

A tendência mundial da siderurgia é fabricar aços especiais cada vez mais limpos, de forma a garantir um alto nível de qualidade do produto e, conseqüentemente, melhores características mecânicas dos componentes fabricados a partir deste. A redução da quantidade e do tamanho das inclusões têm sido o grande foco do processamento destes aços.

A tecnologia de fabricação do aço teve um grande avanço durante os últimos 25 anos, resultando em notável redução das impurezas no aço. 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.⁽¹⁾ Esses requisitos especiais são obtidos na chamada engenharia de inclusões, ou seja, no controle de processos de modo a obter inclusões adequadas à aplicação prevista para o aço.⁽²⁾

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⁽³⁾ 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.

Outro aspecto é com relação à vida em fadiga. Alguns componentes automotivos podem sofrer fadiga devido a esforços cíclicos. As inclusões não metálicas podem ser nucleadoras de trincas e levar o componente ao colapso.⁽⁴⁾

O foco deste trabalho são os aços limpos, com relação ao sistema inclusionário de óxidos. Por isso, é importante compreender os mecanismos de formação de inclusões durante o processo de elaboração do aço na aciaria. Para tanto, a utilização de somente um tipo de medida não fornece todas as informações necessárias para esse entendimento. O uso combinado de técnicas, cada uma compensando as limitações da outra, é uma saída viável.⁽⁵⁾

Este trabalho tem como objetivo apresentar o desenvolvimento de aços limpos, que sofreram otimizações no processo de refino na aciaria para obtenção de qualidade superior.

2 PROCESSO DE ELABORAÇÃO NA GERDAU - AÇOS ESPECIAIS PIRATINI

A Aços Especiais Piratini (AEP), siderúrgica do Grupo Gerdau, produz aços longos especiais destinados, principalmente, à indústria automotiva. Sua planta industrial está localizada no município de Charqueadas, no estado do Rio Grande do Sul, distante aproximadamente 55 quilômetros da capital Porto Alegre.

A aciaria é composta de: forno elétrico a arco (FEA)(65t), forno-panela (FP)(65t), sistema de desgaseificação do tipo tanque VD (VD - desgaseificação a vácuo), lingotamento contínuo (LC) de três veios de tarugos de seção quadrada (150, 180 e 240 mm) e lingotamento convencional (lingoteiras de dimensões especiais). Atualmente, 95% da produção de aço da AEP passa pelo LC.

As laminações da AEP têm capacidade de produzir barras quadradas (50,80 a 127,00 mm), redondas (15,88 a 152,40 mm) e fio-máquina (5,50 a 30,16 mm).

A AEP possui capacidade de produção ao redor de 500.000 t/ano.

3 CARACTERÍSTICAS CRÍTICAS NO PROCESSAMENTO DO AÇO EM ESTUDO

Foi objeto de estudo uma determinada qualidade de aço utilizada pela indústria automobilística na produção de autopeças para veículos pesados. Existem características que tornam esse tipo de aço complexo do ponto de vista de elaboração. As características estudadas neste trabalho foram separadas em processo e produto.

Características de Processo

- Necessidade de desgaseificação (baixo hidrogênio).
- Alta probabilidade de reoxidação (Al alto e Ototal controlado).
- Difícil lingotabilidade (problemas de *clogging*).

Aços especiais devem ter baixos níveis de hidrogênio para evitar a formação de trincas induzidas por hidrogênio e flocos, por isso é importante garantir uma boa operação de vácuo. Por outro lado, a reoxidação do aço deve ser evitada ao máximo, utilizando medidas para isolar o aço do contato com a atmosfera e minimizar a presença de óxidos instáveis na escória (FeO, MnO). Ambas as operações dependem da viscosidade da escória da panela. A viscosidade por sua vez é relacionada com a composição química da escória. A composição da escória foi modificada de forma tal que garantisse uma maior absorção de inclusões, sem causar exposição do aço na rinsagem.

Com relação à lingotabilidade, muitos estudos têm tido foco na flotação de inclusões e no tratamento de inclusões com cálcio.

