

FLUXO ASSIMÉTRICO EM UM DISTRIBUIDOR DE DOIS VEIOS E SEU EFEITO SOBRE A QUALIDADE DO AÇO*

João Vítor Gomes Guimarães Ananias¹
Weslei Viana Gabriel²
Thiago Araujo Santos de Oliveira¹
Salvatore Giuliano Peixoto Tropa de Abreu¹
Itavahn Alves da Silva³
Johne Jesus Mol Peixoto³
Carlos Antônio da Silva³

Resumo

O fluxo de aço em um distribuidor de lingotamento contínuo é um dos fatores que ajuda a determinar a qualidade final do aço. O presente trabalho aborda o caso de fluxo assimétrico em um distribuidor de dois veios provocado pelo posicionamento descentralizado da válvula longa, avaliando o efeito de diferentes configurações de barreiras e diques na assimetria, além da influência nos campos de velocidades. Foram realizados testes em modelo físico de acrílico, utilizando água para simular o aço e KCl como traçador para obtenção das curvas de Distribuição de Tempo de Residência (DTR). Simulação computacional e a técnica PIV também foram utilizadas para análise do fluxo. Foi possível verificar que a utilização de barragens e diques melhoraram as condições para a flotação de inclusão, devido ao aumento do tempo mínimo de residência do aço, além da diminuição de zonas mortas e da quantidade de descarte gerada durante a troca de painéis. A utilização de barragens e diques em conjunto foram eficientes para uma melhor distribuição do fluxo na superfície livre do distribuidor, o que também favorece a limpidez do aço.

Palavras-chave: Distribuidor, fluxo assimétrico, simulação matemática, PIV.

ASYMMETRIC FLOW IN A TWO STRAND TUNDISH AND ITS EFFECTS ON STEEL QUALITY

Abstract

The liquid flow pattern inside a continuous casting tundish is a key factor as far as the final steel quality is concerned. This work deals with the asymmetric fluid flow in a two strand tundish due to the ladle shroud decentralized position. The effects of different weir and dam positions on the flow asymmetry and on the fluid velocity field are assessed. Trials were performed in an acrylic model, using water to simulate liquid steel and KCl as tracer in order to yield the RTD curves. Furthermore, the fluid flow was analyzed by mathematical simulation as well as PIV technique. It was possible to verify that weirs and dams are able to significantly decrease the asymmetry and to improve the inclusion flotation, due to the increase of the minimum residence time as well as the decrease of dead zones and amount of ladle change intermixed steel. Also weirs and dams combined seem to improve the fluid flow distribution on the free surface, favoring the steel limpidity.

Keywords: Tundish, asymmetric flow, mathematical simulation, PIV.

¹ Graduando em Engenharia Metalúrgica, Escola de Minas-UFOP, Ouro Preto, MG, Brasil.

² Eng. Metalurgista, MSc., Doutorando em Engenharia de Materiais, Redemat-UFOP, Ouro Preto, MG, Brasil.

³ Eng. Metalurgista, Doutor, Professor, DEMET, EM-UFOP, Ouro Preto, MG, Brasil.

1 INTRODUÇÃO

O fluxo de aço no interior do distribuidor é um dos fatores que ajuda a definir a qualidade final do aço, uma vez que o mesmo é o último equipamento utilizado antes da solidificação do produto [1]. No distribuidor é possível caracterizar três tipos diferentes de regiões de fluxo: zona de mistura perfeita, onde gradientes de composição e térmicos tendem a serem dissipados devido à forte turbulência; zona fluxo pistonado, em que o aço se move com velocidade constante sem haver mistura; e zona de volume morto, região na qual o aço permanece por um longo período, diminuindo o volume útil do distribuidor [2]. Barragem, dique e inibidor de turbulência são os principais mobiliários utilizados para otimização do escoamento no distribuidor. Esses acessórios buscam aumentar o tempo mínimo de residência do aço líquido no distribuidor, o que implica em aumento da zona de fluxo pistonado [3]. Cloete et al. [4], Barbosa et al. [5] e Harnsihacacha et al. [6] obtiveram resultados que mostram a eficiência dos mobiliários no aumento do tempo mínimo de residência do aço no distribuidor.

Um fator muito importante e que impacta diretamente na qualidade do aço produzido é a simetria do fluxo. Chattopadhyay et al. [7] analisaram a influência do posicionamento da válvula longa e o seu efeito no fluxo de aço em um distribuidor de quatro veios realizando simulação física e matemática. O resultado obtido mostrou que ao se inclinar a válvula longa em 5° em relação à vertical obteve-se um fluxo assimétrico, o que resultou em redução do tempo de residência do aço em um dos lados do distribuidor, e aumento do número de inclusões que passam pelos veios. Outro fator que interfere na simetria do fluxo são os mobiliários. Zhong et al. [8] realizaram simulação física e matemática em um distribuidor de quatro veios em formato "T", adicionando-se duas barragens fendadas com furos inclinados posicionados diferentemente. Essa diferença no posicionamento dos furos resultou numa assimetria de fluxo nos veios, impactando na qualidade do produto lingotado. Cui et al. [9] mostraram que a vazão nos veios pode ser um parâmetro importante para a simetria do fluxo. Foram realizadas simulações físicas em um distribuidor de dois veios operando com vazões diferentes. Quanto maior a diferença de vazão entre os veios, maior foi a assimetria provocada no fluxo, havendo diferença quanto à fração de zona morta e tempo de residência.

