

ESTUDO DO ESCOAMENTO BIFÁSICO, METAL-PÓ FLUXANTE, EM UM MOLDE DE LINGOTAMENTO CONTÍNUO DE PLACAS¹

*Carlos Eduardo Passagli Barral*²

*Thiago Augusto Ávila*³

*Thiago Dutra de Souza*⁴

*Roberto Parreiras Tavares*⁵

Resumo

O presente trabalho apresenta o estudo realizado utilizando técnicas de modelamento para a avaliação do escoamento no interior de um molde de lingotamento contínuo de placas. O conhecimento desse escoamento é essencial para obter máxima produtividade e qualidade no processo. O modelo físico utilizado conta com um sistema de automação que facilita o controle e supervisão do processo permitindo um controle refinado das variáveis de interesse. A energia cinética do aço em movimento é uma das principais responsáveis pela emulsificação do pó fluxante no seio do metal; portanto, o conhecimento da velocidade na região próxima ao menisco possibilita a análise deste fenômeno. Foi utilizado um programa de modelamento matemático do tipo CFD para a obtenção de um mapa de velocidade nesta região. Estes resultados foram comparados aos obtidos no modelo físico por técnicas de visualização de escoamento. Para completar o entendimento do fenômeno de emulsificação no molde, foram utilizadas técnicas de visualização de escoamento no modelo físico utilizando óleo de silicone para simular a fase pó fluxante no reator. As variáveis observadas neste estudo foram a geometria das portas de saída da válvula submersa e a penetração da válvula submersa no reator.

Palavras-chave: Lingotamento contínuo; Modelamento físico; Modelamento matemático; Pó fluxante.

STUDY OF TWO PHASE FLUID FLOW, STEEL-MOLD FLUX, IN A CONTINUOUS SLAB

Abstract

Fluid flow in the continuous casting mold is very important, since it affects productivity and quality of the steel. In the present work, fluid flow in a continuous slab caster mold has been studied using physical and mathematical models. Two-phase flow, steel-mold flux, has also been investigated using physical modeling. The effects of the configuration of the submerged entry nozzle (SEN) and of the casting parameters on the emulsification degree and on the shape of the mould flux layer have been determined. The penetration and the angle of the ports of the submerged nozzle play a significant role in the emulsification degree and can have an important impact on the quality of the steel being cast.

Key words: Continuous casting; Physical modeling; Mathematical modeling; Two phase flow.

¹ Trabalho apresentado no XXXVII Seminário de Aciaria - Internacional, 21 a 24 de maio de 2006, Porto Alegre, RS

² Sócio da ABM, Engenheiro Metalurgista, Aluno de Mestrado do Curso de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas da UFMG

³ Aluno do Curso de Graduação em Engenharia Metalúrgica da UFMG

⁴ Aluno do Curso de Graduação em Engenharia de Controle e Automação da UFMG

⁵ Sócio da ABM, Professor Adjunto do Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais da EEUFMG.

1 INTRODUÇÃO

O lingotamento contínuo é atualmente a forma mais utilizada para conformar o aço por meio de solidificação. Para manter a competitividade frente aos novos materiais, é necessária uma melhoria da qualidade e a minimização do custo de fabricação do aço. Uma das formas de melhorar a qualidade é, a partir do controle do escoamento nos reatores de lingotamento contínuo, obter uma maior limpidez do metal produzido. Para diminuir custos deve-se otimizar a produtividade, utilizando os parâmetros de controle de forma a se produzir uma máxima quantidade no menor tempo, sem prejuízos para a qualidade. Utilizando ferramentas de estudo de escoamento como modelamento físico, é possível avaliar o efeito de parâmetros operacionais na qualidade da placa produzida.

Um dos critérios de qualidade mais importantes na fabricação do aço é a limpidez do mesmo. Entende-se por limpidez a ausência de inclusões não metálicas na placa ou tarugo produzidos. No lingotamento contínuo de placas é usual a utilização de pó fluxante no molde. O pó fluxante é uma escória sintética que tem como principal objetivo a lubrificação do molde, evitando a aderência do aço no momento da solidificação. Além de funcionar como lubrificante, o pó fluxante ainda funciona como isolante térmico, reduzindo a perda de calor do aço para o ar. O pó fluxante serve ainda para prevenir a reoxidação do aço, controlar a transferência de calor e absorver inclusões não metálicas, aumentando a limpidez do aço. Porém, uma escolha errada dos parâmetros de lingotamento pode favorecer a emulsificação do pó fluxante, gerando inclusões não metálicas, prejudicando bastante a qualidade do aço.

