



AVALIAÇÃO DAS CONDIÇÕES DE TURBULÊNCIA NA REGIÃO DO MENISCO DO MOLDE DE LC, VIA MODELAGEM FÍSICA E MATEMÁTICA ¹

*Ely da Silva Araújo Júnior*²

*Vitor Maggioni Gasparini*²

*Carlos Antônio da Silva*³

*Itavahn Alves da Silva*³

*Helder Campos de Carvalho Filho*⁴

*Felipe Mansur*⁴

*Carlos Alberto Perim*⁵

*Varadarajan Seshadri*⁶

Resumo

Estudou-se, via modelamento físico e matemático, os efeitos da velocidade de lingotamento; geometria do molde; profundidade de imersão, geometria e inclinação dos furos da válvula submersa 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, foram 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 CFX, permitiram estimar a velocidade subsuperficial para as condições ensaiadas no modelo. A análise dos resultados de modelagem física e matemática permitiram identificar as condições de lingotamento ideais, para duas configurações de válvulas submersas.

Palavras-chave: Molde; Válvula submersa; Zona do menisco, Turbulência.

EVALUATION OF THE TURBULENCE CONDITIONS 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 has been assessed through mathematical and physical modeling. Experimental data obtained through physical modeling were 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 allowed 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; Meniscus zone; Turbulence.

¹ Contribuição técnica ao 41º Seminário de Aciaria – Internacional, 23 a 26 de maio de 2010, Resende, RJ, Brasil.

² Engenheiro Metalurgista, Mestrando da REDEMAT, Escola de Minas, UFOP

³ Professor Associado do Departamento de Engenharia Metalúrgica da Escola de Minas/ Dr. (UFOP)

⁴ Graduando do Curso de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Escola de Minas, UFOP

⁵ Engenheiro Metalurgista, MSc, ArcelorMittal Tubarão, Vitória, Espírito Santo

⁶ Dr. Ing Professor Emérito do Departamento de Engenharia Metalúrgica e de materiais, UFMG, Belo Horizonte

1 INTRODUÇÃO

Os fenômenos ocorrentes no interior do molde de LC são funções complexas das variáveis e condições operacionais, tais como: velocidade de lingotamento; tipo e formato do produto; características de oscilação do molde; superaquecimento do aço; profundidade de imersão, alinhamento e geometria da válvula submersa; vazão de gás inerte. A Figura 1 esquematiza alguns dos diversos fenômenos ocorrentes no interior do molde. Sabe-se que os fenômenos associados com o 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 carregadas pelo jato de aço líquido e aprisionamento de escória de molde.



Figura 1 – Fenômenos ocorrentes no interior do molde.⁽¹⁾

O fluxo de aço líquido no molde normalmente exhibe distribuição temporal de duplo rolo (Figura 2) embora a estrutura correspondente a rolo simples também seja possível. Tem sido mostrado que na realidade a estrutura de fluxo oscila entre vários padrões, em função do caráter turbulento do fluxo. Este comportamento complexo induz a formação e desenvolvimento de vórtices em ambos os modos de recirculação, podendo resultar no aprisionamento de bolhas e inclusões. Silva et al,⁽²⁾ e Thomas et al.,⁽³⁻⁷⁾ estudaram a distribuição de fluxos de aço líquido no interior do molde, através tanto de métodos de visualização via modelagem física como matemática.

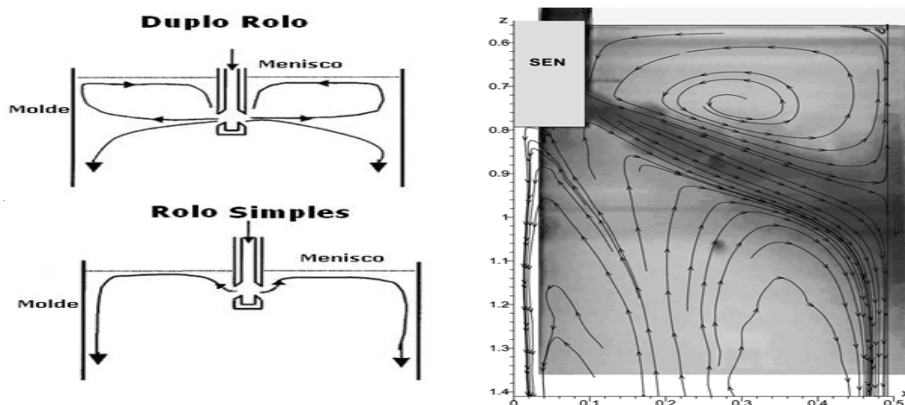


Figura 2 – Distribuição de fluxos nas imediações da porta da SEM.⁽⁸⁾

A intensidade de turbulência na interface metal – escória pode ser quantificada através do Fator F (Figura 3).

