

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS  
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA  
METALÚRGICA E DE MINAS**

**Dissertação de Mestrado**

**“Modelamento Físico e Matemático da Formação  
de Placa de Mistura no Lingotamento Contínuo –  
Efeitos de Modificadores de Fluxo no Molde”**

**Autora: Renata Cristina Alves Elias**

**Orientador: Prof. Roberto Parreiras Tavares**

**Fevereiro – 2010**

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS  
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA  
METALÚRGICA E DE MINAS**

**Renata Cristina Alves Elias**

**“Modelamento Físico e Matemático da Formação de Placa de Mistura  
no Lingotamento Contínuo – Efeitos de Modificadores de Fluxo no Molde”**

**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**

**2010**

## **AGRADECIMENTOS**

A Deus por não ter me deixado só, por um instante sequer, ao longo de toda esta jornada.

Ao meu pai, Ademir, e à minha mãe, Jorgina, pelo apoio e suporte necessários para sempre seguir em frente.

Ao meu grande amor, Flávio, pelo companheirismo, paciência e incentivo.

Ao professor Roberto Parreiras Tavares pela brilhante orientação durante o trabalho e, principalmente, pelo exemplo de profissionalismo e ética, em quem quero me espelhar durante a minha vida profissional.

Aos alunos Fernando e Flávio pelo empenho e seriedade durante a realização do modelamento físico.

Ao pessoal do LaSiP – Laboratório de Simulação de Processos, que me deu suporte durante o aprendizado do modelamento matemático.

À Cida e ao Nelson pela assistência prestada durante todo o mestrado.

## SUMÁRIO

	Página
<b>LISTA DE FIGURAS</b> .....	vi
<b>LISTA DE TABELAS</b> .....	xiv
<b>LISTA DE NOTAÇÕES</b> .....	xv
<b>RESUMO</b> .....	xvii
<b>ABSTRACT</b> .....	xix
<b>1 – INTRODUÇÃO</b> .....	1
<b>2 – OBJETIVOS</b> .....	3
<b>3 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	4
<b>3.1 – Descrição do Processo de Lingotamento Contínuo</b> .....	4
<b>3.2 – Escoamento do Aço Líquido no Veio de Lingotamento Contínuo</b> .....	8
<i>3.2.1 – Modelamento físico</i> .....	12
<i>3.2.2 – Modelamento matemático</i> .....	18
<b>3.3 – Formação da Placa de Mistura</b> .....	28
<i>3.3.1 – Estudos de formação da placa de mistura</i> .....	32
<b>4 – METODOLOGIA</b> .....	41
<b>4.1 – Modelamento Físico</b> .....	41
<i>4.1.1 – Descrição das instalações dos modelos físicos</i> .....	41
<i>4.1.2 – Procedimento Experimental</i> .....	47
<i>4.1.2.1 – Regime estacionário</i> .....	47
<i>4.1.2.2 – Regime transiente</i> .....	48
<i>4.1.2.3 – Curvas de Transição</i> .....	49
<i>4.1.2.4 – Configurações dos modificadores de fluxo no molde</i> .....	52
<b>4.2 – Modelamento Matemático</b> .....	55
<i>4.2.1 – Construção da geometria e da malha</i> .....	56
<i>4.2.2 – Configuração da simulação</i> .....	58
<i>4.2.3 – Solução das equações de conservação</i> .....	61
<i>4.2.4 – Pós-processamento dos resultados</i> .....	62
<b>4.3 – Validação do Modelo Matemático</b> .....	62
<b>5 – RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	63
<b>5.1 – Testes Preliminares</b> .....	63

<b>5.2 – Efeitos dos Modificadores de Fluxo no Molde</b> .....	76
<b>5.2.1 – Perfis de velocidade</b> .....	76
<b>5.2.2 – Comprimento da placa de mistura</b> .....	82
<b>5.2.3 – Nível de turbulência na superfície livre</b> .....	87
<b>5.3 – Validação do Modelo Matemático</b> .....	91
<b>6 – CONCLUSÕES</b> .....	96
<b>7 – SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS</b> .....	97
<b>8 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....	98
<b>9 – BIBLIOGRAFIA</b> .....	105

## LISTA DE FIGURAS

	Página
Figura 3.1: Visão esquemática do processo de lingotamento contínuo. (Disponível em: < <a href="http://www.jfe-21st-cf.or.jp/chapter_2/2j_2_img.html">http://www.jfe-21st-cf.or.jp/chapter_2/2j_2_img.html</a> >. Acesso em: 01 nov. 2008)....	4
Figura 3.2: Desenho esquemático do distribuidor, válvula submersa e molde. (Thomas, 2003).....	7
Figura 3.3: Perfis típicos de escoamento do aço em moldes retangulares com válvula submersa bifurcada com (a) uma região de recirculação e (b) duas regiões de recirculação (Thomas, 2003).....	9
Figura 3.4: Diagrama esquemático do perfil do menisco e do padrão de escoamento dentro de um molde retangular (Gupta e Lahiri, 1994).....	10
Figura 3.5: Diagrama esquemático mostrando a formação do vórtice ao redor da válvula submersa (Gupta e Lahiri, 1994).....	10
Figura 3.6: Perfil de escoamento no veio de lingotamento contínuo, conforme Huang e Thomas (1993). Dimensões da placa: 1,32m de largura e 0,22m de espessura, considerando um quarto do domínio.....	11
Figura 3.7: Esboço do escoamento desenvolvido em um molde para placas, usando válvula submersa bifurcada, conforme Xiu e Carlsson (1983).....	15
Figura 3.8: Perfil de escoamento observado na metade do modelo físico do molde com 1,118m de comprimento, 0,686m de largura e 0,229m de espessura, conforme Thomas et al. (1990).....	16
Figura 3.9: Flutuação do menisco ao longo da largura do molde; porta da válvula de 20mm com ângulo de 0°, profundidade de imersão de 150mm, escala do molde de 1:8 e taxa de escoamento de $1,22 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$ (Gupta e Lahiri, 1994).....	17

	Página
Figura 3.10: Diagrama esquemático do perfil do menisco e do padrão de escoamento do fluido no molde, conforme Kamal e Sahai (2006).....	26
Figura 3.11: Localização no molde dos dispositivos para modificação do escoamento no molde (MFCD) (Kamal e Sahai, 2006) .....	27
Figura 3.12: Geometrias dos dispositivos para modificação do escoamento no molde (MFCD) testados no estudo por Kamal e Sahai (2006).....	27
Figura 3.13: Esquema típico de transição de qualidades, apresentando a velocidade de escoamento, massa e taxa de alimentação do distribuidor, variando com o tempo. (Huang e Thomas, 1996a).....	30
Figura 3.14: Curvas obtidas pelo modelo matemático, mostrando o efeito da quantidade de fluido residual no distribuidor na distribuição da composição química ao longo da placa sendo lingotada. A velocidade de lingotamento é de 1,0m/min. (Yeh et al., 1993) .....	33
Figura 3.15: Curvas obtidas pelo modelo matemático, mostrando o efeito da velocidade de lingotamento na distribuição da composição química ao longo da placa sendo lingotada. A quantidade residual de fluido é de 2.206kg (Yeh et al., 1993) .....	33
Figura 3.16: Esquema do modelo contendo os três volumes do distribuidor de lingotamento contínuo, segundo Huang e Thomas (1996a) .....	34
Figura 3.17: Esquema do modelo contendo as três zonas do veio de lingotamento contínuo, segundo Huang e Thomas (1996a) .....	34
Figura 3.18: Curvas de transição para o molde para diferentes níveis mínimos de fluido no distribuidor (Filho et al., 2008).....	38

	Página
Figura 3.19: Efeito do nível mínimo de líquido no distribuidor sobre o comprimento da placa de mistura (Filho et al., 2008) .....	38
Figura 3.20: Efeito da velocidade de lingotamento e da largura da placa na quantidade de placa de mistura formada, baseada nas composições químicas medidas no centro e na superfície da placa (Alizadeh et al, 2008).....	40
Figura 4.1: Vistas superior e em perspectiva do inibidor de turbulência utilizado no distribuidor, com as dimensões em centímetros, onde D = diâmetro, C = comprimento, L = largura e H = altura. O material acrílico possui espessura de 1cm .....	42
Figura 4.2: Vista frontal dos modelos físicos a serem utilizados, instalados no Laboratório de Simulação de Processos .....	43
Figura 4.3: Vista esquemática dos modelos físicos com indicação dos medidores de vazão e condutivímetros. (Tavares, 2008).....	44
Figura 4.4: Vistas frontal, lateral e superior do distribuidor, com as dimensões em milímetros .....	44
Figura 4.5: Vistas frontal, lateral e superior do molde, com as dimensões em milímetros .....	45
Figura 4.6: Corte transversal da ponteira da válvula submersa, com as dimensões em milímetros (Barral, 2006) .....	45
Figura 4.7: Tela do painel de controle utilizado durante a operação do sistema.....	46
Figura 4.8: Desenho esquemático indicando a definição da profundidade da válvula submersa no molde .....	48



	Página
Figura 4.9: Gráfico esquemático da vazão de alimentação e do nível do distribuidor em relação ao tempo dos experimentos .....	49
Figura 4.10: Exemplo de uma curva de transição de qualidades F.....	50
Figura 4.11: Exemplo de curvas de transição para formação de placa de mistura, identificando os tempos de transição no molde e no distribuidor (Filho et al., 2008)....	51
Figura 4.12: Geometria e dimensões em centímetros dos modificadores de fluxo A e B .....	53
Figura 4.13: Localização dos modificadores de fluxo A e B no molde de lingotamento contínuo .....	53
Figura 4.14: Modificadores de fluxo posicionados na parte superior do molde.....	54
Figura 4.15: Visão esquemática da região modelada (Pereira et al., 2001).....	56
Figura 4.16: Exemplos de <i>Mesh Controls</i> . a) ao redor de um ponto, b) ao longo de uma linha, c) em torno de um triângulo (CFX – <i>Mesh Help</i> ).....	57
Figura 4.17: Região de aplicação do <i>Inflated Boundary</i> (CFX – <i>Mesh Help</i> ).....	58
Figura 4.18: Gráfico dos valores de concentração de traçador na saída do distribuidor, obtidos no modelo físico (Torres, 2009).....	60
Figura 5.1: Vista frontal e vista em perspectiva do molde com a localização do comando <i>Default Body Spacing</i> , que define o valor do tamanho dos elementos de volume utilizados.....	64
Figura 5.2: Localização dos comandos <i>Mesh Control</i> e <i>Inflated Boundary</i> no molde...	64

	Página
Figura 5.3: Comparação dos Casos 1, 2 e 3 das simulações realizadas para o molde sem modificador de fluxo.....	66
Figura 5.4: Comparação dos modelos de turbulência para o Caso 2, das simulações realizadas para o molde sem modificador de fluxo .....	66
Figura 5.5: Comparação dos níveis de turbulência na alimentação do molde para o Caso 2, das simulações realizadas para o molde sem modificador de fluxo .....	67
Figura 5.6: Comparação dos saltos de tempo para o Caso 2, das simulações realizadas para o molde sem modificadores de fluxo .....	68
Figura 5.7: Comparação entre os refinamentos 1 e 2 utilizando o modificador A1 .....	69
Figura 5.8: Comparação entre os refinamentos 1 e 2 utilizando o modificador A9.....	69
Figura 5.9: Comparação entre os refinamentos 1 e 2 utilizando o modificador B .....	70
Figura 5.10: Resíduos das equações de conservação de massa e de quantidade de movimento da configuração sem modificador de fluxo .....	72
Figura 5.11: Resíduos das equações de conservação de massa e de quantidade de movimento da configuração com o modificador A7 .....	72
Figura 5.12: Resíduos das equações de conservação de massa e de quantidade de movimento da configuração com o modificador B .....	73
Figura 5.13: Comparação entre os esquemas de interpolação <i>upwind</i> e <i>high resolution</i> para a configuração com o modificador de fluxo A4 .....	74

	Página
Figura 5.14: Comparação entre os esquemas de interpolação <i>upwind</i> e <i>high resolution</i> para a configuração com o modificador de fluxo A6 .....	74
Figura 5.15: Comparação entre os esquemas de interpolação <i>upwind</i> e <i>high resolution</i> para a configuração com o modificador de fluxo B.....	75
Figura 5.16: Ilustração de três volumes de controle com três pontos nodais (W, P e E) e duas interfaces ( <i>w</i> e <i>e</i> ).....	75
Figura 5.17: Perfis de velocidade no molde das configurações sem modificador e com modificador de fluxo A1 .....	77
Figura 5.18: Perfis de velocidade no molde das configurações com os modificadores de fluxo A9 e B.....	78
Figura 5.19: Perfil de velocidade, na região superior do molde, da configuração sem modificador de fluxo.....	79
Figura 5.20: Perfil de velocidade, na região superior do molde, da configuração com o modificador de fluxo A1 .....	79
Figura 5.21: Perfil de velocidade, na região superior do molde, da configuração com o modificador de fluxo A9.....	80
Figura 5.22: Perfil de velocidade, na região superior do molde, da configuração com o modificador de fluxo B .....	80
Figura 5.23: Perfis de velocidade no plano 5cm abaixo da superfície livre, das configurações sem modificador e com o modificador de fluxo A1 .....	81

	Página
Figura 5.24: Perfis de velocidade no plano 5cm abaixo da superfície livre, das configurações com os modificadores de fluxo A9 e B .....	81
Figura 5.25: Curvas de transição das configurações sem o modificador e com os modificadores A1, A2 e A3, obtidas pelo modelamento matemático .....	82
Figura 5.26: Curvas de transição das configurações sem o modificador e com os modificadores A4, A5 e A6, obtidas pelo modelamento matemático .....	83
Figura 5.27: Curvas de transição das configurações sem o modificador e com os modificadores A7, A8 e A9, obtidas pelo modelamento matemático .....	83
Figura 5.28: Curvas de transição das configurações sem o modificador e com o modificador B, obtidas pelo modelamento matemático .....	84
Figura 5.29: Evolução da concentração do traçador no tempo de 50s para as configurações sem modificador e com os modificadores de fluxo A3 e B, no plano de simetria.....	85
Figura 5.30: Evolução da concentração do traçador no tempo de 100s para as configurações sem modificador e com os modificadores de fluxo A3 e B, no plano de simetria.....	86
Figura 5.31: Evolução da concentração do traçador no tempo de 150s para as configurações sem modificador e com os modificadores de fluxo A3 e B, no plano de simetria.....	86
Figura 5.32: Evolução da concentração do traçador no tempo de 200s para as configurações sem modificador e com os modificadores de fluxo A3 e B, no plano de simetria.....	87

	Página
Figura 5.33: Energia cinética de turbulência na superfície livre das configurações sem modificador e com o modificador de fluxo B.....	88
Figura 5.34: Energia cinética de turbulência na superfície livre das configurações com os modificadores de fluxo A1, A4 e A7 .....	88
Figura 5.35: Energia cinética de turbulência na superfície livre das configurações com os modificadores de fluxo A2, A5 e A8 .....	89
Figura 5.36: Energia cinética de turbulência na superfície livre das configurações com os modificadores de fluxo A3, A6 e A9 .....	89
Figura 5.37: Comparação entre os resultados obtidos pelos modelamentos matemáticos e os dados experimentais para a configuração sem modificador de fluxo.....	91
Figura 5.38: Comparação entre os resultados obtidos pelos modelamentos matemáticos e os dados experimentais para a configuração com o modificador de fluxo A1 .....	92
Figura 5.39: Comparação entre os resultados obtidos pelos modelamentos matemáticos e os dados experimentais para a configuração com o modificador de fluxo A7 .....	92
Figura 5.40: Comparação entre os resultados obtidos pelos modelamentos matemáticos e os dados experimentais para a configuração com o modificador de fluxo A9 .....	93
Figura 5.41: Comparação entre os resultados obtidos pelos modelamentos matemáticos e os dados experimentais para a configuração com o modificador de fluxo B .....	93
Figura 5.42: Variação do comprimento da placa de mistura de acordo com os modificadores de fluxo utilizados no molde.....	95

**LISTA DE TABELAS**

	Página
Tabela III.1: Propriedades da água a 20°C e do aço líquido a 1.600°C (Kreith, 1977; Wollmann, 1999) .....	13
Tabela III.2: Contribuição da mistura no molde no comprimento da placa de mistura (Filho et al., 2008).....	39
Tabela IV.1: Dimensões e características principais do sistema a ser utilizado.....	43
Tabela IV.2: Configurações dos modificadores de fluxo utilizadas no presente trabalho .....	54
Tabela IV.3: Condições de contorno utilizadas para simulação .....	59
Tabela V.1: Especificação da construção da malha para os Casos 1, 2 e 3 do molde sem modificador de fluxo.....	65
Tabela V.2: Especificação da construção da malha para os Refinamentos 1 e 2 do Caso 2, do molde com os modificadores de fluxo .....	68
Tabela V.3: Especificação da malha utilizada para as simulações matemáticas .....	71
Tabela V.4: Tempos de transição e comprimento da placa de mistura obtidos pelo modelamento matemático .....	84
Tabela V.5: Comprimento da placa de mistura obtido pelos modelamentos físico e matemático.....	94

## LISTA DE NOTAÇÕES

A	área da seção transversal
$C_{\text{anterior}}$	concentração do traçador antes da troca de panela
$C_n$	concentração adimensional
$C_{\text{nova}}$	concentração do traçador após a troca de panela
$C_t$	concentração do traçador na saída do molde medida no tempo t
$C_\mu$	constante adimensional
CFD	<i>Computational Fluid Dynamics</i>
CLP	Controlador Lógico Programável
FCD	<i>Flow Control Device</i>
Fr	número de Froude
g	aceleração da gravidade ( $\text{m/s}^2$ );
h	nível médio de oscilações
<i>i</i>	notação para direções e velocidades
<i>j</i>	notação para direções e velocidades
<i>k</i>	energia cinética de turbulência ( $\text{m}^2/\text{s}^2$ )
L	dimensão característica
$L_M$	comprimento da placa de mistura industrial
LDV	<i>Laser Doppler Velocimetry</i>
MFCD	<i>Mold Flow Control Device</i>
PIV	<i>Particle Image Velocimetry</i>
Q	vazão
Re	número de Reynolds
RMS	<i>Root Mean Square</i>
$S_\phi$	termo fonte da variável $\phi$
t	tempo (s)
$t_{\text{trans}}$	tempo de transição avaliado no modelo físico
<b>u</b>	componente vetorial da velocidade
<i>u</i>	valor instantâneo da velocidade na direção x
$\overset{\cdot}{u}$	flutuação da velocidade na direção x
$\overline{u}$	flutuação média da velocidade na direção x

$\bar{u}$	velocidade suavizada na direção x
$V$	velocidade característica do fluido (m/s)
$v$	valor instantâneo da velocidade na direção y
$v'$	flutuação de velocidade na direção y
$\bar{v}$	velocidade suavizada na direção y
$w$	valor instantâneo da velocidade na direção z
$w'$	flutuação de velocidade na direção z
$\bar{w}$	velocidade suavizada na direção z
$\phi$	variável dependente
$\phi'$	flutuação da variável dependente
$\overline{\phi'}$	flutuação média da variável dependente
$\rho$	densidade do fluido (kg/m <sup>3</sup> )
$\rho_l$	densidade do aço (kg/m <sup>3</sup> )
$\rho_f$	densidade do pó fluxante (kg/m <sup>3</sup> )
$\Gamma_\phi$	coeficiente de difusão da variável $\phi$
$\mu$	viscosidade dinâmica (kg/m.s)
$\mu_{\text{eff}}$	viscosidade efetiva (kg/m.s)
$\mu_t$	viscosidade turbulenta (kg/m.s)
$\varepsilon$	taxa de dissipação da energia cinética de turbulência (m <sup>2</sup> /s <sup>3</sup> )
$\lambda$	fator de escala
$\Delta t$	intervalo de tempo



## RESUMO

O processo de lingotamento contínuo é a tecnologia para solidificação do aço mais utilizada pelas indústrias siderúrgicas atualmente. Visando atender às diferentes demandas do mercado, algumas empresas siderúrgicas de grande porte fabricam diversas qualidades de peças de aço.

