

AVALIAÇÃO DA LIMPEZ DO AÇO LÍQUIDO ATRAVÉS DA MODELAGEM MATEMÁTICA ¹

*Paulo Sérgio Bringhamti Lascosqui*²

*Geraldo Alves Vargas Filho*³

*Dimas Bahiense Moreira*⁴

*Carlos Antônio da Silva*⁵

*Itavahn Alves da Silva*⁵

*Varadarajan Seshadri*⁶

Resumo

No processo RH ocorre a circulação do aço líquido entre a panela e a câmara de vácuo. Nesta câmara, também ocorrem as reações metalúrgicas de descarburização e desgaseificação (remoção do hidrogênio, oxigênio e em menor escala do nitrogênio). Neste processo se consegue atingir uma grande energia de misturamento como consequência da circulação do aço, fator que influi positivamente nas reações físicas de remoção das inclusões não metálicas na panela. Como a adição de alumínio para aquecimento ou desoxidação do aço gera uma grande quantidade de inclusões (alumina), o tempo de circulação após a adição do desoxidante tem grande influência na limpeza do aço. Então diferentes condições de operação têm sido estudadas com o objetivo de se obter melhorias no desempenho e na produtividade. Modelos de simulação matemáticos e/ou físicos podem ser empregados para tal, bem como a amostragem do aço ao longo do processo, para caracterização em laboratório. Neste trabalho foi desenvolvido um modelo matemático tridimensional para a simulação da circulação do aço na panela, com a finalidade de avaliar o escoamento do aço, a trajetória das inclusões, bem como também foi desenvolvido um modelo macroscópico para determinar a influência do tempo de circulação (homogeneização), após a adição do alumínio, no grau de limpeza do aço. Para a validação deste modelo, foi empregada a técnica de contagem de inclusões em microscópio e medição do teor de oxigênio total.

Palavras-chave: Desgaseificador à vácuo; Limpeza; Modelo matemático; Inclusões.

EVALUATING THE STEEL CLEANLINESS IN A RH DEGASSER THROUGH MATHEMATICAL MODELING

Abstract

The RH process is based upon the circulation of the liquid steel between the steel ladle and a vacuum chamber, where low-pressure-enhanced reactions such as decarburization and degasification occur. The reactor is also a place for inclusion removal. Thus circulation through the vacuum camera has a great influence on the productivity of the equipment. Experiments have been conducted worldwide aiming to improve the steel quality and productivity under different operational conditions. Physical modeling, mathematical modeling, plant experiments, as well as physicochemical evaluations of industrial samples have been employed to evaluate the process. In this work a three-dimensional mathematical model have been developed for simulation of the steel circulation the vacuum chamber and in the ladle. A macroscopic model also was developed, the purpose was to evaluate the influence of the circulation time on the degree of the steel cleanliness – the inclusion content. The model incorporates a collision-coalescence-removal scheme for the inclusions and its validation is provided by techniques of microscope inclusions counting and measurement of the dissolved/total oxygen content.

Key words: Vacuum degasser; Cleanliness; Mathematical model; Inclusion.

¹ *Contribuição técnica ao XXXVIII Seminário de Aciaria – Internacional, 20 a 23 de maio de 2007, Belo Horizonte, MG, Brasil.*

² *Membro da ABM, Engenheiro Metalurgista, MSc, Especialista de Controle Técnico do Aço da CST.*

³ *Membro da ABM, Engenheiro Metalurgista, MSc, Especialista em Metalurgia do Produto da CST.*

⁴ *Membro da ABM, Engenheiro Metalurgista, CST.*

⁵ *Membro da ABM, Engenheiro Metalurgista, PhD, Professor da Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto.*

⁶ *Membro da ABM, Engenheiro Metalurgista, Dr. Ing. Professor da Universidade Federal de Minas Gerais.*

1 INTRODUÇÃO

A produção de aços com alta limpidez, através de processos com alta funcionalidade e baixo custo são os principais objetivos atuais para os aciaristas. Isto significa que um controle rígido da qualidade do aço passa a ser um dos fatores mais importantes para a produção do aço, o que inclui o controle da composição, tamanho, distribuição e evolução das inclusões.

