

DESAFIOS PARA A OBTENÇÃO DE UM AÇO DE ELEVADA LIMPIDEZ¹

Milton P. Silva Junior²
Flávio Edmundo dos Anjos³
Leonardo Lopes de Oliveira Silva³
Eric Rafael dos Reis³
Paulo Santos Assis⁴

Resumo

A contribuição técnica mostra uma resenha bibliográfica sobre limpidez do aço, sobressaindo a questão do teor de oxigênio no aço, a formação de inclusões, o efeito dos processos de metalurgia primária e secundária nas inclusões, bem como metodologia de avaliação de inclusões. Apresenta alguns dados sobre o efeito de alguns parâmetros do convertedor de uma aciaria na escória e no teor de oxigênio dissolvido no banho. Discute e apresenta alguns dados sobre escória sintética, bem como o efeito de matérias-primas na qualidade do aço. Conclui pela importância do assunto, para a obtenção de aços com maior limpidez, bem como identifica áreas onde projetos de pesquisa e desenvolvimento poderiam ser levados a efeito através de equipes multi-disciplinares, envolvendo tanto a mão-de-obra de fábrica, quanto fornecedores de matérias-primas e insumos, institutos de pesquisa e de ensino e laboratórios

Palavras-chave: Aço limpo; Siderurgia; Inclusões; Escória sintética.

CHALLENGES FOR OBTAINING HIGH QUALITY STEEL

Abstract

This paper shows a review on steel cleanliness, pointing out the question of steel oxygen control, inclusions formation, effect of the steelmaking process in the inclusions, so the methodology of inclusions evaluation as well. It presents some data of the effect of some steel plant parameters on the slag and dissolved oxygen in the bath. It was discussed some data about the effect of slag so as raw materials on the steel quality. It concludes the importance of the subject for obtaining steel with high quality, so as identifies areas where multi knowledge group like the operators, raw materials suppliers, research and education, laboratories can work together to improve the steel quality.

Key words: Clean steel; Steelmaking; Inclusions; Synthetic slag.

¹ *Contribuição técnica ao XXXIX Seminário de Aciaria – Internacional, 12 a 16 de maio de 2008, Curitiba, PR, Brasil*

² *Engenheiro Metalurgista – Heraeus Electro-Nite*

³ *Aluno de graduação da Escola de Minas – UFOP*

⁴ *Professor Titular da Escola de Minas-UFOP; Pesquisador do CNPq; Prof. Honorário da Hebei Technology University - China*

1 INTRODUÇÃO

A demanda por aços com maior limpidez tem aumentado ano a ano. Limpidez é um fator muito importante para a qualidade do aço tendo em vista que a qualidade interna é função dos teores de elementos chave e controle das inclusões.

Dentro do contexto atual de fabricação de aços com requisitos de qualidade cada vez mais rigorosos, o problema de inclusões não metálicas constitui um serio item a ser controlado, uma vez que as inclusões podem causar esfoliações e trincas, que vão influir na qualidade superficial dos aços destinados a chapas e folhas finas e ruptura em aços destinados a trefilação.

Além das exigências de diminuição da quantidade de inclusões não metálicas e controle da sua distribuição de tamanho, morfologia e composição, são requeridas também controle do enxofre, fósforo, hidrogênio, nitrogênio e carbono. Estas exigências variam com o tipo de aço e sua aplicação, como mostra a Tabela 1.

Tabela 1 – Requisitos de Limpidez típicos para diferentes tipos de aço⁽¹⁾

Produto	Fração máxima de impurezas	Tamanho máximo da inclusão
Aço IF	[C] ≤ 30ppm, [N] ≤ 40ppm, T.O. ≤ 40ppm ⁽⁶⁾ [C] ≤ 10ppm ⁽⁷⁾ , [N] ≤ 50ppm ⁽⁸⁾	
Automotivo e Chapa estampagem profunda	[C] ≤ 30ppm, [N] ≤ 30ppm ⁽¹⁰⁾	100µm ^(9, 10)
Latas D&I	[C] ≤ 30ppm, [N] ≤ 30ppm, T.O. ≤ 20ppm ⁽¹⁰⁾	20µm ⁽¹⁰⁾
Aços ligados para vasos de pressão	[P] ≤ 70ppm ⁽¹¹⁾	
Barras de aço ligado	[H] ≤ 2ppm, [N] ≤ 10-20ppm, T.O. ≤ 10ppm ⁽¹²⁾	
Aço HIC (resistente à trinca induzida por hidrogênio)	[P] ≤ 50ppm, [S] ≤ 10ppm ^(11, 13)	
Aços para tubos	[S] ≤ 30ppm ⁽¹¹⁾ , [N] ≤ 35ppm, T.O. ≤ 30ppm ⁽¹²⁾ , [N] ≤ 35ppm ⁽⁸⁾	100µm ⁽¹⁰⁾
Aço para recozimento contínuo	[N] ≤ 20ppm ⁽¹¹⁾	
Chapa para soldagem	[H] ≤ 1,5ppm ⁽¹¹⁾	
Esferas para rolamentos	T.O. ≤ 10ppm ^(11, 14)	15µm ^(12, 14)
Aços para pneus (tire cord)	[H] ≤ 2ppm, [N] ≤ 40ppm, T.O. ≤ 15ppm ⁽¹²⁾	10µm ⁽¹²⁾ 20µm ⁽⁹⁾
Magnético GNO	[N] ≤ 30ppm ⁽⁸⁾	
Chapa grossa	[H] ≤ 2ppm, [N] ≤ 30-40ppm, T.O. ≤ 20ppm ⁽¹²⁾	Inclusão 13µm ⁽¹⁰⁾ Cluster 200µm ⁽¹⁰⁾
Arame (fio)	[N] ≤ 60ppm, T.O. ≤ 30ppm ⁽¹²⁾	20µm