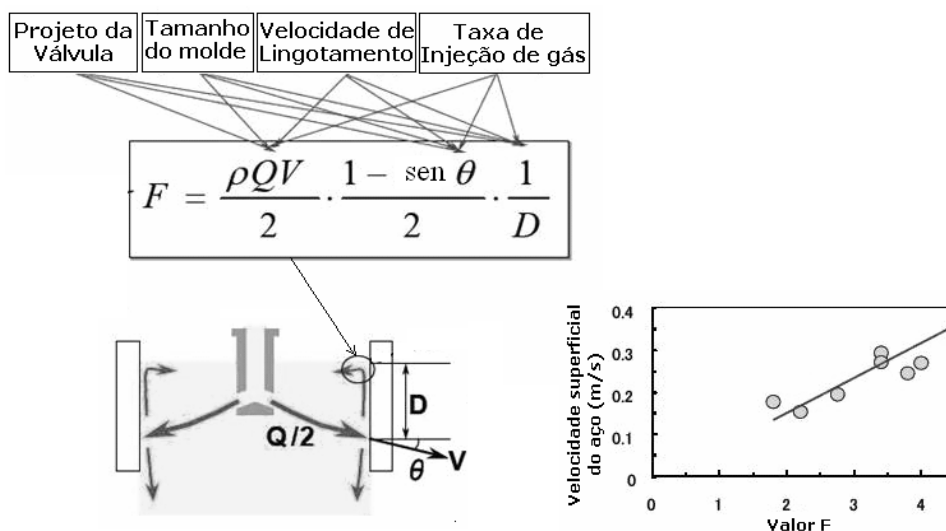


Figura 3 – Quantificação da intensidade de turbulência interfacial no interior do molde de lingotamento contínuo, através do fator F.^(9,10)

A incidência de defeitos se mostra associada ao estado de turbulência reinante na região do menisco, tal como sugerido na Figura 4, onde se nota que as velocidades superficiais recomendadas seriam da ordem de 20-35 cm/s, as quais correspondem a valores de fator F em torno de 3,0 ~ 4,5.

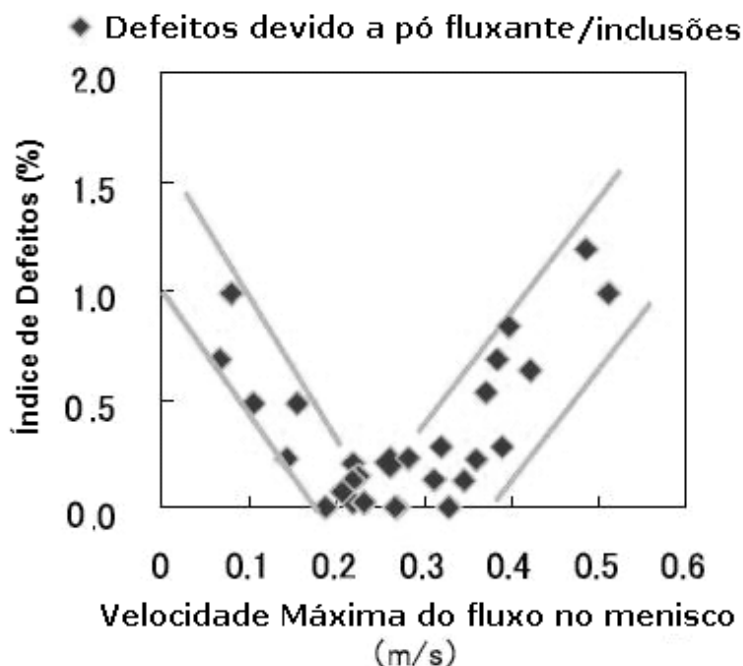


Figura 4 – Influência da velocidade no menisco sobre o índice de defeito na placa.⁽¹⁰⁾

Como indica a literatura,^(1,8-10) estes e outros aspectos relacionam a qualidade do produto à fluidodinâmica no molde, o que justifica a importância de estudos complementares.