Durante o período de flotação de inclusões, segundo Dekkers,⁽⁶⁾ os clusters de inclusões de alumina formados são praticamente eliminados nos primeiros 10 minutos após a adição de Al. Após esse período, aumenta o tamanho médio de outras morfologias de inclusões de alumina. Dekkers também observa que deve existir um meio termo entre o tempo para eliminação dos clusters (que representam cerca de 90% do volume de inclusões) e o tempo para evitar o crescimento de outros tipos de inclusões. Neste trabalho, também foi dada atenção à otimização da flotação de inclusões.

Outro aspecto importante é com relação à composição química das inclusões. Atualmente, existe uma forte demanda por aços para construção mecânica de usinabilidade melhorada. Esses aços contêm teores de enxofre, por exemplo, entre 0,030-0,040%, mais altos do que o normalmente praticado (por exemplo, 0,010-0,015%). Esses aços são cada vez mais desoxidados com Al, para garantir tamanho de grão apropriado no produto final e, conseqüentemente, melhores propriedades mecânicas. No entanto, as aciarias enfrentam diversos problemas em relação à 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 Al₂O₃. Altos teores de cálcio, por sua vez, podem implicar em problemas de *clogging* pela formação de inclusões de Cãs.⁽⁸⁾

Torna-se importante prever a composição das inclusões formadas no equilíbrio do sistema. Calcular o equilíbrio químico das reações entre Al, Ca, S e O é tarefa complexa, por isto programas computacionais que resolvam tais cálculos são poderosas ferramentas. O modelamento do processo por meio de cálculos termodinâmicos torna possível tanto otimizar processos já conhecidos como simular novos processos e desenvolvimento de novas ligas.⁽⁷⁾ Como um exemplo disso, é possível determinar os teores máximos de Al e Ca para a formação de inclusões de fase líquida predominante sem a formação de CaS. Bielefeldt e colaboradores,⁽⁸⁾

reproduziram, via *software FactSage*, resultados obtidos por Holappa e colaboradores.⁽⁹⁾ Foi calculada a “janela líquida”, em um aço 0,35% C - 0,50% Mn - 0,25% Si - 0,025% S. Na Figura 1, os resultados para um teor de oxigênio total de 10, 20 e 40 ppm combinado com um nível de enxofre de 250 ppm são mostrados. Fixando, por exemplo, $O_{total} = 20$ ppm, a curva inferior mostra que, acima dela, as inclusões começam a ter um teor de CaO próximo à região líquida do diagrama binário Al_2O_3 -CaO. Ou seja, é a linha de saturação dos cálcio-aluminatos ($CaO \cdot Al_2O_3$, $CaO \cdot 2Al_2O_3$). A curva superior mostra que, acima desta curva, as inclusões tendem a ficar cada vez mais ricas em CaS, sem modificação da composição dos cálcio-aluminatos. Ou seja, é a linha de saturação de CaS. De maneira análoga, delimitam-se as janelas líquidas para os teores de oxigênio de 40 e 10 ppm.^(8,9)

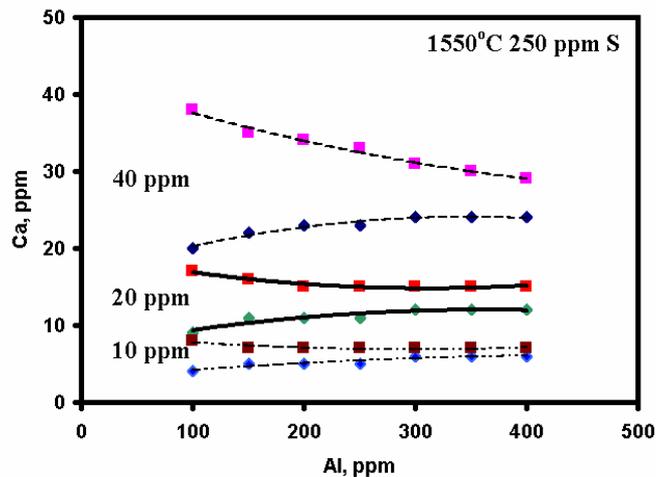


Figura 1. Efeito do oxigênio na “janela líquida” para teor de enxofre de 250 ppm a 1550°C, simulado via FactSage,⁽⁸⁾ a partir de resultados de Holappa et al.⁽⁹⁾

