



## USO DE PARTICLE IMAGE VELOCIMETRY E FLUIDODINÂMICA COMPUTACIONAL PARA ANÁLISE DE INSTABILIDADES NO INTERIOR DO MOLDE DE LINGOTAMENTO CONTÍNUO<sup>1</sup>

Carlos Vinícius de Carvalho<sup>2</sup>

Luiz Flávio Pereira Costa<sup>3</sup>

Luiza Pessoa Moreira<sup>3</sup>

Gabriel Romeu T. Santos<sup>3</sup>

Carlos Antônio da Silva<sup>4</sup>

Itavahn Alves da Silva<sup>5</sup>

Varadarajan Seshadri<sup>6</sup>

### Resumo

O lingotamento contínuo de placas se tornou dominante na rota de produção de aços planos. Esta contribuição tem sido possível pela combinação de alta produtividade, qualidade superficial e interna do produto final. As exigências de alta produtividade tornam o campo de fluxo no interior do molde turbulento por natureza e os efeitos de turbulência influem na dissipação térmica, remoção de inclusões e na distribuição de gás no sistema. *Particle Image velocimetry* (PIV), *laser sheet visualization* (LSV) e CFX foram combinados com o objetivo de elucidar os aspectos de turbulência no interior do molde e é feita uma associação do nível de instabilidade interfacial com a emulsificação de escória. A influência da velocidade de lingotamento, profundidade de imersão e taxa de injeção de gás inerte é analisada.

**Palavras-chave:** Molde; Menisco; Turbulência subsuperficial; Vórtice.

### USING PARTICLE IMAGE VELOCIMETRY AND COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS TO ASSESS THE INSTABILITIES INSIDE A CONTINUOUS CASTING MOLD

#### Abstract

Continuous casting of regular slabs has evolved to be the dominant route of steel production. This role was made possible by a combination of high productivity and superficial and internal quality. Productivity requirements makes the flow field inside the mold turbulent by nature and the turbulence effects show on thermal dissipation, inclusion and gas distribution inside the system. Particle Image Velocimetry(PIV), laser sheet visualization and Computational Fluid Dynamics have been combined in order to elucidate aspects of turbulence inside the mold and a link is provided in regard to interfacial stability that can lead to slag emulsification. The influence of throughput, immersion depth and inert gas flow rate is assessed.

**Key words:** Mold; Meniscus; Sub-superficial turbulence; Vortex.

<sup>1</sup> Contribuição técnica ao 43º Seminário de Aciaria – Internacional, 20 a 23 de maio de 2012, Belo Horizonte, MG, Brasil.

<sup>2</sup> Engenheiro da Gerdau Açominas e Mestrando da Redemat, UFOP.

<sup>3</sup> Aluno de graduação do Curso de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Escola de Minas, UFOP.

<sup>4</sup> MSc, PhD, Professor, Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Escola de Minas, UFOP.

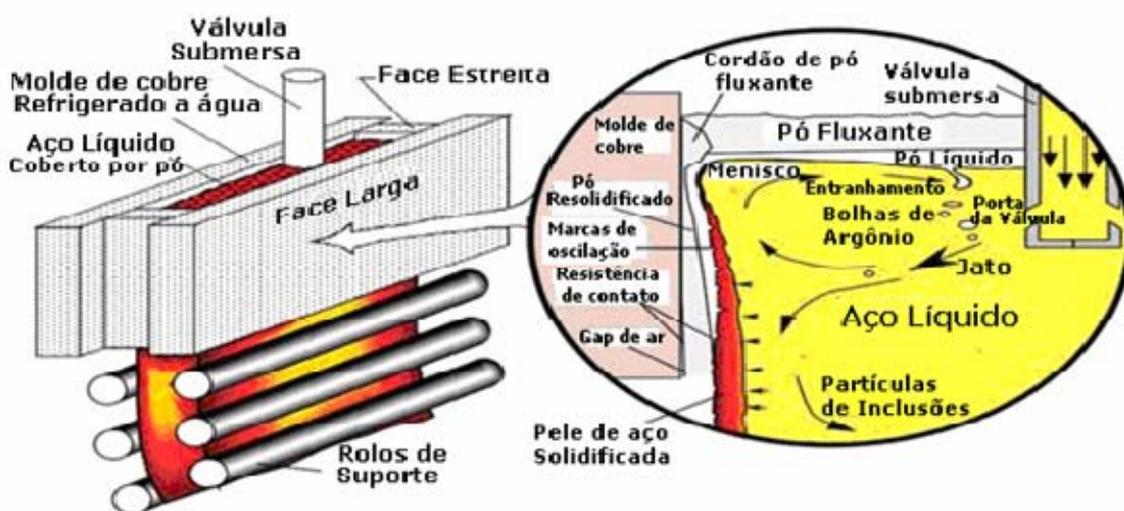
<sup>5</sup> MSc, DSc. Professor, Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Escola de Minas, UFOP.

<sup>6</sup> Dr. Ing. Professor Emérito do Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, UFMG.



