



DISTRIBUIÇÃO DE FLUXO NO INTERIOR DE UM DISTRIBUIDOR DE LINGOTAMENTO CONTÍNUO DEFINIDO POR UM NOVO DISPOSITIVO DE CONTROLE DE FLUXO¹

Daniel Mapa Clemente²
Carlos Antônio da Silva³
Itavahn Alves da Silva⁴
Varadarajan Seshadri⁵

Resumo

Os mecanismos de flotação e separação de inclusões no distribuidor são regidos pela velocidade de lingotamento, geometria e dispositivos de controle de fluxo. As instabilidades fluidodinâmicas na zona do jato da panela são capazes de causar contaminação do aço, devido aos fenômenos de reoxidação e emulsificação da escória de cobertura. Diversos dispositivos de confinamento e inibidores de turbulência da zona do jato da panela têm sido reportados na literatura. Neste trabalho são apresentados e discutidos os resultados metalúrgicos de um distribuidor dotado de uma câmara de turbilhamento equipada com aletas. A influência de parâmetros tais como: dimensões das aletas e geometria do fundo do inibidor sobre a remoção de inclusões, na zona do jato de aço oriundo da panela para o distribuidor, são avaliados.

Palavras-chave: Dispositivo de controle de fluxo; Distribuidor; Inibidor de turbulência; Flotação de inclusões.

FLOW DISTRIBUTION INSIDE A CONTINUOUS CASTING TUNDISH AS DEFINED BY A NOVEL FLOW CONTROL DEVICE

Abstract

The mechanisms of flotation and separation of inclusions in the tundish are governed by casting speed, geometry and flow control devices. The instabilities of the jet fluid dynamics in the pouring jet ladle zone are capable of causing contamination of the steel due to the phenomena of emulsification and reoxidation of cover slag. Several devices for confining and inhibitors of turbulence of the steel jet from the ladle have been reported in the literature. This paper presents and discusses the metallurgical results of a tundish equipped with a whirlpool chamber equipped with guide plates. Parameters such as dimensions of the fins and geometry of the bottom of the inhibitor on the removal of inclusion, in the area of steel jet coming from the ladle to the tundish, are evaluated.

Key words: Flow control device; Tundish; Turbulence inhibitor; Inclusion flotation.

¹ Contribuição técnica ao 43º Seminário de Aciaria – Internacional, 20 a 23 de maio de 2012, Belo Horizonte, MG, Brasil.

² Aluno de graduação do Curso de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Escola de Minas, UFOP - danielnaufop@yahoo.com.br.

³ MSc, PhD, Professor, Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Escola de Minas, UFOP - casilva@em.ufop.br.

⁴ MSc, DSc. Professor, Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Escola de Minas, UFOP - itavahnufop@yahoo.com.br.

⁵ Dr. Ing. Professor Emérito do Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, UFMG. seshadri@demet.ufmg.br.



1 INTRODUÇÃO

Atualmente, cerca de 95% do aço bruto produzido no mundo é processado via rota de lingotamento contínuo. Admite-se que a limpidez interna destes aços deve ser consumada no distribuidor e preservada no molde da máquina de lingotamento contínuo. As reações químicas ocorrentes no distribuidor, os fenômenos de misturamento e emulsificação, determinados em particular pelo campo de velocidades (que rege o fenômeno de aglomeração, flotação e absorção de inclusões não-metálicas pela escória de cobertura) têm influência decisiva sobre a qualidade interna do aço líquido. O uso de dispositivos modificadores de fluxos do aço, tais como diques, barragens, inibidores de turbulência e vórtices, é uma prática corrente para estimular a flotação e remoção de inclusões não-metálicas e garantir a limpidez interna do aço. Uma visão resumida de alguns fenômenos que ocorrem no distribuidor é mostrada na Figura 1.