O presente trabalho tem como objetivo estudar o fluxo assimétrico em um distribuidor de dois veios provocado pelo posicionamento descentralizado do conjunto válvula longa/inibidor de turbulência, avaliando o efeito de diferentes configurações de barreiras e diques na assimetria de fluxo assim como a influência sobre o campo de velocidades.

2 DESENVOLVIMENTO

Os testes foram realizados em um modelo físico em escala (λ) 1:4 de um distribuidor de dois veios, de lingotamento de placas. Água a 25°C foi utilizada para simular o comportamento do aço líquido a 1600°C. Barragens e diques foram instalados para modificação adicional de fluxo. Medidores de vazão e de condutividade foram acoplados em cada veio, realizando medições instantâneas de vazão e permitindo determinar a concentração de traçador, KCl, para obtenção de curvas de distribuição de tempo de residência (DTR).

O modelo é operado em similaridade dinâmica com um distribuidor industrial, sendo o critério de similaridade definido conforme Equação 1 (adimensional de Froude). No modelo físico foi utilizada uma vazão de entrada de 40 l/min, sendo a vazão de saída igual a 20 l/min para cada veio, e o volume de trabalho 160 L.

$$Fr = \frac{V^2}{Lg} \quad (1)$$

Em que: L é comprimento característico; V, a velocidade característica e g, a aceleração da gravidade.

Quatro configurações de mobiliários foram estudadas: a primeira apresentando somente inibidor de turbulência (configuração SB), a segunda com inibidor de turbulência e barragens, apresentando dois furos com inclinação de 23° em relação a horizontal (configuração AB) e a terceira e quarta com barragens e diques (configurações BD1 e BD2) variando as distâncias do dique ao centro da válvula longa (Dd), do dique ao fundo do distribuidor (Ddf), da barragem ao centro da válvula longa (Db) e altura da barragem (Hb). A Figura 1 ilustra essas configurações.

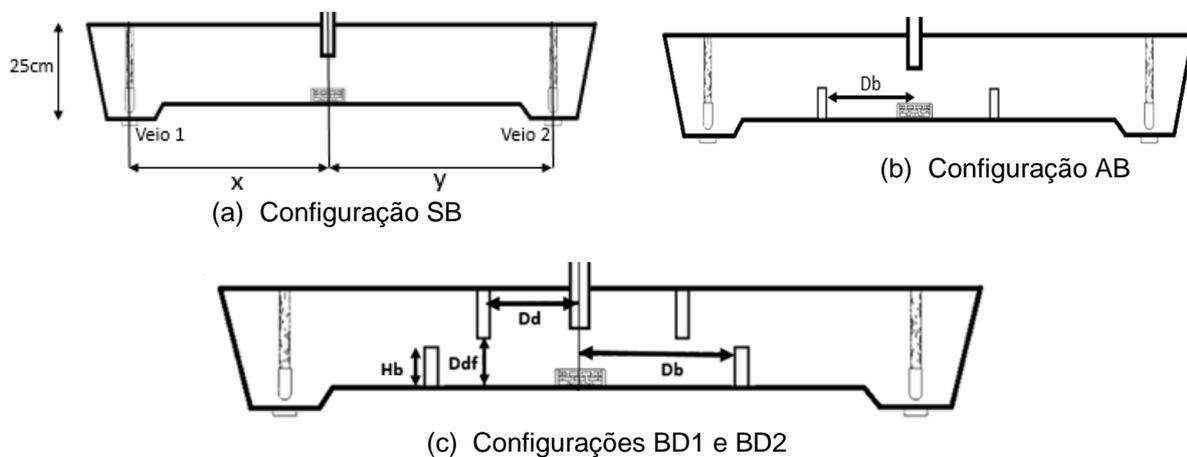


Figura 1. Posicionamento das mobílias no distribuidor.

2.1 Modelo Físico

Szekely e Ilegbusi [10] mostram de maneira detalhada como as curvas DTR são empregadas para caracterizar o fluxo em distribuidores. Merder e Pieprzyca [11], Silva [12], entre outros, seguiram a mesma metodologia em seus trabalhos. Em distribuidores de dois veios com fluxo simétrico é prática apresentar valores médios (dos dois veios) de parâmetros operacionais. Tal consideração não é conveniente se o fluxo é esperado ser fortemente assimétrico, com intensidade que se reflete na qualidade individual do aço provindo de cada veio. Neste caso, o tratamento precisa ser individualizado.

Como primeiro passo a escala de tempo pode ser normalizada a partir da expressão (Equação 2):

$$\theta = \frac{t}{t_{nominal}} \quad (2)$$

Em que t é o tempo (s) e $t_{nominal}$ é o tempo nominal de residência do líquido no interior do reator (s), isto é a razão entre o volume do reator e a somatória da vazão dos dois veios.

A função de distribuição de probabilidade dos tempos de residência (curva DTR) é então estimada pela transformação aplicada aos dados de cada veio, pela seguinte expressão (Equação 3):

$$E(t) = \frac{C}{\int_0^{\infty} C \cdot dt} \quad (3)$$

Aqui C é a concentração de traçador medida na saída para cada veio. O tempo médio de residência de cada veio é, portanto, dado por (Equação 4):

$$\tau = \int_0^{\infty} t E(t) dt \quad (4)$$

A partir da curva E(t) desenvolve-se, por integração direta, a curva cumulativa de distribuição dos tempos de residência, F(t):

$$F(t) = \int_0^t E(t) dt \quad (5)$$

que fornece a fração de elementos de fluido com tempo de residência inferior a t.