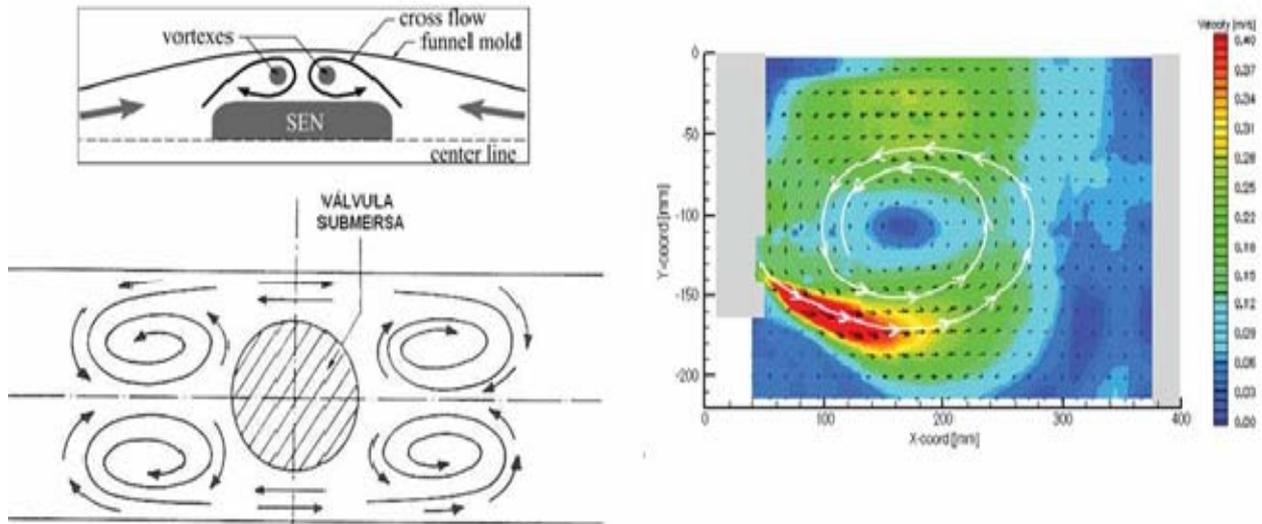
## 1 INTRODUÇÃO

O processo de lingotamento contínuo dos aços é responsável por cerca de 95% da produção mundial de placas, tarugos e tiras. Embora a limpidez do aço líquido deva ser melhorada e preservada no distribuidor a qualidade interna e superficial do produto lingotado deve ser garantida no molde. Na cavidade do molde, as condições de altas velocidades superficiais podem incorrer em aprisionamento de partículas do fluxante e bolhas de argônio na frente de solidificação e arraste destas partículas devido às instabilidades reinantes na região do menisco<sup>(1-8)</sup> (Figura 1). A solidificação inicial do aço, na região do menisco, no topo do molde, é a etapa mais crítica do processo de lingotamento contínuo de aços. No interior do molde, especialmente, nas imediações do menisco, ocorre uma complexidade de fenômenos que influenciam a solidificação inicial, crescimento da pele sólida e aprisionamento de bolhas e inclusões.



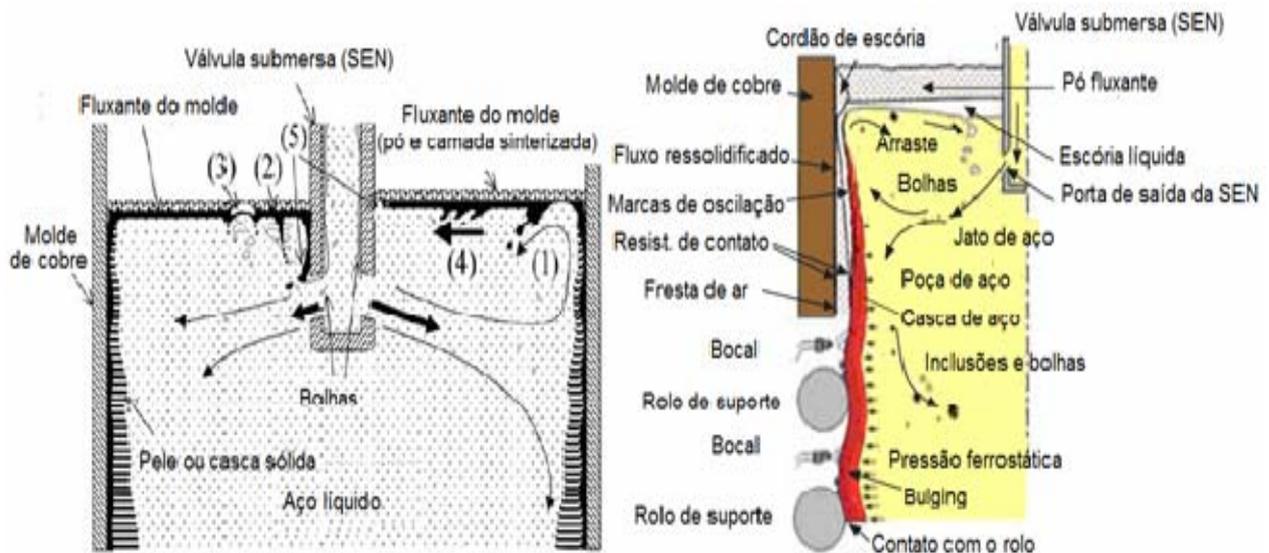
**Figura 1.** Vista dos fenômenos ocorrentes no interior do molde da máquina de lingotamento contínuo.<sup>(2,3)</sup>

A ocorrência de movimentos vorticiais nas imediações das portas de descarga da *SEN* (Figura 2), é uma manifestação da assimetria do fluxo de aço na região do menisco; vórtices podem ser responsáveis pelo arraste de partículas de escória e aprisionamento de bolhas de argônio, que podem ficar capturada pela frente de solidificação. Como citado os vórtices são formados durante a condição de fluxo assimétrico, onde o fluxo movimenta-se rapidamente da face estreita do molde passando entre a válvula submersa e as paredes do molde, causando a formação de redemoinhos ao lado da válvula submersa. As correntes de circulação podem aprisionar as partículas de escória do molde, especialmente quando de baixas profundidades de imersão e desalinhamento da válvula submersa e altas velocidades de lingotamento.



**Figura 2.** (a) Movimentação dos vórtices nas circunvizinhanças da válvula submersa; e (b) formação e desenvolvimento de vórtice ao redor da válvula submersa.

As condições de fluxo na região da interface metal-escória, na região do menisco, devem ser tais que garantam energia térmica para a fusão do fluxante e lubrificação das paredes do molde, sem que haja entranhamento de escória ou de argônio para o interior da poça de aço. O padrão de fluxo recomendado é o duplo rolo (Figura 3).



**Figura 3.** Mecanismos de contaminação do veio de aço no interior do molde 1- Arraste e aprisionamento causado pela reversão de fluxo de aço da face estreita do molde; 2- Arraste e aprisionamento associado ao *vortex streets* de Karman atrás da válvula submersa; 3- Arraste e aprisionamento devido ao escape de argônio na interface metal-escória; 4- arraste e aprisionamento devido à instabilidade de Kelvin–Helmholz, na interface metal/fluxante do molde; 5- arraste e aprisionamento induzido pela diferença de pressão vertical ao longo da parede externa da válvula submersa.<sup>(3)</sup>

Do acima exposto, pode-se sugerir que um padrão estável de escoamento do aço no molde de LC deve ser otimizado e controlado pelo desenho da válvula submersa e condições operacionais (Figura 4).



