

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
Curso de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas

Dissertação de Mestrado

"Efeito de parâmetros geométricos e operacionais sobre o comportamento do pó fluxante no molde de lingotamento contínuo de placas"

Autor: Carlos Eduardo Passagli Barral
Orientador: Prof. Roberto Parreiras Tavares

Abril - 2006

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
Curso de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas

Carlos Eduardo Passagli Barral

**EFEITO DOS PARÂMETROS GEOMÉTRICOS E
OPERACIONAIS SOBRE O COMPORTAMENTO DO
PÓ FLUXANTE NO MOLDE DE LINGOTAMENTO
CONTÍNUO DE PLACAS**

Dissertação de Mestrado apresentada ao
Curso de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica
e de Minas da Universidade Federal de Minas Gerais

Área de concentração: Metalurgia Extrativa
Orientador: Prof. Roberto Parreiras Tavares

Belo Horizonte
Escola de Engenharia da UFMG
2006

SUMÁRIO

	Página
LISTA DE FIGURAS.....	iv
LISTA DE TABELAS	vii
AGRADECIMENTOS.....	viii
RESUMO	ix
ABSTRACT	x
1 – INTRODUÇÃO	1
2 – OBJETIVO	3
3 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	4
3.1 – <i>Lingotamento Contínuo</i>	4
3.2 – <i>Molde</i>	5
3.3 – <i>Válvula Submersa</i>	9
3.4 – <i>Pó Fluxante</i>	10
3.4.1- <i>Características dos pós fluxantes</i>	13
3.4.1.1- <i>Composição química</i>	13
3.4.1.2- <i>Taxa de fusão</i>	14
3.4.1.3- <i>Viscosidade</i>	18
3.5 – <i>Modelamento Físico</i>	20
3.6- <i>Modelamento Matemático de Processos</i>	22
3.6.1- <i>Breve histórico da fluido-dinâmica computacional</i>	23
3.6.2- <i>Formulação matemática</i>	24
3.6.3- <i>Vantagens e limitações do modelamento matemático</i>	26
3.6.4- <i>Modelos de turbulência</i>	28
3.7- <i>Visualização de escoamento</i>	29
3.8- <i>Escoamento bifásico</i>	31
3.9 – <i>Transferência de Calor no Molde</i>	32
3.10 – <i>Defeitos Originados na Solidificação</i>	36
3.11 – <i>Formação de Vórtice/Emulsificação no Molde de Lingotamento Contínuo</i>	37
4 – METODOLOGIA	39
4.1 – <i>Modelo Físico da Instalação de Lingotamento</i>	39
4.2 – <i>Ensaio para Avaliação dos Efeitos das Variáveis</i>	42
4.2.1- <i>Configuração da válvula submersa</i>	43
4.2.2- <i>Dimensões do molde</i>	44

4.2.3- <i>Velocidade de Lingotamento</i>	45
4.2.4- <i>Penetração da válvula submersa</i>	45
4.2.5- <i>Viscosidade do pó fluxante</i>	46
4.3 – <i>Tratamento de Imagens</i>	47
4.4 – <i>Perfil de Velocidade</i>	49
4.4.1- <i>Modelamento Matemático</i>	49
4.4.1.1- <i>Construção da geometria do sistema</i>	49
4.4.1.2- <i>Definição do problema</i>	50
4.4.1.3- <i>Solução do problema</i>	51
4.4.1.4- <i>Visualização dos resultados</i>	51
4.4.2- <i>Modelamento Físico</i>	52
5- RESULTADOS E DISCUSSÃO	54
5.1- <i>Perfil de Velocidades da Água</i>	54
5.2- <i>Perfil da Interface Água-Óleo</i>	57
5.3- <i>Grau de Emulsificação do Óleo</i>	60
5.3.1- <i>Efeito da largura do molde</i>	60
5.3.2- <i>Efeito da penetração da válvula submersa</i>	62
5.3.3- <i>Efeito da inclinação da porta de saída da válvula submersa</i>	64
5.3.4- <i>Efeito da Velocidade de Lingotamento na Máquina de Lingotamento</i>	66
5.3.5- <i>Efeito da viscosidade do pó fluxante</i>	68
5.4- <i>Perfil de Velocidades das Partículas Emulsificadas</i>	71
6- CONCLUSÃO	73
7- TRABALHOS FUTUROS	75
8- REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	76
ANEXOS	80

LISTA DE FIGURAS

	Página
Figura 3.1: Esquema do processo de lingotamento contínuo (http://www.jfe-21st-cf.or.jp/chapter_2/2j_2_img.html , 2 de novembro de 2004).....	5
Figura 3.2: Perfil de temperatura da casca solidificada de aço em um equipamento de lingotamento contínuo, segundo Thomas (2003).	7
Figura 3.3: Desenho esquemático ilustrando os efeitos do uso do freio eletromagnético de jato, segundo Hanley et al (2003).	8
Figura 3.4: Mecanismos de captação de escória, segundo Zhang et al (2003).	9
Figura 3.5: Tipos de válvulas submersas utilizadas em lingotamento contínuo de placas, segundo Thomas (1993).....	10
Figura 3.6: Principais funções do pó fluxante no lingotamento contínuo, segundo Branion (1986).....	11
Figura 3.7: Ilustração esquemática mostrando o efeito do escoamento do aço líquido no escoamento do pó fluxante, segundo Kubota et al (1990).....	12
Figura 3.8: Desenho esquemático mostrando alguns testes utilizados para avaliar a taxa de fusão de escórias (Vieira, 2002).	15
Figura 3.9: Diagrama esquemático do aparelho desenvolvido por Kawamoto et al (1994). utilizado para avaliar a taxa de fusão em pós fluxantes, segundo Bezerra (2005).	15
Figura 3.10: Desenho esquemático mostrando o teste de gotejamento (Vieira, 2002).	16
Figura 3.11: Desenho esquemático de um equipamento para avaliar taxa de fusão de escórias (Bezerra, 2005).....	17
Figura 3.12: Desenho esquemático mostrando o efeito do carbono no controle da taxa de fusão do pó fluxante (Bezerra, 2005).	17
Figura 3.13: Desenho esquemático mostrando as estruturas da sílica sólida e líquida, respectivamente, segundo Geiger e Poirier (1980).	19
Figura 3.14: Estrutura da sílica fundida com a adição do íon Ca^{2+} (Geiger e Poirier, 1980).	19
Figura 3.15: Desenho esquemático mostrando condição de similaridade dinâmica. ...	21
Figura 3.16- Esquema das etapas de modelamento e simulação (Oberkampff, 2002). 27	
Figura 3.17 Desenho esquemático mostrando as três etapas de resfriamento no lingotamento contínuo (Pinheiro, 1988).....	33
Figura 3.18: Resistências térmicas ao fluxo de calor no molde (Penna, 2005).	34

Figura 3.19: Gráfico mostrando o fluxo de calor em função da distância em relação ao topo do molde para diferentes velocidades de lingotamento (Pinheiro, 1988).....	35
Figura 3.20: Gráfico mostrando a temperatura do molde em função da distância em relação ao topo do molde de lingotamento (Pinheiro, 1988).	35
Figura 3.21: Desenho esquemático mostrando o fluxo de aço em um molde (He, 1993).	38
Figura 3.22 Desenho esquemático mostrando o mecanismo de formação de vórtice (He, 1993).....	38
Figura 4.1: Fotografia do modelo físico de um equipamento de lingotamento contínuo de placas localizado no LaSiP.	40
Figura 4.2: Sinótico de controle do modelo físico e os cartões de entrada e saída de sinal.	41
Figura 4.3: Nível da água em função do tempo no modelo físico do molde.	42
Figura 4.4: Desenho técnico mostrando os três tipos de ponteira utilizadas no estudo do escoamento bifásico no interior do molde.	43
Figura 4.5: Fotografia do molde do modelo físico a frio localizado no LaSiP.	44
Figura 4.6: Desenho esquemático mostrando a referência utilizada para medir a penetração da válvula submersa no molde e o ângulo da porta de saída.	46
Figura 4.7: Imagem do molde durante a análise do grau de emulsificação.	48
Figura 4.8: Desenho esquemático ilustrando o cálculo dos vetores de velocidade das partículas em movimento na água.	49
Figura 4.9- Malhas típicas do CFX-5.6. (a) malha uniforme não estruturada (tetraédrico), (b) malha não uniforme e não estruturada e em (c) malha não estruturada combinada a uma malha estruturada (prismática).....	50
Figura 5.1: Perfis de velocidade obtidos por modelamento físico e matemático.	55
Figura 5.2: Perfis de velocidades obtidos para o plano de simetria e planos paralelos ao plano de simetria distanciados de 1 e 2 centímetros do mesmo.	57
Figura 5.3: Imagem mostrando o perfil da interface água-óleo.	58
Figura 5.4: Perfil da interface água-óleo de silicone na superfície do molde para diferentes geometrias da válvula submersa (verde=descendente 15° , vermelha=ascendente 15° e azul=horizontal).	58
Figura 5.5: Comparação entre o perfil de pressão obtido por modelamento matemático e a interface água-óleo obtido para modelamento físico para a válvula submersa com portas de saída com inclinação descendente de 15°.....	59

Figura 5.6: Comparação entre o perfil de pressão obtido por modelamento matemático e o perfil da interface água-óleo obtido para modelamento físico para a válvula submersa com portas de saída com inclinação ascendente de 15°.	59
Figura 5.7: Grau de emulsificação do óleo de silicone em função da largura da placa lingotada.	61
Figura 5.8: Tamanho médio das partículas emulsificadas em função da largura do molde de lingotamento contínuo.	62
Figura 5.9: Grau de emulsificação do óleo de silicone em função da penetração da válvula submersa.	63
Figura 5.10: Tamanho médio das partículas emulsificadas em função da penetração da válvula submersa no molde de lingotamento contínuo.	63
Figura 5.11: Grau de emulsificação do óleo de silicone em função da inclinação das portas de saída da válvula submersa.	65
Figura 5.12: Tamanho médio das partículas emulsificadas em função da inclinação das portas de saída da válvula submersa.	65
Figura 5.13: Grau de emulsificação do óleo de silicone em função da vazão de alimentação no molde de lingotamento contínuo.	67
Figura 5.14: Tamanho médio das partículas emulsificadas em função da vazão de alimentação no molde de lingotamento contínuo.	67
Figura 5.15: Distribuição de temperatura na interface metal-pó fluxante em um molde de lingotamento contínuo de placas (Thomas, 1996).	68
Figura 5.16: Gráfico mostrando o grau de emulsificação do óleo de silicone em função da viscosidade cinemática do mesmo.	69
Figura 5.17: Tamanho médio das partículas emulsificadas em função da viscosidade cinemática do óleo de silicone.	70
Figura 5.18: Emulsificação gerada por escoamento tipo Marangoni (Belton Symposium, 2000).	70
Figura 5.19: Perfil de velocidades do aço líquido, obtido por modelamento matemático, associado à trajetória de partículas emulsificadas, obtido por modelamento físico	71
Figura 5.20: Perfil de velocidade do aço em uma válvula submersa obtido por modelamento matemático (Wang, 1990).	72

LISTA DE TABELAS

Tabela III-1: Faixas de composição típicas de pó fluxante (Vieira, 2002).	13
Tabela III-2: Definição dos termos das equações gerais de conservação.	25
Tabela III-3- Defeitos versus temperatura de fragilização (Wolf, 1991).....	36
Tabela V-1: Parâmetros operacionais utilizados na construção do perfil de velocidades do molde.....	55
Tabela V-2: Comparação das velocidades em pontos específicos do molde.....	56
Tabela V-3: Condições operacionais utilizadas nos ensaios para análise do perfil da interface água-óleo.	57
Tabela V-4: Condições operacionais utilizadas nos ensaios para análise do grau de emulsificação em função da largura do molde.	60
Tabela V-5: Variação da velocidade de lingotamento com a largura do molde para uma vazão de 20 litros/minuto	61
Tabela V-6: Condições operacionais utilizadas nos ensaios para análise do grau de emulsificação em função da penetração da válvula submersa no molde.	62
Tabela V-7: Condições operacionais utilizadas nos ensaios para análise do grau de emulsificação em função da inclinação das portas de saída da válvula submersa.	64
Tabela V-8: Condições operacionais utilizadas nos ensaios para análise do grau de emulsificação em função da velocidade de lingotamento.....	66
Tabela V-9: Valores de velocidade de lingotamento para o modelo físico e para o equipamento real em função da vazão.	67
Tabela V-10: Condições operacionais utilizadas nos ensaios para análise do grau de emulsificação em função da viscosidade cinemática do óleo de silicone utilizado.	69

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus grandes companheiros do LaSiP, sobretudo ao Marck pela idealização e auxílio na realização das medidas da velocidade da água no modelamento físico do molde e ao Thiago Ávila pela grande ajuda com o modelamento matemático. Ao Fred que largou o mestrado para ir atrás de seus sonhos, meus cumprimentos.

Agradeço também aos meus grandes mestres, que tanto me ajudaram enquanto estive na escola como aluno e como professor. Parreiras e Luiz Fernando, a vocês dois meu muito obrigado.

Saí da faculdade em busca de novos desafios e de um caminho para minha vida, mas guardarei sempre muita saudade e carinho por todos os bons momentos e pelos muitos amigos que tive na UFMG. Para todos aqueles que não tiveram o nome citado em meu trabalho, não pensem que não estão em minha memória. Obrigado a todos.

Carlos Eduardo Passagli Barral

RESUMO

O escoamento do aço líquido no processo de lingotamento contínuo tem um grande efeito sobre a qualidade do produto final e pode estabelecer limites para a produtividade a ser alcançada no processo.

Uma alta velocidade de lingotamento pode aumentar a turbulência no menisco do molde e, freqüentemente, formar vórtice, resultando em inclusões de escória no seio do aço líquido. Com o objetivo de aumentar a produtividade deste processo, o controle da turbulência no menisco, através de variáveis geométricas e operacionais, deve ser realizado.

Neste trabalho foram estudados os efeitos de parâmetros geométricos e operacionais no escoamento bifásico, metal líquido/pó fluxante, em um molde de um equipamento de lingotamento contínuo de placas. Para a avaliação desses efeitos, foi utilizado um modelo físico totalmente automatizado com uma estratégia de controle envolvendo cartões de entrada e saída de sinais com padrão ethernet, e um sistema soft-PLC, com uma interface homem-máquina, via sinótico de controle. Os fluidos utilizados para simular o aço e o pó fluxante líquido foram água e óleo de silicone, respectivamente.

O modelo físico, construído em acrílico cristal, em escala de 1:3 em relação a um equipamento localizado no estado de Minas Gerais, permite a visualização do escoamento em função das diferenças óticas entre as duas fases estudadas, possibilitando a filmagem e posterior tratamento das imagens. Este estudo permitiu a avaliação da quantidade de pó fluxante emulsificado, a partir da área ocupada pelo mesmo na vista frontal do molde, e do perfil de velocidades do óleo de silicone emulsificado utilizando imagens quadro a quadro. A velocidade da água no reator foi avaliada por técnicas de visualização de escoamento e modelamento matemático, objetivando a avaliação do efeito dessa variável na emulsificação do pó fluxante líquido.

Foi observado que a principal causa para emulsificação é a turbulência na interface água-óleo. Os parâmetros que causam maior impacto neste sentido são a penetração da válvula submersa e o ângulo da porta de saída da válvula submersa.

ABSTRACT

Fluid flow in continuous casting reactors, tundish and mould, has a significant effect on the product quality and can also limit the productivity that can be attained in the process.

In the continuous casting mould, an increase in productivity is always associated to increases in the casting speed, in the liquid metal flowrate and consequently, in the levels of turbulence, particularly in the upper regions, near the interface between liquid steel and mould flux. These higher levels of turbulence can cause emulsification of the mold flux and lead to entrapment of non metallic particles in the liquid steel.

The configuration of the submerged entry nozzle used to deliver liquid metal into the mould also plays a significant role in determining the levels of turbulence near the interface between liquid steel and mould flux.

In the present work, the effects of the configurations of the submerged entry nozzle, of the properties of the mould flux and of the operational parameters of the continuous casting machine on the behaviors of the interface between liquid steel and mould flux and on the degree of emulsification of the mould flux have been studied using physical modeling.

The physical model reproduced Usiminas N. 2 continuous caster, in a 1:3 scale. The model was completely transparent to enable the visualization of the interface between liquid steel and mould flux. These two fluids were simulated by water and silicone oil, respectively.

In the experiments with the physical model, the images of the interface between water and oil were recorded using a video camera. These images were post processed to determine the degree of emulsification of the oil. The velocity of the water near the interface with the oil was also estimated and compared to prediction of a mathematical models.

The results indicated that emulsification is caused by the turbulence in interface between water and oil (steel and mold flux). Among the parameters that were

investigated, the penetration of the nozzle in the liquid and the angle of the ports presented the most significant effects on emulsification.

1 – INTRODUÇÃO

Um dos principais critérios de qualidade para o aço é a sua limpidez, que deve ser a maior possível. A limpidez do aço é relacionada à ausência de inclusões não metálicas no produto lingotado. É importante que o aço possua um elevado grau de limpidez em função da etapa posterior de seu processamento, a laminação. A presença de inclusões não metálicas no aço pode prejudicá-lo em termos de qualidade superficial e propriedades mecânicas. A presença de inclusões em placas lingotadas pode possibilitar a formação de trincas e defeitos superficiais durante o processo de laminação. O processo de lingotamento contínuo, além de possibilitar uma produtividade significativamente maior que o lingotamento convencional, permite também a melhoria desse importante parâmetro de qualidade.

Por essas razões, o lingotamento contínuo é atualmente a forma mais usual de se processar o aço líquido. Os três principais reatores desse processo são a panela, o distribuidor e o molde. Quando esse sistema foi concebido, a única função do distribuidor era ser um reservatório de aço líquido para o abastecimento do molde, onde o metal se solidifica. Com o aumento da exigência de qualidade do mercado, o distribuidor passou a ser um reator de refino onde, por meio do controle do escoamento utilizando modificadores de fluxo, as inclusões não metálicas remanescentes podem ser capturadas pela escória. Para otimizar o fluxo de aço no distribuidor através do uso de barreiras, técnicas de modelamento físico e matemático podem ser utilizadas. Muitos estudos já foram realizados nesta área, tendo como critério de avaliação os valores de fração de volume pistonado, fração de volume de mistura, fração de volume morto, tempo de residência médio. A visualização do escoamento neste reator pode ser feita pela adição de corantes.

O molde é o reator onde ocorre a solidificação do metal. Ele é normalmente construído em cobre e refrigerado a água. Normalmente o aço é alimentado no molde através de uma válvula submersa. Para evitar o contato do aço líquido com o ar e, conseqüentemente, sua oxidação e perda de calor em uma região indesejada, é acrescentado o pó fluxante à sua superfície. O pó fluxante é essencialmente um tipo especial de escória. As principais funções do pó fluxante são proteger o aço líquido da atmosfera, funcionar como um isolante térmico, direcionando a extração de calor para as paredes do molde e lubrificar as paredes do molde minimizando as marcas de

oscilação na placa lingotada. O pó fluxante serve também para captura de inclusões não metálicas ainda presentes no aço.

Para melhorar ainda mais a qualidade do aço, no que diz respeito à limpidez, é possível, por meio da escolha adequada de uma configuração da válvula submersa e dos parâmetros operacionais, utilizar o molde como um último reator de refino e não apenas como um recipiente onde ocorre a solidificação do metal. Por outro lado, uma escolha inadequada desses parâmetros pode causar a emulsificação do pó fluxante, prejudicando com isso a limpidez do produto lingotado. Desta forma torna-se relevante um estudo onde estes aspectos são considerados, possibilitando um melhor entendimento dos fenômenos que governam o escoamento bifásico no molde, permitindo escolhas mais adequadas dos parâmetros operacionais em um equipamento de lingotamento contínuo para aumentar a produtividade e a qualidade do aço.

Neste trabalho foi feito o estudo do comportamento do pó fluxante no molde de lingotamento contínuo. Para caracterizar este comportamento, foi avaliado o grau de emulsificação do pó fluxante em função de variáveis geométricas e operacionais, sendo elas a velocidade de lingotamento, da penetração da válvula submersa, da geometria de suas portas de saída e da largura da placa lingotada.

Este estudo foi feito utilizando técnicas de modelamento físico a frio, empregando água e óleo de silicone para simular aço líquido e pó fluxante líquido, respectivamente. O modelo físico construído reproduz um molde de lingotamento de placas. A quantidade de pó fluxante emulsificada foi avaliada pela área ocupada pelo óleo de silicone emulsificado na água. O perfil de velocidade do pó fluxante líquido emulsificado foi avaliado a partir de imagens quadro a quadro obtidas por filmagem. A velocidade de cada partícula foi obtida pela distância percorrida por cada partícula em um espaço de tempo conhecido. O perfil de velocidades do fluido no reator foi obtido utilizando técnicas de visualização de escoamento utilizando partículas com densidade similar a da água e por modelamento matemático que foi comparado e validado pelos resultados obtidos no modelamento físico.

2 – OBJETIVO

Os objetivos do presente trabalho são:

-Avaliar, por meio de modelamento físico a frio, os efeitos da velocidade de lingotamento, da configuração da válvula submersa e a viscosidade cinemática do pó fluxante no escoamento bifásico, metal líquido/pó fluxante, em um distribuidor de lingotamento contínuo de placas, para três diferentes larguras de placas;

-Determinar quais são os fatores mais significativos na emulsificação de pó fluxante, possibilitando melhorias na limpidez do aço lingotado com a minimização da emulsificação do pó fluxante;

-Obter o perfil de velocidades do aço no interior do reator por modelamento matemático, validá-lo por modelamento físico e avaliar o efeito deste escoamento na trajetória das partículas emulsificadas de óleo de silicone que simula pó fluxante.

3 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O estudo do escoamento bifásico no molde de um equipamento de lingotamento contínuo exige um conhecimento prévio do sistema e das ferramentas utilizadas neste estudo. Neste item serão detalhados o processo de lingotamento contínuo, as partes do equipamento diretamente relacionadas com o estudo e os critérios que permitem a utilização do modelamento físico.

3.1 – Lingotamento Contínuo

Atualmente, o lingotamento contínuo é o principal processo de solidificação do aço. As suas principais características são a alta produtividade, elevado rendimento, possibilidade de obtenção de boa qualidade superficial e interna do produto e capacidade e versatilidade para produzir várias especificações de aços.

Uma instalação de lingotamento contínuo é constituída basicamente de três reatores:

- Panela;
- Distribuidor;
- Molde.

A figura 3.1 mostra esquematicamente uma dessas instalações.

De acordo com Barbosa (2002), a panela cumpre primeiramente o papel de transporte do aço líquido até a máquina de lingotamento contínuo, além de servir como reservatório de aço líquido durante o lingotamento. Esse reator pode ainda ser usado nas operações de refino secundário do aço, tais como a desoxidação, a dessulfuração e a descarburização.

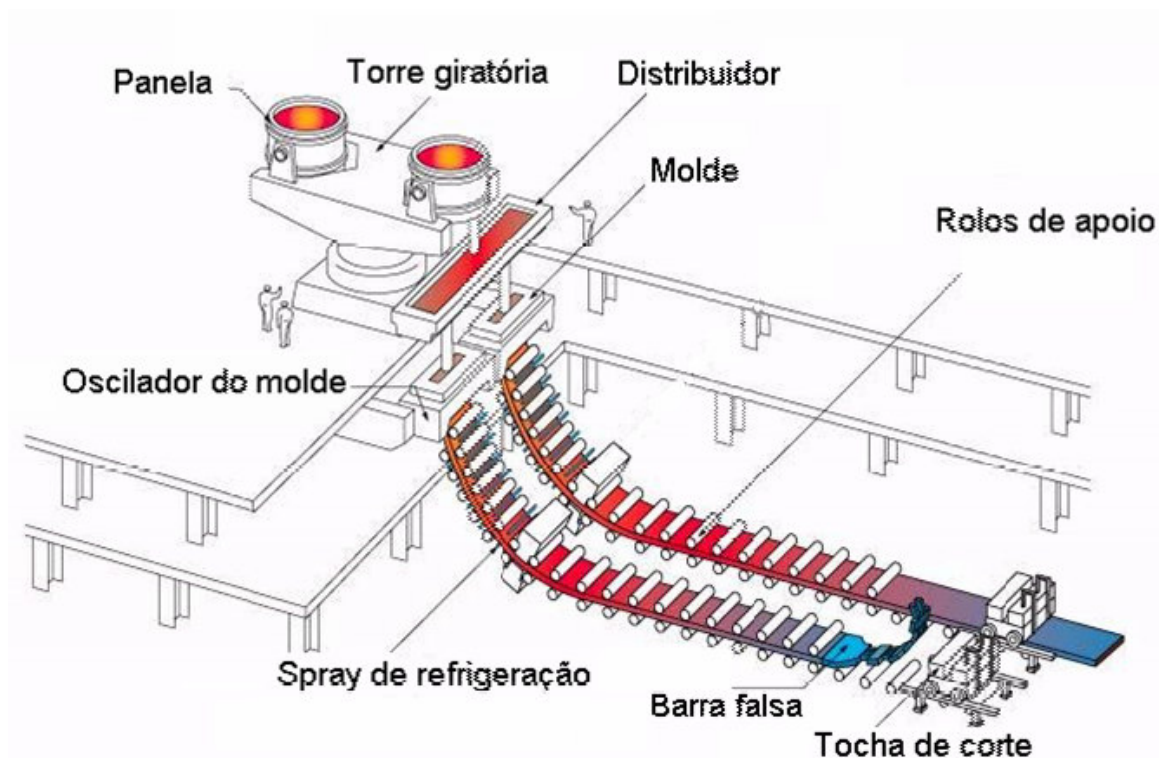


Figura 3.1: Esquema do processo de lingotamento contínuo (http://www.jfe-21st-cf.or.jp/chapter_2/2j_2_img.html, 2 de novembro de 2004).

O distribuidor é um reator intermediário entre a panela e o molde. Tem as funções de servir como um reservatório de aço e manter a continuidade do lingotamento, em especial, nas trocas de panela. Além disso, o distribuidor é projetado com a finalidade de possibilitar a realização de várias operações metalúrgicas, tais como a separação e flotação de inclusões, controle do superaquecimento e homogeneização térmica e química do aço.

O molde é onde a solidificação é iniciada e a geometria da peça a ser produzida é definida. É normalmente construído em cobre e refrigerado a água. A seguir será feita uma descrição mais detalhada do molde e das suas funções no lingotamento contínuo.

3.2 – Molde

O molde é muitas vezes considerado o principal elemento de uma máquina de lingotamento contínuo, por ser o equipamento onde é realizada a extração de calor e a

formação de uma casca sólida. Após a saída do molde, esta casca irá conter o metal líquido durante a refrigeração por jatos d'água até a completa solidificação do veio.

A figura 3.2 mostra esquematicamente isotermas da pele solidificada em um equipamento de lingotamento contínuo. Na região mais interna à pele solidificada, o aço permanece líquido. Pode-se notar que a maior parte do aço se solidifica fora do molde.

O escoamento do aço líquido no molde é muito importante na formação da pele solidificada. A configuração da válvula submersa pode favorecer ou prejudicar esse processo. Atualmente tem sido usado em algumas empresas um equipamento de freio eletromagnético do jato (Hanley et al, 2003). Este equipamento é capaz de modificar significativamente o escoamento no interior do molde. A figura 3.3 mostra esquematicamente o funcionamento desse equipamento. A força eletromagnética gerada pelas bobinas é capaz de favorecer a flotação de inclusões e minimizar o jato direcionado às paredes do molde, mantendo a interface metal-pó fluxante menos turbulenta. Contudo esse equipamento tem um custo bastante elevado, levando ao estudo de outras alternativas mais favoráveis do ponto de vista econômico.