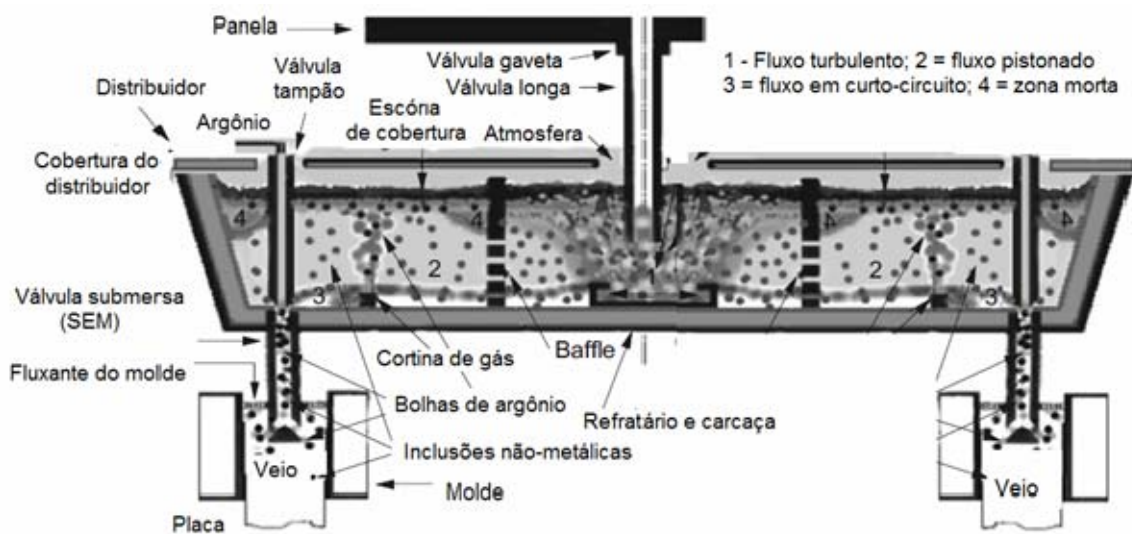


Figura 1. Detalhes de um distribuidor da máquina de lingotamento contínuo.

O supressor ou inibidor de turbulência do jato (por exemplo: *turbostop*) tem a tarefa de confinar e de reorientar o fluxo descarregado pelo jato da panela na direção da escória de cobertura (Figura 2), de modo a facilitar a colisão, aglomeração, flotação e absorção das inclusões pela escória de cobertura).⁽¹⁻⁷⁾ A eficiência deste método é dependente da taxa de dissipação de energia cinética de turbulência e também pela inibição da formação de emulsão metal-escória e do contato entre superfície exposta de aço e atmosfera, nas imediações da válvula longa. Então, a abertura de “olho” junto à válvula longa precisa ser evitada. Por questões de segurança a projeção de gotas metálicas, durante os períodos de elevada taxa de reenchimento do distribuidor deve ser mantida ao mínimo.

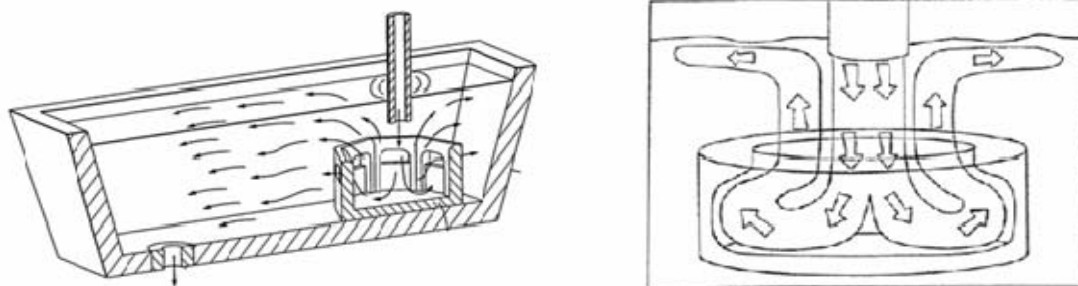


Figura 2. Distribuidor equipado com dispositivo supressor (inibidor) de turbulência do jato da panela.

Um outro método, metalurgicamente eficiente, consiste em induzir uma força centrífuga para remoção de inclusões, por meio da ação de um fluxo circular do aço entrante no distribuidor, acionado por um campo magnético na parte externa da câmara de rotação (Figura 3). Neste caso, o distribuidor (*Centrifugal Flow Tundish - CFT*) é composto de duas subdivisões: a) câmara rotacional de formato cilíndrico, por onde é vazado o aço; e b) câmara com formato trapezoidal, contígua à câmara de centrifugação.

