



OTIMIZAÇÃO DA DISTRIBUIÇÃO DE FLUXOS DO AÇO LÍQUIDO NA REGIÃO DO MENISCO DO MOLDE DE PLACAS DE UMA MÁQUINA DE LINGOTAMENTO CONTÍNUO¹

Ely da Silva Araujo Júnior²

Carlos Antônio da Silva³

Itavahn Alves da Silva⁴

Luiza Pessoa Moreira⁵

Luiz Flávio Pereira da Costa⁵

Varadarajan Seshadri⁶

Resumo

Neste trabalho são investigados os efeitos de velocidade de lingotamento; geometria, profundidade de imersão e inclinação das portas de saída da SEN sobre a estabilidade do fluxo de aço, formação de vórtices e emulsificação metal-escória de molde na região do menisco. Deste modo, os efeitos destes parâmetros operacionais sobre o comportamento fluidodinâmico e instabilidade da interface metal-escória, na região do menisco, são discutidos e demonstrados via modelagem física e matemática. Através da aplicação da técnica de PIV (*Particle Image Velocimetry*), no modelo físico do molde, as características do fluxo na região das portas da SEN e da região do menisco foram mapeadas, servindo para a validação dos resultados obtidos pelo modelo matemático CFD (*Computational Fluid Dynamic*).

Palavras-chave: Molde; Menisco; Vórtice; Inclusões não-metálicas.

OPTIMIZATION OF DISTRIBUTION OF LIQUID STEEL FLOW AT MENISCUS REGION IN THE MOLD OF A SLAB CONTINUOUS CASTING MACHINE

Abstract

This work investigated the effect of casting speed, geometry, immersion depth and inclination of the ports of SEN on vortex formation and metal-slag emulsification in the meniscus region. Thus, the effects of these parameters on the fluid dynamic behavior and instability of the slag-metal interface at the meniscus in the region are discussed and demonstrated by physical and mathematical modeling. By applying the PIV (*Particle Image Velocimetry*) technique the flow characteristics of the region nearby the SEN ports and meniscus regions have been mapped in order to validate the results obtained by the mathematical model CFD (*Computational Fluid Dynamics*).

Key words: Mould; Meniscus; Vortex; Non-metallic inclusions.

¹ Contribuição técnica ao 42º Seminário de Aciaria – Internacional, 15 a 18 de maio de 2011, Salvador, BA, Brasil.

² Engenheiro Metalúrgico Engenheiro de Processo, Votorantim Siderurgia/Resende. Mestrando da REDEMAT/UFOP

³ MSc, PhD, Professor, Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Escola de Minas, UFOP

⁴ MSc, DSc. Professor, Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Escola de Minas, UFOP

⁵ Aluno de graduação do Curso de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Escola de Minas, UFOP

⁶ Dr. Ing. Professor Emérito do Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, UFMG



1 INTRODUÇÃO

No processo de lingotamento contínuo do aço, a qualidade interna e superficial do produto final é substancialmente influenciada pela distribuição de fluxos no molde, particularmente na região do menisco, a qual é determinada especialmente pelas dimensões e formato do molde; profundidade de imersão, diâmetro interno, formato, ângulo de inclinação e número de portas da SEN; velocidade de lingotamento (Figura 1). Outros parâmetros, tais como: sistema de controle de fluxo; entupimento e desalinhamento da SEN, aplicação de forças eletromagnéticas e injeção de gás inerte pela SEN, também afetam o campo de velocidades na região do menisco.

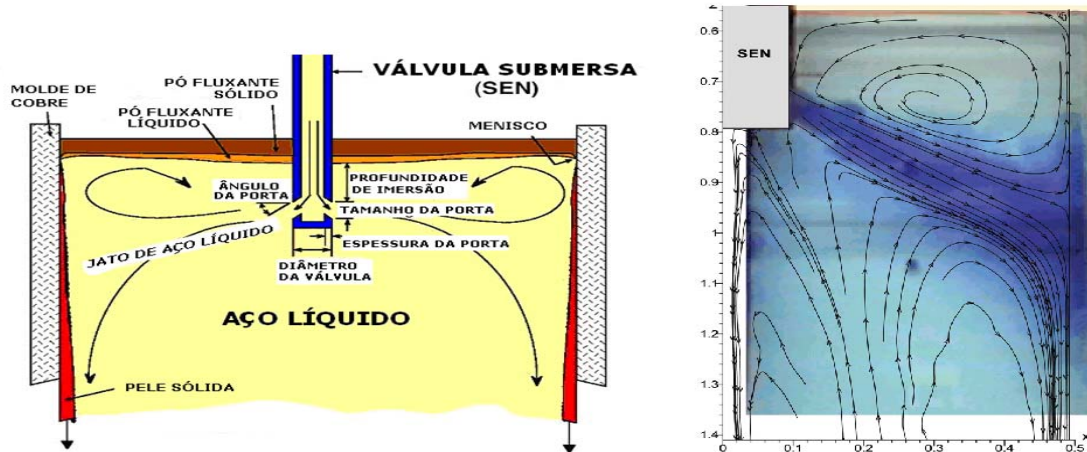


Figura 1 – Distribuição de fluxos na região do molde de LC.⁽¹⁾

As instabilidades superficiais criadas na região do menisco (Figura 2), podem causar o entranhamento de escória e fluxante na poça de aço; reoxidação da poça de aço e aprisionamento de bolhas de argônio e de inclusões não-metálicas, além de produzir um comportamento instável na dissipação do superaquecimento e na fusão da escória de molde.