É possível analisar inclusões não-metálicas quanto ao seu tamanho, quantidade, morfologia e composição química, durante todas as etapas do processo de fabricação do aço.⁽¹⁰⁾ Zhang e Thomas⁽¹¹⁾ relatam em seu trabalho diversos métodos de análises e os classificam em métodos diretos e indiretos. Não existe um método específico que possa ser empregado isoladamente para avaliar a limpeza inclusionária de um aço, pois cada método de análise possui características peculiares. Uma boa alternativa é usar, de maneira combinada, diferentes métodos de análise.

Características de Produto

- Controle inclusionário - Ultra-som de imersão.

O controle inclusionário por ultra-som é largamente utilizado. A detecção de inclusões por ultra-som é baseada na diferença de propriedades acústicas entre a matriz de aço e descontinuidades da estrutura metálica. O tamanho crítico do defeito a ser detectado depende da configuração do equipamento. É consenso que com o passar do tempo, esse tamanho crítico tem diminuído, devido ao aumento de exigência de qualidade por parte da indústria. A maior vantagem é que grandes volumes podem ser analisados, quando comparado com outros métodos. O desenvolvimento de equipamentos de frequência entre 10-100 MHz tornou possível a detecção de defeitos menores do que 100 μ m de espessura. Cuidados devem ser observados, pois o teste é extremamente dependente da qualidade superficial e da homogeneidade estrutural da amostra.⁽⁴⁾

A vida de componentes mecânicos, quando submetidos predominantemente a esforços de fadiga, é inversamente proporcional ao tamanho das inclusões. Isso pode ser visto na Figura 2, onde se observa forte queda na vida em fadiga em tamanhos acima de 20 μm , servindo de base para o estudo em questão. A região marcada (acima e a esquerda) representa corridas com melhorias na elaboração dos aços.⁽⁴⁾

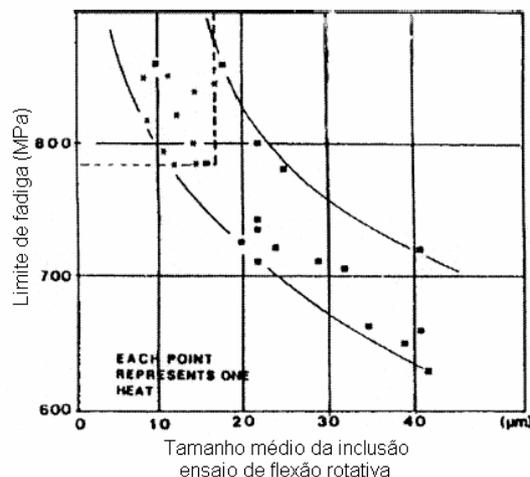


Figura 2. Relação entre o tamanho da inclusão e o limite de fadiga do material.⁽⁴⁾

4 CONDIÇÕES EXPERIMENTAIS - AMOSTRAGEM

Foram analisadas amostras de diversas corridas, seguindo a rota de produção FEA-FP-VD-LC. A Tabela 1 mostra a faixa de composição química do aço estudado.

Tabela 1. Composição química do aço CS18 em %.

	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Al	Sn	Cu
Min.	0,18	0,15	0,90		0,017	0,35		0,10	0,020		
Max.	0,23	0,35	1,30	0,025	0,040	0,70	0,15	0,20	0,045	0,030	0,25

A seqüência de amostragem está descrita na Tabela 2.

Tabela 2. Amostragem durante as diferentes etapas do processo.

Amostra	Descrição
1FP	Início processo forno-panela
2FP	Final processo forno-panela
PVD	Após desgaseificação a vácuo
PCaSi	Após a adição de Al e CaSi, saída da panela para o LC.
PF	Distribuidor - 50% da corrida lingotada
Barra	Laminação de barras redondas

Utilizou-se para a retirada de amostras de aço na panela e distribuidor um amostrador apropriado (tipo "lollipop") disponível no mercado, constituído de coquilha selada a vácuo em cartucho. O tipo de amostrador utilizado não contém desoxidante, para evitar a modificação das inclusões.