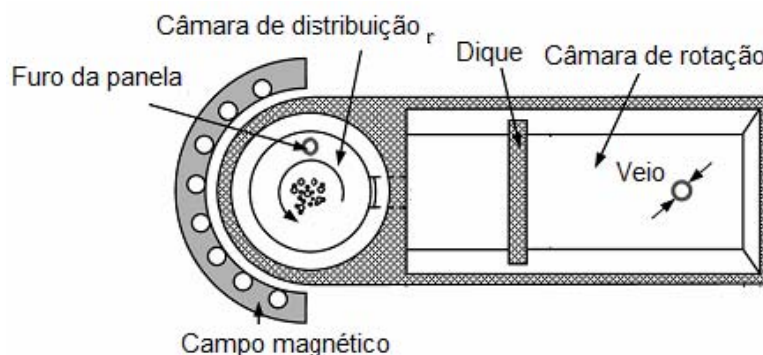


Figura 3. Esquema de um CFT mobiliado com um dique entre o veio e câmara de centrifugação magnética.⁽⁴⁾

A técnica mais recente de controle do jato de aço da panela, denominada SFT (*Swirling flow tundish*), tem como princípio fluidodinâmico o turbilhonamento do aço líquido em uma câmara de centrifugação (Figura 4). A distribuição assimétrica do aço na câmara de turbilhonamento propicia as colisões, aglomeração e remoção das inclusões não-metálicas, oriundas especialmente da panela. Hou et al.^(1,2) reportam que a intensidade de agitação do aço torna-se mitigada na região após o mobiliário dique e barragem componente do distribuidor.

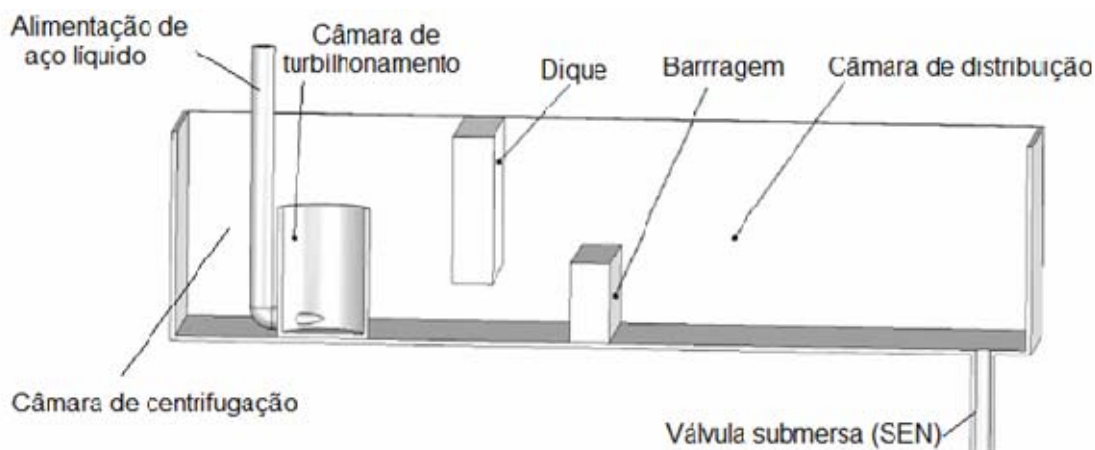


Figura 4. Distribuidor dotado com câmara de centrifugação (SFT).



A Figura 5 compara as distribuições de fluxos de aço líquido em um distribuidor dotado de inibidor de turbulência (TI) e outro equipado com câmara de turbilhonamento (SFT), demonstrando a densificação e direcionamento do fluxo de aço na direção da escória de cobertura, o que favoreceria as colisões e aglomerações de inclusões. Hou et al.^(1,2) reportam que a eficiência de remoção de inclusões não-metálicas do reator SFT é substancialmente maior do que a do distribuidor dotado com inibidor de turbulência (TI).

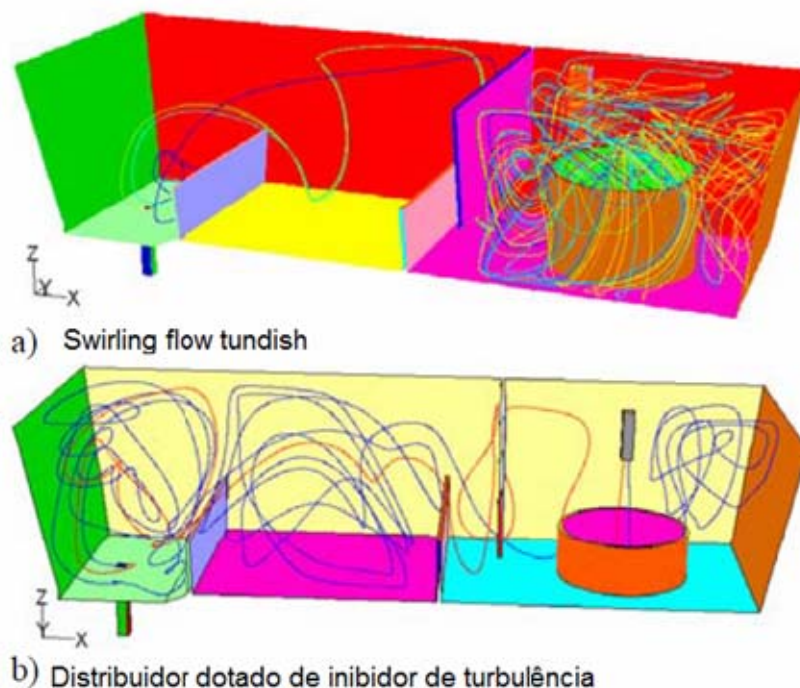


Figura 5. Distribuições de fluxos em distribuidor com diferentes mobiliários.^(1,2)

