

INFLUÊNCIA DO DESIGN DO DISTRIBUIDOR NOS PARÂMETROS DE ESCOAMENTO¹

*Magda Galant François²
Mateus Daroit³
Miguel Liska Bock⁴
Marcos Augusto Zilles Mattiello⁵
Antônio C. F. Vilela⁶*

Resumo

No lingotamento contínuo de aços o emprego da caracterização de escoamento, por meio de modelos físicos, é uma importante ferramenta para otimização do fluxo e aumento do grau de limpeza. O objetivo principal deste trabalho é avaliar o efeito do design do distribuidor sobre parâmetros de escoamento (linhas de fluxo, tempos médio e mínimo de residência e volumes característicos). Neste estudo são comparados dois modelos com configuração pré-estabelecida. A metodologia empregada para análise qualitativa das linhas de fluxo é a injeção de corante (KMnO_4), em pulso, e seu registro em vídeo. Isto permite a visualização e análise do escoamento em três vistas (frontal, lateral e superior) em função do tempo. Para a avaliação dos volumes característicos e tempos de residência (análise quantitativa) é empregada a técnica de DTR (curvas de distribuição de tempos de residência). Esta técnica envolve a injeção, em pulso, de um traçador ácido (HCl) e a construção de curvas DTR. A análise destas permite a caracterização em termos de tempos e volumes característicos. Os resultados mostram que a alteração de design conjugada ao aumento da capacidade, não favorece, em um primeiro momento, as características de escoamento do distribuidor. É observada uma redução do tempo médio de residência (27%), da fração de volume pistonado (14%) e um aumento da fração de volume morto (18%).

Palavras-chave: lingotamento contínuo de aços, modelamento físico de distribuidor, linhas de fluxo e curvas DTR

¹ Trabalho enviado para o XXXVI SEMINÁRIO DE FUSÃO, REFINO E SOLIDIFICAÇÃO DOS METAIS da ABM

² Engenheira Química, Dra., Pesquisadora LASID/PPGEM/ UFRGS

³ Graduando em Engenharia Metalúrgica – UFRGS

⁴ Graduando em Engenharia Metalúrgica – UFRGS

⁵ Graduando em Engenharia Metalúrgica – UFRGS

⁶ Engenheiro Metalúrgico, Dr.-Ing., Professor do DEMET/ PPGEM/ UFRGS

1 INTRODUÇÃO

O distribuidor, no processo de produção de aço via lingotamento contínuo, é um reator primariamente empregado como reservatório ou pulmão. Entretanto, com a necessidade de aumento de qualidade e de redução de custos, ele também tem sido empregado em operações de refino e processo, como por exemplo, a flotação e separação de inclusões ou a redução de custos operacionais como a diminuição do descarte em corridas de qualidades diferentes. Desta forma, o distribuidor deixa de ser considerado um reservatório e passa a ser considerado um reator contínuo.

Em virtude das altas temperaturas empregadas no processo de fabricação do aço e da opacidade dos fluidos, é evidente que estudos realizados “*in loco*” podem ser de difícil execução, além de terem custos elevados. Em função desses inconvenientes têm-se utilizado modelos, numéricos ou físicos, para estudo do escoamento do fluido.

Os modelos numéricos normalmente exigem softwares comerciais (ou construídos especialmente para a solução do problema) e uma equipe treinada em simulação, além de computadores de bom desempenho.

Por outro lado, modelos físicos podem ser implementados de maneira mais econômica e os resultados, desde que tomadas às devidas precauções nas questões de similaridade durante a construção do modelo⁽¹⁾ e na interpretação dos resultados de ensaios, podem fornecer várias informações sobre o escoamento no distribuidor, e por conseqüência, sobre o modelo do distribuidor a um custo relativamente baixo e em um prazo razoável.⁽²⁾ Estes estudos geralmente tratam da visualização de escoamento (com emprego de traçadores) e ensaios de DTR (determinação de tempos médios de residência), que informam os tempos médio e mínimo de residência assim como os volumes característicos.