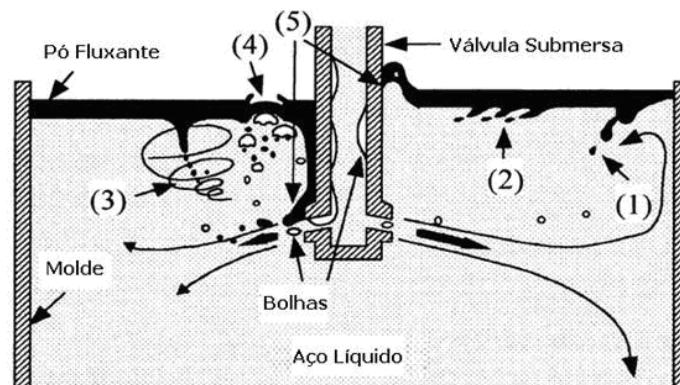


Figura 2 - Mecanismos de arraste em molde de placas: 1- Arraste causado pelo escoamento reverso vindo da face estreita (estacionário) – Instabilidade de *Taylor-Saffman*; 2- Arraste causado pela velocidade superficial (cisalhamento) vindo da face estreita do molde (fenômeno transiente) – Instabilidade de *Kelvin-Helmoltz*; 3- Arraste causado pela formação de vórtices de *Karman*, junto a válvula submersa; 4- Arraste causado pelo rompimento de bolhas de argônio na interface entre o aço e a escória; 5- Arraste causado pela diferença de pressão induzida na direção longitudinal ao longo da válvula submersa.⁽²⁾



Especialmente, sob condições de altas velocidades de lingotamento, o estado de turbulência nas imediações do menisco pode causar a formação de vórtices e arraste de fluxantes do molde e de bolhas de argônio para a poça de aço, bem como o aprisionamento de inclusões não-metálicas e de bolhas na pele solidificada, conforme evidenciado na Figura 3, gerando defeitos do tipo blister e slivers.

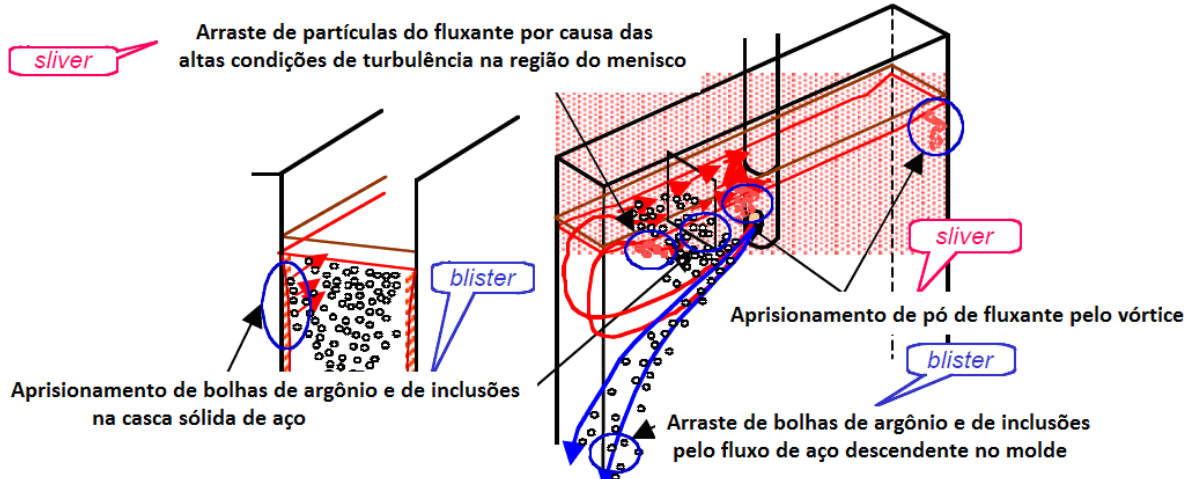


Figura 3 – Fenômenos ocorrentes no molde na máquina de LC.⁽³⁾

Assim, é essencial o controle da velocidade do jato de aço nas imediações da *SEN* de modo a reduzir ou minimizar a frequência de defeitos. No entanto, é necessário manter o suprimento de calor na região do menisco de modo a manter a operação de lingotamento estável, garantindo fusão do fluxante, logo, a preservação de sua capacidade lubrificante das paredes do molde. Mudanças na forma, ângulo, área da saída e profundidade de imersão da *SEN*, além da vazão de aço entrante no molde podem ser provocadas com vista no controle da distribuição de fluxos na região do menisco e da *SEN*.