Um dos fenômenos relevantes que pode ocorrer no molde é a captura de partículas de pó fluxante. Segundo Zhang et al (2004), há alguns mecanismos principais para a captação de escória. Estes mecanismos são mostrados esquematicamente na figura 3.4.

Estes seis mecanismos estão associados a:

- 1- Turbulência e nível de flutuação no menisco. Se o jato da válvula submersa gera um alto nível de flutuações próximo ao menisco, partículas de escória podem ser captadas;
- 2- Oscilação periódica do nível de aço no do molde induzida pelo escoamento não estacionário causado por problemas de variação de vazão do aço líquido, proveniente da válvula submersa;
- 3- Vórtice formado por vazão assimétrica no molde;
- 4- Emulsificação na interface metal/escória, causada por ruptura de bolhas flotando para esta interface;

- 5- Sucção causada pelo jato da válvula submersa. A escória é captada pela baixa pressão na porta de saída da válvula submersa e, se atingir o jato, pode causar sérios problemas de inclusão de escória;
- 6- Incidência do jato na interface metal-escória, induzido por injeção excessiva de gás (quando esta prática é adotada).

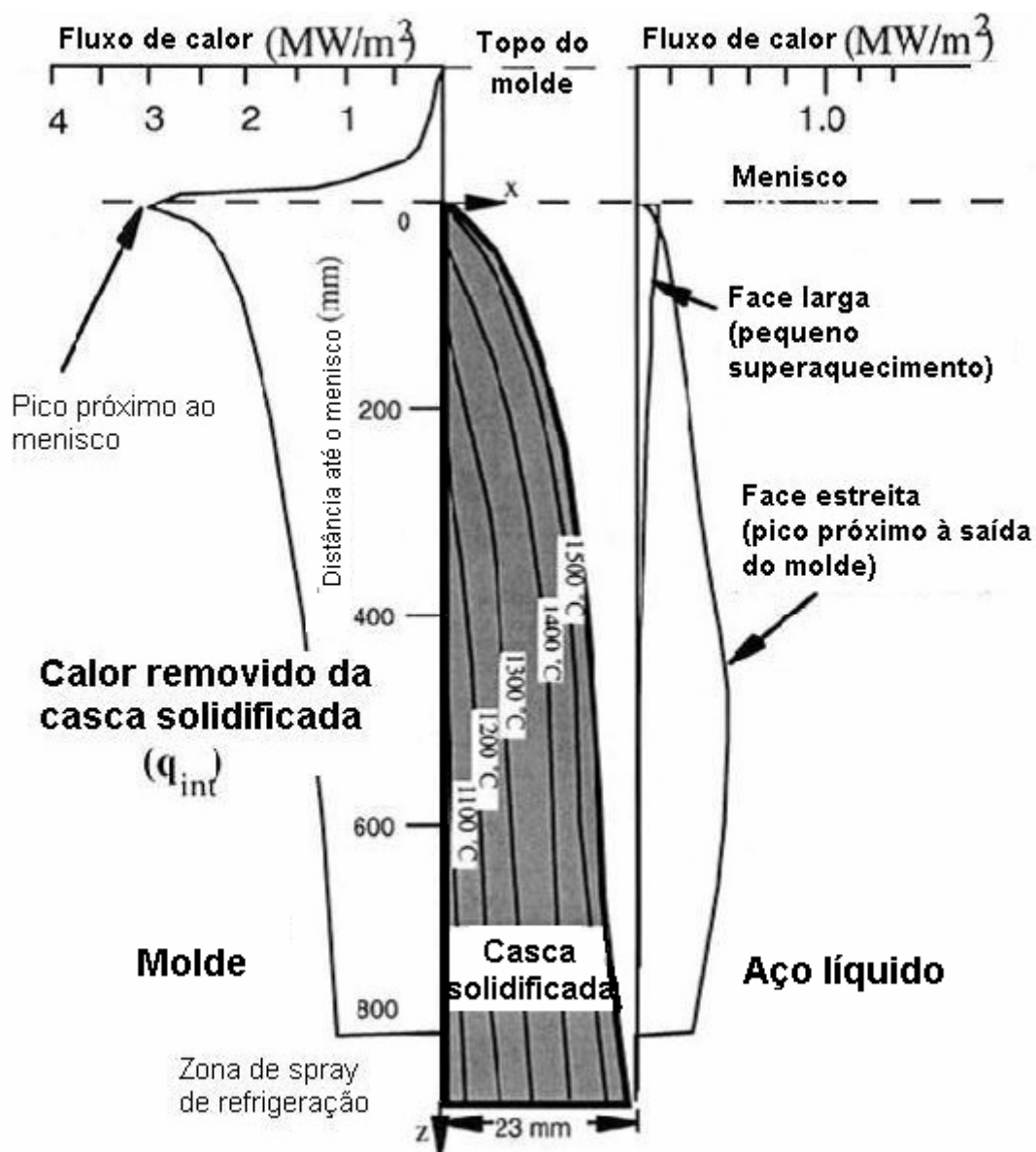


Figura 3.2: Perfil de temperatura da casca solidificada de aço em um equipamento de lingotamento contínuo, segundo Thomas (2003).

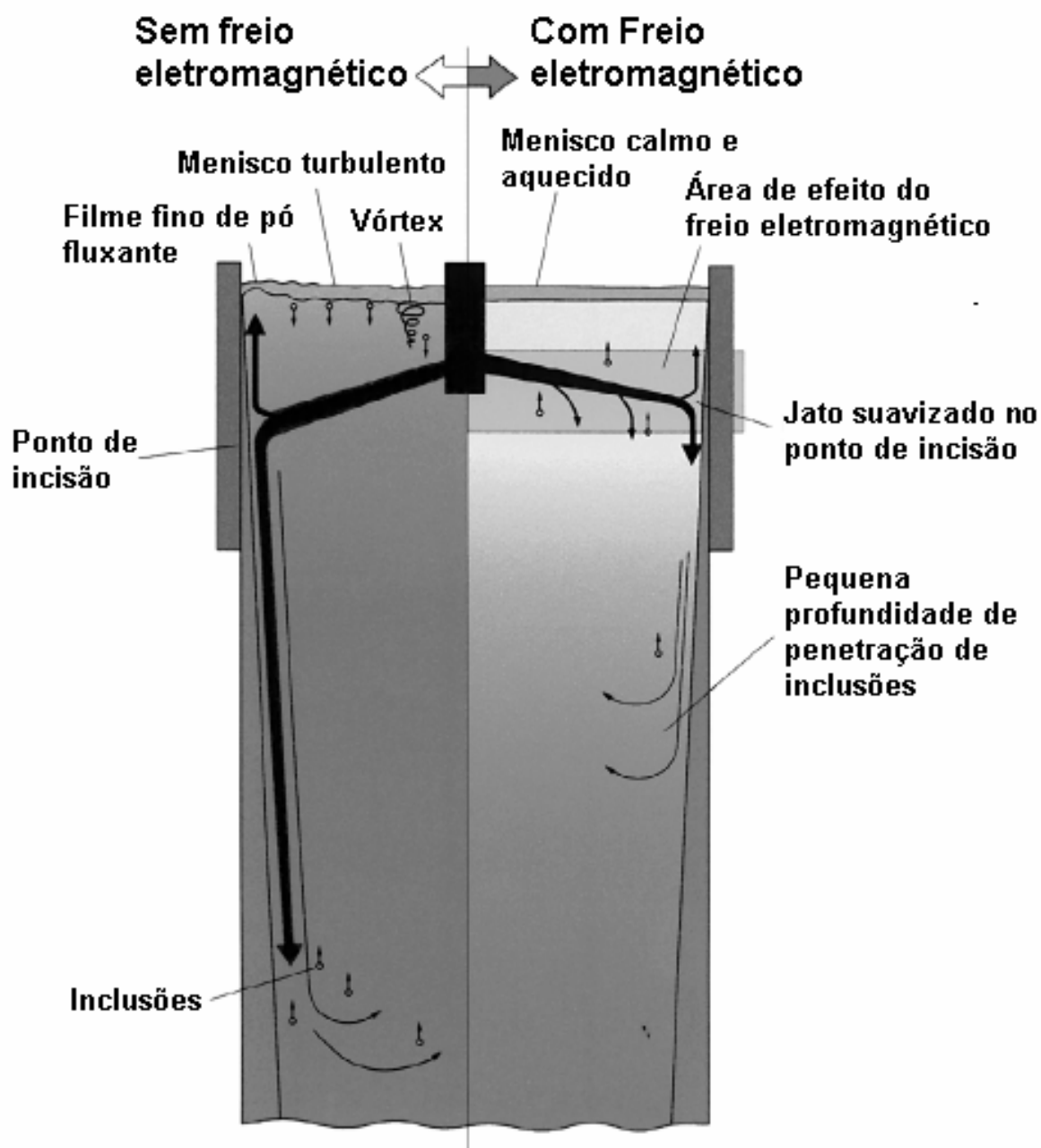


Figura 3.3: Desenho esquemático ilustrando os efeitos do uso do freio eletromagnético de jato, segundo Hanley et al (2003).

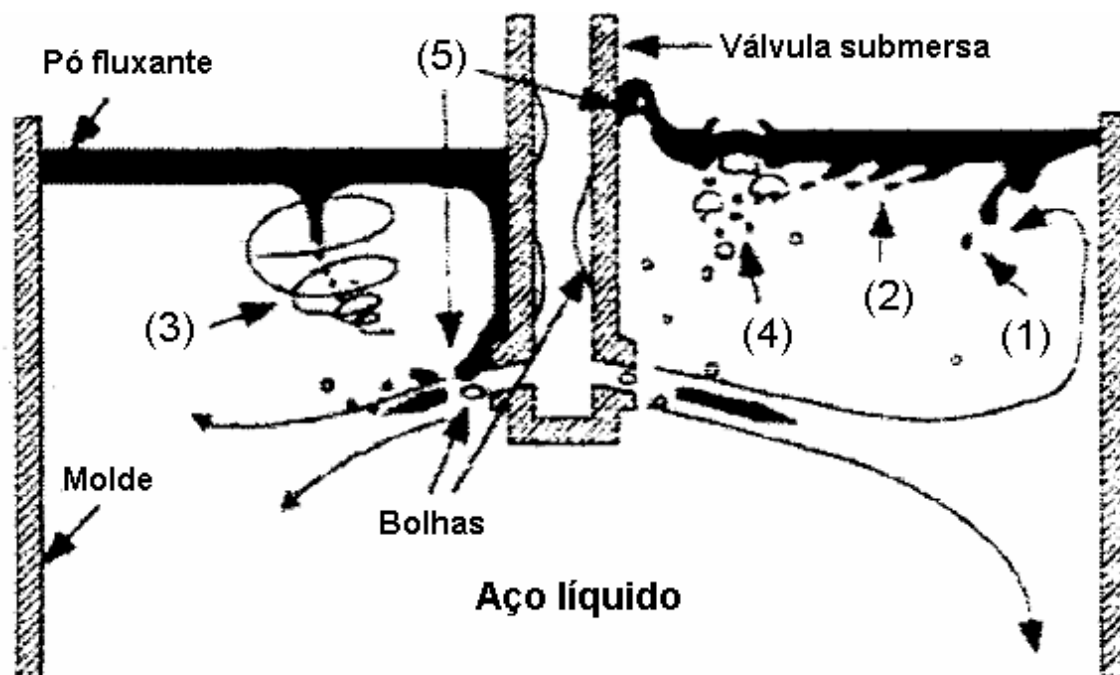


Figura 3.4: Mecanismos de captura de escória, segundo Zhang et al (2003).

3.3 – Válvula Submersa

Segundo Thomas (1993), as características requeridas para uma boa válvula submersa são criar um bom padrão de escoamento na cavidade do molde, ser resistente ao desgaste, a entupimentos e a choques térmicos, além de possuir baixa porosidade e um custo razoável.

Existem vários tipos de válvulas submersas. Para o lingotamento contínuo de placas, as mais utilizadas são as “bifurcadas” e “multiportas”, mostradas na figura 3.5.

O tipo bifurcado é bem mais utilizado. Estas válvulas possuem algumas características que devem ser ajustadas, pois o escoamento do aço é diretamente relacionado com as suas configurações. Algumas dessas variáveis são a penetração da válvula submersa e a geometria das portas de saída da válvula. A velocidade de lingotamento e a largura da placa a ser lingotada também têm relação direta com o escoamento, sendo, desta forma, parâmetros que devem ser considerados na escolha da válvula submersa.

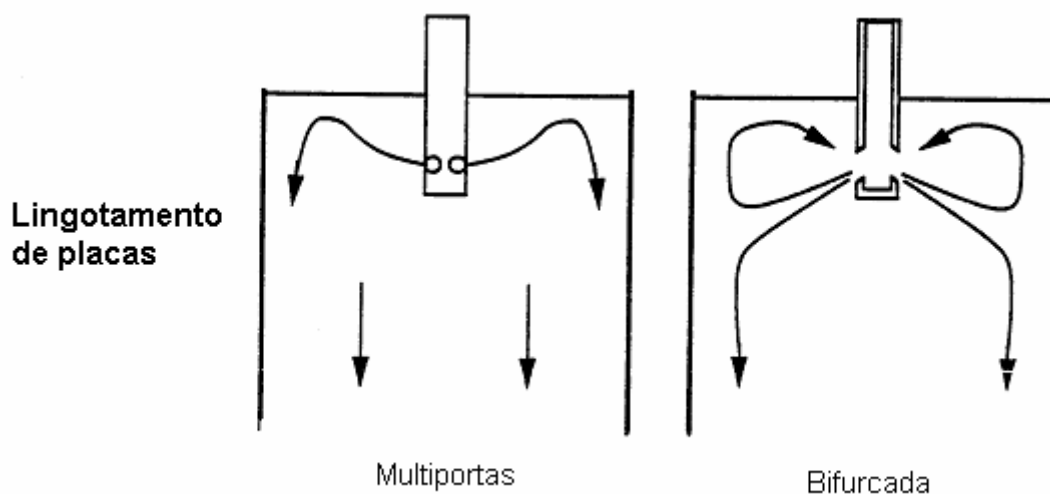


Figura 3.5: Tipos de válvulas submersas utilizadas em lingotamento contínuo de placas, segundo Thomas (1993).

3.4 – *Pó Fluxante*

O pó fluxante é uma escória sintética usada no lingotamento contínuo de aços, tendo como função principal a lubrificação. O pó fluxante é alimentado na superfície do aço líquido, formando uma poça líquida que escoam pelas paredes do molde, diminuindo o atrito entre a casca solidificada do aço e a parede do molde. Segundo Branion (1986), o pó fluxante possui, além da lubrificação, outras quatro funções principais, mostradas na figura 3.6 e detalhadas a seguir.

- 1- Isolamento térmico para o aço líquido, prevenindo a sua solidificação na superfície do molde. O pó fluxante, quando fundido, é inerte e possui condutividade térmica baixa, caracterizando-se como isolante térmico;
- 2- Prevenção contra a reoxidação, por evitar o contato do aço líquido com a atmosfera oxidante;
- 3- Absorção de inclusões. O cumprimento adequado desta função está relacionado com a composição química do pó fluxante;
- 4- Lubrificação entre a casca solidificada e o molde, minimizando a ocorrência do rompimento da pele solidificada durante o lingotamento. A habilidade do pó

fluxante em atuar como lubrificante é determinada pela sua viscosidade e temperatura de cristalização;

- 5- Controle da transferência de calor entre o aço e o molde, determinada também pela viscosidade, pela temperatura de cristalização e pela composição química (presença de fluoretos). A ocorrência de transferência de calor não uniforme pode resultar em formação de trincas.

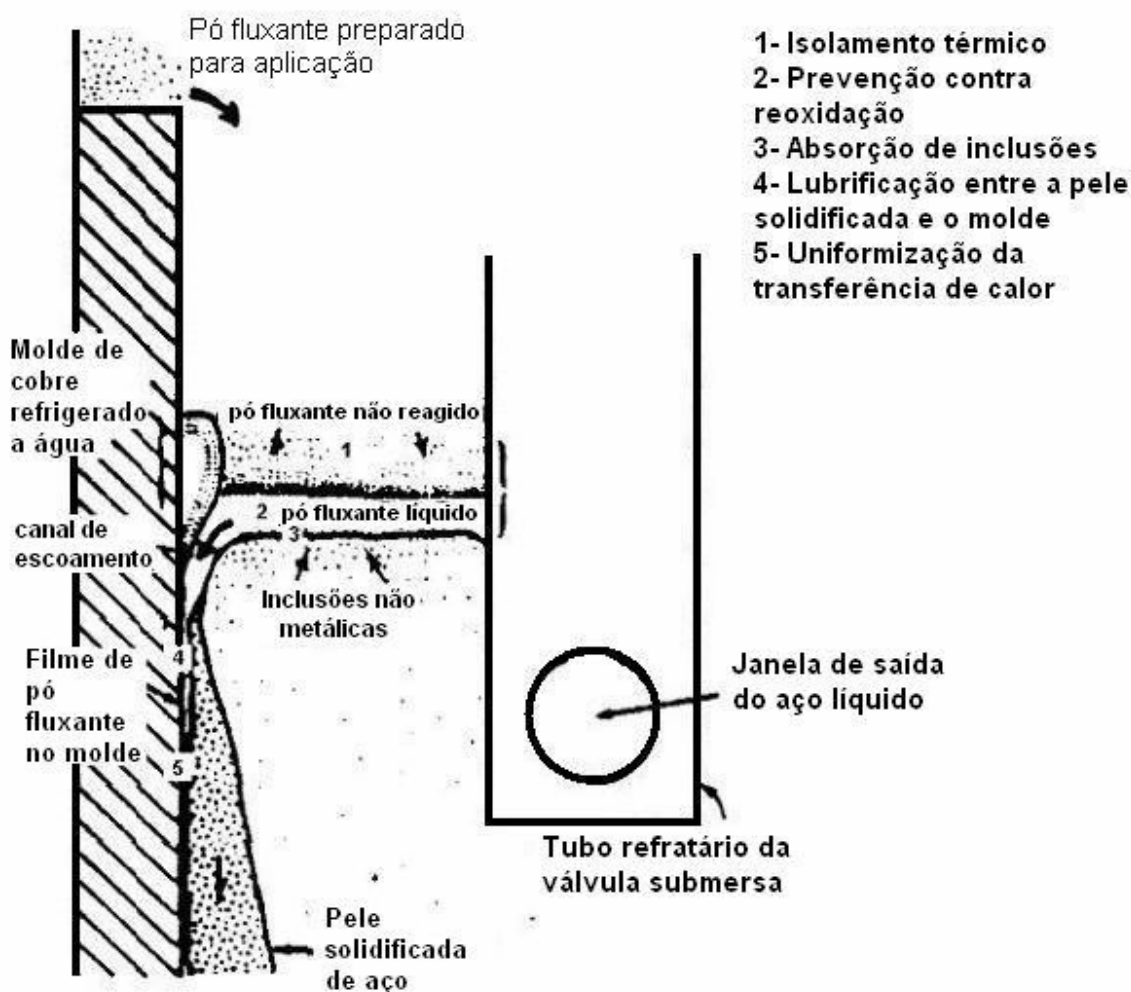


Figura 3.6: Principais funções do pó fluxante no lingotamento contínuo, segundo Branion (1986).

O aço líquido e o pó fluxante são imiscíveis. No molde, devido à sua menor densidade, o pó fluxante fica sobre o aço líquido. Enquanto o aço é alimentado através da válvula submersa, o pó fluxante é adicionado na superfície livre do metal. A movimentação do aço líquido no interior do molde é capaz, em função da viscosidade

dos dois materiais, de provocar o deslocamento do pó fluxante, como é mostrado esquematicamente na figura 3.7.

Esta figura mostra esquematicamente o perfil de velocidades na interface aço-pó fluxante. Sabe-se que neste tipo de interface, a velocidade das diferentes fases é a mesma, logo, a velocidade do aço líquido no molde gera uma velocidade no pó fluxante líquido por meio da força de arraste entre as fases, criando uma força cisalhante no pó fluxante líquido. Quando essa força supera a força associada à tensão superficial do pó fluxante líquido, partículas do mesmo se desprendem (fenômeno de emulsificação) Isto pode causar um aumento das inclusões não metálicas no aço.

O estudo do escoamento bifásico no molde é importante para se avaliar a possibilidade de incorporação de partículas não metálicas provenientes do pó fluxante ao aço, como é mostrado esquematicamente nas figuras 3.4 e 3,7, onde se pode ver o desprendimento de partículas de pó fluxante, que vão para o seio do metal líquido. As características dos pós fluxantes têm efeito sobre o desprendimento destas partículas.

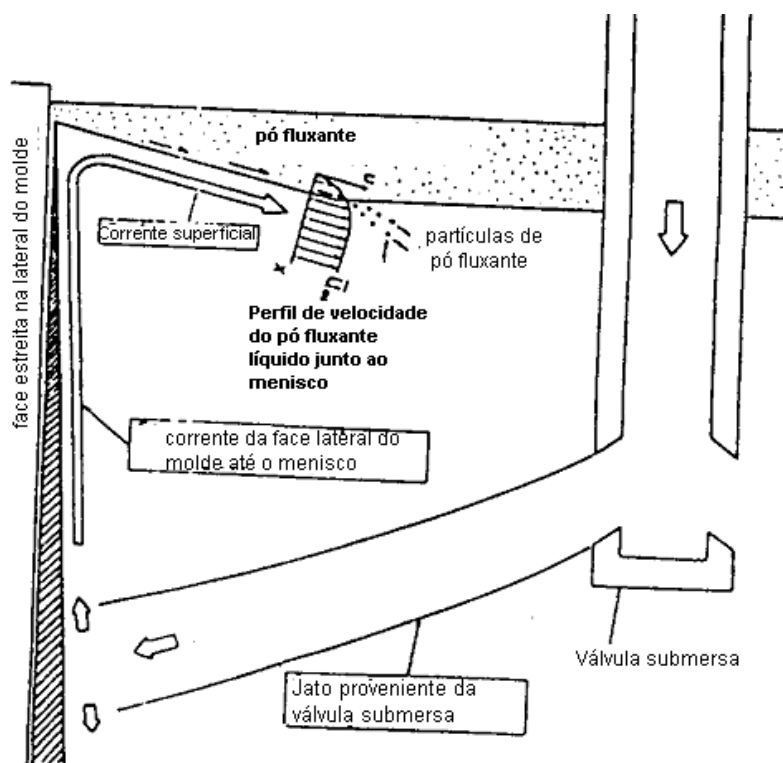


Figura 3.7: Ilustração esquemática mostrando o efeito do escoamento do aço líquido no escoamento do pó fluxante, segundo Kubota et al (1990).

3.4.1- Características dos pós fluxantes

A seguir serão discutidas as principais características dos pós fluxantes que determinam sua performance no interior do molde de lingotamento contínuo.

3.4.1.1- Composição química

Uma das principais características dos pós fluxantes é sua composição química. Esta composição determina o comportamento do mesmo em relação às funções que exerce no molde de lingotamento contínuo. A tabela I mostra a composição típica de pós fluxantes para lingotamento contínuo, segundo Vieira (2002).

Tabela III-1: Faixas de composição típicas de pó fluxante (Vieira, 2002).

Constituintes	Faixa de composição química (%)
CaO	25-45
SiO ₂	20-50
Al ₂ O ₃	0-10
TiO ₂	0-5
C	1-25
Na ₂ O	1-20
K ₂ O	0-5
FeO	0-5
MgO	0-10
MnO	0-10
BaO	0-10
LiO ₂	0-4
B ₂ O ₃	0-10
F	4-10

A especificação da composição química do pó fluxante depende basicamente do tipo de aço a ser lingotado e das condições operacionais de lingotamento. A composição química afeta uma série de características importantes, tais como: taxa de fusão, viscosidade, temperatura de cristalização e de solidificação e taxa de

absorção de alumina. Cada uma destas características e os fatores que as determinam serão discutidas a seguir.

3.4.1.2- Taxa de fusão

A velocidade de formação da poça líquida de escória na superfície superior do molde é definida pela taxa de fusão da mesma. A boa lubrificação entre o molde e o metal solidificado depende de uma taxa de fusão adequada.

Quando o pó fluxante *in natura* é adicionado sobre o aço líquido no molde, o mesmo é aquecido até a temperatura em que há o início da ocorrência das reações de fusão do mesmo, gerando a formação de uma piscina de escória líquida, a qual deve ser suficiente para alimentar o espaço existente entre a pele do aço em solidificação e o molde, garantindo a lubrificação.

O controle da taxa de fusão determina a habilidade do pó fluxante em manter uma piscina de escória líquida com uma espessura estável no molde, mesmo sob condições adversas de lingotamento. Sob condições instáveis, como durante a partida da máquina, a variação de velocidade de lingotamento ou a troca da válvula submersa, o pó fluxante deve rapidamente fornecer novo líquido para lubrificação.

Existem vários testes que permitem a determinação da taxa de fusão do pó fluxante, sendo alguns deles listados a seguir:

- teste do Cone Seger e teste do botão (Branion, 1986)
- teste do cadinho (Vieira, 2002)
- teste do gotejamento de escória (Branion, 1986)

No teste do cone Seger e do botão, a taxa de fusão é determinada pelo tempo necessário para fundir uma peça de forma característica mostrada na figura 3.8. Obviamente este ensaio não representa bem as condições operacionais do pó fluxante no molde de lingotamento contínuo.

No teste do cadinho, o pó fluxante é colocado em um forno a 1400°C dentro de um cadinho de alumina por determinado tempo, após o qual o cadinho é resfriado e o material cortado ao meio. A porcentagem de pó que fundiu determina o índice da taxa de fusão.

O teste considerado mais representativo para a determinação da taxa de fusão, segundo Bezerra (2005), consiste em medir a profundidade da escória líquida no decorrer do tempo, no equipamento proposto por Kawamoto et al (1994), mostrado na figura 3.9. O ensaio requer 1 t de aço líquido, por isso é um teste caro e exige um longo tempo de preparação.

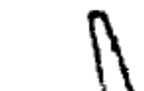





Método	Forma Inicial	Ponto de Amolecimento	Ponto de Fusão
Cone Seger	 Cone Seger	 Cone toca superfície do cadinho	 Superfície do cadinho desaparece
Botão	 Amostra Cilíndrica	 amostra cilíndrica arredondada	 Amostra em forma de hemisfério

Figura 3.8: Desenho esquemático mostrando alguns testes utilizados para avaliar a taxa de fusão de escórias (Vieira, 2002).

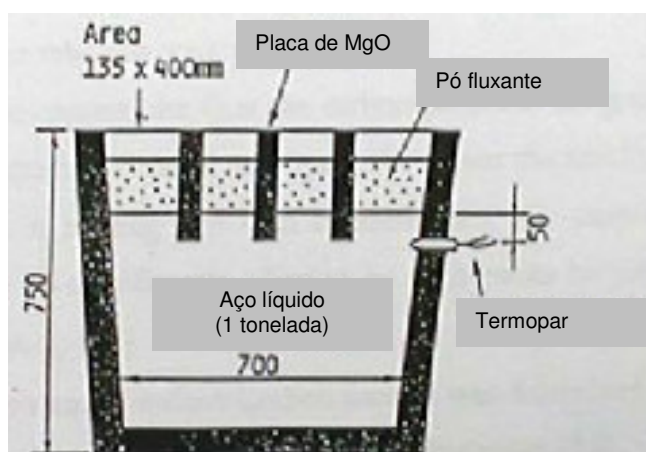


Figura 3.9: Diagrama esquemático do aparelho desenvolvido por Kawamoto et al (1994), utilizado para avaliar a taxa de fusão em pós fluxantes, segundo Bezerra (2005).