A distribuição do tamanho das inclusões é particularmente importante, pois grandes inclusões são muito mais danosas às propriedades mecânicas do aço do que pequenas inclusões. Defeitos catastróficos podem ser causados por apenas uma única inclusão.

Devido a isso, o conceito de aço limpo (clean steel) envolve não somente o controle de porcentual de inclusões, mas também, evitar inclusões maiores que um tamanho crítico, o qual cause dano ao produto.

A importância da distribuição do tamanho das inclusões é mostrada na Figura 1, a qual ilustra a diminuição do teor de inclusões maiores que 30µm medida na panela e no distribuidor.

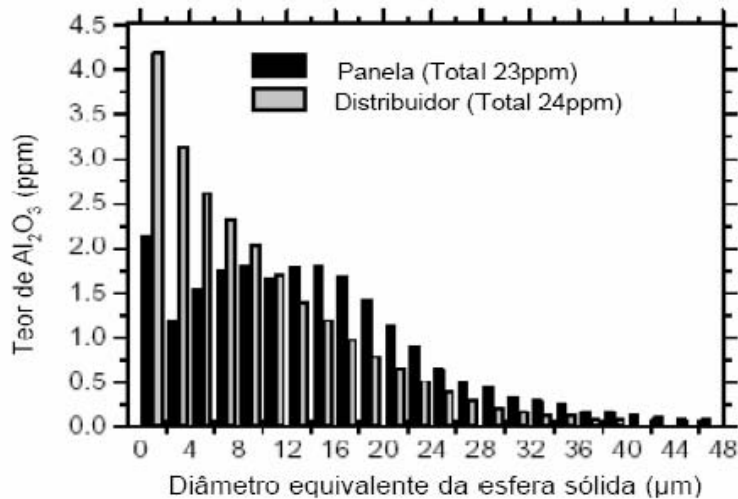


Figura 1 – Distribuição das inclusões de Al₂O₃ na panela e no distribuidor⁽¹⁾

O objetivo deste trabalho é realizar uma resenha, e mostrar alguns dados sobre a questão da limpidez do aço, focando os desafios atuais de tecnologias e processos de manufatura para a produção de um aço com alto grau de limpidez.

2 CONSIDERAÇÕES SOBRE INCLUSÕES

A inclusão é uma fase não metálica, geralmente sulfetos ou óxidos simples e complexos, podendo ser originadas ao longo de todo o processo de fabricação do aço líquido. Sua influência nas propriedades mecânicas será mais ou menos deletéria em função do tamanho, tipo e forma da inclusão.

As inclusões podem ser denominadas como endógenas (de origem em reações que ocorrem no interior do banho durante o tratamento de aço) e exógenas (oriundas de arraste de escória, pó fluxante ou de interação entre o metal e o refratário). Todas as inclusões identificadas na Tabela 2 são endógenas.

As inclusões exógenas geralmente possuem um tamanho maior que as endógenas, podendo ser visto a olho nu. A Tabela 3 apresenta as principais inclusões exógenas. As inclusões podem ter várias origens como, por exemplo, desoxidação, reoxidação, reação aço/escória, aquecimento químico e reações escória/refratário. Na Figura 2 mostra-se o processo de evolução das inclusões.

Tabela 2 – Tipo e forma da inclusão no produto laminado ⁽¹⁾

INCLUSÃO	FORMA NO PRODUTO LAMINADO
MnS	Alongada continuamente
SiO ₂	Alongada continuamente
Al ₂ O ₃	Inclusões dispersas não deformadas
CaS	Inclusões dispersas não deformadas
CaO. Al ₂ O ₃	Inclusões dispersas não deformadas

Tabela 3 – Principais inclusões exógenas ⁽¹⁾

INCLUSÃO	CARACTERÍSTICA/COMPOSIÇÃO QUÍMICA
Interação Metal-Refratário	MnO.SiO ₂ .Al ₂ O ₃ , com alinhamento de Al ₂ O ₃ em sua proximidade.
Escória	Teores elevados de CaO, SiO ₂ , MnO, Al ₂ O ₃ , presença de MgO
Pó Fluxante	Teores elevados de CaO e SiO ₂ , presença de sódio e potássio.