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 MATERIAIS E MÉTODOS

Para a realização dos ensaios utilizou-se um modelo em escala reduzida de um molde de lingotamento de placas, construído em acrílico e dois tipos de válvulas submersas (Figura 4). 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. As condições operacionais de condução dos experimentos estão apresentadas na Tabela 1.

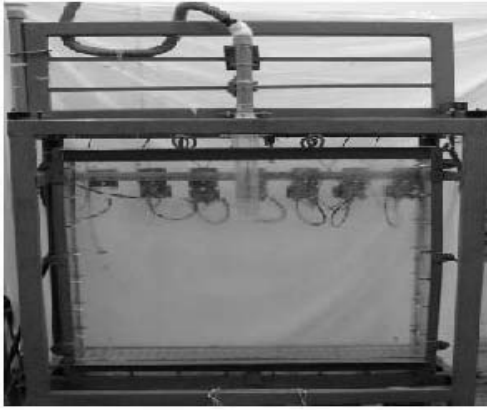


Figura 4 - a) Vista da montagem experimental do molde; b) Geometrias de corpos e portas de válvulas submersas, feitas em acrílico.

Tabela 1 – Parâmetros considerados no estudo

Largura do molde	1,0 e 1,2 m;
Espessura do molde	0,20 m
Profundidade de imersão da válvula submersa	0,15 e 0,20 m
Vazão de líquido: para as placas de 1,2m	150, 175 e 200 lpm
Vazão de líquido: para as placas de 1,0m	121, 141 e 161 lpm
Tipo de válvula	Padrão e Mogul
Geometria da porta de saída da válvula padrão	Quadrada e de pêra
Geometria da porta de saída da Mogul	Quadrada
Ângulo de saída da válvula submersa	15, 25 e 35°

A literatura^(4,5) tem apresentado técnicas de para a inspeção do campo de velocidades do aço na região do molde. Para a condução dos experimentos, utilizou-se a técnica de visualização do fluxo na cavidade do molde via plano de laser (Figura 5) para determinação do parâmetro F (Figura 6), e simulação numérica via CFX; avaliação das condições de emulsificação superficial devido ao efeito das forças de cisalhamento na interface metal/escória e avaliação de velocidade subsuperficial de menisco através de velocimetria PIV (*Particle Image Velocimetry*), para validação do modelo matemático.

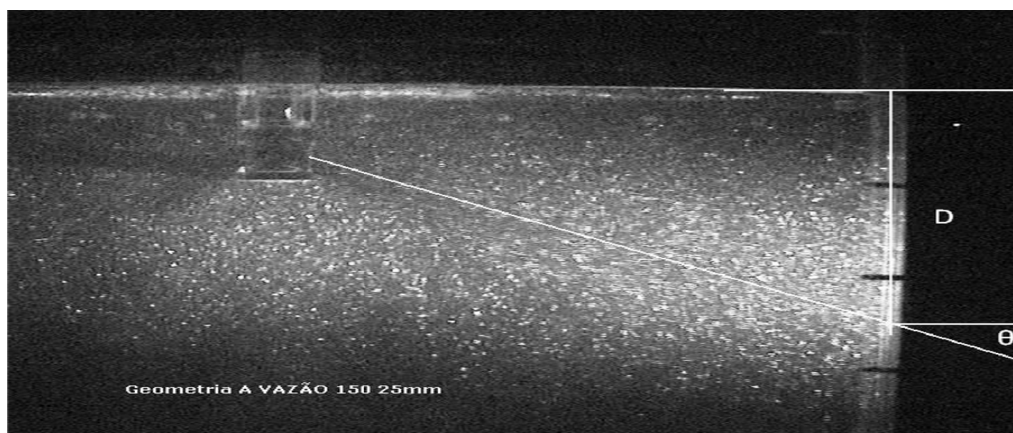


Figura 5 - Determinação dos parâmetros θ e D através da técnica de visualização por plano de laser.