O teste do gotejamento de escória fundida utiliza um equipamento semelhante ao mostrado esquematicamente na figura 3.10. As amostras são aquecidas de 1400°C a 1500°C, fundindo o pó fluxante, que no estado líquido goteja em um recipiente onde a massa é medida continuamente. A variação da massa em função do tempo permite a avaliação da taxa de fusão.

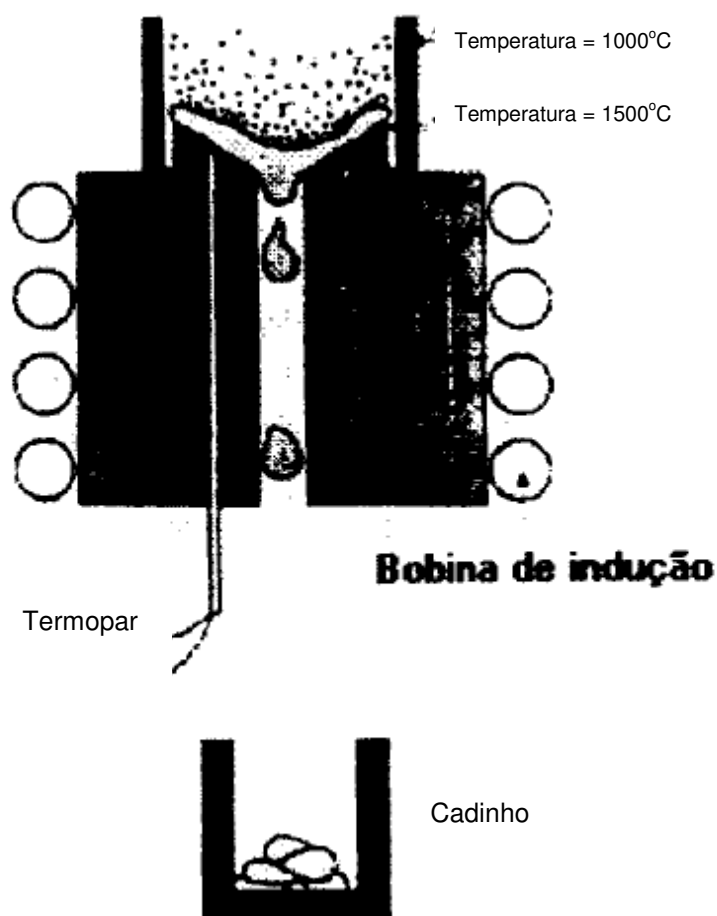


Figura 3.10: Desenho esquemático mostrando o teste de gotejamento (Vieira, 2002).

Bezerra (2005) propôs um equipamento que permite a avaliação comparativa da taxa de fusão de pós fluxantes. Este equipamento é mostrado esquematicamente na figura 3.11. O equipamento possui dois cadinhos com orifícios na parte inferior. Como as condições são as mesmas para ambos, pode-se analisar comparativamente uma determinada escória, colocada em um cadinho, utilizando outra de referência, colocada no outro.

Vieira (2002) observou que tais testes não simulam a condição do molde, porém são válidos para determinar a influência da composição química e mineralógica dos constituintes do pó fluxante e da forma, tipo e teor do carbono contido no mesmo.

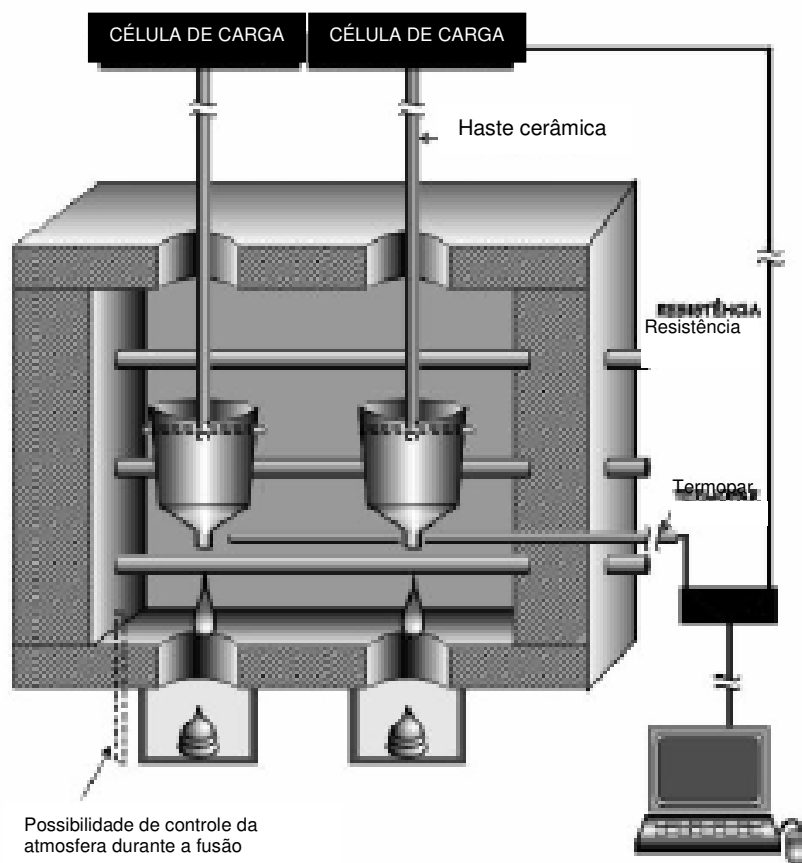


Figura 3.11: Desenho esquemático de um equipamento para avaliar taxa de fusão de escórias (Bezerra, 2005).

Tem sido observado que o carbono livre controla a taxa de fusão do pó fluxante, uma vez que, devido a seu alto ponto de fusão, forma uma barreira inerte entre partículas sólidas e gotas líquidas. A figura 3.12 mostra esquematicamente este efeito. Além do teor, o tipo de carbono também influencia na taxa de fusão.

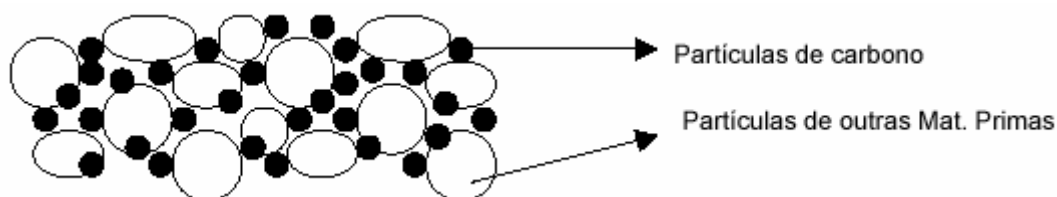


Figura 3.12: Desenho esquemático mostrando o efeito do carbono no controle da taxa de fusão do pó fluxante (Bezerra, 2005).

Segundo Vieira (2002), a velocidade de lingotamento, a frequência de oscilação do molde e as propriedades térmicas das camadas de pó (camada de pó sinterizada, pastosa e líquida) também influenciam na taxa de fusão do pó fluxante.

3.4.1.3- Viscosidade

A viscosidade caracteriza a resistência ao escoamento de um fluido quando este é submetido a uma força externa.

Em geral, a escória formada pelo pó fluxante é composta por cátions e ânions resultantes da ionização de óxidos básicos e ácidos em solução líquida. Os óxidos ácidos são aqueles que, quando dissolvidos na escória, adquirem íons de oxigênio adicionais, formando complexos aniônicos. Os óxidos ácidos mais comuns são a sílica e a alumina. Os óxidos básicos são aqueles que, quando dissolvidos na escória, fornecem os íons de oxigênio, permitindo que seu cátion possa se mover livremente. Os óxidos básicos mais importantes são o CaO, o MgO e o Na₂O.

Uma escória formada unicamente por um óxido ácido apresenta ligações químicas fortes e altamente direcionais. Como consequência, o fluxo viscoso ocorre somente pela quebra dessas ligações. A estrutura da sílica líquida, por exemplo, é semelhante a da sílica sólida, na qual cada Si⁺⁴ compartilha um elétron com cada um dos quatro íons de O⁻², que formam um tetraedro em torno do íon Si⁺⁴. A figura 3.13 mostra esquematicamente esta estrutura. A sílica fundida perde a ordem a longo alcance, porém, a ordem a curto alcance é mantida. A viscosidade da sílica líquida pura a 1940°C é de 1,5 x 10⁵ Poise (Geiger e Poirier, 1980).

Quando CaO ou CaF₂, ou outro óxido divalente básico do mesmo tipo, é adicionado, os íons Ca⁺² são acomodados nos interstícios da estrutura do silicato. O íon O²⁻ entra na rede e provoca a separação de dois tetraedros de sílica, como é mostrado na figura 3.14. A quebra progressiva da cadeia tridimensional resulta em uma diminuição da viscosidade (Geiger e Poirier, 1980).

3.5 – Modelamento Físico

O modelamento físico é uma importante ferramenta na solução de problemas industriais. É capaz de fornecer resultados com grande precisão em tempo reduzido e a baixo custo. A construção e condução de experimentos em modelos físicos para estudos de processos industriais se baseiam no princípio da similaridade.

Segundo Viena (1989), dois sistemas são similares quando exibem uma relação constante entre os valores de grandezas correspondentes, denominada relação de similaridade ou escala. O princípio da similaridade não envolve apenas características geométricas, mas também características mecânicas, térmicas e químicas.

A similaridade geométrica exige que as razões entre dimensões correspondentes sejam sempre constantes.

A similaridade mecânica compreende as similaridades estática, cinemática e dinâmica.

Se dois sistemas são geometricamente similares, também são estaticamente similares. A similaridade cinemática existe quando, em sistemas geometricamente similares, partículas correspondentes traçam trajetórias geometricamente similares no mesmo intervalo de tempo. A similaridade dinâmica é relacionada às forças que aceleram e retardam massas que se movimentam. Se dois sistemas são geometricamente e cinematicamente similares, também o são dinamicamente. A figura 3.15 mostra esquematicamente esta condição. A figura 3.15 (a) mostra a movimentação de uma partícula hipotética do vértice 1 ao vértice 2 em um elemento de volume também hipotético, em um tempo $t_1 \Delta t$. Na escala reduzida deste mesmo elemento de volume mostrada na figura 3.15 b, a movimentação de uma partícula equivalente dos vértices 1' ao vértice 2' deve levar o tempo relativo à relação de proporcionalidade. No caso em que é usada a similaridade de Froude, o tempo t_2 deve ser relacionado com a raiz quadrada do fator de escala para que a similaridade dinâmica seja atendida.

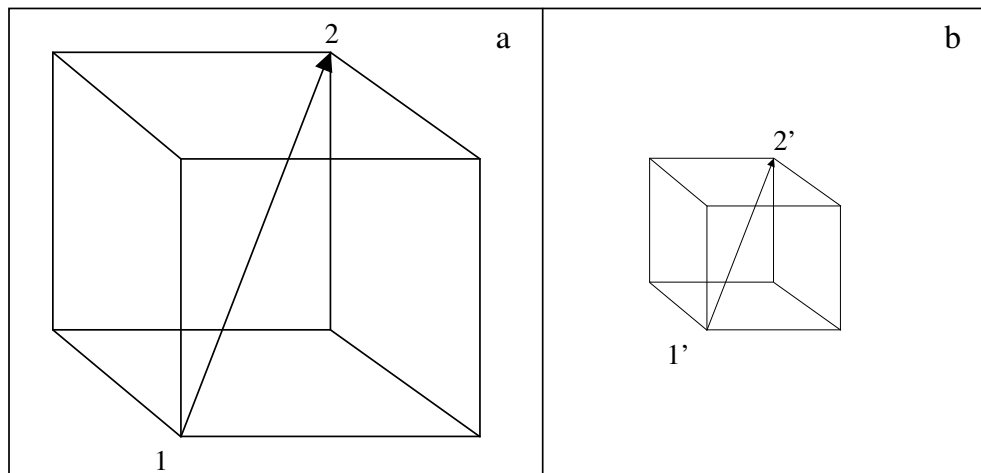


Figura 3.15: Desenho esquemático mostrando condição de similaridade dinâmica.

As condições de similaridade dinâmica são usualmente expressas através de números adimensionais, que estabelecem relações entre as forças relevantes que atuam nos sistemas. Nos modelos físicos para estudo do escoamento do aço em reatores de lingotamento contínuo, a igualdade dos números de Reynolds e Froude com o sistema real são usados como critério de similaridade.

Em modelos físicos de processos que envolvam o aço, usando água como fluido, quando se usa escala reduzida, é impossível conseguir igualdade simultânea destes dois números. Neste caso, deve-se optar por aquele que representa melhor o sistema de interesse. Para sistemas metalúrgicos, tem-se mostrado que a igualdade do número de Froude é a que melhor representa a similaridade entre o modelo físico e o industrial (Wollmann, 1999). Nesse caso, ao desconsiderar o número de Reynolds, considera-se que a força de inércia é muito superior a força viscosa. De fato, isso ocorre em regimes turbulentos, porém, em regimes laminares, a força viscosa é equivalente a força de inércia. No sistema a ser estudado neste trabalho, prevalece o regime turbulento.

O número de Reynolds é normalmente utilizado como critério para estabelecimento do regime de escoamento, laminar ou turbulento, no escoamento de fluidos. Ele é um número adimensional definido genericamente pela equação (1) a seguir:

$$Re = \frac{V \cdot L \cdot \rho}{\mu} \quad (1)$$

Onde:

Re= número de Reynolds;

L= dimensão característica (definida de acordo com a configuração do sistema);

V= velocidade média do fluido;

ρ = densidade do fluido;

μ = viscosidade dinâmica do fluido.

O número de Froude é também um número adimensional, definido pela equação a seguir:

$$Fr = \frac{V^2}{g \cdot L} \quad (2)$$

Fr= número de Froude;

V= velocidade média do fluido;

g= aceleração da gravidade;

L= dimensão característica (definida de acordo com a configuração do sistema).

Em estudos de escoamento do aço, a água pode ser usada como fluido, pois possui aproximadamente a mesma viscosidade cinemática do aço. A viscosidade cinemática é definida como a razão entre a viscosidade dinâmica e a densidade do fluido, podendo também ser chamada de difusividade de momento.

3.6- Modelamento Matemático de Processos

A simulação de processos é uma técnica que abrange diversas áreas do conhecimento e que encontra aplicações em diversos ramos de atividade. Simular um processo (física ou matematicamente) envolve o conhecimento prévio de seu

funcionamento para que os fenômenos nele envolvidos possam ser estudados e compreendidos.

Na simulação matemática, os processos de interesse são representados por meio de equações que regem os fenômenos envolvidos. A solução destas equações permite realizar previsões sobre o comportamento dos processos em diferentes condições operacionais e definir a melhor delas.

A simulação matemática de processos vem apresentando um crescimento acentuado à medida que a tecnologia computacional é também desenvolvida, suprimindo a necessidade de maiores velocidades de processamento, o que permite que simulações inviáveis de serem realizadas há 10 anos atrás possam ser hoje feitas em computadores pessoais. O desenvolvimento e disseminação de softwares comerciais também têm contribuído largamente para o crescimento do uso de modelos matemáticos como ferramenta de estudo e desenvolvimento de processos.

3.6.1- Breve histórico da fluido-dinâmica computacional

Os fundamentos da fluido-dinâmica computacional (CFD) nasceram no início do século XIX com o desenvolvimento das conhecidas equações de Navier-Stokes que descreve, a partir de uma equação diferencial, o processo de transferência de momento.

Com o surgimento dos primeiros computadores, a solução numérica destas equações pôde ser obtida para processos complexos, que não podiam ser resolvidos de forma analítica até então. Deste então, os computadores são utilizados como ferramentas para resolver os problemas de escoamento de fluidos e programas tem sido desenvolvidos ou para solucionar um problema específico ou um grupo específico de problemas.

A partir da metade da década de 70, a complexidade matemática para generalizar os programas até então desenvolvidos começou a ser entendida e, a fluido-dinâmica computacional, como conhecida hoje, teve seu início. Estes programas desenvolvidos para a solução de problemas mais gerais começaram a aparecer no início da década de 80, mas nem os computadores tinham ainda uma capacidade de

processamento necessária para solucionar problemas mais complexos, nem se tinha ainda um conhecimento profundo da fluido-dinâmica, o que fazia com que os métodos numéricos ainda fossem vistos como métodos apenas para a pesquisa científica.

Com o desenvolvimento dos computadores (atualmente com alta performance de processamento, elementos gráficos e alta capacidade de armazenamento de dados), esta idéia vem sendo mudada e a fluido-dinâmica computacional vem sendo encarada como uma importantíssima ferramenta não só de pesquisa, mas também de desenvolvimento de processos, com um baixo custo efetivo e alta precisão na obtenção e análise dos resultados.

Atualmente a fluido-dinâmica computacional é empregada na indústria da construção civil, automobilística, siderúrgica, eletrônica, saúde e segurança, na medicina, entre outras.

Os fundamentos desta importante ferramenta serão discutidos no próximo tópico.

3.6.2- Formulação matemática

A simulação numérica dos fenômenos de transferência de calor, escoamento de fluidos e outros processos relacionados, teve seu início quando as leis que governam tais processos foram expressas matematicamente, na maioria das vezes, por meio de equações diferenciais. De uma forma geral, estes fenômenos podem ser expressos pela equação da continuidade, adotando o sistema de coordenadas cartesiano .

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\phi) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j \phi) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\Gamma \frac{\partial \phi}{\partial x_j} \right) + S\phi \quad (3)$$

onde:

t: tempo;

x_j : coordenada espacial (x, y, z);

ρ : densidade;

u_j : componente da velocidade em cada uma das direções (u, v, w);

Φ : termo geral para denotar a variável dependente;

Γ : coeficiente de difusão para a variável dependente;

S_ϕ : termo fonte.

Nesta equação são representados o termo transiente (1º termo), o termo convectivo (2º termo), o termo difusivo (3º termo) e o termo fonte (4º termo da equação).

As equações de conservação de momento, de espécies químicas, de energia e as equações relacionadas à turbulência do fluido, podem ser todas expressas pela equação (3).

Substituindo os termos gerais (x_i , Φ , Γ , S) por aqueles relacionados à equação de transporte de interesse, pode-se reproduzir todas as equações de conservação relevantes. A tabela III-2 apresenta uma lista de possíveis variáveis dependentes e seus respectivos termos fontes e coeficientes de difusão.

O simples fato das equações diferenciais que descrevem os fenômenos citados acima poderem ser expressas por uma mesma equação geral, onde se muda apenas o significado físico de alguns termos, permite o desenvolvimento de algoritmos gerais capazes de resolver tais equações, dando origem ao que é atualmente conhecido como fluido dinâmica computacional (CFD), que possibilita o estudo de processos e variáveis de processos a partir do seu modelamento matemático.

Tabela III-2: Definição dos termos das equações gerais de conservação.

Equação de Conservação	Variável Dependente	Coeficiente de Difusão	Termo Fonte (em notação tensorial cartesiana)
Massa (continuidade)	1	0	0
Momento (direção X)	U	μ_{ef}	$\frac{\partial}{\partial x_i} \left(\Gamma_\phi \frac{\partial u_i}{\partial x} \right) - \frac{\partial}{\partial x} \left(P + \frac{2}{3} \rho K \right) + \rho g_x$
Momento (direção Y)	V	μ_{ef}	$\frac{\partial}{\partial x_i} \left(\Gamma_\phi \frac{\partial u_i}{\partial y} \right) - \frac{\partial}{\partial y} \left(P + \frac{2}{3} \rho K \right) + \rho g_y$
Momento (direção Z)	W	μ_{ef}	$\frac{\partial}{\partial x_i} \left(\Gamma_\phi \frac{\partial u_i}{\partial z} \right) - \frac{\partial}{\partial z} \left(P + \frac{2}{3} \rho K \right) + \rho g_z$
Energia	H	$\Gamma_{T,ef}$	0

$\mu_{ef} = \mu_{molecular} + \mu_{turbulenta}$ P = pressão k = energia cinética de turbulência

A solução analítica da equação vista anteriormente permite o cálculo do valor da variável ϕ em qualquer região do domínio estudado. Em condições de interesse prático, é raro ter solução analítica para os problemas. Nesse caso, uma solução numérica deve ser obtida. A primeira etapa para a obtenção dessa solução é a discretização da equação que, dá então, origem à um sistema equações lineares, que representa o comportamento da variável dependente ϕ em um domínio discreto. Neste caso, a variável ϕ é calculada em pontos discretos do domínio, a partir da solução de equações algébricas para a obtenção dos valores desta variável.

Segundo Patankar (1980), a discretização das equações diferenciais pode ser realizada de diferentes formas. As três técnicas mais utilizadas são a de diferenças finitas, elementos finitos e volumes finitos. A técnica de volumes finitos privilegia o entendimento dos conceitos físicos, já que parte da idéia de se realizar balanços em um elemento de controle.

3.6.3- Vantagens e limitações do modelamento matemático

Segundo Patankar (1980), a principal vantagem do modelamento matemático está relacionada ao seu baixo custo e rapidez na obtenção de resultados.

Na maioria dos casos, o custo envolvido no desenvolvimento de modelos matemáticos é muitas ordens de grandeza menor que o custo envolvido na investigação experimental. O custo experimental também aumenta bruscamente à medida que o processo aumenta fisicamente de tamanho e os estudos tornam-se mais complexos. Além disto, enquanto os preços de muitos itens utilizados para a aquisição de dados experimentais têm aumentado, os custos envolvidos com a aquisição de tecnologias computacionais cada vez mais avançadas tem sido reduzido. O estudo de diferentes configurações e procedimentos operacionais adotados para o processo pode também ser realizado em poucos dias ou semanas utilizando modelos matemáticos. Por outro lado, um trabalho experimental para investigar os mesmos efeitos poderia levar muito mais tempo.

Outro fator que chama a atenção para os modelos numéricos é a facilidade de obtenção de informações mais completas sobre o sistema em estudo. Diferente da

situação encontrada em experimentos, não existe dificuldade de se obter dados em qualquer parte do domínio nos modelos computacionais e não existe a preocupação de não perturbar o escoamento com a utilização de aparatos para aquisição de dados.

Finalmente, os modelos matemáticos possuem a capacidade de simular situações ideais (que podem ser utilizadas como parâmetro de comparação com o processo real) e estão livres de erros de medidas, inerentes a qualquer equipamento de medição utilizado para a aquisição de dados experimentais, tanto em modelos físicos (escala reduzida e plena) quanto no processo real.

As vantagens apresentadas pelo uso de modelos matemáticos são impressionantes, mas isso não quer dizer que a investigação experimental deixe de ser importante no estudo de processos. O conhecimento dos pontos fortes e fracos de cada uma das técnicas é essencial para a escolha da abordagem a ser utilizada e de como desenvolver um trabalho associando as duas técnicas.

Neste sentido, não existe dúvida de que a experimentação é um método muito importante para a obtenção de dados sobre um fenômeno físico. Por isso, a validação dos modelos matemáticos, baseada em dados experimentais, é necessária. Oberkampf (2002) propôs em seu trabalho um esquema que ilustra perfeitamente o procedimento para estudo de processos e desenvolvimento de modelos computacionais (figura 3.16)

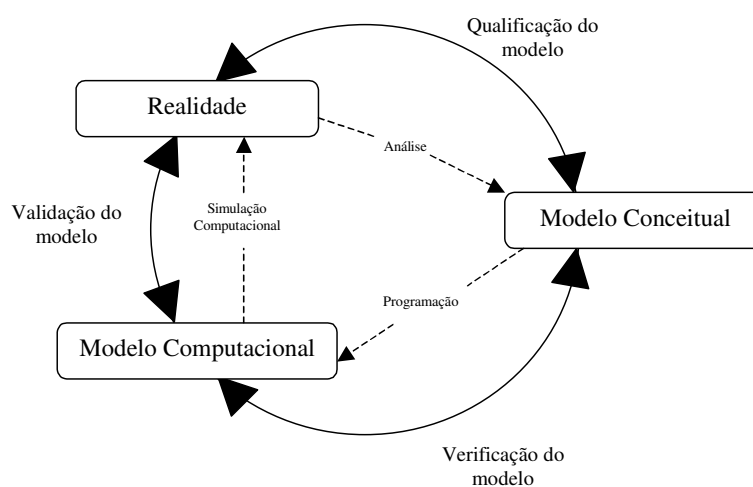


Figura 3.16- Esquema das etapas de modelamento e simulação (Oberkampf, 2002).

3.6.4- Modelos de turbulência

Um assunto importante quando se trata de modelamento matemático do escoamento de fluidos é a incorporação da turbulência. A turbulência está associada à flutuações de velocidade extremamente elevadas em um ponto, o que dificulta a abordagem dos problemas através das equações que regem o escoamento em sua forma laminar.

Ao longo dos anos, várias propostas de como modelar a turbulência têm aparecido com a finalidade de tornar as previsões obtidas pelos modelos matemáticos mais realistas. Dentre estas propostas, a que tem sido mais utilizada é a de Boussinesq (Tavares, 2002). Nesta abordagem, as equações que regem os escoamento são utilizadas como descritas em sua forma laminar e, ao invés de utilizar-se a viscosidade dinâmica, utiliza-se uma viscosidade efetiva, que nada mais é que a soma da viscosidade dinâmica e a viscosidade turbulenta.

Neste caso, uma série de abordagens têm sido desenvolvidas para modelar esta viscosidade turbulenta. Estas abordagens são divididas em três categorias de acordo com o número de equações diferenciais adicionais utilizadas a avaliação da viscosidade turbulenta. Estes três grupos são:

- modelo de zero equação: a viscosidade turbulenta é constante e estipulada de forma arbitrária, visando obter concordância entre os valores previstos pelo modelo matemático e os valores experimentais. Este conceito foi utilizado inicialmente para modelar a turbulência e funciona relativamente bem em sistemas onde o transporte por convecção é predominante;

- modelo de uma equação: neste modelo, para se calcular a viscosidade turbulenta, uma equação diferencial a mais é resolvida (além das equações de conservação de massa e momento), sendo ainda necessário especificar o valor de um parâmetro denominado comprimento de mistura;

- modelo de duas equações: para estimar o valor da viscosidade turbulenta, este modelo utiliza-se de duas equações diferenciais adicionais (uma para a energia cinética de turbulência – k , e outra para a taxa de dissipação da energia cinética de turbulência – ϵ). Neste caso, não é necessário arbitrar valores. Nesta categoria,

encontram-se os populares modelos $k-\varepsilon$ (com suas várias formulações), cujo emprego já é bastante difundido.

Apesar do grande sucesso dos modelos de turbulência $k-\varepsilon$ na previsão de características de escoamento em diversos sistemas diferentes, nenhum deles fornece resultados quantitativamente corretos para uma faixa ampla de aplicações. Basicamente, o que diferencia os modelos do tipo $k-\varepsilon$ é a forma como eles tratam o escoamento próximo às paredes. Alguns destes modelos utilizam funções de parede, outros fazem uma correção da viscosidade turbulenta em função do número de Reynolds turbulento. Estas funções não são de aplicação geral, o que exige que os resultados obtidos sejam analisados e comparados com dados experimentais para validar o modelo empregado, buscando o modelo que melhor representa a situação real.