Para conseguir aliar alta produtividade a custos baixos no lingotamento contínuo, é preciso trabalhar com seqüenciais longos. Nestes casos, ocorre o lingotamento de diferentes qualidades de aço em uma mesma seqüência, o que produz as chamadas placas de mistura, formadas durante a transição de qualidades.

Estas placas de mistura, por possuírem uma composição química variável, não podem ser comercializadas como um produto homogêneo, sendo desclassificadas quanto à qualidade para os clientes finais.

Modelagens físicas e matemáticas vêm sendo aplicadas para minimização do comprimento da placa de mistura dos diferentes tipos de aço durante a transição de qualidades. Porém, na literatura técnica, constatou-se que vários modelamentos foram realizados visando a avaliação de modificações somente no distribuidor, não considerando a mistura que ocorre no molde. Quando se reproduz o procedimento adotado nas indústrias durante a transição de qualidades, a mistura no molde passa a ter um papel significativo.

Assim, o objetivo do presente trabalho foi desenvolver os modelamentos físico e matemático da produção de placa de mistura durante o processo de lingotamento seqüencial de diferentes qualidades de aço visando avaliar os efeitos do uso de modificadores de fluxo no molde sobre o comprimento da placa de mistura.

O modelamento físico foi realizado em modelos físicos do distribuidor e do molde, construídos em acrílico cristal, em escala 1:3 em relação ao sistema de lingotamento contínuo instalado na Aciaria 2 da Usiminas.

Para o modelamento matemático foi utilizado o software comercial ANSYS-CFX11, que é baseado na técnica dos volumes finitos. Foi utilizado um modelo de turbulência e a simulação foi realizada considerando o escoamento nos estados estacionário e transiente.

A validação do modelo matemático foi efetuada através da comparação das previsões do modelo matemático com os resultados obtidos durante o modelamento físico, expressos em termos das curvas de transição (curvas F). Diferentes tipos de modificadores foram testados.

Os resultados obtidos durante o modelamento matemático mostram que todos os modificadores de fluxo testados reduzem o comprimento da placa de mistura, sendo que o melhor resultado apresentou uma redução de 40% do comprimento da placa de mistura obtida, sem efeitos negativos nos níveis de turbulência na superfície livre. Como houve uma boa concordância entre as previsões do modelo matemático e do modelo físico, conclui-se que o modelo matemático utilizado no estudo pode ser empregado como uma ferramenta para simulação da formação da placa de mistura.

## ABSTRACT

Continuous casting is the most important process for solidification of steels. To increase production efficiency of this process, it is necessary to cast long sequences without interruptions. When different grades of steels are cast in sequence, an intermixed slab is formed. This intermixed slab represents a loss for the steelmaking company and it is important to reduce its length.

An intermixed slab is formed when different grades of steel are cast in sequence and represents a loss for the steelmaking companies. Use of flow modifiers and reduction of the steel level in the tundish during grade transition to decrease the intermixing length have a limited effect. Beyond a certain point, the length of the intermixed slab is mainly determined by the mixing that occurs inside the mold. To further reduce the intermixing length, it is necessary to change the flow pattern inside the mold.

Previous studies, using physical and mathematical models, have identified the main factors that affect the length of the intermixed slab. These studies present two significant limitations,

- only the mixing that occurs in the tundish is considered;
- the procedure adopted in the industry, during grade transition, was not considered.

In the present paper, the use of flow modifiers in the mold was proposed and investigated using mathematical modeling of the fluid flow inside the mold. The model was developed using a commercial software, ANSYS-CFX11. Different configurations of flow modifiers were investigated. To validate the model predictions, grade transition experiments were conducted using fully integrated and automated physical models of a tundish and a mold (strand) of a two-strand continuous slab caster.

It was determined that the flow modifiers tested in the present work could lead to significant reductions in the length of the intermixed slab. Flow modifier type B (consisting of two boards with special shape) lead to reductions of up to 40% in the intermixing length.

## 1 – INTRODUÇÃO

O processo de lingotamento contínuo consolidou-se como a tecnologia para solidificação do aço mais utilizada pelas indústrias siderúrgicas atualmente. Isto se deve ao fato do lingotamento contínuo ser um processo seqüencial, o que aumenta consideravelmente a produtividade na produção de placas, tarugos, perfis ou produtos semi-acabados. Além disto, o lingotamento contínuo também aumenta o rendimento do processo e proporciona a fabricação de produtos de melhor qualidade.

Ao longo das últimas décadas ocorreu um aumento de demanda de aço no mercado interno principalmente pelos setores de bens de capital, construção civil, automotivo e utilidades comerciais. Conseqüentemente, pôde-se observar um aumento significativo da concorrência interna e externa devido à tendência mundial de globalização da economia. Isto fez com que as siderúrgicas, para se manterem competitivas no mercado, passassem a trabalhar focadas na busca da qualidade de seus produtos aliada à redução de custos de produção.

Visando atender às diferentes demandas do mercado, algumas empresas siderúrgicas de grande porte fabricam diversas qualidades e dimensões de peças de aço, tornando sua produção um processo complexo. Porém, o lingotamento contínuo precisa trabalhar com seqüenciais longos para conseguir aliar alta produtividade a custos baixos. Nestes casos, é interessante, então, o lingotamento de diferentes qualidades de aço em uma mesma seqüência, o que produz as chamadas placas de mistura, formadas durante a transição de qualidades.

Estas placas de mistura, por possuírem uma composição química variável, não podem ser comercializadas como um produto homogêneo, sendo desclassificadas quanto à qualidade para os clientes finais. As placas de mistura são então vendidas para aplicações menos rigorosas a um preço inferior ou reutilizadas como sucata no próprio processo siderúrgico.

Se a indústria atende a um mercado diversificado, esta produção de placas de mistura pode alcançar volumes significativos, provocando perdas consideráveis de produto. Por isto, é de grande interesse para as indústrias siderúrgicas a realização de estudos visando a diminuição do comprimento destas placas de mistura.

Modelagens física e matemática vêm sendo aplicadas para previsão do comprimento destas placas, resultando em ganhos expressivos quanto ao controle do processo e rendimento, otimizando o corte das mesmas. Estes modelos são importantes também para estudos da minimização da geração da mistura dos diferentes tipos de aço durante a transição de qualidades.

Na literatura técnica constatou-se que vários modelamentos físico e matemático foram realizados visando a avaliação de modificações somente no distribuidor quanto à diminuição do volume de aço misturado no mesmo, diminuindo assim o comprimento da placa de mistura formada. Além disto, os trabalhos já realizados trabalham com os modelos físicos do distribuidor e do molde separadamente, e não conseguem reproduzir exatamente o que ocorre na prática industrial.

Quando o procedimento operacional de redução do volume de aço no distribuidor é aplicado durante a troca de painéis, visando a diminuição da mistura das qualidades de aço, constata-se que o comprimento da placa de mistura passa a ser definido predominantemente pela mistura que ocorre no molde. Desta forma, a margem de redução do comprimento da placa de mistura, alterando-se parâmetros relativos ao distribuidor (adotada na maioria dos trabalhos), passa a ser bem limitada. Isto serve como motivação para se buscar alternativas modificando o padrão de escoamento do aço no molde. Uma das formas de fazer isso envolve o uso de modificadores de fluxo instalados no molde.

Sendo assim, baseado no contexto explanado acima, o presente trabalho se propõe a desenvolver modelamentos físico e matemático da formação de placas de mistura quando modificadores de fluxo são introduzidos no molde, visando avaliar as alterações no escoamento do aço no molde e no comprimento da placa de mistura.

## 2 – OBJETIVOS

Os modelamentos físico e matemático são técnicas bastante utilizadas para simulação de processos industriais, proporcionando assim a previsão de parâmetros operacionais relevantes, os quais podem ser utilizados para a otimização de processos.

O objetivo principal do presente trabalho é desenvolver os modelamentos físico e matemático da produção de placas de mistura durante o processo de lingotamento seqüencial de diferentes qualidades de aço visando avaliar os efeitos do uso de modificadores de fluxo no molde sobre o comprimento da placa de mistura.

Os objetivos específicos do presente trabalho são:

- Realizar o modelamento matemático do escoamento do aço no molde para diferentes configurações de modificadores de fluxo;
- Determinar o efeito do posicionamento dos modificadores de fluxo no molde sobre o comprimento da placa de mistura;
- Validar o modelo matemático desenvolvido utilizando os resultados obtidos experimentalmente com os modelos físicos das configurações propostas.

### 3 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

#### 3.1 – Descrição do Processo de Lingotamento Contínuo

O processo de lingotamento contínuo consolidou-se como a tecnologia para solidificação do aço mais utilizada pelas indústrias siderúrgicas atualmente. Isto se deve ao fato do lingotamento contínuo ser um processo seqüencial, o que possibilita ganhos de produtividade na produção de placas, tarugos, perfis ou produtos semi-acabados. Além disto, o lingotamento contínuo também aumenta o rendimento na produção de semi-acabados e proporciona a fabricação de produtos de melhor qualidade.

A Figura 3.1 apresenta uma visão esquemática do processo de lingotamento contínuo de placas. A instalação é constituída pelos seguintes equipamentos principais: panela, distribuidor e molde.

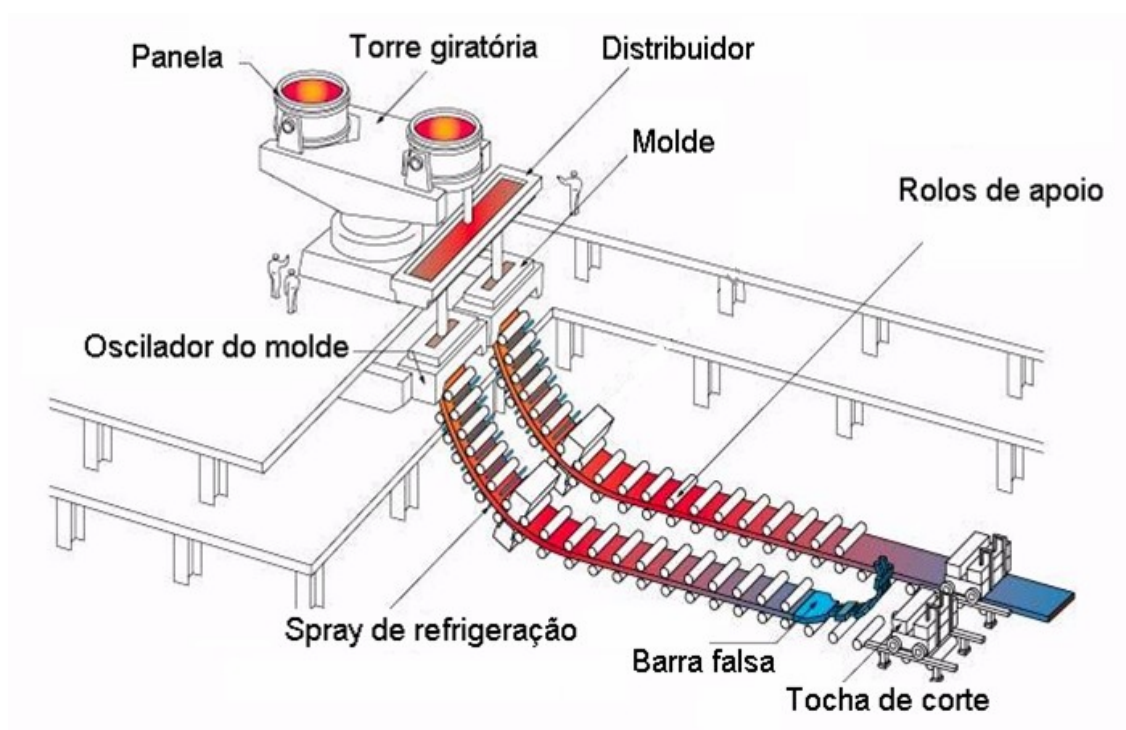


Figura 3.1: Visão esquemática do processo de lingotamento contínuo.  
(Disponível em: <[http://www.jfe-21st-cf.or.jp/chapter\\_2/2j\\_2\\_img.html](http://www.jfe-21st-cf.or.jp/chapter_2/2j_2_img.html)>.

Acesso em: 01 nov. 2008)

O processo inicia-se com o transporte da panela contendo aço para o sistema de lingotamento contínuo, sendo a mesma acoplada na torre giratória. A panela é empregada como reservatório do aço líquido, podendo também ser utilizada para ajuste de temperatura e composição química nas operações de refino secundário do aço, tais como desoxidação, dessulfuração e descarburagem. A panela é, então, posicionada acima do distribuidor para início da alimentação do aço. A alimentação é interrompida assim que inicia-se a formação de vórtice na panela. A formação deste vórtice pode acarretar o arraste da escória juntamente com o aço para o distribuidor.

O distribuidor é um equipamento utilizado como reservatório intermediário entre a panela e o molde, mantendo assim a continuidade do processo durante a troca de panelas. Diferentes configurações de distribuidor podem ser utilizadas, dependendo do número de veios e do tipo de produto sendo lingotado. O distribuidor apresentado na Figura 3.1 é de dois veios, o que possibilita o lingotamento contínuo de duas placas simultaneamente.

O molde é utilizado para extração de calor do aço líquido, provocando a solidificação de uma camada fina, que deve ter espessura suficiente para que não ocorra o rompimento do veio nem o abaulamento de sua superfície devido à pressão ferrostática. Suas paredes são refrigeradas com água e geralmente são feitos de ligas de cobre que, por possuírem uma alta condutividade térmica, permitem uma rápida transferência de calor da peça sendo lingotada. O molde realiza movimentos oscilatórios na direção vertical para evitar a aderência da camada de aço solidificada à sua parede interna.

O pó fluxante é uma escória sintética utilizada para lubrificação no processo de lingotamento contínuo de aços. O pó é adicionado na superfície livre do aço líquido contido no molde, formando uma poça líquida que escoar pelas paredes do molde, diminuindo assim o atrito entre a camada solidificada e a parede.

Entre o distribuidor e o molde encontra-se a válvula submersa, utilizada para conexão direta do aço entre os dois equipamentos sem que o mesmo entre em contato com a atmosfera, que pode provocar sua oxidação. Esta válvula é feita de material cerâmico e



controla o fluxo de aço que entra no molde, sendo o escoamento observado em seu interior realizado devido à diferença de altura entre o nível de líquido do distribuidor e o nível de líquido no molde (superfície livre). O controle do escoamento pela válvula é importante para que o nível de líquido no molde se mantenha constante durante todo o processo de lingotamento contínuo. Além disto, a válvula submersa, por propiciar uma menor turbulência na interface entre o metal líquido e o pó fluxante, reduz a possibilidade de incorporação de pó à placa sendo produzida.

Segundo Pereira (2004), nas válvulas submersas pode-se injetar argônio com o objetivo de impedir que as inclusões fiquem aderidas às suas paredes, podendo provocar seu entupimento e, conseqüentemente, a parada do processo. Porém, a injeção de argônio afeta o escoamento do aço no molde devido à ascensão das bolhas através do metal líquido.