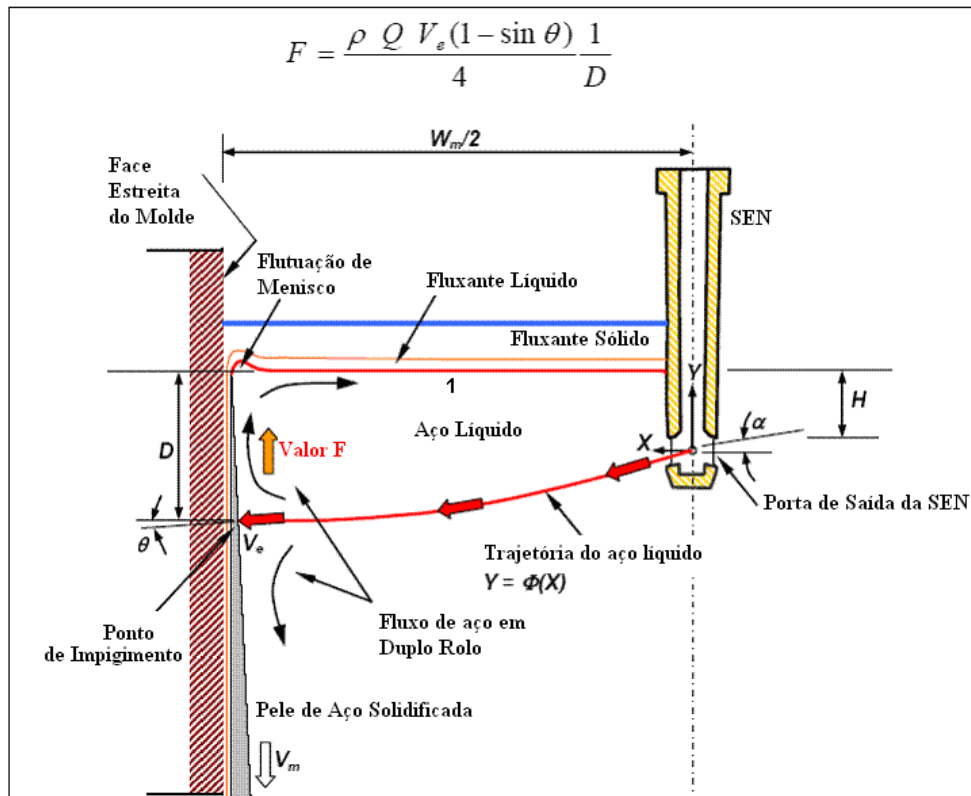


Figura 6 - Cálculo do valor de F (N/m); ρ – massa específica do líquido. (kg/m^3) ; Q – Vazão de entrada do líquido. (m^3/s) ; V – Velocidade no ponto de impacto junto a face estreita. (m/s) ; D – Distância do ponto de impingimento (ponto de impacto na face estreita do molde) ao Menisco. (m) ; θ – Ângulo entre o Vetor Velocidade e o plano horizontal no ponto de impingimento.

Como o termo $\rho Q V_e$ representa força devida à convecção do fluido, ou de inércia, o parâmetro F pode ser tomado como uma medida da intensidade segundo a qual esta força se encontra dirigida contra a superfície. Neste trabalho a velocidade V_e não foi determinada diretamente; optou-se por utilizar a velocidade média de líquido na saída das portas da SEN, isto é, a vazão de líquido dividida pela área das portas de descarga.

A velocidade subsuperficial foi determinada via modelagem matemática utilizando-se o software CFX, tendo sido seu valor medido no ponto (1) (Figura 6). De acordo com a Figura 7 existe boa concordância entre valores medidos de velocidade subsuperficial determinada via CFX e via PIV, de modo que a primeira foi utilizada no restante deste trabalho. A figura também mostra, como esperado, que maiores velocidades de lingotamento implicam em maiores velocidades do aço na região do menisco.

Foram também utilizados óleos de silicone, tingidos, de diferentes viscosidades (50 cst e 200 cst) para a simulação do fluxante do molde, com o propósito de correlacionar a tendência de emulsificação com a velocidade de lingotamento, à geometria do sistema e a velocidade subsuperficial. Nestes experimentos, para cada combinação geométrica de válvula e molde, a vazão de fluido foi gradativamente aumentada até que se observasse um valor crítico de vazão, para o qual o entranhamento de óleo tivesse início.

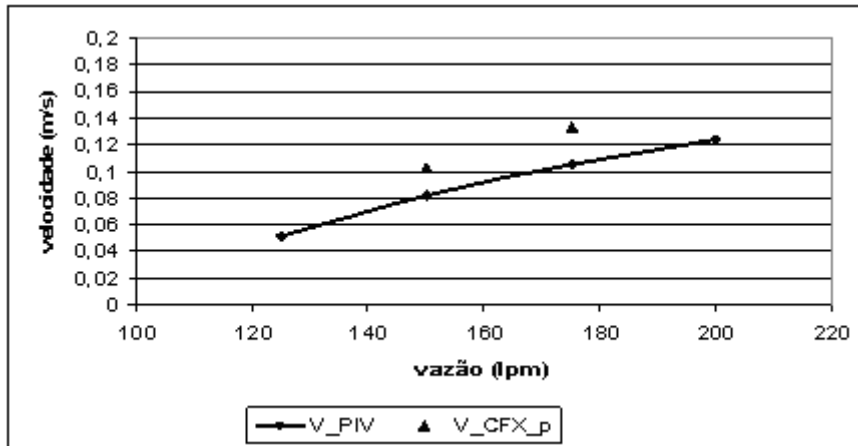


Figura 7 - Velocidades previstas via CFX e medidas via PIV ; V_PIV valor médio via PIV em uma janela 2cm x 2 cm ao redor do ponto de medição; V_CFX_p valor previsto via CFX no ponto de medição

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Em geral se procura dirigir o jato de aço sainte das portas da SEM através do controle da geometria da porta, especificamente do ângulo de saída da mesma. Admite-se também que não existiria correlação perfeita entre ângulo de porta e ângulo de jato, em função da inércia do líquido, fortemente dirigida para baixo. Este aspecto é ilustrado na Figura 8, onde se nota que o ângulo da porta representa o fator principal, mas o ângulo de jato e ângulo da porta não podem ser tomados como sendo iguais.