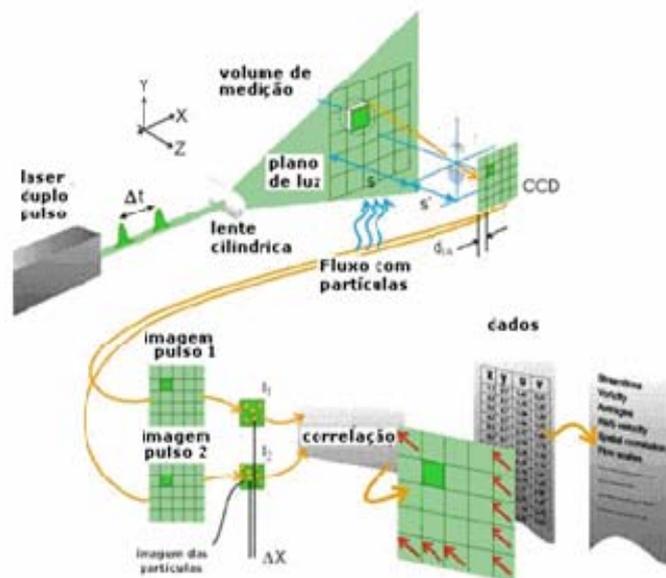
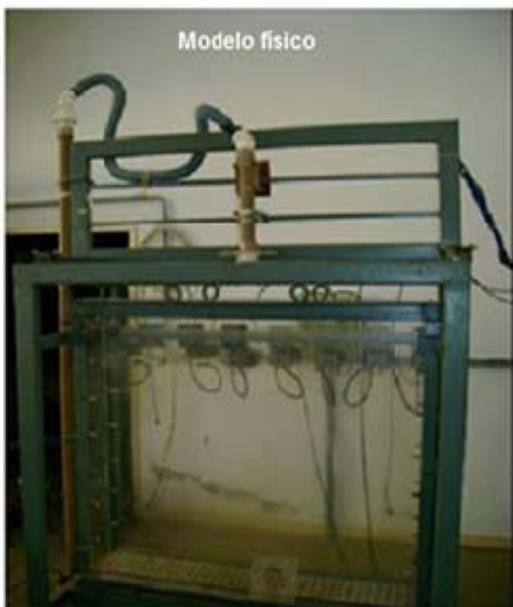
Intensidade do fluxo orientado à superfície (interface metal-fluxante)

**Figura 4.** Sinopse dos efeitos dos parâmetros de escoamento do aço sobre a qualidade do produto lingotado.

Este trabalho trata da influencia de geometria e condições operacionais na qualidade do produto lingotado, através de modelagem fica e matemática.

## 2 MATERIAIS E MÉTODOS

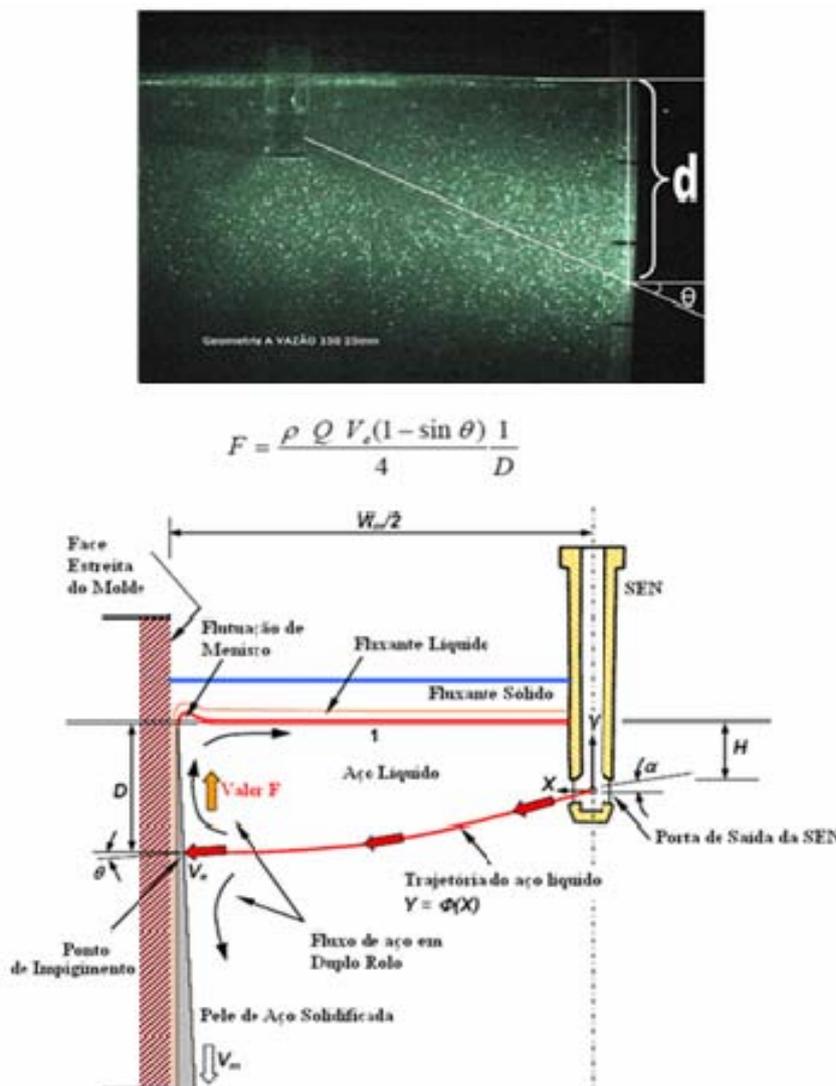
Para a investigação experimental utilizou-se um modelo em escala reduzida de um molde de lingotamento de placas, construído em acrílico, incluindo um modelo em escala da válvula submersa (Figura 5). O fator de escala,  $\lambda = 0,6$  foi determinado considerando as propriedades da água (massa específica, viscosidade e tensão superficial) a 20°C e as propriedades do aço líquido a 1.600°C e os adimensionais de Froude e Weber como critério de semelhança entre a máquina industrial e o modelo físico. Detalhes do campo de velocidades foram obtidos por velocimetria PIV 2-D (da Dantec), (Figura 5b). Uma breve descrição será dada a seguir.



**Figura 5.** Vista da montagem experimental: (a) modelo físico; e (b) Esquema do equipamento PIV (Particle Image Velocmetry).



Escolheu-se quantificar o estado de turbulência no menisco através do Fator F, cujos parâmetros para sua determinação foram parcialmente obtidos através da técnica de visualização *laser sheet*. Esta técnica de visualização de fluxo consiste em incidir um plano de laser contra o modelo de modo que este ilumine partículas pequenas (de densidade igual a do líquido) contidas no fluido. As partículas tendem a acompanhar o fluxo do líquido, permitindo desta forma a identificação da trajetória. A Figura 6 mostra imagens obtidas através desta técnica, bem como exemplo dos parâmetros geométricos determinados. Este experimento foi realizado para cada combinação de vazão de líquido, vazão de gás inerte, profundidade de imersão e para uma dada dimensão da placa.

