

# COMO ESCOLHER UM BOM CONJUNTO MODIFICADOR DE FLUXO/DISTRIBUIDOR NO CASO DE LINGOTAMENTO CONTÍNUO DE AÇOS? <sup>1</sup>

*Magda Galant François<sup>2</sup>*

*Miguel Liska Bock<sup>3</sup>*

*Antônio C. F. Vilela<sup>4</sup>*

## **Resumo**

Atualmente a indústria siderúrgica tem buscado um melhor conhecimento do escoamento do aço líquido no interior de distribuidores com o objetivo de favorecer ou pelo menos evitar a diminuição da qualidade do produto no que se refere às inclusões. O objetivo deste trabalho é fazer uma reflexão sobre o que significa um bom conjunto modificador de fluxo/distribuidor no caso da produção de aços. Os estudos em modelos físicos consistem na visualização do fluxo, por meio de corantes, e na caracterização do escoamento, por ensaios DTR, para a determinação de tempos e volumes característicos. A metodologia empregada na execução e análise de ensaios de visualização de escoamento consiste na injeção, na forma de um pulso, de um corante líquido e o registro do escoamento em vídeo. Para o caso de determinação de curvas de tempos de residência e volumes característicos, entretanto, o procedimento comporta a injeção de um traçador ácido e a análise da variação da concentração de ácido ao longo do tempo. Espera-se, com este trabalho, melhor entender o processo de seleção de modificadores de fluxo, em função da sua influência sobre os parâmetros de escoamento, para uso em distribuidores de lingotamento contínuo de aço.

**Palavras-chave:** Qualificação de design; Modelamento físico; Distribuidores de lingotamento contínuo.

## **Abstract**

Currently, the steel industries have been searching for a better knowledge about the melt flow of steel inside tundishes with the purpose to increase or, at least, avoid losses in product quality regarding to inclusions. The objective of this paper is to discuss about what means a good set flow modifier/tundish to produce clean steels. The studies in physical modeling consist in flow visualization, by means of dye, and in the characterization of the flow by RTD techniques, to achieve the characteristics volumes. The methodology applied in the execution and analysis of the flow visualizations tests was the injection, as a pulse, of a liquid dye and the fluid flow recorded in video. For the case of RTD tests and volume characterization, however, the procedure consists in an acid tracer injection and analysis of the acid concentration changes by the time. It is expected, with this paper, a better understanding in the selection process of fluid flow modifiers, due to its influence in flow parameters, to be used in continuous casting tundishes.

**Key words:** Physical modeling; Fluid flow modifiers selection process; Continuous casting tundish.

---

<sup>1</sup> Trabalho apresentado no XXXVII Seminário de Aciaria - Internacional, 21 a 24 de maio de 2006, Porto Alegre, RS

<sup>2</sup> Engenheira Química, Dra., Pesquisadora LASID/PPGEM/UFRGS

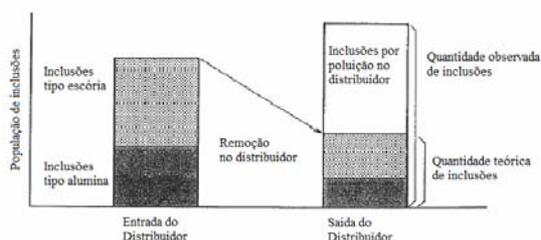
<sup>3</sup> Graduando em Engenharia Metalúrgica – UFRGS

<sup>4</sup> Engenheiro Metalúrgico, Dr.-Ing., Professor do DEMET/PPGEM/UFRGS

## 1 INTRODUÇÃO E OBJETIVOS

O distribuidor, usado na produção de aço via lingotamento contínuo, é um reator primariamente empregado como fonte de aço líquido para distribuição aos moldes. Entretanto, a necessidade de aumento de qualidade associada à redução de custos, fez com que sua importância fosse aumentada, pois pode contribuir com o processo de limpeza do aço ou pelo menos evitar o aumento do número de inclusões presentes. Embora ele possa atuar na limpeza do aço, o mais comum é que em processos de escoamento mal conhecidos ele atue como um elemento a mais para aumentar o nível de inclusões não-metálicas do aço.