A Figura 3.2 apresenta um desenho esquemático contendo o distribuidor, a válvula submersa e o molde retangular. Observando a Figura 3.2, pode-se destacar algumas características importantes do sistema, tais como:

- a camada de escória formada na superfície livre do distribuidor é utilizada para retirada das inclusões não-metálicas presentes no aço líquido;
- a profundidade da válvula submersa e o ângulo das suas portas de saída são dois parâmetros importantes para a formação do perfil de escoamento do aço;
- enquanto o aço é alimentado através da válvula submersa, o pó fluxante é adicionado na superfície livre do molde. O pó fluxante fica sobre o aço líquido devido à sua menor densidade. O deslocamento do pó fluxante fundido ocorre juntamente com a movimentação do aço líquido no interior do molde, em função da viscosidade dos dois materiais. A adição do pó fluxante na superfície livre do molde é importante pois possibilita o isolamento térmico do aço líquido, previne sua reoxidação, além de absorver as inclusões não-metálicas;
- segundo Thomas (2003), uma fina camada solidificada com cerca de 10 a 30mm de espessura é formada nas paredes, até que a placa alcance o final do molde. A espessura formada depende da velocidade de lingotamento,

temperatura de alimentação do aço e vazão de água utilizada para o resfriamento do molde.

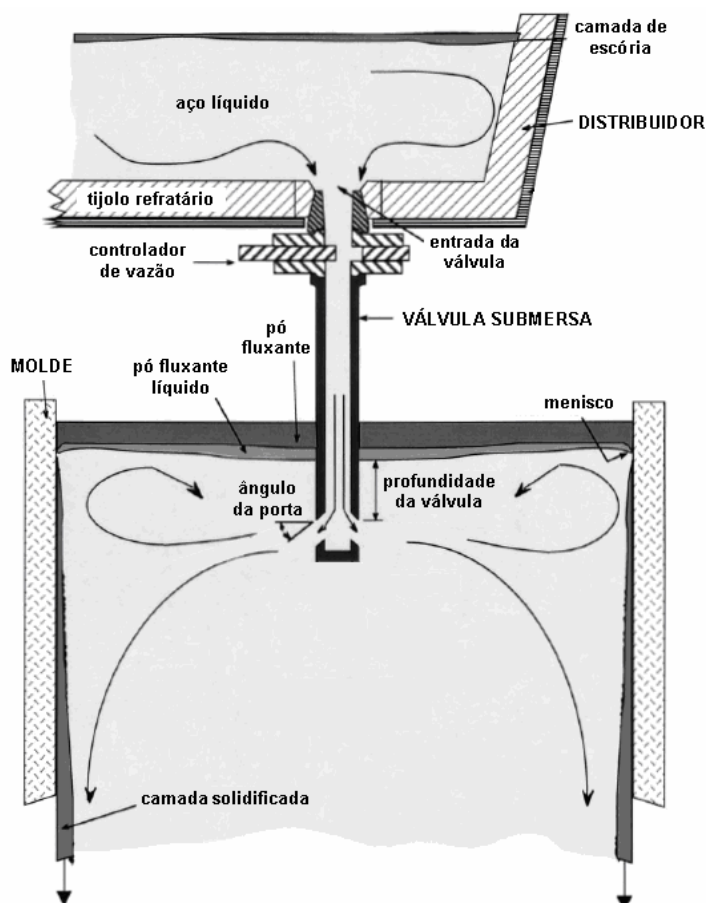


Figura 3.2: Desenho esquemático do distribuidor, válvula submersa e molde.

(Thomas, 2003)

Após o molde, o aço já com uma fina pele solidificada continua o percurso entre os rolos de apoio, onde será realizado o seu resfriamento secundário. Nesta região, é feita aspersão de água ou água/ar sobre a superfície da placa. Após o resfriamento secundário, o resfriamento se dá por convecção natural e radiação, até a completa solidificação da placa. Por fim, a tocha de corte corta o material lingotado em comprimentos pré-especificados.

### 3.2 – Escoamento do Aço Líquido no Veio de Lingotamento Contínuo

O padrão de escoamento do aço durante o processo de lingotamento contínuo afeta diretamente a qualidade do produto e a produtividade, além de alterar também o comprimento da placa de mistura a ser formada durante a transição de qualidades.

De acordo com Thomas (2003), o escoamento do aço no molde depende de alguns fatores, tais como: condições de entrada do jato de aço pela cavidade do molde, tamanho da seção transversal do molde e velocidade de lingotamento.

A válvula submersa bifurcada é a configuração mais utilizada para o lingotamento contínuo de placas. As condições de entrada do jato são determinadas, basicamente, pela penetração da válvula e pela geometria dos orifícios de saída da mesma, que afetam o perfil de escoamento do aço. A válvula submersa deve, então, ser projetada de modo a fazer com que o aço escoe uniformemente no molde, evitando seu escoamento assimétrico, além de prevenir problemas tais como ondas na superfície livre, resfriamento do menisco e formação de fissuras no produto, que pode ocasionar o rompimento da película já solidificada.

Dois perfis típicos do escoamento do aço em um molde retangular contendo válvula submersa bifurcada são apresentados na Figura 3.3 (Thomas, 2003). Na Figura 3.3 (a) nota-se que o jato que sai dos orifícios da válvula segue em direção à superfície livre do molde e alcança suas paredes para, posteriormente, gerar uma região de recirculação, localizada abaixo da saída da válvula. Este perfil de escoamento pode ocorrer nos seguintes casos: quando a válvula submersa está posicionada perto da superfície livre (não está muito profunda); quando os orifícios de saída da válvula são pequenos ou ângulo direcionado para cima; para baixas velocidades de lingotamento; ou em moldes largos. Para este tipo de escoamento, a velocidade na superfície livre e os níveis de flutuação são altos, então defeitos superficiais e o arraste de pó fluxante pelo produto são esperados. Já na Figura 3.3 (b) pode-se observar que o escoamento gera duas regiões de recirculação: uma acima e uma abaixo do jato que entra no molde pelos orifícios da válvula submersa. Este perfil caracteriza uma situação operacional em que a

válvula está posicionada mais profundamente no molde, com orifícios de saída largos e ângulos direcionados para baixo.

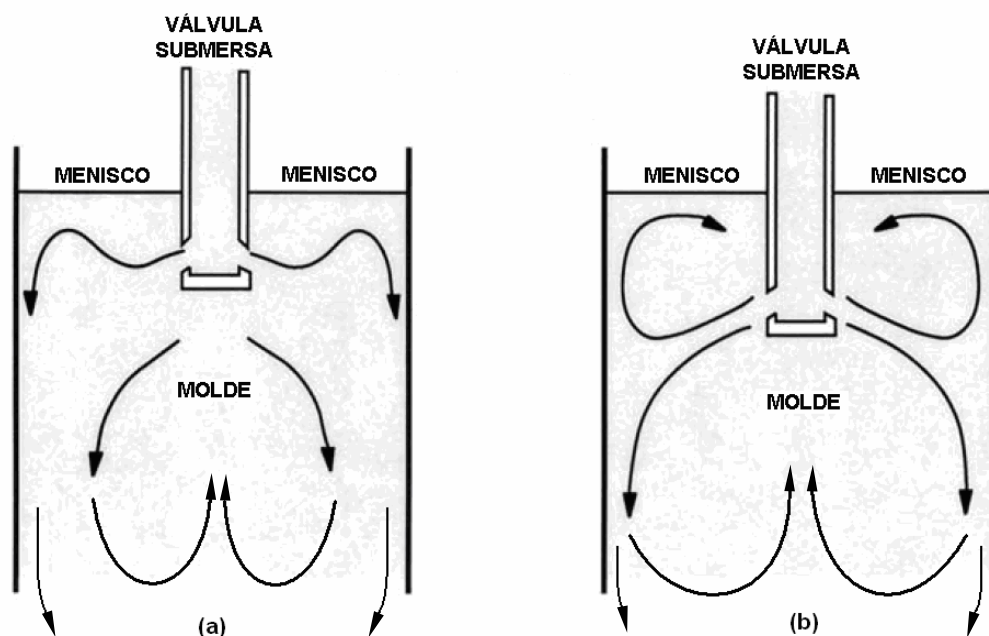


Figura 3.3: Perfis típicos de escoamento do aço em moldes retangulares com válvula submersa bifurcada com (a) uma região de recirculação e (b) duas regiões de recirculação (Thomas, 2003)

Segundo Najjar et al. (1995), os níveis de turbulência do jato aumentam com o aumento da velocidade de lingotamento e com a utilização de válvula submersa com orifícios de diâmetro menor. Outro aspecto interessante é que o aumento da velocidade de lingotamento aumenta somente a velocidade do jato e os níveis de turbulência, não afetando as características do jato de saída, tal como seu ângulo.

A velocidade de lingotamento é outro fator importante a ser controlado, pois a utilização de altas velocidades pode ocasionar turbulência no menisco e formação de vórtice na superfície livre do molde, gerando problemas de qualidade no produto, conforme apresentado nas Figuras 3.4 e 3.5 (Gupta e Lahiri, 1994). Além disto, o

aumento da velocidade de lingotamento pode prejudicar a formação da camada solidificada necessária pra continuidade do lingotamento contínuo, se o aço líquido não permanecer um tempo mínimo no molde para extração da quantidade adequada de calor.

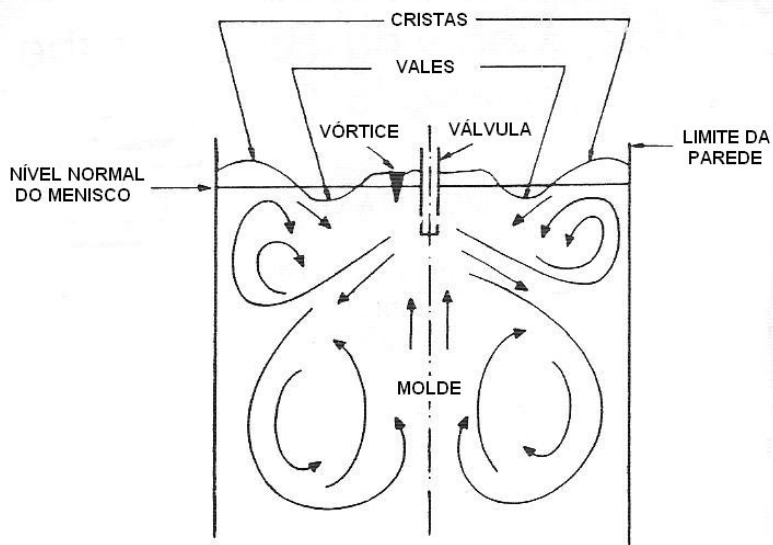


Figura 3.4: Diagrama esquemático do perfil do menisco e do padrão de escoamento dentro de um molde retangular (Gupta e Lahiri, 1994).

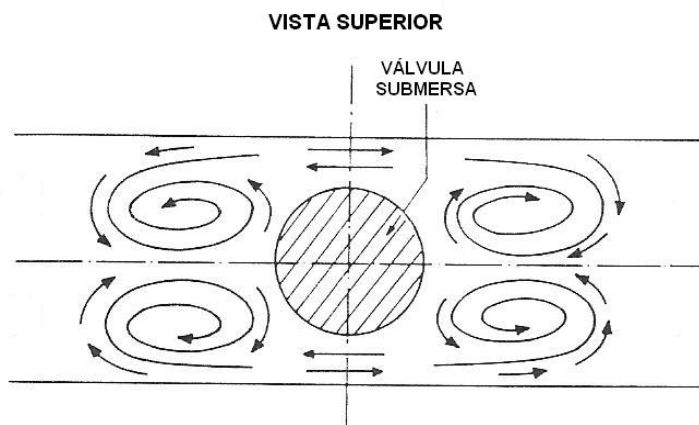


Figura 3.5: Diagrama esquemático mostrando a formação do vórtice ao redor da válvula submersa (Gupta e Lahiri, 1994).

Huang e Thomas (1993) realizaram o modelamento matemático do escoamento do aço no veio e obtiveram o perfil de escoamento apresentado na Figura 3.6. Foram simulados os três primeiros metros do veio.

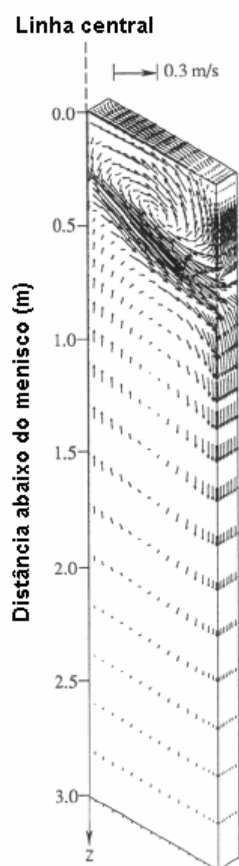


Figura 3.6: Perfil de escoamento no veio de lingotamento contínuo, conforme Huang e Thomas (1993). Dimensões da placa: 1,32m de largura e 0,22m de espessura, considerando um quarto do domínio.

Nota-se o aparecimento de uma região de recirculação do aço acima e outra abaixo do jato de alimentação. Esta região abaixo do jato alcança aproximadamente 3m de profundidade, sendo, portanto, cerca de 5 vezes maior do que o comprimento do molde, que mede 0,6m. Esta informação é importante para a correta seleção das dimensões do domínio no desenvolvimento de modelos matemáticos. Este comprimento deve ser superior à profundidade da zona inferior de recirculação.

Os modelamentos físico e matemático permitem a caracterização do escoamento no molde de lingotamento contínuo, possibilitando a seleção de parâmetros ótimos dos equipamentos e procedimentos operacionais para fabricação de produtos com a menor quantidade de defeitos.

A seguir são apresentados os fundamentos em que se baseiam estes dois tipos de modelamento.

### ***3.2.1 – Modelamento físico***

O modelamento físico consiste da construção de réplicas de instalações industriais em escala laboratorial e da realização de experimentos nas mesmas, seguindo critérios de similaridade em relação aos equipamentos e à operação industrial. A obediência aos critérios de similaridade tem como objetivo assegurar que as características do sistema utilizado industrialmente sejam mantidas quando reproduzidas em escala laboratorial, garantindo a obtenção de resultados confiáveis e aplicáveis à prática industrial.

O uso de modelos físicos é interessante pois possibilita o estudo preliminar de mudanças operacionais e a verificação de seus resultados sem a necessidade de interferência na produção industrial. Além disto, o modelamento físico proporciona a avaliação e otimização dos processos industriais a baixo custo (Seshadri et al., 2005).

Para a construção de um modelo físico, que simule os principais parâmetros operacionais de um processo metalúrgico, os seguintes critérios devem ser obedecidos: similaridade geométrica, similaridade mecânica (compreende as similaridades estática, cinética e dinâmica), similaridade térmica e similaridade química. Cabe ressaltar que o modelo físico não precisa reproduzir o sistema industrial completamente, mas somente os aspectos relevantes que serão estudados.

Para estudos de escoamento do aço em instalações de lingotamento contínuo, os critérios de similaridade para construção e operação dos modelos físicos a frio são (Szekely e Themelis, 1971):

Similaridade geométrica: ocorre quando a razão entre dimensões correspondentes nos dois sistemas é constante;

Similaridade cinética: ocorre se as trajetórias de partículas forem geometricamente semelhantes e quando a razão de proporcionalidade do tempo entre dois eventos correspondentes nos dois sistemas é constante;

Similaridade dinâmica: ocorre quando as forças que atuam em locais e tempos correspondentes nos dois sistemas apresentam razões fixas.

Para estudos do escoamento turbulento do aço em modelos físicos a frio, pode-se utilizar água como fluido. Isto é possível pois a água na temperatura ambiente apresenta uma viscosidade cinemática próxima à do aço na temperatura de lingotamento, ou seja, a água é dinamicamente similar ao aço líquido. A viscosidade cinemática é definida como a razão entre a viscosidade dinâmica e a densidade do fluido, sendo estas propriedades da água e do aço líquido, para as condições de estudo, apresentadas na Tabela III.1.

Tabela III.1: Propriedades da água a 20°C e do aço líquido a 1.600°C (Kreith, 1977; Wollmann, 1999).

Propriedade	Unidade	Água (20°C)	Aço (1.600°C)
Viscosidade dinâmica	kg/m.s	$0,855 \times 10^{-3}$	$6,4 \times 10^{-3}$
Densidade	kg/m <sup>3</sup>	$0,998 \times 10^3$	$7,08 \times 10^3$
Viscosidade cinemática	m <sup>2</sup> /s	$0,86 \times 10^{-6}$	$0,9 \times 10^{-6}$

Nos modelos físicos para estudo do escoamento do aço em sistemas de lingotamento contínuo são consideradas as similaridades dinâmica e cinética, expressas através da igualdade dos números de Reynolds e de Froude, respectivamente. O número de Reynolds (Re) é dado pela razão entre as forças de inércia e viscosa e o número de Froude (Fr) pela razão das forças de inércia e gravitacional, conforme apresentados nas equações (3.1) e (3.2). Em modelos de escala reduzida, não é possível a obtenção de igualdade simultânea destes dois números adimensionais, sendo então necessária a escolha do que melhor representa o aspecto de interesse.



$$\text{Re} = \frac{\rho \cdot V^2 \cdot L^2}{\mu \cdot V \cdot L} = \frac{V \cdot L \cdot \rho}{\mu} \quad (3.1)$$

$$\text{Fr} = \frac{\rho \cdot V^2 \cdot L^2}{\rho \cdot L^3 \cdot g} = \frac{V^2}{g \cdot L} \quad (3.2)$$

Onde:

Re = número de Reynolds (adimensional);

Fr = número de Froude (adimensional);

V = velocidade característica do fluido (m/s);

g = aceleração da gravidade ( $\text{m/s}^2$ );

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

$\mu$  = viscosidade dinâmica do fluido ( $\text{kg/m.s}$ );

$\rho$  = densidade do fluido ( $\text{kg/m}^3$ ).