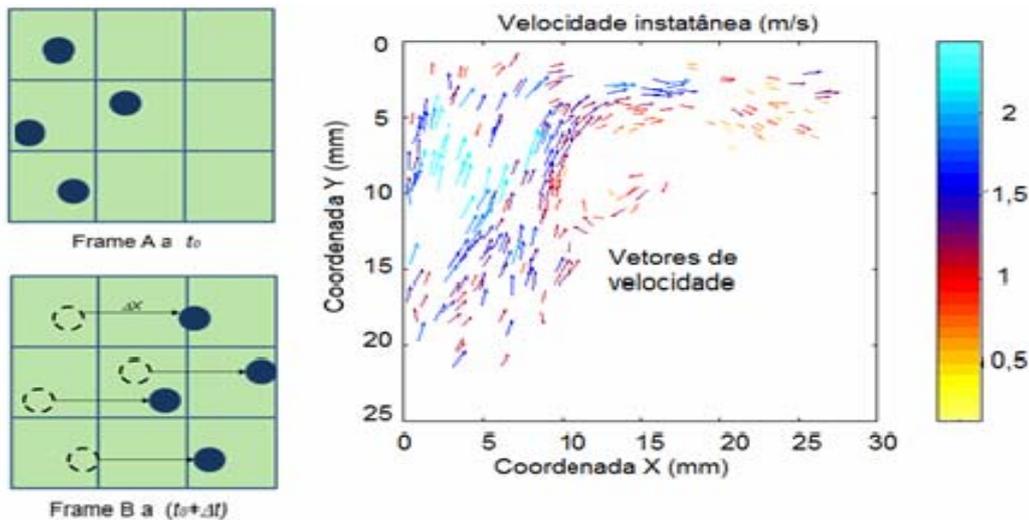


**Figura 6.** Cálculo do valor de F (N/m);  $\rho$  – massa específica do líquido. ( $\text{kg/m}^3$ ); Q – Vazão de entrada do líquido. ( $\text{m}^3/\text{s}$ ); V – Velocidade no ponto de impacto junto a face estreita. ( $\text{m/s}$ ); D – Distância do ponto de impingimento (ponto de impacto na face estreita do molde) ao menisco. (m);  $\theta$  – Ângulo entre o Vetor Velocidade e o plano horizontal no ponto de impingimento.

A técnica PIV consiste basicamente em seguir o fluxo de micropartículas dispersas no fluido, as quais por sua vez (em função de suas características de forma, tamanho e densidade, “seguem o fluxo”). Através da técnica PIV pode-se determinar o deslocamento médio das partículas abrigadas em uma micro-região, denominada área de interrogação, para outra contígua, através de pulsos de feixe de *laser*



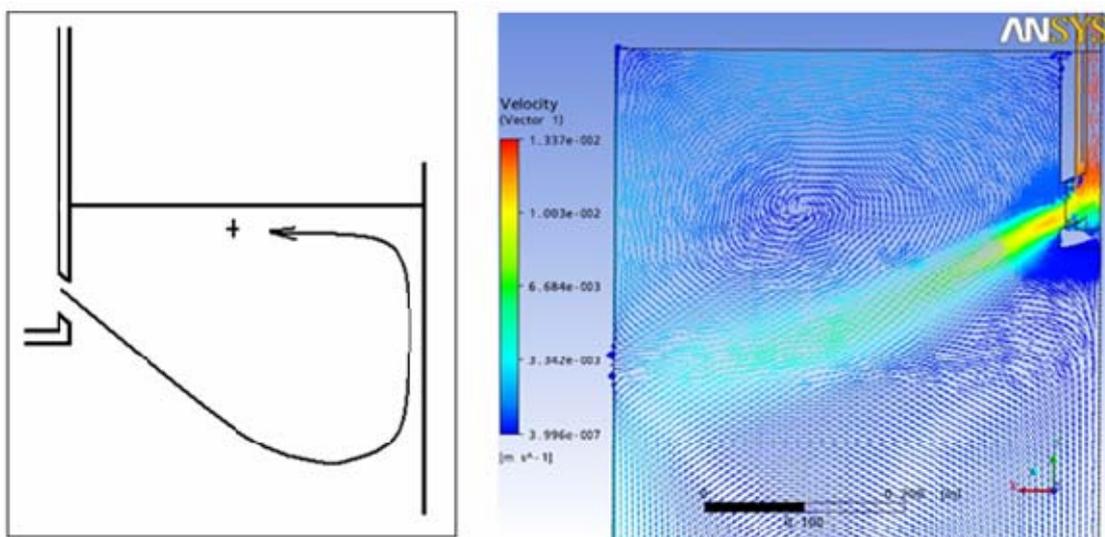
(Figura 7). As imagens são estocadas na memória do computador e digitalizadas, sendo todas elas subdivididas em tais regiões. Matematicamente, a correlação ente duas imagens que permite a obtenção do descolamento médio das partículas mais o intervalo de tempo dado pelo pulso de *laser* permite a obtenção do vetor (Figura 7).



**Figura 7.** Princípio de determinação de velocidade de partículas pela técnica PIV.

As regiões analisadas pela técnica PIV foram o ponto de impacto, cuja velocidade é importante na determinação do fator  $F$  e a região superficial para fins de comparação com valores encontrados via CFD e para análise de transiência de fluxo. Para cada combinação experimental foram adquiridas 300 imagens, obtendo-se 300 mapas vetoriais e conseqüentemente 1 mapa vetorial médio, do qual extraíram-se os valores de velocidade.

Para comparação quantitativa da velocidade na região subsuperficial entre método PIV e CFD, adotou-se como ponto da determinação da velocidade aquele na metade da distância entre a SEN e a face estreita do molde e à 3 cm abaixo da superfície (Figura 8).



**Figura 8.** Campo de velocidades nas imediações das portas da válvula submersa: (a) esquemático; e (b) via ANSYS.



## 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Tabela 1 mostra os efeitos da profundidade de imersão da *SEN*, da vazão de líquido e da vazão de gás sobre o ângulo do jato, a distância D do ponto de impingimento do jato de aço descarregado no molde, a velocidade no ponto de impacto e por fim, sobre o fator F. Valores negativos de ângulo indicam fluxo descendente e todos os valores contidos nesta tabela tratam-se de valores médios de um total de cinco medições. Escolheu-se um ponto a aproximadamente 20 mm da face estreita do molde, na horizontal, a partir do ponto de impacto, para obtenção da velocidade.