Tanaka e outros<sup>1</sup> apresentam uma figura (Figura 1) onde avaliam o efeito do distribuidor no grau de limpeza do aço.



**Figura 1.** Mudança na limpeza do aço no distribuidor<sup>(1)</sup>.

A Figura 1 permite verificar que apesar do distribuidor atuar na remoção de inclusões, outras podem ocorrer por problemas de poluição, anulando o efeito do distribuidor no processo de limpeza. Estas contaminações podem ser oriundas de emulsificação e/ou arraste de escória, de reoxidação, e por desgaste de refratário.

Zhang e outros<sup>2</sup>, em um trabalho onde relatam o comportamento de inclusões na panela, distribuidor e molde, mostram que as fontes de contaminação do aço no distribuidor têm origem na panela ( $\approx 50\%$ ) e no distribuidor por reoxidação ( $\approx 50\%$ ). Os resultados mostram que ocorre uma maior remoção de macro-inclusões em relação às micro-inclusões variando conforme o design interno do distribuidor.

Marcon e outros<sup>3</sup> apresentam a evolução da composição química de inclusões ao longo de algumas corridas para a produção de um aço tipo construção mecânica. Segundo esses autores, após o refino secundário, o que prevalece no distribuidor seriam inclusões pequenas ( $<4\mu\text{m}$ ), oriundas de reoxidação. A análise mostra que inclusões maiores do que  $20\mu\text{m}$  são praticamente eliminadas ao final do processo no distribuidor de LC.

Se as inclusões forem oriundas de reoxidação, é necessário que se localize no distribuidor uma zona que permita a coalescência e o crescimento, uma região de escoamento em regime de mistura. Esta zona deve estar numa região bem definida, não muito próxima à camada de escória, para que não cause um aumento da contaminação por arraste. Ao mesmo tempo é necessário verificar onde ocorre a reoxidação, se é consequência de má selagem no tubo longo, ou em função de uma cobertura ineficiente da camada de escória. Se as inclusões encontradas no distribuidor forem originárias da panela, deve-se priorizar um escoamento com fluxo ascendente, evitar a existência de curtos-circuitos, aumentar a fração de escoamento pistonado e reduzir a fração de morto. No caso de inclusões formadas por arraste ou emulsificação de escória, oriundas do distribuidor, deve-se evitar turbulência próxima à camada de escória e reduzir ao máximo a abertura de olho no distribuidor. Se o tipo de inclusões (gênese, composição química) que ocorre na

saída de um distribuidor é conhecido, então é possível adequar o design interno do equipamento para que elas possam ser adequadas às especificações necessárias.

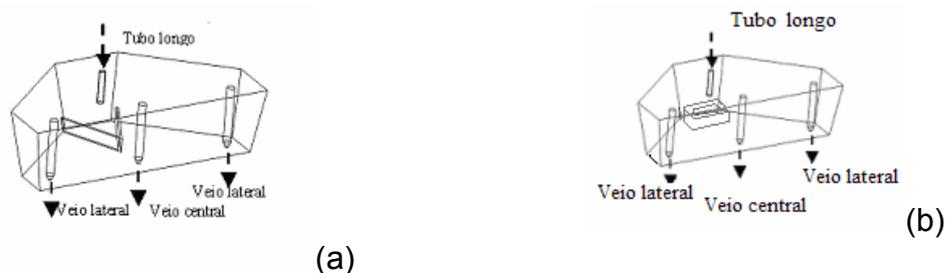
O objetivo deste trabalho é mostrar como, utilizando técnicas de modelamento físico, configurar o escoamento em um distribuidor de forma a obter melhores resultados nos parâmetros de escoamento para a produção de aços com menor teor de inclusões. Para efeito de exemplificação, estudou-se o comportamento do escoamento em um distribuidor do tipo DELTA, munido ora com uma barreira em “V” e ora com um inibidor de turbulência.