Inclusões são fases não metálicas, geralmente sulfetos ou óxidos simples e complexos, podendo ser originadas ao longo de todo o processamento do aço líquido. Sua influência nas propriedades mecânicas do aço será mais ou menos deletéria em função do tamanho, tipo e forma da inclusão. Inclusões endógenas têm origem em reações que ocorrem no interior do banho durante o tratamento do aço. Uma característica destas é que são microscópicas, com tamanho inferior a 100µm. Quando as inclusões são provenientes de arraste de escória, pó fluxante ou de interação entre o metal e o refratário, são denominadas inclusões exógenas, pois são de fonte externa ao aço líquido. Geralmente as inclusões exógenas possuem um tamanho maior que as endógenas, podendo ser vistas a olho nu. Apresentam-se como defeitos internos quando o produto final tem espessura elevada, e superficiais quando a espessura final do produto é pequena.

Independente da origem, inclusões não metálicas podem gerar muitos defeitos, degradando significativamente as propriedades mecânicas do aço, além de influenciarem negativamente no processo de produção, podendo causar desde obstrução até rompimento de pele no lingotamento contínuo.

A limpidez do aço depende não só da quantidade, composição e morfologia das inclusões, mas também da distribuição do tamanho. 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 grande. Devido a isso, o conceito de aço limpo (clean steel), envolve não somente o controle do percentual das inclusões, mas também, evitar inclusões maiores que um tamanho crítico, o qual cause dano ao produto ⁽¹⁾.

Por outro lado o desgaseificador RH tem participado de forma bastante positiva no aumento da capacidade da aciaria em produzir aços de maior limpidez, devido a suas características de maior energia de misturamento, quando comparado aos reatores convencionais. Deste modo este trabalho aborda a construção e validação de um modelo de coalescimento e separação de inclusões num reator RH, em função de características geométricas e operacionais do mesmo, com o objetivo de avaliar as possibilidades de obter maiores índices de limpidez.

2 METODOLOGIA

Algumas das principais características, ou condições típicas de processamento, do reator de desgaseificação RH da CST Arcelor Brasil, são apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1 – Configurações básicas do RH da CST.

Item	Valores Referenciais
Diâmetro interno snorkel	750 mm
Imersão do snorkel	450 mm
Altura do snorkel	900 mm
Número de bicos de injeção de gás	16 bicos (dois níveis de injeção)
Vazão de injeção	2000 a 3000 NI/min
Taxa nominal de circulação	180 ton/min
Capacidade da panela	315 ton

De maneira a avaliar a cinética de choque-coalescimento-flotação de inclusões neste sistema uma série de procedimentos, descritos na seqüência, foi adotada:

- 1-Avaliação da taxa de dissipação de energia como função de alguns dos parâmetros operacionais, a partir de um procedimento numérico;
- 2-Construção de um modelo macroscópico de choque – coalescimento – flotação de inclusões, tendo como variável de entrada a taxa de dissipação de energia;
- 3-Validação do modelo a partir de dados da evolução do oxigênio total e do conteúdo de inclusões.

2.1 Procedimento Experimental

Empregou-se a técnica de análise de imagens para contagem e avaliação da distribuição das inclusões, via microscopia ótica. As amostras foram retiradas com coquilhas (aço 1020), Figura 1, preparadas e enviadas para um laboratório de avaliação de imagens.

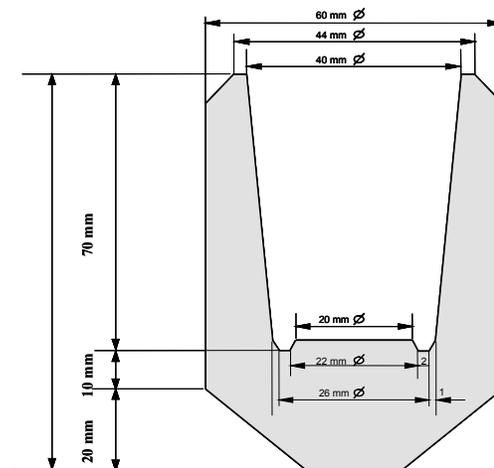


Figura 1 – Desenho esquemático da coquilha utilizada na CST.

A análise ótica das inclusões visualizadas sobre as seções polidas das amostras seguiu o método de YAWATA. Consideraram-se então as formas e as cores exemplificadas na Figura 2.