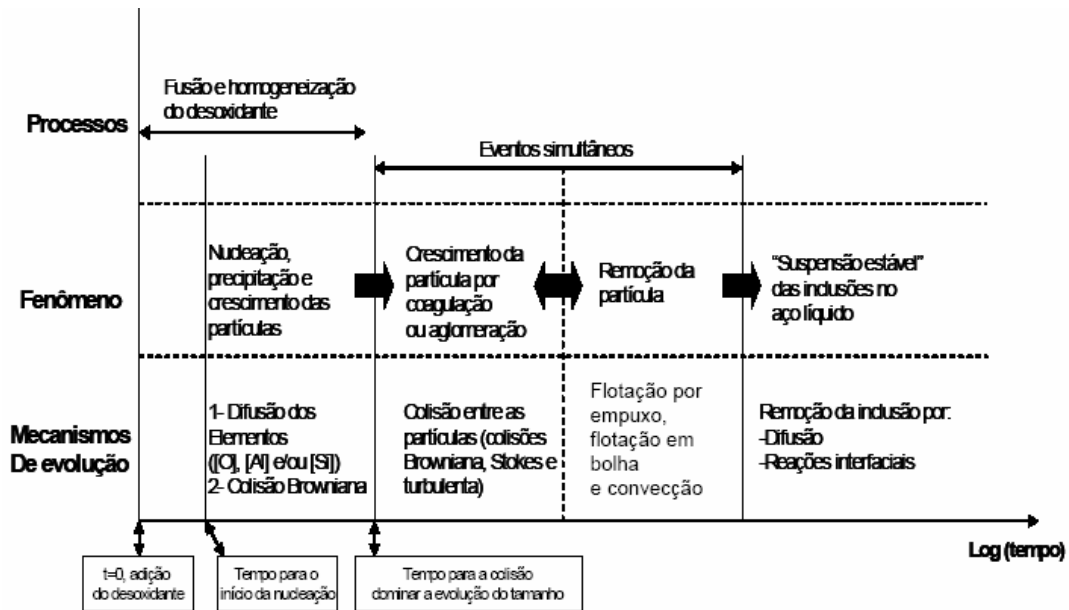


Figura 2 – Mecanismos da evolução das inclusões no aço líquido ⁽¹⁾

A inclusão da classe MnO-SiO₂ formada no processo da dextoxidação do metal líquido durante o refino na panela aumenta a concentração de CaO, transformando-se após o refino na classe CaO-SiO₂. Essa transformação reduz o ponto de fusão da inclusão e facilita a sua fratura no processo de conformação.

A Figura 3 ilustra um exemplo da alumina e da sílica. Durante o processo de conformação ocorre a ruptura do material devido a estas inclusões. Este fato mostra que se as inclusões fossem modificadas para inclusões inofensivas, as mesmas iriam fraturar e a ruptura do material na conformação seria dificultada.

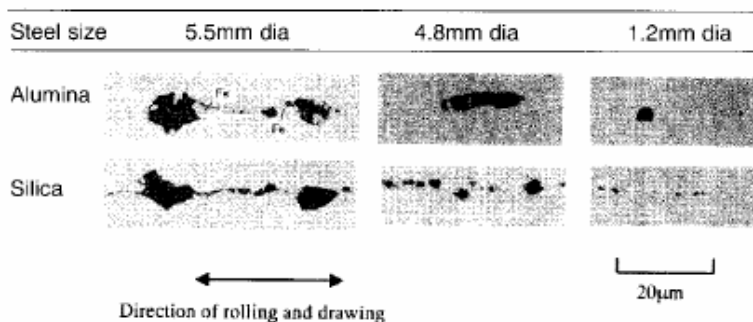


Figura 3 – Típico exemplo de mudança na forma das inclusões durante a conformação ⁽²⁾

3 INFLUÊNCIAS DOS PROCESSOS DE FABRICAÇÃO NA INCLUSÃO

O oxigênio total no aço é a soma do oxigênio livre (dissolvido no aço) e o oxigênio combinado, na forma de inclusões não metálicas. O oxigênio livre pode ser mensurado através da utilização de sensores de medição de oxigênio (Celox), e o oxigênio total através de amostras de aço líquido (TOS).

Como a % oxigênio livre não varia muito, o oxigênio total é um método razoável para medição indireta da quantidade de inclusões no aço (limpidez). O oxigênio total tem uma correlação direta com a incidência de esfoliação no produto, como mostra a Figura 4.

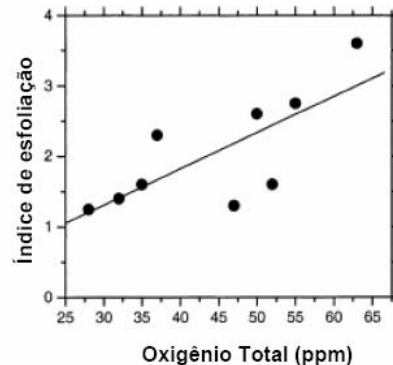


Figura 4 – Relação entre o O_{total} no distribuidor e o índice de defeitos no produto ⁽¹⁾

A partir deste conceito entende-se que para a produção de aço com alta limpidez a redução do oxigênio total é fundamental, e função dos processos de Refino Primário, Secundário e Lingotamento.