A metodologia para execução e análise de ensaios de visualização de escoamento é relativamente uniforme entre os vários trabalhos existentes na literatura⁽³⁻⁴⁾ O escoamento no modelo físico pode ser estudado pela observação da movimentação de um corante em água. E a movimentação desse corante (permanganato de potássio ou azul de metileno) pode ser registrada e analisada. Um escoamento dirigido para a superfície facilita a chegada das inclusões à camada de escória. Como a velocidade de flotação das inclusões é uma resultante da velocidade de Stokes e da velocidade do próprio fluido, a flotação é favorecida por uma orientação ascendente do fluxo.⁽⁵⁾

Para o caso de determinação de curvas de tempos de residência e volumes característicos existem algumas discussões. Alguns autores discutem a questão do traçador a ser empregado (solução salina ou ácida) quando do uso de medidores de condutividade para a construção da curva.⁽⁶⁾ Outros autores^(2,4) discutem a metodologia empregada para o cálculo do tempo médio de residência, o percentual de volume do distribuidor em escoamento pistonado e a fração de volume morto. Entretanto, para efeito de comparação de design, que é o objetivo deste trabalho, é mais conveniente manter uma mesma metodologia para todos os casos estudados.

2 METODOLOGIA

2.1 Modelos Físicos: Delta T e Delta

O modelo físico do distribuidor tipo Delta T está caracterizado e descrito juntamente com a metodologia e os resultados em Wollmann.⁽⁵⁾ A Figura 1 apresenta uma representação esquemática do modelo físico do distribuidor com a barreira empregada. Para o estudo do distribuidor tipo Delta, Figura 2, foi

empregado um modelo físico de distribuidor com três veios, em acrílico, em escala real, com similaridade de Froude e Reynolds e que utiliza água como fluido de simulação. Os dois modelos dispõem de um sistema hidráulico, de um sistema de aquisição de dados de condutividade para uso nos ensaios DTR e de um sistema de injeção de traçadores para uso em ensaios de corante e DTR

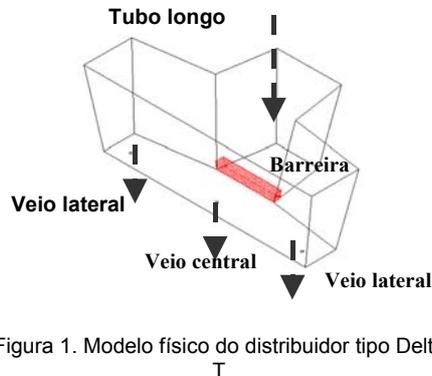


Figura 1. Modelo físico do distribuidor tipo Delta T

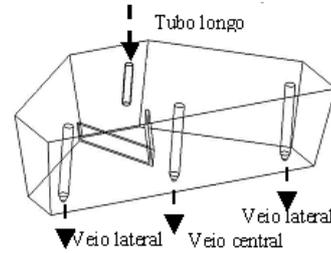


Figura 2: Modelo do distribuidor tipo Delta

O sistema hidráulico permite a realização de medições contínuas e regulagens das vazões em cada uma das três válvulas de saída do modelo e trabalhar com o sistema em circuito fechado e em circuito aberto. Os dois modelos, além da diferença de design, também apresentam diferentes volumes. O modelo Delta T tem capacidade de 1800 litros e o Delta de 2400 litros de água.

2.2 Ensaios de Corante

O corante utilizado para visualizar a movimentação do fluido no interior do distribuidor é permanganato de potássio (KMnO_4). As injeções desse traçador são realizadas através de um sistema pneumático conectado próximo ao jato de entrada do distribuidor. Os tempos de injeção variam entre 3 a 4 segundos e os volumes injetados variam entre 300 e 500 ml de solução à 0,1 g/l de KMnO_4 . Esta metodologia segue a empregada por Wollmann.⁽⁵⁾ A movimentação do corante dentro do modelo pode ser acompanhada através de filmagens feitas com uma câmera filmadora digital. Um vídeo cassete e uma placa de captura de imagens instalada em um microcomputador são utilizados para a obtenção de imagens a partir das filmagens.

2.3 Ensaios DTR

O traçador utilizado para determinar as curvas de distribuição dos tempos de residência (ou curvas DTR) é uma solução de HCl a 3,6%. As condições de injeção são idênticas às descritas para a injeção do KMnO_4 . Para cada configuração foram realizados cinco ensaios DTR. A alteração da condutividade da água gerada pelo HCl é captada por dois sensores de condutividade. Um dos sensores está posicionado no veio central e o outro em um dos veios laterais. Devido à simetria do distribuidor julgou-se desnecessário colocar sensores de condutividade em ambos os veios laterais.