## 2 METODOLOGIA

Para a caracterização do escoamento, os modelos físicos podem fornecer várias informações sobre o escoamento no distribuidor a um custo relativamente baixo e em um prazo razoável (Heaslip e co-autores<sup>4</sup>, Sahai e Emi<sup>5</sup>). Esses estudos tratam da visualização de escoamento (com emprego de traçadores) e ensaios DTR, 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 (Singh e Koria<sup>6</sup>, e Palafox-Ramos e co-autores<sup>7</sup>,). A visualização do escoamento pode ser feita pela observação da movimentação de um corante. Para o caso de determinação de curvas de tempos de residência (curvas DTR) e volumes característicos, alguns autores (Sahai e Emi<sup>5</sup>, Singh e Koria<sup>6</sup>, e Palafox-Ramos e co-autores<sup>7</sup>, Wollmann<sup>8</sup> e François e co-autores<sup>9</sup>) discutem a metodologia para o cálculo do tempo médio de residência, o percentual de volume do distribuidor em escoamento pistonado e a fração de volume morto. No caso específico deste estudo, as variações na metodologia foram avaliadas em um trabalho anterior<sup>8</sup> e não conduzem a alterações significativas nos resultados.

### 2.1 Modelo Físico: Distribuidor Tipo Delta

A Figura 2 apresenta uma representação esquemática do modelo físico do distribuidor empregado para os ensaios e nas respectivas configurações, isto é, barreira em V e inibidor de turbulência. O modelo foi construído em acrílico, com similaridade de Froude e Reynolds, e utiliza água como fluido de simulação. Dispõe 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. O sistema hidráulico permite a realização de medições contínuas e regulagens das vazões em cada uma das três válvulas de saída do modelo. O modelo comporta um volume de 2400 litros de água. Todos os ensaios foram realizados em condições iguais, com vazão de água igual a 8,1 m<sup>3</sup>/h, tanto para os ensaios de corante como para os ensaios DTR.



**Figura 2.** Representação esquemática do modelo físico empregado para os ensaios (a) Configuração barreira em V, (b) Configuração inibidor de turbulência.

## 2.2 Ensaio de Corante

Foi empregado permanganato de potássio ( $\text{KMnO}_4$ ) como corante para visualizar a movimentação do fluido no interior do distribuidor. As injeções 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 0,1 g/l de  $\text{KMnO}_4$ . Esta metodologia segue a empregada por Wollmann<sup>8</sup>. A movimentação do corante dentro do modelo é filmada. Uma placa de captura de imagens instalada em um microcomputador é utilizada para a obtenção das imagens.

## 2.3 Ensaio DTR

Para determinar as curvas DTR foi empregada uma solução de HCl a 3,6%. As condições de injeção são idênticas às descritas para a injeção do  $\text{KMnO}_4$ . Para cada configuração foram realizados cinco ensaios. 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. Cada ensaio tem duração de aproximadamente 50 minutos após a 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 o auxílio de uma planilha eletrônica são traçadas as curvas DTR; determinados os tempos médios de residência e calculados os volumes característicos.

Os valores referentes a todo o distribuidor representam a média ponderada de todos os veios.