Os resultados foram avaliados através de técnicas de análise combinadas. Foram realizadas análises por:

- Microscopia Eletrônica de Varredura e Microanálise (MEV/EDS): Utilizou-se um aparelho JEOL-JSM 5800 analisando-se praticamente a mesma área do

microscópio ótico (MO). Foi utilizado procedimento padrão realizado em outros trabalhos.^(5,12) Os resultados da análise elementar de cada inclusão foram convertidos para os óxidos mais estáveis (Ca em CaO, Al em Al₂O₃, e assim por diante). Foram feitos cálculos de média e desvio-padrão para cada amostra. A composição de cada inclusão foi ainda inserida em um diagrama ternário ou pseudoternário (uma quarta fase de valor fixo), conforme procedimento adotado em outros trabalhos.⁽¹²⁾

- Microscopia Ótica (MO): Foi usado um Microscópio Union Versamet 2. A magnitude adotada foi de 300x. A área analisada foi cerca de 50 mm² dividida em 106 campos. Como o objetivo era avaliar o tamanho dos óxidos, as inclusões também foram classificadas nas faixas de tamanho: <4µm, 4-10µm, 10-20µm, 20-50µm e >50µm.

- Ultra-som por imersão: Foi utilizado um equipamento de ultra-som automático (fabricante Krautkrämer), que inspeciona amostras pelo método de imersão em água. Este método é mais preciso, pois como o corpo de prova fica fixo, não há variação na onda sônica, e o acoplamento é homogêneo. Trabalhou-se com transdutor normal (ondas retas) de ondas longitudinais. O transdutor de inspeção (10MHz) emite ondas sônicas e também as recebe, ou seja, é um cabeçote mono cristal. Em geral as amostras de barras apresentam diâmetro de 15 mm até no máximo 80 mm por questões de metodologia, e o comprimento adotado é de no máximo 500 mm, por questões de limitação de equipamento. O índice de medida utilizado foi o de severidade, que é calculada pela fórmula: comprimento total de todas indicações da barra (em mm) dividido pelo volume inspecionado em dm³.⁽¹²⁾

- Oxigênio total: As análises de oxigênio total foram realizadas no Determinador Simultâneo de Nitrogênio e Oxigênio, marca LECO, modelo TC-436.

- Oxigênio ativo: A análise de oxigênio ativo foi feita utilizando medidores do fabricante Heraeus Electro-Nite, modelo CELOX.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados foram divididos de acordo com a técnica utilizada.

5.1 Resultados de MEV/EDS

A Tabela 3 relaciona a composição química das inclusões durante o processo. Resultados calculados após a escolha dos sistemas ternários.

Tabela 3. Composição das inclusões ao longo das provas.

Prova	Al ₂ O ₃		MgO		CaO		SiO ₂		MnO		Sistema ternário
	M	D	M	D	M	D	M	D	M	D	
1FP	11,9	7,5	-	-	-	-	40,1	6,5	48,0	8,9	MnO-A-S
2FP	34,3	13,0	10,0	-	12,1	6,0	43,7	13,9	-	-	C-A-S 10% MgO fixo
PVD	36,1	21,3	10,0	-	28,8	12,8	25,1	18,8	-	-	C-A-S 10% MgO fixo
PCaSi	64,9	7,8	8,1	6,4	27,0	12,9	-	-	-	-	C-A-MgO
PF	66,5	7,8	7,8	6,7	-	-	25,7	12,5	-	-	C-A-MgO

M = média; D = desvio-padrão. C = CaO; A = Al₂O₃; S = SiO₂.