Segundo Wollmann (1999), para sistemas metalúrgicos, o número de Froude é o que melhor representa a similaridade entre os modelos físicos e o sistema industrial. Cabe ressaltar que, desconsiderando o número de Reynolds, supõe-se que a força de inércia é muito superior à força viscosa. Isso ocorre em regimes turbulentos, porém, em regimes laminares, a força viscosa é equivalente à força de inércia. Como o sistema a ser estudado apresenta escoamento turbulento, esta suposição é satisfatória.

A seguir são apresentados e discutidos alguns estudos de modelamento físico do escoamento no molde.

Ao investigarem o perfil de escoamento na região do molde utilizando modelamento físico, Szekely e Yadoya, citados por Thomas e Zhang (2001), verificaram a existência de uma região de recirculação na parte superior do molde, conforme apresentado na Figura 3.4. Foi observado também que o comprimento de penetração do aço líquido, situado dentro da camada já solidificada do produto que sai do molde, é de aproximadamente 4 a 6 vezes do comprimento do molde, conforme apresentado na Figura 3.6.

Em 1983, Xiu e Carlsson realizaram experimentos em um modelo físico do molde visando estudar o desenvolvimento dos perfis de escoamento quando diferentes configurações de válvulas submersas são usadas. Para visualizar o padrão de escoamento no molde foram injetadas partículas de poliestireno no distribuidor e tiradas fotografias do modelo físico. Observou-se, qualitativamente, que as válvulas submersas com as portas horizontais mantêm a direção do fluxo horizontal após sua saída até que o fluxo encontre a parede do molde, mudando assim a direção do escoamento, conforme apresentado na Figura 3.7. O fluxo de aço líquido que entra em contato com a fina pele solidificada nas paredes do molde pode favorecer a fusão desta camada e aumentar o risco de rompimento do veio. Esta situação é comum em moldes com pequena seção transversal.

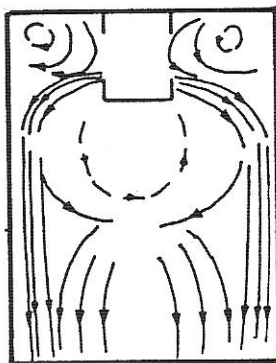


Figura 3.7: Esboço do escoamento desenvolvido em um molde para placas, usando válvula submersa bifurcada, conforme Xiu e Carlsson (1983).

Andrade (1984) analisou a influência da geometria da válvula submersa sobre o fluxo de metal no molde de lingotamento contínuo, utilizando um modelo físico. Para realização das experiências foram utilizados três tipos de válvula submersa com diferentes ângulos das saídas, além da utilização de três larguras de placa e três velocidades de lingotamento. O contorno inicial do jato, a posição das linhas de fluxo, a velocidade do fluxo, o nível de turbulência e a profundidade de penetração do fluxo foram analisados para cada caso proposto. Não foram obtidas relações quantitativas entre os parâmetros estudados. As observações feitas durante as experiências no modelo físico mostraram que as melhores condições são aquelas que originem menor

profundidade de penetração do fluxo e baixo nível de turbulência. A técnica utilizada para avaliação da profundidade de penetração do fluxo foi a medição da distância percorrida por partículas de cânfora a partir do nível de água no molde até o ponto onde iniciam o movimento ascendente ao longo do molde e, para avaliação do nível de turbulência, foi utilizada observação visual. Essas condições ótimas são obtidas com uma válvula com ângulo de saída para cima, mas que não seja suficientemente grande a ponto de gerar perturbações na superfície do aço.

Thomas et al. (1990) desenvolveram o modelamento físico do escoamento do aço em um molde retangular, utilizando água como fluido. Foram determinados perfis de velocidades, conforme apresentado na Figura 3.8. Para tanto, os autores realizaram três procedimentos para permitir a visualização do escoamento: injeção de corante em pontos diferentes do molde, adição de pequenas partículas plásticas com densidade próxima à da água e injeção de bolhas através da válvula submersa. Novamente foram identificadas duas regiões de recirculação: uma região acima da válvula submersa e outra abaixo, sendo as duas separadas pelo jato que sai da válvula submersa.

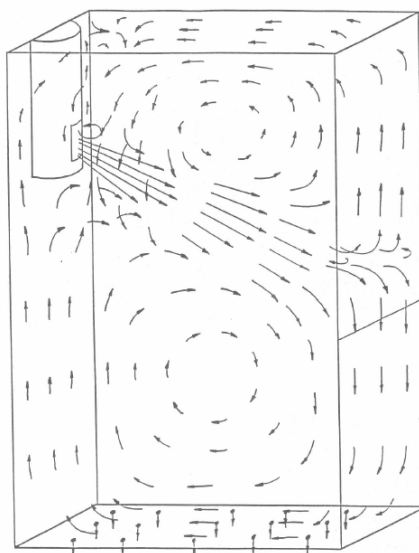


Figura 3.8: Perfil de escoamento observado na metade do modelo físico do molde com 1,118m de comprimento, 0,686m de largura e 0,229m de espessura, conforme Thomas et al. (1990).

Gupta e Lahiri (1994) realizaram o modelamento físico de quatro moldes para placas com dimensões diferentes, mantendo constante somente a espessura, e utilizando válvulas submersas com diferentes configurações. Foi observado que a região do menisco apresentava flutuações, conforme apresentado na Figura 3.9. A formação de vórtice e a captura de bolhas pelas ondulações ocorrem no menisco depois que uma velocidade de escoamento crítica é alcançada. O diâmetro e o ângulo dos orifícios de saída da válvula submersa e sua profundidade de imersão, além da escala do molde, afetam a amplitude das ondulações. Em todos os quatro casos estudados obteve-se uma variação parabólica da amplitude das ondulações com a velocidade de saída do jato da válvula submersa.

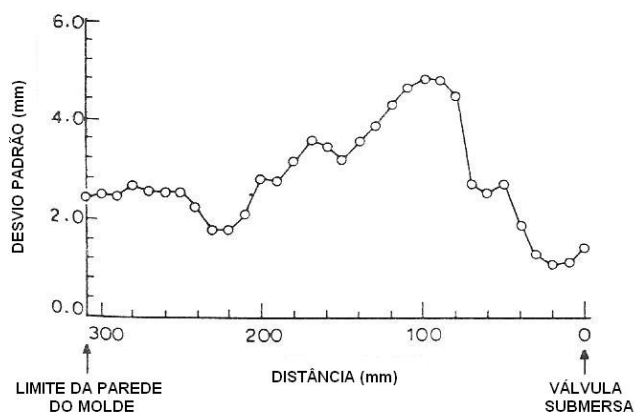


Figura 3.9: Flutuação do menisco ao longo da largura do molde; porta da válvula de 20mm com ângulo de  $0^\circ$ , profundidade de imersão de 150mm, escala do molde de 1:8 e taxa de escoamento de  $1,22 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$  (Gupta e Lahiri, 1994).

Panaras et al. (1998) investigaram o escoamento turbulento em um modelo físico do molde, visando observar as oscilações do menisco, que foram determinadas por velocimetria à laser doppler (*LDV – Laser Doppler Velocimetry*). Os resultados indicaram que as ondulações do menisco possuem um comprimento e frequência predominantes, alcançando, após um tempo pré-determinado, o estado estacionário, considerando os valores médios dos parâmetros obtidos na metade da largura do molde.

Shen et al. (2007) e Shen et al. (2009) também realizaram o modelamento físico do molde de lingotamento contínuo para observar a relação entre a instabilidade do escoamento do fluido e o nível de flutuação do menisco, utilizando para tal medições das ondas superficiais e visualização de imagem de partícula (*Particle Image Visualization*). Os resultados mostraram que o escoamento interno e o nível de flutuação são transientes e dependentes do tempo.

A técnica de velocimetria por imagem de partículas (*PIV – Particle Image Velocimetry*) foi usada por Xing-guo et al. (2007) para estudar o escoamento do fluido ocorrido durante o lingotamento contínuo, usando um modelo físico. As influências do ângulo da válvula e profundidade de imersão, bem como da velocidade de lingotamento no comportamento do fluxo foram investigadas quantitativamente.

Xing-guo et al. (2007) obtiveram os seguintes resultados experimentais:

- quanto maior a profundidade de imersão da válvula, mais estável será o menisco;
- quanto maior o ângulo da válvula menores serão as componentes de velocidade através da superfície livre, resultando em um menisco com menos flutuações;
- quanto maior a velocidade de lingotamento, maior será a turbulência do escoamento e as flutuações do menisco.

A turbulência e as flutuações do menisco criam vórtices na superfície livre do molde que podem gerar problemas na superfície e no interior da placa em relação à qualidade. Além disto, a alta turbulência pode ocasionar o contato do aço líquido com o ar atmosférico, resultando em sua reoxidação.

### **3.2.2 – Modelamento matemático**

A Fluidodinâmica Computacional (*CFD – Computational Fluid Dynamics*) é uma ferramenta bastante utilizada para simulação do comportamento de sistemas envolvendo escoamento de fluidos, transferência de calor e outros processos físicos correlatos. A abordagem utilizando a Fluidodinâmica Computacional pode fornecer uma grande quantidade de informações sobre o sistema com custos relativamente baixos e maior

rapidez. Para utilização adequada do modelamento matemático, é necessário conhecimento dos métodos numéricos e entendimento das simplificações formuladas, uma vez que estas influenciam diretamente os resultados. Além disto, os modelos matemáticos desenvolvidos precisam normalmente ser validados utilizando, por exemplo, a modelagem física. Esta prática tem como objetivo fornecer maior confiabilidade para as previsões do modelo matemático. Isso ocorre principalmente no escoamento turbulento, uma vez que ainda não há um modelo de turbulência de aplicação geral.

O modelamento matemático do escoamento de fluidos envolve a solução das equações de conservação global de massa (equação da continuidade) e de quantidade de movimento, utilizando métodos numéricos. Todas as equações de conservação podem ser escritas na seguinte forma geral (equação (3.3)):

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\phi) + \text{div}(\rho\mathbf{u}\phi) = \text{div}(\Gamma_{\phi}\text{grad}\phi) + S_{\phi} \quad (3.3)$$

Onde:

$\mathbf{u}$  = componente vetorial da velocidade ( $u, v, w$ ) nas direções  $x, y$  ou  $z$ , respectivamente;  
 $\phi$  = variável dependente, podendo ser 1 (equação da continuidade) ou  $u, v, w$  (equações de conservação de quantidade de movimento), que são as componentes de velocidade nas direções  $x, y$  e  $z$ , respectivamente;

$\rho$  = densidade do fluido;

$t$  = tempo;

$\Gamma_{\phi}$  = coeficiente de difusão da variável  $\phi$ ;

$S_{\phi}$  = termo fonte da variável  $\phi$ .

Para obtenção da equação da continuidade, tem-se que assumir  $\phi = 1$ ,  $\Gamma_{\phi} = 0$  e  $S_{\phi} = 0$ .

Nesta equação estão representados o termo transiente de acúmulo (1º termo), o termo convectivo (2º termo), o termo difusivo (3º termo) e o termo fonte (4º termo da

equação). A solução numérica destas equações no estudo do escoamento do fluido fornece os campos de pressão e a velocidade no interior do domínio de cálculo.

Quando o regime de escoamento que prevalece é o turbulento, é necessário o emprego de modelos de turbulência acoplados às demais equações de conservação. Os modelos mais “populares” caracterizam-se por trabalhar com uma velocidade suavizada com o tempo (*time-smoothed velocity*), que é determinada através de uma média das velocidades instantâneas, avaliada ao longo de um curto período de tempo (Bird et al., 1960). A velocidade suavizada na direção x é expressa matematicamente através da equação (3.4).

$$\bar{u} = \frac{1}{\Delta t} \int_t^{t+\Delta t} u \cdot dt \quad (3.4)$$

Onde:

$\bar{u}$  = velocidade suavizada na direção x;

$\Delta t$  = intervalo de tempo usado para se fazer a integração;

$u$  = valor instantâneo da velocidade na direção x.

Os valores instantâneos da velocidade podem, então, ser escritos como uma soma da velocidade suavizada e de uma flutuação de velocidade, conforme a equação (3.5).

$$u = \bar{u} + u' \quad (3.5)$$

Onde:

$u'$  = flutuação de velocidade na direção x.

Expressões similares às equações (3.4) e (3.5) podem ser escritas para as componentes de velocidade  $v$  e  $w$ , nas direções y e z, respectivamente.

A utilização da abordagem acima faz com que as equações da continuidade e do movimento sejam reescritas em termos das velocidades suavizadas, conforme apresentadas nas equações (3.6) e (3.7), respectivamente.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div}(\rho \mathbf{u}) = 0 \quad (3.6)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \phi) + \text{div}(\rho \mathbf{u} \phi) = \text{div}(\Gamma_{\phi} \text{grad} \phi) + \overbrace{\left[ \frac{\partial(\rho \overline{u' \phi'})}{\partial x} \quad \frac{\partial(\rho \overline{v' \phi'})}{\partial y} \quad \frac{\partial(\rho \overline{w' \phi'})}{\partial z} \right]}^{\text{Termos adicionais}} + S_{\phi} \quad (3.7)$$

Onde:

$\overline{u' \phi'}$  = média do produto das flutuações das velocidades pelas flutuações da variável dependente, podendo ser  $u$ ,  $v$  ou  $w$ , que são as componentes de velocidade nas direções  $x$ ,  $y$  e  $z$ , respectivamente.

Os novos termos adicionais, associados às flutuações de velocidade, características do escoamento turbulento, dificultam a resolução das equações do movimento no escoamento turbulento. Para avaliar estes termos, são desenvolvidos modelos de turbulência, que são normalmente modelos semi-empíricos, que necessitam de validação experimental.

Para avaliação destes termos adicionais associados às flutuações de velocidade pode-se utilizar a proposta de Boussinesq (1877), que adotou uma analogia com a equação de Newton da viscosidade, conforme apresentado na equação (3.8) (Bird et al., 1960).

$$\overline{\rho u_i' u_j'} = -\mu_t \left( \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \quad (3.8)$$

Onde:

$\mu_t$  = viscosidade turbulenta (kg/m.s);

$i$  e  $j$  = notação para direções e velocidades.  $i$  ou  $j = 1$  corresponde à direção  $x$ ;  $i$  ou  $j = 2$  corresponde à direção  $y$ ; e  $i$  ou  $j = 3$  corresponde à direção  $z$ .

Adotando esta abordagem, as equações de conservação de quantidade de movimento ficam na mesma forma indicada na equação (3.3), com o coeficiente de difusão sendo



uma viscosidade efetiva ( $\mu_{\text{eff}}$ ). A viscosidade efetiva ( $\mu_{\text{eff}}$ ) é definida pela soma das viscosidades dinâmica ( $\mu$ ) e turbulenta ( $\mu_t$ ). A viscosidade turbulenta não é uma propriedade do fluido, devendo ser avaliada ou estimada para cada sistema em particular.

O modelo de turbulência do tipo  $k$ - $\varepsilon$ , proposto por Launder e Spalding (1972) (Patankar, 1980), é o que tem fornecido resultados satisfatórios em aplicações metalúrgicas, permitindo a avaliação da viscosidade turbulenta (Tavares, 2007). Este modelo incorpora mais duas equações diferenciais para estimativa da viscosidade turbulenta: uma para a energia cinética de turbulência  $k$  e outra para a taxa de dissipação da energia cinética de turbulência  $\varepsilon$ . O parâmetro  $k$  é uma função das flutuações das componentes da velocidade, conforme apresentado na equação (3.9).

$$k = \frac{1}{2} \left( \overline{u^2} + \overline{v^2} + \overline{w^2} \right) \quad (3.9)$$

Onde:

$k$  = energia cinética de turbulência ( $\text{m}^2/\text{s}^2$ );

$\overline{u^2}, \overline{v^2}, \overline{w^2}$  = médias do quadrado das flutuações das componentes de velocidade nas direções x, y e z, respectivamente.

No modelo de turbulência  $k$ - $\varepsilon$ , a viscosidade turbulenta é dada pela equação (3.10):

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (3.10)$$

Onde:

$\mu_t$  = viscosidade turbulenta ( $\text{kg}/\text{m}\cdot\text{s}$ );

$\rho$  = densidade do fluido ( $\text{kg}/\text{m}^3$ );

$C_\mu$  = constante adimensional = 0,09;

$k$  = energia cinética de turbulência ( $\text{m}^2/\text{s}^2$ );

$\varepsilon$  = taxa de dissipação da energia cinética de turbulência ( $\text{m}^2/\text{s}^3$ ).

O modelo de turbulência  $k$ - $\epsilon$  é mais simples e já encontra-se bem estabelecido em muitas situações industriais, tendo sido amplamente validado. Porém, a sua utilização implica na solução de duas equações diferenciais parciais adicionais.

Cabe ressaltar que nenhum modelo de turbulência fornece resultados quantitativamente corretos em uma faixa ampla de aplicações, sendo necessária a avaliação de qual modelo é mais adequado para um dado tipo de aplicação.

Os primeiros resultados de simulação de escoamento tridimensional de fluidos para o sistema composto por molde retangular e válvula submersa bifurcada foram publicados por Yao et al., citados por Thomas e Zhang (2001).

Thomas et al. (1990) demonstraram a importância das condições de penetração da válvula submersa no escoamento no molde de lingotamento contínuo de placas e uma baixa influência da velocidade de lingotamento no perfil de recirculação superior do molde. Para isto foi realizado o modelamento matemático utilizando o modelo de turbulência  $k$ - $\epsilon$ . As previsões foram comparadas com resultados de visualização de escoamento obtidos pelo modelamento físico do sistema. Os principais resultados obtidos com o modelamento foram que os parâmetros de turbulência,  $k$  e  $\epsilon$ , aumentaram significativamente na saída do molde com o aumento da velocidade de lingotamento e que o ângulo de saída do jato possui uma inclinação descendente maior do que o ângulo de saída da válvula submersa (por exemplo, para um ângulo da válvula de  $15^\circ$  descendente foram obtidos um ângulo do jato de  $35^\circ$  descendente pelo modelamento físico e de  $30^\circ$  descendente pelo modelamento matemático).