O escoamento do aço no interior do molde tem grande influência sobre o comportamento do pó fluxante neste reator, logo, para uma escolha adequada dos parâmetros de lingotamento, é importante o conhecimento do perfil de escoamento. Duas importantes ferramentas técnicas para o estudo do escoamento em reatores são o modelamento físico e o modelamento matemático. Utilizando modelamento matemático é possível visualizar os vetores de velocidade do aço no interior do reator. Neste trabalho o software CFX foi utilizado com o objetivo de permitir uma melhor visualização do escoamento monofásico do aço. Todo modelamento matemático necessita de uma validação, seja por dados industriais ou por modelamento físico. Neste caso a validação foi feita por modelamento físico, utilizando técnicas de visualização de escoamento. O modelamento físico foi utilizado ainda para a visualização do escoamento bifásico metal-pó fluxante no molde. Este tipo de escoamento seria bem mais complexo de ser analisado através de modelamento matemático.

Existem várias geometrias possíveis para válvulas submersas, variando a espessura da parede, o número de portas e a inclinação das mesmas. A geometria da válvula submersa tem grande influência sobre o escoamento do aço no interior do molde⁽¹⁾. Considerando a influência do escoamento do aço sobre o comportamento do pó fluxante, foram avaliadas três geometrias de válvula submersa neste trabalho, variando a inclinação das portas de saída da mesma. Foi avaliada também a influência da penetração desta válvula no banho.

2 METODOLOGIA

O estudo foi realizado em duas partes distintas. Na primeira parte foi utilizado modelamento matemático para caracterizar o fluxo do aço no interior do molde de lingotamento contínuo. A segunda parte foi realizada utilizando modelamento físico. A seguir cada uma das etapas é detalhada.

2.1 Modelamento Matemático

Os modelos numéricos para a solução de problemas envolvendo mecânica dos fluidos devem descrever os aspectos mais importantes da física do problema real. escoamentos de fluidos são regidos pelas equações de conservação de massa e quantidade de movimento (Navier-Stokes), mas a extrema complexidade destas equações impossibilita, até mesmo para casos simples, a obtenção de uma solução com os recursos computacionais atualmente disponíveis, se uma simulação considerando todas as escalas espaciais e temporais (transientes) for desejada⁽²⁾. Para modelar estes escoamentos são utilizados modelos aproximados, tais como as equações de Navier-Stokes com valores médios no tempo, conhecidas como *Reynolds Averaged Navier-Stokes Equations* (RANS). Esta abordagem viabiliza a solução de escoamentos turbulentos com os recursos computacionais atualmente disponíveis e é a mais utilizada em problemas industriais. Tomando-se a média das equações de Navier-Stokes surgem novos termos, conhecido por tensões de Reynolds, que carregam as características turbulentas e transientes do escoamento. Uma das metodologias mais usuais consiste em modelar estes termos a partir das variáveis k (energia cinética de turbulência) e ε (taxa de dissipação da energia cinética de turbulência).

Utilizando o software comercial CFX foi calculado o perfil de velocidades no molde de lingotamento de placas com geometria equivalente à existente no modelo físico a frio localizado no Laboratório de Simulação de Processos da UFMG. A malha de volumes finitos foi definida de forma a garantir sua independência. A independência da malha é obtida quando se alcança uma condição na qual um maior refinamento deixa de exercer influência nos resultados. As condições de contorno utilizadas envolveram o fornecimento da vazão de massa na entrada e a consideração de não escorregamento nas paredes. A superfície livre foi considerada plana e sem fricção.

Para a solução das variáveis de turbulência, k e ε , foi utilizado o modelo de turbulência k - ε padrão.

2.2- Modelamento Físico

Utilizando técnicas de visualização de escoamento no modelo físico de um equipamento de lingotamento contínuo, foram feitas análises do perfil de velocidade do fluido, do perfil da interface metal-pó fluxante em escoamento bifásico, do grau de emulsificação e do tamanho médio de partículas emulsificadas no molde.

