

# COMPORTAMENTO DO AÇO LÍQUIDO NA REGIÃO DO MENISCO DO MOLDE DE LINGOTAMENTO CONTÍNUO, VIA MODELAGENS FÍSICA E MATEMÁTICA

Ely da Silva Araújo Júnior <sup>1</sup>  
 Vitor Maggioni Gasparini <sup>2</sup>  
 Carlos Antônio da Silva <sup>3</sup>  
 Itavahn Alves da Silva <sup>4</sup>  
 Helder Campos de Carvalho Filho <sup>5</sup>  
 Filipe Mansur <sup>6</sup>  
 Carlos Alberto Perim <sup>7</sup>  
 Varadarajan Seshadri <sup>8</sup>

## Resumo

Estuda-se, via modelagens física e matemática, os efeitos da velocidade de lingotamento; geometria do molde; profundidade de imersão; geometria e inclinação dos furos da SEN (*Submerged Entry Nozzle*) sobre a estabilidade do fluxo de aço na região do menisco do molde de LC e suas possíveis influências sobre a emulsificação metal-escória. Dados experimentais obtidos, via modelagem física, são agrupados por meio do parâmetro  $F$ , definido a partir da velocidade de lingotamento, da profundidade de impacto do jato contra a face estreita do molde e do ângulo de saída do jato. Simulações numéricas, via programa CFX, permitem estimar a velocidade subsuperficial para as condições ensaiadas no modelo. A análise dos resultados de modelagem física e matemática permitem identificar as condições de lingotamento ideais, para duas configurações de válvulas submersas.

**Palavras-chave:** Moldes; Válvula submersa; Turbulência.

## BEHAVIOR OF LIQUID STEEL AT THE MENISCUS REGION OF A CONTINUOUS CASTING MOLD THROUGH PHYSICAL AND MATHEMATICAL MODELING

### Abstract

The likely influence of casting velocity, mold geometry and depth of immersion of the SEN, internal geometry and inclination of the ports of the SEN on the stability of the steel flow in the mold of a continuous casting machine have been assessed through mathematical and physical modeling. Experimental data obtained through physical modeling are grouped by means of the  $F$  parameter, defined from the values of casting speed, the depth of the impact point of the steel jet against the narrow face and angle of the steel jet. Numerical simulations allow to estimate the subsurface velocity for the test conditions used in the model. The results of physical and mathematical modeling allow the identification of the ideal casting conditions for two nozzle configurations.

**Key words:** Mold; Submerged nozzle; Turbulence.

<sup>1</sup>Engenheiro Metalúrgico, Mestrando em Engenharia de Materiais – Redemat, Universidade Federal de Ouro Preto – UFOP. Av. Rita Maria Ferreira da Rocha, 855, apt 504, Prédio Estados Unidos, Bairro Comercial, Cep 27510-060, Resende, RJ, Brasil. E-mail: elyjuniorgf8@yahoo.com.br

<sup>2</sup>Engenheiro Metalúrgico, Mestrando em Engenharia de Materiais – Redemat, Universidade Federal de Ouro Preto – UFOP. Rua João Dias da Mota, 340, Bairro Inconfidentes, Cep 36420-000, Ouro Branco, MG, Brasil. E-mail: vitormaggioni@yahoo.com.br

<sup>3</sup>Engenheiro Metalúrgico, Ph.D, Professor da Universidade Federal de Ouro Preto – UFOP. Campus Morro do Cruzeiro, Escola de Minas, Bairro Bauxita, Cep 35400-000, Ouro Preto, MG, Brasil. E-mail: casilva@em.ufop.br

<sup>4</sup>Engenheiro Metalúrgico, Ds.C., Professor da Universidade Federal de Ouro Preto – UFOP. Campus Morro do Cruzeiro, Escola de Minas, Bairro Bauxita, Cep 35400-000, Ouro Preto, MG, Brasil. E-mail: itavahnufop@yahoo.com.br

<sup>5</sup>Graduando do Curso de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto – UFOP. Rua Baldomero Barbará Filho, 132, Pioneiros, Cep 36420-000, Ouro Branco, MG, Brasil. E-mail: helderufop@hotmail.com