**Tabela 1.** Fator F do modelo para diferentes variáveis

Vazão (l/min)	Imersão (mm)	Vazão de hélio (l/min)	V(m/s) a 20 mm	Ângulo, via Laser sheet(Vistametrix)	D(cm) Vistametrix	Fator F do modelo (N/m)
100	72	7,65	0,060	-7,0	18,7	0,123
140	72	7,65	0,112	-7,6	21,1	0,308
180	72	7,65	0,100	-5,8	25,9	0,289
100	108	7,65	0,080	-5,1	21	0,118
140	108	7,65	0,150	-7,4	24,7	0,269
180	108	7,65	0,128	-7,6	28,9	0,258
100	72	0	0,112	-12,8	23,1	0,157
140	72	0	0,142	-12,0	24,4	0,269
180	72	0	0,175	-17,7	26,8	0,340
100	108	0	0,104	-14,4	26,8	0,122
140	108	0	0,132	-17,6	28,0	0,192
180	108	0	0,188	-23,4	29,3	0,291

Analisando-se os dados encontrados na Tabela 1, vê-se que para vazões maiores, ou seja, velocidades de lingotamento maiores, obtêm-se maiores de F, sendo consequência de maiores valores de velocidade no ponto de impacto, e distâncias maiores do ponto até a superfície, já que o jato atinge profundidades maiores. Quando se trabalha com injeção de gás, o fluxo ascendente das bolhas tende a se opor ao movimento descendente do fluxo, encontrando-se valores menores de velocidade e também o ponto de impacto localizado a uma distância menor da superfície com o jato chocando-se com ângulos menores, com conseqüente diminuição dos valores de F. É importante informar que na medição de velocidade com o PIV, na presença de gás, apresenta dificuldades específicas, quanto ao discernimento entre bolhas e partículas.

Para melhor avaliar a influência das variáveis operacionais foram realizadas regressões lineares múltiplas (*step-wise*).

Considerando somente as condições para as quais não houve injeção de gás inerte, a equação que melhor descreve F é:

$$F_m (N/m) = -0,05570 + 0,00220Q - 0,00150H \quad R^2 = 98,67\%.$$

Nos casos para os quais ocorreu injeção de gás, encontra-se:

$$F_m (N/m) = -0,357 + 0,00421Q + 0,000627H \quad R^2 = 99,00\%$$



Onde Q = velocidade de lingotamento (L de água / min); e H = profundidade de imersão da válvula submersa (mm).

A influência das variáveis citadas pode ser visualizada através das Figuras 9 e 10. Para a condição na qual se trabalhou com injeção de gás inerte, descartou-se o valor de F para a maior vazão (180 l/min). Esta ação deve-se a uma maior quantidade de bolhas que surgem na região do ponto de impacto, quando se empregam vazões maiores gerando por consequência a dificuldade de discernimento entre bolha e partícula, o que conduz a erros experimentais. Observa-se, como evidência deste fato (Tabela 1), uma diminuição da velocidade no ponto de impacto, para a situação de injeção de gás inerte, no aumento da vazão de 140 l/min para 180 l/min (Figura 10).

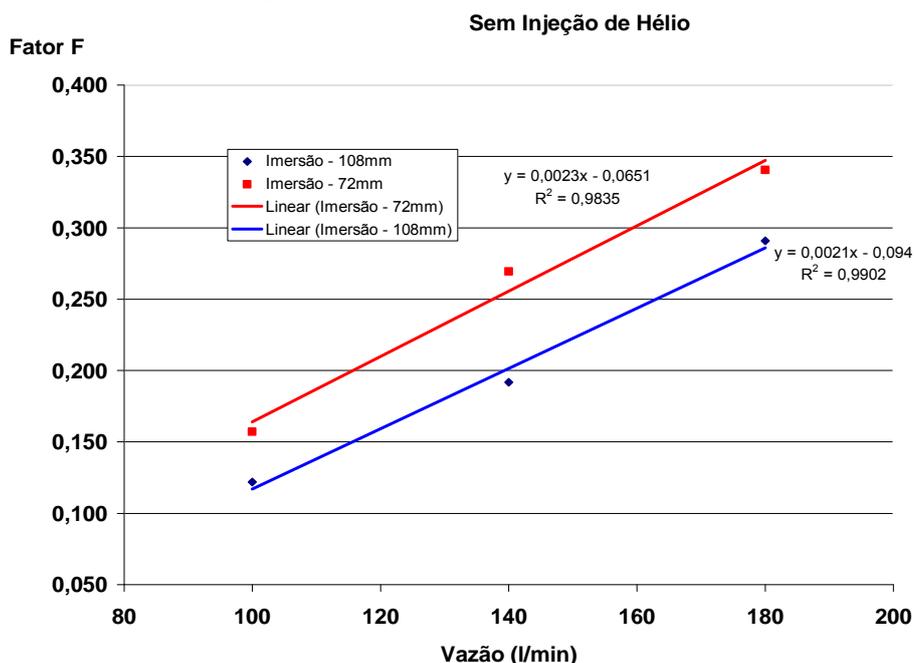


Figura 9. Variação de F com vazão de líquido e imersão da SEN na ausência de gás inerte.

