

REMOÇÃO DE INCLUSÕES EM MODELOS FÍSICOS DE DISTRIBUIDORES DE LINGOTAMENTO CONTÍNUO DE AÇOS: UMA REVISÃO BIBLIOGRÁFICA¹

Magda Beatriz Galant François²
Felipe das Dôres Machado³
Antônio Cezar Faria Vilela⁴

Resumo

A importância de um escoamento adequado em distribuidores de lingotamento contínuo, quando se quer produzir aços limpos (*clean steels*), vem sendo largamente discutida e estudada nas últimas décadas. Esses estudos usualmente são realizados em modelos físicos ou numéricos, visto que em plantas são de difícil execução. Nas últimas décadas vários trabalhos têm sido publicados sobre o comportamento das inclusões no escoamento e outros que estudam basicamente a flotação de inclusões em diferentes condições de escoamento. Estes últimos têm usado principalmente dois métodos para quantificar as inclusões não flutuantes, o primeiro via um sensor especialmente desenvolvido para este fim e outro, mais simples, via separação por peneiras. Este trabalho tem como objetivo fazer uma revisão do que foi publicado nas últimas duas décadas a respeito de modelagem física do processo de flotação de inclusões na produção de aços limpos. Uma análise é feita a partir do embasamento teórico, critérios de similaridade, metodologia empregada para a separação e quantificação das inclusões e resultados obtidos de forma a se obter subsídios para a montagem de um sistema de remoção e quantificação de inclusões em distribuidores de lingotamento contínuo.

Palavras-chave: Distribuidor; Remoção de inclusões; Modelagem física.

INCLUSION REMOVAL IN PHYSICAL MODELS OF STEEL CONTINUOUS CASTING TUNDISHES: A BIBLIOGRAPHIC REVIEW

Abstract

The importance of a proper fluid flow in tundishes when it wants to produce clean steels has been widely discussed and studied for decades. These studies are usually performed on models (physical or numerical). In the last decade several studies have been published about the behavior of the inclusions into the flow and others that study basically flotation of inclusions on different flow conditions. These are used to have two methods to quantify inclusions not floating, the first via a sensor specially developed for this purpose and another, easier by separation for sieves. This paper aims to review what has been published in the last two decades about the physical modeling process flotation of inclusions in clean steel production. A critical analysis is written from the theoretical approaches, similarity criteria, methodology used for the separation and quantification of inclusions and results. The but is to build a experimental setup capable of quantifying the inclusions in a tundish physical model.

Key words: Tundish; Inclusion removal; Physical modeling.

¹ Contribuição técnica ao 44º Seminário de Aciaria – Internacional, 26 a 29 de maio de 2013, Araxá, MG, Brasil.

² Dr. INPL, Pesquisadora Lasid, UFRGS, Prof. Ulbra, RS, Brasil.

³ Eng. Químico, Mestrando, Lasid, PPGE3M, EE, UFRGS, RS, Brasil.

⁴ Prof. Dr.-Ing., Lasid, DEMET, PPGE3M, EE, UFRGS, RS, Brasil.

1 INTRODUÇÃO

Nos últimas décadas as necessidades com relação à limpeza dos aços têm aumentado constantemente. Essas se relacionam a melhorias de propriedades mecânicas e redução de defeitos, os quais podem ser oriundos do processo de fabricação, especialmente aqueles ligados às inclusões.

A importância de um escoamento adequado em distribuidores, quando se quer produzir aços limpos, vem sendo estudada mais intensamente a partir dos anos oitenta. Os estudos têm sido realizados em modelos, pois o aço e os equipamentos empregados não permitem a visualização dos fenômenos em questão, pelo material constituinte (aço e refratário) serem opacos, além das temperaturas altas ($>1.000^{\circ}\text{C}$) e os riscos para a segurança do operador/observador na usina. Testes em laboratório são mais econômicos, seguros e precisos. A busca pela limpeza do aço pode ser entendida como a presença de um menor conteúdo de inclusões, que em função da complexidade dos fenômenos envolvidos torna o modelamento físico, por vezes, restritivo e o matemático difícil. Quando se trata de modelamento físico, a possibilidade de redução do número de inclusões tem sido inferida via estudos que relacionam um melhor escoamento à melhor limpeza do aço. Ultimamente tem se tentado desenvolver modelos físicos que permitam a quantificação das inclusões presentes no banho, ou passantes pelo distribuidor, onde se discute basicamente o material empregado para a simulação das inclusões e a forma de quantificá-las.⁽¹⁻¹¹⁾ Também têm sido realizados estudos com modelos matemáticos⁽¹²⁻¹⁷⁾ que buscam o mesmo objetivo e outros trabalhos apresentam uma combinação de ambos os modelos, físico através dos ensaios de distribuição de tempo de residência (DTR) e matemático para o cálculo da remoção de inclusões.⁽¹⁸⁻²¹⁾ Obviamente, a partir da quantificação das inclusões, em modelos físicos, pode-se avaliar o desempenho de diversos tipos de modificadores de fluxo e/ou inibidores de turbulência, injeção de gases e práticas operacionais quanto a este quesito. Assim sendo, o objetivo deste trabalho é fazer uma revisão dos critérios e técnicas que têm sido empregados para simular e quantificar inclusões em modelos físicos de distribuidores de lingotamento contínuo.