A pureza das matérias primas tem grande influência na produção de aço, especialmente em ferro-liga. Somente para exemplificar, mostra-se na Figura 5 o resultado da variação do O_{total} contido no aço em função do tempo, para ferro-silício standard, granulado e com alta pureza. Assim, Inclusões quando se adiciona ferro-silício standard e com alta pureza são mostradas na Figura 6. A adição de ferro-silício com alta pureza resulta em inclusões de sílica e de silicatos ricos em sílica que pode ser observadas nas amostras retiradas antes da adição de alumínio. Quando o alumínio contido no Fe-Si é usado, o produto da desoxidação consiste em alumina, sílica e alumino-silicatos.

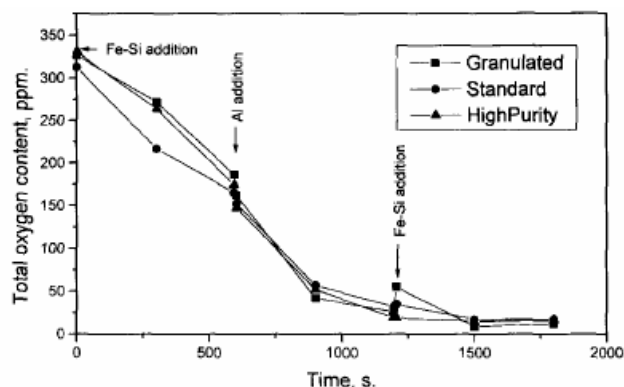


Figura 5 – O_{total} contido no aço durante a desoxidação com diferentes tipos de ferro-silício ⁽³⁾

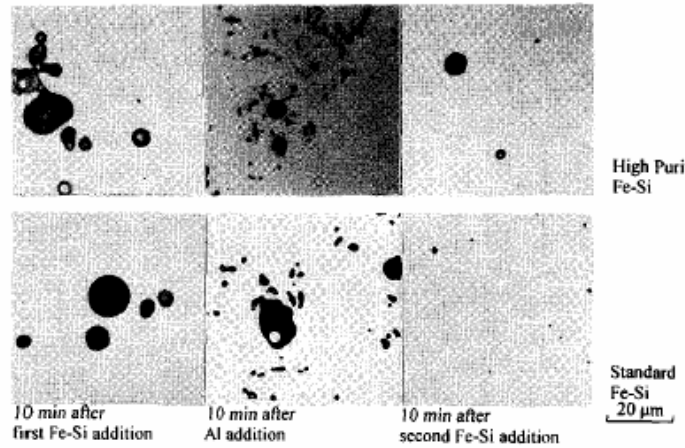


Figura 6 – Inclusões oriundas de Fe-Si de alta pureza e standard ⁽³⁾

O numero e a distribuição das inclusões formadas são similares quando Fe-Si standard e granulado são usados. A adição de Fe-Si com alta pureza resulta em poucas inclusões especialmente de pequenas frações depois do primeiro estágio de desoxidação comparados com os outros, conforme ilustra a Figura 7.

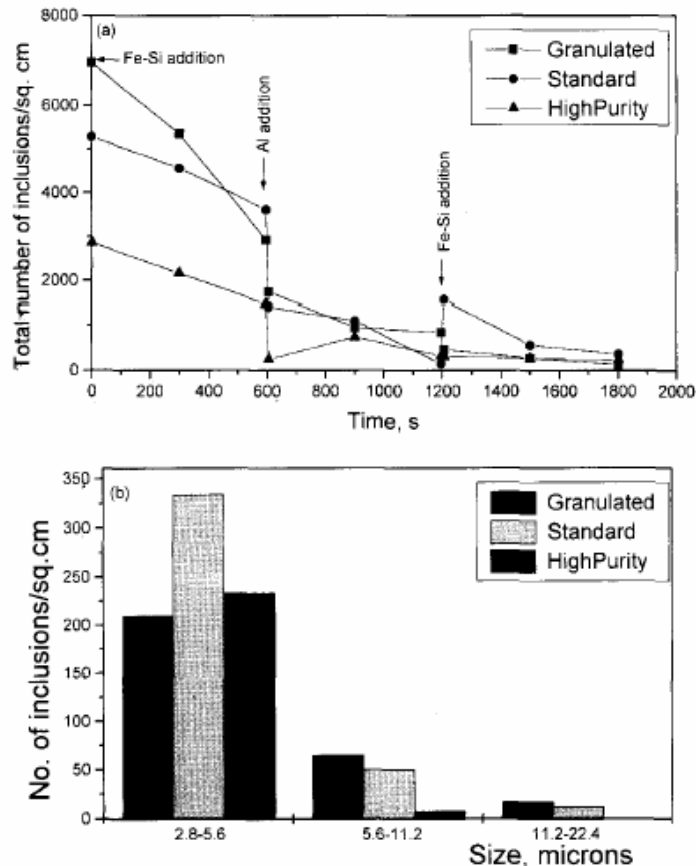


Figura 7 – (a) Numero de inclusões >2,8μm em função do tempo, (b) distribuição das inclusões obtidas após 30 minutos ⁽³⁾