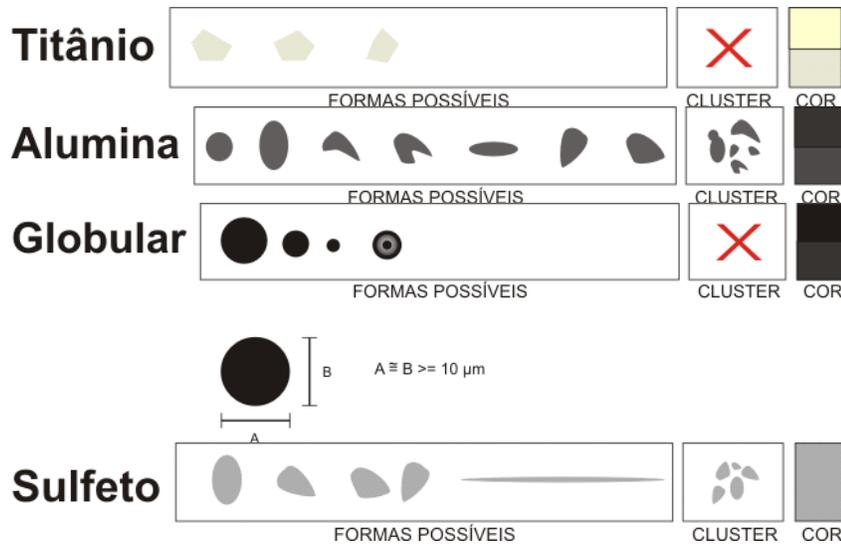


Figura 2 – Padrões de classificação das inclusões segundo YAWATA.

Neste trabalho o foco foi as inclusões de ALUMINA, sendo que os outros tipos foram colocados em um grande grupo denominado OUTROS. O número de classes foi aumentado para permitir melhor comparação com o software desenvolvido e a amplitude das classes diminuída.

Utilizou-se o sistema comercial de aquisição e análise de imagens IMAGO[®] (2), operacionalizado pela ESSS (3). Detalhes adicionais podem ser conseguidos junto à ESSS.

O método utilizado para aquisição de amostras para análise do % de oxigênio total foi o amostrador tipo TOS (Total Oxygen Sampler), da Heraeus Electro-Nite. O sistema de amostragem utiliza um sensor em forma de pino, o qual é imerso no aço líquido. O pino é preenchido através de um sistema de jato de argônio, de modo a obter-se uma amostra isenta de impurezas. A amostra então foi enviada ao laboratório, onde a mesma foi preparada para análise do O_{total} da corrida. As amostragens para avaliação do oxigênio total foram realizadas com os mesmos tempos de referencia usados para a amostragem para contagem de inclusões.

2.2 Procedimento Numérico

A energia de misturamento do aço (expressa através da taxa de dissipação de energia) é o principal fator para controle da remoção das inclusões do aço, por ser responsável pelo coalescimento e crescimento das mesmas. De fato é de fácil demonstração que num sistema de mistura perfeita, a lei da diminuição do número de inclusões ao longo do tempo seria da forma exponencial, na ausência do fenômeno de choque e coalescimento.

O coalescimento seguido do crescimento é o que permite a aceleração do processo de separação de inclusões, o que justifica a importância de se avaliar a taxa de dissipação de energia no RH .

Para tanto foi empregado o modelo matemático tridimensional embutido no código comercial CFX.⁽⁴⁾ Detalhes da implementação podem ser encontrados em Lascosqui.⁽⁵⁾ De modo descrever os resultados experimentais, evidenciados pela amostragem de oxigênio e análise ótica, foi construído um modelo para a contabilização do coalescimento e flotação de inclusões ao longo do processo. Este modelo leva em consideração os mecanismos de SAFFMAN&TURNER e de STOKES, de choque entre inclusões e emprega apenas variáveis macroscópicas do processo, como dimensões do reator, taxa de circulação, temperatura média.

Considera-se inicialmente que o resultado de TOS [%] (oxigênio total) seja indicativo da quantidade total de Al_2O_3 , que se distribui em classes, permitindo então a confecção de um balanço populacional.

Ao contrário de um balanço populacional completo se considera, neste caso, que o número de inclusões em cada classe varia unicamente como função do choque e coalescimento, para um número limitado de mecanismos. Nada impede que o mesmo seja complementado.

Como idéia básica o número de choques entre inclusões de duas classes, por exemplo i e $i+n$, seria proporcional às concentrações de inclusões em cada classe, $xN(i) xN(i+n) W$, onde W representa uma constante de proporcionalidade dependente do mecanismo atuante. Como sugere a Figura 3 o choque entre partículas de classe i com partículas de classe $i+n$ dá ensejo ao nascimento de partículas da classe k .

