

SIMULAÇÃO NUMÉRICA DO ESCOAMENTO DO AÇO EM UM DISTRIBUIDOR DE TRÊS VEIOS PARA DIFERENTES CONFIGURAÇÕES DE INIBIDORES DE TURBULÊNCIA E NÍVEIS DE AÇO LÍQUIDO¹

Carlos André Ruy Carneiro²
Lucas Alves de Castro²
Rafael Fernandes Reis²
Breno Totti Maia³
Roberto Parreiras Tavares⁴

Resumo

A qualidade do aço obtido no lingotamento contínuo é afetada pelas características do escoamento do aço líquido no distribuidor. Visando analisar esse escoamento, o método dos volumes finitos, usado pelo software comercial Ansys-CFX 11, foi aplicado e o modelo K- ϵ escolhido para modelar os efeitos da turbulência. O objetivo deste trabalho foi determinar uma configuração de inibidor de turbulência que confira uma maior qualidade ao aço sem afetar a produtividade, e simular o efeito do nível de aço líquido no distribuidor na qualidade do aço lingotado. A metodologia aplicada inclui a análise das curvas DTR e simulação do comportamento de diferentes tamanhos de inclusões. Uma análise detalhada dos resultados revelou que o nível de aço, o tempo médio de residência e as diferentes configurações de inibidor interferem nos escoamentos e, conseqüentemente, na qualidade do aço produzido. A configuração de distribuidor sem inibidor apresentou os piores resultados, além de revelar um comportamento diferente dos distribuidores com inibidor. Uma configuração de distribuidor com os melhores resultados foi determinada.

Palavras Chave: Distribuidor; Simulação numérica; CFX; Inclusão.

NUMERICAL SIMULATION OF FLUID FLOW IN A THREE-STRAND TUNDISH WITH DIFFERENT CONFIGURATIONS OF TURBOSTOP AND LEVELS OF LIQUID STEEL

Abstract

The steel quality obtained through continuous casting is affected by flow characteristics in the tundish. Aiming at analyzing the characteristics of the flow inside the tundish, the finite volume method, used in software Ansys-CFX, was applied and the k- ϵ model was chosen to model turbulent. The objective of the present work was to determine a turbostop configuration that provided quality improvements without affecting productivity, and to simulate the effect of the level of liquid steel inside the tundish. The methodology include the study of RTD curves and the floatation of inclusions. A detailed analysis of the results of the simulation revealed that the mean residence time and the different configurations of the tundish significantly affect the quality of the steel. The configuration without turbostop presented the worst results in terms of inclusion floatation. The configuration that gave the best results was also determined.

Key words: Tundish; Numerical simulation; CFX; inclusion

¹ *Contribuição técnica ao 40º Seminário de Aciaria – Internacional, 24 a 27 de maio de 2009, São Paulo, SP, Brasil.*

² *Sócio da ABM, Estudante de Graduação, Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Universidade Federal de Minas Gerais, Brasil.*

³ *Engenheiro Metalurgista, M.Sc., Estudante pós-graduação, Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Universidade Federal de Minas Gerais, Brasil.*

⁴ *Sócio da ABM, Professor Associado, Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Universidade Federal de Minas Gerais, Brasil.*

1 INTRODUÇÃO

No lingotamento contínuo de aço, o distribuidor tradicionalmente se refere a uma etapa intermediária entre a panela e o molde, responsável por alimentar o molde a uma taxa constante. Com a necessidade cada vez maior de aumentar a qualidade do aço produzido, o distribuidor tem assumido um papel de destaque cada vez maior. Nos últimos anos, o distribuidor se tornou um importante reator de refino de aço líquido. Atualmente, esse reator é fundamental na remoção de inclusões não-metálicas e homogeneização térmica do aço. De acordo com Sahai e Emi,⁽¹⁾ é importante salientar que a eficiência e otimização desse processo requer um controle das características do escoamento do aço líquido dentro do distribuidor. Se o fluxo de aço líquido não é devidamente controlado, certamente será deteriorada a qualidade do aço produzido.

Desde que o distribuidor se tornou um componente importante na limpidez do aço, têm sido realizadas pesquisas e estudos⁽¹⁻⁴⁾ a fim de otimizar os ganhos no distribuidor. Hoje na literatura encontram-se vários trabalhos referentes ao distribuidor, abordando diferentes fenômenos. De acordo com esses estudos,⁽¹⁻⁴⁾ os fenômenos mais investigados são o escoamento do aço líquido, turbulência, distribuição de tempos de residência (DTR), flotação de inclusões, transporte de energia térmica e vórtices. Neste trabalho são desenvolvidas simulações numéricas focadas no estudo das curvas de distribuição de tempo de residência e na flotação de inclusões, para diferentes níveis de aço e diferentes inibidores de turbulência. A importância do estudo do efeito do baixo nível de aço no distribuidor se deve ao fato que em uma unidade da empresa onde o distribuidor está instalado, há uma disparidade em relação à capacidade do distribuidor (15 toneladas) e a panela (33 toneladas), sendo o distribuidor operado em grande parte do tempo a níveis baixos.