Diferenças no teor de nitrogênio entre processos siderúrgicos (especialmente panela e distribuidor), são indicadores de entrada de ar durante as operações de transferência. O baixo teor de oxigênio dissolvido no aço após a desoxidação permite a absorção de nitrogênio causando problemas de qualidade devido a inclusões formadas por reoxidação como mostra a Figura 8.

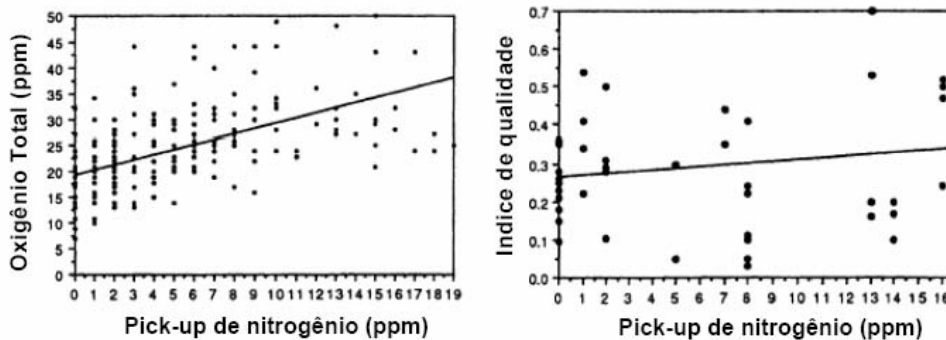


Figura 8 – Relação entre pick-up de nitrogênio, oxigênio total e qualidade do aço ⁽¹⁾

3.1 Convertedor LD/BOF

Em um forno básico a oxigênio, a movimentação do banho é gerada essencialmente pela energia transmitida pelo impacto do jato de oxigênio e pela energia de evaporação da formação de CO, pela oxidação do carbono do gusa líquido carregado. Entretanto, nas laterais do convertedor existem “zonas mortas” onde ocorrem variações de concentrações e resultam em diferentes potenciais de oxidação. Assim, o sopro de gás inerte pelo fundo vem suprir esta deficiência e promover também uma melhora na interação do banho metálico com a escória, favorecendo a obtenção de um nível mais equilibrado de oxidação.

O aumento da cinética de reação entre o banho metálico e a escória no fim de sopro, devido à agitação induzida pela injeção de gás pelo fundo, apresenta como principais melhorias, a redução nos teores de óxido de ferro na escória e a diminuição do oxigênio dissolvido no aço.

Deve ser frizado que além do Sopro Combinado que age reduzindo o nível de oxidação do banho no final do processo, o controle da passagem da escória no vazamento do Convertedor (Retentores de Escória e Infra-Vermelho) tem impacto direto no controle de inclusões.

3.2 Refino Secundário

Nesta etapa do processo, a remoção das inclusões envolve fenômenos complexos, tais como flotação, coalescimento por colisão, anexação às bolhas de gás inerte e o campo de velocidade.

A densidade das inclusões de alumina é em torno de 60% da densidade do aço líquido. Portanto as inclusões tendem a flotar para a superfície do aço líquido. Devido às pequenas dimensões das inclusões e à alta viscosidade do aço líquido, a velocidade de flotação das inclusões é limitada a poucos micrometros por segundo. Portanto, para homogeneizar o aço e aumentar o número de colisões entre as inclusões (capazes de levar ao coalescimento), o aço é agitado na panela através de energia eletromagnética, mecânica ou pela injeção de gás para borbulhamento.

O tempo de homogeneização é de suma importância sobre o teor de O_{total} após a adição de Al no Refino Secundário. A Figura 12 mostra um experimento realizado por SÖLDER, que determinou o O_{total} após a desoxidação de uma corrida processada em um Forno Elétrico a Arco (EAF).

