

ANÁLISE DO FLUXO EM MOLDE DE LINGOTAMENTO CONTÍNUO DE BEAM BLANK: SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL E FÍSICA*

Johne Jesus Mol Peixoto¹
Weslei Viana Gabriel¹
Leticia Queiroz Ribeiro²
Carlos Antonio da Silva³
Itavahn Alves da Silva³
Varadarajan Seshadri⁴

Resumo

O movimento do fluido no interior do molde durante o processo de lingotamento contínuo possui grande impacto na qualidade do produto fabricado, pois influencia os mecanismos de formação da casca solidificada, flotação de inclusões e lubrificação da pele. A geometria complexa dos moldes de *Beam Blank* dificulta a garantia de fluxos térmicos simétricos, o que resulta em variação na espessura da pele; daí a importância de se estudar os parâmetros que interferem no fluxo do fluido no interior do molde. Neste trabalho verificou-se a influência da velocidade de lingotamento e do diâmetro de válvulas submersas do tipo tubulares sobre o fluxo no interior do molde. A análise do campo vetorial de velocidades revelou a existência de seis vórtices, dois na região da alma e dois em cada flange do molde. Além disso, foi encontrado que o aumento de 100L/min a 150L/min a profundidade do jato sobe de 0,74m para 0,84m, enquanto que um aumento de 67% na área de seção transversal das válvulas tubulares não promove diminuição significativa desta profundidade.

Palavras-chave: *Beam blank*; Fluxo; Lingotamento contínuo; *Near net shapes*.

FLUID FLOW ANALYSIS IN MOULD FOR BEAM BLANK CONTINUOUS CASTING: COMPUTATIONAL AND PHYSICAL SIMULATION

Abstract

The fluid flow inside the mould during Continuous Casting has a great effect on product quality affecting the formation of solid shell, inclusions flotation as well as skin lubrication. The complex geometry of Beam Blank moulds can make difficult to guarantee the thermal flow symmetry resulting in thickness variation of the solidified skin. Therefore, it is important to study the influence of parameters on fluid flow inside the mould. This paper aimed to verify the influence of casting velocity likewise the diameter of the Straight Through Conduit type SEN. Six vortices were observed in the mold, two vortices near the web and two in each flange. Furthermore, increase the fluid flow of 100L/min to 150L/min promotes variation from 0,74m to 0,84m at the depth jet, but increase of 67% area of the cross section of the Straight Through Conduit type SEN didn't cause significant variation in this parameter.

Keywords: Beam blank; Fluid flow; Continuous casting; Near net shapes.

¹ Engenheiro Metalúrgico, Mestrando em Engenharia de Materiais, Redemat, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, Minas Gerais, Brasil.

² Graduando em Metalurgia, Escola de Minas, Ouro Preto, Minas Gerais, Brasil.

³ Engenheiro Metalúrgico, Ph.D., Professor, Universidade Federal de Ouro Preto, Escola de Minas, Ouro Preto, Minas Gerais, Brasil.

⁴ Engenheiro Metalúrgico, Dr. Ing., Professor Emérito, Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasil.

1 INTRODUÇÃO

Existe uma tendência do Lingotamento Contínuo que são os processos de fabricação dos chamados *Near-Net-Shapes*, que consiste em processos capazes de fabricar produtos com forma geométrica e características internas mais próximas da condição final de aplicação, ou seja, o produto acabado ou semiacabado [1]. Este conceito inclui o lingotamento de placas e tiras de seções reduzidas, *beam blank* dentre outros. Como vantagem destaca-se a redução no número de passes no processo de laminação, resultando em aumento na produtividade, redução no consumo energético e consequentemente diminui o custo de produção.

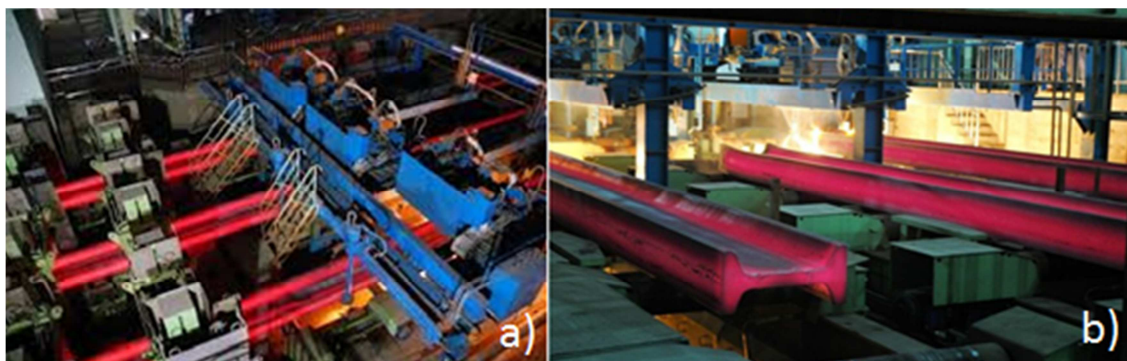


Figura 1 – Máquina de lingotamento contínuo de aços com três veios de *beam blank*, da Caster in Xintai Steel Company, projeto e instalação da Siemens VAI e CCTEC (<http://en.cctec.cn/en/company/>, acessado em 20/7/2014).