2 OBJETIVOS

Este trabalho visa investigar os efeitos de parâmetros operacionais e variáveis, tais como: velocidade de lingotamento; geometria, profundidade de imersão, inclinação dos furos da válvula submersa, sobre a estabilidade do fluxo de aço e emulsificação metal-escória do molde na região do menisco, via modelagem física e matemática.

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Modelamento Físico

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 se diferencia por conter saliências em seu interior as quais agem para equalizar o fluxo. A válvula padrão possui dois formatos de saídas, sendo um quadrado e um em formato de pêra; para cada tipo de saída utilizou-se três ângulos diferentes, 15°, 25° e 35°. A válvula “mogul” apresenta apenas um formato de porta de saída, quadrado. Este modelo e as diversas geometrias são mostrados na Figura 5.

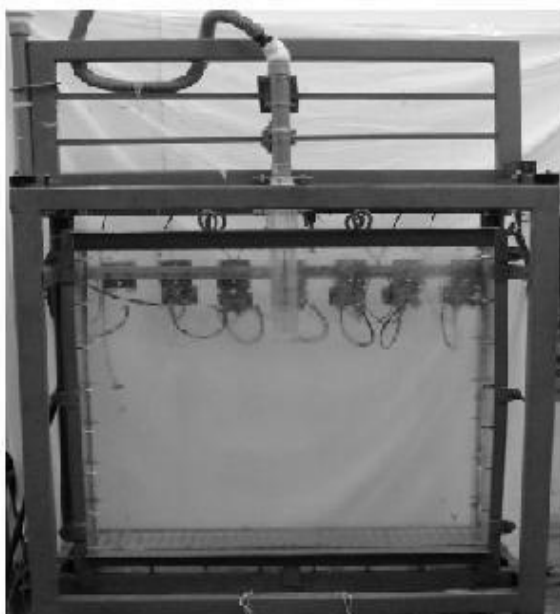


Figura 5 – a) Vista da montagem experimental do molde; b) Geometrias de corpos e portas de válvulas submersas, feitas em acrílico.

Existe, portanto, uma ampla combinação de parâmetros geométricos e operacionais a ser investigada à luz dos testes específicos resumidos nas seções anteriores.

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 1600°C, e os adimensionais de Reynolds, Froude e Weber. O modelo disponível corresponde a um veio de uma máquina de lingotamento, de dimensões de até 0,20 m x 2,0 m, lingotando a 4,5 ton/min.

Os ensaios foram conduzidos para diferentes vazões representando diferentes velocidades de lingotamento e compreenderam o seguinte: visualização via plano de laser para determinação do parâmetro F e 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 densidade igual a do líquido e pequenas dimensões) 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, geometria da SEN, profundidade de imersão e dimensões da placa.

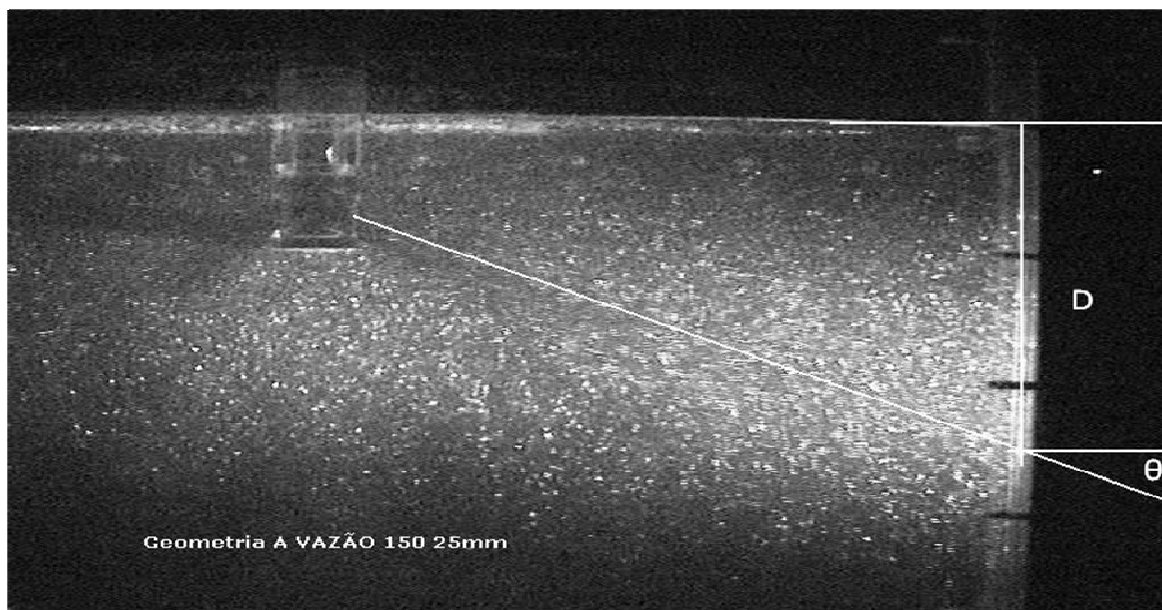


Figura 6 – Determinação dos parâmetros θ e D através da técnica de visualização por plano de laser.