O modelo físico utilizado está localizado no Laboratório de Simulação de Processos do Departamento de Engenharia Metalúrgica da UFMG. Este modelo

foi construído em acrílico cristal em escala de 1:3 em relação a um equipamento industrial. O critério de similaridade de Froude⁽³⁾ foi usado para estabelecer as vazões de água empregadas. A Figura 1 mostra esquematicamente as variáveis estudadas neste trabalho. As dimensões das válvulas submersas utilizadas são mostradas na Figura 2. A Tabela 1 mostra a equivalência entre os parâmetros de ensaio no modelo físico e os do equipamento industrial.

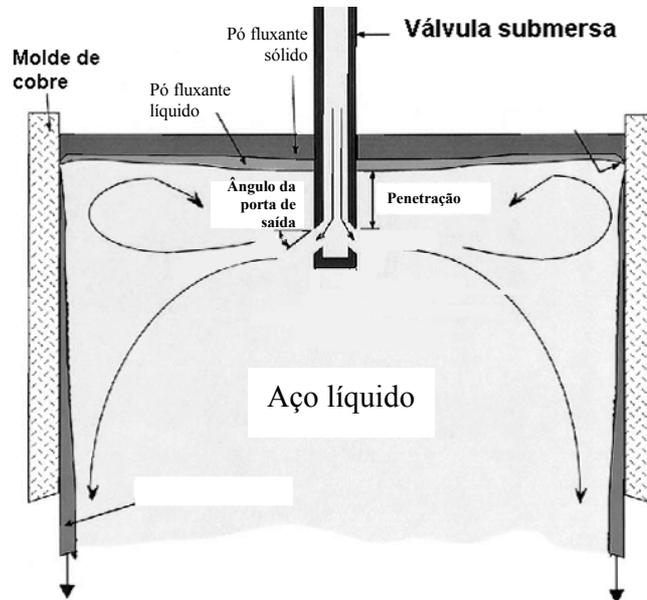


Figura 1. Diagrama esquemático mostrando a penetração e o ângulo da porta de saída da válvula submersa⁽⁴⁾

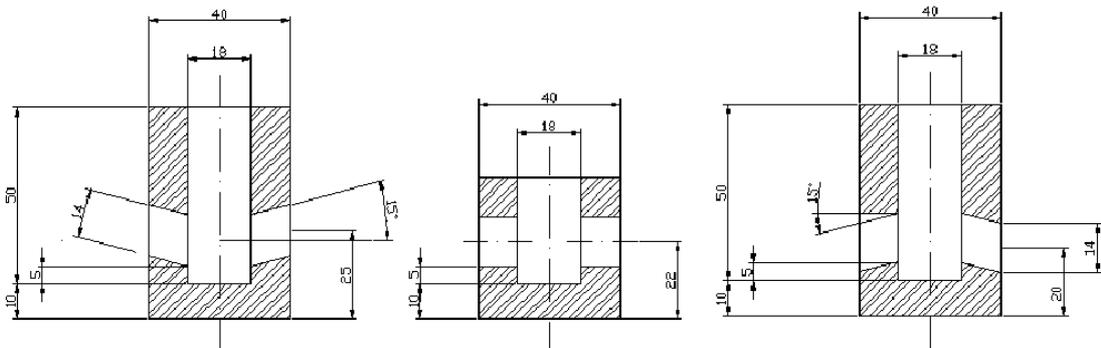


Figura 2. Desenho técnico mostrando as dimensões das ponteiros utilizadas.

Tabela 1. Equivalência entre parâmetros de ensaio no modelo físico e no equipamento industrial

Vazão de água (l/min)	Vazão de aço (toneladas/hora)
20	135
25	170
Penetração da válvula (cm)	Penetração da válvula (cm)
2	6
3	9

2.2.1 Perfil de velocidades

O perfil de velocidades do fluido (água simulando aço) no molde foi avaliado utilizando imagens quadro a quadro de uma filmagem do molde, com um intervalo de 0,2 segundos entre cada quadro. As condições utilizadas foram as mesmas utilizadas no modelamento matemático, a saber:

- Válvula sumersa com duas portas, inclinação descendente de 15°;
- Vazão de entrada na válvula submersa de 20 litros/minuto;
- Penetração da válvula submersa de 2 centímetros.

Foram utilizadas esferas de massa epóxi com densidade equivalente à da água, que podiam ser visualizadas enquanto seguiam o fluxo da água que escoava no interior do molde. Utilizando sobreposição de imagens foi possível a construção dos vetores de velocidade, como é mostrado esquematicamente na Figura 3.