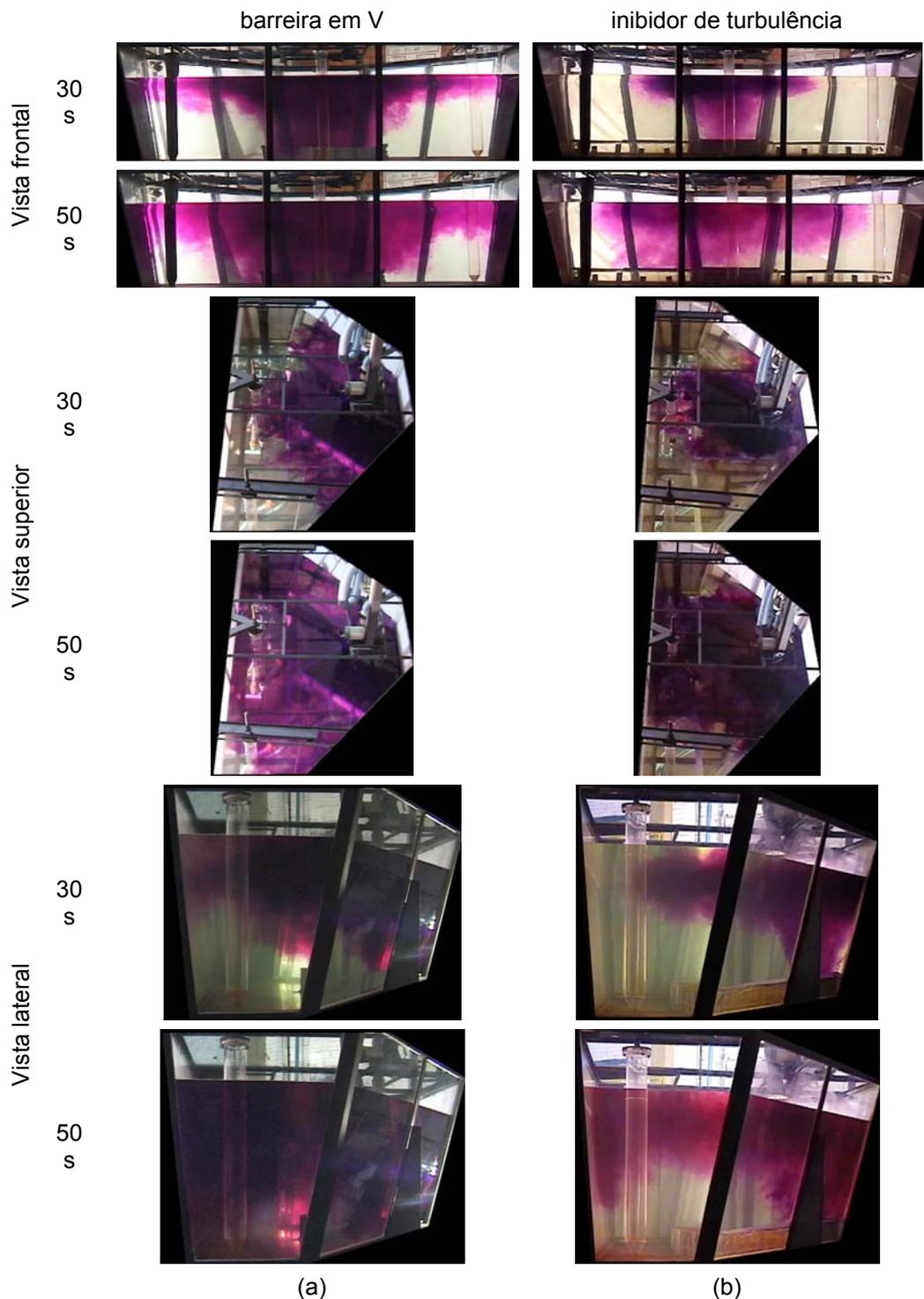
O tempo mínimo de residência é retirado da curva do ensaio. O tempo médio de residência e os volumes característicos são calculados segundo equacionamento apresentado em François<sup>8</sup>.

# 3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

## 3.1 Ensaio de Corante

A Figura 3 apresenta os resultados de escoamento, vistas frontal, lateral e superior, para os tempos de 30 e 50 s, obtidos para o modelo do distribuidor com a barreira em "V" e com o inibidor de turbulência. Quando se quer qualificar um conjunto modificador de fluxo/distribuidor em termos de visualização de linhas de fluxo é importante observar a orientação do escoamento. Os ensaios de corante permitem visualizar, quando encadeados e com as três vistas, o movimento do fluido como um todo. Obrigatoriamente não deve existir escoamento curto-circuitado, isto é, direcionado para os veios. Ele deve ser orientado para as proximidades da camada de escória, não deve mover-se com velocidades altas para evitar o cisalhamento, o arraste e emulsificação de escória. Deve ocupar todo o espaço disponível no distribuidor de forma homogênea não deixando espaços incolores, pois estes denotam volumes mortos. Nos dois casos, barreira em V e inibidor de turbulência (Figura 3), o jato dirige o fluido para o fundo e pelo efeito dos modificadores, o fluido é dirigido para cima num escoamento ascendente, retornando após aos veios. Com relação ao uso da barreira em V, o corante se dispersa com maior rapidez, atingindo os veios em menor espaço de tempo. O fato

de o corante dispersar-se com menor velocidade com o inibidor de turbulência permite que se acredite que, neste caso, haverá um maior tempo para a flotação de inclusões, visto que em ambos o fluxo é ascendente.