2 PRINCÍPIOS BÁSICOS RELACIONADOS AO MODELAMENTO FÍSICO DE DISTRIBUIDORES

Os modelos, tanto físicos quanto numéricos, são construídos com o objetivo de melhor entender os fenômenos que ocorrem durante o processo. Porém, para que os resultados possam ser utilizados com alguma segurança, eles devem obedecer a critérios de similaridade (geométrica, cinemática, dinâmica, térmica e química) e das respectivas forças que governam os fenômenos envolvidos. Citam-se como autores importantes e que tratam detalhadamente deste assunto Szekely, Eves e Brimacombe,⁽²²⁾ Mazumdar e Evans⁽²³⁾ e Sahai e Emi.⁽²⁴⁾

Na impossibilidade do uso simultâneo de todos os critérios de similaridade é fundamental o entendimento do papel das forças que interagem em cada tipo de fenômeno. Estas devem reproduzir os fenômenos de interesse e estabelecer relações de relevância entre eles. A escolha da escala do modelo é consequência do fenômeno a ser estudado. Tanto a escolha da escala como a interpretação dos resultados são dificultadas pela diversidade de fenômenos que ocorrem durante a operação

No caso do distribuidor, deve-se levar em conta a existência das diferentes forças que atuam em cada fenômeno. Pode-se citar: o vazamento do aço líquido da panela para o distribuidor (relação entre forças gravitacionais e de inércia), a penetração do fluido no interior do distribuidor (inércia x tensão superficial), o escoamento principal do aço no interior do distribuidor (forças viscosas, gravitacionais e de inércia), a existência de regiões bifásicas (tensão superficial x inércia) e a flotação de partículas (flotação x inércia).

Quando se opta por estudar as linhas de fluxo no interior do distribuidor, as forças mais importantes são as de inércia, as gravitacionais e as viscosas. A relação entre as forças de inércia (transporte de momento convectivo) e as forças viscosas (transporte de momento difusivo) é dada pelo número de Reynolds; a relação entre as forças gravitacionais e de inércia é dada pelo número de Froude. Por consequência, quando o objetivo é reproduzir o escoamento do aço no modelo devem-se manter os mesmos Reynolds e Froude que o equipamento real de forma a se obter o que se chama de similaridade dinâmica. A manutenção dessas relações e o uso de água como fluido de simulação baseado nas viscosidades similares (Tabela 1) implicam no uso de um fator de escala igual a 1.⁽²⁵⁾ A combinação dos números de Froude e Reynolds fornece o adimensional de Euler, que representa a relação entre as forças de pressão (ligadas ao jato) e as forças de inércia.

Tabela 1. Propriedades físicas da água e do aço⁽²⁶⁾

Propriedade	Água (20°C)	Aço (1600°C)
Viscosidade cinemática	10^{-6}	$0,913 \times 10^{-6}$

Pode-se inferir que, devido à diversidade dos fenômenos, é impossível que se possam manter, em um mesmo modelo físico, todos os critérios de similaridade, e obter resultados para diferentes fenômenos com o mesmo rigor. Isto foi apresentado por Sahai e Emi^(24,27) e Sahai e Ahuja,⁽²⁵⁾ e Sinha e Sahai⁽¹⁵⁾ através de diversas contribuições. Nessas foram apresentadas e discutidas os critérios de similaridade para modelamento físico e remoção de inclusões além da importância da similaridade de Reynolds e Froude. Esses trabalhos apresentam o embasamento teórico, que depois foi empregado por vários autores.^(1,3-7,11,21,28)

A abordagem mostrada por Sahai e Emi⁽²⁷⁾ para a similaridade de Reynolds considera que o escoamento no interior do distribuidor é turbulento, ou seja, a transferência de momento é predominantemente difusiva (em virtude dos vórtices) em relação ao transporte convectivo. Portanto, a similaridade de Reynolds seria mais importante em escoamentos laminares que em escoamentos turbulentos.

Segundo Rogler, Helaslipe e Mehrvar,⁽²⁹⁾ o escoamento no interior do distribuidor é dominado pelas forças de inércia e dirigido pelas forças gravitacionais. Neste caso, Froude, é de boa aplicabilidade para manter a similaridade entre o modelo e o protótipo.

Sahai e Emi⁽²⁷⁾ também argumentam, por outro lado, que a simetria baseada em Froude não é fundamental para simulação de escoamento em distribuidores, visto que, como se trabalha com modelos isotérmicos pode-se desconsiderar a força gravitacional. Esses autores também acrescentam que o uso do Froude é conveniente, pois permite a variação do fator de escala. Entretanto, deve-se lembrar de que o jato da panela é governado pela força gravitacional.

Mazumdar e Guthrie,⁽²⁶⁾ analisando trabalhos de outros autores, comentam que, em condições de escoamento turbulento e para diferentes modelos de distribuidor

(volume e geometria), Reynolds apresenta pouca variação, e neste caso a condição de similaridade mais importante seria a de Froude, ou de Euler.

No Laboratório de Siderurgia da UFRGS foram construídos três modelos de distribuidores em escala 1:1, com similaridade de Reynolds e Froude para fins de pesquisa e ensino, tanto na universidade quanto na indústria. Paralelamente, também foi construído um modelo de panela, em escala 1:3, com similaridade de Froude. Nos modelos de distribuidor foram realizados estudos de escoamento, com o objetivo de qualificá-lo, isto é, aumentar o tempo médio de residência e diminuir curto circuito e volume morto, além de estudos de emulsificação de escória.⁽³⁰⁻³²⁾ Na panela foram empreendidos estudos de escoamento e tempos de mistura.⁽³³⁾ Todos os modelos, independente da escala, têm apresentado bons resultados e em boa concordância com os equipamentos originais. É claro que, quando usados para fins educacionais, os modelos em escala 1:1 apresentam maior impacto na visualização dos fenômenos envolvidos.

3 INCLUSÕES E RESPECTIVOS CRITÉRIOS DE SIMILARIDADE PARA SIMULAÇÃO EM MODELOS FÍSICOS

As inclusões, quanto à origem, são classificadas como endógenas e exógenas. Ambas precisam ser controladas para que não sejam prejudiciais à qualidade do aço. Diz-se que, por serem maiores, as exógenas são mais prejudiciais.

As inclusões exógenas (>50 μm) são oriundas dos processos de reoxidação do banho e das operações transientes do distribuidor, isto é, pela passagem de escória da panela para o distribuidor e do distribuidor para o molde^(34,35) ou por emulsificação da escória também em operações transientes (Figura 1).