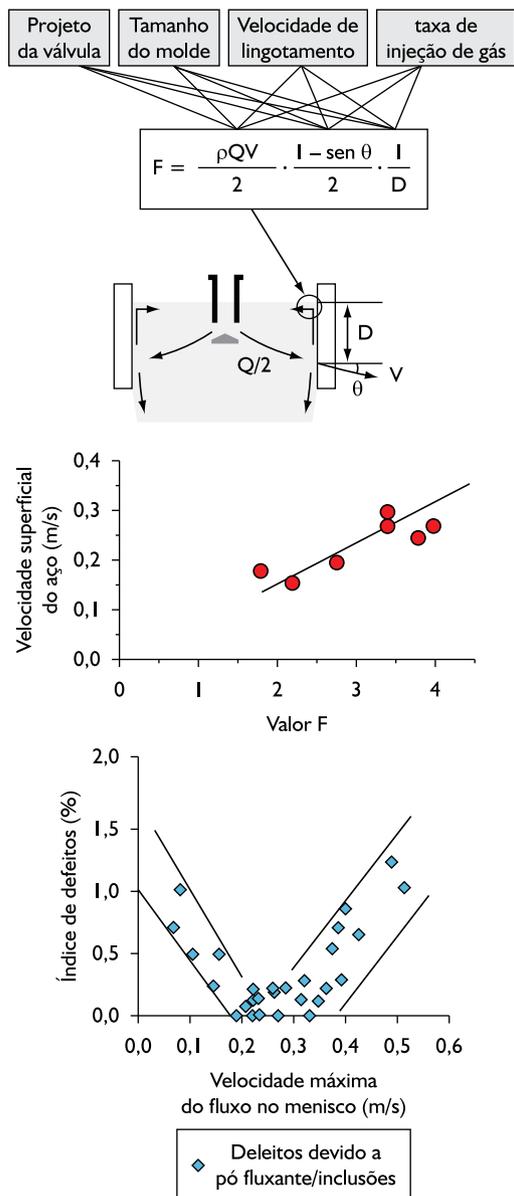
<sup>6</sup>Graduando do Curso de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto – UFOP. Av. Vinte e Seis de Outubro, 1925-J30D, Ap.202, Cep 35160-208, Ipatinga, MG, Brasil. E-mail: fimansur@yahoo.com.br

<sup>7</sup>Engenheiro Metalurgista, MSc, ArcelorMittal Tubarão, Rua Paulina Marangoni, 90, Bairro Mata da Praia, Cep 29065-590, Vitória, ES, Brasil. E-mail: carlos.perim@arcelormittal.com

<sup>8</sup>Engenheiro Metalúrgico, Dr., Professor da Universidade Federal de Minas Gerais – UFMG. Rua Costa Rica, 333, apt 702, Bairro Sion, Cep 30320-030, Belo Horizonte, MG, Brasil. E-mail: seshadri@demet.ufmg.br

## I INTRODUÇÃO

Os fenômenos associados ao regime turbulento causado pelo jato de aço e o trem de bolhas de argônio, nas imediações das portas da SEN e região do menisco no molde de LC, são responsáveis por uma gama de defeitos do produto final, tais como: *slivers*, *blisters*, *hooks*, aprisionamento de inclusões carreadas pelo jato de aço e aprisionamento de escória de molde. A intensidade de turbulência na interface metal – escória pode ser quantificada por meio do Fator F (Figura 1). Por outro lado, a incidência de defeitos mostra-se associada ao estado de turbulência reinante na região do menisco. Tal como sugerido na Figura 1, nota-se que as velocidades superficiais recomendadas seriam da ordem de 20-35 cm/s, que correspondem a valores de fator F em torno de 3,0~4,5. Como indica a literatura<sup>(1-8)</sup>, estes e outros aspectos relacionam a qualidade do produto à fluidodinâmica no molde, o que justifica a importância de estudos complementares.