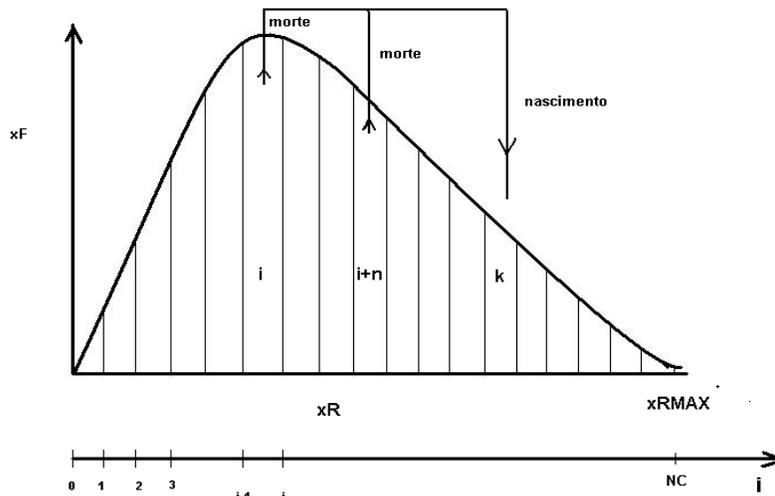


Figura 3 – Esquemático de distribuição de tamanho de inclusões.

Caso apenas o mecanismo de SAFFMAN&TURNER (que prevê interação entre as inclusões como efeito da turbulência) esteja atuante. Observe-se que ε [m^2/s^3] e μ [m^2/s] representam, respectivamente, a taxa de dissipação de energia e a viscosidade cinemática do aço, o que confere, para o mecanismo de SAFFMAN&TURNER, unidades de $[m^3/s]$ à constante de proporcionalidade:

$$W_1 = \{1,3 \alpha [xR(i) + xR(i + n)]\}^3 \left(\frac{\varepsilon}{\mu} \right)^{0,5}$$

Outros mecanismos podem estar ativos, por exemplo choques devidos à diferença de velocidade de ascensão propiciada pelo empuxo que age sobre partículas de diferentes diâmetros. Propõe-se, para este mecanismo (normalmente denominado contribuição de Stokes).

$$W_2 = \frac{2\pi \Delta\rho g}{9\eta} \{xR(i) + xR(i + n)\}^3 |xR(i + n) - xR(i)|$$

Onde, $\Delta\rho$ representa a diferença entre as massas específicas do aço e inclusão, g a aceleração da gravidade e η a viscosidade dinâmica do aço. Então, $W = \Sigma W_i$

De modo a contabilizar a separação das inclusões na interface metal/escória admitiu-se que a panela pode ser subdividida em dois reatores, figura 4.

1- o reator inferior, de mistura perfeita, onde ocorre o choque e coalescimento de inclusões de acordo com o modelo já descrito; 2- um reator superior, de volume restrito à proximidade da interface metal-escória, que perde todas as inclusões nele contido num dado intervalo de tempo de processamento.

Como primeira aproximação se admite portanto eficiência completa de captura de inclusões na interface. Além do mais, o volume deste reator virtual, e logo a quantidade de inclusões efluentes, depende do tamanho de inclusão a ser considerado. Por exemplo inclusões maiores flutam mais rápido o que implica em reator mais profundo.

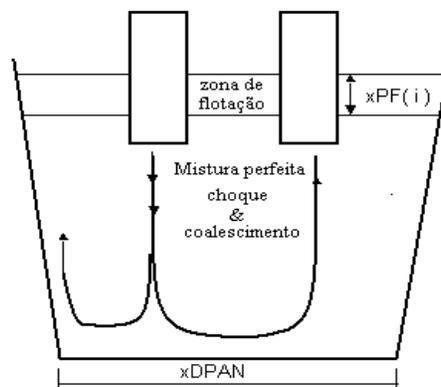


Figura 4 – Divisão esquemática da panela em reator de coalescimento e de flotação.

No reator de flotação as velocidades são significativamente menores, caracterizando um fluxo laminar, o que permitiu estimar a velocidade de flotação a partir da equação de Stokes.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados de TOS obtidos podem ser visualizados na Tabela 2.

Tabela 2 – Resultados O_{total} medidos na CST.