Cada ensaio DTR tem duração de uma hora após o momento de injeção do traçador. De posse do banco de dados com os valores de condutividade e por meio de uma curva de calibração, os valores de condutividade são convertidos em concentração. Com uma planilha eletrônica são traçadas as curvas DTR; determinados os tempos de residência e calculados os volumes característicos. O equacionamento empregado para o cálculo de volumes característicos é o mesmo apresentado em Wollmann.⁽⁵⁾

Para cada ensaio DTR são determinados os tempos mínimo e médio de residência e calculados os volumes característicos. Os valores referentes a todo o distribuidor representam a média ponderada de todos os veios, ou seja:

$$\frac{2}{3} \times \text{Valor do tempo de residência ou volume dos veios laterais} + \frac{1}{3} \times \text{Valor do tempo de residência ou volume do veio central}$$

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Escoamento do Fluido: Ensaio de Corante

A Figura 3 apresenta os resultados de escoamento de fluido obtidos para os modelos dos distribuidores tipo Delta e tipo Delta T (WOLLMANN, 1999). No ensaio de corante, vista lateral, é possível observar que o fluido desloca-se, no caso do Delta T, primeiramente de forma a ocupar a zona do T e após (24s) ele se encaminha pela parte superior do distribuidor em direção aos veios. No caso do Delta, como não existe essa região de concentração da turbulência, a zona do T, o fluido desloca-se também pela parte superior, mas de maneira mais dispersa.

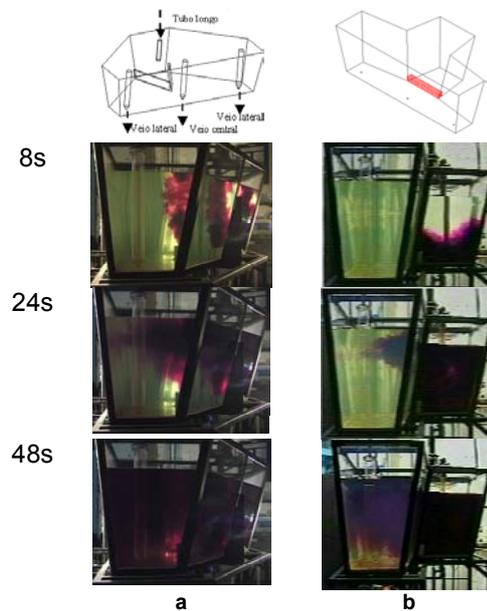


Figura 3. Ensaio de corante: vista lateral , modelos físicos Delta (a) e Delta T (b)

A Figura 4 apresenta os resultados de escoamento de fluido obtidos para os modelos dos distribuidores tipo Delta e tipo Delta T.⁽⁵⁾ No ensaio de corante, vista frontal, é possível observar, no caso Delta T, o mesmo efeito visto na vista lateral, o fluido concentrado na parte traseira do distribuidor e deslocando-se depois pela parte superior. No caso do modelo Delta, observa-se que, já aos 8s existe uma maior dispersão do corante e que este se desloca pela parte superior do distribuidor em direção aos veios. É visível, também nessa vista, que existe uma maior dispersão do corante em um menor espaço de tempo.

A vista superior, para os dois casos, Delta e Delta T,⁽⁵⁾ apresentada na Figura 5, mostra os resultados de escoamento de fluido obtidos para os modelos dos distribuidores no ensaio de corante. É possível observar no caso Delta T, a concentração de corante na região do T, enquanto que o Delta permite uma maior dispersão.