**Figura 3.** Resultados de corante para as vistas frontal, superior e lateral, tempos de 30 e 50 s, obtidos para o modelo do distribuidor com (a) barreira em “V” e (b) inibidor de turbulência.

O ensaio de corante é de execução relativamente fácil e a análise de seus resultados é rápida podendo ser executado antes de outros, entretanto apresenta como inconveniente o fato de não fornecer dados quantitativos. Os ensaios DTR

forneem então os dados quantitativos que permitem um apoio na seleção do design.

### 3.2 Ensaios DTR:

Os ensaios DTR são os ensaios quantitativos empregados na seleção de equipamento, fornecem resultados de tempos mínimo e médio e de volumes característicos. No caso dos tempos (médio e mínimo), busca-se, quando se tem interesse em limpeza, maximizar esses valores.

A Figura 4 apresenta os resultados de tempo mínimo de residência, para as duas configurações, para cada veio e para o distribuidor como um todo (três veios). A configuração barreira em V, com tempo mínimo igual a 58s para os veios laterais e central, apresenta uma maior homogeneidade, entretanto o valor é inferior ao encontrado para a configuração inibidor de turbulência (76 s para o veio central e 80 s para os laterais). Esses resultados confirmam o que foi visto no ensaio de corante, Figura 3, vista lateral, 50s. O corante, no caso da barreira em V, já atingiu os veios enquanto que com o inibidor, ele está se deslocando pela parede frontal em direção aos veios. Nota-se aqui a contribuição do ensaio de corante na validação dos ensaios DTR.

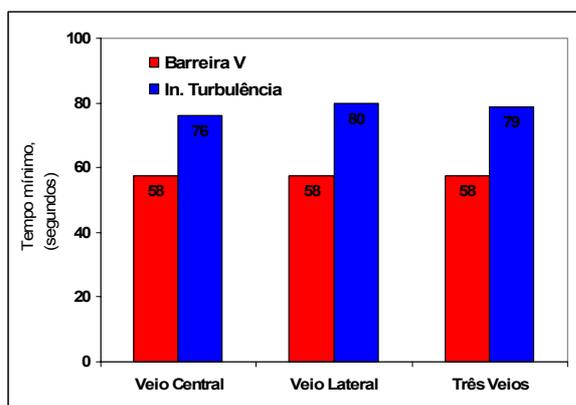


Figura 4. Tempo mínimo de residência (s)

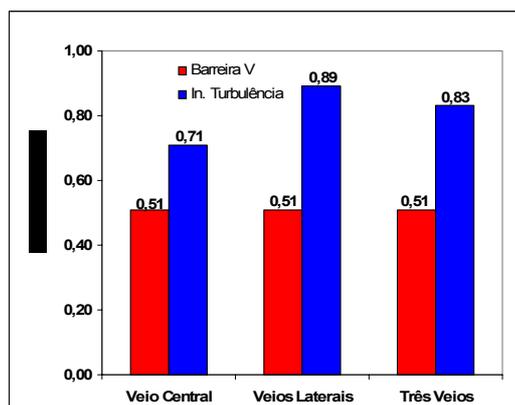


Figura 5. Tempo médio de residência (normal)

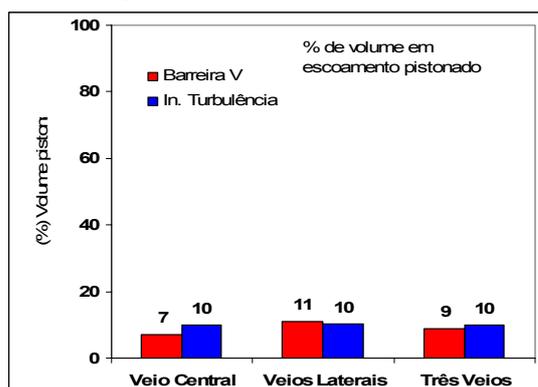
O emprego de tempo mínimo, entretanto, como variável de controle para efeito de comparação de modelos de distribuidor é de importância relativa, pois informa o menor espaço de tempo que o fluido dispõe para permanecer no modelo. Esta informação é interessante em estudos sobre trocas de qualidade quando da utilização de um mesmo distribuidor. Para efeito de limpeza de aço, esta variável não fornece informações definitivas, apenas informa que as inclusões oriundas de uma nova panela não irão alcançar o veio antes desse tempo. Com relação àquelas que se formam no distribuidor, não é possível afirmar nada.