**Figura 1.** Molde de lingotamento contínuo, por meio do fator F<sup>(6,7)</sup>; b) Influência da velocidade no menisco sobre o índice de defeito na placa.<sup>(4)</sup>

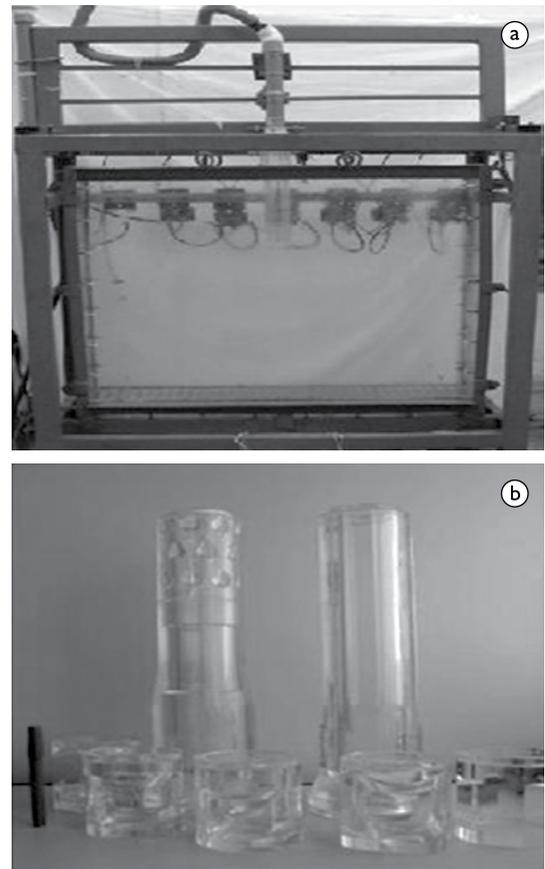
## 2 OBJETIVOS

Este trabalho propõe-se a investigar os efeitos da velocidade de lingotamento; geometria, profundidade de imersão, inclinação dos furos da válvula submersa sobre a estabilidade do fluxo de aço e emulsificação metal-escória na região do menisco, via modelagens física e matemática.

## 3 MATERIAL E MÉTODOS

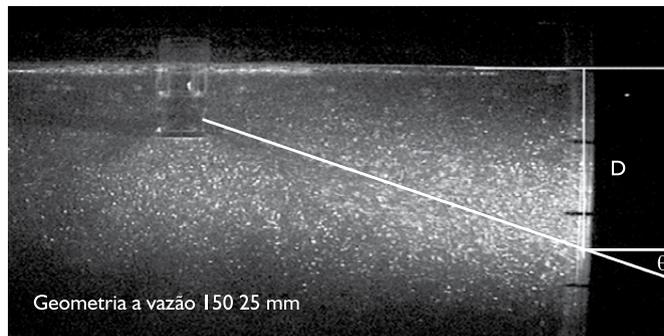
### 3.1 Modelagem Física

Utilizou-se um modelo em escala reduzida, 0,6: 1 de um molde de lingotamento de placas, construído em acrílico e dois tipos de válvulas submersas, uma nomeada de padrão e uma denominada *mogul*. Esta última diferencia-se por conter saliências em seu interior, que agem para equalizar o fluxo. A válvula padrão possui dois formatos de saídas, sendo um quadrado e um em formato de pêsco; para cada tipo de saída utilizaram-se três ângulos diferentes: 15°, 25° e 35°. A válvula *mogul* apresenta apenas um formato quadrado de porta de saída. Este modelo e as diversas geometrias da válvula submersa são mostrados na Figura 2.



**Figura 2.** a) Vista da montagem experimental do molde com  $\lambda = 0,6$ ; b) Geometrias de corpos e portas de válvulas submersas, feitas em acrílico.

Os ensaios foram conduzidos para diferentes vazões representando diferentes velocidades de lingotamento e compreenderam: (i) visualização via plano de laser para determinação do parâmetro  $F$ , e (ii) simulação numérica via CFX. A técnica de visualização de fluxo consiste em incidir um plano de laser contra o modelo de forma que este ilumine partículas (de massa específica igual à do líquido e quantificar pequenas dimensões) contidas no fluido. As partículas tendem a acompanhar o fluxo do líquido, permitindo a identificação da trajetória. A Figura 3 mostra imagens obtidas por meio dessa técnica, bem como exemplo dos parâmetros geométricos determinados. Esse experimento foi realizado para cada combinação de vazão de líquido, geometria da SEN, profundidade de imersão e dimensões da placa.