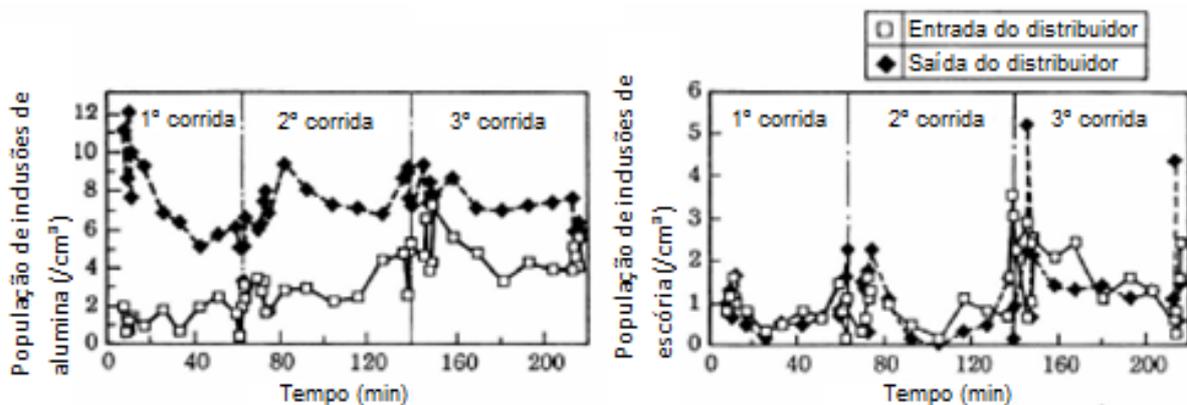


Figura 1. População de inclusões de alumina (esquerda) e de escória (direita) ao longo do tempo na entrada e na saída do distribuidor (Aço acalmado ao Al, panela de 320 t, 5%FeO na escória, distribuidor de 60 t inertizado com Ar e MgO como fluxante).⁽³⁴⁾

Sabe-se, porém, que as endógenas podem aglomerar formando *clusters* com tamanhos iguais ou superiores. Esse fenômeno de aglomeração é fundamental para a remoção das microinclusões (<10 μm), já que por flotação é inviável que isto ocorra em um tempo inferior ao tempo de residência do distribuidor.⁽²⁴⁾ As endógenas são fruto do processo, e podem ser formadas durante a desoxidação ou por precipitação de óxidos durante o resfriamento e solidificação.

Com relação à desoxidação, a adição de agentes desoxidantes busca a formação de óxidos, preferencialmente líquidos. Para que isto ocorra deve-se trabalhar numa faixa muito estreita de composição química ou serão formadas inclusões sólidas de Al_2O_3 , SiO_2 e outras, que são mais difíceis de remover.

Assim sendo, o setor industrial produtor de aços, principalmente aquele que produz aços especiais, vem trabalhando com limites bastante rigorosos quanto ao tamanho e conteúdo crítico de inclusões. Um exemplo clássico é o aço rolamento de alto desempenho quanto à fadiga em que as inclusões presentes devem possuir tamanho máximo de 10 μm ,⁽²⁴⁾ pois elas afetam diretamente as propriedades mecânicas.

Sahai e Emi⁽²⁷⁾ discutiram os critérios necessários para a simulação da flotação de inclusões. Neste estudo eles consideram que as partículas obedecem a um vetor de velocidade resultante de dois outros vetores, um relacionado a lei de Stokes e outro relacionado com o vetor de velocidade do escoamento do aço.

No caso do uso de modelos em escala 1:1, os parâmetros de comprimentos, vazões, velocidades e tamanhos de inclusão permanecem iguais ao do protótipo. No entanto, em escala reduzida os modelos devem obedecer a similaridade de Froude. Portanto, este critério de similaridade é mantido quando as equações apresentadas na Tabela 2 são respeitadas.

Tabela 2. Equações para similaridade de Froude em modelo de escala reduzida

Parâmetro	Equação
Velocidade	$V_m = \sqrt{\lambda} V_p$
Comprimento característico	$L_m = \lambda L_p$
Raio da inclusão	$R_{inc,m} = \lambda^{0,25} R_{inc,p}$

λ = Fator de escala; m = Modelo; p = Protótipo.

A equação do raio da inclusão mostrada na Tabela 2 considera que a relação entre as massas específicas da inclusão/água são as mesmas da relação inclusão/aço. Porém, esta relação é difícil de ser obedecida em termos de materiais para simular inclusões. Desta forma Sahai e Emi⁽²⁷⁾ propõem que se obedeça a uma relação mais genérica, a Equação 1. O uso desta equação permite, quando conhecidos os valores do fator de escala e da massa específica do aço e das inclusões, determinar o valor da massa específica da inclusão no modelo.

$$\frac{R_{inc,m}}{R_{inc,p}} = \lambda^{0,25} \left[\frac{1 - \frac{\rho_{inc,p}}{\rho_{aço}}}{1 - \frac{\rho_{inc,m}}{\rho_{água}}} \right]^{0,5} \quad (1)$$

Vale lembrar que neste artigo Sahai e Emi⁽²⁷⁾ discutem a questão de crescimento e coalescência de inclusões para uso em simulação numérica, mas em modelos físicos estes são critérios mais difíceis de serem simulados.

Recentemente, Chattopadhyay e Isac,⁽³⁶⁾ em um estudo que alia simulação numérica e validação via modelo físico, propôs um número adimensional específico para a simulação de remoção de inclusões. Este adimensional, chamado de Guthrie (Equação 2), relaciona tempo de residência do distribuidor com o tempo de flotação das inclusões. Consideram os autores que o tempo flotação de inclusões não pode ser calculado somente via Stokes, uma vez que o vetor velocidade de ascensão da inclusão é uma resultante entre o vetor originário da lei de Stokes e os vetores relativos a velocidade de escoamento do aço. Deve-se também levar em conta, nesse caso, o arraste por injeção de gases. Além disso, também deve ser lembrado

que partículas muito pequenas têm tempo de flotação muito grande e, portanto usualmente maiores que o tempo de residência do aço no distribuidor.

$$Gu = \frac{t_{\text{residência}}}{t_{\text{flotação}}} \quad (2)$$

Desta forma, para maior limpeza do aço é necessário operar os distribuidores com elevados valores do número de Guthrie, isto é, distribuidores com altos tempos de residência e baixos tempos de flotação de inclusões. Baixos valores para tempos de flotação são obtidos com inclusões de maior diâmetro ou com a formação de aglomerados de partículas.