Hibbeler et al. [2] destacam que a eficiência e qualidade do lingotamento contínuo de aço estão em constante aperfeiçoamento, devido ao aumento da automação e os avanços tecnológicos obtidos, principalmente, através de testes experimentais na própria planta. No entanto, as soluções empíricas são agora muito caras, sem o auxílio de ferramentas como a modelagem computacional. Nota-se um grande interesse na aplicação de modelamentos matemáticos em estudos do comportamento térmico e/ou mecânico no interior do molde, da distribuição do fluxo de aço e também na investigação da solidificação da pele. Neste sentido, Hibbeler et al. [2] desenvolveram um modelo para simular ao mesmo tempo temperatura, tensão e deformação em um quarto da seção transversal de um molde comercial de lingotamento contínuo de *beam blank*, considerando a complexidade de sua geometria real, a dependência das propriedades dos materiais com a temperatura e as condições operacionais. O modelo forneceu informações sobre os mecanismos de falha da pele na região do filete, desencadeada inicialmente por uma pele mais fina sob condições combinadas de tensões termomecânicas, e mais tarde acelerada pela abertura de um gap no filete.

O padrão de fluxo de aço no interior do molde impacta na limpidez do aço, na formação da casca sólida e consequentemente na qualidade superficial do produto lingotado. Yang et al. [3], Chen et al. [4] lembram que a limpidez do aço é influenciada pelo campo de velocidades do aço na região do molde e esta propriedade pode ser controlada pelos parâmetros operacionais, tais como: velocidade de lingotamento, profundidade de imersão e configuração da(s) válvula(s) submersa(s), entre outros. Através de simulações matemáticas, nestes trabalhos foram avaliados os efeitos destas variáveis no fluxo de aço em moldes de lingotamento contínuo de *beam blank*.

Utilizando um modelo matemático tridimensional que considerava simultaneamente o fluxo de aço e a solidificação dentro do molde, Yang et al. [3] observaram que o campo de velocidades do aço em um modelo considerando apenas a fase líquida é semelhante ao do modelo que considera a presença da pele de aço solidificado no molde, mas as velocidades do fluxo de retorno é evidentemente maior quando se considera o efeito da pele.

Chen et al. [4], verificou que para válvulas tubulares, o aumento na profundidade de imersão promove aumento na profundidade de impacto do jato, o que pode ser maléfico ao processo de flotação de inclusões, mas que por outro lado, reduz a velocidade no menisco, resultando em menor entranhamento da escória no banho. Para este tipo de válvula, a profundidade de imersão recomendada está na faixa de 50mm a 100mm.

Diferentes tipos e configurações de válvulas submersas têm sido estudados, com o objetivo de definir as condições que resultem em maior facilidade operacional e melhor qualidade do aço produzido.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

Foram realizadas simulações físicas e matemáticas do fluxo de fluido no interior de um molde com formato de *Beam Blank*, avaliando a velocidade e profundidade do jato, assim como campo vetorial formado pelo fluxo.

Nas simulações físicas utilizou-se modelo em acrílico escala 1:1 (Figura 2.a), de um molde de *Beam Blank* com dimensões 499mmX415mmX125mm e altura de 1,5m. Os testes foram realizados com dois tipos de válvulas submersas tubulares cujos diâmetros internos são de 26,7mm (tipo 1) e 34,6mm (tipo 2). As vazões utilizadas foram de 100L/min, 125L/min e 150L/min, que corresponde às velocidades de lingotamento de 0,78m/min; 0,98m/min e 1,2m/min respectivamente. A profundidade de imersão das válvulas foi 100mm.

Os fluxos foram analisados em duas áreas do molde perpendiculares ao menisco, possibilitando descrever o fluxo na região da alma e na do flange. A posição das regiões analisadas pode ser verificada através da Figura 2.b.

Um dos métodos de análise aplicados na simulação física foi o de caracterização do jato através da injeção de tinta. Este método consiste em inserir tinta na tubulação de entrada de água e filmar o caminho percorrido pelo jato no interior do molde até seu total espalhamento, desta forma foi possível visualizar o fluxo ao longo da altura do molde e avaliar a profundidade de impacto (Figura 3).