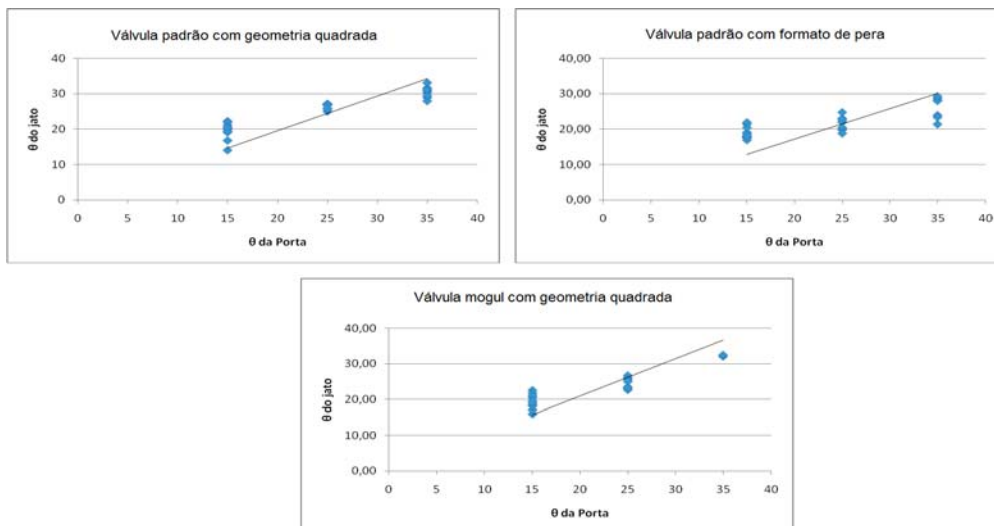


Figura 8 - Relação entre o ângulo da porta da SEN e o ângulo de impacto do jato para tipos diferentes de válvula submersa.

Os parâmetros de regressão (stepwise, MINITAB) relacionado ângulo de jato e ângulo de porta são apresentados na Tabela 2.



Tabela 2 – Regressões de θ em função das variáveis operacionais

Válvula/Geometria	Vazão (lpm)			Largura (m)			Imersão (cm)			Ângulo de Saída		r^2	
	Coef	t	p	Coef	t	p	Coef	t	p	Coef	t		p
Mogul/Quadrada	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,639	18,47	0	90,94
Padrão/Quadrada	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,541	13,51	0	84,3
Padrão/Pêra	-	-	-	-13,2	-4,17	0	-	-	-	0,34	8,76	0	74,05

A Figura 9 mostra o efeito da velocidade de lingotamento sobre o valor de F, reforçando o princípio que para todos os casos investigados, o aumento da velocidade de lingotamento, maior o valor de F. Como se nota a dispersão parece significativa, o que pode ser creditado à influência de outras variáveis de processo, como mostrado na Tabela 3. De acordo com a tabela os parâmetros principais seriam vazão e ângulo de porta.

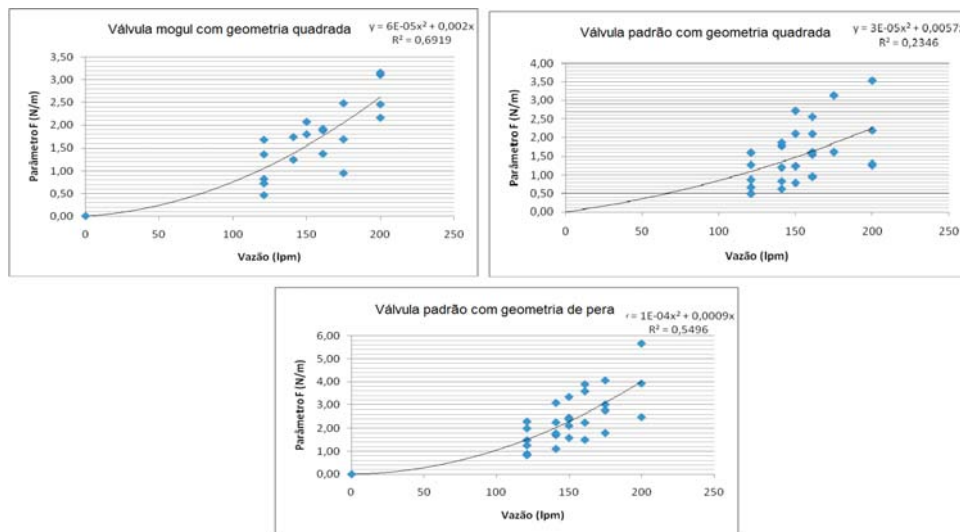


Figura 9 - Valor de F versus vazão de líquido para tipos diferentes de válvulas submersas.

Uma condição não recomendável de velocidade subsuperficial se encontra nos casos em que a mesma excede um valor crítico, acima do qual existe cisalhamento na interface metal-escória. Por outro lado existiria também um valor crítico, abaixo do qual a fusão do fluxante pode ser prejudicada, levando a problemas de lubrificação. Neste caso em particular, as velocidades estariam abaixo do valor mínimo, que seria característico de aporte térmico adequado ao pó fluxante, o qual garante lubrificação apropriada.