A flotação das inclusões é um fator importante estudado nesse trabalho. De acordo com Sinha e Sahai,⁽⁵⁾ nos distribuidores de lingotamento contínuo atuais, é fundamental que se concilie alta produtividade e qualidade, produzindo aços com maior nível de limpidez possível.

As inclusões são formadas por reações químicas (desoxidação, reoxidação e precipitação) ou por condições físicas (turbulência, por exemplo). Muitas inclusões têm efeito negativo nas propriedades do aço. Óxidos sólidos (alumina ou aluminato de cálcio, por exemplo) podem causar bloqueio nas válvulas durante o lingotamento contínuo, podendo levar até a paralisação do processo. Algumas inclusões podem causar defeitos e fraturas, delaminação em produtos laminados, como também fraturas durante laminação a quente e a frio e na trefilação de fio máquina.

As inclusões são menos densas que o aço líquido e, conseqüentemente, têm que ser removidas pela flotação até a interface aço/escória. Essa interface deve ter a capacidade de capturar as inclusões vindas do metal líquido. Para otimizar a flotação das inclusões é de suma importância que se estude e modele o escoamento dentro do distribuidor, utilizando, por exemplo inibidores de turbulência ou modificadores de fluxo.

O objetivo do presente trabalho foi determinar uma configuração de inibidor de turbulência que confira uma maior qualidade ao aço sem afetar a produtividade. Foram analisadas as configurações do distribuidor com dois tipos de inibidores e sem inibidor.

Outro objetivo foi analisar o efeito do nível de aço líquido no distribuidor na qualidade do aço lingotado.

2 METODOLOGIA

2.1 Modelo Matemático

No presente trabalho, as simulações matemáticas foram realizadas utilizando o Software comercial Ansys-CFX 11. O modelo de turbulência usado foi o modelo K- ϵ de Launder e Spalding.⁽⁶⁾ Trata-se de um modelo de duas equações em que k e ϵ representam respectivamente, a energia cinética de turbulência e a taxa da dissipação desta energia, baseado no conceito da viscosidade turbulenta de Boussinesq. De acordo com Daoud et al.,⁽⁷⁾ a utilização desse modelo apresenta soluções adequadas e rápidas computacionalmente para várias aplicações industriais, incluindo o caso estudado nesse trabalho. Ainda de acordo com Gardin et al.,⁽⁸⁾ o modelo K- ϵ é o modelo de turbulência mais empregado nesse tipo de pesquisa. As equações resolvidas foram as equações de conservação de massa, quantidade de movimento e de espécies para simular injeção de traçador. Para determinação da trajetória de partículas foi usada a abordagem Lagrangeana.

2.2 Condições Simuladas

Para um mesmo distribuidor, de 15 toneladas foram simuladas configurações diferentes, considerando três inibidores de turbulência distintos e dois níveis de aço líquido, ou seja, distribuidor com volume máximo e na metade. Essas configurações estão esquematicamente mostradas na Figura 1.