Para avaliação do campo vetorial, os ensaios consistiram em incidir um plano de laser sobre uma determinada área do modelo, iluminando partículas (com densidade igual a da água) contidas no fluido. Estas partículas acompanham o fluxo do fluido permitindo, portanto, a identificação da trajetória. A Figura 4 mostra exemplos de imagens obtidas nestes testes, sendo possível identificar o formato do jato, assim como os redemoinhos gerados seção AA do molde.

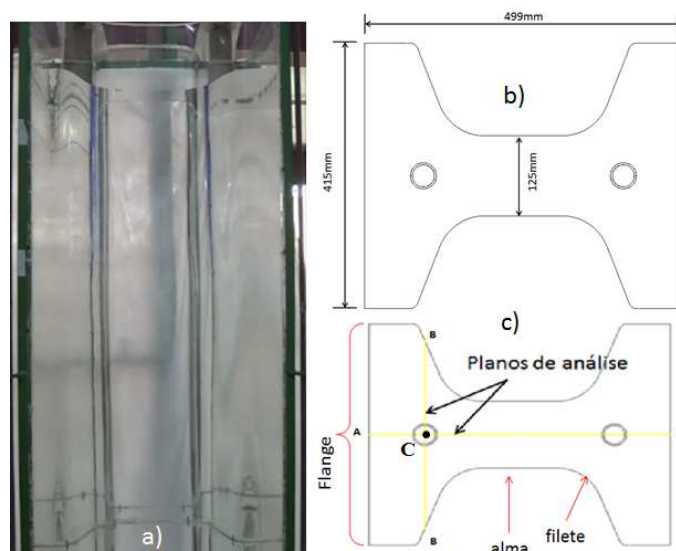


Figura 2. a) Molde em acrílico utilizado nas simulações físicas; b) dimensões do *beam blank*; c) seção transversal do molde de *Beam Blank* e suas regiões, destacando os planos AA e BB nos quais foram realizadas as análises.

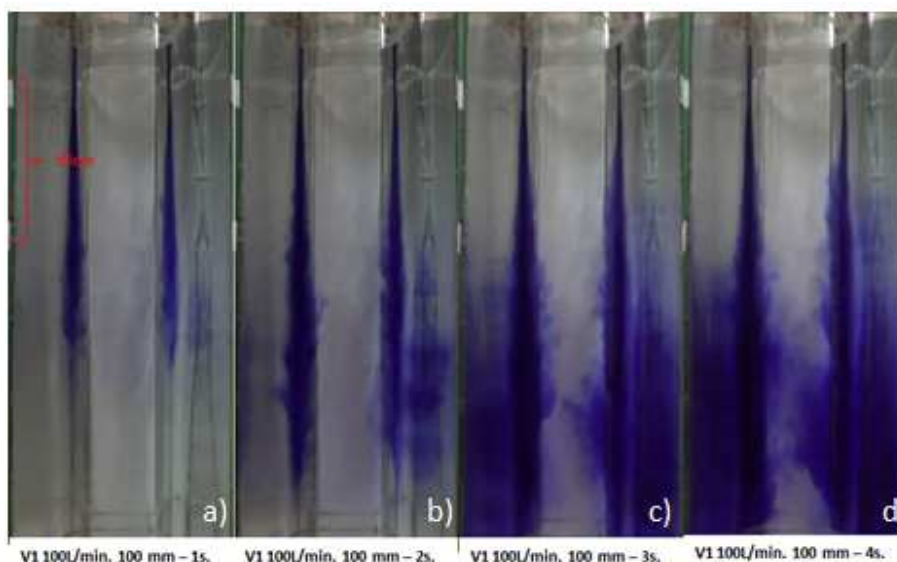


Figura 3. Evolução do jato de tinta para válvula tipo 1 e vazão de 100L/min – a) $t=1s$; b) $t=2s$; c) $t=3s$ e d) $t=4s$.

Para análise quantitativa do fluxo por meio de simulação física foi utilizada a técnica PIV (*Particle Image Velocimetry*) através do aparelho fornecido pela DANTEC® existente no laboratório de Pirometalurgia do DEMET-UFOP. Esta técnica consiste basicamente em seguir o fluxo das partículas dispersas no fluido em um plano gerado pela iluminação com o laser *Sheet Visualization* e captação de imagens na filmagem deste plano por uma câmera CCD (Figura 5).

As imagens, geradas a partir de dois pulsos sucessivos do laser, são processadas em software específico e a velocidade (além de linhas de fluxo, vorticidade, valores médios e flutuações) é determinada a partir de um processo de interpolação. Foi avaliado o campo vetorial da altura do menisco até uma profundidade de aproximadamente 80 cm permitindo a análise do fluxo e do redemoinho. A Figura 2.c mostra a posição dos planos analisados.