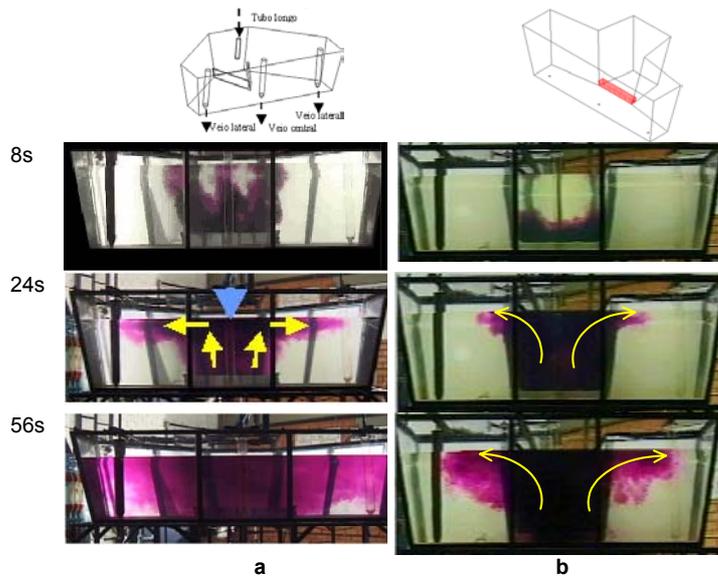


Figura 4. Ensaio de corante: vista frontal , modelos físicos Delta (a) e Delta T (b)

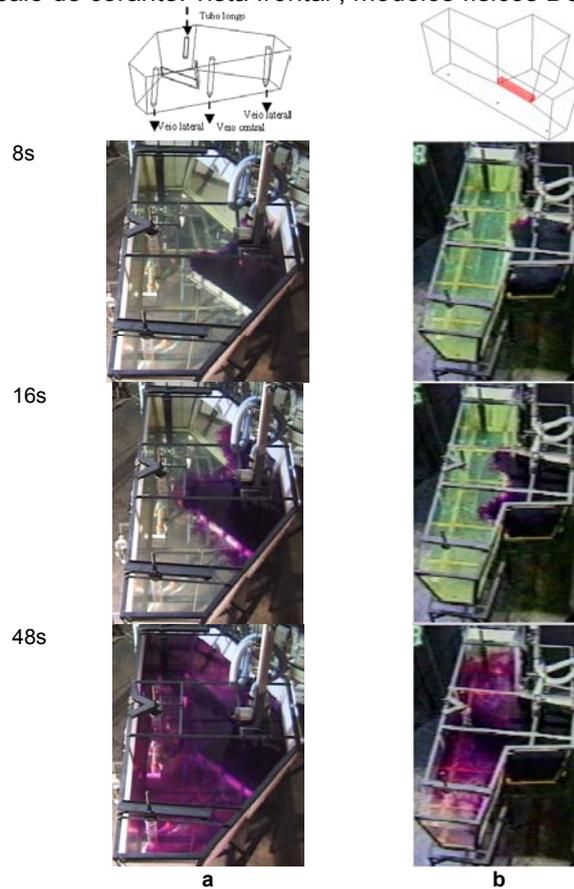


Figura 5. Ensaio de corante: vista superior, modelos físicos Delta (a) e Delta T (b)

3.2 Tempos e Volumes Característicos: Ensaio DTR

Os resultados de tempos mínimos, de cada modelo, para cada veio e o valor global para os três veios, estão apresentados na Figura 06.

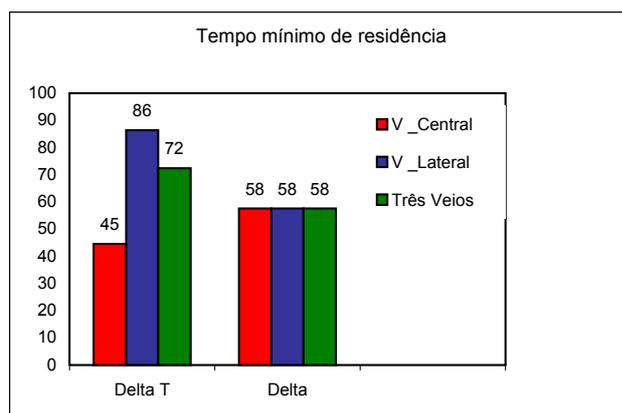


Figura 6. Resultados de Tempo Mínimo para os modelos dos distribuidores Delta-T e Delta.