As inclusões da prova 1FP enquadraram-se no sistema MnO-Al₂O₃-SiO₂. Procurou-se ajustar a composição do aço para a região da espessartita (3MnO-Al₂O₃-3SiO₂ contendo 43% MnO, 20,6% Al₂O₃ e 36,4% SiO₂). Essa região é a mais favorável, segundo Choudhary e colaboradores.⁽¹⁴⁾

As inclusões das provas 2FP e PVD mudaram para o sistema $\text{CaO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ incluindo 10% de MgO fixo, devido à interação aço-escória durante o processo no forno-painel. Da prova 2FP para a prova PVD, aumentou o teor de MgO e diminuiu o de SiO_2 nas inclusões, o que pode ser explicado pela interação da escória com o aço líquido, principalmente durante a vigorosa agitação sob vácuo. Na prova PVD, o desvio-padrão mais elevado pode estar associado ao fato da retirada da amostra realizar-se logo após a etapa de desgaseificação, onde o banho de aço pode estar não totalmente homogêneo.

Após as adições de Al e CaSi, a composição das inclusões é modificada para o sistema $\text{CaO-Al}_2\text{O}_3\text{-MgO}$ na prova PCaSi.

No presente estudo, o diagrama que melhor representa a composição das inclusões da prova PF (distribuidor) é o sistema $\text{CaO-Al}_2\text{O}_3\text{-MgO}$. O diagrama foi obtido do Slag Atlas,⁽¹⁵⁾ e pode ser observado na Figura 3 com as inclusões plotadas.

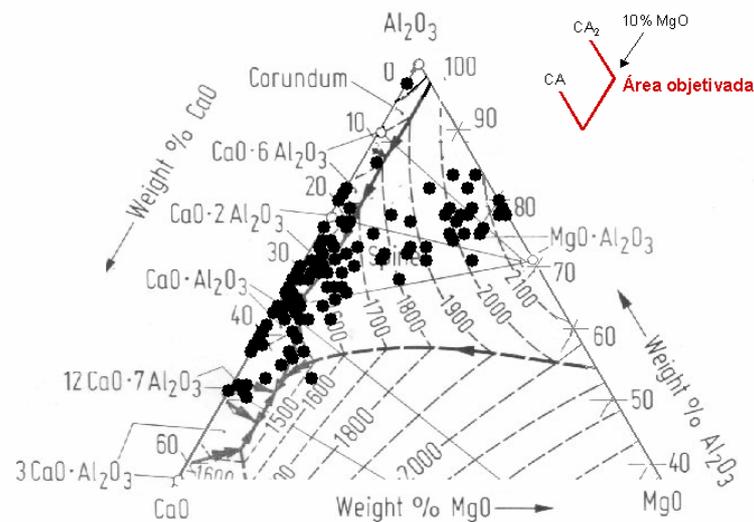


Figura 3. Diagrama ternário $\text{CaO} - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{MgO}$ para a prova PF.

Devido ao teor de enxofre desse aço, a composição desejada das inclusões situa-se entre CA_6 e CA ($\text{C} = \text{CaO}$, $\text{A} = \text{Al}_2\text{O}_3$). O teor de MgO deve ser no máximo de 10%. O teor de enxofre nas inclusões analisadas foi baixo, indicativo do baixo teor de CaS. As corridas analisadas se situaram entre as janelas para 10 e 20 ppm da Figura 1, com teor de cálcio entre 5 e 10 ppm e Al entre 200 e 300 ppm.

5.2 Resultados de Microscopia Ótica (MO)

A Tabela 4 mostra os resultados da média do número de inclusões / mm^2 para as corridas analisadas.

Tabela 4. Distribuição média das inclusões por faixas de tamanho ao longo das provas.

		Faixas de tamanho (μm)				
		0 - 4	4 - 10	10 - 20	20 - 50	>50
Prova	1FP	3,99	1,42	0,28	0,10	0,05
	2FP	3,55	0,69	0,08	0,03	-
	PVD	2,4	0,14	0,04	0,01	-
	PCaSi	0,99	0,06	0,04	0,02	-
	PF	2,37	0,17	0,02	-	-
	Barra	2,10	0,54	0,01	-	-
		Inclusões/ mm^2				

Pode-se observar uma redução gradual do número de inclusões maiores do que $10\mu\text{m}$ ao longo das provas na panela (1FP a PCaSi). Por outro lado, também existe um aumento do número de inclusões $<4\mu\text{m}$ da panela (PCaSi) para o distribuidor (PF). Essa tendência também foi observada por Miki e Thomas.⁽¹⁶⁾ Isso pode estar associado a pequena reoxidação, sendo objeto atual de desenvolvimento.