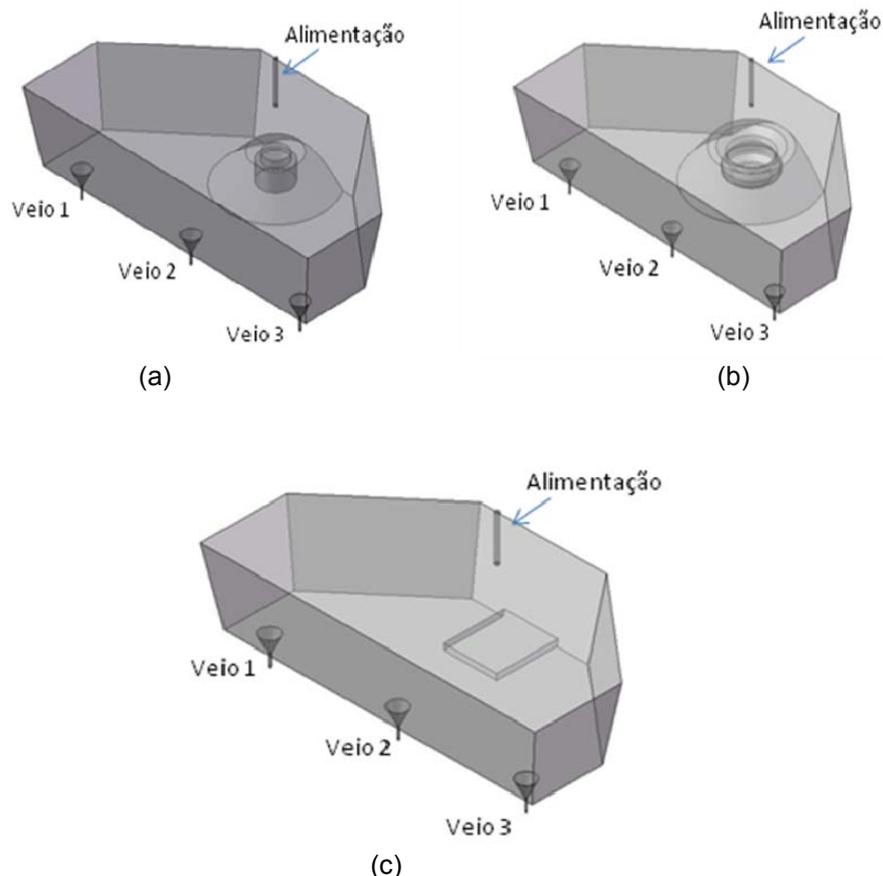


Figura 1 – Distribuidor com inibidor atual (a), Distribuidor com inibidor de turbulência modelo 1 (b) e Distribuidor sem inibidor de turbulência (c). Todos em nível máximo.

As simulações numéricas foram desenvolvidas em três passos, adotando metodologia semelhante à utilizada por Oliveira et al.:⁽⁹⁾

- Primeiro passo – simulação em estado estacionário. Nesse passo foi considerada uma taxa de alimentação de aço de 0.5 ton/h proveniente da panela. Nas resoluções das equações de conservação, foi definido como critério de convergência um resíduo médio de 1×10^{-5} na solução, assim como esquema high resolution.⁽¹⁰⁾ Em todas as simulações, foi considerada a simetria no distribuidor, sendo simulada apenas metade do distribuidor, condição isotérmica e não foi considerada a rugosidade dos refratários.

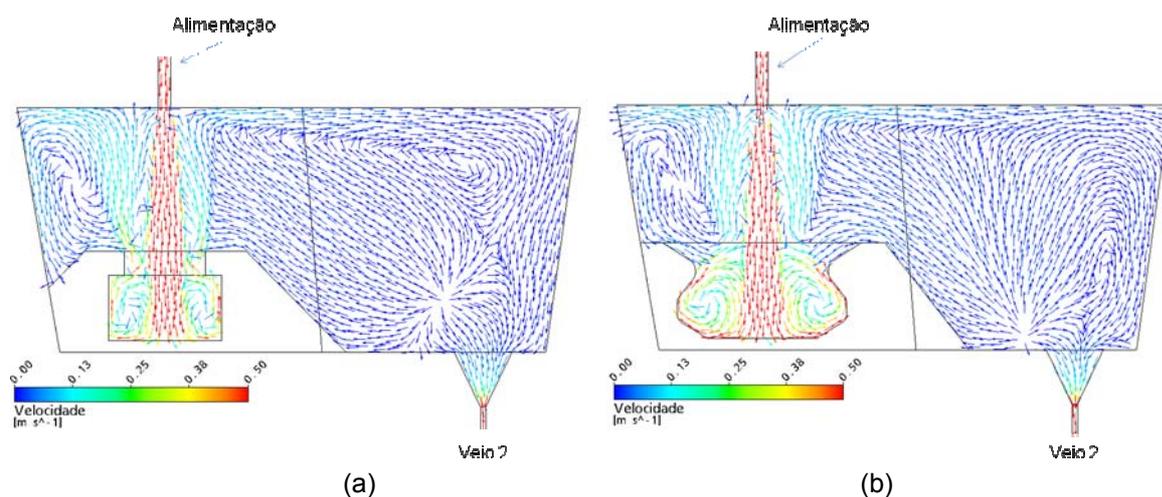
- Segundo passo – Simulação no estado transiente. Nesse passo foram modeladas as curvas DTR. Os perfis estacionários modelados no primeiro passo foram usados como valores iniciais na simulação transiente, sendo assim desnecessário refazer os cálculos das equações de conservação de massa e “momentum” para o aço. Somente foi resolvida a equação de conservação relativa à injeção de traçador. Um traçador foi injetado no jato da panela e sua concentração monitorada nos veios, em intervalos de 0,5 segundo, durante cinco vezes o tempo de residência médio.