Corrida	Tempo após desoxidação da corrida (s)				
	60	180	360	480	600
243222-1	0,0067	0,0069	0,0028	0,0026	0,0023
243221-8	0,0037	0,0016	0,0049	0,0022	0,0026
146305-7	0,0019		0,0022	0,0019	0,0023
244917-5		0,0055	0,0018	0,0024	

Amostras sem resultado.
 Média de 03 resultados.

Estes foram ajustados por trechos, sugerindo :

$$\begin{aligned}
 t < 60 \text{ segundos} & \quad O = 0,050937 e^{-0,03486 t} \quad R^2 = 1 \\
 t > 60 \text{ segundos} & \quad O = 0,00715 e^{-0,00214 t} \quad R^2 = 0,85
 \end{aligned}$$

e então, Figura 5, a atuação de um processo de choque-coalescimento-flotação de inclusões bastante efetivo nos períodos iniciais de circulação, onde a concentração de inclusões é ainda significativa.

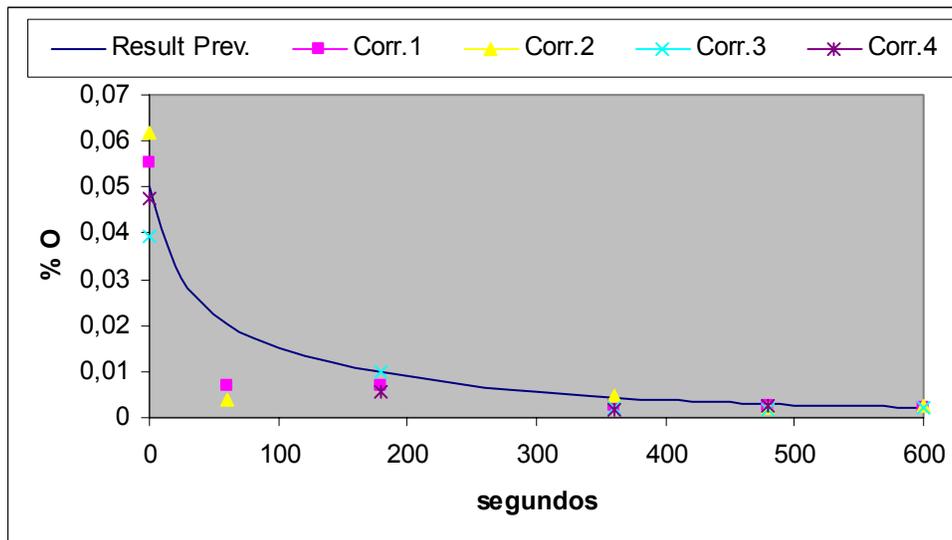


Figura 5 – Evolução do O_{total} em relação ao tempo de homogeneização do RH, valores de TOS e previstos pelo modelo matemático.

Amostras para análise de imagem só estão disponíveis após 1 minuto de circulação. Portanto a tendência é que este tipo de análise reproduza os instantes finais do fenômeno de coalescimento e flotação. Por outro lado a distribuição de tamanhos em um dado instante é função também da distribuição original, a qual não se conhece. Os dados do IMAGO, por este motivo, foram utilizados para confirmar o teor total de oxigênio, via TOS. A concordância pode ser considerada boa.

A Figura 6 apresenta mapas de contorno (ou de intensidade) mostrando a distribuição espacial deste parâmetro no interior da panela, conforme calculado via CFX. Os dados apresentados são específicos para a temperatura de 1600 °C, 315 toneladas de aço, pernas com diâmetro interno de 0,75 m e profundidade de imersão igual a 0,45 m. Para outras condições a forma da distribuição não se altera substancialmente.

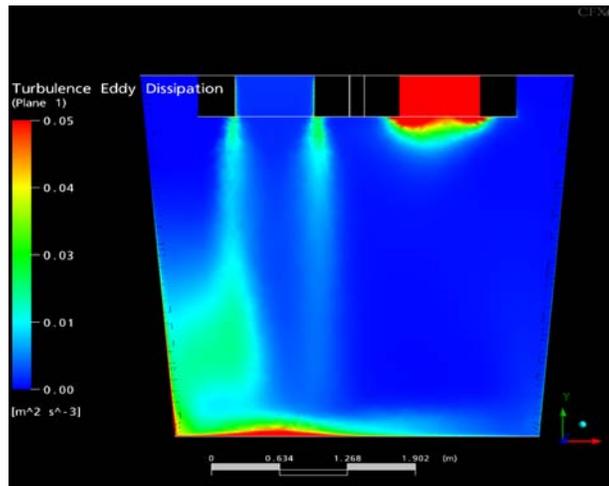


Figura 6 – Taxa de dissipação de energia , corte vertical coincidente com plano médio das pernas.