Tabela 3: regressões em F em função de parâmetros operacionais

Regressão em F													
Válvula/Geom	Vazão (lpm)			Largura (m)			Imersão (cm)			Ângulo de Saída		r^2	
	Coef	t	p	Coef	t	p	Coef	t	p	Coef	t		p
Mogul/Quad	0,0155	11,1	0	-	-	-	-	-	-	-0,0663	-15,38	0	91,59
Padrão/Quad	0,0165	8,38	0	-	-	-	-	-	-	-0,078	-12,86	0	87,71
Padrão/Pera	0,0302	14,1	0	-	-	-	-0,072	-3,36	0,002	-0,0864	-13,16	0	92,32

Uma condição não recomendável de velocidades excessivas na região do menisco seria aquela provém da ocorrência de cisalhamento seguido de emulsificação metal-escória. Neste caso em particular, as velocidades estariam abaixo do valor mínimo,



que seria característico de aporte térmico adequado ao pó fluxante, o qual garante lubrificação apropriada.

A Figura 10 mostra a relação entre o parâmetro F calculado pelo modelo físico e a velocidade subsuperficial obtida via modelo matemático. Considerou-se a largura do molde entre 1,20 m e 1,0 m e vazões entre 120 lpm e 160 lpm para o molde de 1,0 m e 150 lpm a 200 lpm para o molde de 1,20 m de largura. De acordo com a literatura a faixa pretendida de velocidade subsuperficial na máquina industrial seria de 0,2 m/s a 0,4 m/s. Considerando a validade da relação $V_{\text{modelo}} = V_{\text{industrial}} \lambda^{1/2}$, esta

faixa, no modelo, seria de 0,15 m/s a 0,30 m/s. Os pontos identificados em destaque nesta figura sugerem condições operacionais que se situam fora da faixa desejável de velocidade, o que poderia redundar em eventos de qualidade. Seriam estes:

Válvula padrão com porta de saída quadrada: o ponto (1) representa uma situação não recomendável, referente a molde com 1,6 de Largura (1,0m no modelo), Válvula Padrão, geometria de saída Quadrada, ângulo da porta de 15°, Imersão de 0,35 m (0,20 m no modelo) e velocidade de lingotamento de aproximadamente 4 ton/min (161 lpm no modelo).

Válvula padrão com porta de saída na forma de pêra: industrial como sendo: o ponto (1) representa molde com 1,6 m de Largura (1,0 m no modelo), Válvula Padrão, geometria de saída pêra, ângulo da porta de 15°, Imersão de 0,35 m (0,20 m no modelo), velocidade de lingotamento de aproximadamente 3,5 ton/min (141 lpm no modelo); o ponto (2) indica molde com 1,6m de Largura (1,0 m no modelo), Válvula Padrão, geometria de saída pêra, ângulo da porta de 15°, Imersão de 0,35 m (0,20 m no modelo), velocidade de lingotamento de aproximadamente 4 ton/min (161 lpm no modelo); o ponto (3) molde com 1,6 de Largura (1,0 m no modelo), Válvula Padrão, geometria de saída pêra, ângulo da porta de 15°, Imersão de 0,25 m (0,15 m no modelo), velocidade de lingotamento de aproximadamente 4 ton/min (161 lpm no modelo); enquanto que o ponto (4) denota molde com 2,0 m de Largura (1,2 m no modelo), Válvula Padrão, geometria de saída pêra, ângulo da porta de 15°, Imersão de 0,25 m (0,15 m no modelo), velocidade de lingotamento de aproximadamente 3,8 ton/min (150 lpm no modelo).

Finalmente, para válvula mogul com porta de saída quadrada, o ponto (1) indica molde com 2,0 m de Largura (1,2 m no modelo), Válvula Mogul, geometria de saída quadrada, ângulo da porta de 25°, Imersão de 0,25 m (0,15 m no modelo), velocidade de lingotamento de aproximadamente 5 ton/min (200 lpm), enquanto que o ponto (2) identifica molde com 1,6 m de Largura (1,0 m no modelo), Válvula Mogul, geometria de saída quadrada, ângulo da porta de 35°, Imersão de 0,35 m (0,20 m no modelo), velocidade de lingotamento de aproximadamente 3 ton/min (121 lpm no modelo).

Em todos os outros casos anteriores, a situação em destaque não seria recomendável em função de velocidades excessivas no menisco, as quais poderiam levar ao cisalhamento seguido de emulsificação. Neste último caso em particular (ponto 1, válvula mogul com saída de porta quadrada) as velocidades estariam abaixo do valor mínimo, o que seria característico de aporte térmico inadequado ao pó fluxante, redundando em lubrificação ineficiente.