Najjar et al. (1995) realizaram simulações bidimensionais e tridimensionais para o escoamento do aço no molde de lingotamento contínuo visando avaliar os efeitos de diversas configurações da válvula submersa bifurcada e de variáveis operacionais do processo no escoamento do jato que sai dos orifícios da válvula. Para tal foi empregado um modelo de elementos finitos (FIDAP) para realizar o modelamento matemático do escoamento estacionário, utilizando o modelo de turbulência  $k$ - $\epsilon$ . Além disto, foram

realizados experimentos em modelos físicos utilizando água para validação do modelo matemático.

Os resultados mostraram que o ângulo do jato é controlado, principalmente, pelo ângulo da base do orifício de saída da válvula submersa, apesar do jato de saída apresentar um ângulo descendente maior do que o ângulo da válvula submersa. Nos experimentos realizados no modelo físico, os ângulos do jato de saída de  $-32^\circ$ ,  $-15^\circ$  e  $-9^\circ$  foram medidos experimentalmente para ângulos da válvula submersa de  $-25^\circ$ ,  $0$  e  $+15^\circ$ , respectivamente (os sinais de  $+$  e  $-$  significam ascendente e descendente, respectivamente). A utilização de orifícios com uma área grande faz com que o ângulo do jato não seja afetado pelo ângulo do orifício de saída. Foi observado escoamento assimétrico severo quando os ângulos de saída ou tamanhos dos orifícios da válvula eram desiguais. Para altas velocidades de lingotamento e orifícios de diâmetro pequeno foi detectado que os níveis de turbulência eram altos. Porém, o aumento da velocidade de lingotamento não afeta o ângulo do jato, e sim sua velocidade (Najjar et al., 1995).

Thomas et al. (2000) realizaram o modelamento matemático tridimensional do escoamento turbulento na região do molde para placas do lingotamento contínuo, utilizando o software comercial CFX 4.2 e o modelo de turbulência  $k-\varepsilon$ . A validação do modelo foi feita através de medidas experimentais na unidade de lingotamento da AK Steel – Mansfield, além da utilização de modelagem física. Concluiu-se que o modelo matemático elaborado se mostrou adequado para estudo do processo industrial.

Miranda et al. (2005) estudaram as oscilações observadas na superfície livre de um modelo físico do molde, para lingotamento contínuo de placas, através de experimentos e utilizando modelamento matemático. As medições experimentais foram realizadas utilizando-se sensores ultrasônicos e as simulações feitas com um software comercial (CFD). Concluiu-se que as oscilações da superfície livre são compostas por várias componentes da frequência, que apresentam periodicidade, e que são dependentes da posição espacial, da velocidade de lingotamento e da profundidade da válvula submersa.

Li e Tsukihashi (2005), visando observar a formação de vórtices no molde de lingotamento contínuo de placas, realizaram seu modelamento físico e desenvolveram um modelo numérico para estudo do sistema. Para visualização do escoamento foram injetadas partículas de cânfora negras no modelo físico e realizadas filmagens das mesmas. O vórtice está geralmente localizado no lugar em que se observa a menor velocidade adjacente à válvula submersa. A magnitude do vórtice depende da velocidade horizontal do fluido no local e decresce gradualmente com a distância da superfície livre. O tamanho do vórtice depende da localização da válvula submersa no molde e a sua intensidade é determinada por esta posição da válvula e pela velocidade de lingotamento.

Porém, segundo Li e Tsukihashi (2005), quando estudos numéricos são desenvolvidos em sistemas em que a válvula submersa está localizada exatamente no centro da seção transversal do molde, é obtida uma simetria do escoamento do fluido nas duas metades do veio, não sendo observada a formação de vórtices na superfície livre. Sendo assim, como a magnitude destas oscilações é desprezível nestes casos, ao se realizar o modelamento matemático do sistema na região do molde pode-se fazer uma aproximação de que a superfície livre é plana.

Sivaramakrishnan et al. (2000), Yuan et al. (2001), Vanka e Thomas (2001), Yuan et al. (2004) e Zhang et al. (2007) podem ser citados como exemplos de trabalhos que realizaram modelamentos físico e matemático visando avaliar o escoamento transiente observado em moldes de placas, utilizando válvula submersa bifurcada, no lingotamento contínuo. A investigação dos parâmetros responsáveis por este tipo de escoamento é importante para evitar problemas de qualidade superficial e interna durante o lingotamento contínuo destes produtos.

Mais recentemente, Kamal e Sahai (2006) realizaram um estudo para avaliação da utilização de dispositivos para modificação do escoamento no molde (MFCD – *Mold Flow Control Device*) para o controle das ondulações superficiais e da turbulência. Neste trabalho, foram realizadas simulações em um modelo físico utilizando água como fluido e modelamento matemático empregando o software comercial FLOW3D,

considerando um sistema tridimensional e um modelo de diferenças finitas incorporando o escoamento turbulento do fluido, utilizando o modelo de duas equações do tipo  $k$ - $\epsilon$ .

Um diagrama esquemático do perfil do menisco e do padrão de escoamento do fluido no molde foi elaborado por Kamal e Sahai (2006), conforme apresentado na Figura 3.10. Pode-se observar que a recirculação na parte superior é a que contribui para a formação das ondulações superficiais e elevação da turbulência no topo do molde.

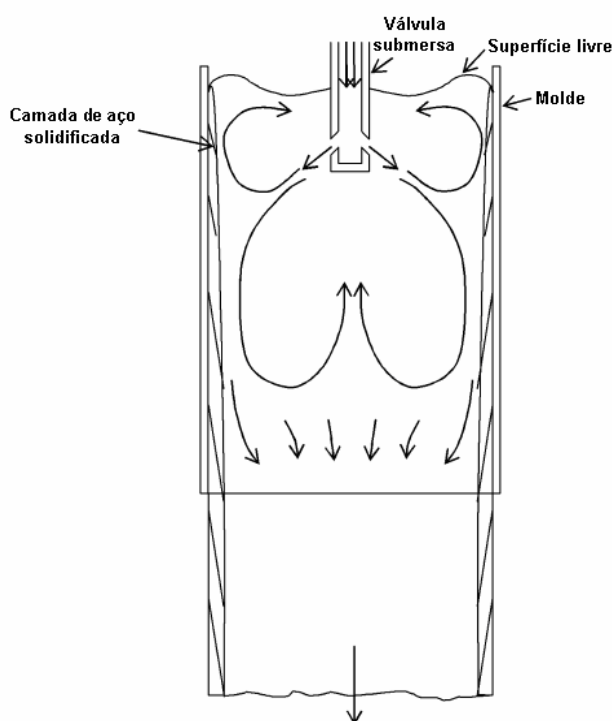


Figura 3.10: Diagrama esquemático do perfil do menisco e do padrão de escoamento do fluido no molde, conforme Kamal e Sahai (2006).

Na Figura 3.11 encontram-se apresentadas algumas geometrias de dispositivos para modificação do escoamento no molde utilizados no trabalho e na Figura 3.12 pode-se observar a localização destes dispositivos na parte superior do molde, não havendo contato destes com a saída do jato da válvula submersa. A consideração de diversas geometrias dos dispositivos a serem testados é interessante para correta avaliação da sua influência no perfil de escoamento observado no molde.

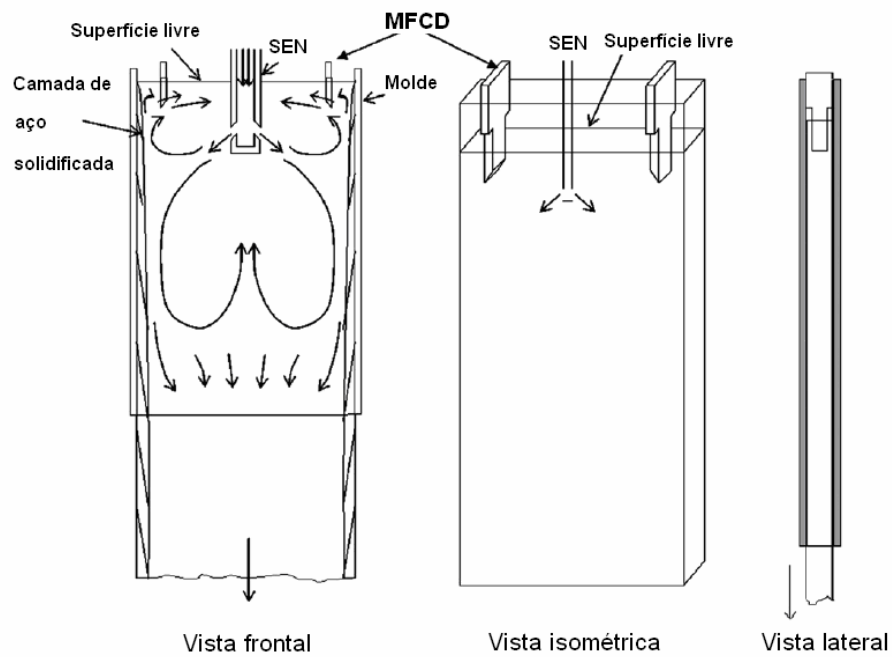


Figura 3.11: Localização no molde dos dispositivos para modificação do escoamento no molde (MFCD) (Kamal e Sahai, 2006).

Projeto MFCD	Vista Isométrica	Vista Lateral
No.1		
No.2		
No.3		

Figura 3.12: Geometrias dos dispositivos para modificação do escoamento no molde (MFCD) testados no estudo por Kamal e Sahai (2006).

Segundo Kamal e Sahai (2006), os benefícios potenciais do controle do escoamento do fluido com a utilização destes dispositivos refratários instalados na parte superior do molde são:

- redução das ondulações superficiais e a turbulência, diminuindo assim os defeitos superficiais do produto;
- redução da formação de vórtice na superfície livre do metal no molde;
- incorporação de um parâmetro extra para controle do escoamento do fluido no molde;
- possibilidade de aumento da velocidade de lingotamento, aumentando assim a taxa de produção sem afetar a qualidade do produto.

Kamal e Sahai (2006) não abordaram o possível efeito dos MFCD sobre a formação da placa de mistura.

### **3.3 – Formação da Placa de Mistura**

Visando atender às diferentes demandas do mercado, algumas indústrias siderúrgicas de grande porte fabricam diversas qualidades e dimensões de aço, tornando sua produção um processo complexo, com a constante transição de qualidades de aço durante o lingotamento contínuo.

O lingotamento contínuo de aços, para conseguir aliar alta produtividade a custos baixos, precisa trabalhar com seqüenciais longos, sem interrupção do processo. Esta prática acarreta a mistura dos aços com diferentes composições, ocasionando a formação das chamadas placas de mistura.

As placas de mistura, por possuírem uma composição química variável entre as qualidades de aço misturadas, não podem ser comercializadas como um produto homogêneo, sendo desclassificadas quanto à qualidade para os clientes finais. Estas placas de mistura são então vendidas para aplicações menos rigorosas a um preço inferior ou reutilizadas como sucata no próprio processo siderúrgico.

Se a indústria atende a um mercado diversificado, esta produção de placas de mistura pode alcançar volumes significativos, provocando perdas consideráveis de produto. Por isto, é de grande interesse para as indústrias siderúrgicas a realização de estudos visando a diminuição do comprimento destas placas. Uma das formas de alcançar esta redução envolve a alteração nos padrões de escoamento do aço na máquina de lingotamento.

De acordo com Yu et al. (2005) e Alizadeh et al. (2008), o comprimento da placa de mistura depende da extensão da mistura entre as duas qualidades de aço que ocorre no distribuidor e no veio de lingotamento. Esta extensão da mistura é determinada pelo padrão de escoamento do aço e pelas condições de operação utilizadas durante o processo de lingotamento contínuo. Desta forma, o estudo da transição de qualidades considerando o distribuidor e o veio simultaneamente torna-se necessário para gerar dados completos que possam ser aplicados industrialmente.

Segundo Huang e Thomas (1996a), durante uma transição típica de qualidades de aço, a velocidade de lingotamento, o volume total contido no distribuidor e a taxa de alimentação do distribuidor variam com o tempo, conforme apresentado na Figura 3.13.

O tempo zero é definido como sendo o momento de abertura da panela, contendo a nova qualidade de aço. O tempo menor do que zero da Figura 3.13 representa procedimentos que ocorrem anteriormente à abertura da nova panela.

Geralmente, antes da abertura da panela, a velocidade de lingotamento é diminuída. Assim, a solidificação da camada de aço no molde aumenta, diminuindo a profundidade de recirculação do aço líquido no veio e, conseqüentemente, diminuindo o comprimento da placa de mistura formada.

Ao mesmo tempo, a taxa de alimentação do aço no distribuidor é diminuída sendo, no instante da troca de panelas, reduzida à zero. A redução faz com que o volume de aço no distribuidor abaixe até uma altura mínima, na qual não ocorra a formação de vórtice. Este procedimento é importante pois diminui a mistura entre as diferentes qualidades de



aço no distribuidor. Quando a nova panela é aberta, a taxa de alimentação do aço aumenta para que se alcance o volume normal de operação no distribuidor.

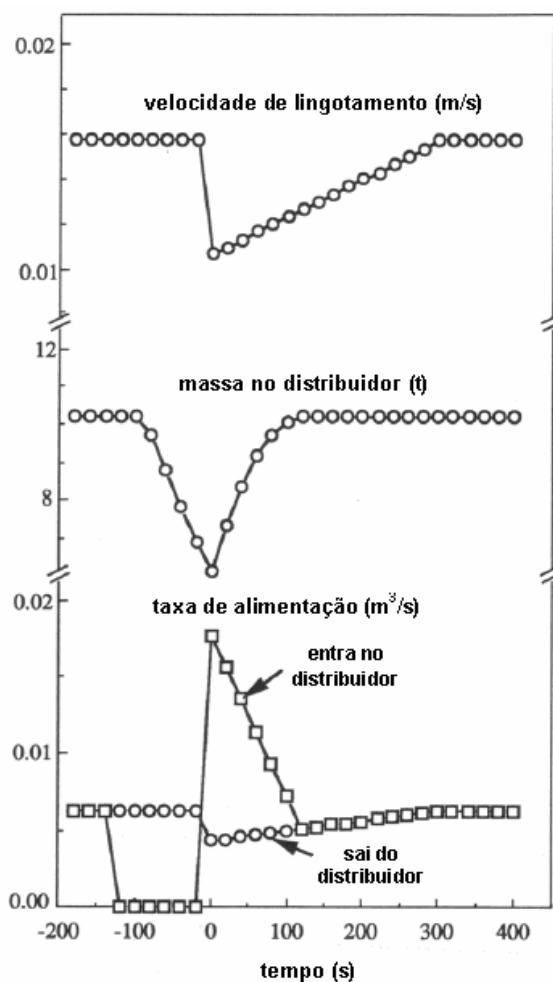


Figura 3.13: Esquema típico de transição de qualidades, apresentando a velocidade de escoamento, massa e taxa de alimentação do distribuidor, variando com o tempo.

(Huang e Thomas, 1996a)

No veio, a mistura ocorre principalmente na linha central, onde observa-se a recirculação do aço que entra no molde.

De acordo com Huang e Thomas (1996a) e Masal'skii et al. (2007), existem diferentes procedimentos para que se faça a transição de qualidades de aços no lingotamento contínuo.

O método mais simples é aquele em que somente a panela é trocada. Este método evita perdas de produtividade, porém, produz o máximo de mistura de aços.

O método mais extremo consiste em interromper o lingotamento quando uma nova qualidade de aço for alimentada ao processo. Este método não produz placa de mistura. No entanto, ocorre uma perda de tempo para reinício do processo. Além disto, uma parte da produção é perdida devido ao problema de qualidade no início e no final do produto lingotado, decorrente do início do processo de lingotamento.

Outro método envolve a troca do distribuidor, evitando que o processo seja interrompido e que ocorra mistura de qualidades no distribuidor. O distribuidor é trocado ao mesmo tempo em que a panela, contendo a nova qualidade de aço, é aberta. Neste método a mistura ocorre somente no veio de lingotamento. Este procedimento demanda uma estrutura mais complexa na planta industrial, além de promover a perda do aço antigo remanescente no distribuidor trocado.

Visando minimizar a mistura que ocorre no molde, existe a possibilidade da utilização de placas separadoras de qualidades que são inseridas no topo do molde durante a troca de qualidades. No entanto, a inserção de uma placa no molde requer um bom controle do processo para que não ocorram fissuras, abaulamento ou rompimento da superfície do produto, além da possibilidade de provocar danos na máquina de lingotamento. Além disto, as placas separadoras possuem valor elevado.

Como pode-se notar, cada método produz um comprimento diferente de placa de mistura. Para a escolha entre os métodos deve-se fazer uma análise de custo-benefício do processo. Porém, na maioria das vezes, para que não ocorra queda na produtividade, a transição de qualidade de aço a ser solidificado ocorre sem que haja a troca do distribuidor.

### *3.3.1 – Estudos de formação da placa de mistura*

Os modelamentos físico e matemático são as ferramentas que vêm sendo aplicadas para o estudo do escoamento do aço no lingotamento contínuo e previsão do comprimento de placas de mistura, resultando em ganhos expressivos quanto ao controle do processo e rendimento, otimizando o corte das mesmas.