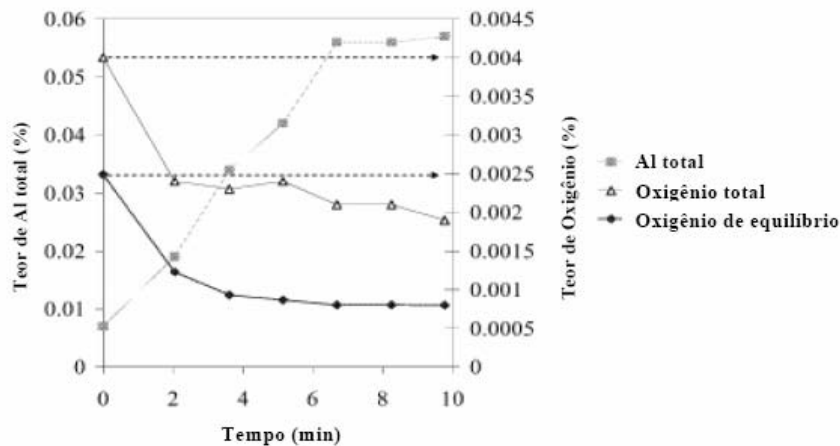


Figura 12 – Al total analisado, Oxigênio total e Oxigênio dissolvido calculado em função do tempo de homogeneização, SÖLDER (1,4,5)

A Figura 13 mostra uma imagem típica de inclusões. No 1º minuto após a adição de alumínio, tanto as inclusões dendríticas como as partículas sólidas irregulares são vistas. No 15º minuto, não existe nenhuma inclusão dendrítica, apenas cluster de partículas sólidas irregulares. Isto mostra que grandes inclusões são eliminadas por flotação e os clusters são gerados por pequenas partículas que se aderem durante o processo de refino, notadamente no refino secundário.

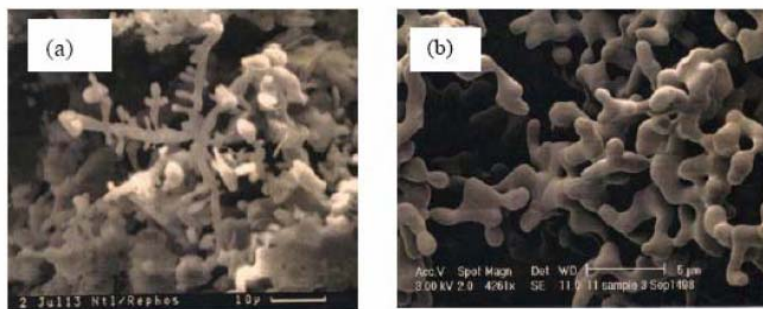


Figura 13 – Morfologia de inclusões. (a) 1 minuto e (b) 15 minutos após a adição de alumínio (1)

Uma forma de tratar um aço com inclusões de Al_2O_3 é através de escória sintética. Estas inclusões inicialmente indeformáveis são transformadas em inclusões deformáveis. A deformabilidade de uma inclusão é fortemente afetada pelo teor de Al_2O_3 . Inclusões contendo 20% de Al_2O_3 apresentam melhor deformabilidade. Basicidade baixa da escória e controle do teor de Al dissolvido do aço também favorecem a formação de inclusões deformáveis (Figura 14).

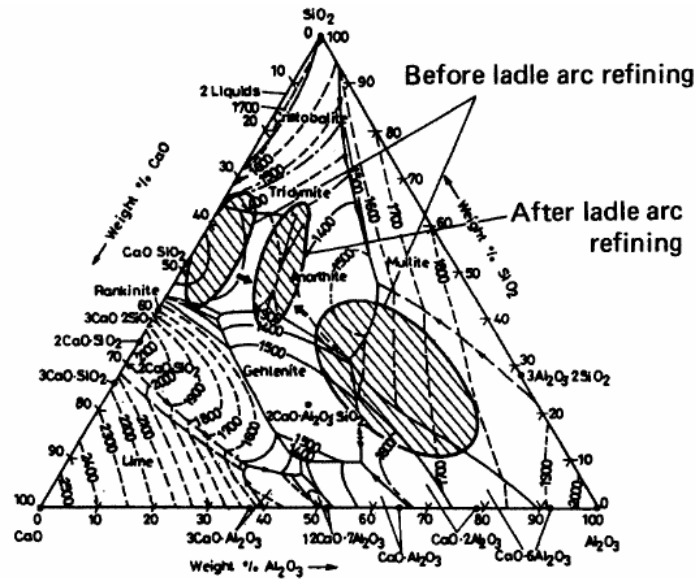


Figura 14 – Efeito da escória sintética no tratamento de inclusões em aços ⁽⁴⁻⁶⁾

O alto índice de FeO e MnO contidos nas escórias de panela tem um grande potencial de reoxidação e conseqüentemente a geração de inclusões de alumina. Defeitos no produto final são atribuídos a reoxidação do FeO da escórias de Panela. A Figura 15 mostra a correlação do O_{total} no aço contido na Panela e %FeO+MnO na escória de Panela, demonstrando ser problemático manter uma escória muito oxidada sobre o banho.

Já na Figura 16, a influência da agitação com a desoxidação no processo de Refino Secundário (EB, ASEA – SKF, VOD e RH) é mostrada, demonstrando que quanto maior a potência de mistura, maior será a taxa de desoxidação até um valor limite de $4 \cdot 10^2$ W/ton de aço. Acima deste valor, esta taxa deverá se reduzir devido a exposição do aço a atmosfera.