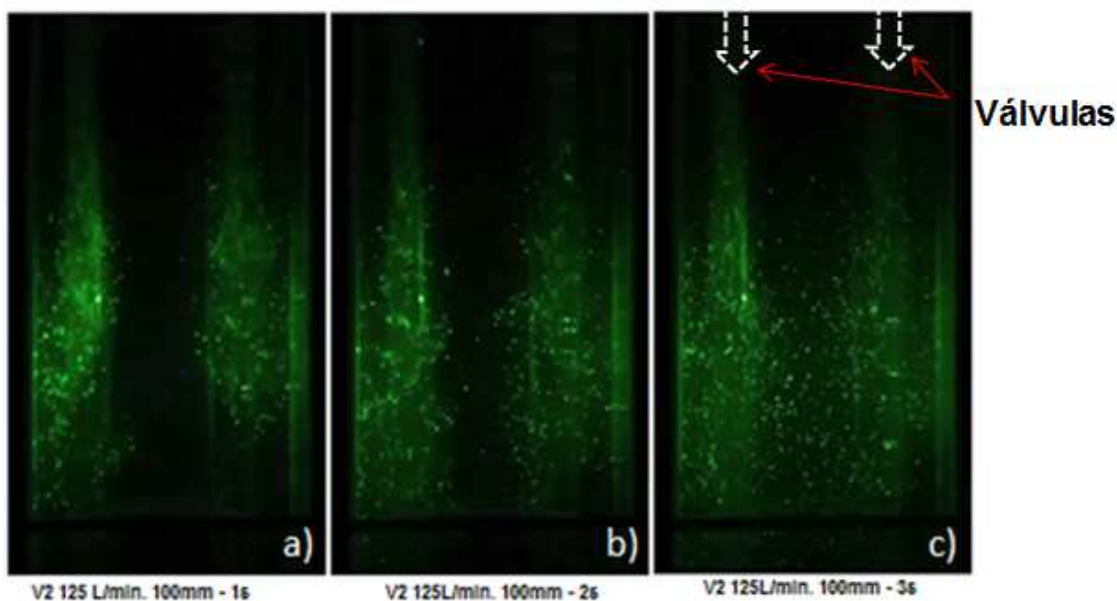


Figura 4. Visão do fluxo em molde de Beam Blank através da iluminação do mesmo por um plano de laser. Testes realizados com válvula tipo 2 e vazão de 125L/min: a) $t=1s$; b) $t=2s$ e c) $t=3s$,

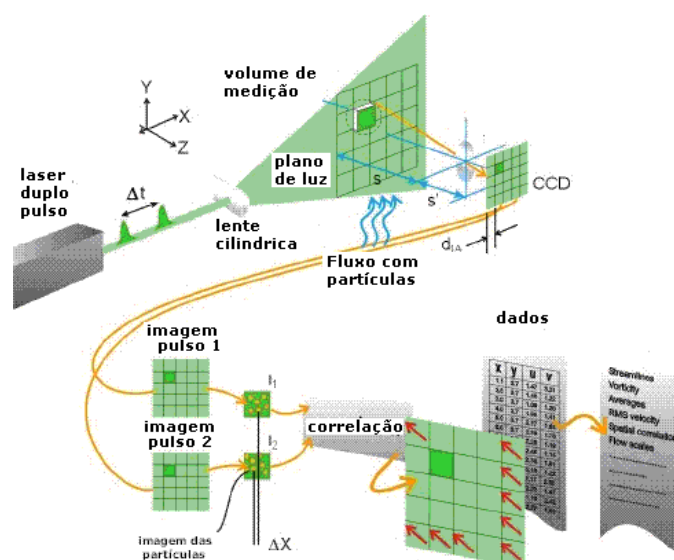


Figura 5. Esquema de funcionamento de um aparelho PIV, de acordo com a DANTEC®.

As simulações computacionais foram realizadas em regime permanente utilizando-se o software Ansys® CFX 15.0 versão acadêmica, considerando a água um fluido Newtoniano, temperatura constante e igual a 25°C. O modelo aplicado foi o k- ϵ , no qual se resolve as equações da continuidade, de Navier Stokes e da Viscosidade efetiva, além das equações auxiliares para determinação de k (energia de turbulência) e ϵ (taxa de dissipação de energia cinética).

Condições de contorno aplicáveis ao problema:

- Paredes - Condição de não deslizamento nas paredes do molde;
- Condição de livre deslizamento no menisco;
- Vazão mássica na entrada - 1,667kg/s; 2,083kg/s e 2,5kg/s para as velocidades de lingotamento equivalentes a 0,78m/min; 0,98m/min e 1,2m/min respectivamente.