4 METODOLOGIAS EMPREGADAS

A Tabela 3 apresenta uma lista dos autores que foram considerados, as características dos modelos construídos, os critérios de similaridade empregados e as técnicas utilizadas para a quantificação das inclusões.

Tabela 2. Principais características dos modelos físicos de distribuidores utilizados por diversos autores

Autor(es)/Ano	Características do modelo físico				Critérios de similaridade	Técnicas utilizadas para quantificação de inclusões
	Dimensões do fundo (LxPxH)	Número de veios	Escala	Formato do distribuidor		
Chattopadhyay; Isac; Guthrie. (2011) ⁽¹⁾	1460x340x167 mm	4 veios	1:3	Delta	Froude	ESZ
Cho; Lee. (2001) ⁽²⁾	1000x300x450 mm (varia com a altura)	1 veio	1:1	Retangular	Froude e Reynolds	Peneira metálica
Fan; Shie; Hwang (2003) ⁽¹⁸⁾	---- x160x330 mm (Informação incompleta)	1 veio	1:3	Retangular	Froude	DTR e Matemático
Jin-Gang et al. (2007) ⁽⁴⁾	780x400x400 mm (varia com a altura)	1 veio	1:2,5	Retangular	Froude	Peneira metálica
Joo; Guthrie. (1993) ⁽⁵⁾	5190x1100x680 mm (varia com a altura)	1 veio	1:1	Retangular	Froude e Reynolds	ESZ
Hojo et al. (1996) ⁽³⁾	7 t (Capacidade)	1 veio	1:2	Retangular	Froude	Turbidez
Miki; Thomas. (1999) ⁽¹⁹⁾	3700x800x1100 mm (varia com a altura)	1 veio	1:1	Retangular	Reynolds	DTR e Matemático
Ramos-Banderas et al. (2003) ⁽²⁰⁾	1344x248x322 (varia com a altura)	1 veio	2:5	Retangular	Froude	DTR e matemático
Nascimento. (2008) ⁽⁶⁾	60 t (Capacidade)	2 veios	1:3	Retangular	Froude	Peneira metálica
Qiang et al. (2009) ⁽⁷⁾	2250x244x400 mm (varia com a altura)	2 veios	1:3	Retangular	Froude	Peneira metálica
Ray; Isac; Guthrie. (2011) ⁽⁸⁾	12 t (Capacidade)	4 veios	1:1	Delta	Froude e Reynolds	Peneira metálica
Rogler; Heaslip; Mehrvar. (2005) ⁽²⁹⁾	1393x190x380 mm (varia com a altura)	1 veio	1:3	Retangular	Froude	Peneira metálica
Seshadri et al. (2012) ⁽¹⁰⁾	60 t (Capacidade)	2 veios	1:3	Retangular	Froude	Peneira metálica
Zhang et al. (2011) ⁽¹¹⁾	2374x256x400 mm (varia com a altura)	2 veios	1:3	Retangular	Froude	Peneira metálica
Zhang; Taniguchi; Cai. (2000) ⁽²¹⁾	2250x300x400 mm	1 veio	1:4	Retangular	Froude	DTR, matemático e indústria

De forma geral pode-se verificar que modelos são construídos em escala de varia entre 1:1 a 1:4, sendo os 1:1 ou 1:3 os mais usuais. Os primeiros com similaridade de Reynolds e Froude e os outros com similaridade de Froude. Dada as especificidades e as forças envolvidas, todos os dois fatores de escala apresentam

bons resultados, com a particularidade que modelos com escala menor são mais fáceis de trabalhar e apresentam um custo menor. Além disso, modelos com similaridade de Froude favorecem os trabalhos ligados à flotação de inclusões, pois abrem mais possibilidades no que tange a escolha do material para simular as inclusões. A questão da redução da escala é limitada pelas dimensões finais do modelo, pois sempre se devem levar em conta as limitações ocasionadas pelo efeito de parede em pequenos modelos.

Entre os modelos físicos empregados nos estudos, dois métodos distintos de quantificação de inclusões não flotantes são mais citados: um mais simples via peneira metálica,^(2,4,6-8,10,11,29) e outro via sensor de quantificação de partículas em meio aquoso, chamado de sistema APS (*Aqueous Particle Sensor*)^(1,5) que utiliza a técnica do tipo ESZ (*Electric Sensing Zone*).

Nos ensaios que utilizam o método de quantificação via peneira metálica, os ensaios têm como objetivo capturar as partículas nos veios de saída do modelo físico. Após o ensaio, as peneiras são secadas e pesadas. A quantificação da eficiência de remoção no distribuidor (inclusões flotantes) é calculada conforme a equação 13.

Sendo que eficiência de remoção (η_R) é a diferença da razão entre a massa coletada no filtro (M_c) e a massa injetada no ensaio (M_i), conforme Equação 3.

$$\eta_R (\%) = 1 - \left(\frac{M_c}{M_i} \right) \times 100 \quad (3)$$

A técnica ESZ foi desenvolvida a partir do sistema LiMCA (*Liquid Metal Cleanliness Analyser*) que inicialmente foi concebido para utilização em alumínio (LiMCA Al) e depois adaptado para aço líquido (LiMCA Fe).

Trabalhos vêm sendo realizados quanto à eficiência da utilização desses sistemas.⁽³⁸⁻⁴³⁾ O método ESZ emprega sensores de corrente elétrica, que sinalizam a redução do sinal de corrente quando ocorre a passagem de partículas não condutoras. Esse método é mais sensível, mas de implementação mais difícil e mais cara que um método de separação via peneiras. Trabalhos comparativos entre os dois métodos não foram encontrados na literatura pesquisada.