Desta forma, cada veio pode ser analisado de forma individual, como requer a condição de fluxo fortemente assimétrico.

Neste trabalho optou-se, para fins comparativos, por estimar a quantidade de material de mistura como aquele material lingotado no intervalo de tempo entre os valores correspondentes a F=0,2 e F=0,7. O tempo mínimo de residência de cada veio é o tempo necessário para que se observe F=0,02.

Assim, a fração de fluxo em pistão (FFP) e de volume morto (FVM) são dadas respectivamente pelas equações (6) e (7):

$$FFP = \frac{t_{\text{mínimo}}}{t_{\text{nominal}}} \quad (6)$$

$$FVM = \int_{2\tau}^{\infty} (t/t_{\text{nominal}}) E(t) dt \quad (7)$$

Conseqüentemente o valor da fração de mistura perfeita será dado pela Equação 8:

$$FFP + FMP + FVM = 1 \quad (8)$$

2.2 PIV (Velocimetria por Imagens de Partículas)

Para verificar a influência das barreiras nos perfis de velocidade do distribuidor além de validar o modelo matemático, utilizou-se a metodologia PIV. Na realização do ensaio, injetou-se microesferas banhadas a prata de 5 µm de diâmetro pela válvula longa; tais partículas possuem a mesma densidade da água e conseqüentemente

acompanham o fluxo. O laser e a câmera de alta resolução, foram posicionados conforme apresentado na Figura 2.

Foram realizados testes com as configurações SB e BD2. Conforme mostra a Figura 2, o distribuidor foi dividido em três regiões: o plano AA', próximo a válvula longa; o plano BB' mais centralizado e o plano CC' na região de saída. Para a realização do PIV, não foi utilizado o tampão.

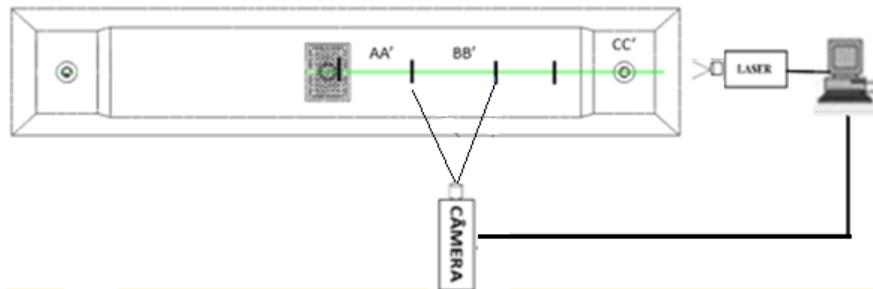


Figura 2. Representação esquemática da montagem para realização de medições utilizando PIV e as regiões analisadas.

2.3 Modelo Matemático

O software CFX 19.1 (Ansys®) versão acadêmica foi utilizado para realizar a simulação matemática do fluxo no distribuidor, resolvendo as equações da continuidade, de conservação de quantidade de movimento (forma turbulenta das equações de Navier-Stokes), e de espécie química (para o transporte de traçador). O modelo de turbulência adotado foi o modelo $k-\epsilon$ padrão e utilizou-se os valores padrões do software para as propriedades físicas da água e do ar (a 25°C). Mais detalhes podem ser obtidos em [13].

A geometria utilizada nas simulações foi construída através do software Design Modeler e suas dimensões seguem as dimensões do modelo físico. A malha foi construída utilizando o software Meshing Modeler. O estudo de independência de malha foi realizado pelo monitoramento de velocidade em alguns pontos do distribuidor, obtido em simulações com malhas de tamanhos variados. Obteve-se uma malha de 2 mm nas paredes do inibidor, 5 mm na região acima do inibidor e no tubo longo, 6 mm próxima aos veios, e 8 mm no restante do distribuidor utilizando a ferramenta *element sizing*, com 5 camadas de refinamento nas paredes através da ferramenta *inflation*, totalizando cerca de 1 milhão de elementos e 413 mil nós.

As condições de contorno aplicáveis ao problema foram:

- Condição de não deslizamento aplicada em todas as paredes (distribuidor, tubo longo e mobiliários), regiões onde o fluido possui velocidade zero;
- Um plano de simetria, o que reduz consideravelmente o custo computacional das simulações;
- Entrada: vazão mássica de água, correspondente a metade de 40 l/min (dada a condição de simetria). O regime de escoamento selecionado é o subsônico, com uma intensidade de turbulência de 5% (média);
- Veios 1 e 2: condição de saída, com vazão mássica de água, correspondente a metade de 20 l/min (dada a condição de simetria);
- Condição de escorregamento livre na superfície do distribuidor;

Na simulação de injeção de traçador (solução salina), foram realizadas simulações em regime transiente (*timestep* de 0,01 s) para avaliar a dispersão de um traçador, representado pela função *Additional Variables*, utilizando a opção escalar volumétrica (kg/m³). Um pulso de traçador é adicionado na entrada do tubo longo, com 1 s de duração como no modelo físico. Os resultados de fluxo obtidos nas simulações em regime permanente são utilizados como condição inicial para garantir que o traçador seja inserido no modelo em uma etapa com fluxo completamente desenvolvido. Além disso para reduzir o tempo de simulação, utilizando a ferramenta *Expert Parameters* do CFX foram desabilitadas as resoluções de todas as equações, exceto aquela correspondente ao transporte de massa do escalar, permitindo alcançar o tempo total de simulação de 1200 segundos em até três dias de cálculo.