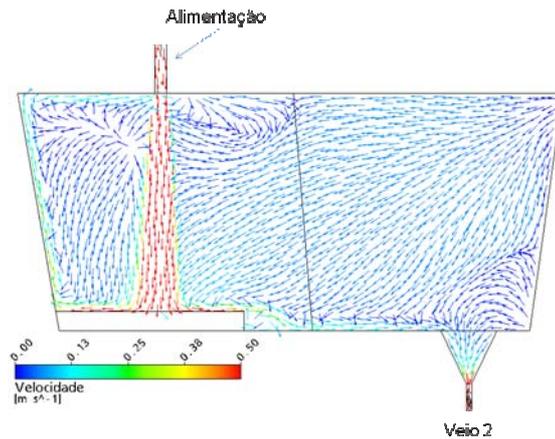
- Terceiro passo – Flotação de inclusões. Ainda com o uso dos resultados da simulação estacionária no primeiro passo, foi resolvida a equação referente ao modelo lagrangeano para trajetórias de partículas. Foram consideradas partículas de alumina, com densidade de 2.702 kg/m^3 , de cinco tamanhos distintos, $20 \mu\text{m}$, $40 \mu\text{m}$, $60 \mu\text{m}$, $80 \mu\text{m}$ e $100 \mu\text{m}$.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Análise do Escoamento

A Figura 2 apresenta os vetores de velocidade no plano de simetria do distribuidor, considerando distribuidor cheio e as três configurações internas.



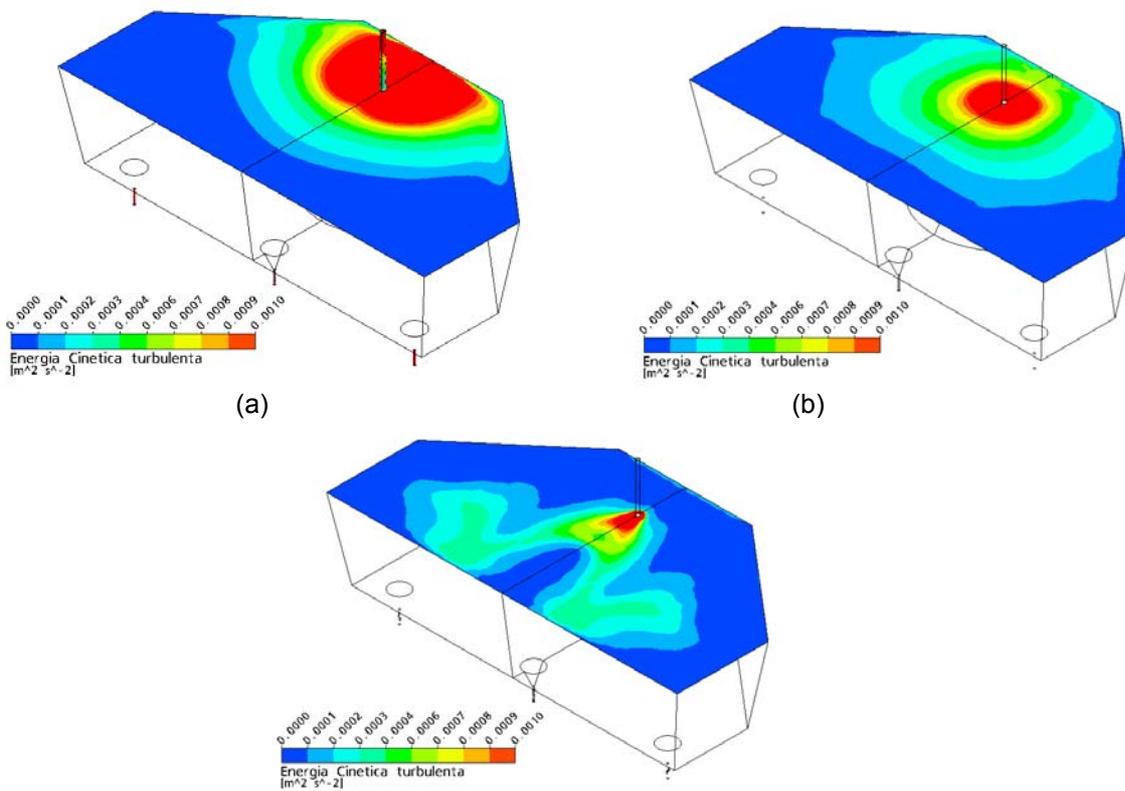


(c)

Figura 2 – Vetores de velocidade no plano de simetria para os distribuidores em nível máximo com inibidor atual(a), com o inibidor modelo 1 (b) e sem inibidor (c).

Nota-se que os distribuidores com inibidor possuem fluxo ascendente, enquanto o sem inibidor possui fluxo descendente. Este comportamento implicará em menor remoção de inclusão no distribuidor sem inibidor (c) em comparação aos com inibidores [(a) e (b)].

Na Figura 3, está apresentada a energia cinética de turbulência na interface aço/escória. A importância dessa análise é verificar qual configuração terá maior turbulência nessa interface, tendendo a um maior arraste de inclusões da escória para o aço.



(c)

Figura 3 – Contornos de energia cinética de turbulência para o distribuidor em nível máximo com inibidor atual (a), com o inibidor modelo 1 (b) e sem inibidor (c).