5.3 Resultados de Ultra-som Via UPR-4 para Barras

A Figura 4 mostra a evolução dos resultados de severidade para quatro corridas analisadas.

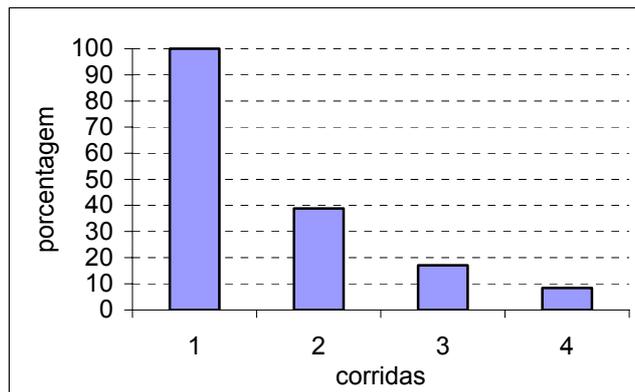


Figura 4. Resultados de severidade para as corridas enviadas.

Considerando a corrida 1 partindo de 100%, os resultados mostram uma redução significativa dos índices de severidade ao longo das corridas, mostrando claramente a efetividade das ações de melhoria tomadas para a obtenção de aço com grau de *clean steel*. Pode-se observar também que os resultados ficam mais estáveis nos últimos testes, corridas 3 e 4.

5.4 Resultados de Oxigênio Total e Ativo

A Figura 5 mostra a média e desvio-padrão das análises de oxigênio total e ativo ao longo das provas.

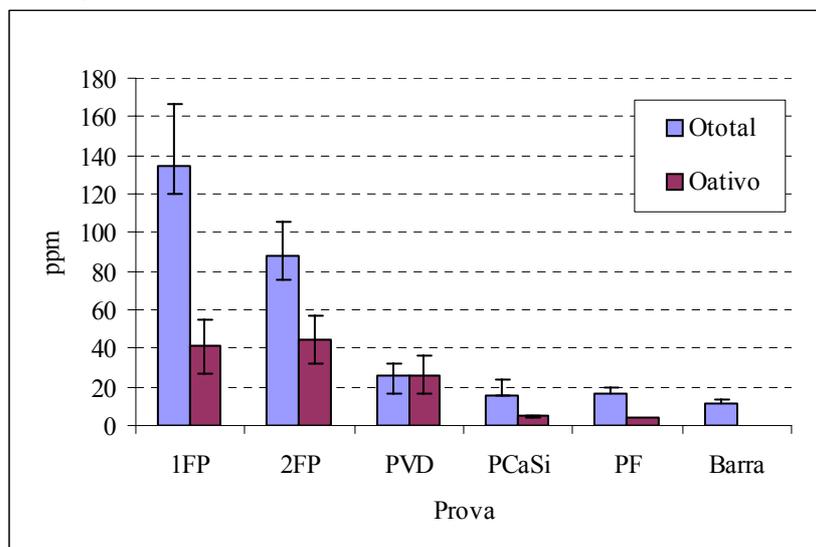


Figura 5. Evolução do Ototal e Oativo ao longo das provas.

O teor de Ototal cai de forma acentuada ao longo do processo. No distribuidor, obteve-se valores entre 14 e 20 ppm (média de 17 ppm). Entre a última amostra na panela (PCaSi) e a amostra do distribuidor (PF) houve um incremento de 0,5 ppm. Nas amostras de barra, o teor de oxigênio total médio foi de 11,8 ppm.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados de análise via MO e MEV/EDS mostram de forma clara a evolução da composição química e distribuição das inclusões ao longo do processo.

Na análise de ultra-som por imersão, pode-se observar a melhoria da sanidade interna das barras.

É importante salientar que as análises via MEV/EDS e MO são mais adequadas para micro-inclusões e a análise via ultra-som é mais adequada para macro-inclusões. A combinação das técnicas torna-se fundamental para o completo entendimento dos fenômenos estudados, e um melhor controle do processo de fabricação de aços limpos.