2.4 Resultados

Alguns aspectos da influência de diques e barragens no fluxo no interior do distribuidor podem ser observados na Figura 3. Os tempos médios, τ , Figura 3(a), são sempre maiores para o veio 2. Esse comportamento é explicado pela assimetria geométrica do distribuidor, e conseqüente assimetria de fluxo. Para caracterizar a assimetria do distribuidor, isto é, a diferença entre os veios, foi calculada através da Equação 9 uma relação percentual de quanto a assimetria foi reduzida para cada configuração:

$$A\% = \left(\frac{t_{\text{mínimo;veio 2}} - t_{\text{mínimo;veio 1}}}{t_{\text{mínimo;veio 1}}} \right) \times 100 \quad (9)$$

Os valores foram 22,3%, 31,8%, 15% e 15,2% para a configuração SB, AB, BD1 e BD2, respectivamente. Nota-se que existe uma assimetria consideravelmente alta para a configuração AB, o que compromete o controle da qualidade do aço produzido. Tanto os intervalos de tempo para a flotação de inclusão são muito diferentes veio a veio como os intervalos de produção de intermix. Por outro lado, nas configurações BD1 e BD2, nota-se que a assimetria caiu para menos da metade, mostrando que essas configurações foram eficientes no que diz respeito a redução da assimetria no distribuidor.

As configurações BD1 e BD2 apresentaram maior valor de tempo médio de residência, o que favorece as condições de flotação de inclusão e limpeza do aço. A melhor condição de flotação de inclusão, ou seja, o maior tempo mínimo de residência, $t_{\text{mínimo}}$, tanto para o veio 1 quanto para o veio 2, se dá para a configuração BD2, enquanto a pior condição é aquela utilizando-se apenas inibidor de turbulência, SB, vide Figura 3(b). Liu et al. [14], Bensouici et al. [15] e Boudjabi et al. [16] também observaram em seus trabalhos uma melhora nas condições para a flotação de inclusão com a utilização de barreiras/diques e inibidor.

Para aplicações mais nobres as placas devem atender a requisitos de limpeza mais estritos, que incluem mesmo as inclusões de menor tamanho, por exemplo 10 μm . Uma análise macroscópica do desempenho do distribuidor quanto à flotação de inclusões é normalmente dada pela fração de inclusões removidas nas duas primeiras seções do distribuidor, de mistura perfeita e de fluxo em pistão. Para inclusões pequenas, cuja flotação pode ser explicada pela Lei de Stokes, a quantidade residual de inclusões na saída de cada seção é dada pela Equação 10:

$$r = 1 - \frac{V_{terminal} t_{residência}}{H} \quad (10)$$

Onde $V_{terminal}$ é a velocidade terminal de ascensão da inclusão dada pela Lei de Stokes; $t_{residência}$ é o tempo de residência naquela seção específica do distribuidor; H é o nível de aço no distribuidor.

Então ambas as seções contribuem de maneira similar à flotação de inclusões. Desta forma é conveniente associar o tempo de residência (efetivo para remoção de inclusões) ao tempo médio de residência, descontada a fração de volume morto (calculada com base no limite 2τ), isto é (Equação 11):

$$t_{residência} = \tau (1 - FVM) = \int_0^{2\tau} t E(t) dt \quad (11)$$

A título de exemplo considerando configuração BD2, inclusões de alumina (3000 kg/m^3) e propriedades do aço típicas (7000 kg/m^3 ; $6,5 \text{ mPa.s}$); $V_{terminal}$ igual a $3,35 \times 10^{-5} \text{ m/s}$; H da ordem de 1m se estima que cerca de 98% das inclusões de $10 \mu\text{m}$ provindas da panela adentram o molde. Portanto para esta faixa de tamanho de inclusões o distribuidor não pode ser pensado como um reator efetivo para remoção de inclusões, a menos que medidas adicionais sejam tomadas (por exemplo a implantação de cortinas gasosas). Modo geral se espera que as piores performances sejam para aquelas configurações que combinam alta fração de volume morto com baixo tempo médio de residência, vide Figuras 3(a) e 3(c).

Outro aspecto importante a se observar é como a fração de volume morto (FVM) impacta a produção de intermix. De acordo com a Figura 3(c) é possível verificar que a configuração BD1 foi a mais eficiente na redução do volume morto.