**Figura 3.** Determinação dos parâmetros  $\theta$  e  $D$ , pela técnica de visualização por plano de laser.

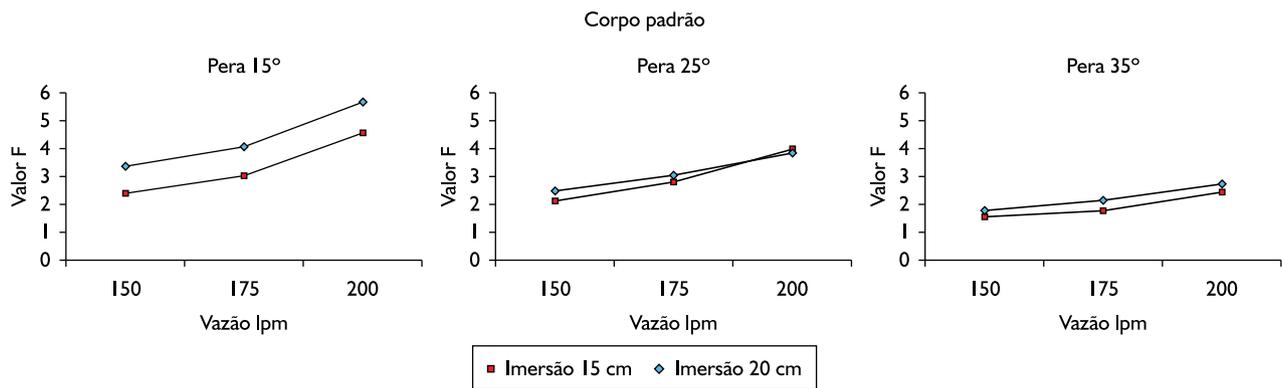
### 3.2 Modelagem Matemática

Para a modelagem matemática foi utilizado o software ANSYS/CFX. As condições de contorno e as equações utilizadas de Conservação de massa e de Quantidade de Movimento não diferem daquelas descritas na literatura<sup>(8)</sup> e não serão abordadas neste trabalho. Essas simulações permitiram relacionar o fator  $F$  à velocidade subsuperficial, para condições específicas de geometria do sistema e das condições operacionais.