3.2 Modelamento Matemático

Para o modelamento matemático 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⁽¹¹⁾ e não são abordadas neste trabalho. A Figura 7 mostra um exemplo de imagem obtida através dessa simulação, neste caso estão ilustradas as linhas de fluxo para uma determinada configuração; estas simulações permitiram relacionar o fator F à velocidade subsuperficial.

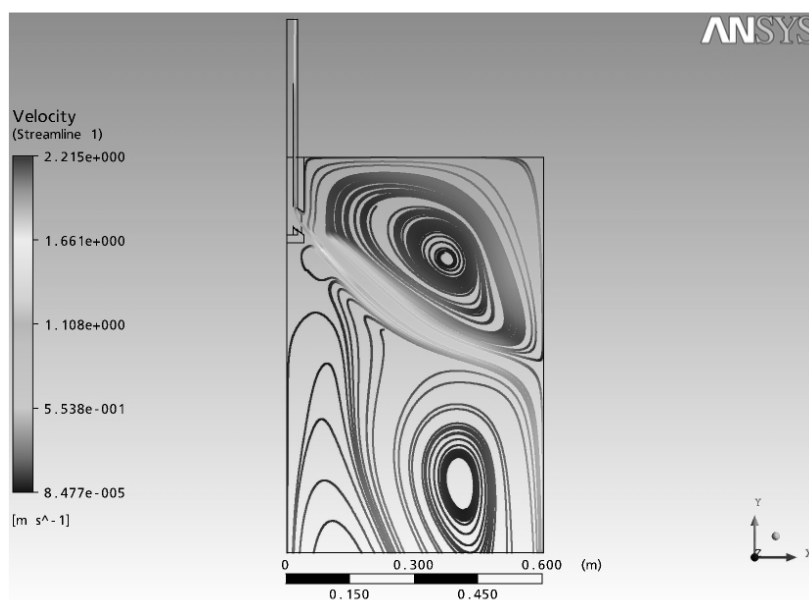


Figura 7 – Linhas de Fluxo para uma determinada configuração.



4 RESULTADOS

4.1 Controle do Fluxo na Região do Menisco Via Parâmetro F

As Figuras 8, 9 e 10 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°, já para as outras configurações a imersão praticamente não influenciou no fator F. O valor 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 junto as faces estreitas mais profundo; espera-se que sob essas condições o estado de turbulência na região do menisco o seja menor. Pode-se observar também que o aumento da velocidade de lingotamento também influencia diretamente no fator F, o que decorre evidentemente da definição deste.

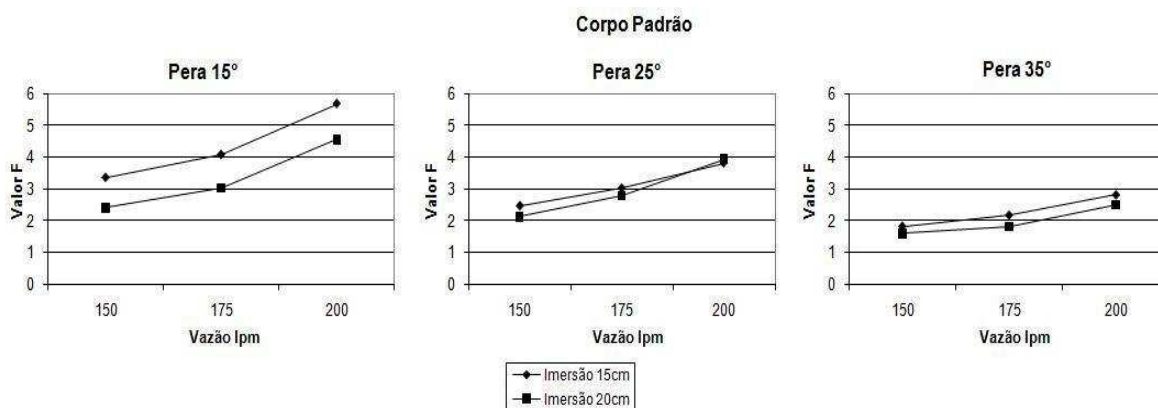


Figura 8 – Válvula Padrão, Pera 15°; – Válvula Padrão, Pera 25° ,– Válvula Padrão, Pera 35°.