A Figura 5 apresenta os resultados de tempo médio de residência para a configuração barreira em V e inibidor de turbulência. O caso barreira em V, (tempo médio igual a 0,51 para os veios laterais e central), mostra uma maior homogeneidade, entretanto o valor é inferior ao encontrado para o inibidor de turbulência (0,71 para o veio central e 0,89 para os laterais, resultando em um tempo médio global de 0,83). No caso da barreira em V, pode-se observar que o valor de 0,5 é muito baixo e isso permite afirmar que o fluido permanece no modelo somente a metade do tempo disponível de forma que pode ser melhorado para uso em processos que necessitem que o distribuidor atue como equipamento adequado à flotação. O uso do inibidor de turbulência favorece a permanência do fluido no

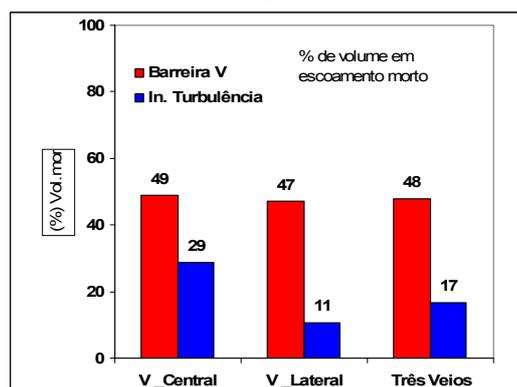
distribuidor e permite um maior tempo para a flotação, entretanto os tempos são diferentes, o que pode causar uma diferença na limpeza entre os veios.

Com relação ao uso da variável tempo médio de residência como parâmetro de controle é interessante notar que apesar dela não fornecer informações absolutas sobre a flotação, fornece o tempo que o fluido permanece no modelo. Com o auxílio das imagens dos ensaios de visualização de escoamento, Figura 3, pode-se verificar que, em ambos os casos, este é calmo e ascendente e conduz o fluido predominantemente para a camada de escória. Nessa condição é possível empregar a variável para a qualificação de design, afirmando que quanto maior o seu valor, maior a possibilidade de propiciar a flotação de inclusões.

A Figura 6 apresenta a fração de volume em escoamento pistonado para a barreira em V e o inibidor de turbulência. Nota-se para esse tipo de volume característico para a barreira em V uma fração de 7 para o veio central e 11 para o veio lateral. Com o inibidor esse valores são 10 e 11 respectivamente. Trata-se de uma fração pequena, entretanto é mais homogênea para o inibidor de turbulência, pois apresenta aproximadamente o mesmo valor para ambos os casos. Este tipo de configuração interna, em ambos os casos, não favorece a flotação de inclusões. Essas considerações permitem afirmar que este design de distribuidor, com as duas configurações testadas, necessita melhorias se ele for utilizado para procedimentos de “mixing tundish”, ou mesmo para permitir uma melhor flotação de inclusões.



**Figura 6.** Fração de volume em escoamento do tipo pistonado (%)



**Figura 7.** Fração de volume em escoamento do tipo morto (%)

A importância da contribuição da fração de fluido em escoamento pistonado como variável de controle para qualificação de design em modelos de distribuidores é discutível. Se a análise da visualização do escoamento mostra que este é do tipo ascendente, é interessante que o valor seja elevado. Se não for ascendente, e estiver direcionado diretamente para os veios, pode ser qualificado como escoamento em curto-circuito e neste caso o seu efeito é deletério à limpeza. Uma das funções deste tipo de escoamento seria de fornecer uma força auxiliar ascendente para a flotação de inclusões, e por essa razão é possível concluir que um valor elevado é interessante. A outra função para o escoamento pistonado, é no caso de operações de “mixing tundish”, e nesse caso também é interessante que o seu valor seja maximizado, pois quanto maior a porção de escoamento em fluxo pistonado, maior é a separação entre as corridas.