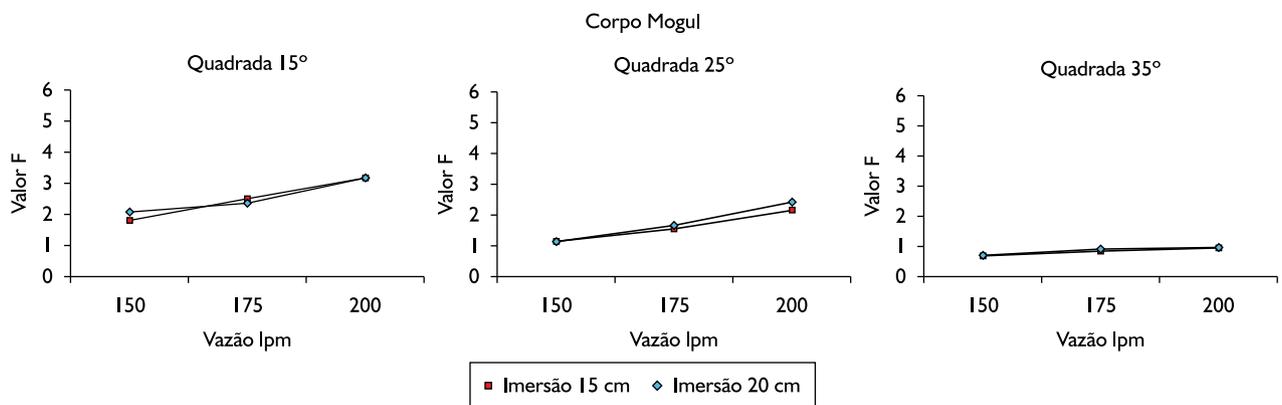
## 4 RESULTADOS

### 4.1 Controle do Fluxo na Região do Menisco Via Parâmetro $F$

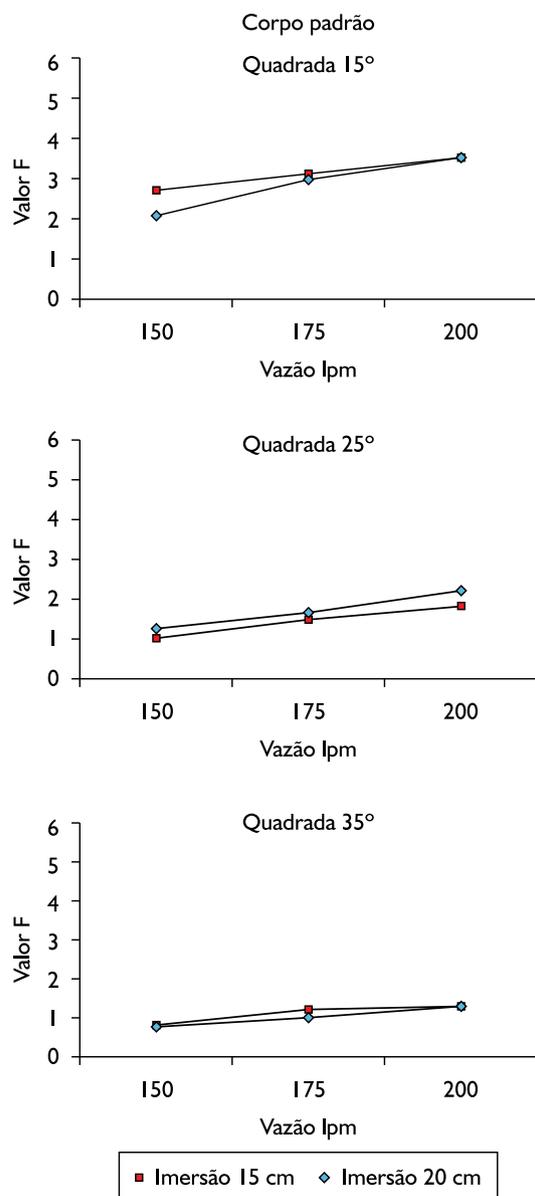
As Figuras 4, 5 e 6 mostram como os fatores operacionais (inclinação das portas e imersão da válvula submersa, velocidade de lingotamento) fazem variar o valor  $F$ . A imersão da válvula submersa teve resultado significativo quando se utiliza a válvula padrão com geometria de saída em forma de pêra com um ângulo de  $15^\circ$ ; já para as outras configurações a imersão praticamente não influencia no fator  $F$ . O valor



**Figura 4.** Válvula padrão, pêra  $15^\circ$ ; Válvula padrão, pêra  $25^\circ$ ; Válvula padrão, pêra  $35^\circ$ .



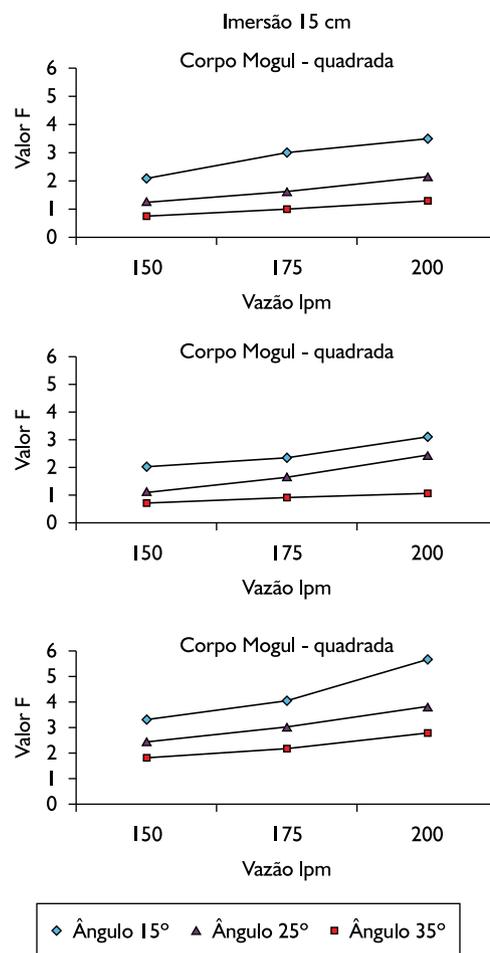
**Figura 5.** Válvula mogul, quadrada  $15^\circ$ ; Válvula mogul, quadrada  $25^\circ$ ; Válvula mogul, quadrada  $35^\circ$ .