Na Figura 4 são apresentados os contornos de tensão de cisalhamento junto às paredes do distribuidor. Este parâmetro tem relação como o desgaste de refratários. Observa-se que o inibidor de turbulência reduz o desgaste nas paredes do distribuidor. O inibidor de turbulência modelo 1 (b) apresentou maior eficiência de redução do tensão de cisalhamento nas paredes em relação ao modelo atual.

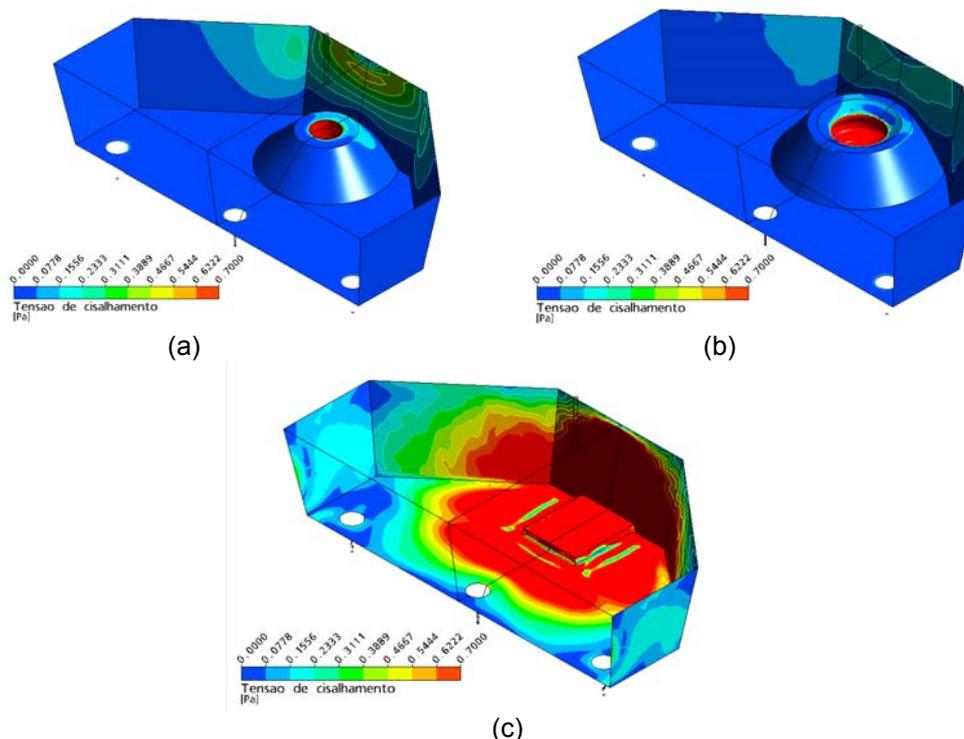


Figura 4 - Contornos de tensão de cisalhamento para os distribuidores em nível máximo com inibidor atual(a), com o inibidor modelo 1 (b) e sem inibidor (c).

Na Figura 5, são apresentados os vetores de velocidade no plano de simetria para o distribuidor com metade do volume de aço.