O tempo mínimo de residência representa o menor tempo que o aço, após deixar o tubo longo, tem para alcançar os veios. Esse também é o menor tempo disponível para a flotação de inclusões a partir do momento que ela deixa o tubo longo. Ele também permite garantir, no caso de uma troca de qualidade de aço em um mesmo distribuidor, que a corrida antiga não seja contaminada pela nova. Portanto, quanto maior for o valor do tempo mínimo, melhores são as condições para a limpeza e flotação de inclusões e para garantir o menor descarte de aço.

A configuração Delta apresenta a vantagem, em relação à configuração Delta T, de ter o mesmo valor de tempo mínimo para todos os veios, isto é, com relação ao tempo mínimo é mais homogênea. Entretanto, esse valor (58s) para a configuração Delta é baixo, pois a configuração Delta T apresenta 72s como valor global para os três veios. Apenas uma terça parte do fluido que escoar no distribuidor tem um valor menor (45 s para o veio central). É possível então prever, que nos 86s iniciais de corrida, nos veios laterais, não haveria problemas de mistura no caso de troca de qualidade com um mesmo distribuidor (“mixing tundish”).

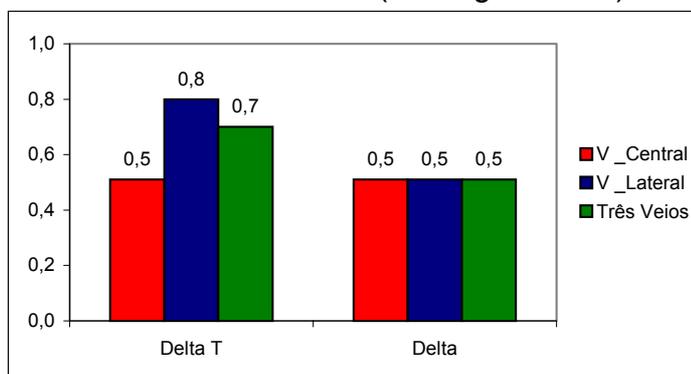


Figura 7. Resultados de Tempo Médio Normalizado para os modelos dos distribuidores Delta-T e Delta.

A Figura 7 apresenta os tempos médios de residência em função do tipo de design interno do equipamento, em valores normalizados.

Pode-se observar que a configuração Delta T, apesar de não apresentar o mesmo valor para os três veios (0,5 para o central, e 0,8 para os laterais) é a que apresenta o melhor valor global ($t=0,7$). A configuração Delta apresenta um valor de $t=0,5$. Isso significa que somente a metade do tempo teoricamente disponível para o aço permanecer no distribuidor está sendo usado.

Para o distribuidor com a configuração Delta T, o tempo teórico de residência, com a velocidade de lingotamento empregada, é de 12 minutos. A configuração

Delta, nas mesmas condições, apresenta um tempo teórico de residência de 16 minutos.

O modelo Delta T apresenta valores superiores aos do modelo Delta na ordem de 35% no que se refere ao tempo médio de residência normalizado e, nos resultados de tempo mínimo de residência, na ordem de 26%.

Os resultados de volumes característicos obtidos para as duas configurações estão apresentados na figura 8 em valores percentuais do volume total de cada distribuidor.

A análise de volumes característicos é interessante, pois permite a qualificação do equipamento em função do uso que se quer dar a ele.

Em qualquer caso, independente do uso, é importante que o volume de curto-circuito seja igual ou muito próximo de zero e que se tenha o menor volume morto possível, pois esse além de ocupar espaço no distribuidor e perder temperatura também propicia a formação de uma zona de difícil limpeza.

Quanto aos volumes tipo pistonado e mistura, é importante que a fração de volume em escoamento pistonado seja elevada quando o objetivo é troca de qualidade, pois isso viabiliza um descarte menor. Quando se quer propiciar coalescimento e crescimento de inclusões deve-se aumentar o volume de mistura. Quando é necessário obter limpeza juntamente com o menor descarte possível, deve-se manter uma boa proporção entre esses dois tipos de volumes característicos.