**Figura 6.** Válvula padrão, quadrada 15°; Válvula padrão, quadrada 25°; Válvula padrão, quadrada 35°.

de F tende a diminuir quanto maior a imersão; tal fato pode ser explicado uma vez que a uma maior imersão da SEN implica em ponto de impacto mais profundo junto às faces estreitas. Espera-se que sob essas condições o estado de turbulência na região do menisco seja menor. Pode-se observar que o aumento da velocidade de lingotamento também influencia diretamente no fator F, o que decorre evidentemente da sua definição.

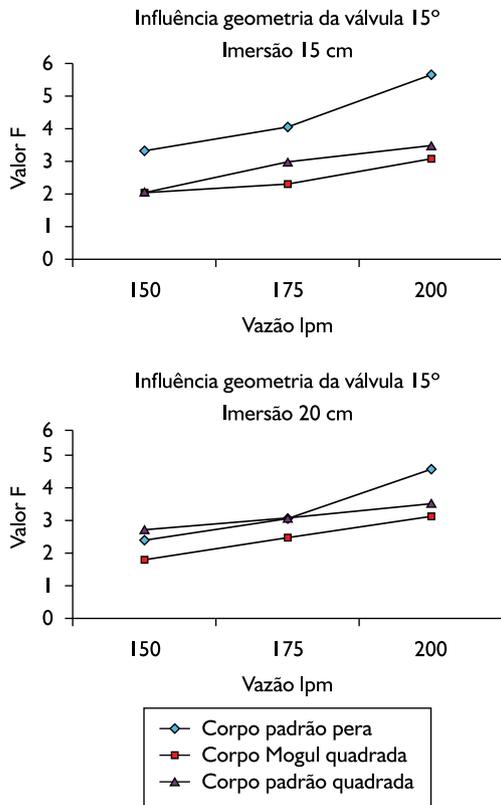
A formulação proposta para o cálculo de F indica que os valores são decrescentes quanto maior for o ângulo de saída do jato; como este está relacionado com o ângulo da porta espera-se encontrar alguma influência deste sobre o valor de F. Essa tendência pode ser observada nos ensaios realizados. O gráfico da Figura 7 mostra que, para todas as configurações, quanto maior o ângulo de saída da porta da válvula submersa menor é o valor de F. Espera-se, por consequência, menor intensidade de fluxo na região do menisco.



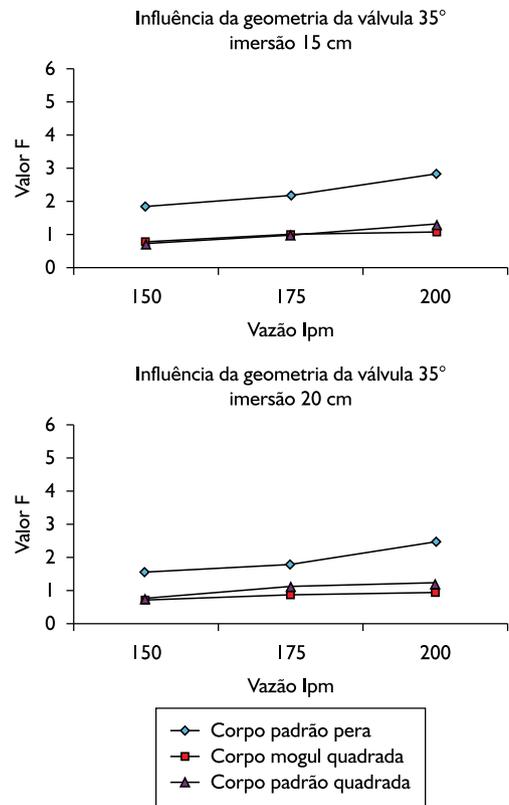
**Figura 7.** Influência do ângulo de saída da válvula submersa sobre o fator F.