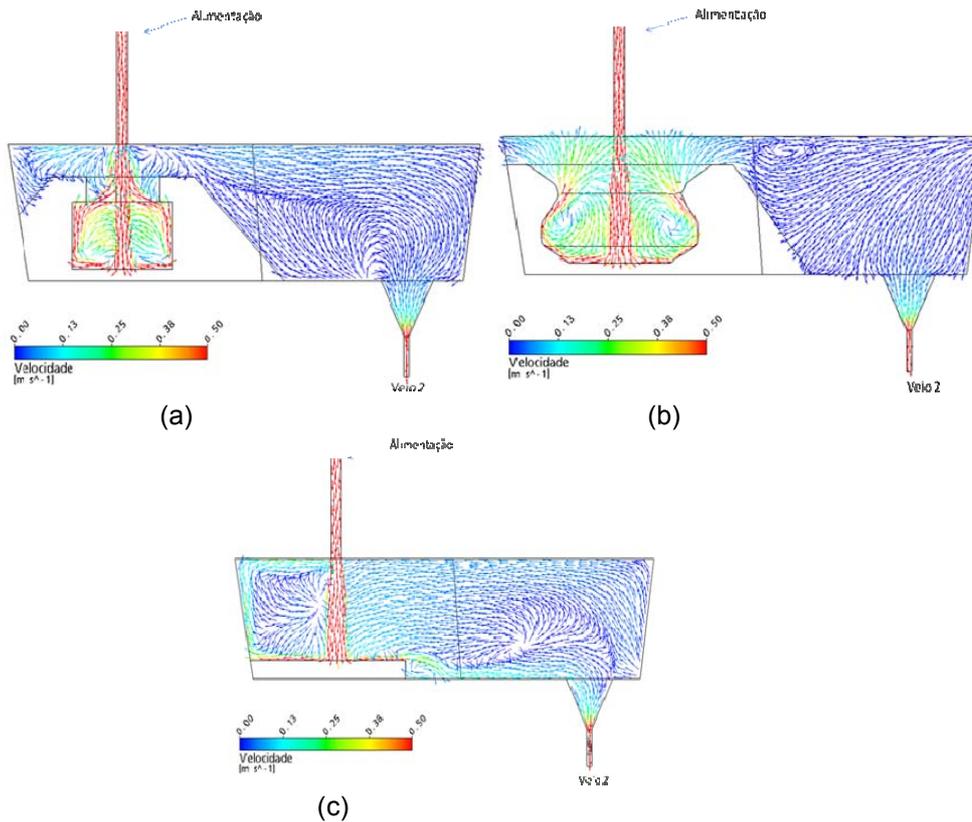
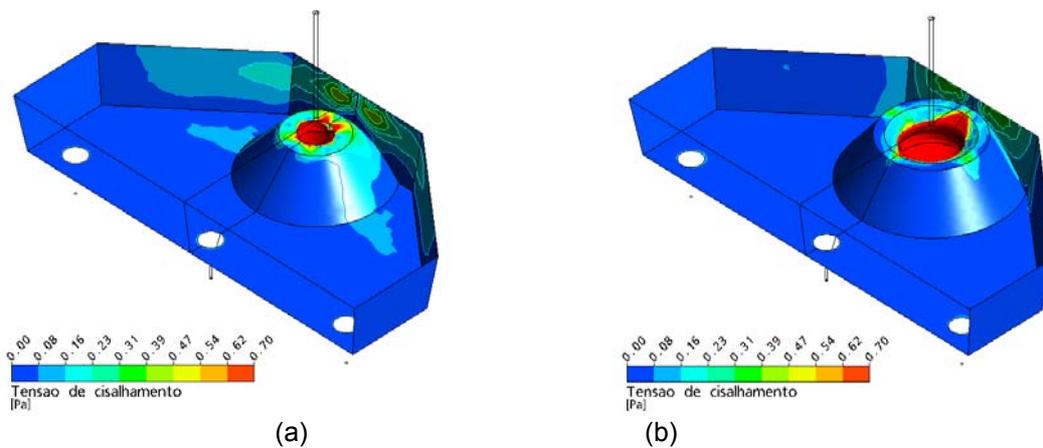
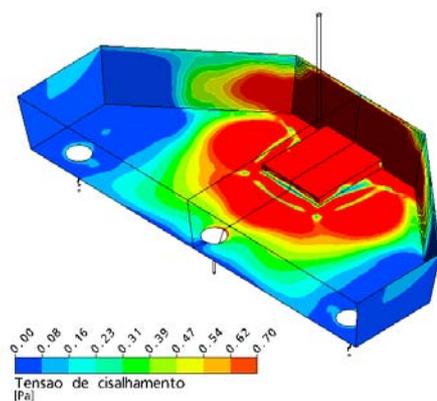


Figura 5 – Vetores de velocidade no plano de simetria para o distribuidor com metade do nível máximo e inibidor atual (a), com o inibidor modelo 1 (b) e sem inibidor (c).

Observa-se que as velocidades são mais elevadas que no caso de distribuidor cheio. No caso do distribuidor sem inibidor, o jato de entrada é direcionado para o veio central pela parte inferior do distribuidor.

Na Figura 6, são apresentados os contornos de tensão de cisalhamento para metade do nível máximo de aço líquido. Foi analisado o perfil da tensão nas paredes próximas ao inibidor, local onde o desgaste do refratário é mais crítico.





(c)

Figura 6 – Contornos de tensão de cisalhamento para os distribuidores, em metade do nível máximo, com inibidor atual(a), com o inibidor modelo 1 (b) e sem inibidor (c).

3.2 Tempos e Volumes Característicos

Para avaliar os tempos e volumes característicos foram analisadas as curvas DTR para cada configuração estudada.

O primeiro parâmetro analisado foi a fração de volume pistonado. Os resultados são apresentados na Figura 7.

A relevância da contribuição da fração de fluido em escoamento pistonado como variável para análise de desempenho de distribuidores é discutível. De acordo com Galant François et al.,⁽¹¹⁾ se a análise da visualização do escoamento mostra que esse é do tipo ascendente (Figura 2(a)), é importante que o volume pistonado seja alto. Se não for ascendente e estiver direcionado diretamente para os veios, pode ser qualificado como escoamento em curto-circuito e nesse caso o seu efeito é negativo à limpeza do aço.

Ainda segundo Galant François et al.,⁽¹¹⁾ um dos benefícios do escoamento pistonado no distribuidor é a de fornecer uma força auxiliar (além da força de Stokes), ascendente, para a flotação de inclusões. Por essa razão é possível concluir que um valor elevado, quando da existência de escoamento ascendente, seria interessante. O escoamento pistonado tem relevância também no caso de operações de “mixing tundish”. Nesse caso também seria interessante que o seu valor fosse maximizado, pois quanto maior a porção de escoamento em fluxo pistonado menor a porção em mistura, garantindo uma melhor transição entre as corridas, uma vez que o escoamento pistonado não apresenta dispersão.