3.7- Visualização de escoamento

Segundo Andrade (1984), a simples observação visual durante as experiências permite uma avaliação aproximada do fluxo e nível de turbulência no interior de um modelo físico de um molde de lingotamento contínuo, mas ela deixa de ser eficaz quando se deseja uma avaliação mais precisa. Nestes casos, devem ser utilizadas técnicas que facilitem a visualização do fluxo. Essas técnicas podem ser divididas em três categorias, discutidas a seguir.

A utilização de soluções coloridas não é conveniente para avaliar a estrutura do fluxo devido à sua rápida dispersão causada pela difusão. No entanto, essa técnica permite delinear com boa precisão o contorno inicial do jato na saída da válvula submersa, quando o traçador é adicionado antes da mesma.

A utilização de linhas coloridas com uma das extremidades presa junto a entrada da corrente, no caso na saída da válvula submersa, não é conveniente quando o comprimento dessas linhas é grande. Neste caso sempre ocorre a colagem das mesmas na parede do molde ou mesmo o embaraçamento. Se é adotado algum dispositivo de modo que o comprimento das linhas possa ser reduzido, a técnica pode ser empregada sem os problemas citados. No entanto, ela passa a ter limitações,

porque proporcionará uma visualização das linhas de fluxo quase pontuais, não permitindo uma avaliação mais ampla.

A utilização de partículas sólidas em suspensão na água possibilita uma melhor visualização do fluxo. Neste caso, as partículas devem ter uma densidade a mais próxima possível à da água, a fim de neutralizar a influência da sua flutuação ou decantação.

Para a avaliação da velocidade do fluxo existem várias técnicas, além da visualização do escoamento, que podem ser utilizadas, sendo sua adequabilidade uma função do problema específico.

A utilização de tubos de Pitot é uma técnica largamente aplicada, porém apresenta sérios inconvenientes com relação à dificuldade de posicionamento, necessidade de alinhamento com a direção do fluxo e sensibilidade insuficiente para pequenas variações de velocidade.

Outros métodos que provavelmente oferecem maior precisão de medida de velocidade consistem na utilização de anemômetros de fio quente, sondas de termistores ou anemômetro a laser.

A visualização do escoamento por outro lado mostra-se uma possibilidade mais simples e com maior flexibilidade. Utilizando partículas sólidas em suspensão pode também ser utilizada na avaliação da velocidade do fluxo, na possibilidade de se obter imagens em intervalos suficientemente curtos e conhecidos de tempo e na identificação de cada uma das partículas no reator após a passagem do intervalo de tempo. Uma grande vantagem neste método é a possibilidade de se obter o perfil completo das velocidades associado à estrutura do fluxo. A dificuldade nesta técnica é a identificação das partículas, quando as mesmas possuem dimensões reduzidas.

3.8- Escoamento bifásico

Nos reatores metalúrgicos é muito comum a presença de duas, ou mais, fases distintas. No molde de lingotamento contínuo, as fases presentes são pó fluxante líquido, aço líquido e gás, quando injetado na válvula submersa.

Um dos aspectos mais importantes em escoamentos bifásicos é a tensão interfacial entre as duas fases presentes. Segundo Rabockai (1979), quando se tem dois líquidos imiscíveis α e β em contato, uma molécula que se encontre na interface estará submetida, de um lado, à força de atração das moléculas da fase α , e do outro lado, à atração das moléculas da fase β . As duas forças atuam em sentidos opostos, neutralizando-se parcialmente, e a tensão interfacial apresentará, normalmente, um valor intermediário às tensões superficiais individuais.

Em virtude da atração existente entre as moléculas de duas fases líquidas, em contato entre si, é necessário realizar trabalho para separar as duas fases. Esse trabalho, referido à área unitária, é denominado trabalho de adesão. Quando se destrói uma interface líquido-líquido, separando-se as fases, duas interfaces líquido-ar são formadas (uma para cada fase líquida). Então a pressão e temperatura constantes, o trabalho de adesão será:

$$\tau_a = \gamma_\alpha + \gamma_\beta - \gamma_{\alpha\beta} \quad (4)$$

onde:

τ_a é o trabalho de adesão (N/m);

γ_α é a tensão superficial de α (N/m);

γ_β é a tensão superficial de β (N/m);

$\gamma_{\alpha\beta}$ é a tensão interfacial de um sistema $\alpha\beta$ (N/m).

O trabalho de adesão não pode ser medido diretamente, mas pode ser calculado pela equação (4) descrita anteriormente.

O trabalho τ_c , envolvido para separar em duas partes uma coluna de área unitária do mesmo líquido é denominado trabalho de coesão. Nesta operação são produzidas duas interfaces líquido-ar, cada uma de área unitária. Portanto, a pressão e temperatura constantes, o trabalho de coesão será:

$$\tau_c = 2 \cdot \gamma \quad (5)$$

onde:

τ_c é o trabalho de coesão (N/m);

γ é a tensão superficial do líquido (N/m).

Quando o trabalho de adesão é inferior ao trabalho de coesão, é possível que haja emulsificação de uma fase líquida sobre a outra, o que no presente caso, significa emulsificação do pó fluxante líquido no aço.

3.9 – Transferência de Calor no Molde

Segundo Vieira (2002), trabalhos desenvolvidos na área de lingotamento contínuo enfatizam a importância de se conhecer o comportamento térmico do aço para uma melhor compreensão do pó fluxante e da oscilação do molde na qualidade superficial da placa.

No lingotamento contínuo o resfriamento da placa lingotada é dividido em três diferentes etapas, o resfriamento primário, o resfriamento secundário e o resfriamento por radiação e convecção livre. Na primeira etapa, o calor é retirado em um molde refrigerado a água, na segunda, sprays de água são direcionados na placa, retirando calor, enquanto na terceira etapa a retirada de calor ocorre por meio de convecção livre. A figura 3.17 mostra esquematicamente estas três etapas.

Segundo Pinheiro (1988), o molde deve ser capaz de extrair suficiente calor do metal para que, na sua saída, exista uma camada sólida com espessura capaz de suportar as tensões de extração do veio e a pressão ferrostática do metal líquido. Essa extração de calor também deve ser uniforme, evitando a formação de uma pele

solidificada de espessura reduzida, que poderiam romper, resultando no vazamento do aço, ou provocar a geração de trincas internas.

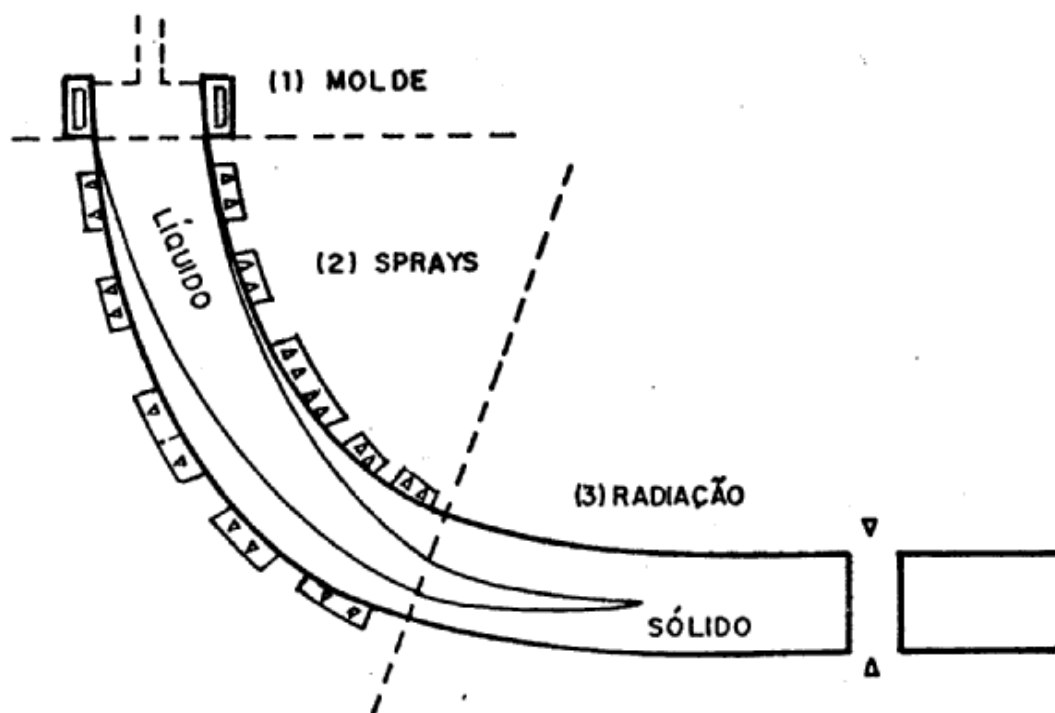


Figura 3.17 Desenho esquemático mostrando as três etapas de resfriamento no lingotamento contínuo (Pinheiro, 1988).

O entendimento dos mecanismos de transferência de calor no molde é essencial para o controle do processo. Muitos estudos foram feitos com o objetivo de esclarecer a natureza, a intensidade e a repartição do fluxo de calor neste reator. Parâmetros metalúrgicos ou tecnológicos podem afetar também este fluxo. A figura 3.18 mostra esquematicamente a seqüência de etapas pelas quais o calor é transferido do metal líquido para o molde. Estas etapas são listadas a seguir:

- convecção no líquido
- condução no sólido
- condução através de um filme lubrificante
- condução e radiação através de "gaps" de gases
- condução pela parede do molde
- convecção na face refrigerada do molde

Segundo Pinheiro (1988), a velocidade de lingotamento é a variável que exerce maior influência sobre o fluxo de calor. A figura 3.19 mostra a influência da velocidade

de lingotamento sobre o fluxo de calor, enquanto a figura 3.20 mostra a influência da velocidade de lingotamento sobre a temperatura do molde.

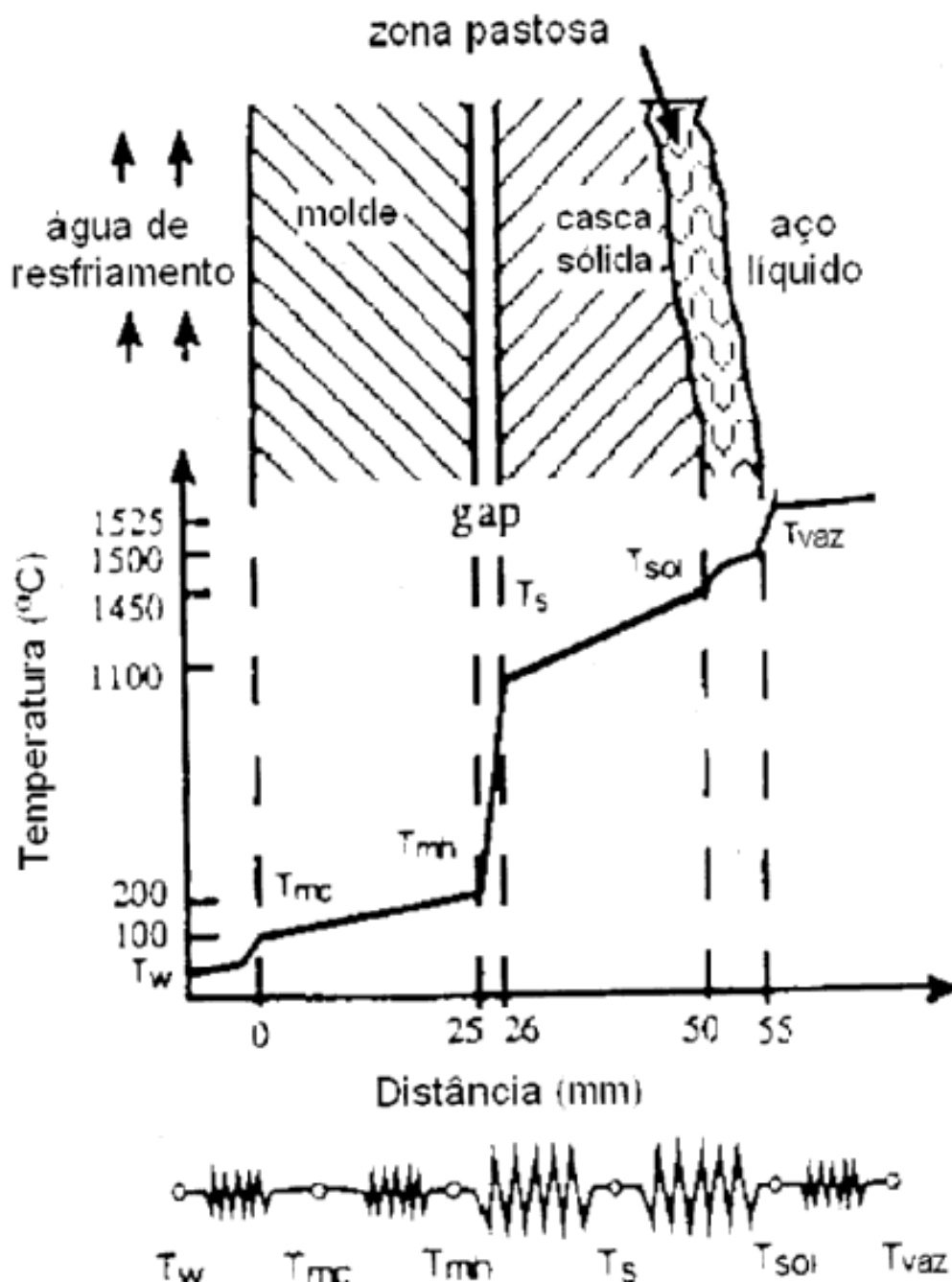


Figura 3.18: Resistências térmicas ao fluxo de calor no molde (Penna, 2005).

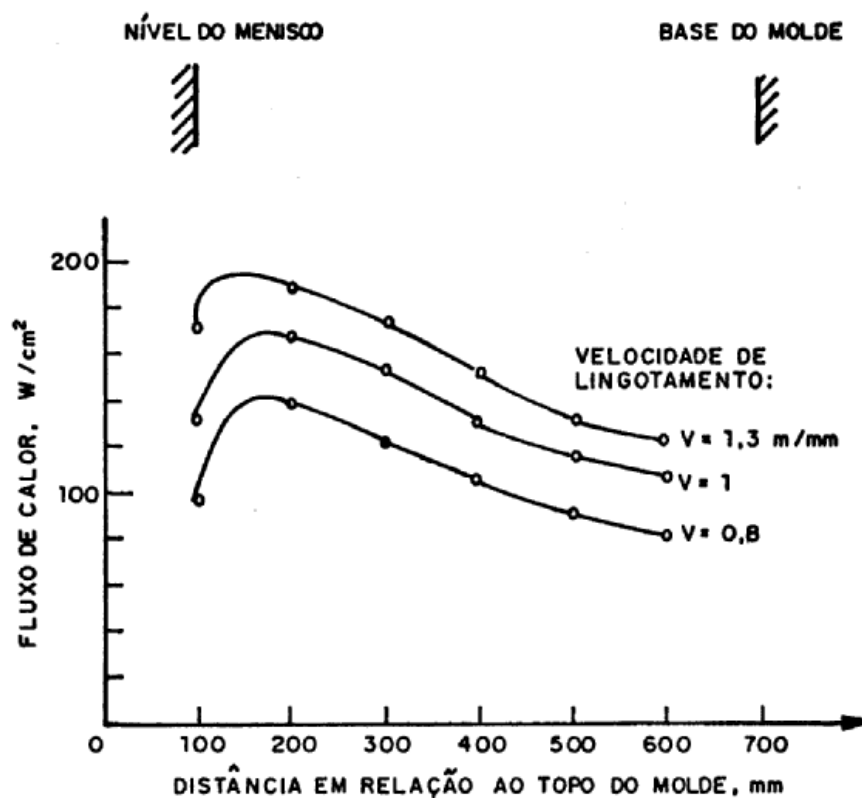


Figura 3.19: Gráfico mostrando o fluxo de calor em função da distância em relação ao topo do molde para diferentes velocidades de lingotamento (Pinheiro, 1988).

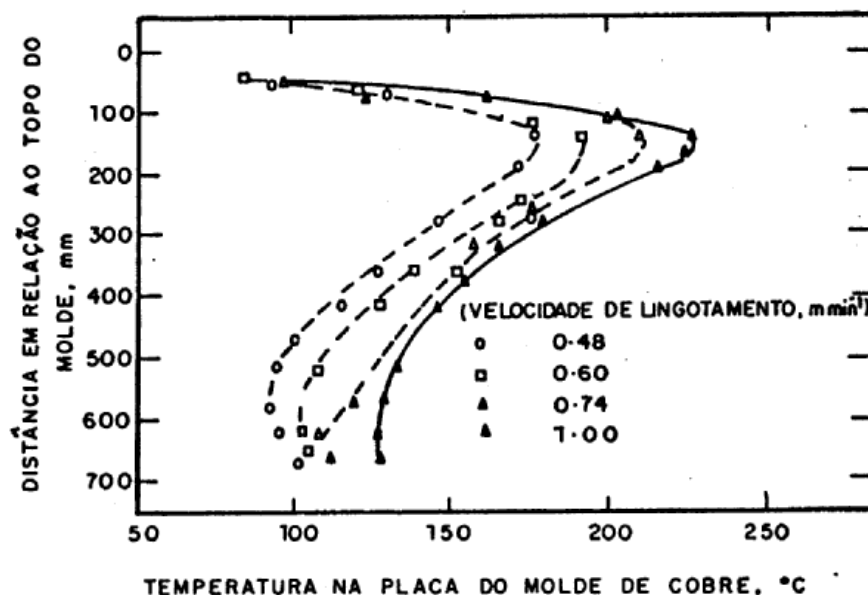


Figura 3.20: Gráfico mostrando a temperatura do molde em função da distância em relação ao topo do molde de lingotamento (Pinheiro, 1988).

3.10 – Defeitos Originados na Solidificação

Segundo Vieira (2002), alguns defeitos são originados em decorrência da solidificação irregular no menisco, outros se originam após a solidificação. Estudos realizados por Wolf (1991) associam o mecanismo de formação de defeitos com as temperaturas de fragilização. Três faixas de temperatura de fragilização são propostas:

- faixa de temperatura de fragilização I (TFRI): está situada entre 1200^oC e temperatura de liquidus do aço. A nucleação de trincas nesta região está correlacionada ao crescimento irregular da estrutura dendrítica colunar primária;
- faixa de temperatura de fragilização II (TRFII): ocorre entre 900 e 1200^oC. Esta faixa caracteriza-se pela precipitação de elementos residuais como enxofre, fósforo e manganês no contorno de grãos grosseiros de austenita, criando campos de tensão que podem propiciar a geração de trincas. A formação de marcas de oscilação profundas ou depressões reduzem localmente a taxa de refrigeração e propicia a geração de grãos grosseiros de austenita;
- faixa de temperatura de fragilização III (TRFIII): ocorre entre 600 e 900^oC. Mecanismo semelhante ao descrito para TRFII, sendo que nesta região nitreto de alumínio, nitreto de boro e nitrogênio é que precipitam nos contornos de grãos.

Na tabela III-3 pode-se observar a correlação entre os tipos de trinca, a faixa de temperatura de fragilização e o tipo de microestrutura.

Tabela III-3- Defeitos versus temperatura de fragilização (Wolf, 1991).

Tipo de Trinca	Microestrutura	TFR
Longitudinal de quina	Colunar dendrítica	I
Subsuperficial de quina	Colunar dendrítica	I
Agarramento transversal	Colunar dendrítica	I
Longitudinal	Grãos grosseiros de austenita	II
Estrela	Grãos grosseiros de austenita	I, II
Transversal de Trinca	Grãos grosseiros de austenita	I, II, III

Em aços que possuem tendência a contração, formam marcas de oscilação profundas, propiciando o aparecimento de grãos grosseiros e cosequentemente trincas explicadas pela TRFII e TRFIII. Aços com tendência ao agarramento são

sensíveis aos esforços gerados no molde durante a oscilação, o que pode ocasionar em irregularidades no crescimento colunar interdendrítico. As trincas que ocorrem neste tipo de aço são descritas pelo mecanismo TFRI.

3.11 – Formação de Vórtice/Emulsificação no Molde de Lingotamento Contínuo

Segundo He et al (1993), a formação de vórtices é um fenômeno que pode ocorrer no molde de lingotamento contínuo, podendo contribuir significativamente na emulsificação do pó fluxante, diminuindo a limpidez do aço.

A formação do vórtice pode ser associada ao escoamento do aço no reator. A observação do escoamento do aço em um molde real, durante o processo de lingotamento se mostra impossível, por esta razão He (1993) realizou experimentos utilizando modelamento físico a frio em escala plena, permitindo que fossem atendidos os critérios de similaridades de Reynolds e Froude simultaneamente.

A formação do vórtice exige que exista um componente de velocidades rotacional, logo, a existência do vórtice no molde de lingotamento contínuo deve ocorrer na região onde existe um fluxo rotacional que irá gerar uma força cisalhante na interface metal pó-fluxante líquido. A figura 3.21 mostra o típico padrão de escoamento em um molde de lingotamento contínuo de placas. Observando esta figura, pode-se notar que dois fluxos de direções opostas interagem próximo à válvula submersa, o que pode gerar um componente rotacional de velocidade e, conseqüentemente, uma força cisalhante, logo, se houver a formação de vórtice, será nesta região.

Os primeiros resultados obtidos por He et al (1993) confirmaram a ocorrência de vórtice próximo à válvula submersa em condições inferiores às normais de lingotamento. A posição exata na qual ocorrem os vórtice depende das condições de escoamento no interior do molde.

Quando a válvula submersa é posicionada fora do centro do molde, são formados fluxos rotacionais, a partir do encontro do fluxo forte com o fluxo suave, como é mostrado esquematicamente na figura 3.22.

Segundo Tsukihashi (2005), o escoamento do aço líquido no molde de lingotamento contínuo é instável e existem diferentes tipos de escoamento, especialmente para altas velocidades de lingotamento. São razões para a formação de vórtice o posicionamentos da válvula submersa fora do centro, oscilações periódicas e randômicas do nível, turbulência no menisco, entre outras.

Segundo Wang (1990), a maior parte dos defeitos localizados na metade da espessura de placas podem ter como fonte, a existência de vórtice, que ocasionaram a inclusão de partículas não metálicas na placa.

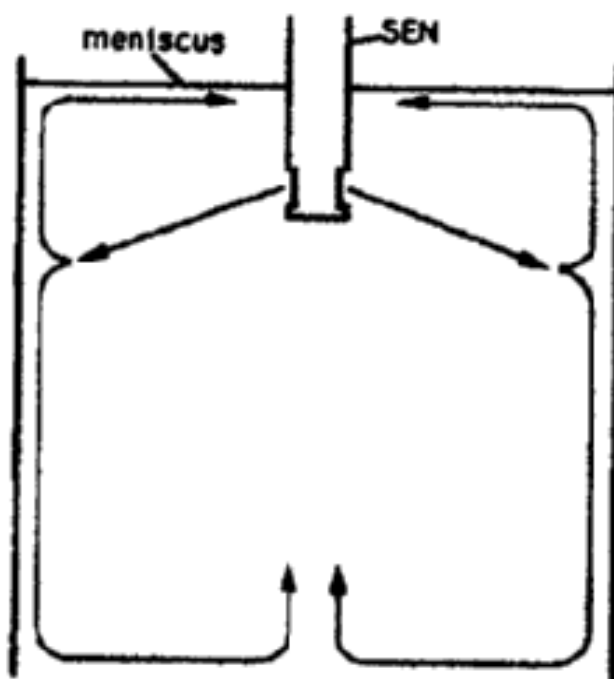


Figura 3.21: Desenho esquemático mostrando o fluxo de aço em um molde (He, 1993).

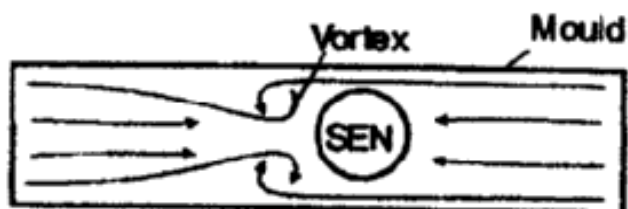


Figura 3.22 Desenho esquemático mostrando o mecanismo de formação de vórtice (He, 1993).

4 – METODOLOGIA

Neste item serão apresentados os equipamentos e o procedimento experimental para a realização dos testes relacionados ao estudo do escoamento bifásico no molde do equipamento de lingotamento contínuo de placas, utilizando modelamento físico.

4.1 – Modelo Físico da Instalação de Lingotamento

O modelo físico do equipamento de lingotamento contínuo de placas, localizado no LaSiP (Laboratório de Simulação de Processos do Departamento de Engenharia Metalúrgica da UFMG), foi baseado em um equipamento industrial localizado no estado de Minas Gerais. Foi construído em escala reduzida de 1:3, em acrílico cristal, o que permite a visualização do escoamento em seu interior. A operação do modelo foi completamente automatizada e integrada por um sistema de cartões de entrada e saída monitorados e controlados por um programa que simula o funcionamento de um PLC “program logical controlled”. A figura 4.1 mostra a fotografia dos modelos físicos. A figura 4.2 mostra a tela do painel de controle, que é utilizado durante a operação do sistema e os cartões de entrada e saída de sinal.

O controle do nível de fluido no molde, essencial para o desenvolvimento do trabalho, é feito através de um procedimento automatizado. Isso garante repetibilidade aos experimentos realizados.

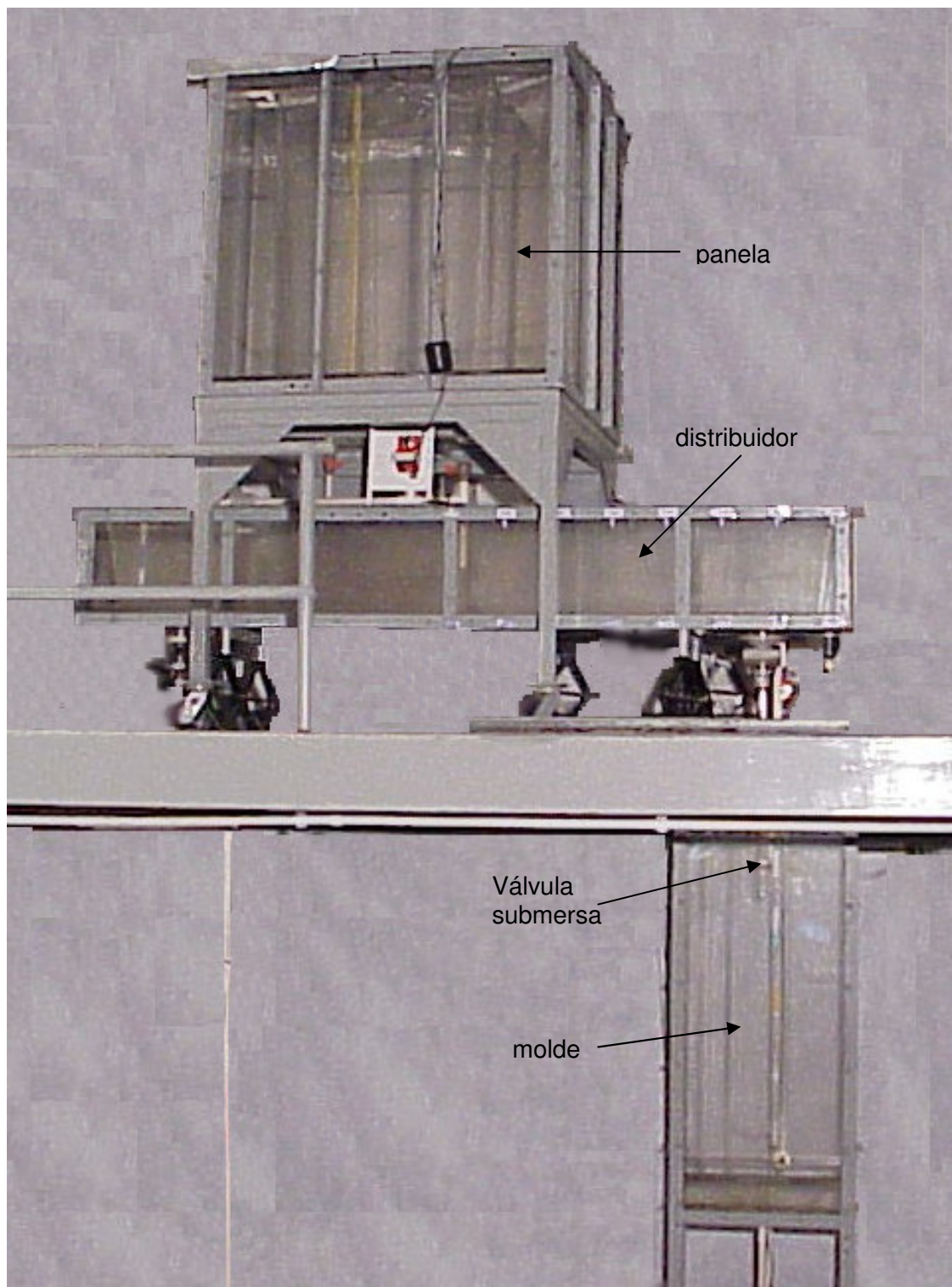


Figura 4.1: Fotografia do modelo físico de um equipamento de lingotamento contínuo de placas localizado no LaSiP.