A geometria dos furos de saída também influencia o fator F. As Figuras 8, 9 e 10 ilustram essa afirmativa. Comparou-se para as mesmas configurações (imersão e ângulo) a influência da geometria da saída da válvula submersa. Pode-se observar que, para todos os casos, a válvula padrão com geometria em forma de pêra é a que apresenta maior fator F, sendo que a válvula *mogul* com geometria quadrada e válvula padrão com geometria quadrada apresentam semelhança em termos de fator F em praticamente todas as configurações, entretanto, com valor inferior à geometria pêra. É relevante citar o comportamento da válvula *mogul* em relação à válvula padrão: em todas as situações a *mogul* apresenta fator F menor em relação à padrão.

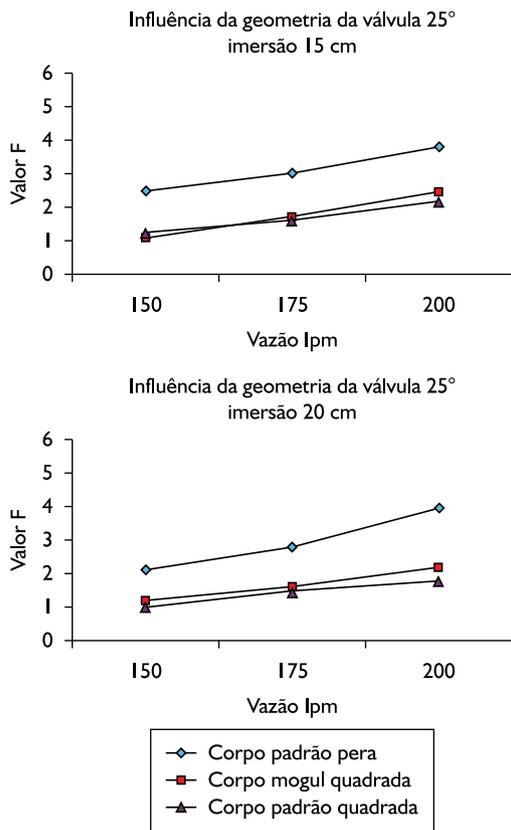
A Figura 11 mostra a relação determinada, via modelagem matemática, entre o parâmetro F e a velocidade subsuperficial no modelo do molde. Para determinação desses valores, a largura do molde foi variada entre 1,20 m e 1,0 m, enquanto se consideraram valores de vazão 120 Lpm e 160 Lpm para o molde de 1,0 m; e 150 Lpm e



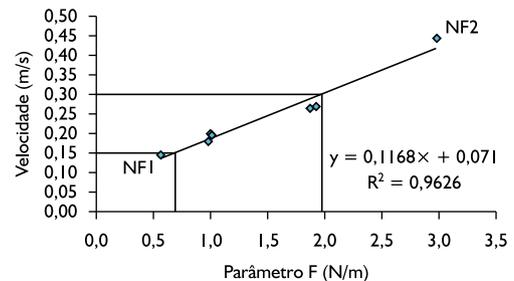
**Figura 8.** Influência da geometria da válvula submersa e da vazão sobre o valor de F para duas profundidades de imersão diferentes e ângulo de saída de 15°.



**Figura 10.** Influência da geometria da válvula submersa e da vazão sobre o valor de F para duas profundidades de imersão diferentes e ângulo de saída de 35°.



**Figura 9.** Influência da geometria da válvula submersa e da vazão sobre o valor de F para duas profundidades de imersão diferentes e ângulo de saída de 25°.



**Figura 11.** Relação entre a velocidade subsuperficial e o parâmetro F (para o modelo).

200 Lpm para o molde de 1,20 m de largura. Este gráfico é válido para a válvula de corpo padrão, com portas de saída de forma quadrada e ângulos de 15° e 35°. A velocidade superficial foi considerada como sendo o valor médio à meia distância entre a face estreita e o corpo da SEN, na proximidade da superfície. Nota-se uma relação quase linear entre os dois valores, que pode ser comparada àquela da Figura 1. De acordo com a literatura, a faixa pretendida de velocidade subsuperficial seria de 0,2 m/s a 0,4 m/s (na máquina industrial). Considerando a relação de conversão entre velocidades  $V_{\text{modelo}} = V_{\text{industrial}} \lambda^{1/2}$  isto

implica, no modelo, valores de fator F entre 0,7 e 2,0. Estes limites de fator F sugerem que as operações identificadas pelos símbolos NF (1 e 2) não se situam dentro da faixa recomendada. Transpondo estes resultados à máquina industrial tem-se:

- NF(1) Molde com 1,6 m de largura, velocidade de lingotamento de aproximadamente 3,0 t/min e válvula com ângulo de 35°; e
- NF(2) Molde com 1,6 m de largura, velocidade de lingotamento de aproximadamente 4,0 t/min e válvula com ângulo de 15°.