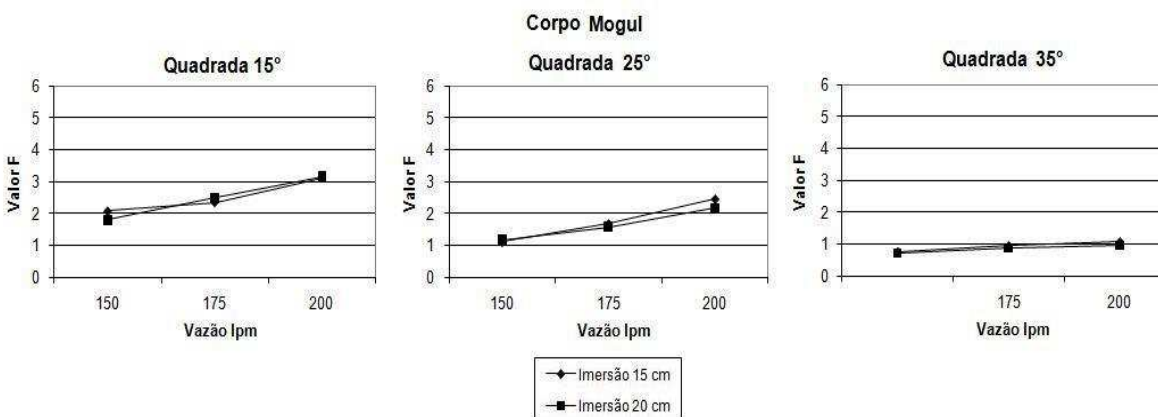


Figura 9 – Válvula mogul, Quadrada 15°; – Válvula mogul, Quadrada 25°, – Válvula mogul, Quadrada 35°.

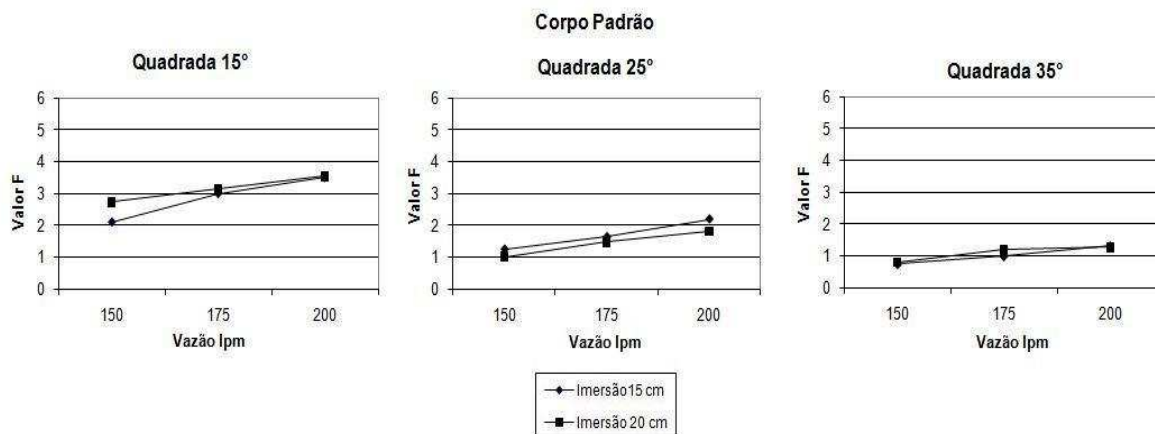


Figura 10 – Válvula Padrão , quadrada 15°; – Válvula Padrão, quadrada 25°, – Válvula Padrão, quadrada 35°.

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 11 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.