4.1 Limpeza do Aço

A literatura vem divulgando estudos das metodologias empregadas na limpeza do aço^(24,34,35,37) na busca de melhorar o escoamento interno no distribuidor, evitar reoxidação do banho (formação de inclusões exógenas) e favorecer a flotação de inclusões. Entre eles encontra-se a utilização de diversos tipos de artifícios tais como: tubos longos,^(1,2,4-8,10,11,29) barreiras,^(4,8) barreiras com furos,^(6,7,8) diques,⁽⁴⁾ injeção de gases inertes no tubo longo,^(1,2) câmara de redemoinho,⁽⁷⁾ cortinas de gás no fundo do distribuidor,^(6,10,11,29) soleira,⁽⁷⁾ inibidores de vortex⁽²⁹⁾ e inibidores de turbulência.^(1,4,6,7,10,11,29) Para fins ilustrativos, na Figura 2 os artifícios mais utilizados estão representados em um distribuidor de dois veios tipicamente utilizado na fabricação de aços longos.

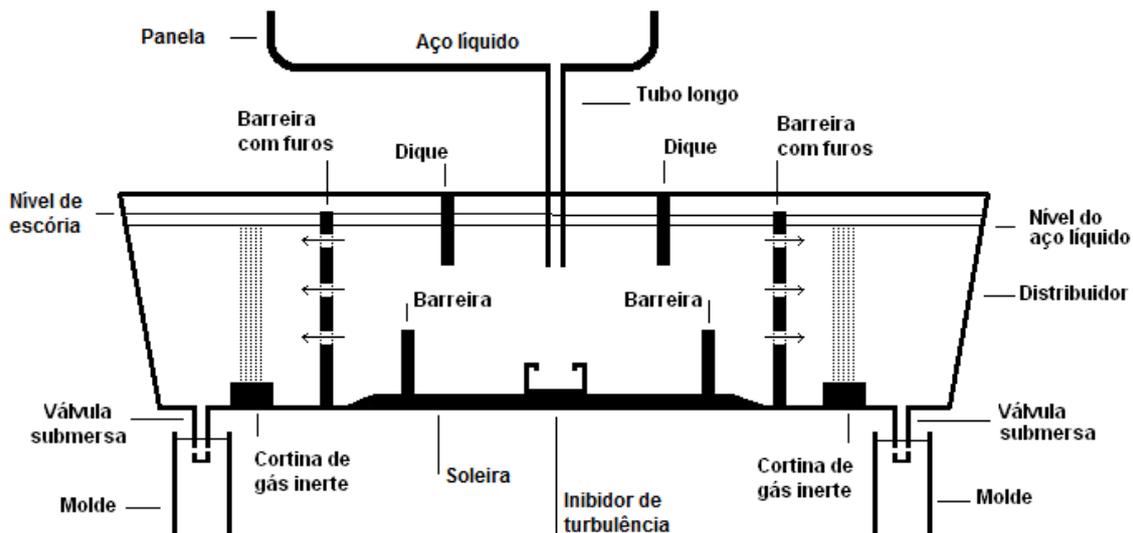


Figura 2. Representação do distribuidor e os artifícios empregados na busca de melhorias na eficiência de remoção de inclusões na produção de aços longos.

O uso do tubo longo para produção de aços especiais é apresentado por autores como artifício para evitar a reoxidação do banho e, conseqüentemente, evitar o aumento da quantidade de inclusões presentes no aço, pois permite a minimização da reoxidação do aço e geração de inclusões (óxidos não metálicos) pela recombinação com o O_2 arrastado.⁽²⁴⁾ Na modelagem física a maioria dos autores utiliza o tubo longo e, no caso apresentado por Chattopadhyay e coautores,⁽¹⁾ um desalinhamento deste pode provocar problemas de homogeneidade térmica e química entre os veios. Os autores em questão mostraram diferenças aproximadamente 8,5 vezes maiores em quantidade de inclusões entre os veios. Os trabalhos, normalmente, utilizam inibidores de turbulência^(4,6,7,10,11,29) na busca de melhor escoamento e melhor a flotação de inclusões, porém poucos comparam a presença e ausência deste no distribuidor.^(4,29) Rogler e coautores⁽²⁹⁾ encontraram aumento de 19,8% na remoção de inclusões, utilizando inibidor de turbulência ao comparar com o distribuidor sem artifícios de modificação. Jin-gang e coautores⁽⁴⁾ encontraram melhoria na remoção de inclusões de 11,7%. Durante a abertura da panela Chattopadhyay, Isac e Guthrie⁽¹⁾ concluíram que a presença do inibidor diminui a quantidade de inclusões passantes e melhora a distribuição das inclusões nos veios.

O uso de barreiras, barreiras com furos e diques como artifícios têm sido bastante frequentes entre os autores. Rogler, Heaslipe e Mehrvar⁽²⁹⁾ apresentaram uma comparação entre uma configuração limpa de distribuidor (sem artifício) e outra com a utilização de barreiras e diques e obtiveram melhoria na remoção de inclusões de 461%. Ray, Isac e Guthrie⁽⁸⁾ também estudaram o uso desses artifícios, porém durante o período transiente do distribuidor, e concluíram que houve melhora nos resultados de inclusões passantes pelo veio quando se utiliza um conjunto de barreiras e diques no distribuidor.

A utilização de gás inerte no distribuidor é uma prática de produção para aços limpos que vem sendo estudada,^(9,20,44-47) em que um dos métodos é a injeção pelo fundo.^(6,10,11,29) Os estudos relatam que a flotação das inclusões é favorecida pela ascensão dos gases em direção à escória. Rogler, Heaslip e Mehrvar⁽²⁹⁾ obtiveram resultados 20% melhores na eficiência de remoção com a aplicação da cortina de gás no fundo do distribuidor. Os autores também estudaram o aumento da vazão de gás e concluíram que existe uma vazão limite benéfica à eficiência de remoção. A

limitação relatada pelos autores seria a turbulência causada pelo gás na superfície do banho de forma a desprender escória e formar macroinclusões que seriam direcionadas para os veios, resultado também obtido por Ramos-Banderas et al.⁽²⁰⁾

Cho e Lee,⁽²⁾ ao injetar gases no tubo longo, mostraram que a eficiência de remoção de inclusões não depende majoritariamente da vazão de gás injetada e sim da homogeneidade das bolhas no fluxo de água do tubo longo. Os autores atingiram maior homogeneidade no fluxo para o ponto mais próximo da válvula gaveta. Wang, Lee e Hayes⁽⁴⁶⁾ fizeram um estudo mais detalhado quanto à distribuição de acordo com a abertura da válvula gaveta, vazão de gás injetado e posição de injeção na busca da melhor eficiência de remoção de inclusões. Os autores afirmam que as bolhas capturam as inclusões e favorecem a remoção de inclusões no distribuidor, inclusive as bolhas podem absorver gases contidos no aço como [O], [N] e [H].