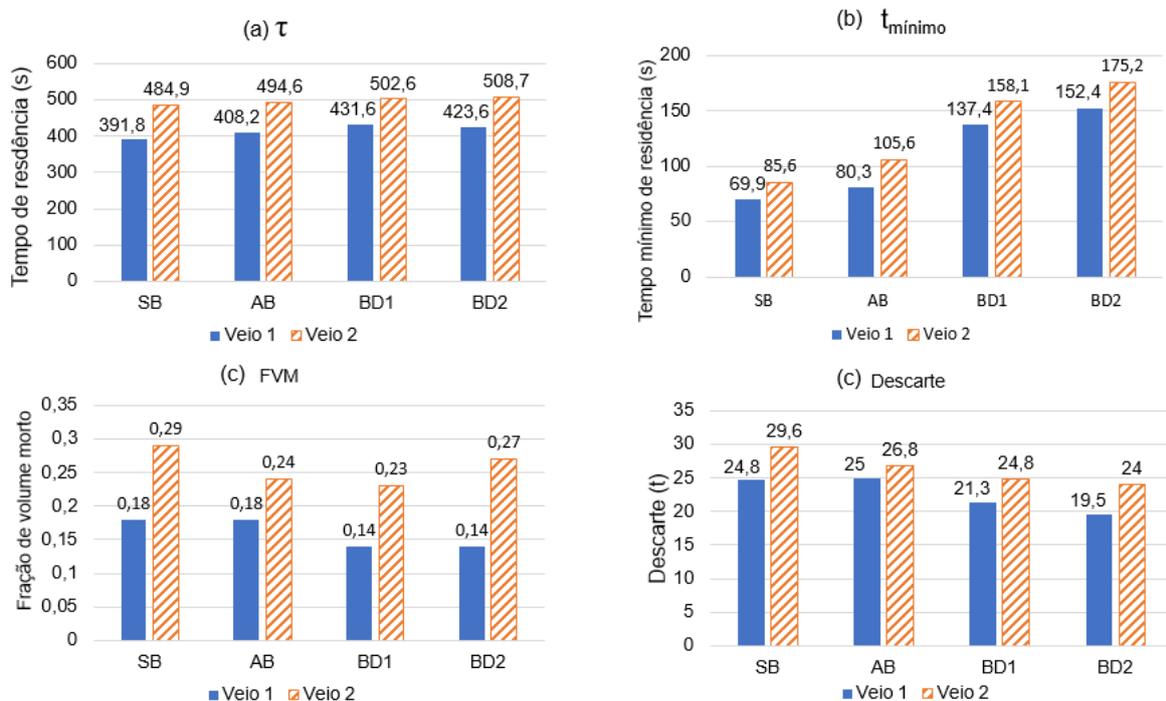


Figura 3: Valores médios de: (a) tempos médios de residência, τ ; (b) tempos mínimos de residência, $t_{\text{mínimo}}$; (c) fração de volume morto, FVM e (d) descarte em função da configuração de mobiliários do distribuidor.

A configuração BD2 foi a mais eficiente para a redução do descarte para ambos os veios. Essa redução implica em uma menor quantidade de aço descartada, aumentando o rendimento metálico e eficiência do processo.

Para elucidar as alterações do fluxo no interior do distribuidor com a introdução das barreiras, foram realizados testes via técnica PIV e simulações numéricas para as condições sem barreira (SB) e com barreira e dique 2 (BD2). Observa-se na Figura 4 os perfis de velocidade obtidos no plano AA'. É possível verificar que ao sair da válvula longa, o fluido se choca com o inibidor de turbulência e retorna à superfície com alta velocidade, deslocando-se horizontalmente. Na Figura 4(b), a presença do dique altera a direção de deslocamento do fluido, aumentando o número de vórtices e reduzindo a velocidade superficial após a barreira. Estas alterações na direção do fluxo implicam em alterações de tempo mínimo de residência. Destaca-se ainda uma boa concordância entre os perfis calculados pelo PIV e pelo modelo numérico.

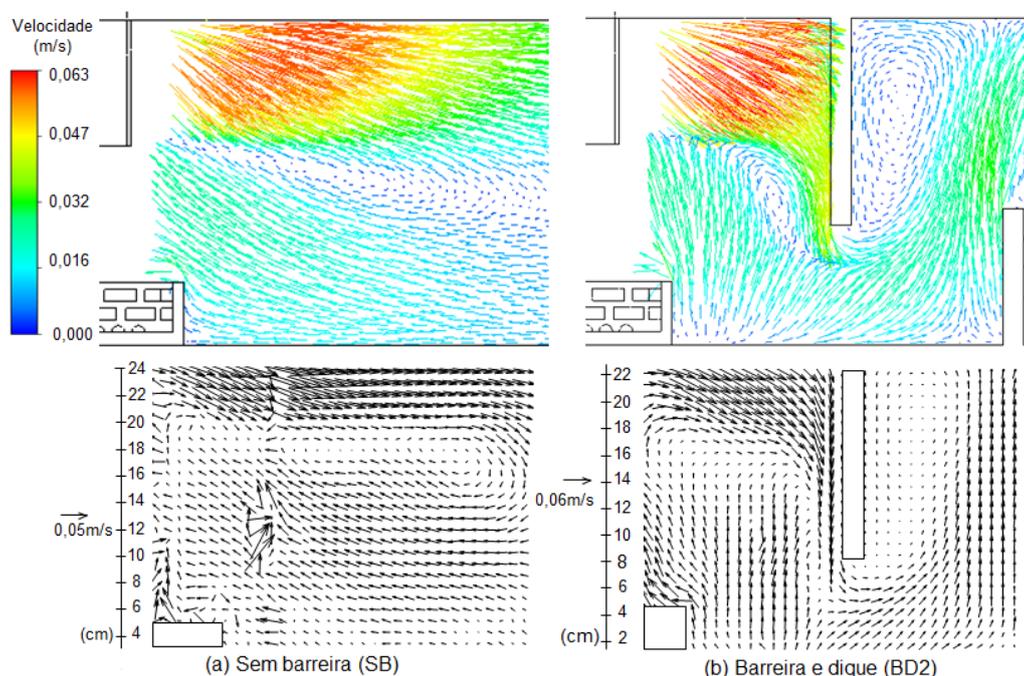


Figura 4: Comparação do perfil de velocidades no plano AA' da simulação matemática (superior) e do PIV (inferior) para configuração: (a) sem barreiras (SB), (b) com barreira e dique (BD2).