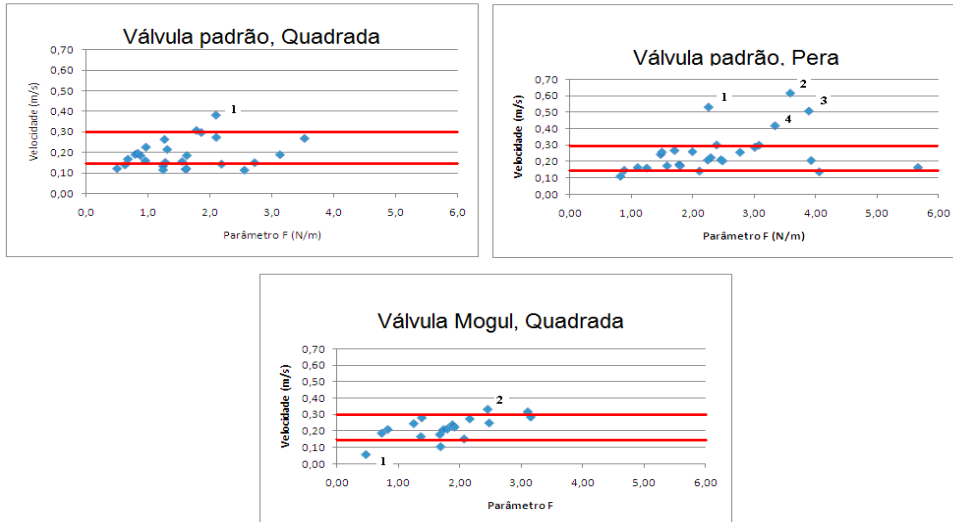


Figura 9 - Relação entre a velocidade subsuperficial e o parâmetro F (para o modelo), para os tipos de válvulas estudados.

As Figuras 11, 12 e 13 mostram os efeitos geometria, profundidade de imersão e ângulo das portas da válvula submersa sobre a velocidade crítica de lingotamento, a partir da qual se observa emulsificação na região do menisco por cisalhamento. Para o caso da válvula padrão com geometria Pera, a emulsificação ocorreu para velocidades de lingotamento menores em comparação com as demais configurações, devido ao maior estado de turbulência gerado na região do menisco. Fica evidenciado que quanto maior o ângulo da porta de saída da válvula é necessário uma maior vazão para que ocorra desprendimento por cisalhamento da camada metal/escória.

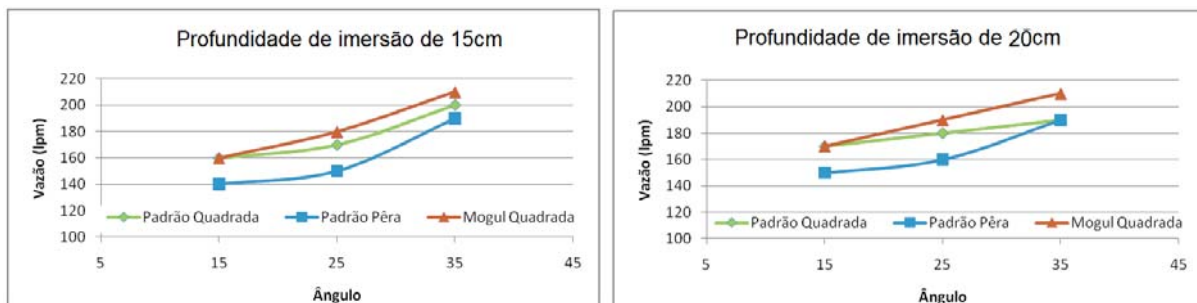


Figura 101 - Influência da geometria da válvula e do ângulo sobre a geração de emulsificação por cisalhamento da interface metal/escória e diferentes profundidades de imersão da SEN. Óleo de Silicone de 200 cSt, Espessura da camada de óleo de 3 cm, molde com 1,0 m.

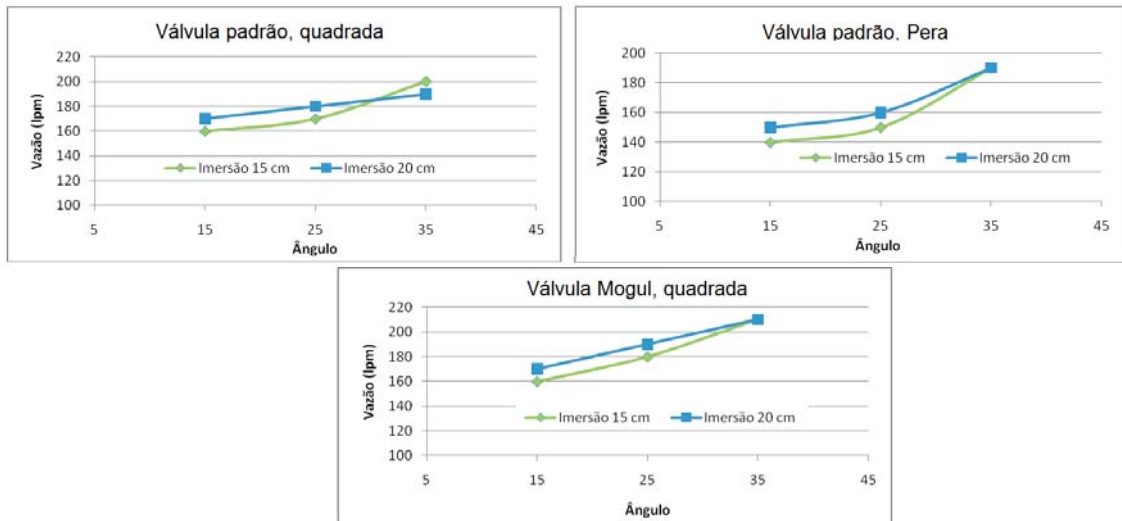


Figura 112 - Influência da imersão sobre a geração de emulsificação por cisalhamento da interface metal/escória. Óleo de Silicone de 200 cSt; espessura da camada de óleo de 3 cm e molde com 1,0 m. Válvula padrão com geometria quadrada.