O segundo parâmetro analisado pelas curvas DTR obtidas foi o volume morto, isto é, a fração de volume com um lento deslocamento. Pelo estudo de Sahai e Emi,⁽¹⁾ o volume morto seria a fração de material que fica no distribuidor acima de duas vezes o tempo de residência médio. A Figura 7 apresenta os resultados.

Como o volume morto é prejudicial ao desempenho do distribuidor, objetiva-se que o seu valor seja o menor possível. As regiões estagnadas, correspondentes ao volume morto, por apresentarem escoamento mais lento, têm maior tendência a perder temperatura, causar problemas de solidificação do aço, além de não favorecer a flotação de inclusões.

O terceiro parâmetro analisado é a fração do volume em escoamento do tipo mistura, cujos resultados estão concluídos na Figura 7(c). Novamente, o inibidor modelo 1 apresentou os melhores resultados.

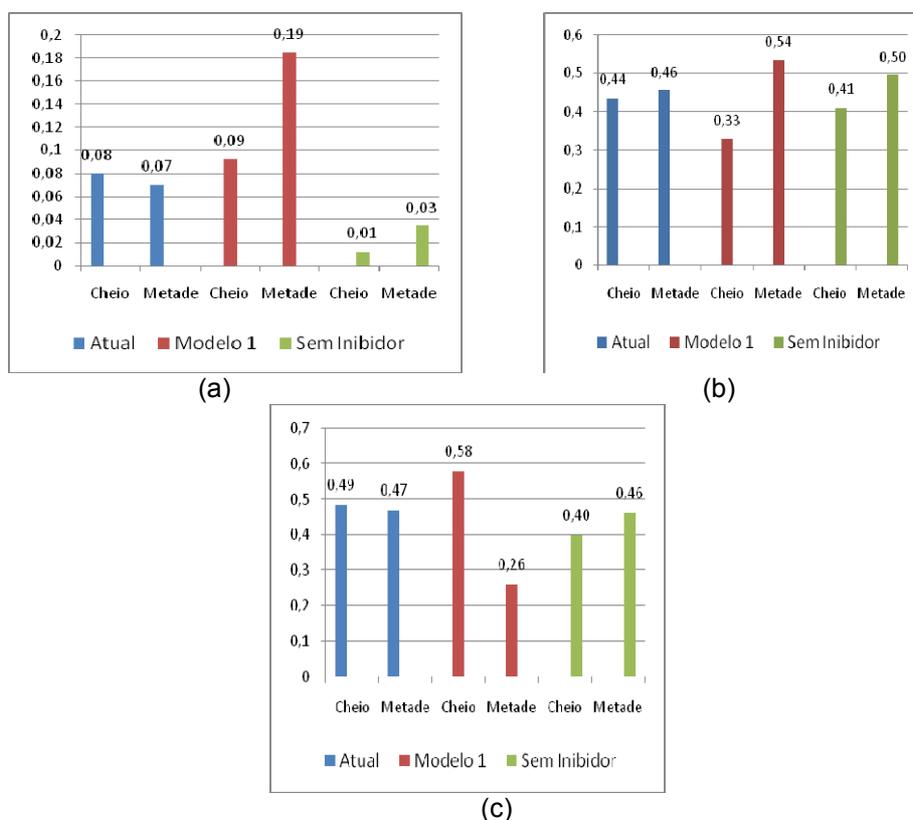


Figura 7 – Comparação das frações de volume pistonado (a), volume morto (b) e volume de mistura (c) para várias configurações do distribuidor.

3.3 Trajetória das Inclusões

As curvas DTR fornecem informações relativas à distribuição dos tempos de permanência do aço, sendo possível quantificar as frações volumétricas características. A análise lagrangeana usando partículas tende a complementar os resultados da DTR, quantificando a trajetória e possibilidade de remoção das inclusões. Os resultados desta análise são apresentados na Tabela 1. Os valores apresentados correspondem à fração de inclusões que são flotas.

Tabela 1- Fração de inclusões de alumina flotas para as diferentes configurações simuladas.

Tamanho das inclusões (µm)	Configuração do distribuidor					
	Inibidor Atual		Inibidor Modelo 1		Sem Inibidor	
	Cheio	Metade	Cheio	Metade	Cheio	Metade
20	55	7	24	24	24	50
40	71	42	79	41	35	66
60	90	93	95	94	49	50
80	96	98	100	95	49	51
100	100	100	100	100	50	50

Observa-se, pela Tabela 1, que a flotação das inclusões nos distribuidores com inibidores de turbulência foi maior.