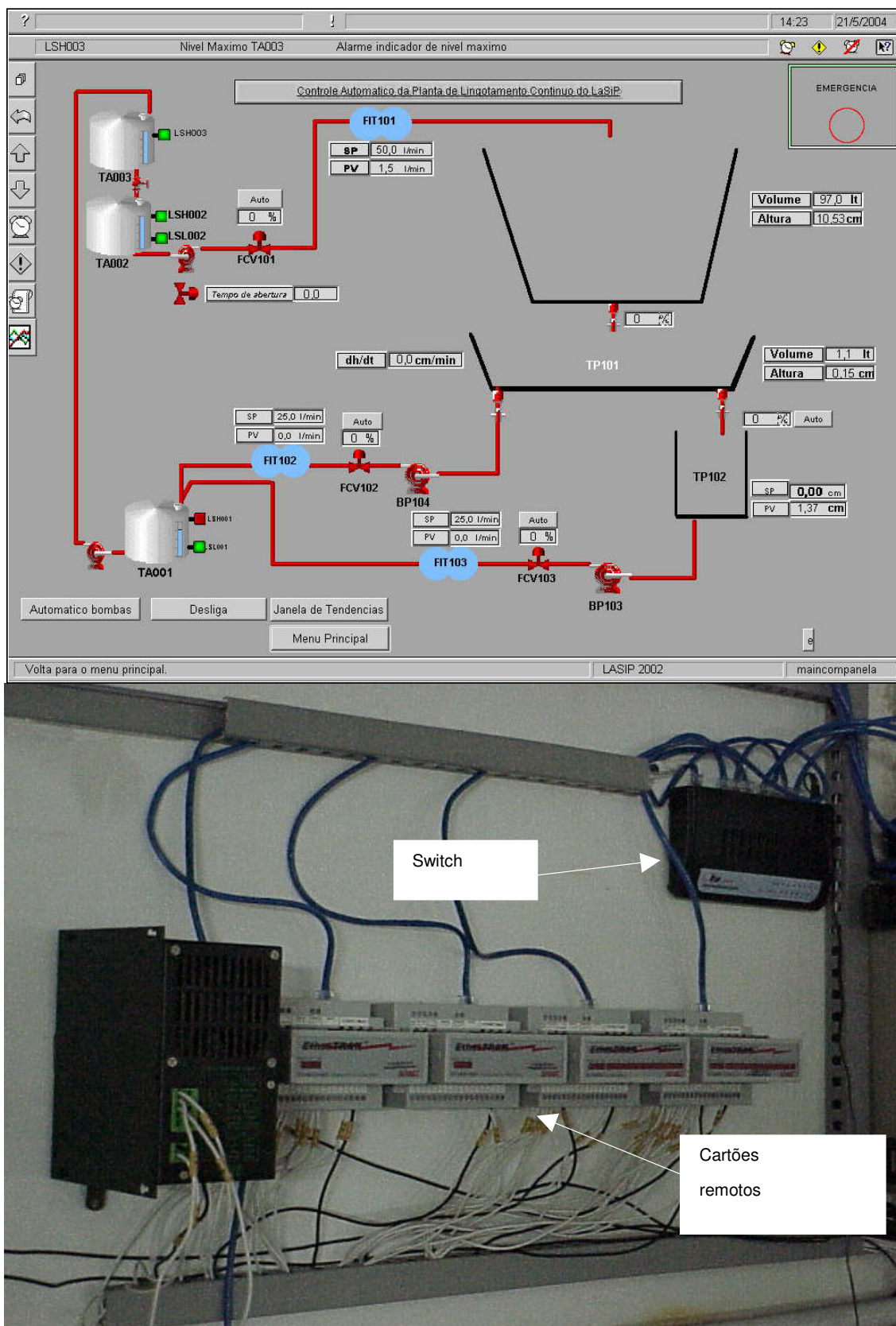


Figura 4.2: Sinótico de controle do modelo físico e os cartões de entrada e saída de sinal.

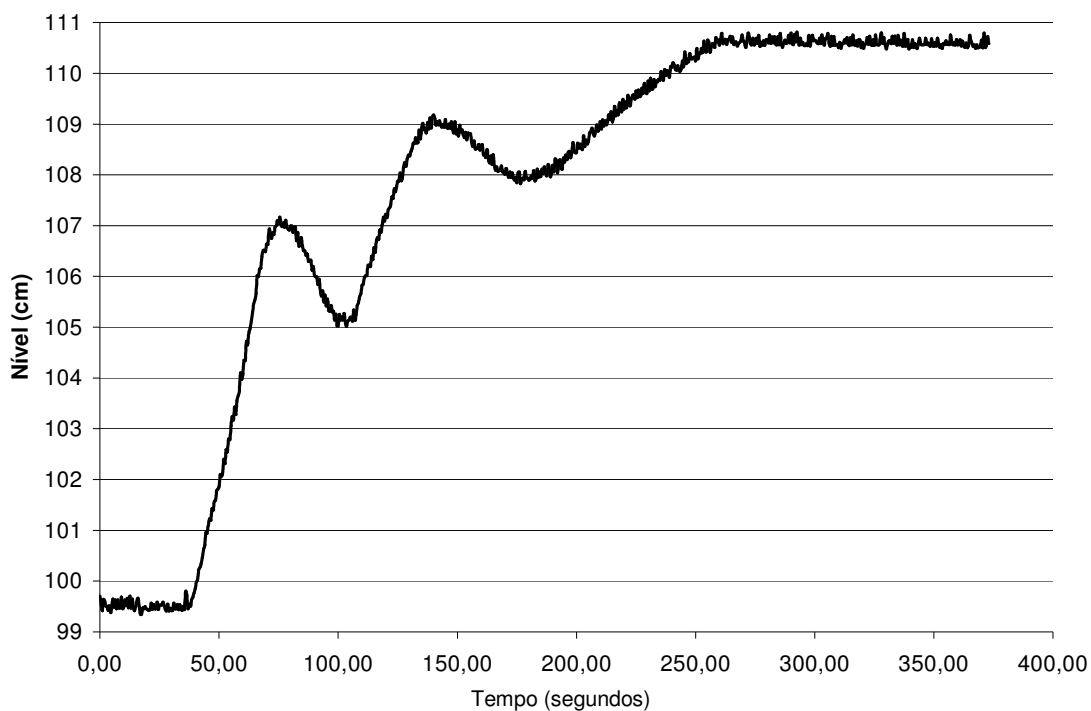


Figura 4.3: Nível da água em função do tempo no modelo físico do molde.

4.2 – Ensaios para Avaliação dos Efeitos das Variáveis

Para avaliar o grau de emulsificação e o padrão de escoamento do pó fluxante líquido no molde, foram feitos estudos empregando filmagens no modelo físico. Este modelo utiliza água para simular o aço líquido. Para simular o pó fluxante, foram usados diferentes tipos de óleo de silicone, com diferentes viscosidades, representando pós fluxantes também com diferentes viscosidades.

Os ensaios foram realizados para diferentes vazões de água, representando diferentes velocidades de lingotamento. O nível no molde foi mantido constante em cada ensaio. Foram feitos ensaios para diferentes penetrações da válvula submersa. A largura da placa também foi alterada, utilizando-se placas de acrílico no interior do molde. Outra variável considerada foi a configuração das portas de saída da válvula submersa. Foram utilizadas neste estudo três diferentes configurações para estas portas.

Para a realização dos ensaios, o escoamento no interior do modelo foi mantido em estado estacionário, para cada uma das diferentes configurações estudadas. Foi acrescentada uma camada de óleo de silicone com 1 centímetro de espessura pela parte superior do molde. No equipamento industrial existe uma camada de pó-fluxante

não reagido sobre a camada de pó fluxante líquido. Neste trabalho a camada de pó fluxante não reagido não foi considerada, utilizou-se então a espessura citada por fornecer uma boa visualização do perfil da interface água-óleo, simulando a interface aço-pó fluxante. A avaliação do grau de emulsificação e do padrão de escoamento do óleo emulsificado foram feitos por comparação das imagens quadro a quadro obtidas na filmagem do molde. O grau de emulsificação foi avaliado pela área ocupada pelo óleo de silicone líquido no interior do molde, para cada uma das configurações. O mapa de vetores, que representa o perfil de velocidade do óleo emulsificado, foi construído a partir da distância que cada elemento emulsificado do óleo se moveu no tempo decorrido entre a imagem obtida em um quadro após o outro.

A seguir são apresentadas as variáveis cujos efeitos foram estudados e detalhada cada etapa do estudo realizado.

4.2.1- Configuração da válvula submersa

A válvula submersa foi projetada de forma a permitir a substituição da sua ponteira, que efetivamente direciona o jato de aço líquido no interior do molde. Foram avaliadas neste trabalho três diferentes configurações de válvula submersa, todas com furos circulares e com diferentes inclinações. A figura 4.4 mostra o desenho técnico que representa as três ponteiros que foram avaliadas, sendo que uma possui inclinação ascendente de 15° , uma possui furos horizontais e a terceira possui uma inclinação descendente de 15° .

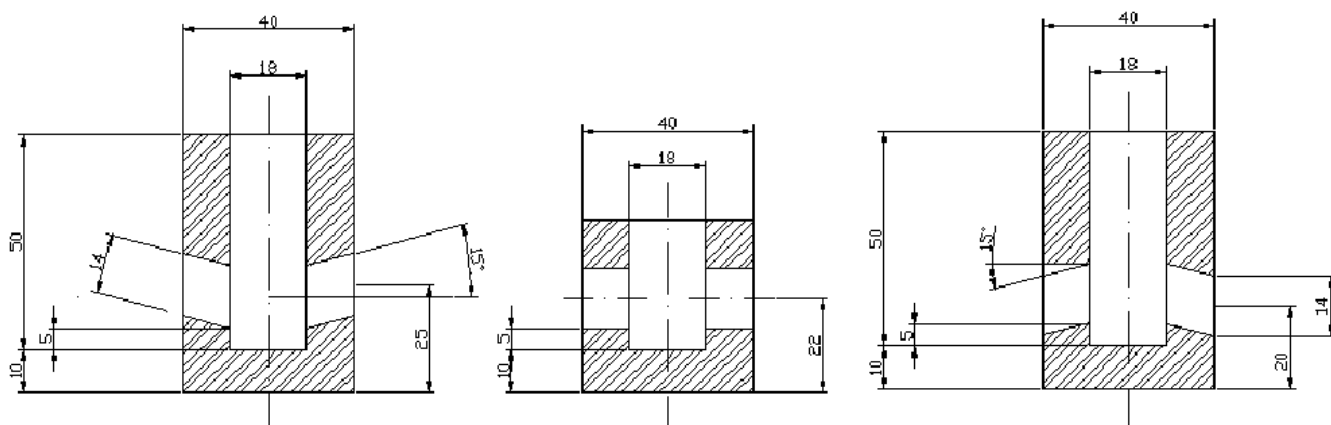


Figura 4.4: Desenho técnico mostrando os três tipos de ponteira utilizadas no estudo do escoamento bifásico no interior do molde.

4.2.2- Dimensões do molde

A largura do molde do modelo físico foi alterada por meio da incorporação de placas de acrílico, que podem ser colocadas em três posições específicas no interior do molde. Essa alteração da largura representou o lingotamento de placas de diferentes larguras, possibilitando estudar o efeito do jato nas paredes do molde para diferentes configurações do sistema. A figura 4.5 mostra uma fotografia do molde do modelo físico, indicando as três larguras que podem ser estudadas. As larguras utilizadas foram de 0,4, 0,5 e 0,6 metro. Como o modelo físico foi construído em escala 1:3, estas larguras representam placas de 1,2 metros, 1,5 metros e 1,8 metros, respectivamente. Nesta etapa, a vazão de água utilizada foi de 20 litros/minuto, representando uma vazão de aço de 135 toneladas por hora. A penetração utilizada foi de 2 centímetros, representando uma penetração de 6 centímetros no equipamento industrial. Foi utilizada a ponteira com portas com inclinação ascendente, mostrada na figura 4.4 e a viscosidade cinemática do óleo de silicone foi de 0,6 cm²/segundo.

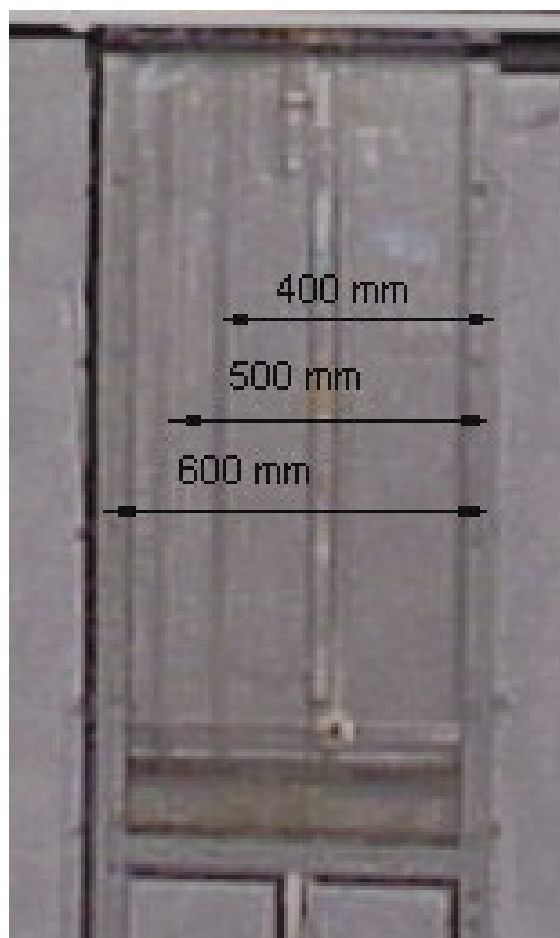


Figura 4.5: Fotografia do molde do modelo físico a frio localizado no LaSiP.

4.2.3- Velocidade de Lingotamento

O escoamento no interior do molde é diretamente relacionado com a velocidade de lingotamento utilizada. Com o aumento da velocidade de lingotamento é possível aumentar a produtividade, porém, essa prática pode aumentar a quantidade de inclusões e alterar o comportamento do pó fluxante. Para avaliar este efeito, foram realizados ensaios para duas diferentes vazões, representando duas diferentes velocidades de lingotamento. As vazões utilizadas foram de 20 litros/minuto e 25 litros/minuto, representando vazões industriais de 135 toneladas/hora e 170 toneladas/hora (de acordo com o critério de similaridade de Froude), respectivamente. As demais condições utilizadas neste experimento foram:

- Largura do molde: 0,6 metros, representando um equipamento com 1,8 metros de largura;
- Válvula submersa com portas com inclinação ascendente de 15°;
- Penetração da válvula submersa de 3 centímetros, representando 9 centímetros de penetração no equipamento industrial;
- Viscosidade cinemática de 0,6 cm²/segundo.

4.2.4- Penetração da válvula submersa

A penetração da válvula submersa foi alterada simplesmente pela variação do nível da água no interior do molde do modelo físico. As penetrações utilizadas foram de 2 centímetros e 3 centímetros, representando penetrações de 6 centímetros e 9 centímetros respectivamente no equipamento real. A figura 4.6 mostra esquematicamente a referência de penetração que foi utilizada neste trabalho. As demais configurações nestes experimentos foram:

- Largura do molde: 0,6 metros, representando um equipamento com 1,8 metros de largura;
- Válvula submersa com portas com inclinação ascendente de 15°;
- Vazão de alimentação de 20 litros/minuto de água, representando 135 toneladas/hora, no equipamento real;
- Viscosidade cinemática do óleo de 0,6 cm²/segundo.

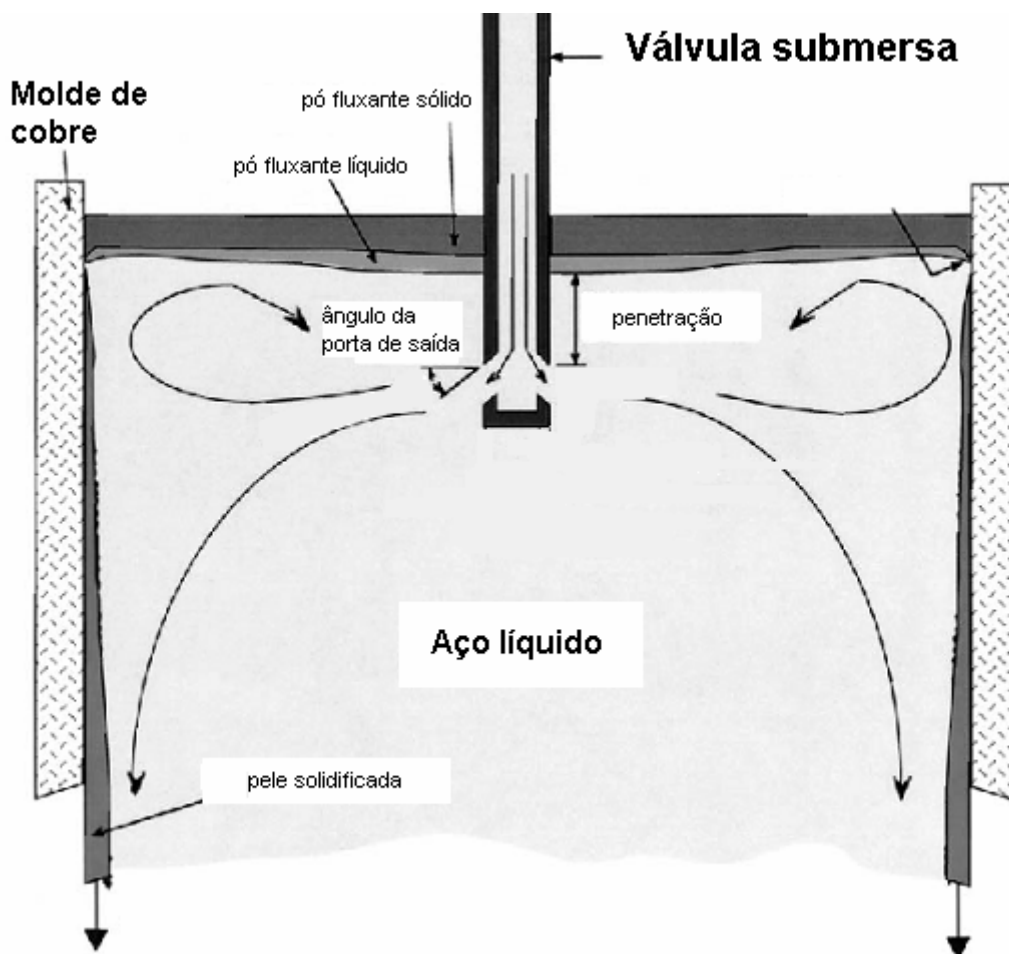


Figura 4.6: Desenho esquemático mostrando a referência utilizada para medir a penetração da válvula submersa no molde e o ângulo da porta de saída.

4.2.5- Viscosidade do pó fluxante

A viscosidade do pó fluxante líquido também pode afetar o grau de emulsificação.

Para avaliar o efeito da viscosidade do pó fluxante, foram realizados ensaios com óleos de silicone com diferentes viscosidades. A viscosidade dinâmica foi determinada empregando um viscosímetro programável BROOKFIELD DV-II+. A viscosidade que define o escoamento de um fluido é a viscosidade cinemática, sendo ela definida pela razão entre a viscosidade dinâmica e a densidade. A densidade foi medida utilizando-se uma proveta graduada e uma balança analítica, sendo que a razão entre a massa e o volume define a densidade. As viscosidades cinemáticas utilizadas foram de $0,6 \text{ cm}^2/\text{segundo}$, $0,9 \text{ cm}^2/\text{segundo}$ e $1,3 \text{ cm}^2/\text{segundo}$. As demais condições foram:

- Largura do molde: 0,6 metros, representando um equipamento com 1,8 metros de largura;
- Válvula submersa com portas com inclinação ascendente de 15°;
- Vazão de alimentação de 25 litros/minuto de água, representando 170 toneladas/hora;
- Penetração da válvula submersa de 3 centímetros, representando 9 centímetros de penetração no equipamento industrial.

4.3 – Tratamento de Imagens

Para avaliar o grau de emulsificação do pó fluxante, foi feito um estudo da área ocupada pelo óleo de silicone emulsificado na vista frontal do modelo físico. Utilizando um software comercial de tratamento de imagens, foi feito o contorno em cada uma das partículas de óleo emulsificado, e a partir deste contorno, a área ocupada pelas partículas foi calculada pelo próprio software. O grau de emulsificação foi definido neste trabalho como a razão entre a área ocupada pelas partículas de óleo emulsificado e a área frontal do molde, considerando o comprimento do molde como 0,8 metros no equipamento industrial, sendo representado por 26,6 centímetros no modelo físico. O tamanho médio das partículas, em relação à área do molde, também foi obtido, simplesmente dividindo-se o valor obtido para o grau de emulsificação pelo número de partículas existentes. Este valor é adimensional e representa a fração da face frontal do molde que é ocupada pela partícula. Para se obter o valor em unidades de área, basta multiplicar o valor mostrado neste trabalho pela área do molde utilizado. A figura 4.7 mostra o exemplo de uma imagem do molde durante a análise do grau de emulsificação. Para garantir que os resultados fossem representativos, esta análise foi feita para quadros em diferentes tempos de filmagem de uma mesma condição e foram avaliados o desvio padrão e a variância do grau de emulsificação. O número de ensaios foi o suficiente para que a variância entre os resultados fosse inferior a 5%.

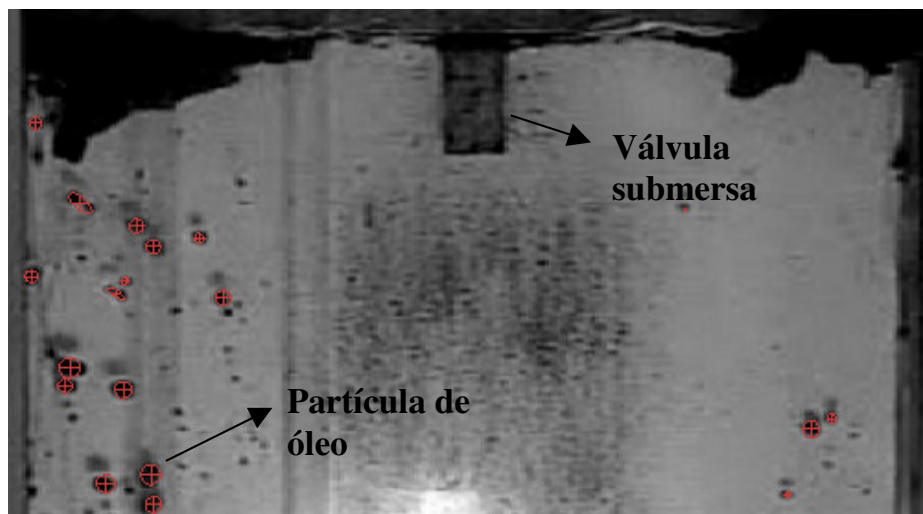


Figura 4.7: Imagem do molde durante a análise do grau de emulsificação.

Utilizando a análise de imagens quadro a quadro das filmagens do escoamento no interior do modelo físico, também foi avaliado o perfil de velocidades dos elementos emulsificados do óleo que simula o pó fluxante. Foram analisadas imagens duas a duas, que foram sobrepostas e comparadas. O tempo decorrido entre uma imagem e outra foi de 0,2 segundos. Esse tempo foi suficiente para que houvesse um elevado grau de certeza de que as imagens comparadas no tempo 0 e tempo 1, mostradas esquematicamente na figura 4.8, fossem da mesma partícula após deslocar uma distância representada por um vetor. A velocidade que esse vetor representa pôde ser determinada pela relação entre a distância percorrida pela partícula e o tempo decorrido entre uma imagem e a outra. A velocidade avaliada nessa análise foi associada ao plano frontal (largura x altura), sendo que os componentes de velocidade relacionados aos planos lateral (espessura x altura) e superior (espessura x largura) foram desconsiderados. Isso foi feito em função da espessura ser suficientemente menor que as outras dimensões. Devido a isso, o deslocamento nessa direção também será desprezível em relação às outras duas direções.

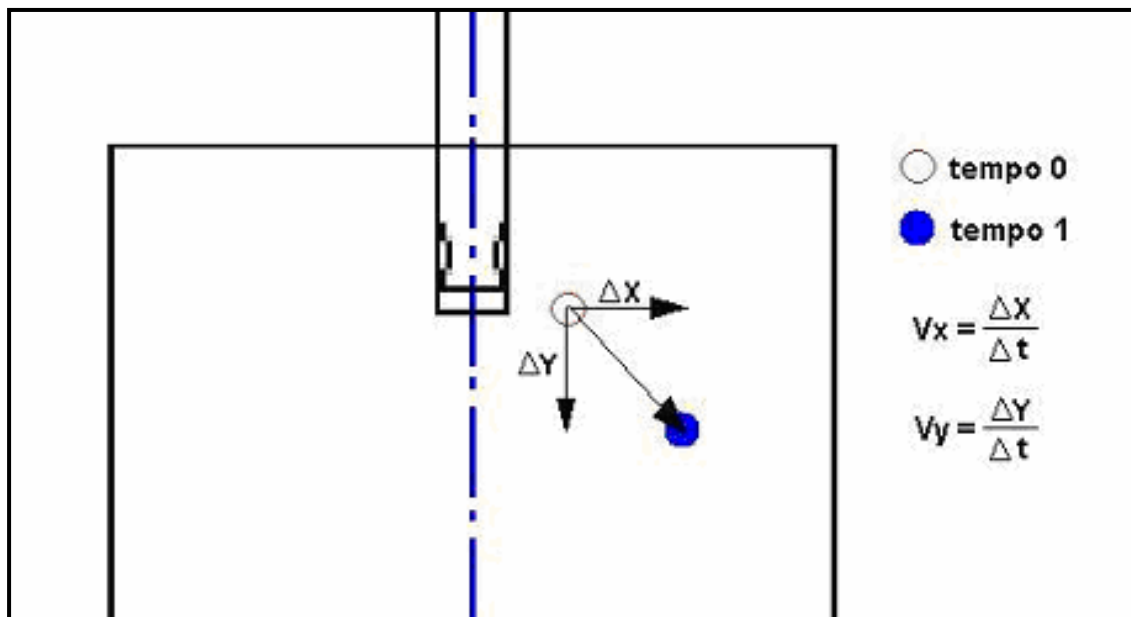


Figura 4.8: Desenho esquemático ilustrando o cálculo dos vetores de velocidade das partículas em movimento na água.