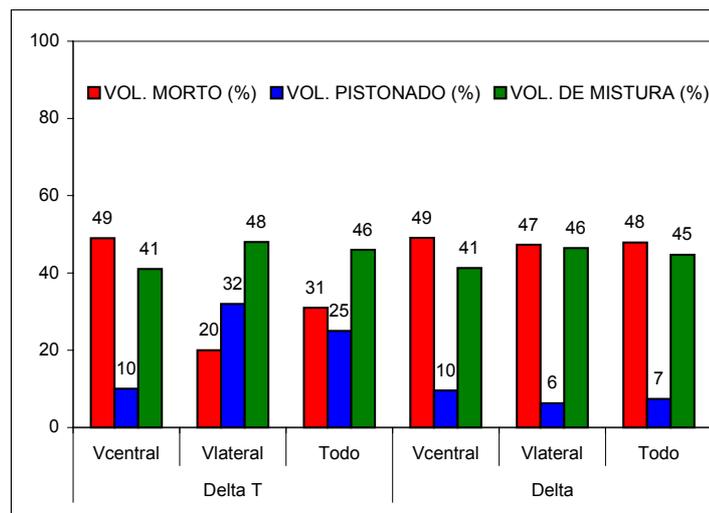


Figura 8. Valores Percentuais dos Volumes Característicos nos modelos dos distribuidores Delta-T e Delta.

A Figura 8 apresenta a fração de volume morto, fração de volume pistonado e fração de volume de mistura (em percentual) existente no distribuidor para os dois modelos testados.

Para a configuração Delta T tem-se uma fração de volume morto correspondente a 31% do volume total do distribuidor. Esta fração está dividida em 49% nos veios laterais e 20% no veio central.

Para o caso Delta, a fração de volume morto corresponde a 48%, e é aproximadamente a mesma para os veios central e laterais. Pode-se observar um aumento de 20 para 47% do volume morto relacionado ao veio lateral, isso confirma os ensaios de corante que mostram que o corante desloca-se pela parte superior do distribuidor, cobrindo após a frente e deixando um vazio na zona entre os veios central e lateral (Figura 4, t=56s). Na Figura 8, pode ser observada que a distribuição de frações de volumes característicos para o veio central é a mesma para os dois

casos, Delta e Delta T, isto é, as alterações ocorridas em função da troca de modelo ficaram concentradas nos veios laterais, que são os responsáveis por 2/3 da vazão total de escoamento.

Para a configuração Delta T, tem-se uma fração de volume pistonado correspondente a 25% do volume total do distribuidor. Esta fração está dividida em 32% nos veios laterais e 10% no veio central.

Para o caso Delta, a fração de volume pistonado corresponde a 7%, e é aproximadamente 10% para o veio central e 6% para os veios laterais.

Para a configuração Delta T, tem-se uma fração de volume de mistura correspondente a 46% do volume total do distribuidor. Esta fração está dividida em 48% nos veios laterais e 41% no veio central.

Para o caso Delta, a fração de volume de mistura corresponde a 45%, e corresponde a 41% no veio central e 46% nos veios laterais.

Estes resultados mostram que um aumento de volume conjugado somente a uma variação de design não favorece especialmente o escoamento no interior do distribuidor.

No caso do modelo do distribuidor tipo Delta T, existe uma fração de volume morto global de 31%, o que corresponderia a 3,7 toneladas de aço. No Delta, a fração de volume morto é de 48% (que seria equivalente a 7,7 toneladas de aço). Pois o aumento da fração de volume morto conjugado ao aumento de volume do distribuidor faz com que o volume de aço que estaria em regime de escoamento mais lento, provavelmente com velocidades menores, seria muito maior. Isto em um caso real seria prejudicial ao escoamento do fluido podendo dar origem a problemas de perda de temperatura e de diminuição do grau de limpeza do aço.

Com relação à fração de volume pistonado é possível observar que o valor de volume pistonado relacionado ao veio central dos dois design é muito similar, entretanto quando se trata dos veios laterais esta fração diminui de 32 para 6%. Então, o escoamento pistonado, que está presente no design do Delta T, relacionado aos veios laterais praticamente desaparece (6%), como consequência, o valor global de fração de volume pistonado também diminui de maneira drástica (de 25 para 7%) e nesses veios aparece um aumento (em relação ao modelo Delta T) da fração de volume morto e de mistura. Como a fração de volume pistonado está relacionada a flotação de inclusões poderia se esperar, no caso da troca de design, uma redução da limpeza do aço.