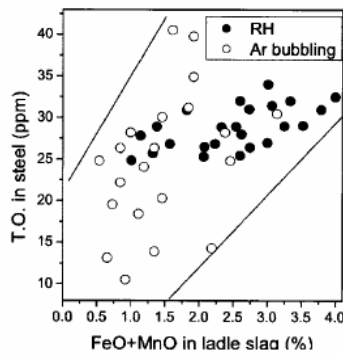


Figura 15 – Relação entre FeO+MnO na escória de Panela e O_{total} no aço ^(5,6)

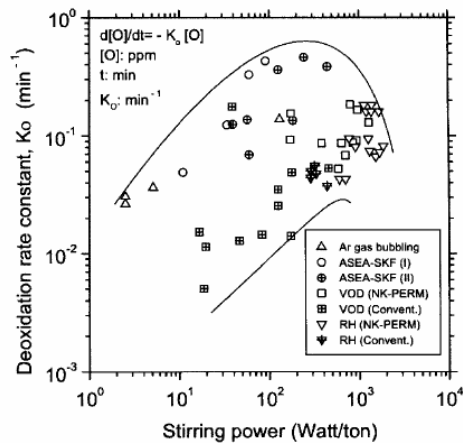


Figura 16 – Efeito da potência de agitação na desoxidação em vários equipamentos do Refino Secundário ^(4,7)

4 MÉTODOS PARA MEDIR LIMPEZ DO AÇO

Para controlar a limpeza do aço e fundamental dispor de métodos de avaliação precisos. Existem diversos métodos de avaliação direta da limpeza do aço. A seguir são nomeados alguns dos métodos utilizados.

- Observação Metalográfica por Microscópio (MMO)

Método tradicional, em que amostras de aço são examinadas em um microscópio ótico, em duas dimensões e as inclusões presentes são quantificadas e qualificadas por avaliação visual. É um método tradicional, de baixo custo.

- Análise de Imagens (IA)

Evolução do MMO, permite mensurar a quantidade de inclusões através de uma rápida avaliação computacional das imagens microscópicas. Este depende de uma infra-estrutura laboratorial, bem como softwares específicos.

- Microscopia Eletrônica de Varredura (SEM ou MEV)

Esse método revela claramente a forma tridimensional e a composição de cada inclusão examinada. A composição química é quantificada através do micro analisador de sonda de elétrons (EPMA). Exige longas preparações da amostra para localizar e expor as inclusões.

- Dissolução (Slime)

Método preciso, porém demorado. Uma amostra relativamente grande de aço (200g a 2kg) é completamente dissolvida em ácido HCl, e as inclusões não metálicas remanescentes são filtradas para inspeção, contagem e posterior análise.

A Tabela 4 mostra um comparativo de diversos métodos de avaliação direta de inclusões.

Tabela 4 – Métodos diretos de avaliação da limpidez do aço ⁽¹⁾

Método	Vantagens	Pontos fracos
MMO	- Quantidade de inclusões, distribuição de tamanho (principalmente de 5 - 30µm) e possível forma	- Bidimensional - Avaliação visual (erro humano) - Composição das inclusões - Longo tempo
IA	- Distribuição do tamanho das inclusões	- Não avalia morfologia e composição - Bidimensional - Contagem de inclusões inexistentes (erro da máquina)
Impressão de enxofre	- Grande área de cobertura - Baixo custo	- Não avalia quantidade, composição e distribuição de tamanho das inclusões - Serve apenas para macro inclusões
(SEM e EPMA)	- Revela forma tridimensional da inclusão - Mensura a composição da inclusão	- Mede apenas individualmente as inclusões - Longo tempo processamento
Espectrometria fotoeletrônica de raios-X (XPS)	- Medição da composição da inclusão	- Não avalia morfologia, quantidade e distribuição de tamanho - Aplicável apenas para inclusões maiores que 10 µm
Varredura Ultra-sônica Convencional (CUS)	- Medição da distribuição do tamanho (> 20µm)	- Não avalia morfologia e composição das inclusões
Raios-X	- Medição da quantidade de inclusões	
Dissolução (Slime)	- Medição precisa da quantidade de inclusões - Captura grandes inclusões raras - Com análise sub seqüente, pode obter distribuição de tamanho e morfologia 3-D	- Longo tempo para dissolução completa da amostra

5 DISCUSSÃO

Pelos dados apresentados, observa-se a importância da ocorrência de inclusões no processo de fabricação de um aço limpo. Também fica claro o efeito do teor de oxigênio nas inclusões, na sua formação, bem como na sua qualidade. Tipos de inclusões são definidas não somente nos processos, bem como influenciadas diretamente pelos insumos usados tanto no processo primário, quanto na metalurgia secundária. Processos de metalurgia secundária são importantes e fundamentais para conferir um grau adequado a limpidez do aço. Neste sentido, o papel da escória sintética é de enorme importância, pois certamente vai auxiliar na captação e na retenção das inclusões, antes de o aço ser levado ao lingotamento contínuo.