4.4 – Perfil de Velocidade

O escoamento do aço no interior do molde afeta o comportamento da camada de pó fluxante. Neste trabalho, este perfil de escoamento foi avaliado através de modelamento matemático e experimentos com modelo físico.

4.4.1- Modelamento Matemático

O modelo matemático foi desenvolvido no software CFX em 4 etapas básicas que envolvem a construção da geometria e da malha, definição do problema (domínio, condições de contorno, esquemas de solução, etc.), solução do problema e a visualização dos resultados.

4.4.1.1- Construção da geometria do sistema

A definição do domínio e da malha a ser utilizado nas simulações é realizada através de um dos 4 módulos do CFX denominado CFX-Build. Este módulo consiste basicamente em uma interface tipo CAD onde o domínio de interesse é desenhado através de comandos de definição de pontos, retas, planos e sólidos. Depois de

definido fisicamente o domínio, a malha desejada é ajustada a ele podendo se utilizar malhas tetraédricas, hexaedricas e/ou uma forma combinada destes. A figura 4.9 apresenta as malhas típicas geradas pelo CFX.

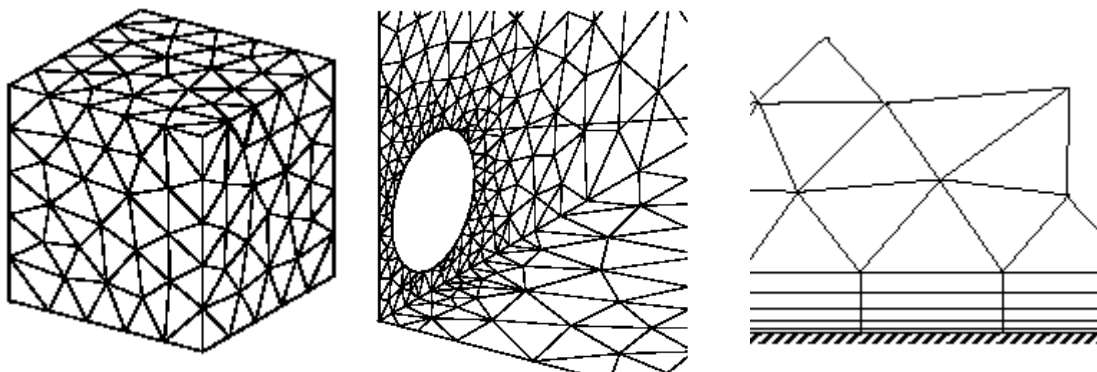


Figura 4.9- Malhas típicas do CFX-5.6. (a) malha uniforme não estruturada (tetraédrico), (b) malha não uniforme e não estruturada e em (c) malha não estruturada combinada a uma malha estruturada (prismática).

4.4.1.2- Definição do problema

No segundo módulo (CFX-Pre), são definidas as propriedades do domínio, os fluidos, as condições de contorno e os parâmetros para a solução das equações, através do “solver”.

Na definição do problema, é estabelecido inicialmente se a simulação será em regime transiente ou estacionário. Depois são definidas as propriedades do domínio como pressão de referência, fluidos envolvidos, existência ou não de termos fontes, modelos de turbulência adotados e parâmetros de interação entre os fluidos, etc.

As condições de contorno são definidas de acordo com as características estabelecidas para cada uma das superfícies de interesse, aqui chamadas de *patch*. Os *patches* podem ser definidos como entradas, saídas, aberturas, paredes e/ou planos de simetria. Cada definição exige do usuário um parâmetro característico, como por exemplo, a velocidade (ou a vazão) do fluido no *patch* definido como “entrada”.

Posteriormente são definidas as condições iniciais da simulação e os parâmetros do “solver” (número de iterações, fator de relaxação, adaptações de malha, etc).

Esta etapa é finalizada com a criação do arquivo de definição (*.def - definition), que contém as informações estabelecidas durante a execução do CFX-Pre.

4.4.1.3- Solução do problema

O CFX-5 Solver Manager é o módulo do CFX-5.6 responsável pela solução propriamente dita do problema. O CFX-5.6 utiliza um método de solução acoplada que resolve as equações hidrodinâmicas (para u, v, w e p) como um sistema único. Este método utiliza um esquema puramente implícito das equações em um dado passo de tempo.

Durante toda a etapa de solução do problema, gráficos de resíduos são continuamente registrados, mostrando o comportamento da solução (se ela está convergindo ou não) e, ao final deste processo, são gerados dois arquivos importantes: um arquivo de saída (*.out – output), onde se tem um resumo da solução por iteração e as mensagens de problemas durante a solução e um arquivo de resultado, (*.res – result), que é utilizado pelo CFX-Post para a visualização dos resultados obtidos ao final da simulação (quando o critério de convergência é atingido ou é realizado o número de iterações especificadas).

4.4.1.4- Visualização dos resultados

A visualização dos resultados obtidos é realizada através do módulo CFX-Post que funciona como uma interface gráfica, onde os resultados numéricos de cada simulação são traduzidos em vetores, planos representativos do domínio de cada uma das variáveis de interesse, linhas de fluxo e outras diversas formas de apresentação.

Nas primeiras simulações, o sistema proposto foi modelado considerando a existência de dois planos de simetria, o que possibilitou uma redução no tempo computacional de processamento.

O modelo foi desenvolvido considerando a penetração da válvula submersa de dois centímetros, a largura da placa 0,6 metros, a espessura da placa de 8 centímetros e a inclinação da porta de saída da válvula submersa descendente com

15° de inclinação. Nas simulações foram utilizadas malhas hexaédricas, não uniformes e com diferentes números de nós.

Como o estudo bi-fásico através de modelamento matemático é complexo e não era objetivo principal deste trabalho, a interface água-óleo foi considerada uma superfície plana sem atrito. Obviamente isto não representa o sistema, mas permite uma comparação qualitativa com os resultados obtidos por modelamento físico.

Numa etapa posterior, o escoamento foi simulado utilizando modelamento físico a frio, com as mesmas configurações utilizadas no modelamento matemático, utilizando partículas com densidade semelhante à da água e posterior tratamento das imagens para fim de validação do modelo matemático. Com a validação do modelo, foi feito um novo estudo considerando a porta de saída da válvula submersa com inclinação ascendente de 15° para realização da comparação com o escoamento do óleo emulsificado no modelamento físico.

4.4.2- Modelamento Físico

Todo modelamento matemático necessita ser validado por modelamento físico ou por dados industriais. Neste trabalho o modelamento físico também foi utilizado com o objetivo de analisar o fluxo do líquido no reator. 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, assim como foi feito para se avaliar o perfil de velocidade das partículas de óleo emulsificadas. 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;
- Largura da placa de 0,6 metros.

As partículas utilizadas nesta etapa do trabalho foram 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. A figura 4.8 exemplifica bem o método utilizado.

5- RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste item serão apresentados e discutidos os resultados dos experimentos realizados com o modelamento físico e os do modelamento matemático, que visam o entendimento do escoamento bifásico aço-pó fluxante em um molde de lingotamento contínuo de placas. Os resultados serão apresentados nos sub-itens a seguir:

- Perfil de Velocidades da Água;
- Perfil da interface Água-Óleo;
- Grau de Emulsificação do Óleo;
- Perfil de Velocidades das Partículas Emulsificadas.

Fotografias do molde durante a realização dos ensaios são mostradas nos anexos, ilustrando o escoamento bifásico no interior deste reator. As imagens que foram utilizadas nas análises dos resultados são semelhantes a estas mostradas nos anexos.

5.1- Perfil de Velocidades da Água

O perfil de velocidades foi obtido utilizando-se modelamento matemático e validado por modelamento físico. O perfil de velocidades obtido por modelamento matemático foi sobreposto ao obtido por modelamento físico, permitindo a comparação de ambos. A figura 5.1 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.

As condições operacionais operacionais utilizadas para a obtenção desta figura são mostradas na tabela V-1, assim como o valor ao qual representa no equipamento industrial. A tabela V-2 mostra valores de velocidades obtidos nos pontos 1 ao 10, mostrados na figura 5.1.

Tabela V-1: Parâmetros operacionais utilizados na construção do perfil de velocidades do molde

Parâmetro	Modelo físico	Equipamento real
Penetração da válvula submersa	2 centímetros	6 centímetros
Vazão	20 litros/minuto	135 toneladas/hora
Largura da placa	0,6 metros	1,8 metros
Inclinação das portas de saída da válvula submersa	15° descendente	15° descendente

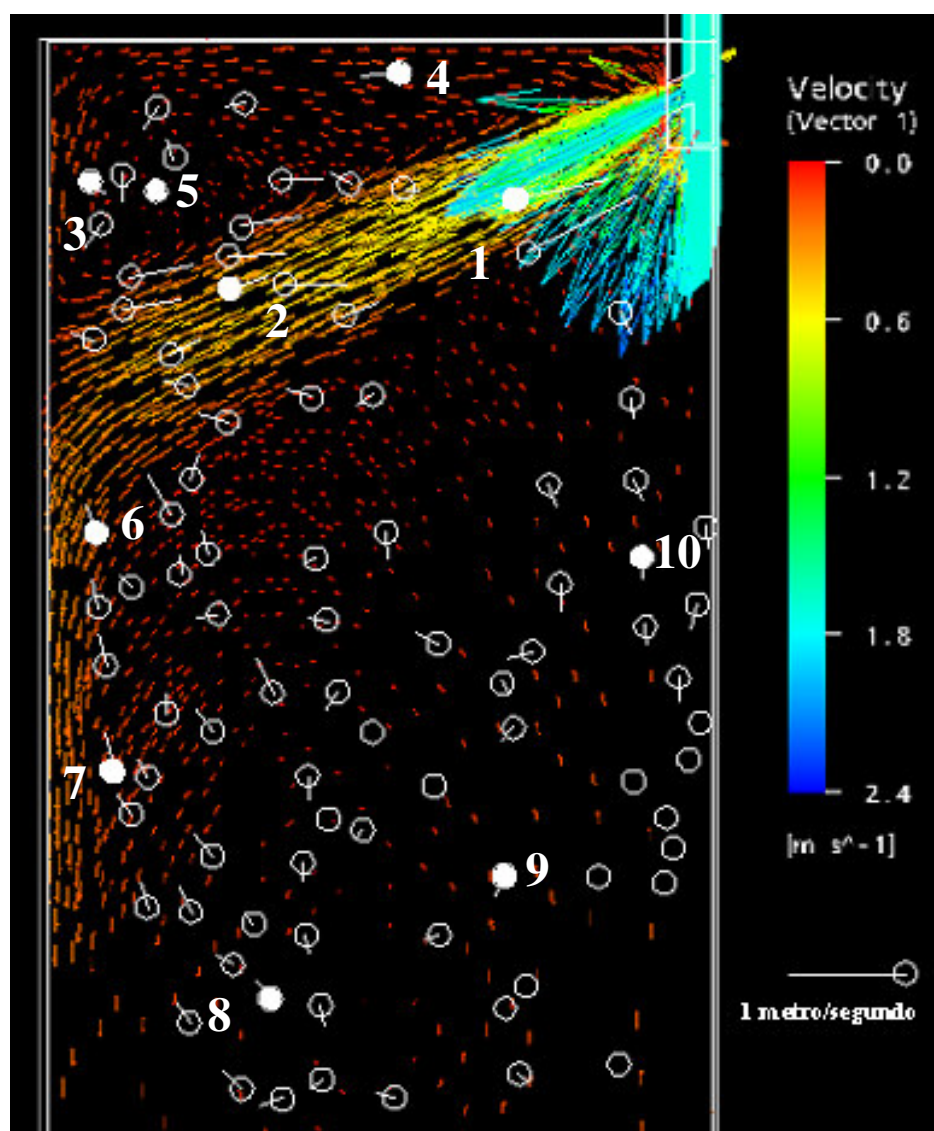


Figura 5.1: Perfis de velocidade obtidos por modelamento físico e matemático.

Tabela V-2: Comparação das velocidades em pontos específicos do molde

Ponto	Módulo de velocidade por modelamento físico (m/s)	Módulo de velocidade por modelamento matemático (m/s)
1	0,8	0,7
2	0,4	0,4
3	0,2	0,2
4	0,4	0,3
5	0,0	0,0
6	0,3	0,3
7	0,3	0,2
8	0,2	0,2
9	0,2	0,0
10	0,2	0,1

A trajetória do aço obtida por modelamento matemático apresenta a mesma tendência indicada por modelamento físico, porém os valores numéricos das velocidades obtidas apresentam uma certa discrepância. Um dos motivos desta discrepância pode ser o fato de que a velocidade obtida por modelamento matemático foi avaliada apenas no plano de simetria do molde, contudo, no modelamento físico, não foi possível a avaliação da velocidade apenas neste plano, com a metodologia adotada. No modelo físico as velocidades foram obtidas em todo o volume. Como a largura do molde é muito superior à espessura, a variação não se mostrou excessiva em termos de comparação dos meios de avaliação do perfil de velocidades. A figura 5.2 mostra perfis de velocidade para outros planos do molde, variando o valor da posição do plano vertical em 1 centímetro. Essa imagem atesta a modificação do perfil de velocidades em função da posição deste plano e o seu grau de variação.

A trajetória obtida está similar à obtida por Andrade (1984), contudo, seu estudo foi qualitativo, não mostrando a ordem de grandeza dos vetores obtidos.

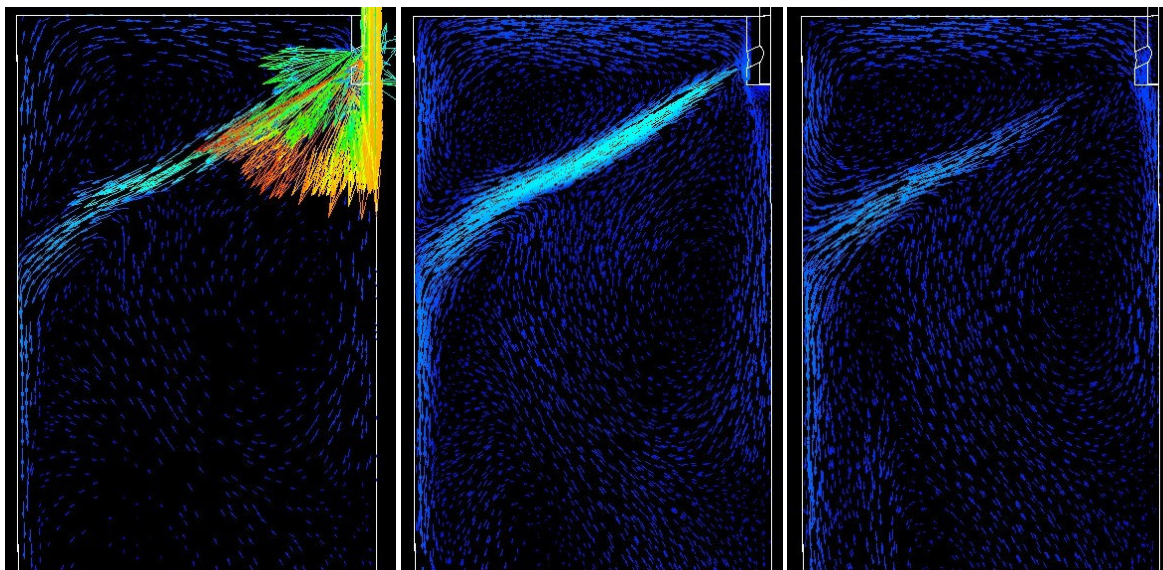


Figura 5.2: Perfis de velocidades obtidos para o plano de simetria e planos paralelos ao plano de simetria distanciados de 1 e 2 centímetros do mesmo.

5.2- Perfil da Interface Água-Óleo

A figura 5.3 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. Os parâmetros operacionais utilizados no modelo físico são mostrados na tabela V-3, com os valores correspondentes no equipamento industrial.

Tabela V-3: Condições operacionais utilizadas nos ensaios para análise do perfil da interface água-óleo.

Parâmetro	Modelo físico	Equipamento real
Penetração da válvula submersa	3 centímetros	9 centímetros
Vazão	25 litros/minuto	170 toneladas/hora
Largura da placa	0,6 metros	1,8 metros
Viscosidade cinemática	0,6 cm ² /segundo	0,6 cm ² /segundo
Inclinação das portas de saída da válvula submersa	15° descendente, horizontal, 15° ascendente	15° descendente, horizontal, 15° ascendente

A espessura da camada de óleo utilizada no ensaio foi de 1 cm.

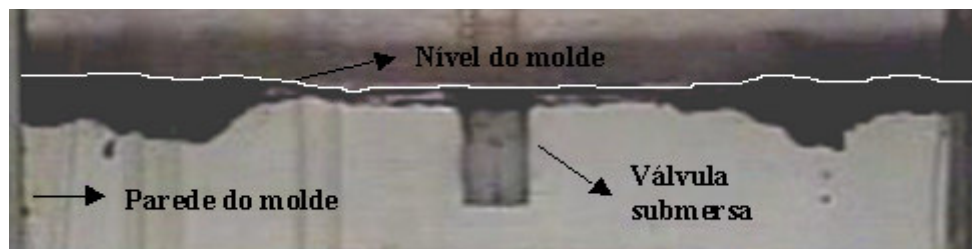


Figura 5.3: Imagem mostrando o perfil da interface água-óleo.

A figura 5.4 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.

O perfil do contorno da interface água-óleo depende do padrão de escoamento da água e, em particular, dos níveis de pressão junto a esta interface. Estes níveis de pressão são previstos através do modelamento matemático. As figuras 5.5 e 5.6 comparam os contornos de pressão e os da interface água-óleo, obtidos por modelamento matemático e físico, respectivamente.

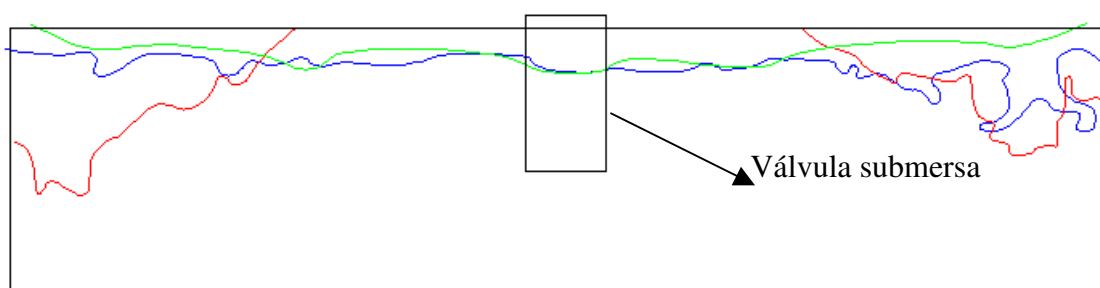


Figura 5.4: Perfil da interface água-óleo de silicone na superfície do molde para diferentes geometrias da válvula submersa (verde=descendente 15° , vermelha=ascendente 15° e azul=horizontal).

Pode-se notar que nas regiões onde a pressão mostrada no modelamento matemático é maior, a espessura do filme de óleo obtido no modelamento físico é menor, demonstrando claramente o efeito do fluxo da água (e conseqüentemente sua pressão) na movimentação do óleo na superfície. Na figura 5.5, onde a pressão é mais uniforme, a camada de óleo é também mais uniforme se comparado com a figura 5.6.

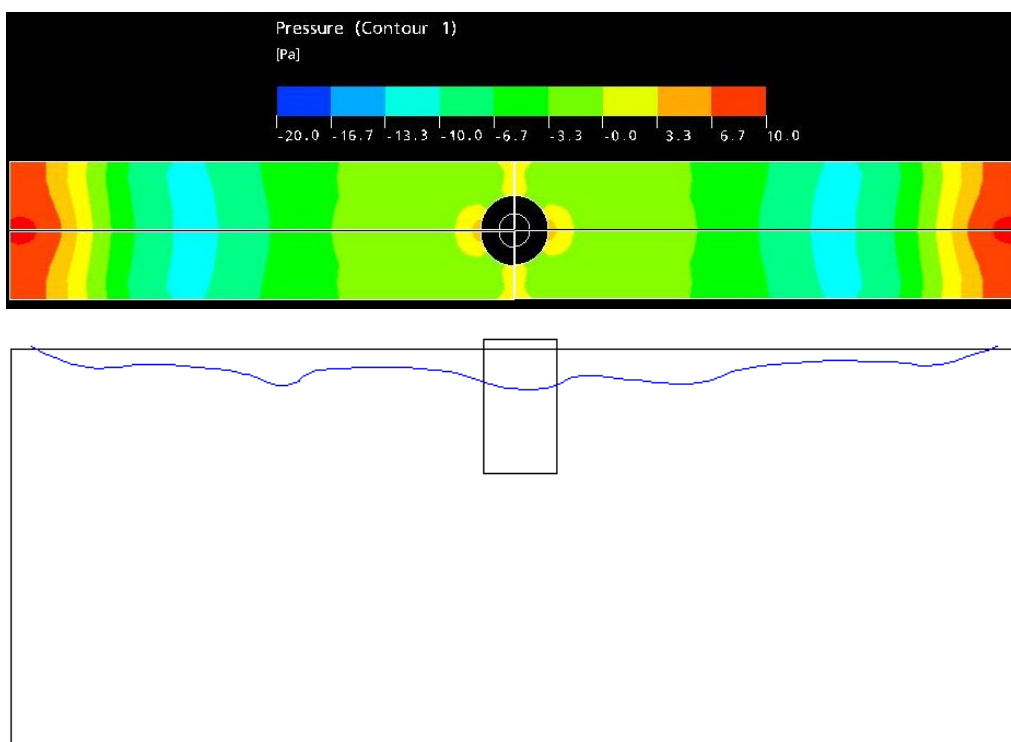


Figura 5.5: Comparação entre o perfil de pressão obtido por modelamento matemático e a interface água-óleo obtido para modelamento físico para a válvula submersa com portas de saída com inclinação descendente de 15° .

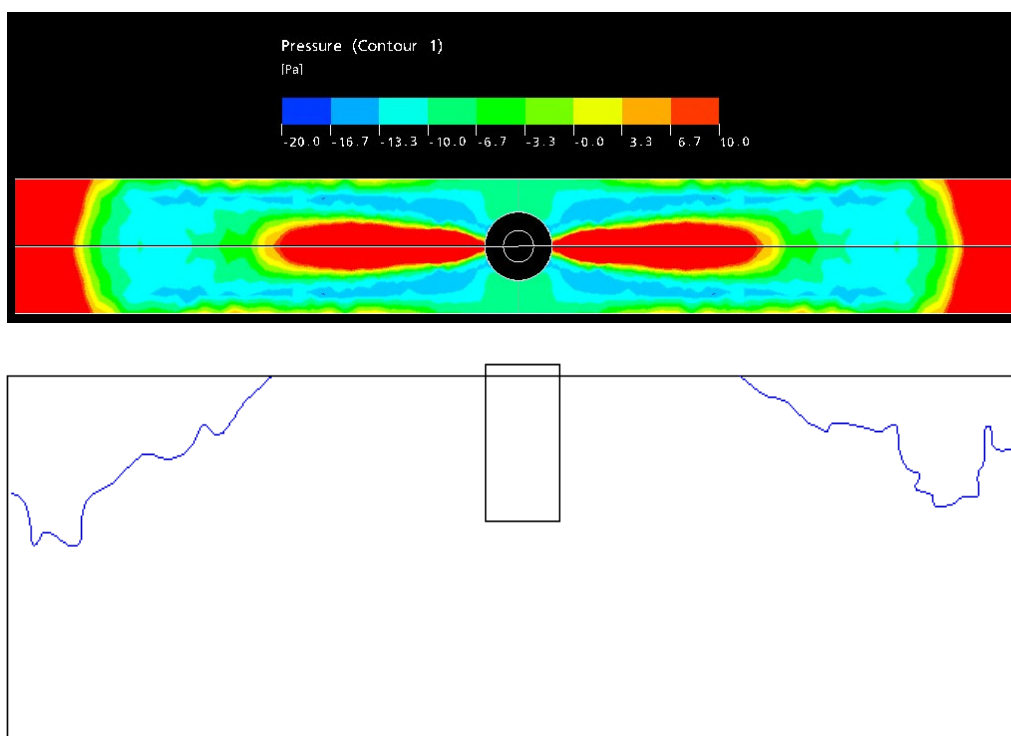


Figura 5.6: Comparação entre o perfil de pressão obtido por modelamento matemático e o perfil da interface água-óleo obtido para modelamento físico para a válvula submersa com portas de saída com inclinação ascendente de 15° .

5.3- Grau de Emulsificação do Óleo

O grau de emulsificação apresentou variações significativas com as mudanças dos parâmetros operacionais utilizados. Os resultados obtidos para cada modificação de um parâmetro operacional será mostrado nos itens a seguir.

5.3.1- Efeito da largura do molde

Nesta etapa a largura da placa foi alterada e as demais condições operacionais foram mantidas constantes. As condições utilizadas são mostradas na tabela a seguir.

As figuras 5.7 e 5.8 mostram o efeito da largura do molde sobre o grau de emulsificação e tamanho médio das partículas, respectivamente.

Tabela V-4: Condições operacionais utilizadas nos ensaios para análise do grau de emulsificação em função da largura do molde.

Parâmetro	Modelo físico	Equipamento real
Penetração da válvula submersa	2 centímetros	6 centímetros
Vazão	20 litros/minuto	135 toneladas/hora
Largura da placa	0,6 metros 0,5 metros 0,4 metros	1,8 metros 1,5 metros 1,2 metros
Viscosidade cinemática	0,6 cm ² /segundo	0,6 cm ² /segundo
Inclinação das portas de saída da válvula submersa	15° ascendente	15° ascendente

O fato do grau de emulsificação aumentar com o estreitamento da placa pode ser relacionado com o fato das velocidades no molde terem se concentrado na região próxima ao menisco. Além disso, a velocidade de lingotamento para as placas mais estreitas é maior para uma mesma vazão, no caso, 20 litros/minuto, representando uma vazão de 135 toneladas/hora, como é mostrado na tabela a seguir.

Este resultado ilustra o fato de que para manter a limpidez do aço, é necessária uma produtividade menor quando se está produzindo placas mais estreitas.