Yeh et al. (1993) desenvolveram um modelo matemático tridimensional para simular o escoamento e a transferência de massa no distribuidor, visando prever a distribuição de composição química em placas de mistura e o seu comprimento durante uma transição de qualidades no lingotamento contínuo. Para formulação do modelo matemático foi aplicado o modelo de turbulência  $k$ - $\epsilon$  e sua validação foi realizada utilizando um modelo físico. O estudo comprovou que a quantidade de fluido residual no distribuidor, quando a transição de qualidades ocorre, afeta a distribuição da composição química ao longo do comprimento da placa sendo lingotada, conforme apresentado na Figura 3.14. Neste estudo, especificamente, foi observado que a velocidade de lingotamento não afeta significativamente o comprimento da placa de mistura, conforme mostrado na Figura 3.15.

Para obtenção das curvas foi realizada a normalização da concentração, denominada concentração adimensional. Sendo assim, os valores zero e a unidade representam a composição do aço na panela anterior e na nova panela, respectivamente.

Ao realizarem o modelamento matemático do escoamento em um distribuidor durante uma transição de qualidades, Chen e Pehlke (1996) concluíram que a configuração e os níveis de operação do distribuidor afetam diretamente o comprimento da placa de mistura produzida. Manter o nível de aço no distribuidor o menor possível durante todo o período da transição de qualidades é mais eficaz para diminuição do comprimento da placa de mistura do que abaixar e aumentar rapidamente o nível do distribuidor.

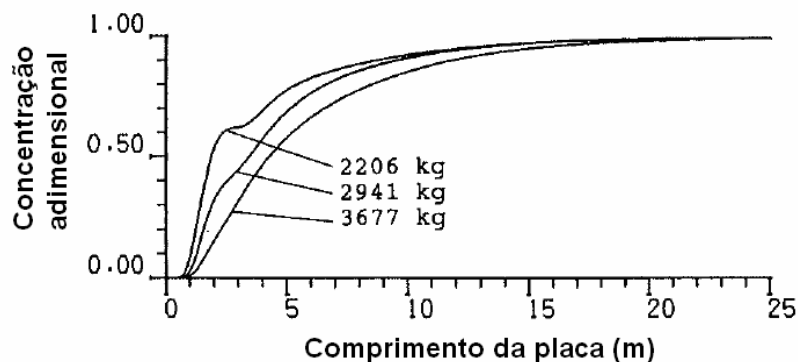


Figura 3.14: Curvas obtidas pelo modelo matemático, mostrando o efeito da quantidade de fluido residual no distribuidor na distribuição da composição química ao longo da placa sendo lingotada. A velocidade de lingotamento é de 1,0m/min.

(Yeh et al., 1993)

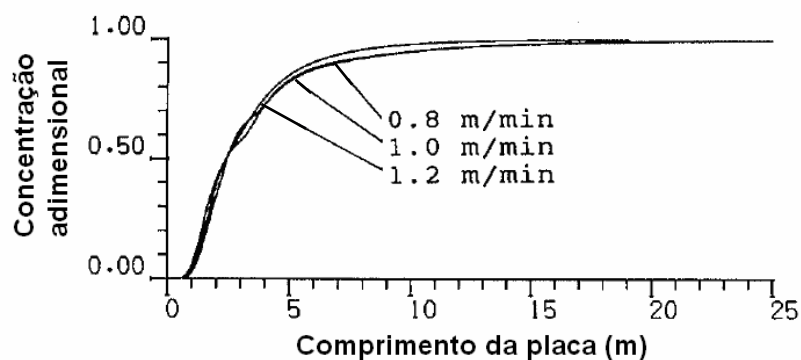


Figura 3.15: Curvas obtidas pelo modelo matemático, mostrando o efeito da velocidade de lingotamento na distribuição da composição química ao longo da placa sendo lingotada. A quantidade residual de fluido é de 2.206kg (Yeh et al., 1993).

Huang e Thomas (1996a) desenvolveram um modelo matemático unidimensional de mistura, MIX1D, para investigar a variação de composição química do aço que ocorre durante transições de qualidade no processo de lingotamento contínuo de placas. Para desenvolvimento do modelo, o distribuidor foi dividido em volumes de escoamento pistonado, de mistura e morto e o molde foi considerado como sendo composto de duas regiões de mistura, uma superior e uma inferior, conforme apresentado nas Figuras 3.16 e Figura 3.17, respectivamente. Para utilização do modelo, os volumes do distribuidor e as regiões do molde devem ser especificados como dados de entrada.

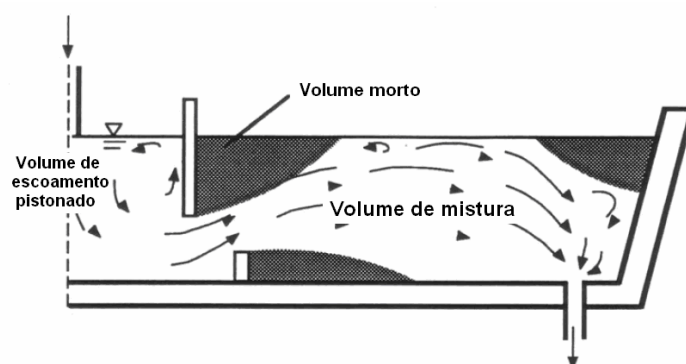


Figura 3.16: Esquema do modelo contendo os três volumes do distribuidor de lingotamento contínuo, segundo Huang e Thomas (1996a).

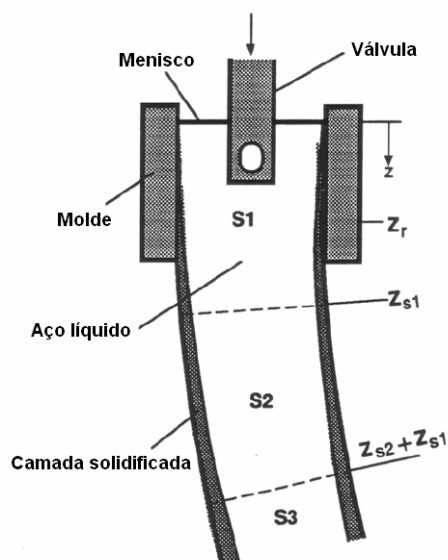


Figura 3.17: Esquema do modelo contendo as três zonas do veio de lingotamento contínuo, segundo Huang e Thomas (1996a).

O modelo matemático foi aplicado para os diferentes métodos de transição de qualidade, visando o entendimento do processo de transição de qualidades para minimizar a quantidade de mistura. Concluiu-se que o método que utiliza a troca do distribuidor é mais eficiente quando aplicado juntamente com as placas separadoras de qualidade. Quando não se utiliza a placa separadora, o método que emprega somente a troca de painéis é o mais indicado, podendo ser otimizado utilizando-se um baixo volume de aço no distribuidor durante a transição de qualidades.

Thomas (1997), utilizando o modelo matemático MIX1D para simular a distribuição da composição química no distribuidor e no molde durante uma transição de qualidades, chegou às seguintes conclusões para otimização do processo:

- a mistura no distribuidor é dominante quando o distribuidor é largo, para velocidades de lingotamento baixas e lingotamento de placas com espessura pequena;
- a mistura no veio é dominante quando a operação é realizada em distribuidores pequenos, com troca do distribuidor durante a transição de qualidades, para velocidades de lingotamento altas e lingotamento de placas mais espessas;
- aços com especificações de qualidade mais restritas devem ser lingotados antes do que aços com especificação mais ampla, quando a mistura no distribuidor é dominante. A operação inversa é a indicada quando a mistura no veio é dominante;
- a diminuição da massa de aço no distribuidor quando uma nova panela é aberta, com o seu posterior enchimento mais lento, reduz a mistura, principalmente em distribuidores largos. O controle do escoamento do aço no distribuidor também é indicado visando a diminuição da mistura durante a transição de qualidades;
- a diminuição da velocidade de lingotamento diminui a quantidade de aço misturado;
- moldes com espessuras e larguras menores produzem placas de mistura menores.

Piccone et al. (2001) estudaram a influência da utilização de dispositivos de controle de turbulência e barragens no distribuidor, durante uma transição de qualidades realizada na unidade de lingotamento contínuo da usina de Gary da “U.S. Steel” nos Estados Unidos. Através da utilização de testes industriais e modelamento físico, foi identificado que a utilização dos dispositivos e das barragens faz com que ocorra uma diminuição do comprimento das placas de mistura.

Sinha e Vassilicos (2001) fizeram uma comparação entre diversos tipos de dispositivos para modificação do escoamento (FCD – *Flow Control Device*) no distribuidor, visando avaliar a efetividade de cada um na redução da produção de placas de mistura durante

uma transição de qualidades. A comparação foi realizada entre um dispositivo denominado *Dogbowl* com um sistema contendo amortecedor de impacto na entrada do distribuidor e defletores nas suas laterais, antes da saída para o molde. Para todos os casos testados, o dispositivo *Dogbowl* não apresentou resultados satisfatórios por apresentar uma alta sensibilidade ao desalinhamento, fazendo com que fossem observados padrões de escoamento diferentes ao longo do tempo no distribuidor.

Zimmerman e Schmidt (2003) desenvolveram um modelo matemático de mistura para prever o comprimento e a distribuição de composição química em placas de mistura durante uma transição de qualidades no lingotamento contínuo. O modelo vem sendo utilizado desde julho de 2002 no lingotamento contínuo da Burns Harbor e calcula o perfil de transição de composição química repetidamente durante sucessivos intervalos de tempo e ajusta cada iteração para qualquer mudança significativa dos parâmetros de lingotamento.

Um modelo para determinação da massa da placa de mistura formada durante uma transição de qualidades foi desenvolvido por Yu et al. (2005). Para formulação do modelo, Yu et al. (2005) dividiu o distribuidor em volumes de escoamento pistonado, morto e de mistura e realizou o balanço de massa para obtenção das composições químicas. As concentrações nos volumes de escoamento pistonado e morto foram aproximadas pelas concentrações da qualidade de aço nova e antiga, respectivamente. No volume de mistura foi assumido que a mistura do aço ocorre de maneira uniforme. Foram obtidas, então, equações diferenciais que relacionam as variações de concentração na saída do distribuidor em função do tempo.

A validação do modelo foi realizada utilizando-se análises químicas das placas de mistura formadas. O objetivo da elaboração do modelo era facilitar o entendimento do efeito de várias variáveis durante uma transição de qualidades, sendo um programa de fácil utilização e que gerasse respostas rápidas.

Os efeitos do perfil de enchimento do distribuidor, aumento da velocidade de lingotamento e presença de inibidores de fluxo durante a transição foram investigados. Yu et al. (2005) ressalta a importância dos seguintes aspectos durante uma transição de qualidades:

- taxa de enchimento do distribuidor é dependente do volume de aço contido no mesmo no momento da troca de panela;
- aumento da velocidade de lingotamento antes da troca das panelas deve ser evitado;
- utilização da menor massa de aço líquido no distribuidor durante a troca, desde que não apresente risco de arraste de escória e inclusões;
- utilização de inibidores e modificadores de fluxo, que mudam o perfil de escoamento do aço.

Estas medidas, além de melhorarem a qualidade do produto, reduzem a massa da placa de mistura.

Cravo (2006) elaborou um modelo matemático, aplicado ao distribuidor e molde, para prever o comprimento da placa de mistura gerada durante uma transição de qualidades no lingotamento contínuo da Companhia Siderúrgica de Tubarão (CST). Para validação do modelo foram realizadas amostragens em placas de mistura obtidas na planta industrial da CST.

Entre os resultados obtidos, Cravo (2006) destacou a importância do controle do volume de aço no distribuidor para minimizar a mistura. Esse volume deve ser o menor possível, sem que ocorra a passagem de escória do distribuidor para o molde.

Filho et al. (2008) avaliaram os efeitos das condições de transição de qualidade sobre o comprimento da placa de mistura através de modelamento físico. Foram realizados ensaios considerando-se quatro níveis mínimos de fluido no distribuidor, mantendo a vazão de recuperação em 80 L/min e o tempo de permanência no nível mínimo em 30s. O nível mínimo é obtido quando a taxa de alimentação do fluido no distribuidor é diminuída até que se alcance uma altura mínima, na qual não ocorra a formação de



vórtice e a vazão de recuperação é utilizada quando a nova panela é aberta, para que o volume normal de operação no distribuidor seja alcançado novamente.

A Figura 3.18 apresenta as curvas de transição obtidas para o molde e a Figura 3.19 os comprimentos de placa de mistura estimados. Foi observado que a redução do nível mínimo de aço líquido no distribuidor foi a variável que causou a redução mais significativa no comprimento da placa de mistura.

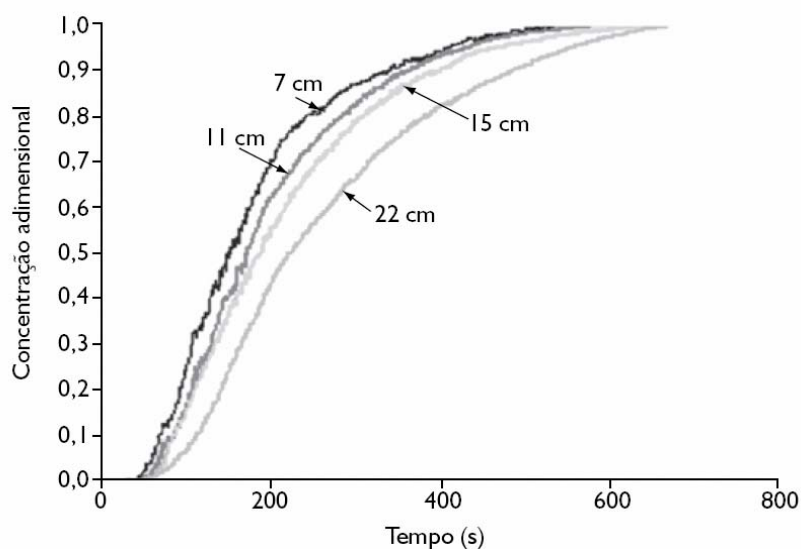


Figura 3.18: Curvas de transição para o molde para diferentes níveis mínimos de fluido no distribuidor (Filho et al., 2008).

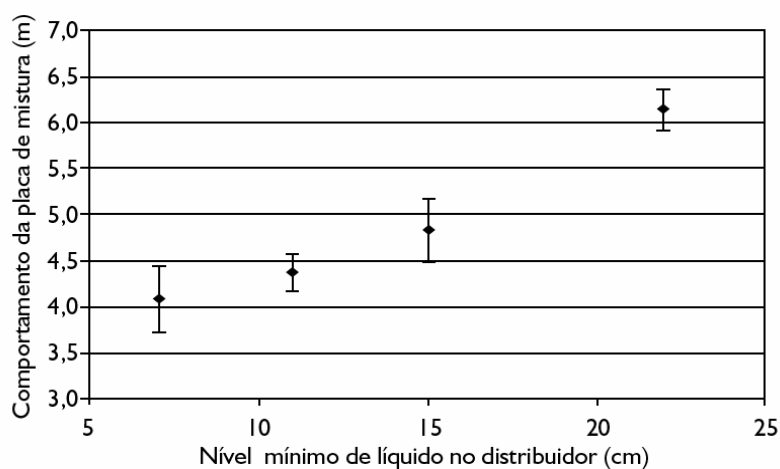


Figura 3.19: Efeito do nível mínimo de líquido no distribuidor sobre o comprimento da placa de mistura (Filho et al., 2008).

O tempo de permanência no nível mínimo e a vazão de alimentação de aço no distribuidor, durante a recuperação do nível normal de trabalho, mostraram pouco efeito sobre o comprimento da placa de mistura, dentro dos limites testados.

Foi constatado também que, conforme resultados apresentados na Tabela III.2, em todos os níveis mínimos de líquido no distribuidor, a mistura no molde tem papel mais significativo, particularmente para os níveis mínimos mais baixos no distribuidor. Concluiu-se então que as variáveis que afetam o escoamento no molde também devem ser investigadas quando se deseja fazer previsões realistas do comprimento das placas de mistura e desenvolver maneiras de reduzir este comprimento.

Tabela III.2: Contribuição da mistura no molde no comprimento da placa de mistura (Filho et al., 2008).

<b>Nível mínimo de líquido no distribuidor (cm)</b>	<b>Contribuição relativa da mistura no molde no comprimento da placa de mistura (%)</b>
7	86,0
11	73,0
15	72,5
22	63,6

Alizadeh et al. (2008) desenvolveram um modelo matemático para simulação da transição de qualidades do aço, baseando-se nas técnicas e condições operacionais do lingotamento contínuo de placas em uma unidade da empresa Mobarakeh Steel Company. O modelo matemático foi validado através de medições diretas da composição química das placas de mistura formadas durante as transições de qualidades.

Os resultados do modelo mostraram, conforme apresentado na Figura 3.20, que a quantidade de placa de mistura gerada aumenta consideravelmente com o aumento da velocidade de lingotamento e da largura da placa sendo lingotada. Apesar de Yeh et al. (1993) terem observado que a velocidade de lingotamento não afeta significativamente

o comprimento da placa de mistura no sistema estudado, a maioria dos trabalhos realizados sobre o assunto concordam com o resultado obtido por Alizadeh et al. (2008).

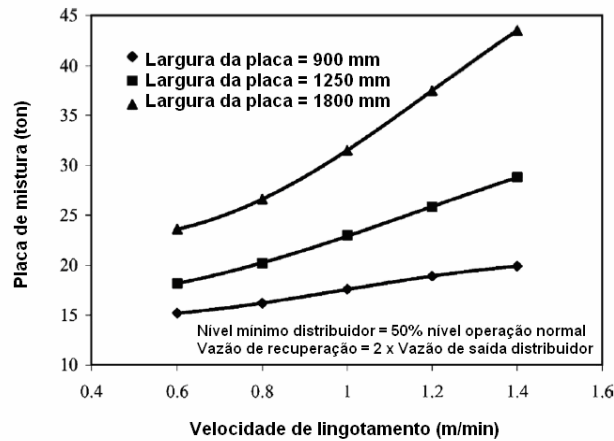


Figura 3.20: Efeito da velocidade de lingotamento e da largura da placa na quantidade de placa de mistura formada, baseada nas composições químicas medidas no centro e na superfície da placa (Alizadeh et al, 2008).