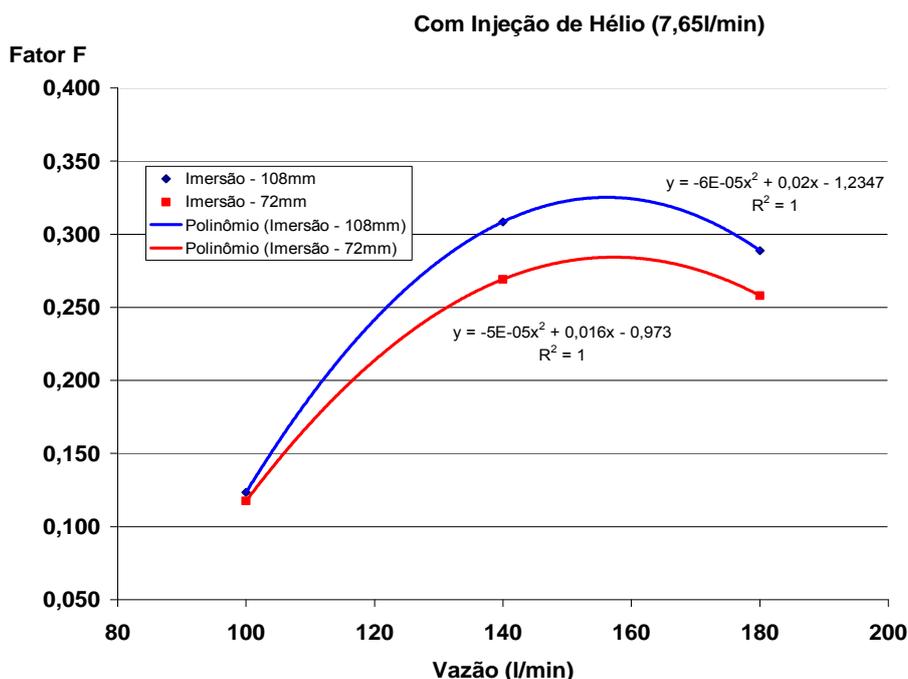
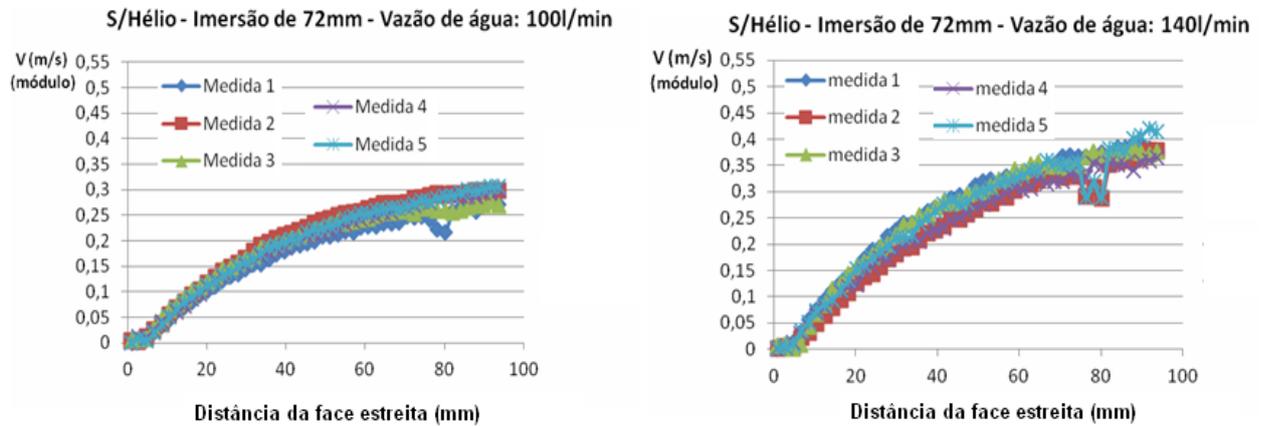


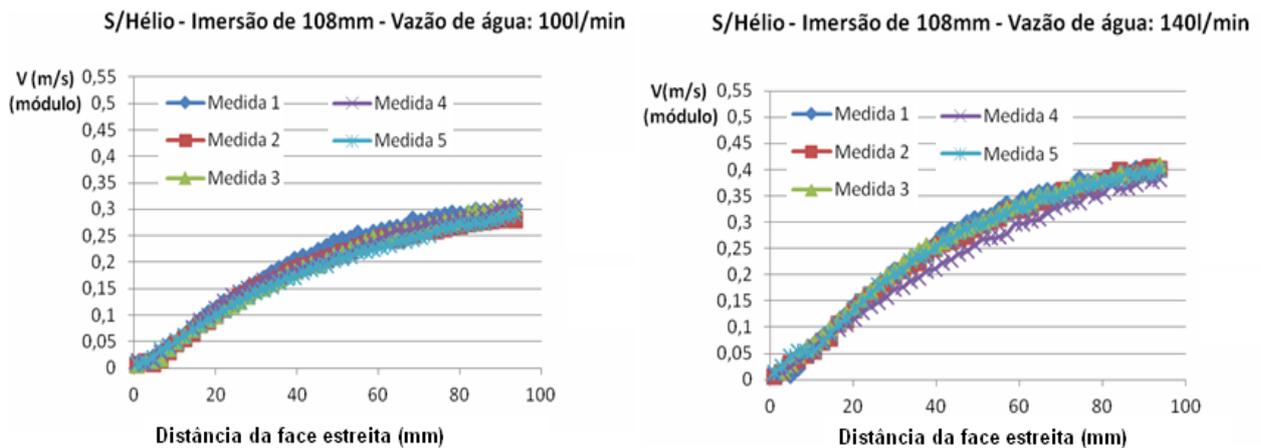
Figura 10. Variação de F com vazão de líquido e imersão da SEN com a presença de gás inerte.



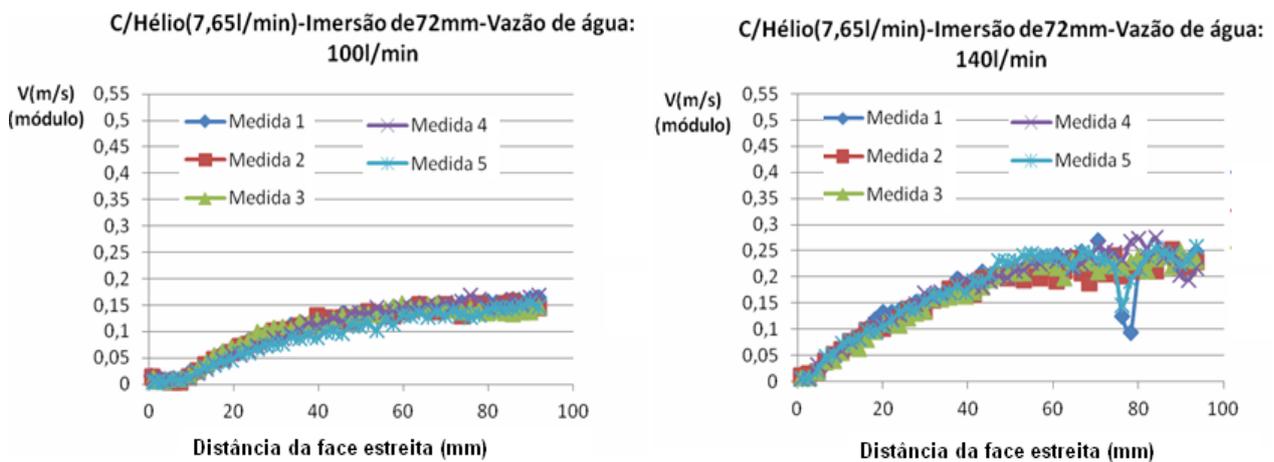
As Figuras de 11 a 14, mostram o aumento da velocidade junto à face estreita com a distância horizontal a partir da face estreita do molde, ou do ponto de impingimento. Os gráficos contêm as cinco curvas, uma para cada medição, encontrando-se estas sobrepostas umas as outras, revelando uma boa repetibilidade dos resultados.