Alguns autores simulam a presença da camada de escória nos ensaios de remoção de inclusões. Rogler, Heaslip e Mehrvar⁽²⁹⁾ ao utilizar uma camada de querosene sobre a água em um distribuidor sem artifícios obtiveram um aumento de 1,8% na remoção de inclusões. No trabalho isto foi atribuído à formação de vórtices próximos à superfície que reinserem as inclusões flotas no banho. Assim, a camada de querosene atua no sentido de absorver e diminuir a reinserção das inclusões no banho.

De uma forma geral pode-se observar que embora todos os artifícios usados individualmente ou em conjunto busquem melhorar o escoamento e a remoção de inclusões, não existe uma regra geral que garanta um determinado desempenho do distribuidor. A configuração interna de cada distribuidor deve ser estudada individualmente de forma a se obter um melhor resultado.

Conforme mostrado na seção 2.2, o tamanho da partícula é modificado via alteração da massa específica da material usado para simular a inclusão. E diferentes autores utilizam diversos materiais para atingir a melhor metodologia de ensaio, conforme mostrado na Tabela 4.

Tabela 4. Principais características de simulação de inclusões do distribuidor utilizadas por diversos autores

Autor(es)/Ano	Fluido de escoamento	Simulação da escória	Material de simulação para inclusões	Distribuição de tamanho de partícula	Massa específica (kg/m ³)	Molhabilidade do material com a água
Chattopadhy; Isac; Guthrie. (2011) ⁽¹⁾	Água	Óleo mineral + polietileno (PE)	Polietileno (PE)	Não informado	920	102° ⁵
Cho; Lee. (2001) ⁽²⁾	Água	Não considerado na simulação	Polietileno (PE) Policloreto de Vinil (PVC) Acrilonitrila Butadieno Estireno (ABS)	421 µm (PE) 144 µm (PVC) 536 µm (ABS) (diâmetro médio)	850 (PE) 1358 (PVC) 1040 (ABS)	102° (PE) 87° (PVC) 72° (ABS)
Fan; Shie; Hwang (2003) ⁽¹⁸⁾	Água (DTR) e aço (Mat.)	Não considerado na simulação	Al ₂ O ₃ , CaO, MgO e SiO ₂ (simulação matemática)	5, 10, 20, 30,50 e 80 µm (diâmetro)	3900 (Al ₂ O ₃) 3320 (CaO) 3650 (MgO) 2200 (SiO ₂)	Não considerado na simulação
Jin-Gang et al. (2007) ⁽⁴⁾	Água	Não considerado na simulação	Poliestireno (PS)	1 mm (diâmetro médio)	Não informado	91°
Joo; Guthrie. (1993) ⁽⁵⁾	Água	Não considerado na simulação	Microesferas de vidro ocas	20 – 110 µm	295	Não informado
Hojo et al. (1996) ⁽³⁾	Água	Não considerado na simulação	Bolhas de vidro	53 – 88 µm	260	Não informado
Miki; Thomas. (1999) ⁽¹⁹⁾	Água (DTR) e aço (Mat.)	Não considerado na simulação	Clusters de Al ₂ O ₃ (simulação matemática)	0,5 µm (simula aglomeração)	4000 e 5000	Não considerado na simulação
Ramos-Banderas et al. (2003) ⁽²⁰⁾	Água	Não considerado na simulação	Relação entre aço e alumina	1-100 µm	500	Não considerado na simulação

Tabela 4. Principais características de simulação de inclusões do distribuidor utilizadas por diversos autores (cont.)

Autor(es)/Ano	Fluido de escoamento	Simulação da escória	Material de simulação para inclusões	Distribuição de tamanho de partícula	Massa específica (kg/m ³)	Molhabilidade do material com a água
Nascimento. (2008) ⁽⁶⁾	Água	Não considerado na simulação	Polipropileno (PP)	50-297 µm (diâmetro)	970	118° ²⁴
Qiang et al. (2009) ⁽⁷⁾	Água	Não considerado na simulação	Polipropileno (PP)	120-160 µm (diâmetro)	912	118°
Ray; Isac; Guthrie. (2011) ⁽⁸⁾	Água	Poliétileno (PE)	Poliétileno (PE)	3,2 mm (diâmetro médio)	935	102° ⁵
Rogler; Heaslip; Mehrvar. (2005) ⁽²⁹⁾	Água	Querosene	Poliétileno (PE)	53-75 µm e 75-106 µm (diâmetro)	370	105°
Seshadri et al. (2012) ⁽¹⁰⁾	Água	Não considerado na simulação	Polímero	50-100 µm e 100-200 µm (diâmetro)	970	Não informado
Zhang et al. (2011) ⁽¹¹⁾	Água	Querosene + óleo	Alumina (Al ₂ O ₃)	44-500 µm (raio)	980	Não informado
Zhang; Taniguchi; Cai. (2000) ⁽²¹⁾	Água (DTR) e aço (Mat.)	Escória básica (indústria)	Alumina (Al ₂ O ₃)	1 – 75 µm	3000	Não informado

Cho e Lee⁽²⁾ compararam três materiais para a simulação das inclusões e comparou-os com os resultados obtidos nos ensaios. De acordo com este estudo, a molhabilidade do material com o fluido de simulação é um fator importante na eficiência de remoção. A diferença na eficiência de remoção ficou em 20% maior para o polietileno frente ao PVC e o ABS (molhabilidade na Tabela 4). Zheng, Hayes e Lee⁽⁴⁷⁾ também constataram essa importância, comparando o poliestireno com o PVC e obtiveram resultados de aproximadamente 20% melhores em eficiência de remoção com o poliestireno. Assim, torna-se relevante escolher o material de simulação da inclusão de modo que esteja próximo da molhabilidade das inclusões do protótipo com o aço líquido. Por exemplo, a molhabilidade das inclusões sílica e alumina em aço líquido são 115° e 144°, respectivamente.