Tão importante quanto os processos e as matérias-primas,^(1,3-5,7-11) é a questão da qualificação e identificação das inclusões, Estudos termodinâmicos para determinar fases presentes,^(7-9,11-14) bem como laboratórios que possuam ferramentas a esta detecção vão influenciar claramente a obtenção de aços de maior limpidez.⁽¹⁵⁻¹⁹⁾ E finalmente é de se mencionar a qualificação da mão-de-obra em desenvolvimentos projetos multi-disciplinares, envolvendo empresas, tanto as que produzem aço, quanto fornecedores de matérias-primas ou insumos para o setor siderúrgico. O papel da universidade também é assumir importância no sentido de fomentar conhecimento e na participação nestes grupos de pesquisa e desenvolvimento.

6 CONCLUSÃO

Do trabalho apresentado, depreende-se:

O controle de inclusões e técnicas utilizadas para produção de aços com alta limpidez foi revisado.

Os pontos chaves para controlar as inclusões no aço são: controle do sopro e passagem de escória no vazamento para reduzir o nível de oxidação, avaliação das ligas utilizadas, utilização de técnicas como escória sintética, tratamento com cálcio e uma agitação adequada.

Utilização extensiva dos processos de refino secundário (processos de desgaseificação, forno panela).

A redução das inclusões assim como a sua transformação em inclusão inofensiva é sem dúvida um desafio para se melhorar à qualidade em relação às perdas causadas por rupturas, trincas, etc.

Agradecimentos

Os autores agradecem a Escola de Minas-UFOP, REDEMAT, pelo apoio e consentimento na publicação deste trabalho. Estendem os agradecimentos ao CNPq que auxilia nos projetos de pesquisa do professor Paulo Assis, bem como agradece a FAPEMIG pelo apoio a participação dos alunos e do professor no evento.

REFERÊNCIAS

- 1 Lascosqui, P. S. B. Avaliação da Limpidez da Aço Através da Modelagem Matemática do Desgaseificador - RH da Companhia Siderúrgica de Tubarão – CST. REDEMAT, Ouro Preto, 2007.
- 2 Kimura, S., Mimura, T., Hoshikawa, I., Ibaraki, N., Chouda, T. Técnicas de Controle das Inclusões do Steel Cord.
- 3 Wijk, O., Brabie, V. The Purity of Ferrosilicon and Its Influence on Inclusion Cleanliness of Steel, Stockholm, Sweden, 1996.
- 4 Yu, Z. Zheng, W. Wang, X. Zou, Y. Technical Improvement on Clean Steel in the N°3 Steel Plant at Wisco, China 2000.
- 5 Zhang, L. State of Art in the Control of Inclusions in Tire Cord Steels – a Review, Trondheim, Norway, 2005.
- 6 Zhang, L. Thomas, B. G. Evaluation and Control of Cleanliness – Review, 85th Steelmaking Conference Proceedings, ISS-AIME, Warrendale, PA, 2002.
- 7 Silva, A. L. V. C. Refino de Aços – Avanços e Perspectivas, Universidade Federal Fluminense, Volta Redonda, RJ.
- 8 Emi, T. Trends in Steel Refining Technology, University Tohoku, Sendai, Japan.
- 9 Araujo, L. A. Manual de Siderurgia, São Paulo, Brasil, 1997.
- 10 Carpenter, J. D. Shepherd, R. G. Clean Steel Project – Identification of Variables that affect Oxide Inclusions Steel Castings at Indiana.
- 11 Shannon, G. N. Sridhar, S. Modeling Al₂O₃ Inclusion Separation Across Steel-Slag Interfaces, Pittsburgh, PA, USA, 2005.
- 12 Suito, H. Inoue, R. Thermodynamics on Control of Inclusions Composition in Ultra-Clean Steels, Sendai, Japan, 1995.
- 13 Gaye, H. Faral, M. Lehmann, J. Computational Thermodynamics Applied to Steel Elaboration, Maizières-lès-Metz, 2003.
- 14 Strandh, J. Nakajima, K. Eriksson, R. Jönsson, P. A Mathematical Model to Study Liquid Inclusion Behavior at the Steel-Slag Interface, Stockholm, Sweden, 2005.
- 15 Naito, K. Wakoh, M. Recent Change in Refining Process in Nippon Steel Corporation and Metallurgical Phenomena in the New Process, Oita, Japan, 2005.

- 16 Bielefeldt, W. V. Moraes, C. A. M. Vilela, A.C.F.; Klujso, L. A. C. Fernandes, P. C. Caracterização e Estudo Termodinâmico de Inclusões do Aço SAE 8620 Produzido via Aciaria Elétrica, Estudos Tecnológicos – Vol.2, 2006.
- 17 Tanabe, H. Nakada, M. Steelmaking Technologies Contributing to Steel Industries, NKK Technical Review N°88, 2003.
- 18 Steneholm, K. Influence of Step on Inclusion Characteristics, Hagfors, Sweden.
- 19 Naumann, F. K. Spies, F. Metallic Inclusions Steel.