Na região intermediária de fluxo (entre inibidor e veio, plano BB', Figura 5), verifica-se que na parte inferior o fluido retorna em direção ao inibidor, enquanto o fluxo principal segue pela parte superior do distribuidor até a região de saída, plano CC', sendo direcionado para o veio. Na Figura 6, o fluxo retornando pela parte inferior do plano BB' é guiado novamente pela barragem ao encontro do fluxo principal na região superior, seguindo em direção ao veio.

O fluxo na parte superior do distribuidor também foi analisado por meio do modelo numérico (Figura 7). É possível verificar que sem as barreiras, o líquido se desloca majoritariamente próximo às paredes do distribuidor indo diretamente para o veio 2, resultando no tempo mínimo de residência baixo para essa condição. Com a presença das barreiras, o fluxo oriundo do tubo longo precisa inicialmente contornar os obstáculos (dique e barragem) como observado nas Figuras 5 e 6, e depois percorrer a parte superior uniformemente distribuído até a região do veio. Essas

alterações no comportamento do fluido fazem com que o tempo mínimo de residência aumente significativamente como foi encontrado nos resultados com injeção de traçador.

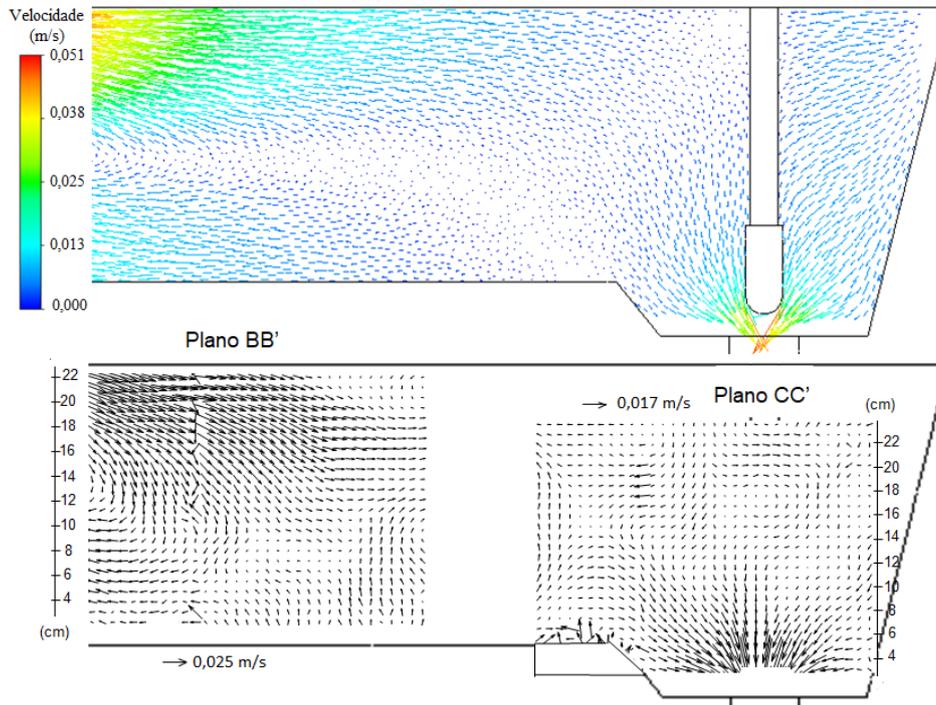


Figura 5: Comparação entre o modelo matemático e o PIV para as regiões BB' e CC' na configuração SB.

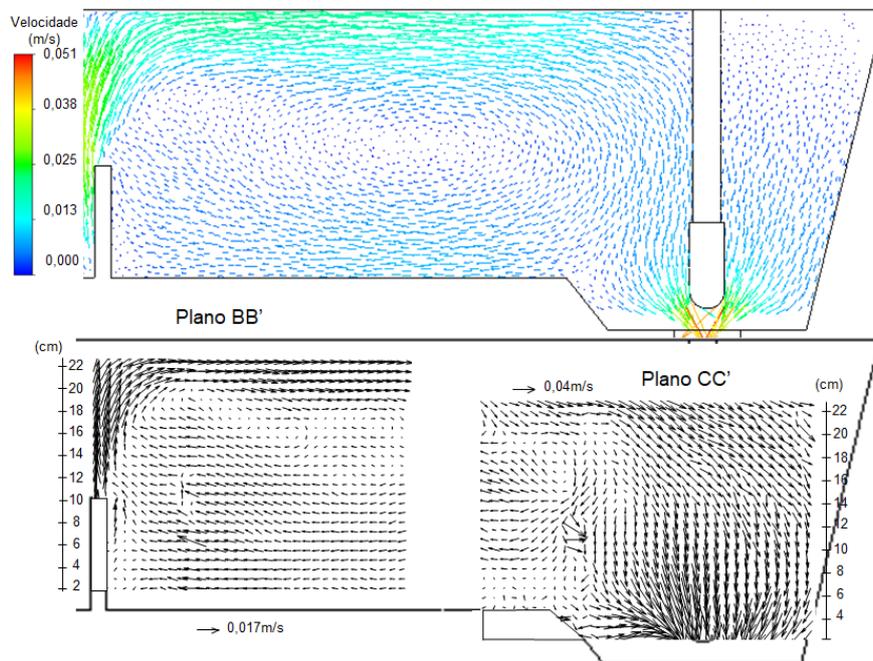


Figura 6: Comparação entre resultados do modelo matemático e de PIV para as regiões BB' e CC' na configuração BD2.