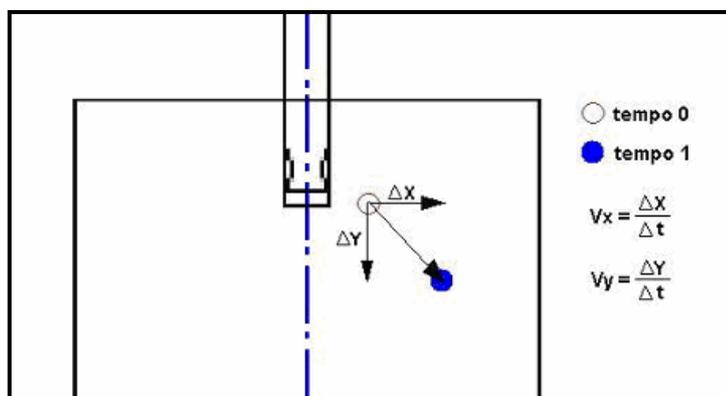


Figura 3. Desenho esquemático mostrando avaliação do perfil de velocidades por modelamento físico

2.2.2 Perfil da interface metal-pó fluxante

A posição da interface aço-pó fluxante foi identificada utilizando visualização do escoamento utilizando água para simular o aço líquido e óleo de silicone para simular o pó fluxante líquido. A similaridade com o sistema real é garantida pela igualdade da viscosidade cinemática, que é definida pela razão entre a viscosidade dinâmica e a densidade do fluido. A Figura 4 mostra um exemplo de uma imagem utilizada para a determinação da posição da interface água-óleo.

Nesta etapa foram realizados ensaios para três diferentes condições, variando o ângulo da porta da válvula submersa. A vazão utilizada foi mantida constante nestes ensaios em 25 litros/minuto, a penetração das válvulas de 3 centímetros e a espessura da camada de óleo utilizada foi de 2 cm. As inclinações das portas das válvulas submersas utilizadas foram de 15° ascendente, horizontal e 15° descendente.

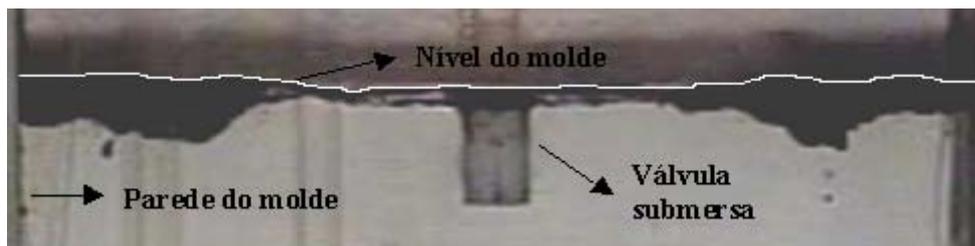


Figura 4. Imagem mostrando o perfil da interface água-óleo

2.2.3 Análise do grau de emulsificação

O grau de emulsificação foi obtido também por tratamento de imagens. O aço foi simulado pela água e o pó fluxante pelo óleo de silicone, respeitando a igualdade das viscosidades cinemáticas como no item anterior. As condições avaliadas nesta etapa foram o efeito da inclinação da porta da válvula submersa, sendo as mesmas do item anterior e a sua penetração no aço líquido. Na avaliação do efeito da inclinação da porta da válvula, a vazão foi mantida em 25 litros/minuto, a penetração de 3 centímetros e a espessura da camada de óleo de 2 centímetros. Para a avaliação do efeito da penetração, foi utilizada uma vazão de 20 litros/minuto, penetrações de 2 e 3 centímetros e a válvula submersa com inclinação ascendente de 15° . A Figura 5 mostra o exemplo de uma imagem do molde durante a análise do grau de emulsificação em uma das condições estudadas.