De modo geral se observa que a taxa de dissipação é maior no snorkel de subida , na saída do snorkel de descida e no fundo da panela, onde ocorre o impacto do jato de aço ao fundo da panela. Também que seria razoável assumir uma distribuição quase uniforme desta variável ao longo do volume da panela.

Regressão múltipla dos resultados das várias simulações sugere:

$$\varepsilon[\text{m}^2/\text{s}^3] = 0,008714 + 0,00696 \frac{Q}{100} - 0,0162 S - 0,0066 D$$

Onde, Q é a vazão (ton / min), S é o diâmetro do Snorkel de subida (m), e D o diâmetro do snorkel de descida (m).

Vale ressaltar, no entanto, que de acordo com a implementação numérica adotada para o CFX ⁽⁴⁾, estas variáveis foram tratadas como dados de entrada independentes. Na realidade não o são, como exemplificado em SILVA et al. ⁽⁶⁾, SESHADRI et al. ⁽⁷⁾.

Por exemplo, determinar a influência do diâmetro das pernas na taxa de dissipação de energia implica também em avaliar o efeito deste parâmetro sobre a velocidade de circulação.

Não obstante os valores numéricos previstos pelo CFX estão em bom acordo com dados da literatura, por exemplo SZEKELY et al. ⁽⁸⁾ e THOMAS et al. ⁽⁹⁾ que cita valores típicos de taxa de dissipação de energia, considerando uma panela de 250 ton e taxa de circulação de 200 ton/min, da ordem de 0,01 m²/s³.

Como se apreende da discussão a seguir, o modelo macroscópico de choque - coalescimento e separação de inclusões na panela do RH foi capaz de reproduzir as principais características do processo.

Observou-se, inicialmente, que a distribuição inicial (assumida), de inclusões influencia os valores de oxigênio total previstos pelo modelo, mas principalmente nos primeiros minutos. Nenhuma influência significativa foi prevista para tempos maiores que 300 segundos. Por outro lado esta distribuição inicial não é conhecida de fato.

Por estes motivos optou-se por escolher o valor da constante de SAFFMAN & TURNER igual a 0,45, o qual faz com que a curva prevista pelo modelo desenvolvido reproduza os dados de O_{total} medidos pela sonda TOS, nos instantes finais de circulação, como se nota na Figura 5. Para tanto se encontrou um valor final médio, considerando todas as corridas amostradas, de cerca de 25 ppm. O valor da taxa de dissipação de energia ($\varepsilon = 0,0040 \text{ m}^2/\text{s}^3$), foi assim escolhido por refletir a situação típica da CST.

Pode-se notar que os resultados da curva prevista pelo modelo mostram um grau de acerto bastante significativo, principalmente para os tempos maiores que 2 minutos.

DEKKERS ⁽¹⁰⁾, determinou a influência do tempo de homogeneização sobre o teor de oxigênio total, após a adição de Al no refino secundário. De acordo com o mesmo, tempos maiores que 10 minutos têm pouca influência na diminuição do teor de O_{total} . AOKI et al. ⁽¹¹⁾, desenvolveu um modelo matemático tridimensional para determinar a evolução do O_{total} em uma panela com borbulhamento pelo fundo. O modelo prevê uma forte redução no conteúdo de oxigênio, nos primeiros 600 s.

ZHANG et al. ⁽⁴⁾, e NAKANISHI ⁽¹²⁾, obtêm resultados similares. O modelo desenvolvido então está em boa concordância com a literatura.

Com base nestes argumentos outras simulações foram realizadas. As principais diferenças previstas parecem ocorrer nos primeiros 120 segundos de homogeneização. Entretanto não são diferenças significativas que possam garantir que uma configuração seja muito superior às outras condições no aspecto de se atingir uma maior limpidez, notadamente porque os tempos típicos de circulação são tipicamente muito superiores a estes. Outro fator importante apresentado, é que a maior queda do O_{total} ocorre nos primeiros 100 segundos do tempo de mistura na panela.

Uma diferença de 50 °C na temperatura de processamento do aço (1600 °C => 1650 °C), não apresentou influência significativa na taxa de dissipação de energia do reator RH, e, por conseguinte não influencia significativamente o grau de limpidez do aço.