É possível notar também, Figura 7, uma tendência à recirculação do líquido na região por sobre o veio. Esta estrutura pode resultar no desenvolvimento de um

vortex durante a redução de nível, no final da operação de lingotamento ou durante a troca de painelas.

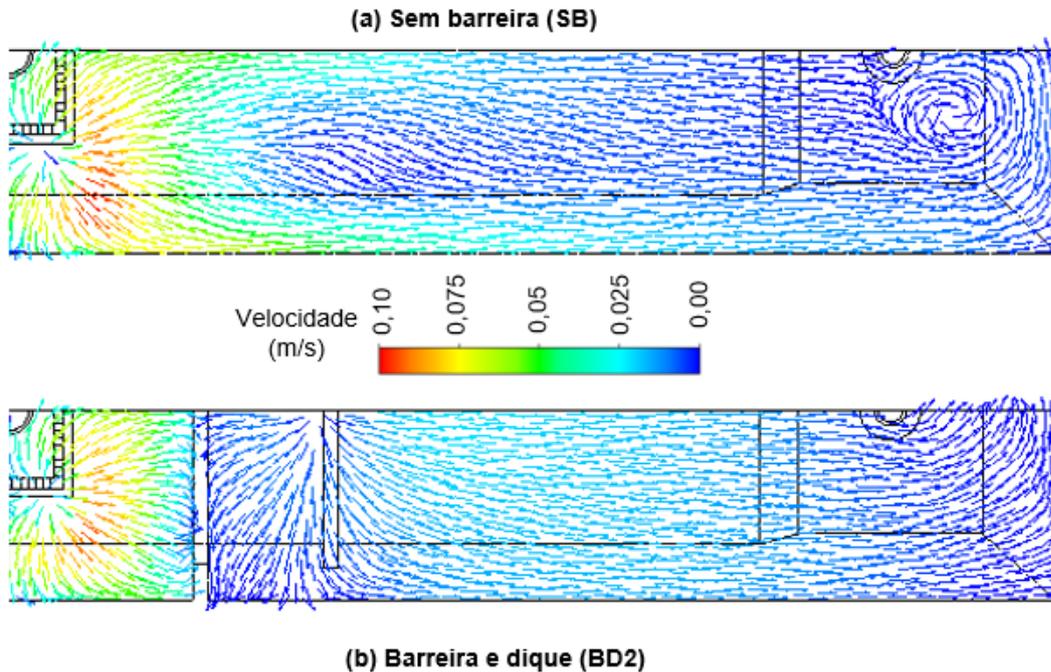


Figura 7: Perfil de velocidades na superfície livre do distribuidor para configuração: (a) sem barreiras (SB); (b) com barreira e dique (BD2).

Os resultados obtidos na simulação matemática com injeção de traçador são apresentados nas Figuras 8 e 9. Nota-se que as curvas DTR do modelo físico e matemático na configuração BD2 para ambos os veios apresentam resultados similares. Os tempos de residência, a fração de volume morto e o descarte calculados a partir destas curvas também apresentam boa concordância (Figura 9).

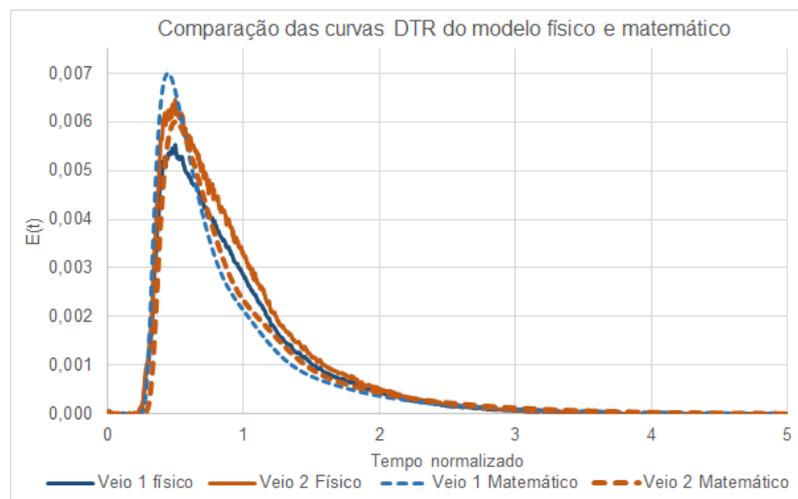


Figura 8: Comparação entre as curvas DTR, dos modelos físico e matemático.