Os resultados obtidos através da simulação matemática são validados quando apresentam resultados semelhantes aos de simulação física, isto é determinado através da comparação dos mapas vetoriais obtidos em ambas as técnicas, assim como pelos valores de velocidades.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados foram divididos em três tópicos em função das variáveis analisadas.

3.1 Profundidade do Jato

A profundidade do jato foi analisada através da observação do comportamento do jato de tinta ao longo do molde, método semelhante ao aplicado por Chen *et al.* [5]. Com base nas análises das imagens da Figura 3, o tempo definido para a determinação da profundidade do jato foi de 2s, uma vez que para tempos superiores se tem um maior espalhamento do jato. Após o espalhamento do jato a força inercial, responsável pelo desenvolvimento do jato na direção vertical, deixa de ser a predominante no sistema e o mesmo se espalha por convecção.

A Figura 6 apresenta a variação da profundidade do jato em função da vazão de água obtida através da análise do jato de tinta e pela modelagem computacional. Os resultados obtidos pelo teste físico (Figura 6.a) indicam a variação da vazão possui maior influência sobre a profundidade do jato, enquanto que o aumento do diâmetro das válvulas não resultou em uma redução significativa desta profundidade, levando-se em conta que o aumento da seção transversal das válvulas foi em torno de 68%. Para a simulação matemática (Figura 6.b) a sensibilidade da profundidade de impacto com a vazão foi menor que no teste físico, mas os resultados de ambos os testes são próximos.

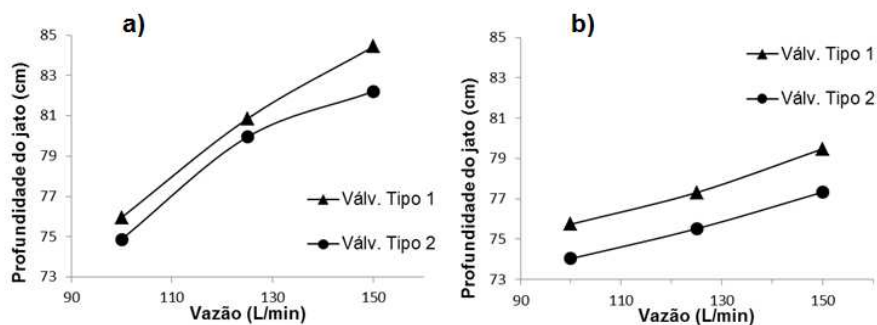


Figura 6. Gráfico da profundidade do jato para: a) jato de tinta em t=2s; b) profundidade de impacto obtida na simulação via CFX/Ansys.

Chen *et al.* [4], também verificaram que o aumento da velocidade de lingotamento, ou seja da vazão de fluido, resultou sempre em um aumento de profundidade do jato, porém tais autores encontraram valores superiores a 1m, para velocidades e 0,7m/min a 1,3m/min em um molde de *Beam Blank* de seção 550mmx450mmx90mm, diâmetro interno e imersão das válvula igual a 40mm e 75mm respectivamente. Isto pode ser justificado em função do modelo possuir a alma mais estreita e o flange mais aberto, o que pode dificultar o movimento do fluido em direção à alma, restringindo o fluxo na região do filete.

3.2 Comportamento do Fluxo

Através da avaliação do campo vetorial é possível entender o comportamento do fluxo ao longo do molde. Com base na análise das Figuras 6.a e 6.b é possível verificar que no caso de válvulas tubulares tem-se evolução do jato na direção de lingotamento e a partir de determinada profundidade parte do fluido retorna na região central do molde formando dois vórtices na alma. Posteriormente o fluido se desloca verticalmente em direção às válvulas submersas e desce junto com o jato. Na região do flange Figura 6.b também se observa a formação de dois vórtices que promovem retorno do fluido para a região do menisco. Este fluido de retorno se movimentando do flange para o centro da alma e em seguida desce tangencialmente às válvulas e se desloca na direção do jato. Os resultados foram semelhantes aos encontrados por Lee *et al.* [6]. E o número de vórtices encontrados foram seis (dois na alma e quatro nos flanges) assim como descrito por Chen *et al.* [5]. Este modo de recirculação do fluido também foi observado nas filmagens realizadas com plano de laser nas seções AA e BB do modelo físico, que geraram as imagens da Figura 4.