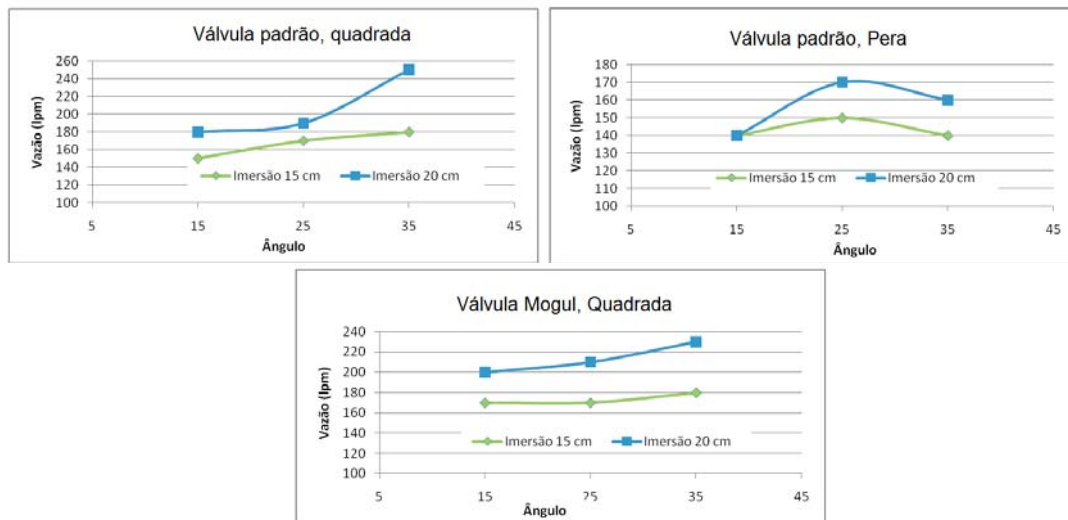


Figura 123 - Influência da imersão sobre a geração de emulsificação por cisalhamento da interface metal/escória. Óleo de Silicone de 50 cSt, Espessura da camada de óleo de 1 cm e molde com 1,2 m.

5 CONCLUSÕES

Para as condições investigadas, as seguintes conclusões puderam ser obtidas: Maiores profundidades de imersão da válvula tendem a diminuir o valor de F , uma vez que implicam em menores níveis de turbulência na região do menisco. Para válvula padrão com geometria de saída quadrada, a imersão praticamente não influenciou o valor F .

Maiores ângulos de saída da SEN resultaram em menores valores de F .

Para uma dada profundidade de imersão e ângulo da porta de saída, a válvula Padrão com porta de saída em forma de Pera produziu maior valor de F . Enquanto que a válvula Mogul com porta de saída quadrada e válvula Padrão com porta de saída quadrada apresentaram valores de F semelhantes, em praticamente todas as configurações, entretanto, com valor inferior ao relativo à válvula com formato de pera.



O aumento gradativo da velocidade de lingotamento causa a emulsificação da camada de escória. No caso da válvula padrão com geometria de pera, a emulsificação ocorreu para velocidades de lingotamento menores que das demais válvulas, devido ao maior estado de turbulência gerado na região do menisco.

Para todas as condições investigadas, a válvula Mogul apresentou o menor valor de F em relação à válvula padrão.

A metodologia utilizada permite avaliar os valores de F na máquina industrial e otimizar as condições operacionais de lingotamento e, por consequência, o controle do nível de limpidez do produto lingotado continuamente.

Agradecimentos

CNPq, CAPES, FAPEMIG e ArcelorMittal Tubarão pelo auxílio financeiro

REFERÊNCIAS

- 1 THOMAS, B. G - Modeling of Continuous Casting Defects Related to Mold Fluid Flow – AIST Transactions, vol. 35, No. 5, 1-37
- 2 YAMASHITA, S & IGUCHI, M - Mechanism of Mold Powder Entrapment Caused by Large Argon Bubble in Continuous Casting Mold - ISIJ International, Vol. 41 (2001), No. 12, pp. 1529–1531
- 3 TAKEUCHI, S. KUBOTA, J. MIKI, Y; OKUDA, H & . SHIRAYAMA, A -Change and Recent Trend of Molten Steel Flow Control Technology in a Continuous Casting Mold by Electromagnetic Force - Proceedings of the Electromagnetic Processing of Materials International Conference
- 4 ARAÚJO JÚNIOR, E. S; GASPARIN, 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.
- 5 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.