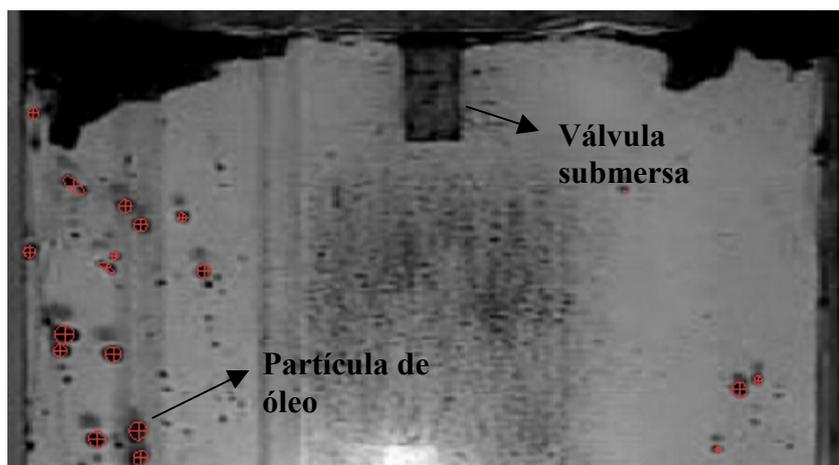


Figura 5. Imagem do molde durante a análise do grau de emulsificação.

O grau de emulsificação foi definido neste trabalho como a razão entre a área ocupada pelas partículas emulsificadas e a área total do molde. O tamanho médio das partículas, em relação à área do molde, foi obtido dividindo-se o grau de emulsificação pelo número de partículas emulsificadas.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

O perfil de velocidades obtido por modelamento matemático foi sobreposto ao obtido por modelamento físico, permitindo a comparação de ambos. A Figura 6 mostra esta sobreposição dos resultados. As setas coloridas são o resultado obtido pelo modelamento matemático, enquanto os círculos seguidos por rastros mostram o resultado obtido por modelamento físico.

A Figura 7 mostra o perfil da interface água-óleo, obtido nos estudos realizados. Pode-se notar que o perfil obtido pela válvula com inclinação ascendente é bem mais irregular que o obtido pela válvula horizontal e o obtido com a válvula descendente é mais regular que ambos, considerando-se a distância entre o óleo e a superfície.

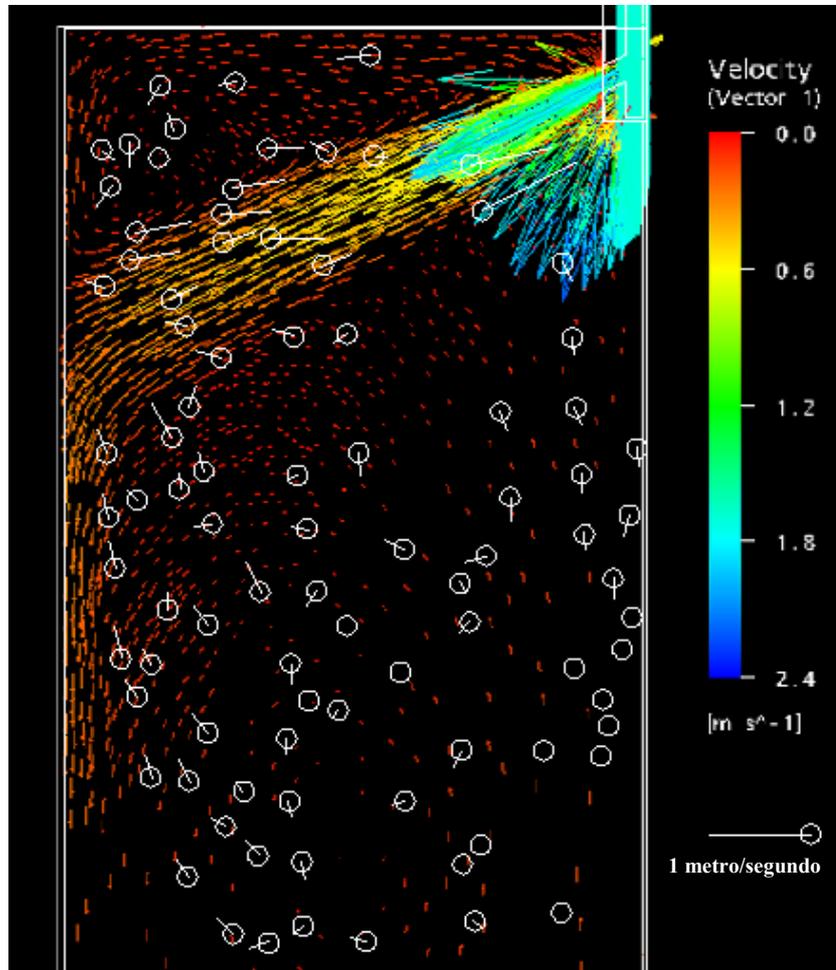


Figura 6. Perfis de velocidade obtidos por modelamento físico e matemático sobrepostos

A Figura 8 mostra a variação do grau de emulsificação em função do ângulo da porta da válvula submersa. A vazão foi de 25 litros por minuto e a penetração de 3 centímetros. A Figura 8 mostra ainda o tamanho médio das partículas emulsificadas, em relação à área do molde, nas mesmas condições.