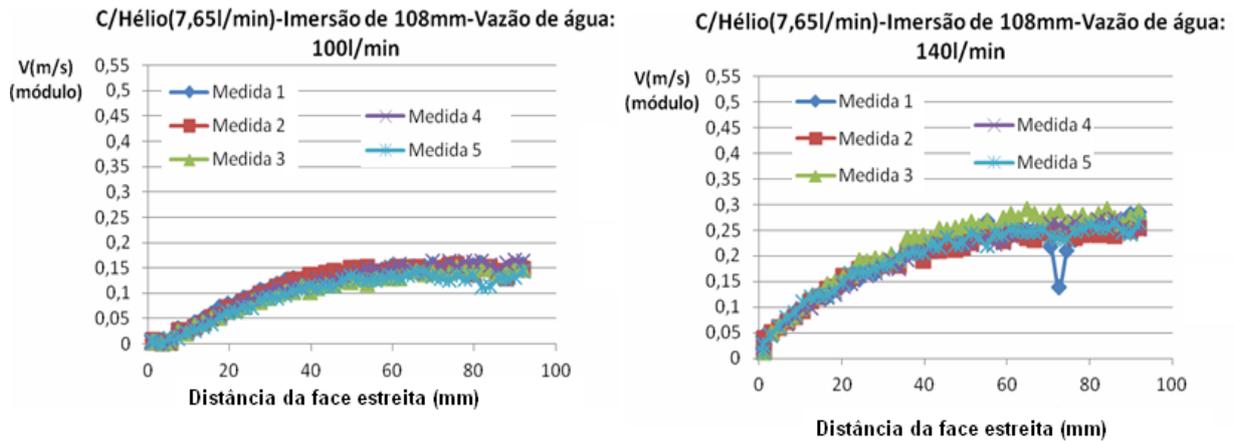
**Figura 11.** Variação da velocidade com a distância da placa para duas velocidades de lingotamento e profundidade de imersão da válvula submersa de 72 mm.



**Figura 12.** Variação da velocidade com a distância da placa para duas velocidades de lingotamento e profundidade de imersão da válvula submersa de 108 mm.

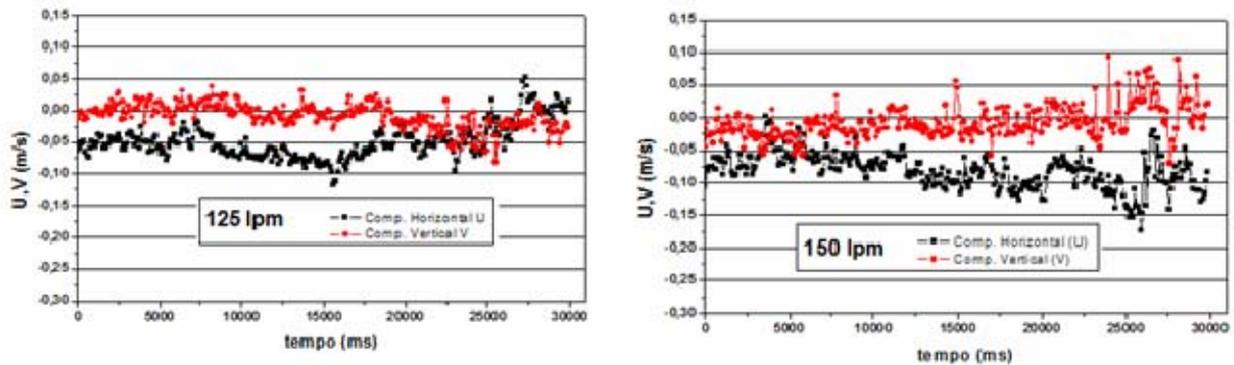


**Figura 13.** Variação da velocidade com a distância da placa para duas velocidades de lingotamento e profundidade de imersão da válvula submersa de 72 mm, com injeção de hélio.

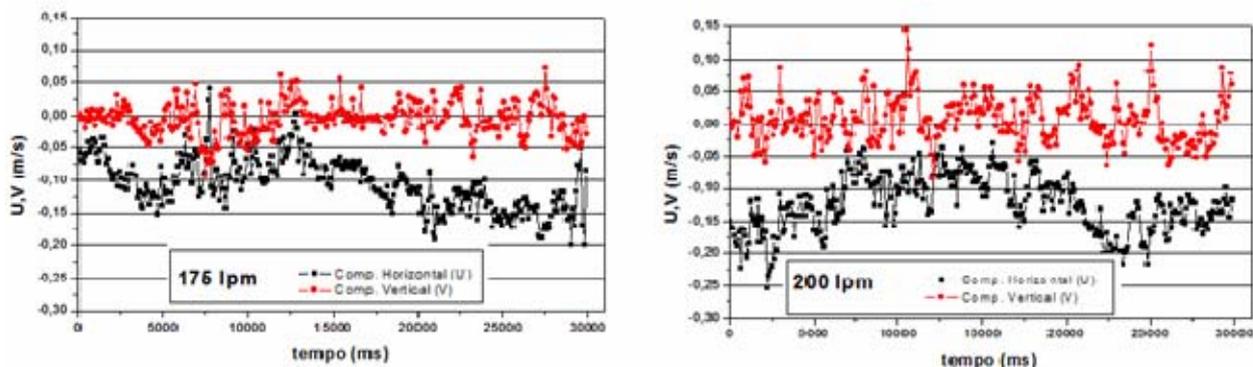


**Figura 14.** Variação da velocidade com a distância da placa para duas velocidades de lingotamento e profundidade de imersão da válvula submersa de 108mm, com injeção de hélio.

As Figuras 15 e 16 ilustram as flutuações de velocidades horizontal e vertical para várias velocidades de lingotamento, no ponto locado da metade da distância entre a parede do molde e a *SEN* e 30 mm abaixo do nível do menisco. Os resultados demonstram que maiores velocidades de lingotamento implicam em maiores intensidades das variações de velocidades horizontal e vertical nas vizinhanças da interface metal-escória. Com isto, maiores estados de turbulência na interface metal-escória, na região do menisco, favorecendo também o entranhamento e arraste de inclusões de pequenas dimensões e bolhas de argônio para o interior da poça de aço.