Através da análise dos estudos citados acima, pode-se concluir que os principais parâmetros operacionais que afetam a quantidade de placa de mistura gerada devido à mistura no distribuidor e no veio de lingotamento contínuo são:

- nível mínimo de aço líquido no distribuidor no momento da abertura da nova panela;
- velocidade de lingotamento durante a transição de qualidades;
- dimensões da placa sendo lingotada;
- taxa de enchimento do distribuidor;
- modificadores de fluxo utilizados no distribuidor e;
- composição química dos aços a serem lingotados em sequência.

## 4 – METODOLOGIA

O presente trabalho foi desenvolvido em duas etapas:

- 1ª etapa: desenvolvimento do modelamento matemático do sistema para análise do escoamento do aço no molde, incorporando modificadores de fluxo, e previsão das curvas de transição para determinação do comprimento da placa de mistura;
- 2ª etapa: realização de experimentos com os modelos físicos do sistema de lingotamento contínuo, sem e com modificadores de fluxo no molde, para validação das previsões do modelamento matemático.

O foco do trabalho foi investigar alternativas de modificadores de fluxo inseridos no molde, que possibilitem uma redução no comprimento da placa de mistura.

A seguir as duas etapas do trabalho serão detalhadas.

### 4.1 – Modelamento Físico

Os modelos físicos utilizados encontram-se instalados no Laboratório de Simulação de Processos do Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais da UFMG. A descrição do sistema e o procedimento experimental adotado são apresentados a seguir.

#### *4.1.1 – Descrição das instalações dos modelos físicos*

Os modelos físicos foram construídos em acrílico cristal, em escala 1:3 em relação ao sistema de lingotamento contínuo instalado na Aciaria 2 da Usiminas. Nesta aciaria é realizado o lingotamento de placas em uma máquina de 2 veios.

O sistema metalúrgico estudado é constituído pelos modelos físicos do distribuidor e do molde. É importante mencionar que os modelos físicos do distribuidor e do molde

foram utilizados de forma integrada, o que reproduz exatamente o que ocorre na prática industrial.

O modelo físico do distribuidor é constituído por dois vasos: um interno, com a geometria do distribuidor propriamente dito, e um externo, utilizado para equalizar a pressão hidrostática do vaso interno. O distribuidor foi utilizado com a presença de um inibidor de turbulência na sua entrada, cujas dimensões encontram-se apresentadas na Figura 4.1. As condições de operação do distribuidor foram mantidas as mesmas em todos os testes.

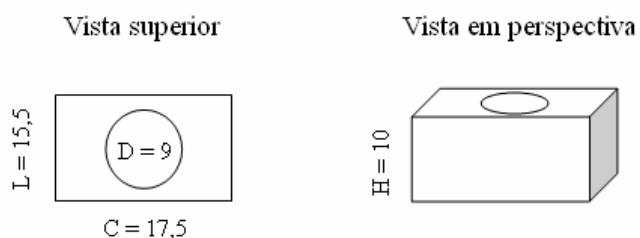


Figura 4.1: Vistas superior e em perspectiva do inibidor de turbulência utilizado no distribuidor, com as dimensões em centímetros, onde D = diâmetro, C = comprimento, L = largura e H = altura. O material acrílico possui espessura de 1 cm.

A alimentação do distribuidor é realizada através de um duto conectado a reservatórios de água. Estes reservatórios são utilizados para simular a alimentação das duas diferentes qualidades de aço no distribuidor.

Uma válvula gaveta foi utilizada para controlar a vazão de saída do fluido do distribuidor para a válvula submersa em um dos veios; a outra saída do distribuidor não possui molde. A válvula submersa é responsável pelo transporte do fluido do distribuidor para o molde.

O modelo físico do molde é de geometria retangular. Sua alimentação é realizada pelo distribuidor e na sua saída encontram-se instalados uma válvula e um medidor de vazão. A água usada nos ensaios retorna aos reservatórios e é reaproveitada.

Na Tabela IV.1 são apresentadas as principais características e dimensões dos modelos físicos e equipamentos complementares utilizados no presente trabalho.

A Figura 4.2 apresenta uma vista frontal das instalações dos modelos físicos. A Figura 4.3 ilustra uma vista esquemática das instalações, com indicação dos sensores usados. As Figuras 4.4 e 4.5 apresentam, respectivamente, as dimensões do distribuidor e do molde utilizados. A Figura 4.6 detalha as características da ponteira da válvula submersa.

Tabela IV.1: Dimensões e características principais do sistema a ser utilizado.

<b>CARACTERÍSTICAS DO DISTRIBUIDOR</b>	
Comprimento superior	2,76m
Comprimento inferior	2,66m
Largura superior	0,33m
Largura inferior	0,155m
Altura	0,39m
Vista esquemática	Ver Figura 4.3
<b>CARACTERÍSTICAS DO MOLDE</b>	
Comprimento (m)	1,12
Largura (m)	0,6
Espessura (m)	0,08
Vista esquemática	Ver Figura 4.4
<b>CARACTERÍSTICAS DA VÁLVULA SUBMERSA</b>	
Diâmetro da válvula	0,018m
Furos das portas de saída da válvula	circulares
Diâmetro das portas de saída da válvula	0,014m
Inclinação das portas de saída da válvula	15°
Vista esquemática	Ver Figura 4.5

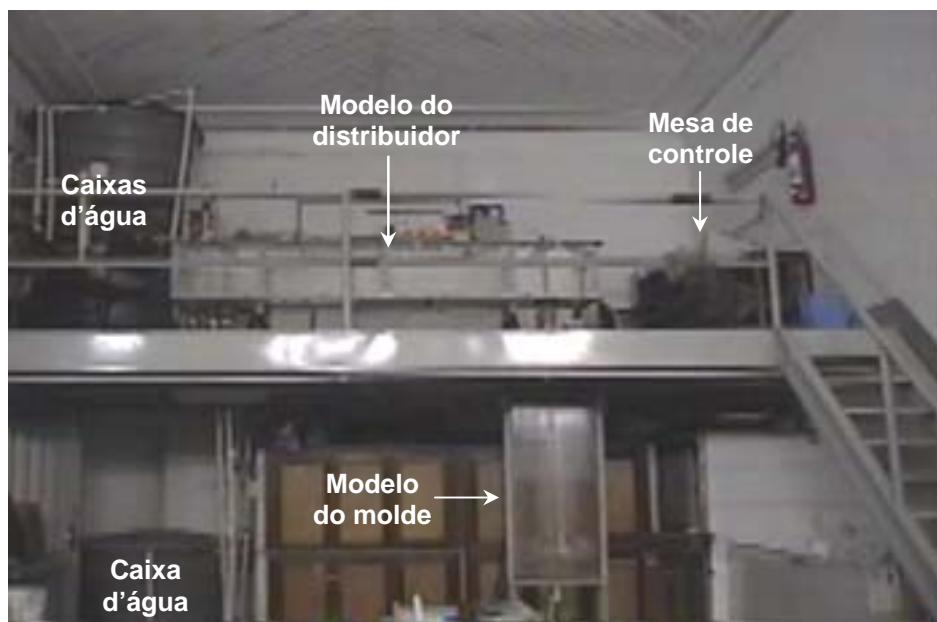


Figura 4.2: Vista frontal dos modelos físicos a serem utilizados, instalados no Laboratório de Simulação de Processos.

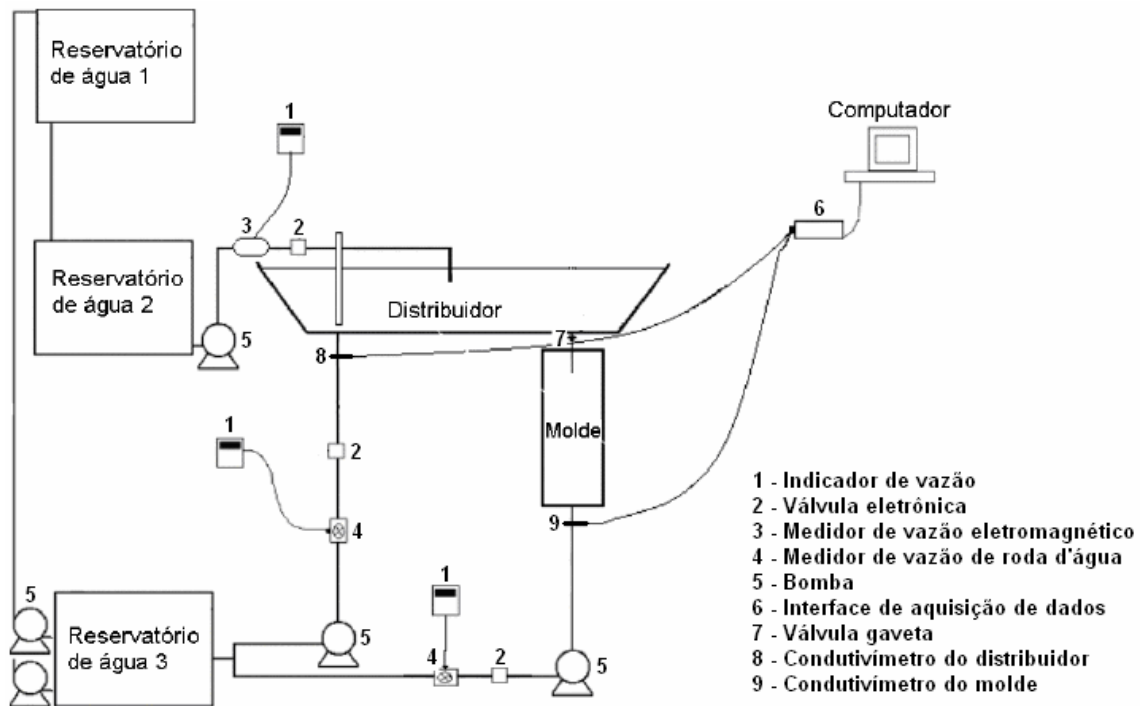


Figura 4.3: Vista esquemática dos modelos físicos com indicação dos medidores de vazão e condutivímetros. (Tavares, 2008)

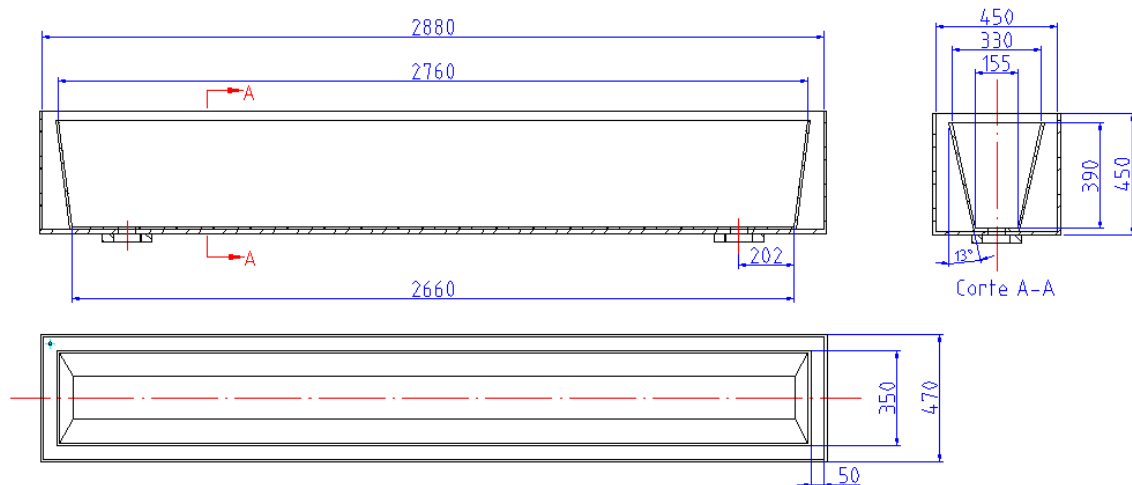


Figura 4.4: Vistas frontal, lateral e superior do distribuidor, com as dimensões em milímetros.

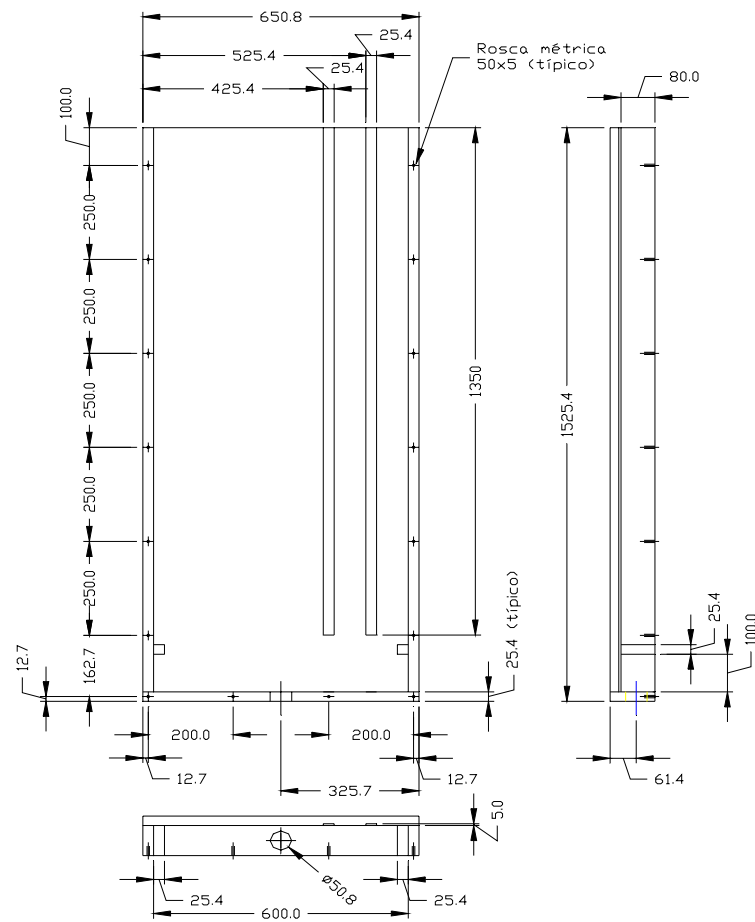


Figura 4.5: Vistas frontal, lateral e superior do molde, com as dimensões em milímetros.

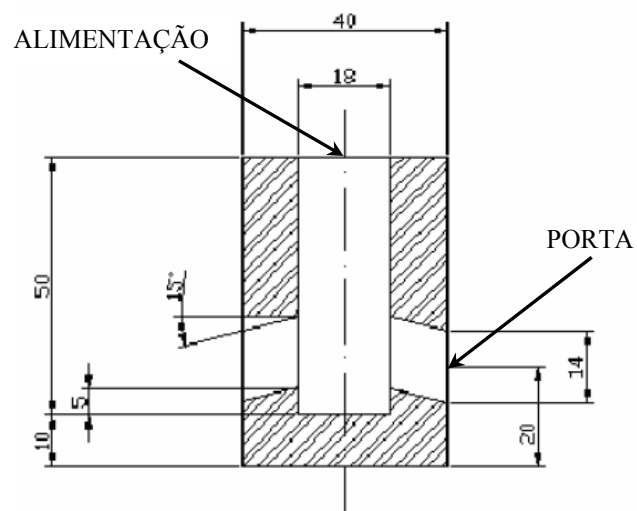


Figura 4.6: Corte transversal da ponteira da válvula submersa, com as dimensões em milímetros (Barral, 2006).



A operação dos modelos físicos está 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 CLP (Controlador Lógico Programável).

Os sistemas de controle e supervisão controlam as seguintes variáveis:

- vazão de alimentação do distribuidor;
- vazão de saída do distribuidor (veio sem o molde);
- vazão de saída do molde;
- níveis de líquido no distribuidor e no molde.

Na Figura 4.7 é apresentada a tela do painel de controle, utilizada durante a operação do sistema.

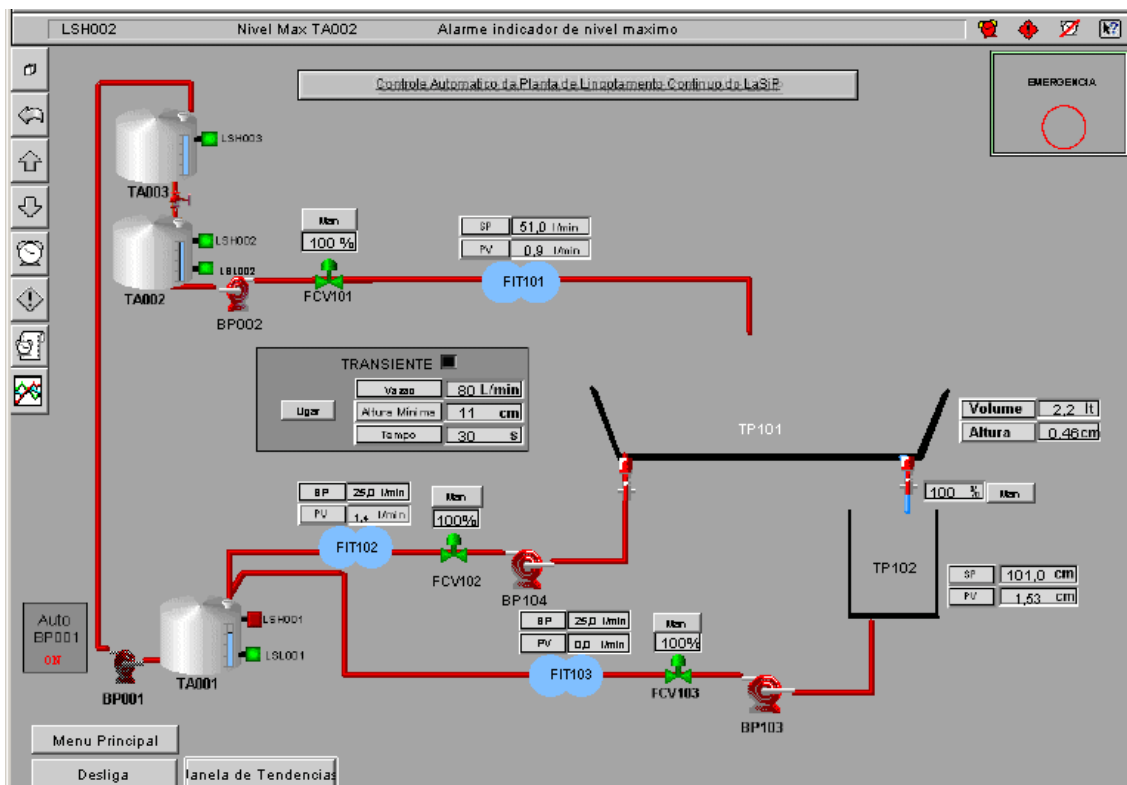


Figura 4.7: Tela do painel de controle utilizado durante a operação do sistema.