Uma ressalva deve ser dada na análise de ultra-som, pois essa técnica pode captar não somente macro-inclusões como também inclusões menores que foram alongadas na laminação. Essas inclusões podem ter grandes comprimentos por indicação, ou seja, severidade alta.

Em um cenário no qual se analisa a influência de partes por milhão de elementos de liga, a termodinâmica computacional é uma ferramenta poderosa. Os resultados do uso do *software FactSage* para esse e outros aços serão publicados em trabalhos posteriores.

Como conclusão geral, deve-se destacar o aumento no nível de limpeza interna do aço, que teve a quantidade e tamanho de inclusões reduzidas ao nível de produtos extremamente competitivos.

Agradecimentos

A Gerdau Aços Especiais Piratini, LASID/UFRGS e NUCMAT/UNISINOS enaltecem a importante parceria estabelecida ao longo dos anos entre estas entidades para o desenvolvimento de conhecimento tecnológico em siderurgia.

REFERÊNCIAS

- 1 Holappa, L.; Helle, A. S. Inclusion control in high-performance steels. *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 53, p. 177-186, 1995.
- 2 Silva, A. C. Refino dos Aços - Avanços e Perspectivas. In: *Simpósio Aços: Perspectivas para os próximos 10 anos*, p. 55-62, Rio de Janeiro, 2002.
- 3 Cramb, A. W. High Purity, Low Residual and Clean Steels. In: *Impurities in Engineering Materials*. Marcel Dekker: New York, NY. p. 49-91. 1999.
- 4 Atkinson, H. V.; Shi, G. Characterization of inclusions in clean steels: a review including the statistics of extremes methods. *Progress in Materials Science* 48 (2003), p. 457 - 520.
- 5 Marcon L. et al. Uso de diferentes técnicas para caracterização de inclusões não-metálicas em aços. 15th IAS Steelmaking Conference, p. 707-714, San Nicolas, Argentina, 2005.
- 6 Dekkers, R. et al. Non-metallic inclusions in aluminium killed steels. *Ironmaking and Steelmaking*. v. 29, n. 6, p. 437-444, 2002.

- 7 Moraes, C. A. M. et al. Análise Termodinâmica das Interfaces Metal-Escória e Metal-Inclusões na Produção do Aço - Utilização de Modelo Termodinâmico Computacional e sua Combinação com Modelos de Escoamento. In: 57º Congresso Anual da ABM - Internacional, São Paulo, p. 348-358, julho de 2002.
- 8 Bielefeldt, W. V. et al. Estudo de inclusões no tratamento com cálcio utilizando termodinâmica computacional. 60º Congresso Anual da ABM - Internacional, Belo Horizonte, 25 a 28 de julho de 2005.
- 9 Holappa, L. et al; Thermodynamic Examination on Inclusion Modification and Precipitation from Calcium Treatment to Solidified Steel. Ironmaking and Steelmaking, vol. 30, nº 2, p. 111-115, 2003.
- 10 Beskow, K. et al. Chemical characteristics of inclusions formed at various stages during the ladle treatment of steel. Ironmaking and Steelmaking, vol. 29, nº 6, p. 427-435, 2002.
- 11 Zhang, L.; Thomas, B. G. State of the art in evaluation and control of steel cleanliness. ISIJ International, vol. 43, nº 3, p. 271-291, 2003.
- 12 Bielefeldt, W. V. et al. Evolução das inclusões no processamento do aço SAE 8620 via aciaria elétrica. 59º Congresso Anual da ABM - Internacional, São Paulo, 19 a 22 de julho de 2004.
- 13 Rodrigo Silveira de Souza - Comunicação privada 09/01/2006.
- 14 Choudhary, S. K., Chandra S., Ghosh, A. Prediction of deoxidation and inclusion precipitation in semi-killed steel. Metallurgical and Materials Transactions B, vol. 36(1), p. 59-66, feb. 2005.
- 15 SLAG ATLAS., 2. ed. Düsseldorf: Verlag Stahleisen GmbH, 1995.
- 16 Miki, Y.; Thomas, B. G. Modeling of inclusion removal in a tundish. Metallurgical and Materials Transactions B, 1999, vol. 30B (4), p. 639-654.