Tabela V-5: Variação da velocidade de lingotamento com a largura do molde para uma vazão de 20 litros/minuto

Largura do molde (metros)		Velocidade de lingotamento (metros/minuto)	
Modelo físico	Equipamento industrial	Modelo físico	Equipamento industrial
0,6	1,8	0,4	0,7
0,5	1,5	0,5	0,85
0,4	1,2	0,6	1,0

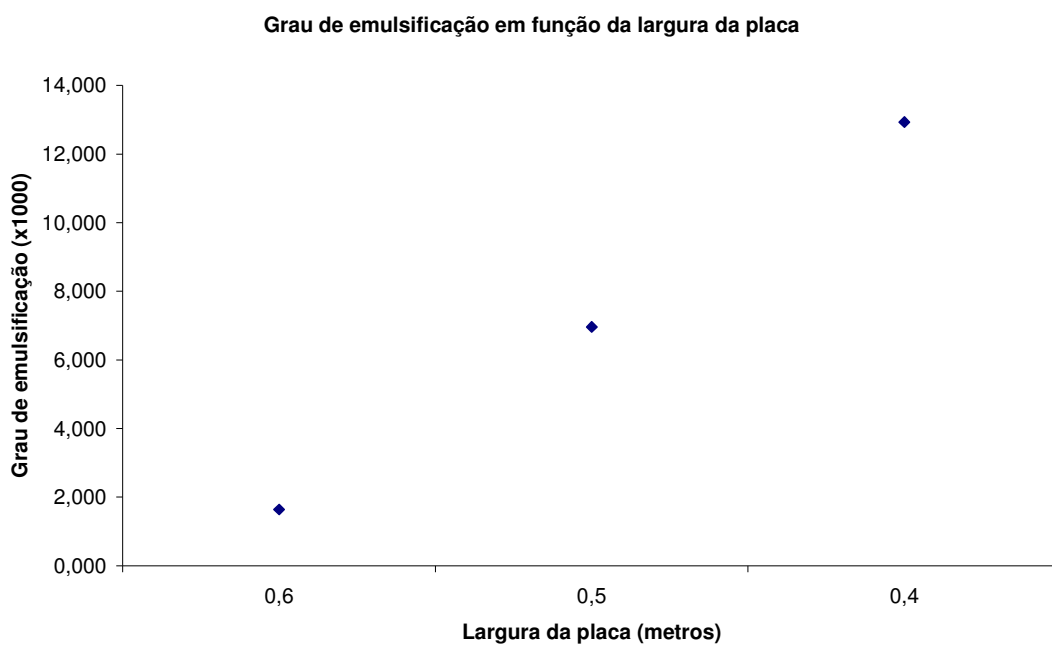


Figura 5.7: Grau de emulsificação do óleo de silicone em função da largura da placa lingotada.

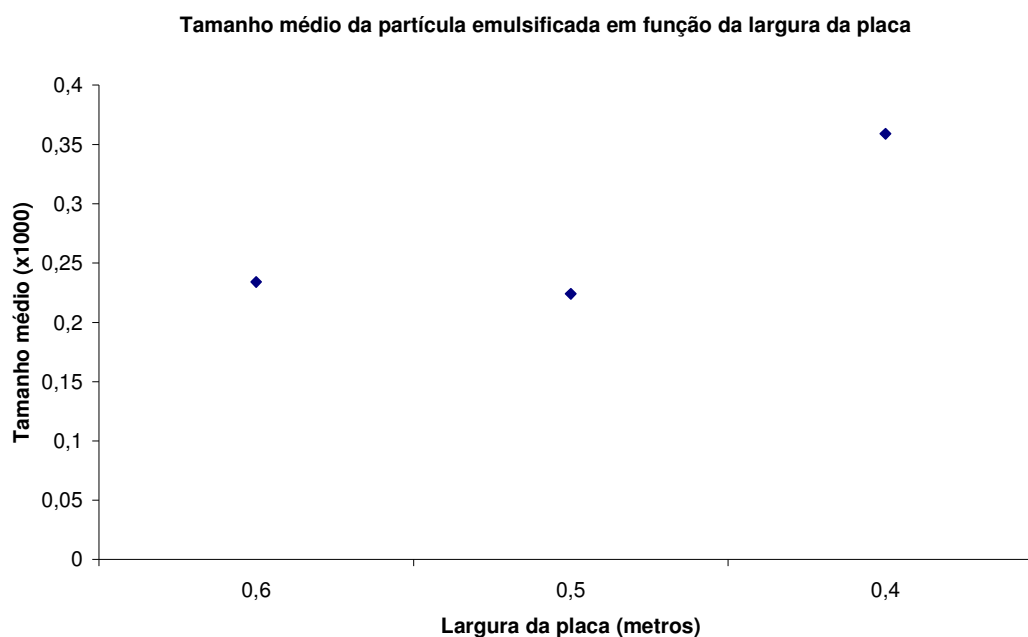


Figura 5.8: Tamanho médio das partículas emulsificadas em função da largura do molde de lingotamento contínuo.

5.3.2- Efeito da penetração da válvula submersa

Nesta etapa a penetração da válvula submersa foi variada e as demais condições operacionais foram mantidas constantes. As condições utilizadas são mostradas a seguir.

Tabela V-6: Condições operacionais utilizadas nos ensaios para análise do grau de emulsificação em função da penetração da válvula submersa no molde.

Parâmetro	Modelo físico	Equipamento real
Penetração da válvula submersa	2 centímetros, 3 centímetros	6 centímetros, 9 centímetros
Vazão	20 litros/minuto	135 toneladas/hora
Largura da placa	0,6 metros	1,8 metros
Viscosidade cinemática	0,6 cm ² /segundo	0,6 cm ² /segundo
Inclinação das portas de saída da válvula submersa	15° ascendente	15° ascendente

As figuras 5.9 e 5.10 mostram o efeito da penetração da válvula submersa no aço sobre o grau de emulsificação e tamanho médio das partículas, respectivamente.

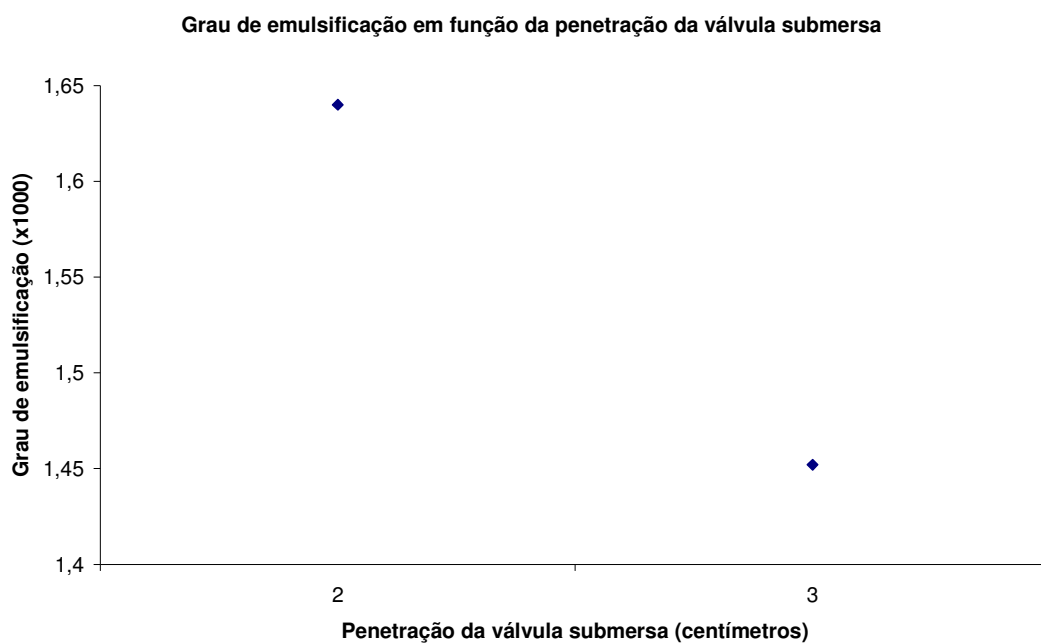


Figura 5.9: Grau de emulsificação do óleo de silicone em função da penetração da válvula submersa.

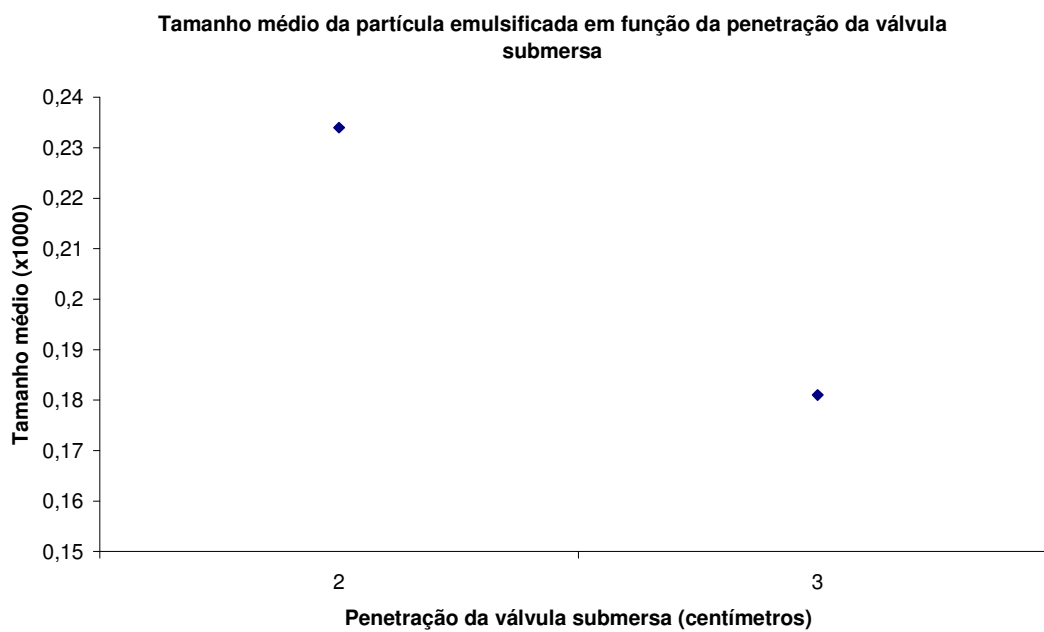


Figura 5.10: Tamanho médio das partículas emulsificadas em função da penetração da válvula submersa no molde de lingotamento contínuo.

Observando-se os gráficos pode-se notar que com o aumento da penetração, tanto o grau de emulsificação quanto o tamanho médio das partículas emulsificadas diminui. Neste caso a velocidade do aço próximo ao menisco diminui com o aumento da penetração, minimizando as forças de arraste na interface água-óleo. Um aumento exagerado da penetração da válvula submersa por outro lado poderia acarretar em uma perda excessiva de calor do aço na região próxima ao menisco.

5.3.3- Efeito da inclinação da porta de saída da válvula submersa

Nesta etapa, a ponteira da válvula submersa foi substituída enquanto as demais condições operacionais foram mantidas constantes. As condições utilizadas são mostradas na tabela V-7.

Tabela V-7: Condições operacionais utilizadas nos ensaios para análise do grau de emulsificação em função da inclinação das portas de saída da válvula submersa.

Parâmetro	Modelo físico	Equipamento real
Penetração da válvula submersa	3 centímetros	9 centímetros
Vazão	25 litros/minuto	170 toneladas/hora
Largura da placa	0,6 metros	1,8 metros
Viscosidade cinemática	0,6 cm ² /segundo	0,6 cm ² /segundo
Inclinação das portas de saída da válvula submersa	15° descendente, horizontal, 15° ascendente	15° descendente, horizontal, 15° ascendente

As figuras 5.11 e 5.12 mostram o efeito da inclinação das portas de saída da válvula submersa sobre o grau de emulsificação e tamanho médio das partículas, respectivamente.

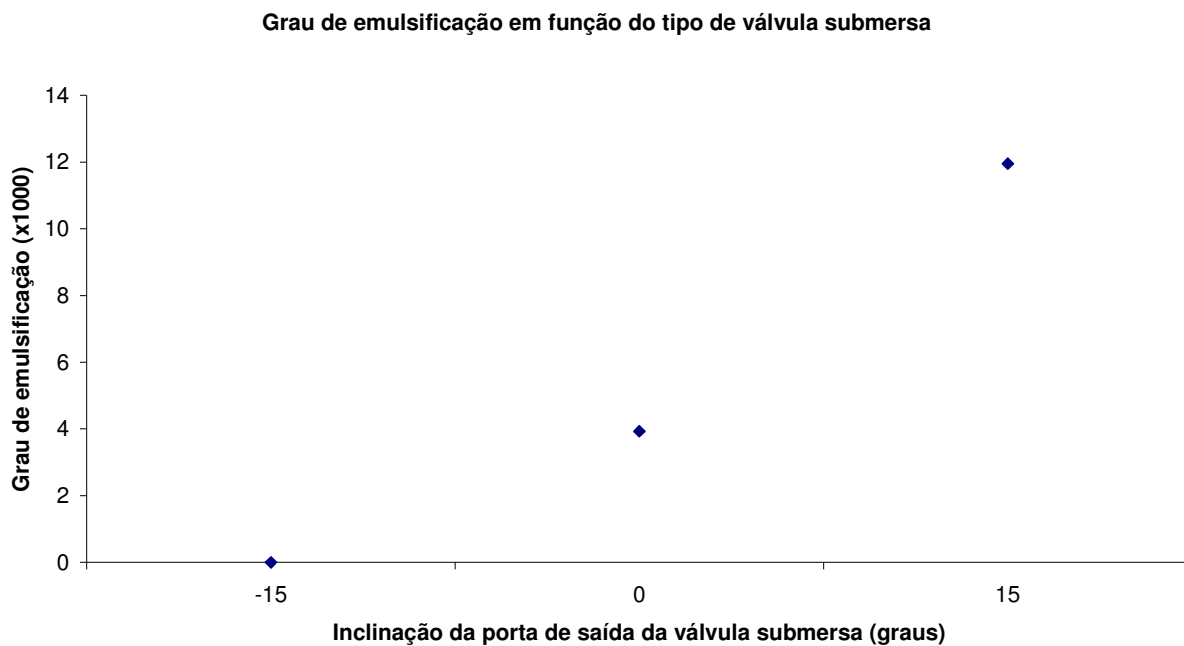


Figura 5.11: Grau de emulsificação do óleo de silicone em função da inclinação das portas de saída da válvula submersa.

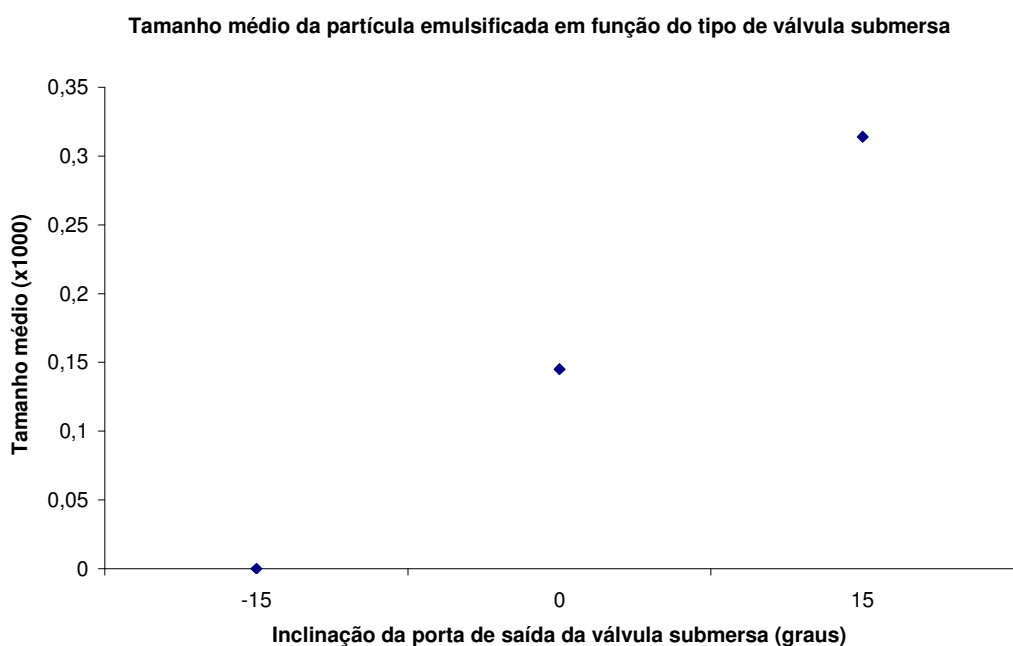


Figura 5.12: Tamanho médio das partículas emulsificadas em função da inclinação das portas de saída da válvula submersa.

A razão da mudança do comportamento do óleo de silicone com a mudança do ângulo de saída da porta das válvulas submersas pode ser relativo à velocidade da água próxima ao menisco. Para a válvula com inclinação descendente, tem-se o jato

de água direcionado para baixo, de forma que a interferência sobre o escoamento do óleo é a menor, dentre as condições estudadas. Com a válvula de inclinação ascendente, tem-se um jato direcionado diretamente para o óleo de silicone, gerando um alto grau de turbulência e, conseqüentemente, um alto grau de emulsificação com partículas grandes. A válvula com portas de saída do jato horizontal apresenta resultados intermediários.

5.3.4- Efeito da Velocidade de Lingotamento na Máquina de Lingotamento

Nesta etapa vazão de alimentação foi variada e as demais condições operacionais foram mantidas constantes. As condições utilizadas são mostradas a na tabela V-8.

Tabela V-8: Condições operacionais utilizadas nos ensaios para análise do grau de emulsificação em função da velocidade de lingotamento.

Parâmetro	Modelo físico	Equipamento real
Penetração da válvula submersa	3 centímetros	9 centímetros
Vazão	20 litros/minuto, 25 litros/minuto	135 toneladas/hora, 170 toneladas/hora
Largura da placa	0,6 metros	1,8 metros
Viscosidade cinemática	0,6 cm ² /segundo	0,6 cm ² /segundo
Inclinação das portas de saída da válvula submersa	15° ascendente	15° ascendente

As figuras 5.13 e 5.14 mostram o efeito da vazão de alimentação de aço sobre o grau de emulsificação e tamanho médio das partículas, respectivamente.

O efeito neste caso é semelhante ao ocorrido com a variação das larguras das placas lingotadas em ordem de grandeza dos resultados. A tabela V-9 a seguir mostra a velocidade relativa a cada vazão. Observando-se os resultados obtidos para cada velocidade e comparando-os aos obtidos para a variação da largura, pode-se notar uma semelhança que indica que o mecanismo nos dois casos é semelhante.

Tabela V-9: Valores de velocidade de lingotamento para o modelo físico e para o equipamento real em função da vazão.

Vazão		Velocidade (metros/minuto)	
Modelo físico (l/min)	Equipamento real (ton/h)	Modelo físico	Equipamento real
20	135	0,4	0,7
25	170	0,55	0,9

Grau de emulsificação em função da vazão de alimentação

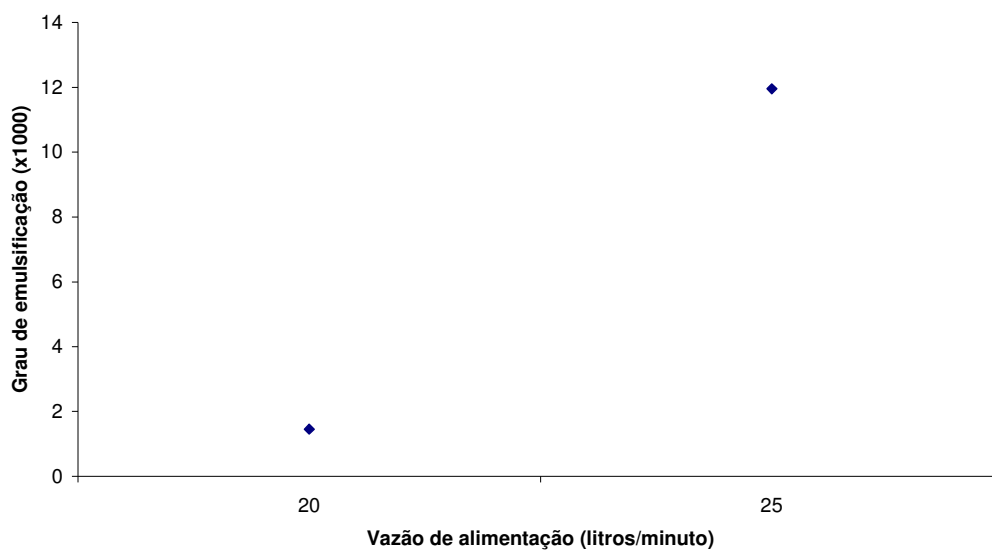


Figura 5.13: Grau de emulsificação do óleo de silicone em função da vazão de alimentação no molde de lingotamento contínuo.

Tamanho médio da partícula emulsificada em função da vazão de alimentação

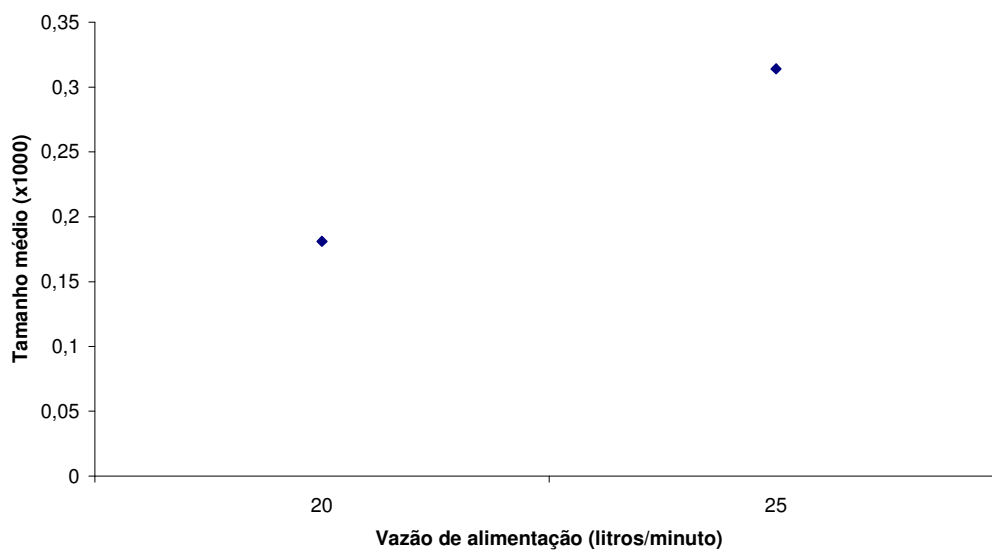


Figura 5.14: Tamanho médio das partículas emulsificadas em função da vazão de alimentação no molde de lingotamento contínuo.

5.3.5- Efeito da viscosidade do pó fluxante

Segundo Thomas (1996), a viscosidade do pó fluxante líquido varia significativamente com a variação da temperatura e a temperatura do pó fluxante líquido na interface pó fluxante-aço também varia com a posição como é mostrado na figura 5.15. Os estudos realizados neste trabalho consideram a viscosidade do pó fluxante uniforme. Para avaliar o efeito da variação da viscosidade cinemática, foram feitos testes com 3 tipos de óleo.

Nesta etapa a viscosidade cinemática do óleo de silicone, utilizado para simular o pó fluxante líquido, foi variada e as demais condições operacionais foram mantidas constantes. As condições utilizadas são mostradas a seguir.

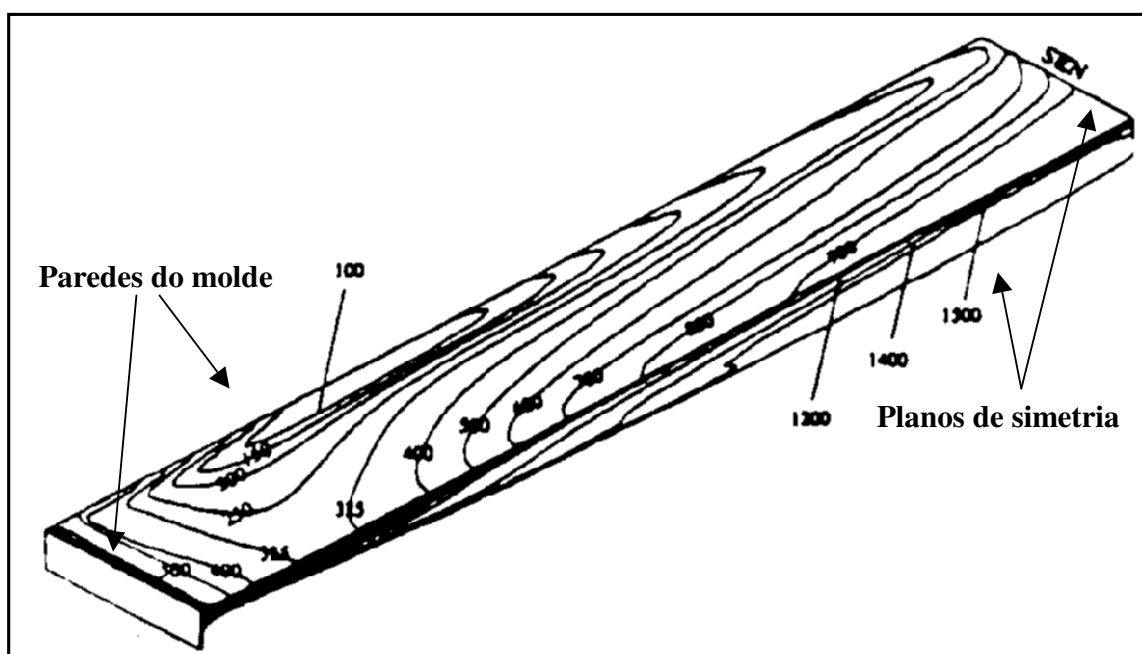


Figura 5.15: Distribuição de temperatura na interface metal-pó fluxante em um molde de lingotamento contínuo de placas (Thomas, 1996).

Tabela V-10: Condições operacionais utilizadas nos ensaios para análise do grau de emulsificação em função da viscosidade cinemática do óleo de silicone utilizado.

Parâmetro	Modelo físico	Equipamento real
Penetração da válvula submersa	3 centímetros	9 centímetros
Vazão	25 litros/minuto	170 toneladas/hora
Largura da placa	0,6 metros	1,8 metros
Viscosidade cinemática	0,6 cm ² /segundo, 0,9 cm ² /segundo, 1,3 cm ² /segundo	0,6 cm ² /segundo, 0,9 cm ² /segundo, 1,3 cm ² /segundo
Inclinação das portas de saída da válvula submersa	15° ascendente	15° ascendente

As figuras 5.16 e 5.17 mostram o efeito da viscosidade cinemática do óleo sobre o grau de emulsificação e tamanho médio das partículas, respectivamente.

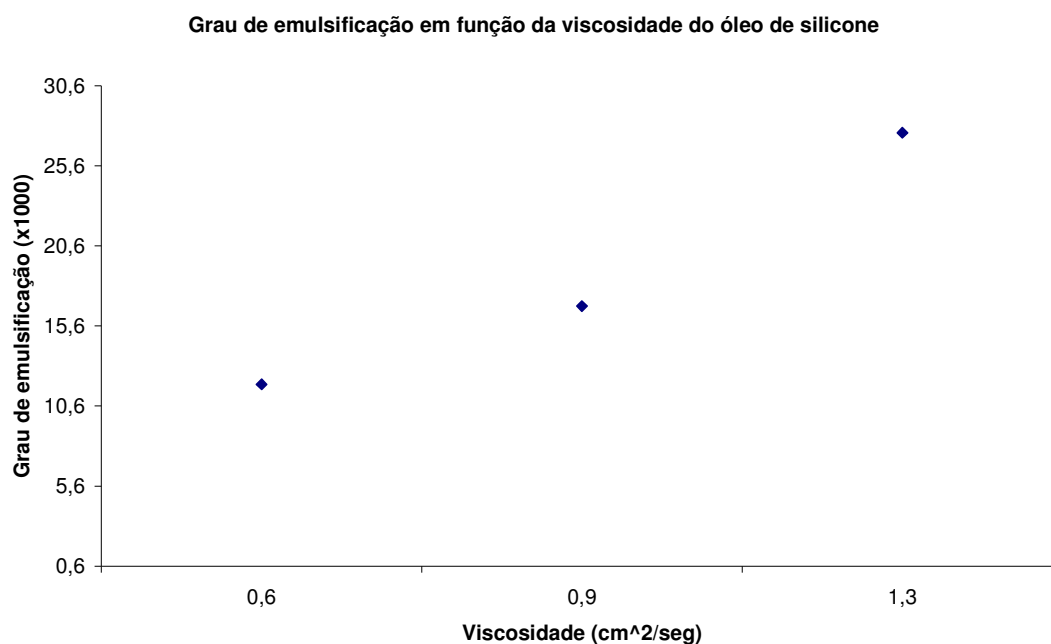


Figura 5.16: Gráfico mostrando o grau de emulsificação do óleo de silicone em função da viscosidade cinemática do mesmo.