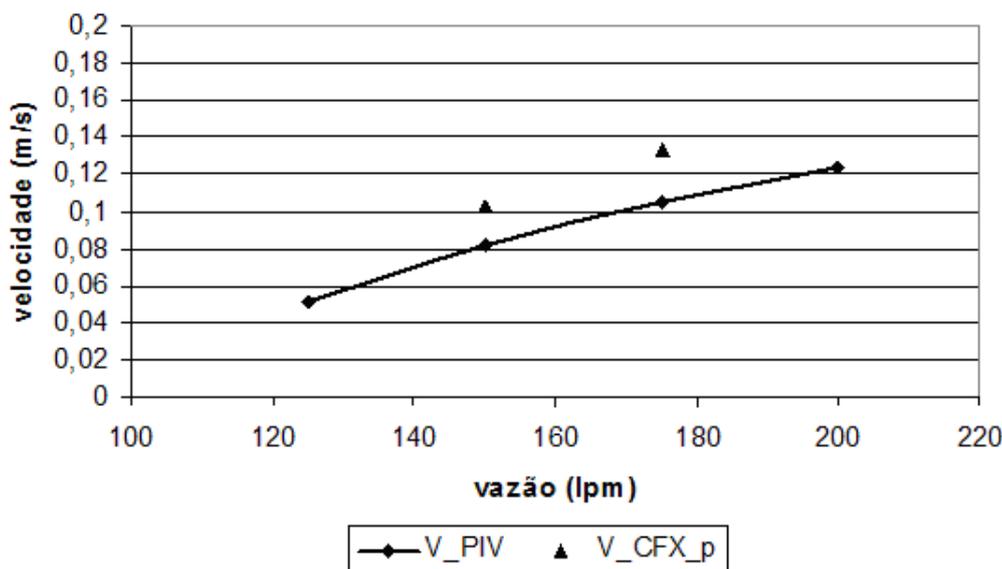
**Figura 15.** Flutuações de velocidades vertical e horizontal temporais do líquido, no menisco, para velocidade de lingotamento de 125 lpm e 150 mm.



**Figura 16.** Flutuações de velocidades vertical e horizontal temporais do líquido, no menisco, no caso de velocidade de lingotamento de 175 lpm e 200 lpm.



O gráfico da Figura 17 mostra a variação da velocidade subsuperficial, com a vazão para fins de comparação quantitativa entre CFD e PIV. O ponto de medição é aquele referente a metade da distância entre a SEN e a face estreita do molde e a 3 cm da superfície.



**Figura 17.** Influência da velocidade de lingotamento sobre a velocidade sub-superficial na região do menisco.

Percebe-se uma grande proximidade dos valores obtidos por ambos os métodos, de modo que a simulação via CFD (CFX da ANSYS) pode ser empregada para se obter detalhes do campo de velocidade. A simulação de que trata este trabalho, em termos de valores médios (Reynolds Average, modelo  $k-\varepsilon$ ) não é capaz, entretanto de alcançar o verdadeiro estado de turbulência, tal como explicitado pelas medições em PIV (Figuras 15 e 16).

## 4 CONCLUSÕES

Para as condições operacionais investigadas, pode-se concluir:

- determinou-se a influencia de parâmetros como vazão de líquido, vazão de gás, imersão da válvula sobre os valores do fator F, aqui tomado como indicativo do nível de atividade superficial. Esta influencia pode ser retratada através de formulas de regressão;
- na ausência de injeção de gás inerte, o aumento da profundidade de imersão da SEN provoca uma diminuição no fator F, sugerindo menores níveis de flutuação na superfície, o que acarretaria em menores possibilidades de emulsificação de escória no banho de aço. O contrário foi observado na presença de gás;
- a avaliação temporal da velocidade na região do menisco permite identificar caoticidade do fluxo, variabilidade dos valores de velocidade, característico do processo de turbulência na região interfacial; e
- os valores obtidos via PIV apresentam boa concordância com àqueles obtidos via modelagem matemática, de modo, então, a validá-los.



## Agradecimentos

Ao CNPq, CAPES, FAPEMIG e ArcelorMittal Tubarão pelo auxílio financeiro e de equipamentos.

## REFERÊNCIAS

- 1 THOMAS, B.G; YUAN, Q; BIN ZHAO, B & VANKA, P - **Transient Fluid-Flow Phenomena in the Continuous Steel-Slab Casting Mold and Defect Formation**, JOM, online
- 2 SENGUPTA, J & THOMAS, B. G -- **Visualizing Hook and Oscillation Mark Formation in Continuously Cast Ultra-Low Carbon Steel Slabs**, JOM, online, 2006
- 3 YOSHIDA, J; OHMI, T & IGUCHI, M – **Cold Mould Study of the Effects of Density Differences and Blockage Factor on Mould Powder Entrainment** – ISIJ International, vol. 45, 2005, n. 8, p. 1160-164
- 4 SILVA, C. A; PERIM, C.A SOUZA, E.C & VARANDA, V.W. S - **Desenvolvimento De Uma Metodologia Para Visualização Do Fluxo De Aço No Interior De Moldes De Lingotamento Contínuo, Através De Modelamento Físico** - Contribuição técnica apresentada no XXXI Seminário sobre Fusão, Refino e Solidificação dos Metais, da ABM, em Maio de 2.000, Vitória – ES.
- 5 SILVA C. A; VARGAS FILHO, G.A; SILVA, I.A; SESHADRI, V & CUNHA, F. R - **Avaliação Das Condições De Fluxo Na Região Do Menisco, No Molde De Lingotamento Contínuo De Placas Da CST**; Contribuição técnica apresentada no XXXIV Seminário de Fusão, Refino e Solidificação dos Metais, maio de 2003.
- 6 ARAÚJO JÚNIOR, E. S; GASPARI, V. M; SILVA, C. A; SILVA, I. A; CARVALHO FILHO, H. C; MANSUR, F; PERIN, C. A; SESHADRI - **Avaliação das Condições de Turbulência na Região do Menisco do Molde de LC, Via Modelagem Física E Matemática**. Contribuição técnica ao 41º Seminário de Aciaria – Internacional, 23 a 26 de maio de 2010, Resende, RJ, Brasil.
- 7 ARAÚJO JÚNIOR, E. S; SILVA, C. A; SILVA, I. A; Moreira, L. P; Costa, L.F.P & ; SESHADRI - **Otimização Da Distribuição De Fluxos Do Aço Líquido Na Região Do Menisco Do Molde De Placas De Uma Máquina De Lingotamento Contínuo** Contribuição técnica ao 42º Seminário de Aciaria – Internacional, 15 a 18 de maio de 2011, Salvador, BA, Brasil.
- 8 SESHADRI, V; SILVA, C.A; SILVA, I.A; ARAÚJO Jr, E.S & MOREIRA, I. P - **Controlling Turbulence at the Meniscus Region of a Continuous Casting: a Physical and Mathematical Modeling**. METEC InSTEELCon® 2011, Düsseldorf, 27 June \_ 1 July 2011, p. 1 -9