Nos distribuidores com inibidor, o baixo nível de aço líquido foi prejudicial à flotação das inclusões. Os melhores resultados foram obtidos com nível máximo de aço. As inclusões menores flotaram menos que as inclusões maiores, devido às suas menores velocidades de ascensão.

No distribuidor sem inibidor, os melhores resultados, em termos de flotação de inclusão, foram obtidos com metade do nível máximo de aço no distribuidor.

O resultado referente ao distribuidor sem inibidor pode ser explicado pelo fluxo descendente da panela direto para os veios, onde seu volume pistonado seria caracterizado por um possível curto-circuito, logo prejudicando a flotação de inclusões. Nesse caso, como o fluxo não está direcionado para a interface aço/escória, o parâmetro tempo médio de residência não seria o determinante para flotação de inclusões, e sim a altura da interface, ou seja, quanto mais próxima essa interface estiver da base do distribuidor, maior será a remoção de inclusões.

O distribuidor modelo 1 apresentou os melhores resultados de flotação de inclusões. Comparando com os resultados das curvas DTR, confirma-se o melhor desempenho desta configuração.

4 CONCLUSÕES

Os resultados indicaram que o inibidor modelo 1 apresenta os melhores resultados, agregando maior qualidade ao aço produzido .

O baixo nível de aço é prejudicial à qualidade do aço lingotado, promovendo uma menor flotação de inclusões, com maior turbulência em seu domínio. Baseado nestes resultados foi sugerido mudanças na máquina de lingotamento contínuo: objetivar trabalhar com nível máximo no distribuidor e implantar inibidor de turbulência tipo 1 para aços com maior requerimento de qualidade.

REFERÊNCIAS

- 1 SAHAI, Y.; EMI, T. Melt Flow characterization in continuous casting tundishes. *ISIJ International*, v. 36, n. 6, p. 667-72, 1996.
- 2 SÁNCHEZ, R.R.; AMADOR, M.A.M.; POSADAS, R.J.J.; HERNÁNDEZ, M. L.A.; MACÍAS, S.R.; DÍAZ, C.M.. Study of the pattern of flow fluid in the tundish of continuous casting and mathematical modeling. In: IAS STEELMAKING CONFERENCE, 15., 2005, San Nicolas, Argentina. [S.n.t.]. p. 317-26.
- 3 TRINDADE, L.B.; REIS, M.V.F.; KRUGER, M.; VIEIRA, C.A.P.; SILVA, L.F.; VIEIRA, F.B.; MANETTA, H.R. Análise numérica do escoamento em um distribuidor de 4 veios. In: IAS STEELMAKING CONFERENCE, 15., 2005, San Nicolas, Argentina. [S.n.t.]. p. 337-46.
- 4 GOLDSCHIMT, M.; FERRO, S.; PRÍCIPE, J.; COPPOLA, A. Numerical modeling of liquid steel flow in continuous casting processes. Buenos Aires: Centre for Industrial Research, 200?
- 5 SINHA, A.; SAHAI, Y. Mathematical modeling of inclusion transport and removal in continuous casting tundishes. *Isij International*, v. 33, n. 5, p. 556-66, 1993.
- 6 LAUNDER, B.E., SPLADING, B.D. The numerical computation of turbulent flows. *Computer Methods In Applied Mechanics and Engineering*, v. 3, p. 269-89, 1974.

- 7 DAOUD, I.; SICORSKI, R.; TRINDADE, L.; FRANÇOIS, M.; VILELA A. Simulação numérica do escoamento e do comportamento de inclusões não-metálicas em um distribuidor de lingotamento contínuo de aço. In: IAS STEELMAKING CONFERENCE, 15., 2005, San Nicolas, Argentina. [S.n.t.]. p. 298-306.
- 8 GARDIN, P.; BRUNET, M.; DOMGIN, J.P.; PERICLEOUS, K. An experimental and numerical CFD study of turbulence in a tundish container. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON CFD IN THE MINERALS AND PROCESSES INDUSTRIES, 2., 1999, Melbourne, Australia. [S.n.t.].
- 9 OLIVEIRA, H.; LEÃO, M.C.; ÁVILA, T. A.; CAMPOS, T.; TAVARES, R. P. Numerical simulation of turbulence fluid flow in different configurations of tundishes and experimental validation. In: IAS STEELMAKING CONFERENCE, 15., 2005, San Nicolas, Argentina. [S.n.t.]. p. 307-16.
- 10 ANSYS Europe Ltd. *CFX- manuals product document*. [S.l.: s.ed.], 2006.
- 11 GALANT FRANÇOIS, M.B.; MATTIELO, M.A.Z.; BOCK, M.L.; VILELA A.C.F.. Contribuição ao entendimento do uso das curvas de determinação de tempos característicos (DTR) e dos volumes característicos em modelos físicos de distribuidor de lingotamento contínuo. IAS STEELMAKING CONFERENCE, 15., 2005, San Nicolas, Argentina. [S.n.t.]. p. 328-36.