Esta contribuição trata da concepção de um inibidor de turbulência, cilíndrico e dotado de aletas, desenvolvido com o objetivo de controlar o fluxo no interior de um distribuidor.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

Para condução dos experimentos, utilizou-se um modelo físico em acrílico de um distribuidor de lingotamento contínuo com fundo curvo, na escala $\lambda = 1:3$, equipado com o dispositivo de controle de turbulência do jato da panela (Figura 6).



Distribuidor



Inibidor

Figura 6. Vista do modelo físico do distribuidor com fundo curvo e do modificador do fluxo do jato da panela.



Aspectos gerais do fluxo foram determinados via análise de curvas de DTR. Para tanto, o distribuidor foi dotado de Condutivímetros nas saídas correspondentes aos dois veios e Medidores de Vazão nas saídas para os veios e na entrada. Sinais destes aparelhos forma transmitidos via placa A/D de aquisição de sinais a um PC, para fins de processamento posterior. Como usual, os parâmetros de análise foram o tempo mínimo de residência, a fração de volume morto, a extensão de material intermix gerado em transição de grau (descarte) e o número de Peclet como critério de dispersão. A vazão de entrada foi de 80 l/min e a vazão de saída em cada válvula submersa foi de 40 l/min, a qual corresponde a 4,4 ton de aço/min. Estes valores foram obtidos após aplicação do critério de semelhança baseado no número de

Froude, $Q_{modelo} = \lambda^{2,5} Q_{industrial}$. A quantidade de aço no distribuidor operando em regime permanente, para a condução dos experimentos, foi de 40 toneladas.

Testes de projeção durante reenchimento foram realizados recolhendo-se as gotas projetadas em um feltro seco (Figura 7). Para tanto, partia-se sempre com o distribuidor vazio, com as saídas para as *SEN*'s fechadas, e com alimentação arbitrariamente fixada em 120 lpm (contra 80 lpm em ritmo de cruzeiro). O peso de água coletado quando o nível de líquido no distribuidor atingia 5 cm ou 11 cm do nível de cruzeiro foi tomado como critério de intensidade de projeção.

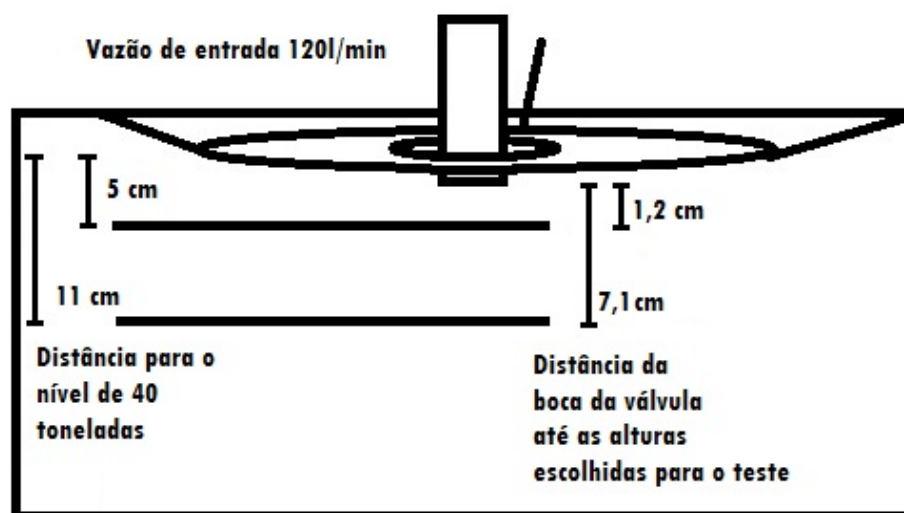


Figura 7. Posicionamento e configuração do feltro usado em um teste de projeção.