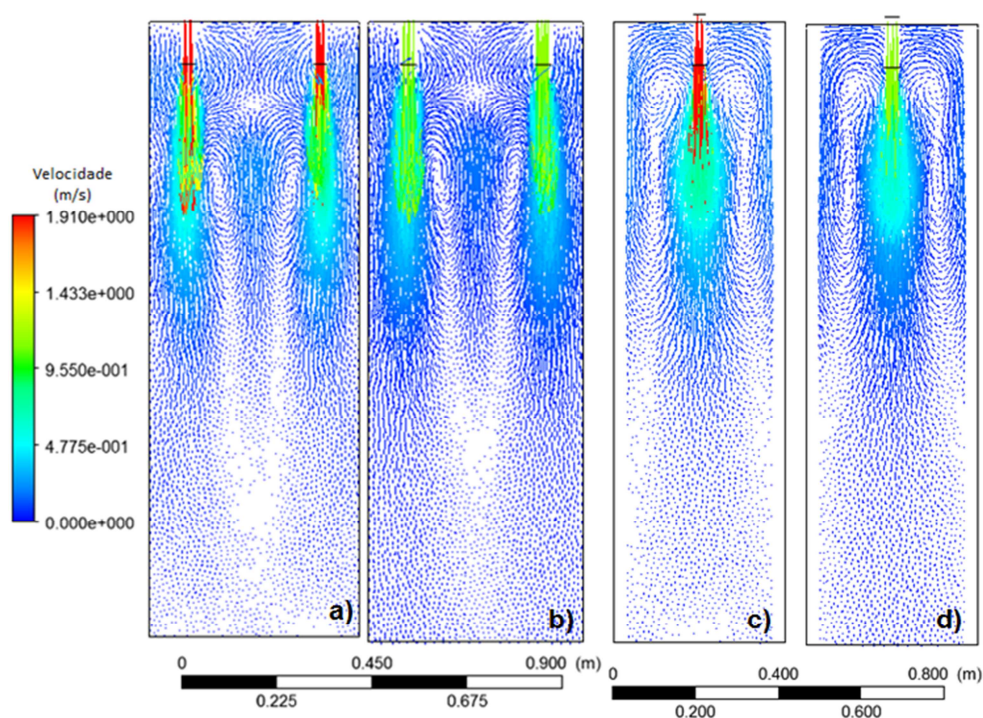


Figura 7. Mapa vetorial do fluxo obtido por simulação matemática para vazão de 125L/min a) seção AA válvula tipo 1; b) seção AA válvula tipo 2; c) seção BB válvula tipo 1 e d) seção BB válvula tipo 2.

Não se verifica uma variação significativa no comportamento do fluxo quando mudou o diâmetro da válvula tubular de 26,7mm para 30,4 mm, como pode ser visto na comparação entre as Figuras 7.a e 7.b – plano AA – e entre as Figuras 7.c e 7.d – plano BB. A movimentação do fluido foi semelhante para ambas as válvulas, diferenciando-se apenas quanto à ordem de grandeza das velocidades, ocorrendo uma redução na velocidade do jato com aumento no diâmetro das válvulas.

Analisando o mapa vetorial de velocidade de recirculação de fluido na região do menisco (Figura 8), nota-se claramente que o fluido se movimentando das faces estreitas do flange para o centro da alma, sendo que a região de maior velocidade no menisco ocorre próximo aos filetes, e para a válvula de menor diâmetro tem-se maior velocidade.

Lee *et al.*[6], Yang *et al.* [3] e CHEN *et al.* [4,5], destacam que os fluxos recirculatórios de aço na região da alma e da ponta da flange afetam o perfil de crescimento da pele sólida do *beam blank*, e assim, o crescimento da pele sólida nas regiões do filete é mais lento nos estágios iniciais da solidificação. Da mesma forma, o crescimento da pele sólida nas regiões do filete e do centro da flange é retardado devido ao impingimento do fluxo de aço da válvula submersa sobre a pele sólida. É importante lembrar que uma condição de baixa velocidade do aço no topo do molde, prejudica a fusão do pó fluxante, flotação, separação e absorção das inclusões não-metálicas pela escória do molde. Por outro lado, a oscilação excessiva do menisco irá favorecer o entranhamento de escória. De Santis *et al* [7] sugerem que para se ter uma boa fusão do pó fluxante, a velocidade na região do menisco deve ser da ordem de 0,30 m/s; como se verifica na figura 8, os valores de velocidade no menisco estão abaixo do especificado e o aumento no diâmetro da válvula resultou em diminuição desta velocidade, o que pode estar relacionado com a redução na velocidade de recirculação do vórtice superior mostrado nos mapas vetoriais da Figura 7.c e 7.d.