Do mesmo modo o aumento das dimensões dos snorkels, de 750 a 800 mm, induz a um aumento discreto da taxa de dissipação de energia e, por conseguinte da velocidade de remoção de inclusões.

4 CONCLUSÕES

A cinética do processo de coalescimento-flotação de inclusões na panela do desgaseificador RH foi avaliada a partir de um modelo macroscópico tendo como variável de entrada a taxa de dissipação de energia. A evolução do conteúdo de inclusões foi seguida através de amostragens de algumas corridas, o que permitiu determinar o conteúdo total de inclusões com o auxílio do amostrador TOS e estimar a distribuição de tamanhos por meio do analisador de imagens IMAGO. Estas duas técnicas serviram para validar o modelo macroscópico e as conclusões são como se seguem.

A variável macroscópica de maior influência sobre a taxa de remoção de inclusões é a taxa de dissipação de energia, que apresentou distribuição praticamente uniforme ao longo do volume da panela.

O fator que tem maior influência na taxa de dissipação de energia, é a velocidade de circulação do aço (t/min).

A maior taxa de decaimento do O_{total} ocorre nos primeiros três minutos após a adição de alumínio, seja ele para desoxidação ou para aquecimento aluminotérmico. Após 360 segundos da adição de alumínio a curva de decaimento do O_{total} parece se tornar assintótica, o que nos leva a concluir que tempos de homogeneização superiores a 480 segundos levam a ganhos incrementais, que devem ser reavaliados quando se procura aumentar a produtividade da aciaria. Modelo e resultados experimentais concordam neste aspecto

Os resultados previstos pelo modelo são significativamente afetados pela distribuição inicial assumida apenas se forem considerados os primeiros 2~3 minutos de homogeneização.

REFERÊNCIAS

- 1 Zhang L., Thomas B. G., – State of art en Evaluation and Control of Steel Cleanliness, ISIJ, 43 (2003), nº 3, p. 273-278.
- 2 IMAGO® – Software de análise de imagens ESSS - (48) 3334-8922, ramal 2112.
- 3 Engineering Simulation and Scientific Software (ESSS) - Florianópolis, Sta Catarina, Brasil – (48) 3334-8922.
- 4 CFX – Software Ansys de computação fluido dinâmica, representado no Brasil pela ESSS -contato (48) 3334-8922, ramal 2206.
- 5 Lascosqui, P.S.B, - Avaliação da Limpidez do Aço Líquido Através da Modelagem Matemática do Degaseificador – RH da Companhia Siderúrgica de Tubarão – CST – Dissertação de Mestrado, REDEMAT – UFOP-CETEC-UEMG, dezembro de 2006.
- 6 Silva C.A., Silva I.A., Martins, E.M.C., Seshadri V., Perim C.A., Vargas Filho, G.A., Fluid flow and mixing characteristics in RH degasser of Companhia Siderurgica de Tubarao, and influence of bottom gas injection and blockage through physical modeling study; Ironmaking and Steelmaking, 2004, vol 31, no 1, p. 37-42.
- 7 Seshadri, V., da Silva, C.A., da Silva, I.A., Vargas, G.A., Lascosqui, P.S.B., Decarburisation rates in RH-KTB degasser of CST steel plant through physical modelling study ; Ironmaking and Steelmaking , v 33 , no 1 , fevereiro 2006, p. 34-38.
- 8 Szekely, J., Shirabe, K. - A Mathematical model of fluid Flow and Inclusion Coalescence in the RH Vacuum Degassing System, Transactions ISIJ, 1983, vol 33.
- 9 Thomas, B.G., Denissov, A., Miki, Y., Shimada, Y., - Model of inclusion removal during RH degassing of Steel, ISS 80th Steelmaking conference, 1997, p. 31-38.
- 10 Dekkers, R. - Chapter 10 – Improvement of Steel Cleanliness - Ph.D Thesis, Katholieke Universiteit Leuven, Belgium (2002), p. 136.
- 11 Aoki, J., Zhang, L., Thomas, B.G., Modeling of Inclusion Removal in Ladle Refining, ICS Proceedings – 2005 – p. 319-331.
- 12 Zhang, L., Pluschkell, W., Thomas, B. G., - Nucleation and Growth of Alumina Inclusions During Steel Deoxidation, 2002 Steelmaking Conf. Proc, p. 463-475.