Para avaliar o tamanho e morfologia do “olho”, causado pelo jato ascendente de aço nas imediações da válvula longa, (que é um local de reoxidação e contaminação do aço), foram utilizadas partículas poliméricas de diâmetro entre 1,4 mm e 3,5 mm, de forma a emular a escória de cobertura no distribuidor. A Figura 8 mostra a abertura da camada de escória, ao redor da válvula longa, sendo a área de exposição ao ar medida com base em uma sequência de frames.



Figura 8. Vista superior da região do jato da panela no distribuidor.

Quanto à nova proposta de inibidor, confinador de turbulência, foi construído na forma cilíndrica, com diâmetro de 195 mm e altura média de 250 mm. Na parte interna foram colocadas quatro aletas, com vista a gerar fluxo espiralado. De modo a modificar o padrão de fluxo optou-se por alterar a largura das aletas (mantendo-se a angulação de 45°), entre 20 mm e 40 mm, além da forma do fundo do inibidor (Figura 9).



Figura 9. Vista interna da configuração de uma aleta para a indução do movimento espiralado na câmara de rotação.

Eventualmente, a caracterização visual do padrão de fluxo foi realizada pela observação da dispersão de solução alcoólica saturada em anilina, injetada junto à válvula longa.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

As curvas RTD permitiram identificar diferenças significativas, quando foram comparados o inibidor padrão e as diversas versões do inibidor de aletas. A



Tabela 1 faz uma comparação entre as médias dos valores obtidos para inibidor padrão e inibidor com aletas (de 20 mm de largura a 45 graus), fundo curvo e fundo plano.

Tabela 1. Resultado comparativo de algumas versões de inibidor

	Descarte (ton)		Fração de volume morto		Tempo mínimo de residência (s)		% de inclusões 50 microns flotadas no distribuidor	
	Veio 1	Veio 2	Veio 1	Veio 2	Veio 1	Veio 2	Veio 1	Veio 2
Inibidor padrão	14,162	14,727	0,169	0,172	55,480	51,883	3,970	3,72
Aletas, 20 mm, 45º, fundo curvo	18,885	16,807	0,300	0,272	49,664	42,704	3,560	3,07
Aletas, 20 mm, 45º, fundo plano	15,899	16,319	0,284	0,234	47,185	55,085	3,386	3,942

Pela comparação entre os valores obtidos para os dois modelos, é notável o fato de que o novo modelo não levou a resultados melhores do que o modelo padrão, notadamente no caso de inibidor com aletas e fundo curvo. Observa-se que o volume de descarte é maior e que o tempo mínimo de residência é inferior nos dois veios. A flotação, nesse caso das partículas de 50 microns, foi também inferior. Outro parâmetro importante é a fração de volume morto, que foi maior nos dois veios para o novo modelo. Observe-se também a assimetria de fluxo, principalmente no caso de fundo curvo.

A instalação de um fundo plano no inibidor com aletas provocou melhora sensível, mas os resultados foram ainda inferiores ao inibidor padrão.

A comparação desses resultados com outros modelos propostos é inevitável, porém deve ser limitada. Por exemplo, YUE *et al.*⁽⁵⁾ conseguiu que o modelo SFT flotasse mais inclusões, tivesse tempo mínimo de residência maior e menor fração de volume morto do que o inibidor de turbulência utilizado para comparação. Entretanto, as condições dos testes realizados por esses pesquisadores e o proposto no presente trabalho são diferentes, uma vez que, dentre outros aspectos, não há garantias da similaridade dos dois modelos de inibidor padrão utilizados para comparação. Apesar disso, é válido notar que o movimento helicoidal pode gerar resultados positivos, como sugeridos na literatura.

A injeção de anilina dissolvida em álcool permitiu verificar que o fluido, com o novo modelo de inibidor de turbulência com aletas, teve seu fluxo direcionado para cima, assim como no inibidor de turbulência padrão. Estes resultados são consoantes aos observados por diversos autores.⁽¹⁻⁷⁾

Porém, para tempos mais longos, o traçador parece apresentar maior grau de dispersão no novo caso do inibidor com aletas. Isto já teria sido verificado nas curvas de distribuição de tempo de residência e foi apenas confirmado nestes testes. Como se sabe, a análise via RTD permite estimar o número de Peclet característico do fluxo como:

$$Pe = VL/D$$

Onde V e L são a velocidade e o comprimento de referência, e D representa a difusividade efetiva para o fluxo (um valor de Difusividade do traçador capaz de reproduzir a dispersão observada). De acordo com este modelo:

- Peclet crescente sugere maior fração de fluxo piston;
- Peclet decrescente sugere maiores níveis de mistura.