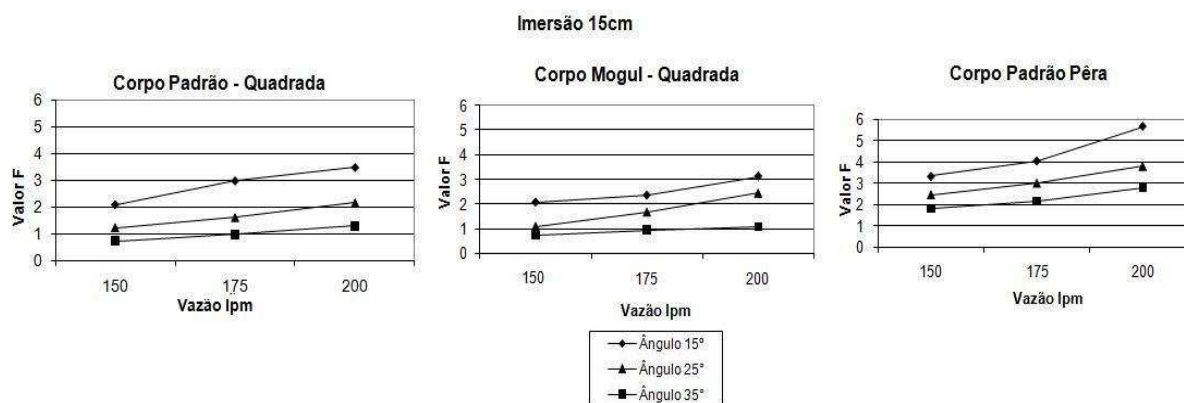


Figura 11: Influência do ângulo de saída da válvula submersa sobre o fator F.

A geometria dos furos de saída também influencia sobre o fator F; as Figuras 12, 13 e 14 ilustram essa afirmativa. Comparou-se para 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 foi a que obteve maior fator F, sendo que a válvula mogul com geometria quadrada e válvula padrão com geometria quadrada apresentaram semelhança em termos de fator F em praticamente todas configurações, entretanto, com valor inferior a geometria pêra. É relevante citar o comportamento da válvula mogul em relação a válvula padrão: em todas as situações a mogul apresentou fator F menor em relação a padrão.

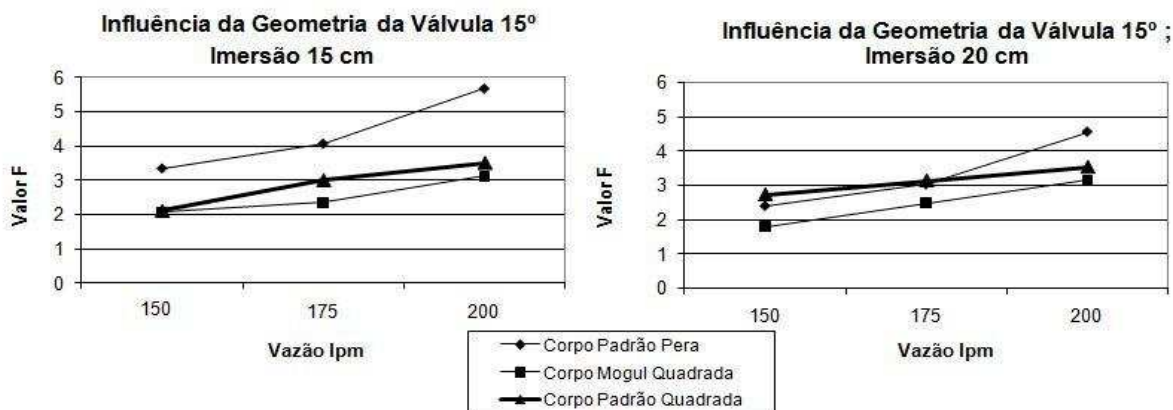


Figura 12 – Influência da geometria da válvula submersa e da vazão sobre o valor de F para duas profundidades de imersão diferentes e ângulo de saída de 15°.