## 5 CONCLUSÃO

Dos resultados obtidos, pode-se concluir que:

- o valor de F diminui com o aumento da profundidade de imersão da SEN, resultando em menores níveis de turbulência na interface metal/fluxante e, por isso, menores chances de emulsificação metal-escória na região do menisco;
- a imersão da válvula submersa apresenta resultado significativo quando se utilizou a válvula padrão com geometria de saída em forma de pêra com um ângulo de 15°; já para as outras configurações a imersão praticamente não influenciou no fator F. Pode-se observar que o aumento da velocidade de lingotamento também influencia diretamente no fator F;

- quanto maior o ângulo de saída da porta da válvula submersa menor é o valor de F e, conseqüentemente, menor intensidade de fluxo na região do menisco;
- a válvula padrão com geometria em forma de pêra é a que obteve maior fator F. Aa válvula *mogul* com geometria quadrada e válvula padrão com geometria quadrada apresentam semelhança em termos de fator F em praticamente todas configurações, entretanto, com valor inferior à geometria pêra;
- é relevante citar o comportamento da válvula *mogul* em relação à válvula padrão: em todas as situações a *mogul* apresenta fator F menor em relação à padrão;
- a metodologia utilizada permite avaliar os valores de F na máquina industrial e otimizar as condições operacionais de lingotamento.

## Agradecimentos

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

## REFERÊNCIAS

- 1 SENGUPTA, J.; THOMAS, B. G. Visualizing hook and oscillation mark formation in continuously cast ultra-low carbon steel slabs. *JOM-e*, Dec. 2006. Disponível em: <<http://www.tms.org/pubs/journals/JOM/0612/Sengupta/Sengupta-0612.html>>. Acesso em: 20 dez. 2009.
- 2 SILVA, C. A. et al. Desenvolvimento de uma metodologia para visualização do fluxo de aço no interior de moldes de lingotamento contínuo, através de modelagem física. In: SEMINÁRIO DE FUSÃO, REFINO E SOLIDIFICAÇÃO DOS METAIS, 31, 2000, Vitória, ES. *Anais...* São Paulo: ABM, 2000. p. 599-609.
- 3 THOMAS; B. G.; MIKA, L. J.; NAJJAR, F. M. Simulation of fluid flow inside a continuous slab casting machine. *Metallurgical and Materials Transactions B*, v. 21, n. 2, p. 387-400, Apr. 1990.
- 4 THOMAS, B. G. et al. Transient fluid-flow phenomena in the continuous steel-slab casting mold and defect formation. *JOM-e*, Dec. 2006. Disponível em: <<http://www.tms.org/pubs/journals/JOM/0612/Thomas/Thomas-0612.html>>. Acesso em: 20 dez. 2009.
- 5 THOMAS, B. G. Modeling of continuous-casting defects related to mold fluid flow *Iron and Steel Technology*, v. 3, n. 7, p. 128-43, July 2006.
- 6 KUBOTA, J. et al. Meniscus flow control in the mold by travelling magnetic field for high speed slab caster. In: CRAMB, A. W.; SZEKERES, E. (Eds.). *Mold operation for quality and productivity*. Warrendale, Pa: Iron And Steel Society, 1991. p. 7-8.
- 7 LOFGREN, S. K. P. M.; LEHMAN, A. Improving quality and productivity in thick slab casting by direct control of electromagnetic brake (EMBR). In: INTERNATIONAL CONFERENCE AISE, 2003, Pittsburgh, USA. *Proceedings...* [S.l.]: Association for Iron & Steel Technology, 2003. p. 977-84
- 8 THOMAS, B. G.; ZHANG, L. Review: mathematical modeling of fluid flow in continuous casting. *ISIJ International*, v. 41, n. 10, p. 1181-93, 2001.

Recebido em: 06/10/2010

Aceito em: 07/12/2010