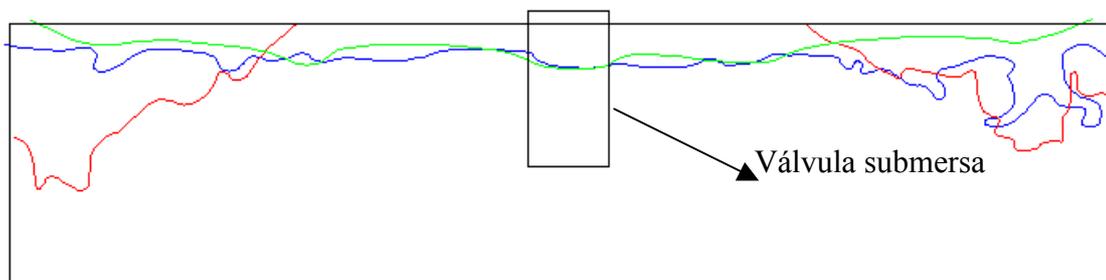


Figura 7. Perfil da interface água-óleo de silicone na superfície do molde para diferentes geometrias da válvula submersa (verde=descendente 25° , vermelha=ascendente 15° e azul=horizontal)

O efeito da penetração pode ser visto na Figura 9, para uma vazão de 20 litros/minuto, utilizando a válvula com inclinação ascendente e penetrações de 2 e 3 centímetros. Tanto o grau de emulsificação, quanto o tamanho médio das partículas, diminuiram com o aumento da penetração.

Comparando as Figuras 7 e 8, pode-se notar a influência que o perfil da interface exerce sobre o grau emulsificado e o tamanho das partículas emulsificadas. Quanto mais irregular a interface água-óleo, maior o grau de emulsificação e o tamanho médio das partículas.

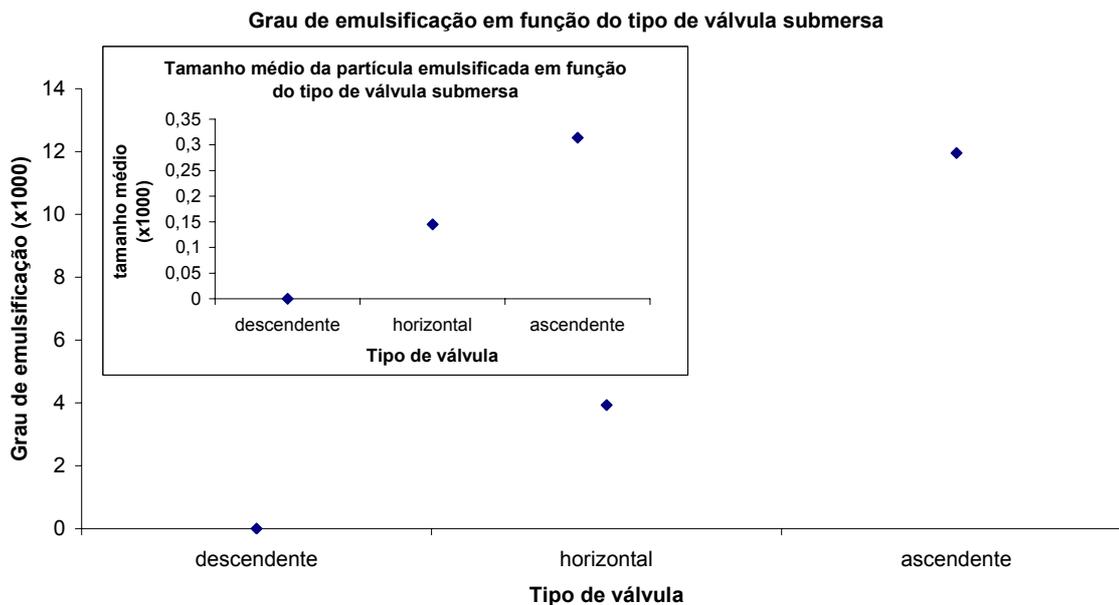


Figura 8. Gráfico do grau de emulsificação e do tamanho médio da partícula em função da válvula submersa utilizada