De forma geral pode-se concluir que manter os parâmetros de tamanho de inclusão via critérios de similaridade é importante, mas também é necessário preocupar-se com os fenômenos ligados a molhabilidade e ângulos de contato, pois as forças de tensão superficial também são relevantes no processo de flotação de inclusões.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Muitos trabalhos têm sido implementados na modelagem física de remoção de inclusões. Alguns estudos envolvem a construção de modelos físicos de distribuidores e outros se destinam a estudar casos mais particulares, como a implementação de um artifício específico, do tipo inibidor de turbulência ou outros. Poucos, entretanto, discutem os critérios de similaridade e a relevância das forças envolvidas no processo.

De forma geral, pode-se verificar que modelos em escala 1:1 ou 1:3 são os mais usuais. Os dois fatores de escala apresentam bons resultados, com a particularidade que modelos com escala menor são mais fáceis de trabalhar e apresentam um custo menor embora a redução de escala apresente a limitação do efeito de parede. Além disso, modelos com similaridade de Froude favorecem os trabalhos ligados à flotação de inclusões pois abrem mais possibilidades no que tange a escolha do material para simulá-las.

Com relação a simulação das inclusões especificamente, pode-se verificar que além da similaridade de Froude é importante observar a questão da molhabilidade e de ângulos de contato, pois a tensão superficial também é relevante no processo de flotação de inclusões.

Para a quantificação de inclusões observou-se que os dois métodos mais frequentes na literatura são o de separação via peneiras e análise via sensor de corrente elétrica (ESZ). O primeiro método é de implementação mais fácil e de menor custo, além de apresentar resultados adequados.

Agradecimentos

Ao CNPq pela bolsa concedida ao aluno de mestrado do Programa de Pós Graduação de Engenharia de Minas, Metalúrgica e Materiais (PPGE3M) da UFRGS Felipe das Dôres Machado.

Aos bolsistas de iniciação científica do Laboratório de Siderurgia da Escola de Engenharia da UFRGS: Lucas Machado Moreira e Elisa Araujo Santos Darsie.

REFERÊNCIAS

- 1 CHATTOPADHYAY, K.; ISAC, M.; GUTHRIE, R. I. L. Physical and Mathematical Modelling to Study the Effect of Ladle Shroud Mis-alignment on Liquid Metal Quality in a Tundish. The iron and steel institute of Japan international, v. 51, p. 759-68, 2011.
- 2 CHO, J.; LEE, H. Cold model study on inclusion removal from liquid steel using fine gas bubbles. The iron and steel institute of Japan international, v. 41, p. 151-7, 2001.
- 3 HOJO, M. et al. Oxide inclusion control in ladle and tundish for producing Clean stainless steel. The iron and steel institute of Japan international, v. 36, p. 128-31, 1996.
- 4 JIN-GANG, L. et al. Water modeling of optimizing tundish flow field. Journal of iron and steel research, v. 14, p. 13-19, 2007.
- 5 JOO, S.; GUTHRIE, R. I. L. Inclusion behavior and heat-transfer phenomena in steelmaking tundish operations Part I. aqueous. Metallurgical transactions, v. 24, p. 755-65, 1993.
- 6 NASCIMENTO, R. P. Remoção de inclusões não-metálicas do aço líquido através do borbulhamento de Argônio pelo fundo distribuidor de lingotamento contínuo da ArcelorMittal Tubarão. Dissertação de Mestrado. Ouro Preto: Universidade Federal de Ouro Preto, Out. 2008.
- 7 QIANG, Y. et al. Water Modeling of Swirling Flow Tundish for Steel Continuous Casting. Journal of iron and steel research international, v. 16, p. 17-22, 2009.
- 8 RAY, S. K.; ISAC, M.; GUTHRIE, R. I. L. Modelling performance of four-strand, 12 t, delta shaped continuous casting tundish fitted with different flow modifying arrangements for better steel quality. Ironmaking and Steelmaking, v. 38, p. 173-80, 2011.
- 9 ROGLER, J. P.; HEASLIP, L. J.; MEHRVAR, M. Inclusion removal in a tundish by gas bubbling. Canadian Metallurgical Quarterly, v. 43, p. 407-16, 2004.
- 10 SESHADRI, V. et al. A physical modelling study of inclusion removal in tundish using inert gas curtain. Tecnologia em metalurgia, materiais e mineração, v. 9, p. 22-9, 2012.
- 11 ZHANG, M.J. et al. Physical e mathematical modeling of inclusion removal with gas bottom-blowing in continuous casting tundish. Journal of mining and metallurgy, v. 47, p. 37-44, 2011.
- 12 JHA, P. K.; RAO, P. S.; DEWAN, A. Effect of height and position of dams on inclusion removal in a six strand tundish. The iron and steel institute of Japan international, v. 48, p. 154-60, 2008.
- 13 JOO, S.; HAN, J. W.; GUTHRIE, R. I. L. Inclusion behavior and heat-transfer phenomena in steelmaking tundish operations: Part II. mathematical model for liquid steel in tundishes. Metallurgical transactions, v. 24, p. 767-77, 1993.