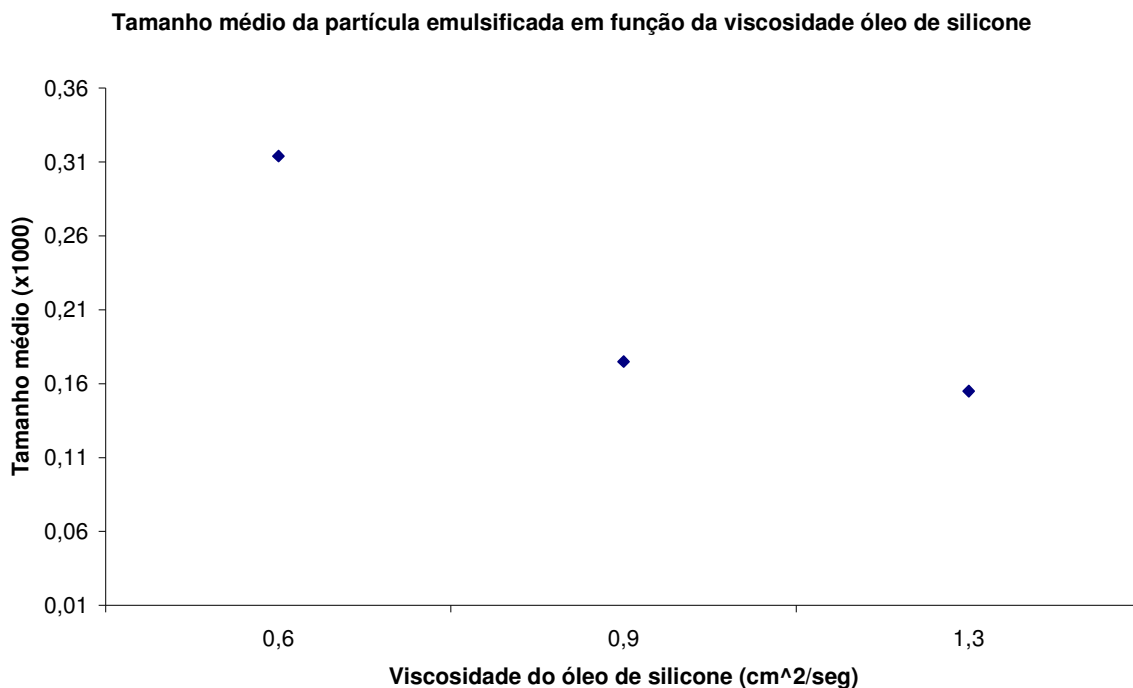


Figura 5.17: Tamanho médio das partículas emulsificadas em função da viscosidade cinemática do óleo de silicone.

Neste caso o efeito é relacionado à formação de pescoços na interface. Para o óleo de maior viscosidade cinemática, formam-se muitas partículas pequenas, pois não se formam oscilações grandes na interface água-óleo. No óleo com menor viscosidade cinemática são formadas poucas partículas grandes, pois o óleo se deforma facilmente na interface neste caso. Este resultado está de acordo com o mecanismo de emulsificação por escoamento tipo Marangoni, mostrado esquematicamente na figura 5.18, descrito por Chung et al (2000).

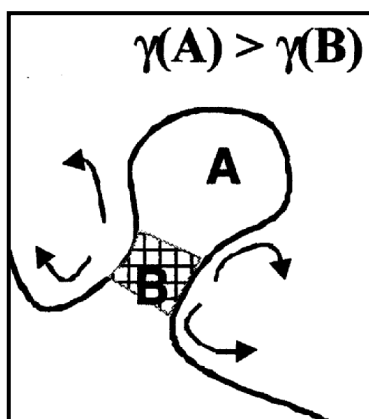


Figura 5.18: Emulsificação gerada por escoamento tipo Marangoni (Chung et al, 2000).

5.4- Perfil de Velocidades das Partículas Emulsificadas

As partículas emulsificadas tendem a acompanhar o fluxo do aço, por estarem envolvidas por ele, porém, a diferença da densidade faz com que o empuxo leve essas partículas para a superfície. Utilizando as técnicas de visualização de escoamento associadas ao modelamento matemático foi possível sobrepor a trajetória das partículas com o perfil de velocidades do aço. As condições utilizadas foram vazão de alimentação de 25 l/min, largura do molde de 600 mm, penetração da válvula de 3 cm, viscosidade do óleo de 0,6 cm²/seg e inclinação das portas de saída da válvula submersa de 15°, ascendente. Essa imagem é mostrada na figura 5.19.

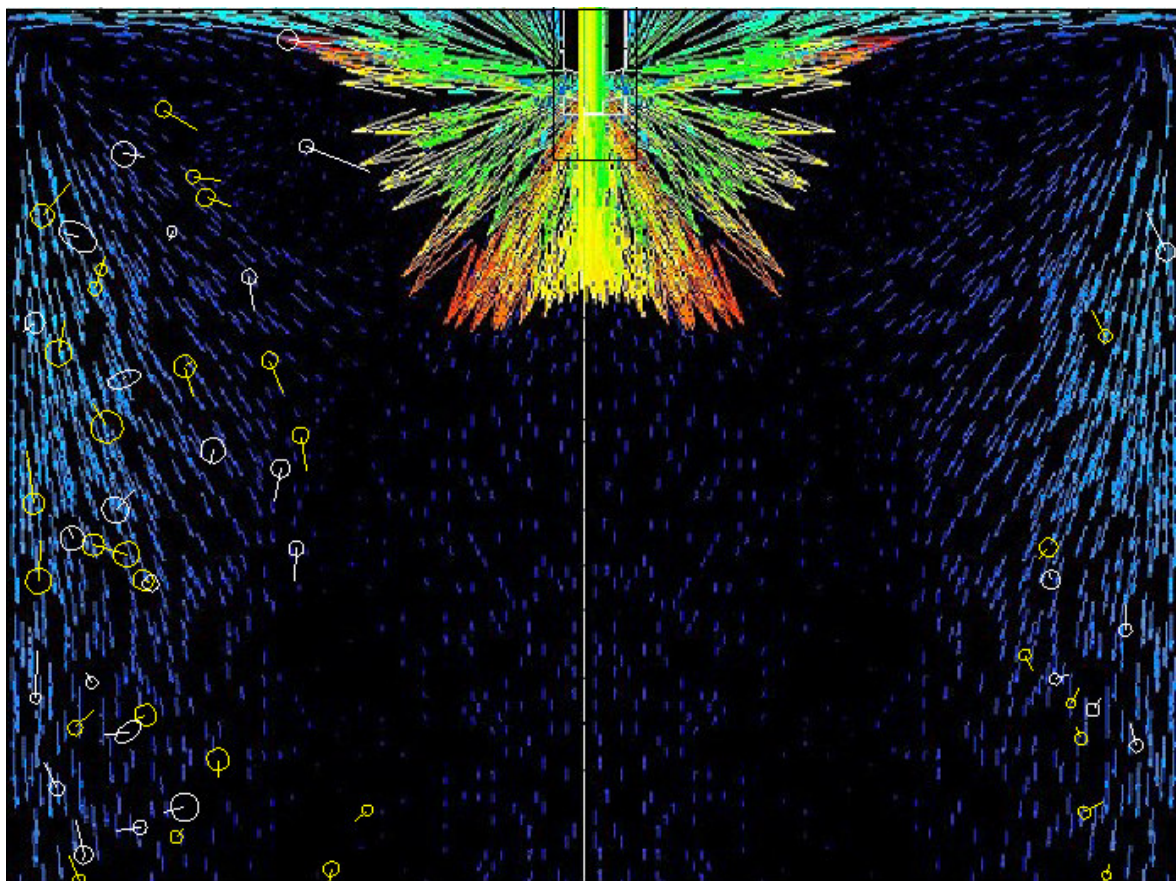


Figura 5.19: Perfil de velocidades do aço líquido, obtido por modelamento matemático, associado à trajetória de partículas emulsificadas, obtido por modelamento físico

Esta imagem mostra claramente a influência da movimentação do aço sobre a movimentação das partículas emulsificadas no molde do equipamento de lingotamento contínuo. As partículas emulsificadas seguem o fluxo do aço em regiões onde a velocidade do aço líquido é alta, no entanto, à medida que a velocidade do aço

diminui, o empuxo passa a prevalecer, gerando uma recirculação das partículas emulsificadas.

Segundo Andrade (1984), pode ocorrer assimetria no fluxo do aço no interior do molde, este fenômeno foi estudado por Wang (1990), que associou o fato à abertura da válvula gaveta, como mostrado na figura 5.20. Isso explica a assimetria das partículas emulsificadas.

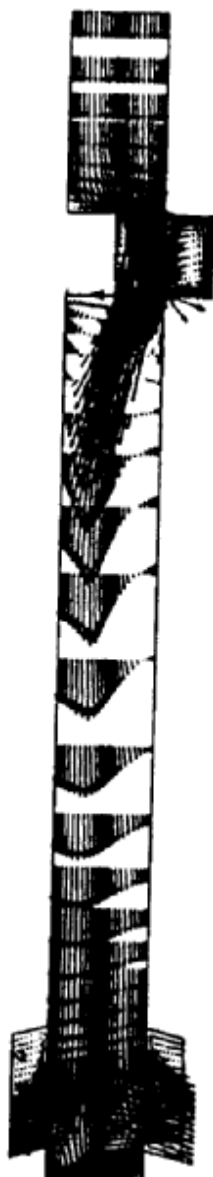


Figura 5.20: Perfil de velocidade do aço em uma válvula submersa obtido por modelamento matemático (Wang, 1990).

6- CONCLUSÃO

Os resultados obtidos neste trabalho mostram que os parâmetros geométricos e operacionais em um equipamento de lingotamento contínuo têm grande influência sobre a limpidez do produto obtido.

O perfil de velocidades obtido por modelamento matemático foi validado pelo obtido por modelamento físico, permitindo a utilização desta ferramenta em outras análises.

O perfil da interface água-óleo sofreu grande influência com a modificação do ângulo das portas de saída da válvula submersa. O ângulo descendente é o que obtém a interface água-óleo mais plana e com menor turbulência. A válvula com portas de saída com angulação ascendente apresenta um alto índice de turbulência e de formação de “pescoços” na interface, possibilitando um alto grau de emulsificação. A válvula com portas de saída horizontais apresentou um resultado intermediário.

A comparação dos perfis das interfaces água-óleo, com o modelamento matemático, mostrou também a influência da pressão da água na interface sobre este perfil, justificando o comportamento da interface mais plana com o uso da válvula com portas de saída com inclinação descendente.

O efeito da vazão de alimentação do aço sobre o grau de emulsificação e o tamanho médio das partículas emulsificadas foi muito semelhante ao obtido com a alteração da largura da placa lingotada. O mecanismo de emulsificação aparentemente é o mesmo para os dois casos, logo a velocidade de lingotamento seria um parâmetro de controle mais adequado neste caso do que a vazão volumétrica do aço, pois esta variável é obtida através da razão entre a vazão volumétrica e a área superficial da seção transversal da placa (diretamente proporcional à largura da placa).

O aumento da penetração da válvula submersa proporciona ótimos resultados em relação ao grau de emulsificação e ao tamanho médio das partículas emulsificadas, ficando sua penetração máxima limitada pelos aspectos de transferência de calor.

O efeito da inclinação das portas de saída da válvula submersa correspondem ao esperado pelo resultado obtido na análise do perfil da interface água-óleo. A válvula com portas de saída com inclinação ascendente é a que apresenta maior grau de emulsificação e maiores partículas emulsificadas. A válvula com portas de saída com inclinação descendente apresenta os melhores resultados, não apresentando partículas emulsificadas para as condições testadas.

Os resultados obtidos com a alteração da viscosidade do óleo apresentaram maior grau de emulsificação para o óleo de maior viscosidade, porém, este apresentou também as menores partículas emulsificadas. O óleo com menor viscosidade apresentou resultados inversos e o com viscosidade intermediária apresentou resultados intermediários. Este resultado está provavelmente relacionado à facilidade de formar “pescoços” na interface água-óleo. O óleo de baixa viscosidade apresentou poucos “pescoços”, mas de grande dimensão, enquanto o óleo com alta viscosidade apresentava muitos “pescoços” de tamanho reduzido.

A sobreposição dos perfis de velocidade do aço e das partículas emulsificadas permite notar que as partículas seguem o fluxo do aço nas regiões onde a velocidade do aço é alta, para regiões onde a velocidade do aço é baixa, as partículas tendem a subir em direção à interface pela força de empuxo.

Também foi observado que a principal causa para emulsificação é a turbulência na interface água-óleo. Os parâmetros que causam maior impacto neste sentido são a penetração da válvula submersa e o ângulo da porta de saída da válvula submersa.

7- TRABALHOS FUTUROS

Neste item são sugeridos alguns trabalhos que podem ser realizados utilizando os recursos do LaSiP, dando continuidade aos trabalhos realizados.

Modelamento físico integrado do equipamento de lingotamento contínuo verificando o escoamento bifásico metal/escória na panela.

Estudo do lingotamento contínuo de tiras finas utilizando o sistema integrado, permitindo comparação imediata com o lingotamento de placas a partir da construção de curvas DTR.

Avaliação da relação entre o tamanho da partícula emulsificada, a velocidade do aço líquido e a capacidade de flotação da partícula, permitindo a definição da velocidade máxima de lingotamento para um determinado tamanho máximo de inclusão não metálica.

Outras geometrias de ponteiras de válvulas submersas podem ser testadas inclusive utilizando injeção de gás na válvula submersa, estudando-se o escoamento tri-fásico.

8- REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ANDRADE, S. O. C. INFLUÊNCIA DA GEOMETRIA DA VÁLVULA SUBMERSA SOBRE O FLUXO DE METAL NO MOLDE DE LINGOTAMENTO. Belo Horizonte: Escola de Engenharia da UFMG, 1978. 116p (Dissertação, Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Minas).
- BARBOSA, F. A. MODELAMENTO MATEMÁTICO E FÍSICO DO ESCOAMENTO DO AÇO LÍQUIDO EM DIFERENTES PROJETOS DE DISTRIBUIDOR DO LINGOTAMENTO CONTÍNUO DA USIMINAS. Belo Horizonte: Escola de Engenharia da UFMG, 2002. 188p (Dissertação, Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Minas).
- BEZERRA, M. C. C. et al. Avaliação da Taxa de Fusão de Fluxantes para Lingotamento Contínuo de Aços. XXXVI Seminário de Fusão, Refino e Solidificação dos Metais-Internacional p.211-220, Maio 2005.
- BRACKBILL, J. U.; KOTHE, D. B.; ZEMACH, C. A continuum method for modelling surface tension. *Journal of Computational Physics*, n. 100, p. 335-354, 1992.
- BRANION, R. V. Mold Fluxes for Continuous Casting. I&SM, p.41-50, September 1986.
- CHUNG, Y., JIMBO, I., SHARAN, A., BYRNE, M., CRAMB, A. W.; Dynamic Interfacial Phenomena in Liquid Steel Slag Systems. Belton Symposium, 2000, p 165-184.
- GEIGER, G. H. POIRIER, D. R. Transport Phenomena in Metallurgy. Reading: Addison-Wesley, 1973, 616 p.
- GUPTA, D., LAHIRI, A. K.; Water-Modeling Study of the Surface Disturbances in Continuous Slab Caster. Metallurgical and Materials Transaction B, Volume 25 B, p.227-233, April 1994.
- HANLEY, P. J. Electromagnetic Methods for Continuous Casting. In: THE MAKING, SHAPING AND STEEL; Casting Volume. AISE Steel Foundation, 11th edition.

- HE, Q. Observation of Vortex Formation in the Mold of a Continuous Slab Caster. *ISIJ International*, Vol. 33, No 2, pp.343-345, 1993.
- KAWAMOTO, M.; NAKAJIMA, K.; KANAZAWA, T.; NAKAI, K. Designs principles of mold fluxes for high speed continuous casting. *ISIJ International*, v. 34, n.7, p. 593-598, 1994.
- 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
- KUBOTA, J., et al. MECHANISM OF LEVEL FLUCTUATION AND MOLD POWDER CATCHING IN SLAB CONTINUOUS CASTING AT HIGH SPEEDS. In: Proceedings of The Sixth International Iron and Steel Congress, Nagoya, ISIJ, 1990.
- LOURENÇO, P. T. MODELAMENTO FÍSICO DO SISTEMA DE INJEÇÃO DE GÁS INERTE EM PANELA DE AÇO. Belo Horizonte: Escola de Engenharia da UFMG, 1985. 167 p (Dissertação, Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Minas)
- Oberkampf, W. L.; TRUCANO, T. G.; HIRSCH, C. Verification, validation and predictive capability in computational engineering and physics. *Foundations for verification and validation in the 21st century workshop*, Maryland (USA), 20 p., 22 –23 October, 2002.
- PENNA, L. V. TRINCAS DE SOLIDIFICAÇÃO OFF-CORNER NO LINGOTAMENTO CONTÍNUO DE TARUGOS. Belo Horizonte: Escola de Engenharia da UFMG, 2005. 216p (Dissertação, Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Minas).
- PINHEIRO, C. A. M. ANÁLISE TÉRMICA DO LINGOTAMENTO CONTÍNUO DE AÇOS COM ÊNFASE NO RESFRIAMENTO POR SPRAY DE ÁGUA. Belo Horizonte: Escola de Engenharia da UFMG, 1988. 98p (Dissertação, Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Minas).
- RABOCKAI, T. Físico-Química de Superfícies. Instituto de Química da Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, Brasil, 1979.
- TAVARES, R. P. *Apostila de Fenômenos de Transporte*, Abril de 2002.

THOMAS, B. G.; Mc DAVID, R. M. Flow and Thermal Behavior of the Top Surface Flux/Powder Layers in Continuous Casting Molds. Metallurgical and Materials Transaction B, Vol. 27B, pp. 672-685, 1996.

THOMAS, B. G. Fluid Flow in the Mold. In: THE MAKING, SHAPING AND STEEL; Casting Volume. AISE Steel Foundation, 11th edition, 2003.

THOMAS, B. G. CONTINUOUS CASTING OF BILLETS, BLOOMS AND SLABS. Vancouver: The Centre for Metallurgical Process Engineering, The University of British Columbia, April, 1993. Volume I.

TSUKIHASHI, F., LI, B. Vortexing Flow Patterns in a Water Model of Slab Continuous Casting Model. ISIJ International, Vol. 45, No 1, pp.30-36, 2005

VIEIRA, F. B. DESENVOLVIMENTO DE UMA METODOLOGIA PARA SELEÇÃO DE PÓ FLUXANTE PARA O LINGOTAMENTO DE PLACAS DE AÇOS COM COMPORTAMENTO PERITÉTICO. Belo Horizonte: Escola de Engenharia da UFMG, 2002. 97p (Dissertação, Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Minas).

VIENA, U. A. MODELO FÍSICO PARA SIMULAÇÃO DO SISTEMA DE INJEÇÃO DE GÁS E PÓS ATRAVÉS DE LANÇA EM PANELA DE ACIARIA. Belo Horizonte: Escola de Engenharia da UFMG, 1989. 234p (Dissertação, Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Minas).

WANG, H. J. Turbulent Recirculating Flow in Argon-Stirred-Ladle. Univ. of N.Y. at Buffalo. 1975. (M.S. Thesis)

WANG, Y. H. 73rd Steelmaking Conf. Proc., ISS-AIME, Warrendale, PA, 343p, 1990.

WANG, Y. H. A Study of a Effect of Casting Conditions on Fluid Flow in the Mold Using Water Modelling. Steelmaking Conference Proceedings, pp. 473-480, 1990.

WINDER, E. A. et al. Optimization of Steel Flow Conditions in the Mould using Mathematical and Physical Modelling. 3rd European Conference on Continuous Casting, October, 1998.

WOLF, M.M. Estimation method of crack susceptibility for new steel grades. **European conference on continuous casting**, p2489-2499, 1991.

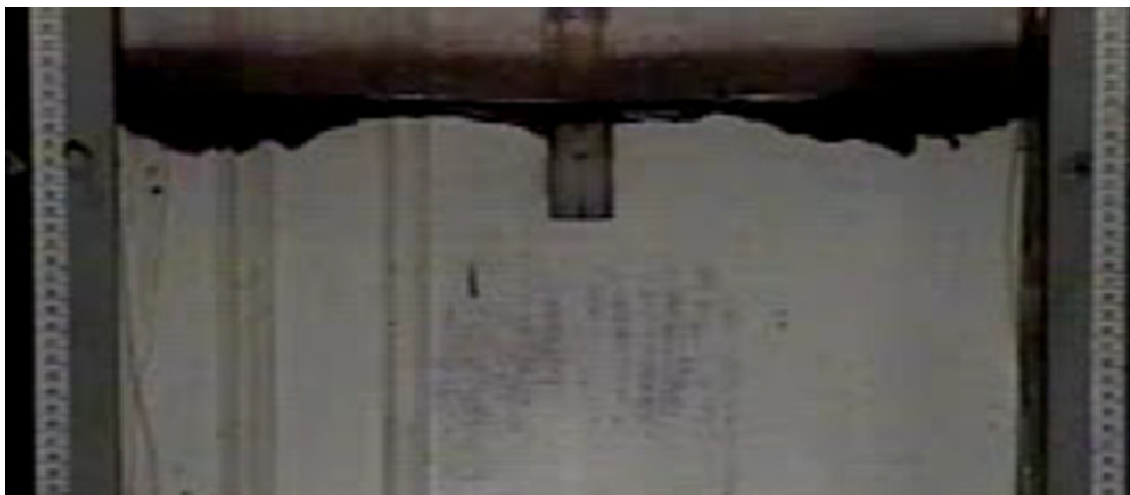
WOLLMANN, A. M. ESTUDOS DE FLUXO EM UM DISTRIBUIDOR DE LINGOTAMENTO CONTÍNUO. Porto Alegre: Escola de Engenharia da UFRGS, 1999. 95p (Dissertação, Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Minas).

ZHANG, L. et al. Physical, Numerical and Industrial Investigation of Fluid Flow and Steel Cleanliness in the Continuous Casting Mold at Panzhihua Steel. AISTech 2004 Proceedings, Volume II, p. 879-894.

http://www.jfe-21st-cf.or.jp/chapter_2/2j_2_img.html, 2 de novembro de 2004

ANEXOS

ANEXO I – Amostras das imagens obtidas durante os experimentos para as diferentes condições estudadas



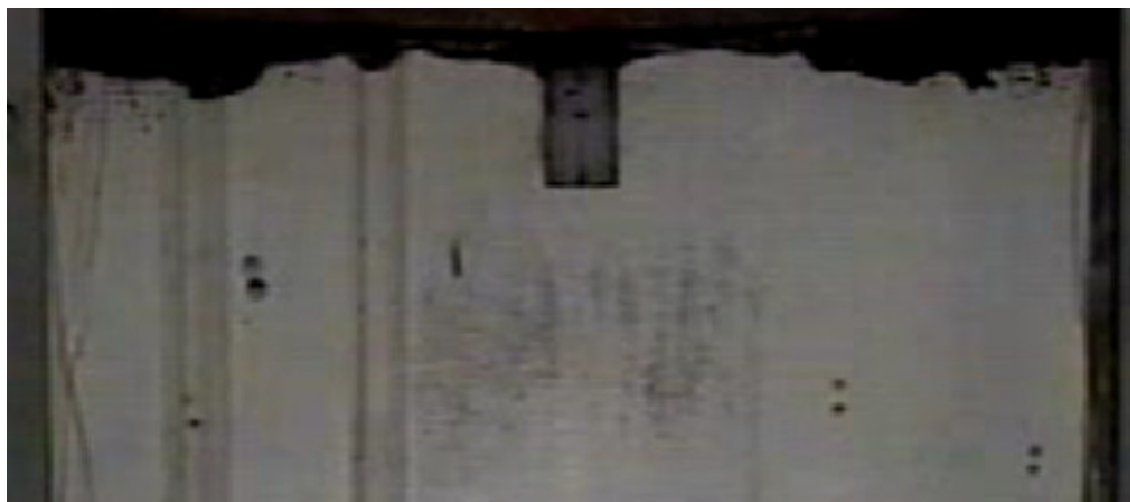
Largura da placa:600 mm ,vazão de alimentação: 20l/min ,inclinação das portas de saída da válvula submersa: ascendente 15°, penetração da válvula submersa: 2 cm, viscosidade do óleo de silicone: 0,6 cm²/seg.



Largura da placa:500 mm ,vazão de alimentação: 20l/min ,inclinação das portas de saída da válvula submersa: ascendente 15°, penetração da válvula submersa: 2 cm, viscosidade do óleo de silicone: 0,6 cm²/seg.



Largura da placa:400 mm ,vazão de alimentação: 20l/min ,inclinação das portas de saída da válvula submersa: ascendente 15°, penetração da válvula submersa: 2 cm, viscosidade do óleo de silicone: 0,6 cm²/seg.



Largura da placa:600 mm ,vazão de alimentação: 20l/min ,inclinação das portas de saída da válvula submersa: ascendente 15°, penetração da válvula submersa: 3 cm, viscosidade do óleo de silicone: 0,6 cm²/seg.



Largura da placa:600 mm ,vazão de alimentação: 25l/min ,inclinação das portas de saída da válvula submersa: ascendente 15°, penetração da válvula submersa: 3 cm, viscosidade do óleo de silicone: 0,6 cm²/seg.



Largura da placa:600 mm ,vazão de alimentação: 25l/min ,inclinação das portas de saída da válvula submersa: horizontal 0°, penetração da válvula submersa: 3 cm, viscosidade do óleo de silicone: 0,6 cm²/seg.



Largura da placa:600 mm ,vazão de alimentação: 25l/min ,inclinação das portas de saída da válvula submersa: descendente 15°, penetração da válvula submersa: 3 cm, viscosidade do óleo de silicone: 0,6 cm²/seg.



Largura da placa:600 mm ,vazão de alimentação: 25l/min ,inclinação das portas de saída da válvula submersa: ascendente 15°, penetração da válvula submersa: 3 cm, viscosidade do óleo de silicone: 0,9 cm²/seg.



Largura da placa:600 mm ,vazão de alimentação: 25l/min ,inclinação das portas de saída da válvula submersa: ascendente 15° , penetração da válvula submersa: 3 cm, viscosidade do óleo de silicone: $1,3 \text{ cm}^2/\text{seg}$.

ANEXO II – Imagem de um ensaio de injeção de corante mostrando o jato obtido com a utilização da válvula submersa com portas de saída com inclinação ascendente de inclinação 15°.