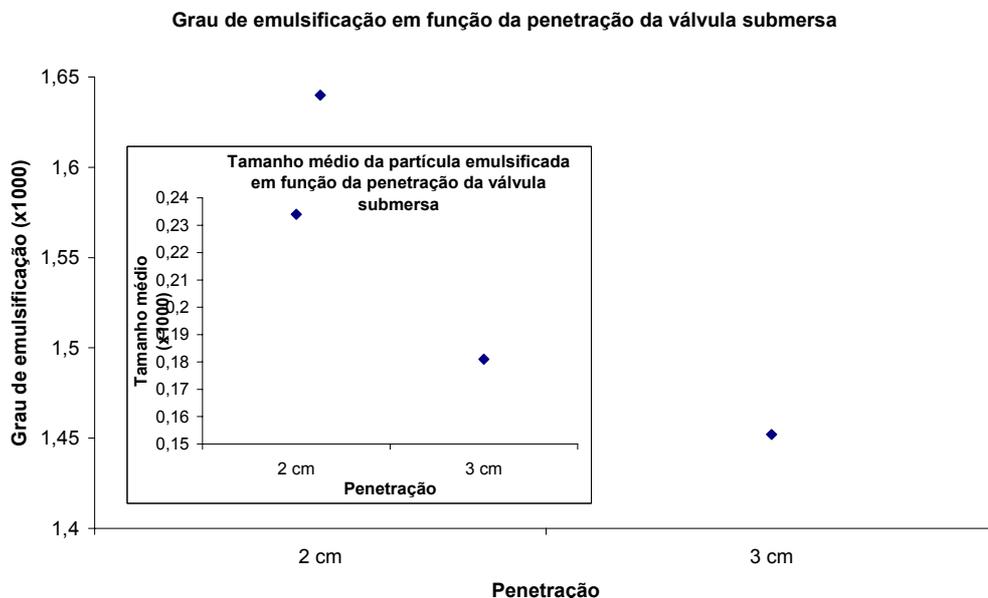


Figura 9. Gráfico do grau de emulsificação e do tamanho médio da partícula em função da penetração da válvula submersa

4 CONCLUSÕES

Os resultados obtidos pelo modelamento físico e matemático para a avaliação do perfil de velocidades no molde apresentam boa similaridade. As diferenças existentes podem ser associadas ao fato de o modelo matemático ter sido avaliado no plano de simetria e o físico ter envolvido todo o volume.

O perfil obtido pela interface metal-pó fluxante teve considerável alteração com a mudança da válvula submersa utilizada demonstrando a influência do fluxo no interior do reator a este resultado.

Pode-se notar também que a influência da válvula submersa no grau de emulsificação e no tamanho das partículas emulsificadas pode ser associado ao perfil da interface, mostrando uma interligação muito grande entre o perfil de velocidades, o perfil da interface, o grau de emulsificação e o tamanho das partículas no molde.

A partir destes resultados, pode-se sugerir o estudo de um método para prever o grau de emulsificação e o tamanho das partículas emulsificadas utilizando unicamente o perfil de velocidades obtido por modelamento matemático.

REFERÊNCIAS

- 1 ANDRADE, S.O.C. "Influência da Geometria da Válvula Submersa Sobre o Fluxo de Metal no Molde de Lingotamento". Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Minas Gerais, 1984.
- 2 KRUGER, M. et al. Desenvolvimento de um Dispositivo para Proteção do Jato Aberto Utilizando Dinâmica dos Fluidos Computacional. XXXVI Seminário de Fusão, Refino e Solidificação dos Metais-Internacional p.211-220, Maio 2005
- 3 SAHAI, Y.; EMI, T. Melt Flow Characterization in Continuous Casting Tundishes. ISIJ International, vol. 36, Nº 6, 1996.
- 4 THOMAS, B.G. Fluid Flow in the Mould. In: The Making, Shaping and Treating of Steel, 11th Edition, Casting Volume, 2003.