A Figura 7 mostra os resultados de fração de escoamento caracterizada como morto. Os valores obtidos para os dois veios no caso da configuração barreira em V (49 para o veio central e 47 para os veios laterais) mostram que estes devem produzir resultados muito similares em termos de limpeza, entretanto para o caso da configuração inibidor de turbulência (29 para o veio central e 11 para os veios

laterais,), isso não ocorre, podendo os veios laterais apresentarem resultados melhores. Além disso, os valores obtidos para o caso da barreira em V são muito elevados. Isto é, aproximadamente 50% do volume do distribuidor está subutilizado podendo apresentar gradientes de temperatura. Nesse caso recomenda-se o uso de distribuidor com tampa. Esta configuração também não favorece a limpeza do aço, pois localiza-se no centro do distribuidor, (Figura 3, vista lateral, 30 e 50s), próxima aos veios.

Para efeito de qualificação de design de equipamentos, a fração de volume morto é prejudicial ao escoamento e espera-se que o seu valor seja o menor possível. O fluido em escoamento morto, por ter um perfil de velocidade mais lento que as outras regiões, tem uma maior tendência a perder temperatura e pode causar problemas de “freezing”. Além disso, não favorece nem a flotação de inclusões (por não contribuir para o escoamento ascendente), nem a prática de “mixing tundish”, pois permite que uma fração de aço de uma determinada qualidade permaneça mais tempo no distribuidor.

Para este modelo especificamente os resultados mostram que a fração de morto é mais adequada no caso da configuração inibidor de turbulência apesar de apresentar valores diferentes entre os veios. No caso do inibidor, ela está localizada próxima ao veio central. (Figura 3, vista lateral, 30 e 50s).

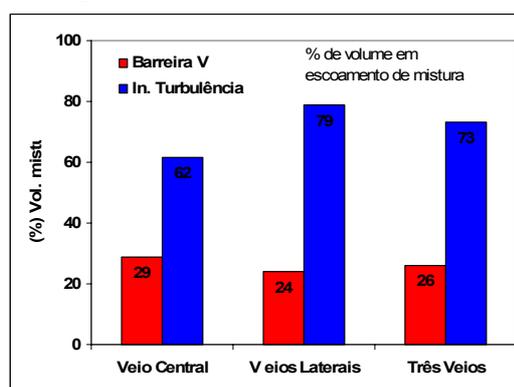


Figura 8. Fração de volume em escoamento do tipo mistura (%)

A figura 8 apresenta os resultados de fração de volume em escoamento de mistura. Os valores obtidos para as duas configurações (29 para o veio central e 24 para os veios laterais, barreira em V, e 62 para o veio central e 79 para os veios laterais, inibidor de turbulência), apresentam a maior diferença. Isto se deve ao fato que esta fração, em ambos os casos, é calculada por diferença.

O efeito da fração de fluido em escoamento do tipo mistura é permitir a homogeneização térmica e química do fluido e a coalescência e o crescimento de inclusões. Quando se busca a homogeneização, esta fração pode ser espalhada no interior do volume do distribuidor, quando se quer crescimento e coalescência de inclusões acredita-se que o melhor seria se ela fosse localizada em uma região específica do distribuidor, nas proximidades do jato de entrada.

#### 4 CONCLUSÕES

No caso das duas configurações de distribuidor testadas, buscando a seleção de uma configuração interna que favoreça o aumento de limpeza, o uso de modelamento físico permite que se verifique as vantagens e desvantagens de uma ou outra e assim definir a mais conveniente a partir dos ensaios de corante e DTR.

Com relação aos ensaios de corante busca-se então:

- ✓ a não existência de curto-circuito (nenhum dos conjuntos apresenta curto-circuito);
- ✓ orientação ascendente (as duas configurações apresentam);
- ✓ escoamento calmo na superfície (as duas configurações apresentam);
- ✓ ocupar todo o espaço disponível no distribuidor não deixando espaços incolores, (tanto a barreira em V quanto o inibidor apresentam regiões não uniforme, entretanto com a barreira é mais aparente).