4 CONCLUSÕES

O ensaio de corante permite verificar que o fluido esco, no caso Delta T, inicialmente na zona de concentração de turbulência e depois para os veios. Para o caso Delta observa-se uma maior dispersão do corante, este se desloca pela parte superior do distribuidor em direção aos veios, deixando uma região central interna livre de corante.

Os ensaios DTR mostram que a configuração Delta T apresenta um maior valor para tempo mínimo global, 72s, em relação à configuração Delta (tempo mínimo igual a 58s). Com relação ao tempo médio de residência, a configuração Delta T é a que apresenta o melhor valor global, ($t=0,7$). A configuração Delta apresenta um valor de $t=0,5$. O modelo Delta T apresentou valores superiores aos do modelo Delta na ordem de 35% e, nos resultados de tempo mínimo de residência, na ordem de 26%.

Em relação aos volumes característicos, na configuração Delta T, tem-se uma fração de volume morto correspondente a 31% do volume total do distribuidor. Para o caso Delta, a fração de volume morto corresponde a 48%.

Para a configuração Delta T, tem-se uma fração de volume pistonado correspondente a 25% do volume total do distribuidor. Para o caso Delta, a fração de volume pistonado corresponde a 7%.

Para a configuração Delta T, tem-se uma fração de volume de mistura correspondente a 46% do volume total do distribuidor. Para o caso Delta, a fração de volume de mistura corresponde a 45%.

Estes resultados mostram que um aumento de volume conjugado somente a uma variação de design não favorece especialmente o escoamento no interior do distribuidor no caso específico das configurações testadas.

Os resultados de volumes característicos mostram que uma troca de design, isto é, passar de Delta T a Delta, mantém as características de escoamento no veio central, aumenta as frações de volume morto e diminui a fração de volume pistonado para os veios laterais. Como os veios laterais são responsáveis por uma maior fração de volume em escoamento, essa troca não seria necessariamente vantajosa nas questões de flotação de inclusão e para a prática operacional de “*mixing tundish*”.

Agradecimentos

À Gerdau Aços Finos Piratini pelo contínuo apoio ao LASID no desenvolvimento de conhecimento tecnológico em siderurgia.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 1 HEASLIP, L.J.; MCLEAN, A; SOMMERVILLE, I.D., Continuous casting, chemical and physical Interactions during transfer operations. Warrendale, PA: Iron & Steel Society, 1983. v. 1, p. 67-84.
- 2 SAHAI, Y.; EMI, T. Melt flow characterization in continuous casting tundishes. **ISIJ International**, v..36, p.667-672, 1996.
- 3 SINGH, S.; KORIA, S.C. Physical modeling of steel flow in continuous casting tundish. **Ironmaking and Steelmaking**, v. 20, n. 3, p. 221-230, 1993.
- 4 PALAFOX-RAMOS, J.; BARRETO, J.; LOPEZ-RAMIREZ, S.; MORALES, R.D. Melt flow optimization using turbulence inhibitors in large volume tundishes. **Ironmaking and Steelmaking**, v. 28, n. 2, p. 101-109, 2001.
- 5 WOLLMANN, A. M. **Estudos de fluxo em um distribuidor de lingotamento contínuo**. 1999. Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica) - Escola de Engenharia. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1999.
- 6 DAMLE, C.; SAHAI, Y. The effect of tracer density on melt flow characterization in continuous casting tundishes – a modeling study. **ISIJ International**, v. 35, n. 2, p.163-169, 1995.

INFLUENCE OF TUNDISH DESIGN ON FLOWING PARAMETERS

*Magda Galant François
Mateus Daroit
Miguel Liska Bock
Marcos Augusto Zilles Mattiello
Antônio C. F. Vilela*

Abstract

In the steel's continuous casting, the flowing characterisation, by physical modelling, is an important tool to flowing optimisation and clean steel production. The aim of this work is evaluate the tundish design effect of flowing parameters (streamlines, average residence time, minimum residence time and characteristics volumes). In this work, two models of tundishes, with pre-established configuration, were compared. This comparison is made in terms of flow pattern (with KMnO_4 injection) and RTD curves. The results shows the design alteration does not get better, in a first time, the flow characteristics. It was observed a minimum time and average time reduction besides piston flow reduction and dead volume augmentation.

Key-words: continuous casting of steel, physical modelling, streamlines and RTD curves