- 14 JOO, S.; HAN, J. W.; GUTHRIE, R. I. L. Inclusion behavior and heat-transfer phenomena in steelmaking tundish operations: Part III. Applications – Computational approach to tundish design. *Metallurgical transactions*, v. 24, p. 779-88, 1993.
- 15 SINHA, A. K.; SAHAI, Y. Mathematical modeling of inclusion transport and removal in continuous casting tundishes. *The iron and steel institute of Japan international*, v. 33, p. 556-65, 1993.
- 16 WANG, L.; LEE, H.; HAYES, P. Prediction of the optimum bubble size for inclusion removal from molten steel by flotation. *The iron and steel institute of Japan international*, v. 36, p. 7-16, 1996.
- 17 ZHONG, L. et al. Fluid flow in a four-strand bloom continuous casting tundish with different flow modifiers. *The iron and steel institute of Japan international*, v. 47, p. 88-94, 2007.
- 18 FAN, C. M.; SHIE, R. J.; WANG, W. S. Studies by mathematical and physical modelling of fluid flow and inclusion removal phenomena in slab tundish for casting stainless steel using various flow control device designs. *Ironmaking and Steelmaking*, v. 30, p. 341-7, 2003.
- 19 MIKI, Y.; THOMAS, B. G. Modeling of inclusion removal in a tundish. *Metallurgical and materials transactions*, v. 30, p. 641-54, 1999.
- 20 RAMOS-BANDERAS, A. et al. Mathematical simulation and modeling of steel flow with gas bubbling in trough type tundishes. *The iron and steel institute of Japan international*, v. 43, p. 653-62, 2003.
- 21 ZHANG, L.; TANIGUSHI, S.; CAI, K. Fluid flow and inclusion removal in continuous casting tundish. *Metallurgical and materials transactions*, v. 31, p. 253-66, 2000.
- 22 SZEKELY, J., EVANS, J. W. e BRIMACOMBE, J. K. *The mathematical and physical modeling of primary metals processing operations*. Wiley-Interscience, Nova York, 1988.
- 23 MAZUMDAR, D.; EVANS, J. W. *Modeling of steelmaking process*. CRC Press, 2009.
- 24 SAHAI, Y.; EMI, T. *Tundish technology for clean steel production*. World Scientific Publishing Company, 2007.
- 25 SAHAI, Y.; AHUJA, R. Fluid dynamics of continuous casting tundishes – Physical Modeling. *Proc. Steelmaking Conf., ISS-AIME, Washington DC*, v. 69, p. 677-87, 1986.
- 26 MAZUMDAR, D.; GUTHRIE, I. L. R. The physical and mathematical modeling of continuous casting tundish systems. *ISIJ Intern.*, v. 39, n. 6, p. 524-47, 1999.
- 27 SAHAI, Y.; EMI, T. Criteria for water modeling of melt flow and inclusion removal in continuous casting tundishes. *The iron and steel institute of Japan international*, v. 36, p. 1166-73, 1996.
- 28 MIKI, Y. et al. Model of inclusion removal during RH degassing of steel. *Iron and Steelmaker*, v. 24, p. 31-8, 1997.
- 29 ROGLER, J. P.; HEASLIP, L. J.; MEHRVAR, M. Physical modelling of inclusion removal in a tundish by gas bubbling. *Canadian metallurgical quarterly*, v. 44, p. 357-68, 2005.
- 30 FRANÇOIS, M. G., BOCK, M. L. e VILELA, A. C. F. How to chose a good flow modifier/tundish set in the continuous casting of steel. *XXXVII Seminário de aciaria, Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais –ABM, Porto Alegre*, p.388-97, 2006.
- 31 PEREIRA, J. A. M. et al. Physical and numerical modelling of steel process optimization. *Steel grips*, v. 5., n. 1 , 2007.
- 32 WOLLMANN, A. M. et al . *Modelamento Físico do Distribuidor de Lingotamento Contínuo da Aços Finos Piratini*. 11º Seminário de Aciaria do IAS, Imprensa Amalevi, Buenos Aires, 1997.
- 33 PEREIRA, J. A. M. *Modelamento físico de uma panela siderúrgica não cilíndrica agitada com gás*. Tese de Doutorado. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2011.
- 34 TANAKA, H. et al. Quantitative analysis of contamination of molten steel in tundish. *The iron and steel institute of Japan international*, v. 33, p. 1238-43, 1993.
- 35 TANAKA, H. et al. Technology for cleaning of molten steel in tundish. *The iron and steel institute of Japan international*, v. 34, p. 868-75, 1994.

- 36 CHATTOPADHYAY, K.; ISAC, M. Dimensionless numbers for tundish modelling and the Guthrie number (Gu). *Ironmaking and Steelmaking*, v. 39, p. 273-83, 2012.
- 37 ZHANG, L.; THOMAS, B. G. State of the art in evaluation and control of steel cleanlines, v. 43, p. 271-91, 2003.
- 38 ARAI, H. et al. Model experiment on inclusion removal by bubble flotation model experiment on inclusion removal by bubble flotation. *The iron and steel institute of Japan international*, v. 49, p. 965-74, 2009.
- 39 ATKINSON, H. V.; SHI, G. Characterization of inclusions in clean steels: a review including the statistics of extremes methods. *Progress in Materials Science*, v. 48, p. 457–520, 2002.
- 40 GUTHRIE, R. I. L.; LI, M. In situ detection of inclusions in liquid metals: Part I. mathematical modeling of the behavior of particles traversing the electric sensing zone. *Metallurgical and materials transactions*, v. 32, p. 1067-79, 2000.
- 41 GUTHRIE, R. I. L.; LI, M. In situ detection of inclusions in liquid metals: Part II. metallurgical applications of LiMCA systems. *Metallurgical and materials transactions*, v. 32, p. 1081-93, 2000.
- 42 GUTHRIE, R. I. L. Fluid Flows in Metallurgy—Friend or Foe? *Metallurgical and materials transactions*, v. 35, p. 417-37, 2004.
- 43 LI, M; CAROZZA, C. GUTHRIE, R. I. L.; Particle discrimination in water based LiMCA (liquid metal cleanliness analyzer) system. *Canadian Metallurgical Quarterly*, v. 39, p. 325-38, 2000.
- 44 KUMAR, D. S. et al. Forced flotation of inclusions in tundish. *Ironmaking and Steelmaking*, v. 36, p. 400-75, 2009.
- 45 ZHANG, L.; TANIGUSHI, S. Fundamentals of inclusion removal from liquid steel by bubble flotation. *International materials reviews*, v. 45, p. 59-82, 2000.
- 46 WANG, L.; LEE, H.; HAYES, P. A new approach to molten steel retining using fine gas bubbles. *The iron and steel institute of Japan international* v. 36, p. 17-24, 1996.
- 47 ZHENG, X.; HAYES, P. C.; LEE, H. Particle removal from liquid phase using fine gas bubbles. *The iron and steel institute of Japan international* v. 37, p. 1091-7, 1997.