Com relação aos ensaios DTR procura-se:

- ✓ maximizar os valores de tempos mínimo e médio de residência e de volume pistonado (o inibidor de turbulência apresenta os maiores valores);
- ✓ minimizar o volume morto (o inibidor apresenta o menor valor);
- ✓ manter um volume de mistura que não seja predominante, nem o menor em relação aos outros (a barreira em V apresenta um valor médio, em torno de 30%).

Acessoriamente espera-se que os resultados sejam similares para os três veios de forma a evitar grandes diferenças.

Entre as configurações testadas, o conjunto com o inibidor de turbulência apresenta mais vantagens em relação à montagem com barreira em V, pois além de uma configuração de escoamento adequada também apresenta melhores resultados em termos de tempos mínimo e médio de residência e volumes característicos (menor volume morto, maior pistonado).

Além disso, deve-se lembrar que não existe uma configuração ideal quando se parte somente de resultados obtidos por meio de DTR. Deve-se saber qual o uso que vai ser feito do equipamento e quais os objetivos que se quer atingir para juntamente com ensaios de visualização determinar a melhor configuração.

Os modelos físicos também apresentam restrições ao uso, uma vez que fenômenos térmicos são mais difíceis de simular. Sempre se deve lembrar que os efeitos de convecção natural não são levados em conta. Esses podem ser implementados em modelos numéricos previamente validados em modelos físicos.

Um exame do tipo de inclusões (morfologia, gênese, etc) deveria ser empreendido no caso do interesse do uso dessas configurações em uma planta.

## Agradecimentos

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

Aos bolsistas IC, Marcos Augusto Zilles Mattiello e Marcelo Freitas Caregnato pela execução dos testes e contínuo apoio.

## REFERÊNCIAS

- 1 TANAKA, H., NISHIHARA, R., KITAGAWA, I., E TSUJINO, R. **Quantitative analysis of contamination of molten steel in tundish**. ISIJ International, Vol. 33, (1993), pp. 1238-1243
- 2 ZHANG, L. THOMAS, B.G., et al. ISS Tech 2003 (Conf. Proc.), Indianápolis, IN, USA, April.27-30, 2003, ISS-AIME, Warrendale, PA, 2003, pp.141-156
- 3 MARCON, L., BIELEFELDT, W. V., MORAES, C.A.M., VILELA, A.C.F., **Uso de diferentes técnicas para caracterização de inclusões não-metálicas em aços**. 15 Conferencia de Aceria, IAS, 2005, San Nicolas, Argentina.

- 
- 4 HEASLIP, L.J.; McLEAN, A.; SOMMERVILLE, I.D., **Continuous Casting, Chemical and Physical Interactions during Transfer Operations**, Iron & Steel Society, Warrendale, PA, vol. 1, 1983, p. 67-84.
  - 5 SAHAI, Y. e EMI, T., **Melt flow characterization in continuous casting tundishes**, ISIJ International, Vol.36,1996, p.667-672
  - 6 SINGH, S.; KORIA, S.C., **“Physical modeling of steel flow in continuous casting tundish”**. Ironmaking and Steelmaking, 1993, vol. 20, no. 3, p. 221-230.
  - 7 PALAFOX-RAMOS, J., BARRETO, J., LOPEZ-RAMIREZ, S. E MORALES, R.D. **“Melt flow optimization using turbulence inhibitors in large volume tundishes”**, Ironmaking and Steelmaking, 2001, vol. 28, no. 2, p. 101-109.
  - 8 WOLLMANN, A. M. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós Graduação da Escola de Engenharia. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1999
  - 9 FRANÇOIS, M. G., BOCK, M. L., MATTIELLO, M. A. Z. e VILELA, A.C. F. **Contribuição ao entendimento do uso dos tempos e volumes característicos em modelos físicos de distribuidor de lingotamento contínuo**. In: 15 Conferencia de Aceria do IAS, San Nicolas, Argentina, 2005.