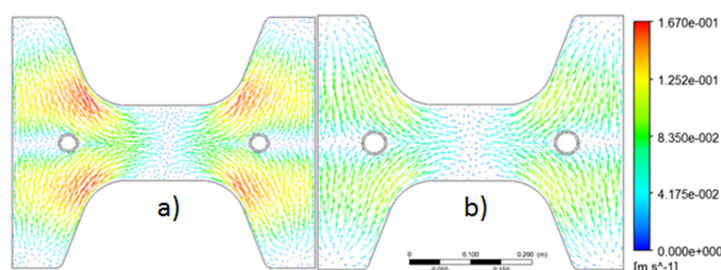


Figura 8. Mapa vetorial de velocidades na região do menisco para uma vazão de 125L/min: a) válvula tipo 1 e b) válvula tipo 2.

3.3 Análise do Campo de Velocidades

Os gráficos da Figura 9 representam a variação da componente vertical de velocidade sobre uma linha horizontal traçada no plano BB (Figura 3.c), isto é sua origem projeta-se sobre o centro da válvula C e sua extremidade está sobre o filete da face estreita do flange. Foram analisadas três posições a uma distância de 250mm, 450mm e 750mm do menisco. Estes dados foram obtidos tanto via simulação física através da técnica PIV (gráficos da esquerda) quanto pela computacional utilizando o software Ansys CFX (gráficos da direita). As maiores velocidades em módulo são obtidas na região central e diminui próximo das paredes devido as condições de contorno das mesmas. À medida que se distancia do menisco, a velocidade diminui em função da redução gradativa da força de impacto do jato. O aumento da vazão implica em maiores velocidades do jato (velocidade negativa) e também de recirculação (velocidade positiva).

Yang *et al.* [3] destacaram que com o aumento da velocidade de lingotamento, o gradiente de temperatura no interior do molde é intensificado e o núcleo líquido é alongado (o comprimento metalúrgico aumenta). De acordo com os resultados da simulação, a velocidade lingotamento deve ser controlada entre 0,85m/min e 1,05m/min para manter a produtividade e melhorar a qualidade dos lingotes, sendo que a velocidade máxima não deve exceder 1,1m/min. Por outro lado, Chen *et al.* [4] observaram que com o aumento da velocidade de lingotamento, as características do fluxo de aço no molde não mudam significativamente, mas a profundidade de impacto e a velocidade na superfície aumentam, ocorrendo ainda uma elevação

gradual da flutuação da superfície livre. Mantendo-se os outros parâmetros constantes, a velocidade de lingotamento deve estar entre 0,9m/min e 1,3m/min. Deve-se ressaltar que há diferenças nas medidas da seção transversal dos moldes de *beam blank* analisados nos dois trabalhos.