Para o distribuidor dotado do inibidor padrão se encontrou número de Peclet da ordem 4,37, o novo inibidor com fundo curvo 1,87 e o novo inibidor com fundo plano 2,52. Então, comparativamente, a difusividade efetiva (e então o grau de dispersão) para o novo modelo de inibidor é significativamente maior. Daí, para este, os menores valores de tempo mínimo e maiores valores de volume morto.

A Figura 10 mostra, graficamente, os resultados dos testes de projeção. Mediu-se a massa de água absorvida pelo feltro. Como média, a taxa de projeção para o inibidor padrão parece ser 25% maior que a taxa de projeção referente ao novo inibidor (de fundo curvo, com aletas de 20 mm), quando se mede a massa absorvida na distância de 5 cm. Não se nota diferença sensível para a distância de captação 11 cm.

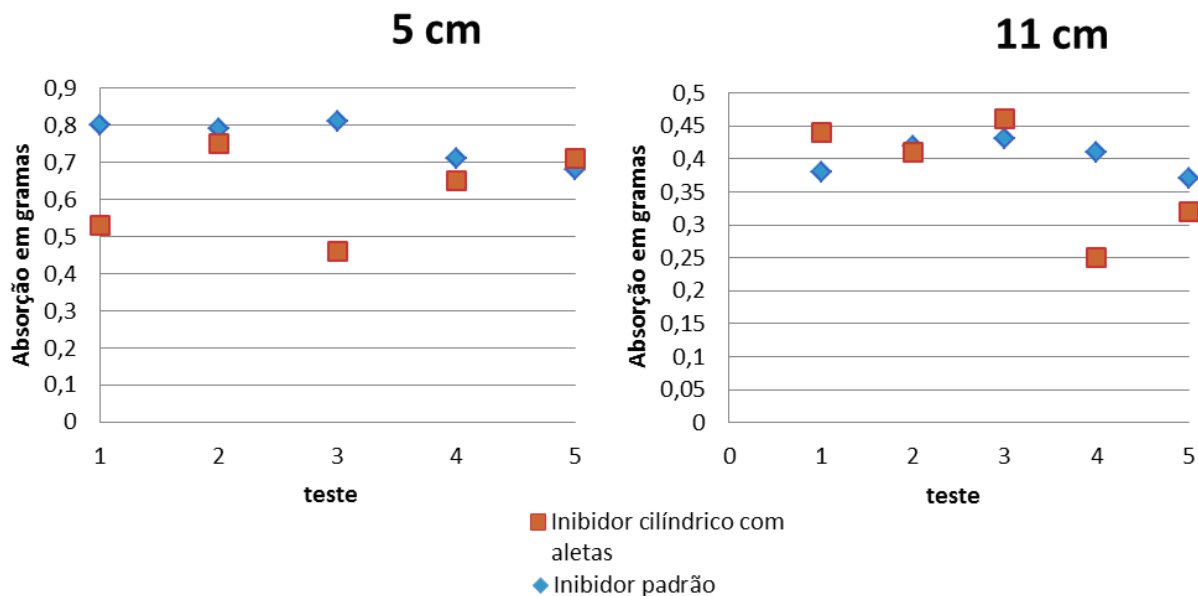


Figura 10. Projeção de líquido durante o enchimento do distribuidor na região do jato da panela.

De modo a mostrar uma síntese dos resultados, as várias versões de inibidores foram identificadas: Inibidor padrão, inibidor com aletas de 20 mm a 45 graus e fundo curvo, inibidor com aletas de 20 mm a 45 graus e fundo plano, inibidor com aletas de 40 mm a 45 graus e fundo plano, figuras seguintes.

Como se nota, a partir da Figura 11, os valores de tempo mínimo e, portanto, do potencial de flotação de inclusões podem ser recuperados aos níveis do inibidor de turbulência padrão, tomado como base de comparação.