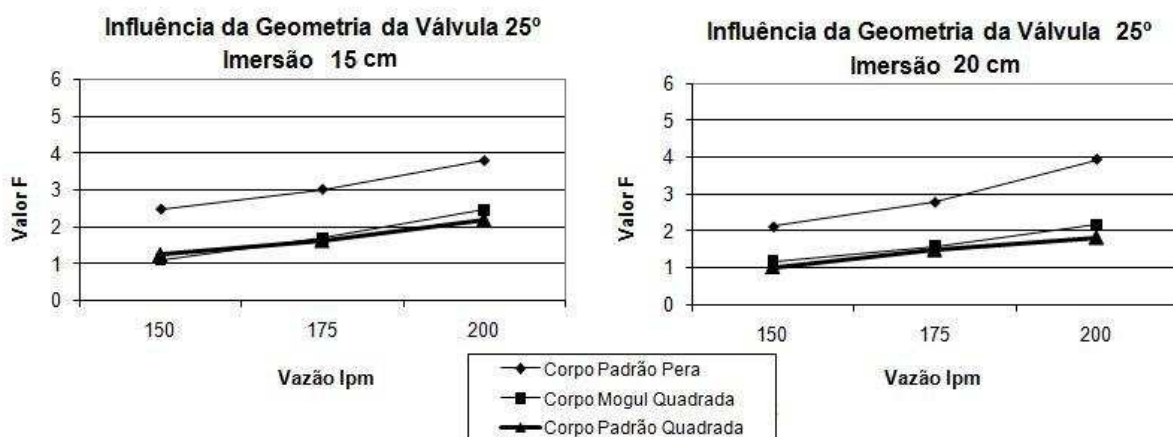


Figura 13 - Influência da geometria da válvula submersa e da vazão sobre o valor de F para duas profundidades de imersão diferentes e ângulo de saída de 25°.

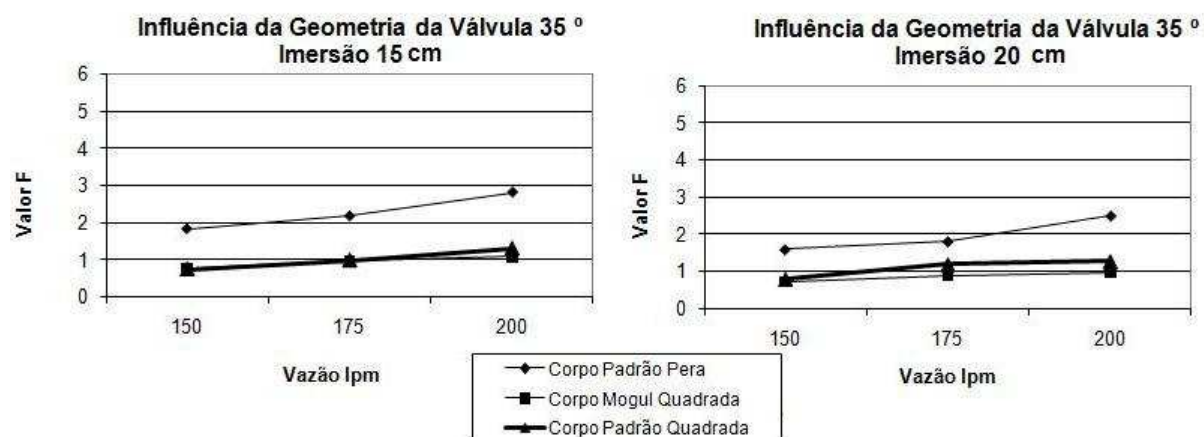


Figura 14 - Influência da geometria da válvula submersa e da vazão sobre o valor de F para duas profundidades de imersão diferentes e ângulo de saída de 35°.

A Figura 15 mostra a relação determinada, via modelagem matemática, entre o parâmetro F e a velocidade subsuperficial no modelo do molde. Para determinação destes valores a largura do molde foi variada entre 1,20 m e 1,0 m, enquanto se assumiu valores de vazão 120 lpm e 160 lpm para o molde de 1,0 m e 150 lpm e 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 graus e 35 graus. A velocidade superficial, com a qual se pretende caracterizar a



possibilidade de cisalhamento na interface metal/escória foi assumida 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, a qual pode ser comparada com aquela da Figura 3. 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 $V_{mod\ elo} = V_{industrial} \lambda^{1/2}$ 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 se tem:

NF(1) Molde com 1.6 m de largura, velocidade de lingotamento de aproximadamente 3.0 ton/min. e válvula com ângulo de 35°.

NF(2) Molde com 1.6 m de largura, velocidade de lingotamento de aproximadamente 4.0 ton/min. e válvula com ângulo de 15°.