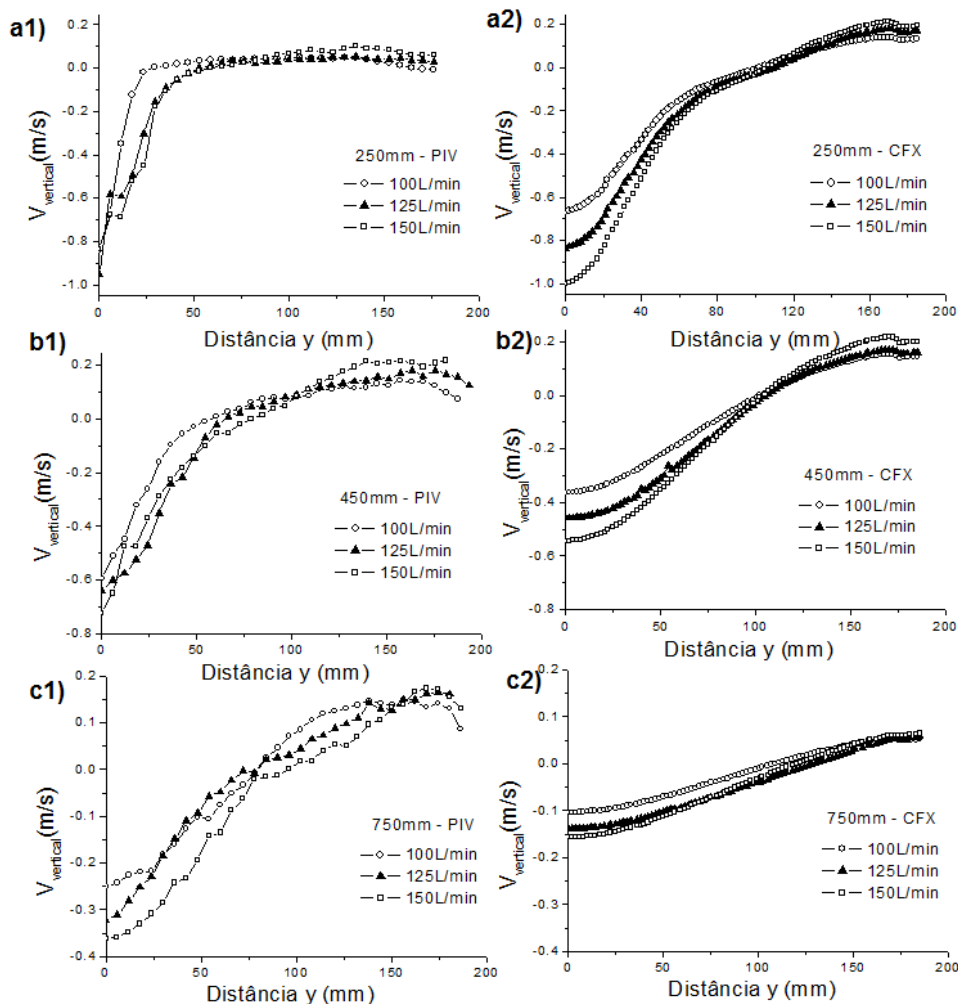


Figura 9. Gráficos de velocidade em função da distância y do centro da válvula até o filete da face estreita do flange obtidos: pela Técnica PIV a uma distância do menisco de a1) 250mm, b1) 450mm e c1) 750mm; por simulação numérica no CFX a uma distância do menisco de a2) 250mm, b2) 450mm e c2) 750mm.

É importante notar que a mudança no sinal da velocidade observado nos gráficos da Figura 9 indica a passagem pelo centro de um dos vórtices laterais do flange, como mostrado nas Figuras 7.c e 7.d. Os gráficos da esquerda da Figura 9 (obtidos via PIV), indicam que o centro do vórtice ao longo da vertical está localizado cerca de 75mm do centro do jato, ou seja, aproximadamente 125mm do filete da face estreita do flange.

Comparando os dados obtidos via simulação física e os obtidos pelo CFX, conclui-se que a simulação computacional apresenta valores coerentes, sendo capaz de descrever corretamente o fluxo de fluido no modelo de molde de lingotamento contínuo de *beam blank*.

4 CONCLUSÃO

- Um aumento de 67% na área de seção transversal das válvulas tubulares não promove diminuição significativa na profundidade do jato molde de *beam blank* para vazões entre 100L/min e 150L/min.
- O aumento na vazão de fluido promove aumento significativo na profundidade do jato, sendo que para aumento de 100L/min a 150L/min na vazão, a profundidade sobe de 0,74m para 0,84m.
- Tanto na simulação física quanto na matemática, foram observados seis vórtices no molde: dois na região da alma e dois em cada flange.
- O campo de velocidade vertical obtido pelo Ansys CFX 15.0 apresentou valores compatíveis com o obtido via PIV na simulação física.

Agradecimentos

Os autores gostariam de agradecer ao Conselho Nacional do Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e à Fundação Gorceix pelo apoio financeiro, em especial pelas bolsas de pesquisa concedidas a J. J. M. Peixoto, W.V. Gabriel L. Q. Ribeiro, respectivamente. Agradecem também à FAPEMIG pelo apoio.

REFERÊNCIAS

- 1 Garcia A, Spim JA, Santos CA, Cheung N. *Lingotamento Contínuo de Aços*. São Paulo: ABM; 2006.
- 2 Hibbeler LC, Xu K, Thomas B.G, Koric S, Spangler C. Thermomechanical Modeling of beam blank Casting. *Iron & steel technology*. 2009; 6(7):60-73.
- 3 Yang JW; Du YP, Shi R, Cui XC. Fluid Flow and Solidification Simulation in beam blank Continuous Casting Process With 3D Coupled Model. *Journal of Iron and Steel Research, International*. 2006;13(4):17-21.
- 4 Chen W, Zhang YZ, Zhu LG, Zhang CJ, Chen Y, Wang BX, Wang C. Three dimensional FEM study of fluid flow in mould for beam blank continuous casting: influence of straight through conduit type SEN. *Ironmaking and Steelmaking*. 2012; 39(8):551-559.
- 5 Chen W, Zhang YZ, Zhang CJ, Zhu LG, Zhang CJ, Chen Y, Wang BX, Wang C. Three-dimensional FEM study of fluid flow in mould for beam blank Continuous Casting: influence of nozzle structure and parameters on fluid flow. *Ironmaking and Steelmaking*. 2012; 39(8):560-567.
- 6 Lee J-E, Yoon J-K, Han HN. 3-dimensional mathematical model for the analysis Beam Blank casting using body fitted coordinate of continuous system. *ISIJ International*. 1998; 38(2):132–141.
- 7 De Santis M, Cristallini A, Rinaldi M, Sgro A. Modelling-based Innovative feeding Strategy for Beam Blanks Mould Casting Aimed at As-cast Surface Quality Improvement. *ISIJ International*. 2014; 54 (3): 496–503.