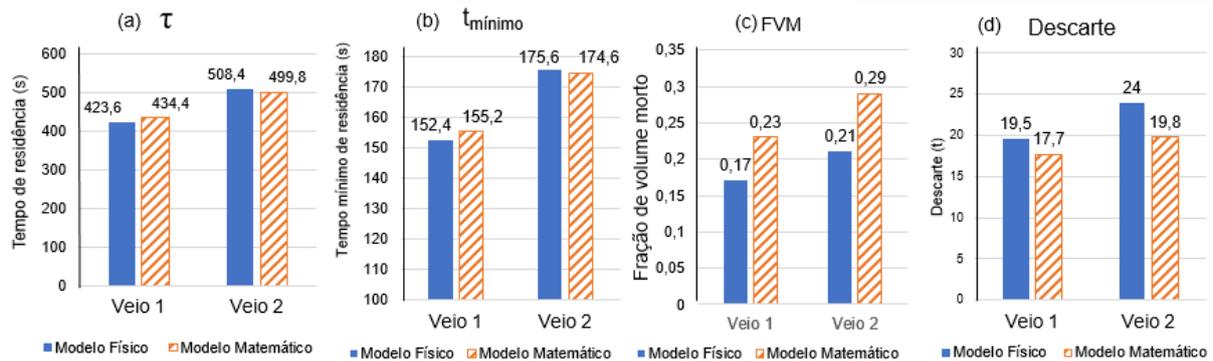


Figura 9: Comparação entre resultados do modelo físico e matemático para a configuração BD2.

3 CONCLUSÃO

Pelos resultados obtidos foi possível concluir que:

- A assimetria geométrica descrita neste trabalho introduz assimetria de fluxo significativa, como se pode aferir pela comparação de valores de τ , $t_{\text{mínimo}}$ e intermix;
- A combinação de inibidor de turbulência, dique e barragem foi capaz de reduzir a assimetria do fluxo, sendo a configuração BD2 a mais eficiente. A combinação de inibidor de turbulência e barragem (AB), levou ao aumento da assimetria de fluxo, em comparação à configuração utilizando somente inibidor (SB);
- Os perfis de velocidade no plano de simetria foram obtidos através da técnica PIV, e possibilitaram uma caracterização das alterações ocorridas pela introdução das barreiras;
- Observou-se uma boa concordância entre os perfis calculados via PIV e pelo modelo numérico, assim como entre as curvas DTR e os tempos de residência calculados para a configuração BD2.
- Diques e barragens produziram um fluxo superficial mais uniformemente distribuído comparativamente ao que ocorre somente com inibidor de turbulência, onde se observa um fluxo majoritariamente nas paredes.

Agradecimentos

Os autores agradecem à Fundação Gorceix, Fapemig, Capes e ao CNPq.

REFERÊNCIAS

- 1 Machado FD. Modelagem física de remoção de inclusões em distribuidor de lingotamento contínuo de tarugos [dissertação de mestrado]. Porto Alegre: UFRGS; 2014.
- 2 Rizzo, EMS. Introdução aos processos de lingotamento dos aços. São Paulo: Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais; 2006.
- 3 Alves, JG. Melhoria no padrão de escoamento do aço líquido no distribuidor do lingotamento contínuo 01 da APERAM Inox América do Sul [dissertação de mestrado]. Belo Horizonte: UFMG; 2014.
- 4 Cloete JH; Akdogan G; Bradshaw SM; Chibwe DK; Physical and numerical modelling of a four-Strand steelmaking tundish using flow analysis of different

- configurations. The Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy. 2015; 115: 355-362.
- 5 Barbosa FA, Araújo Filho GM, Tavares RP. Modelagens matemática e física do escoamento do aço líquido em diferentes projetos de distribuidor do lingotamento contínuo da Usiminas. Tecnologia em Metalurgia e Materiais. 2005; 1(4): 34-39.
 - 6 Harnsihacacha A, Pipiyapaneeekoon A, Kowitwarangkul P. Physical Water Model and CFD Studies of fluid flow in a single strand tundish. Thailand International Metallurgy Conference. 2018;5: 9220-9228.
 - 7 Chattopadhyay K, Liu FG, Isac M, Guthrie RIL. Effect of vertical alignment of ladle shroud on transient steel quality output from multistrand tundish. Institute of Materials, Minerals and Mining. 2011; 38(2): 112-118
 - 8 Zhong L, Li B, Zhu Y, Wang R, Wang W, Zhang X. Fluid Flow in A Four-Strand Bloom Continuous Casting Tundish with different flow modifiers. ISIJ International. 2007; 47:88-94.
 - 9 Cui H, Liu Y, Li D. Fluid Flow Characterization in asymmetric tundish. ISIJ International. 2015; 55(12): 2608-2604.
 - 10 Szekely J, Ilegbuse OJ. The physical and mathematical modeling of tundish operations. New York: Springer-Verlag; 1988.
 - 11 Merder T, Pieprzyca J. Optimization of two-strand industrial tundish work with use of turbulence inhibitors: physical and numerical Modeling. Steel Research International. 2012; 83(9999): 1-10.
 - 12 SILVA HHS. Remoção de inclusões em um distribuidor assistida por Injeção de gás inerte [dissertação de mestrado]. Ouro Preto: UFOP; 2017.
 - 13 ANSYS: ANSYS CFX- Theory Guide 19.1. Canonsburg: ANSYS; 2018.
 - 14 Liu JG, Yan HC, Liu L, Wang XH. Water modeling of optimizing tundish flow field. Journal of Iron and Steel Research, International. 2007; 14(3): 13-19.
 - 15 Bensouici M, Bellaouar A, Talbi K. Numerical investigation of the fluid flow in continuous casting tundish using analysis of RTD curves. Journal of Iron and Steel Research, International. 2009; 16(2): 22-29.
 - 16 Boudjabi AF, Bellaouar A, Lachi M, Elwakil N. Physical modelling of a continuous casting tundish: a parametric study of residence time distribution curves. WSEAS TRANSACTIONS on APPLIED and THEORETICAL MECHANICS. 2008; 10: 849-858.