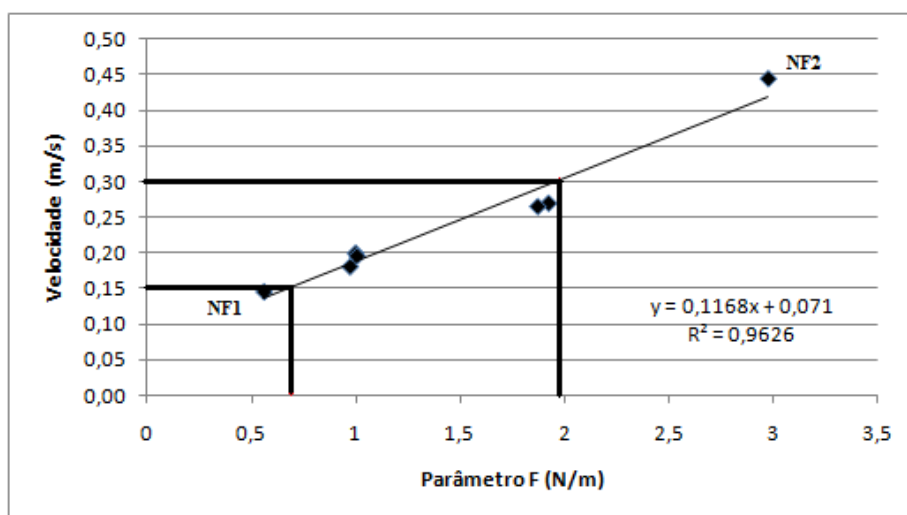


Figura 15: Relação entre a velocidade subsuperficial e o parâmetro F (para o modelo).

5 CONCLUSÃO

Dos resultados obtidos, pode-se concluir que:

O valor de F tendeu a diminuir 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 teve 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 também 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 foi o valor de F; e conseqüentemente, menor intensidade de fluxo na região do menisco.

A válvula padrão com geometria em forma de pêra foi a que obteve maior fator F, sendo que a válvula Mogul com geometria quadrada e válvula padrão com geometria quadrada apresentaram semelhança em termos de fator F em praticamente todas configurações, entretanto, com valor inferior a geometria pêra.



É relevante citar o comportamento da válvula Mogul em relação a válvula padrão: em todas as situações a Mogul apresentou fator F menor em relação a padrão. A metodologia utilizada permite avaliar os valores de F na máquina industrial e otimizar as condições operacionais de lingotamento.

Agradecimentos

CNPq, CAPES, FAPEMIG e 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, TMS online, 2006
- 2 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** - XXXI Seminário sobre Fusão, Refino e Solidificação dos Metais, da ABM, em Maio de 2000, Vitória – ES.
- 3 THOMAS; B.G.; MIKA. .L.J & NAJJAR, F.M. - **Simulation of Fluid Flow Inside a Continuous Slab Casting Machine** *Metall. Trans. B*, 21B (2) (1990), pp. 387–400.
- 4 THOMAS, B.G. - **Casting Process Simulation and Visualization: A JOM-e Perspective**,” *JOM*, 54 (1) (2002), pp. 20-21
- 5 THOMAS, B.G. - **Chapter 14. Fluid Flow in the Mold** *Making, Shaping and Treating of Steel: Continuous Casting, Vol. 5*, ed. A. Cramb (Pittsburgh, PA: AISE Steel Foundation, 2003), pp. 14.1–14.41.
- 6 THOMAS, B.G. - **Chapter 5. Modeling of Continuous Casting**” *Making, Shaping and Treating of Steel: Continuous Casting, Vol. 5*, ed. A. Cramb (Pittsburgh, PA: AISE Steel Foundation, 2003), pp. 5.1–5.24.
- 7 THOMAS, B. G; YUAN, Q, Y; ZHAO, B & VANKA, S. P - **Transient Fluid-Flow Phenomena in the Continuous Steel-Slab Casting Mold and Defect Formation** - – JOM, TMS online, 2006
- 8 THOMAS, B.G. **Modeling of Continuous-Casting Defects Related to Mold Fluid Flow** - *Iron and Steel Technology (AIST Transactions)*, 3 (7) (2006), pp. 128–143.
- 9 KUBOTA, J; HUBO, N; ISII, T; SUZUKI, M, ARANAKI, N & NISHIMCHI, R, **Meniscus Flow Control In The Mold By Travelling Magnetic Field For High Speed Slab Caster, Mold Operation For Quality And Productivity**, Ed. A.W. Cramb And E. Szekeres (Warrendale, Pa: Iron And Steel Society, 1991).
- 10 KOLLBERG, S; LOFGREN, P & LEHMAN, A - **Improving quality and productivity in thick slab casting by direct control of electromagnetic brake (EMBR)**. In *Proceedings of the Int. Conf. AISE* (Pittsburgh, USA, 2003), pp. 1–8.
- 11 THOMAS, B.G. & L. ZHANG - **Review: Mathematical Modeling of Fluid Flow in Continuous Casting**, *ISIJ International.*, 41 (10) (2001), pp. 1181–1193.