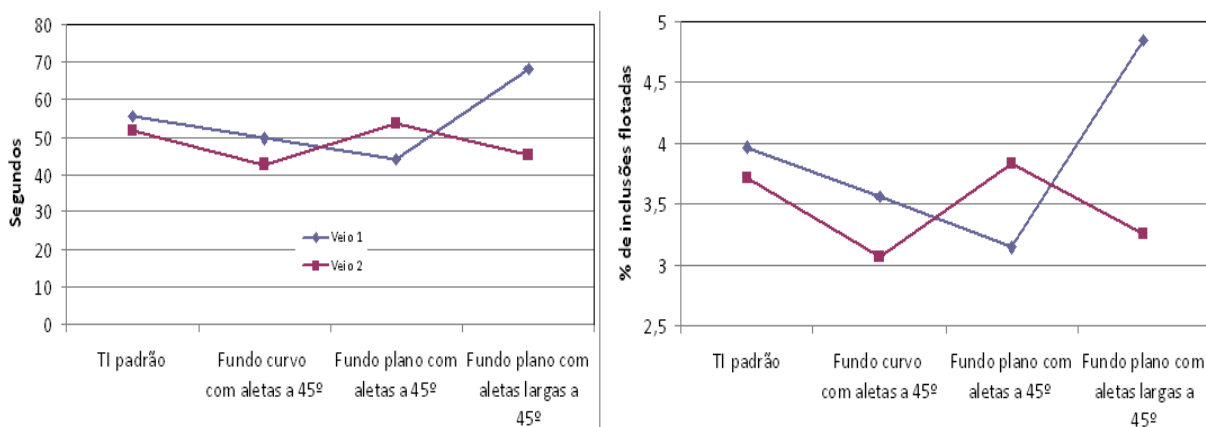


Figura 11. Comparativo entre tempos mínimos e % de inclusões de 50 microns flotadas no distribuidor, para os vários inibidores.



A Figura 12 sugere que as novas configurações de inibidor, cujos resultados são aqui apresentados, levam a um maior grau de dispersão (e então a menores valores do número de Peclet), o que se traduziria por uma transição mais longa entre dois tipos de aço lingotados sequencialmente. Por conseguinte, em maiores valores de intermix.

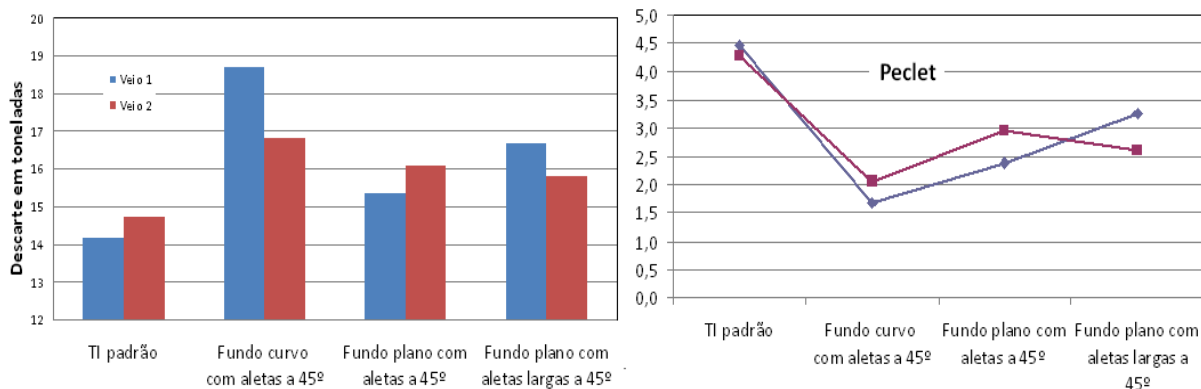


Figura 12. Comparativo para produção de aço de mistura, vários inibidores.

Por outro lado, a Figura 13 indica que os inibidores de aletas potencialmente seriam capazes de gerar menor quantidade de projeção, o que do ponto de vista de segurança representa um ponto favorável.

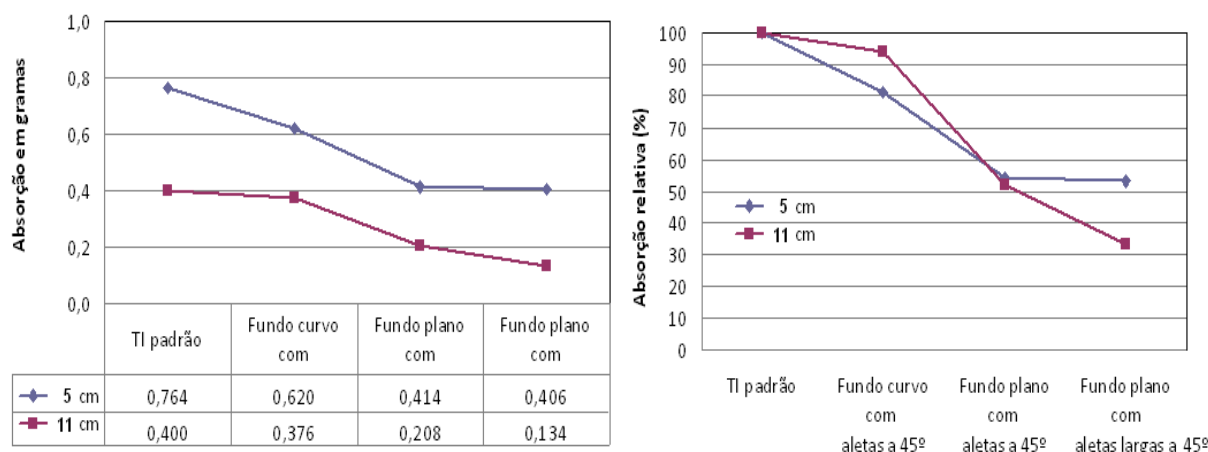


Figura 13. Comparativo entre índice de projeção durante reenchimento, vários inibidores.

O último parâmetro investigado referiu-se ao tamanho da área exposta à oxidação do aço em torno da válvula longa. Os resultados obtidos demonstram diminuição da área desse “olho” em comparação com a gerada pelo inibidor de turbulência padrão. Os valores obtidos, para o inibidor padrão e para o novo modelo de inibidor com aletas largas a 45° de inclinação, foram 1.131 cm² e 716 cm² respectivamente. Isto denota que o novo modelo de inibidor de turbulência resultaria em menor taxa de oxidação do aço em torno da válvula longa.

4 CONCLUSÕES

A análise dos resultados permitiu determinar diferenças entre os dois modelos de inibidor de turbulência utilizados:



- o comportamento fluidodinâmico do aço no distribuidor mostrou-se influenciado pelo tipo, dimensões e configuração do inibidor de turbulência na região do jato da panela;
- o uso do dispositivo de centrifugação com fundo curvo resultou em menor tempo mínimo de residência, maior descarte em toneladas, maior fração de volume morto e, em tese, menor capacidade de flotação de inclusões em comparação com o inibidor padrão utilizado;
- no caso de inibidor de fundo plano, resultados melhores (comparados ao inibidor de fundo curvo) foram obtidos em termos de tempo mínimo de residência, quantidade de descarte e fração de volume morto.
- da análise da dispersão de corante, pôde-se mostrar que o tempo mínimo de residência no novo modelo, para todas as configurações investigadas, se mostrou novamente inferior ao obtido pelo uso do inibidor de turbulência padrão;
- contudo, a taxa de projeção de aço sugere que o novo inibidor apresenta melhores resultados (menor taxa de projeção);
- a área exposta à oxidação do aço, pelo modelo de inibidor proposto, em torno da válvula longa, mostrou-se inferior à do inibidor padrão; e
- experimentos extras carecem de ser conduzidos, envolvendo outras condições operacionais (instalação de diques e barragens em torno da zona do jato da panela; rearranjo das placas-guia) de modo a maximizar a densidade de fluxo e flotação das inclusões nesta região do distribuidor.

REFERÊNCIAS

- 1 HOU, Q.F; WANG, H.Y; YUE, Q; ZOU, Z.S & YU, A. B - Physical and Mathematical Modelling of swirling Flow Tundish. – Fifth International Conference on CFD on the Process Industries CSIRO, Melbourne, Australia, 13-15 December, 2006
- 2 HOU, Q.F, WANG, H.Y, YUE,Q., ZOU, Z.S, YU, B.A. Physical and Mathematical Modeling of Swirling Flow Tundish. International Conference on CFD in the Process Industries, 5. 2006. Melbourne.
- 3 LIU, J.G; YAN, G,G; LIU, L & WANG, X.A - Water Modeling of Optimizing Tundish Flow Field. Journal of Iron and Steel Research, International.2007, 14(3): 13-19.
- 4 WANG, I., ZHONG,Y., WANG,B., LEI,Z., REN,W. E ,REN,Z. Numerical and Experimental Analysis of Flow Phenomenon in Centrifugal Flow Tundish. ISIJ International, Vol. 49 (2009), No. 10, pp. 1542–1550
- 5 YUE, Q., ZOU, Z.S, HOU, Q; F & CHEN, Z. Water Modeling of Swirling Flow Tundish for Steel Continuous Casting. Journal of Iron and Steel Research, International. 2009, 16(5): 17-22.
- 6 QIANG, Y; ZOU, Z &, HOU, Q Aggregation Kinetics of Inclusions in Swirling Flow Tundish for Continuous Casting Journal of Iron and Steel Research International (2010) Volume: 17, Issue: 5, Central Iron and Steel Research Institute, Pages: 6-10
- 7 Qiang. Y Water Modeling of a Swirling Flow Tundish for Steel Continuous Casting. Journal Of Iron And Steel Research,International, 2009, 16(5): 17-17.