#### 4.1.2 – Procedimento Experimental

Os experimentos foram realizados utilizando água com diferentes concentrações de cloreto de potássio, para simular as duas qualidades de aço durante a troca de panelas. Nos modelos físicos a frio, o efeito da solidificação não é considerado. Essa aproximação é adequada devido à pequena espessura da camada solidificada em relação à largura do molde, afetando pouco o escoamento do fluido.

Os parâmetros operacionais para realização dos experimentos foram fixados seguindo o princípio de similaridade com o processo industrial adotado na Usiminas, usando o critério especificado pela igualdade do número de Froude. Para tanto, as vazões adotadas no modelo físico correspondem à vazão industrial multiplicada pelo fator de escala dos modelos construídos (no presente trabalho,  $\lambda = 1/3$ ) elevado ao expoente 2,5, conforme a equação (4.1).

$$Q_{\text{modelo físico}} = Q_{\text{equipamento industrial}} \cdot \lambda^{2,5} \quad (4.1)$$

Para a realização dos experimentos foi adotado o seguinte procedimento:

##### 4.1.2.1 – Regime estacionário

Nesta etapa foram reproduzidas as condições utilizadas na indústria durante o lingotamento contínuo de uma qualidade de aço, com os seguintes parâmetros operacionais:

- Vazão de alimentação do distribuidor: 50L/min (equivalente a aproximadamente 330ton aço/h);
- Nível de líquido no distribuidor: 31cm (equivalente a 200L de fluido e 40 toneladas de aço no processo industrial);
- Vazão de saída em cada veio: 25L/min (mantida constante);
- Nível de líquido no molde: 101 cm (mantido constante);

- Profundidade da válvula: 6,3 cm (definida como sendo a distância do nível de líquido no molde até o início da porta de saída da válvula submersa, conforme ilustrado na Figura 4.8).

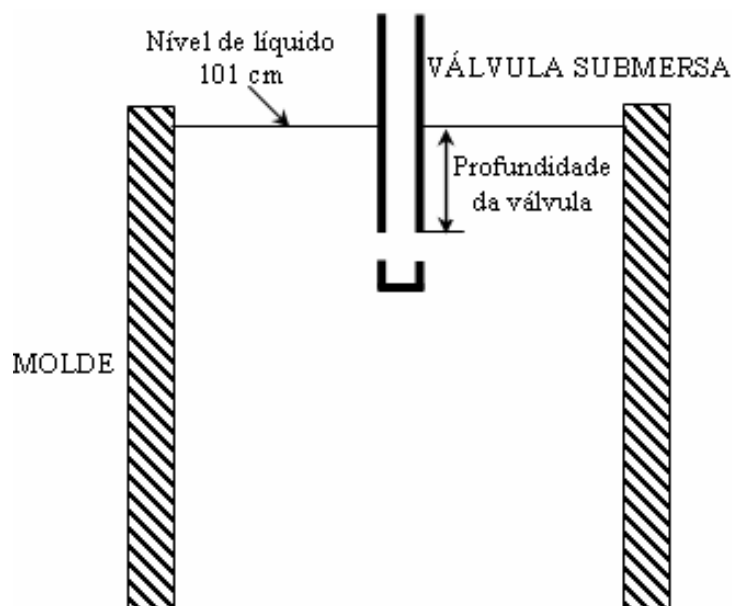


Figura 4.8: Desenho esquemático indicando a definição da profundidade da válvula submersa no molde.

#### 4.1.2.2 – Regime transiente

Nesta etapa foram reproduzidas as condições utilizadas na indústria durante a transição de qualidades do aço no lingotamento seqüencial. Para isto, a alimentação do distribuidor é interrompida até que se alcance o nível mínimo de líquido no distribuidor para o qual não há formação de vórtice, no momento da troca de painéis. Em estudos anteriores (Filho et al., 2008), este nível foi determinado como sendo 7 cm.

Ao atingir o nível mínimo de líquido no distribuidor, inicia-se a alimentação de água com uma dada concentração de sal, a uma taxa de enchimento de 50L/min para a permanência no nível mínimo por 30s. Após esse tempo, inicia-se a alimentação de água a uma vazão de recuperação de 80L/min, visando recuperar o nível normal de

trabalho no distribuidor. Quando esta condição é alcançada, a vazão de alimentação do distribuidor volta para os 50L/min.

A Figura 4.9 apresenta o gráfico esquemático com as vazões e os níveis no distribuidor, utilizados nos experimentos com os modelos físicos.

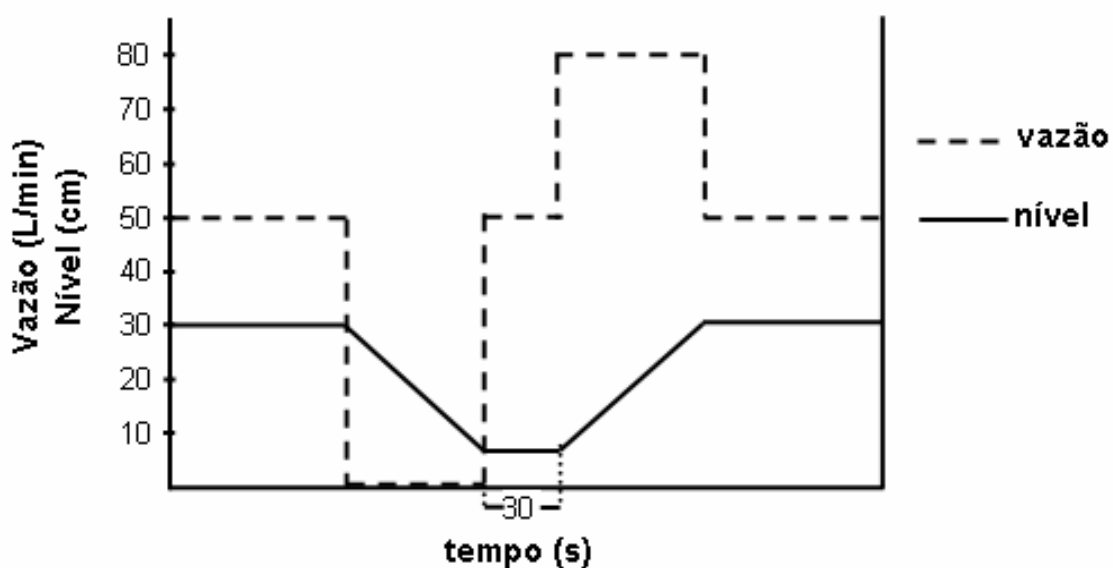


Figura 4.9: Gráfico esquemático da vazão de alimentação e do nível do distribuidor em relação ao tempo dos experimentos.

As variações de condutividade elétrica do fluido (que dependem da concentração de sal) nas saídas do distribuidor e do molde foram monitoradas durante todo o experimento, sendo posteriormente convertidas em concentração de traçador, utilizando-se uma curva de calibração. O condutivímetro realiza a leitura da condutividade elétrica do líquido, que aumenta com o aumento da concentração de sal.

#### 4.1.2.3 – Curvas de Transição

Para construção das curvas de transição durante a troca de qualidades do aço, foi utilizada uma concentração adimensional  $C_n$  definida como:

$$C_n = \frac{C_t - C_{anterior}}{C_{nova} - C_{anterior}} \quad (4.2)$$

Onde:

$C_t$ : concentração do traçador na saída do molde medida no tempo  $t$ ;

$C_{anterior}$ : concentração do traçador na alimentação do distribuidor antes da troca de panela ( $t = 0$ );

$C_{nova}$ : concentração do traçador na alimentação do distribuidor após a troca de panela.

Foram construídos, então, gráficos de  $C_n$  em função do tempo para cada experimento realizado, obtendo-se uma curva similar à apresentada na Figura 4.10. Esta curva é denominada de curva F.

O critério para a especificação do comprimento da placa de mistura foi a utilização do intervalo de tempo transcorrido entre as concentrações  $C_n$  de 0,2 e 0,8. Este intervalo de tempo, escolhido arbitrariamente, significa o tempo gasto para que ocorra a completa homogeneização do elemento crítico (de maior variação de concentração nos aços).

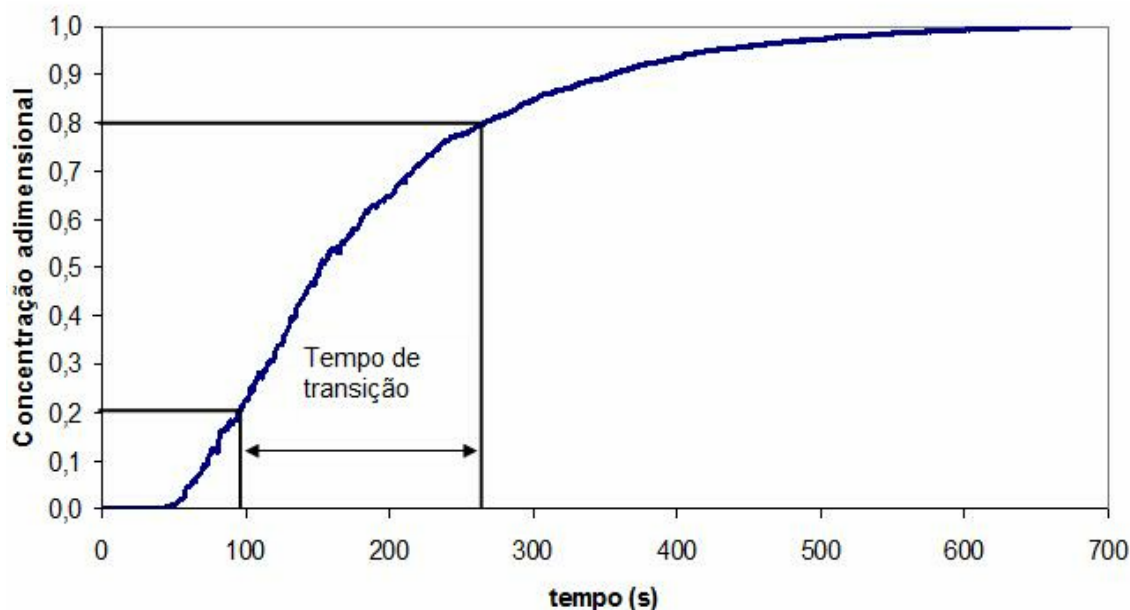


Figura 4.10: Exemplo de uma curva de transição de qualidades F.

Este intervalo de tempo é sempre menor quando a placa de mistura é avaliada considerando-se apenas a variação de concentração na saída do distribuidor, conforme mostrado na Figura 4.11. Quando os dados de saída do molde são utilizados, a mistura que ocorre no molde, além da que ocorre no distribuidor, são consideradas. Por isso é importante a utilização do distribuidor e do molde de forma integrada durante os experimentos, para que os resultados se aproximem mais do que ocorre industrialmente.

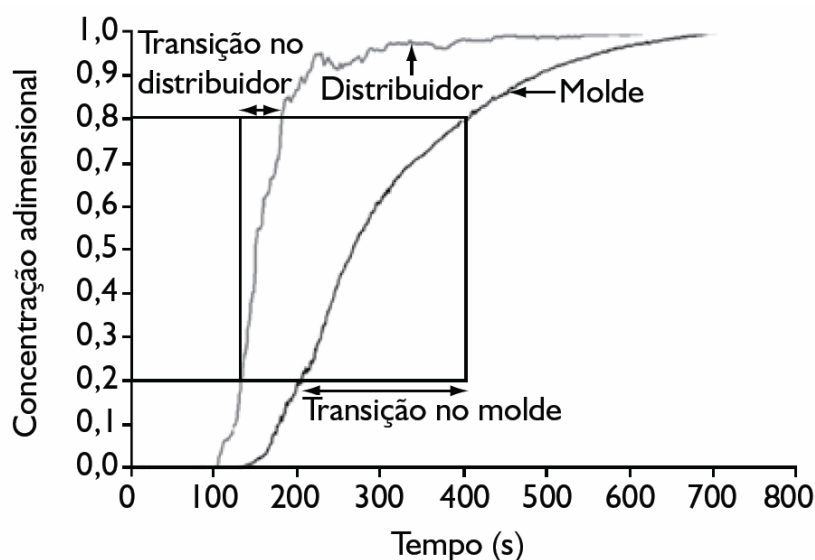


Figura 4.11: Exemplo de curvas de transição para formação de placa de mistura, identificando os tempos de transição no molde e no distribuidor (Filho et al., 2008).

Conhecendo-se este tempo de transição, as dimensões do molde e a vazão de saída do líquido do molde, foi possível a determinação do comprimento da placa de mistura, sendo os cálculos realizados com os dados do modelo físico e, posteriormente, multiplicados por 3, para se obter a dimensão da placa na indústria.

O comprimento da placa de mistura foi estimado, então, através da utilização da equação (4.3). A razão da vazão de saída do fluido pela área da seção transversal do modelo físico do molde resulta na velocidade de lingotamento. O produto desta velocidade pelo tempo de transição fornece o valor do comprimento da placa de mistura que, multiplicado pelo inverso do fator de escala, resulta no comprimento da placa de mistura industrial.

$$L_M \equiv \frac{Q \times 0,001}{A \times 60} \cdot t_{trans} \cdot \frac{1}{\lambda} \quad (4.3)$$

Onde:

$L_M$  = comprimento da placa de mistura industrial (m);

$Q$  = vazão de saída de material do molde (L/min);

$A$  = área da seção transversal do modelo físico do molde ( $m^2$ );

$t_{trans}$  = tempo de transição avaliado no modelo físico (s);

$\lambda$  = fator de escala (no presente trabalho,  $\lambda = 1/3$ ).

#### 4.1.2.4 – Configurações dos modificadores de fluxo no molde

No presente estudo foi analisado o escoamento do fluido no molde de lingotamento contínuo. Os principais fatores que influenciam no padrão de escoamento do aço no molde são a configuração da válvula submersa, a velocidade de lingotamento e as dimensões do próprio molde.

Para alterar os padrões de escoamento no molde e com isso interferir na formação da placa de mistura, foram introduzidos modificadores de fluxo. A Figura 4.12 ilustra a geometria dos modificadores de fluxo A e B utilizados no presente trabalho, com suas respectivas dimensões, sendo a espessura dos dois modificadores igual a 1cm. Na Figura 4.13 encontra-se a disposição dos mesmos no molde de lingotamento contínuo. A Figura 4.14 mostra uma visão em perspectiva do molde com os modificadores de fluxo A posicionados na sua parte superior.

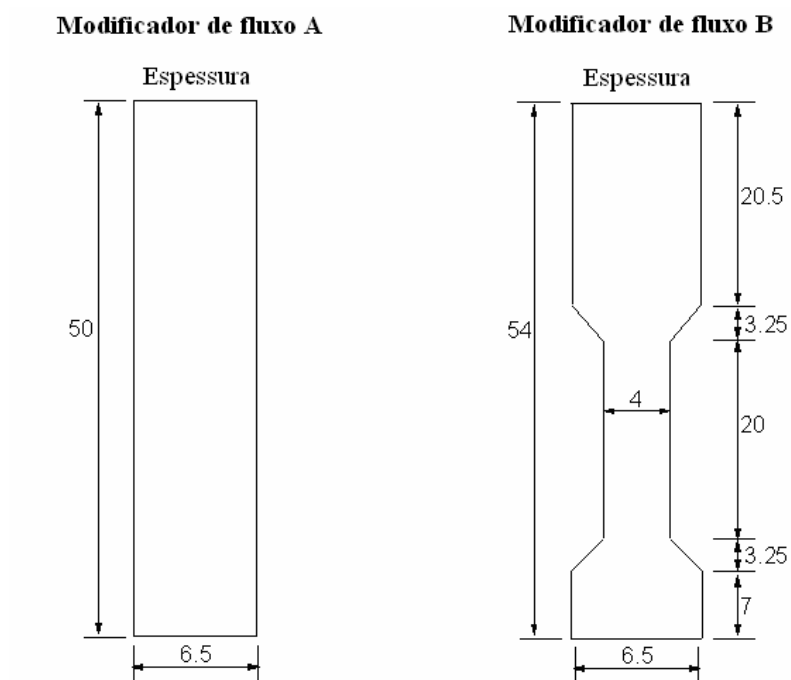


Figura 4.12: Geometria e dimensões em centímetros dos modificadores de fluxo A e B.

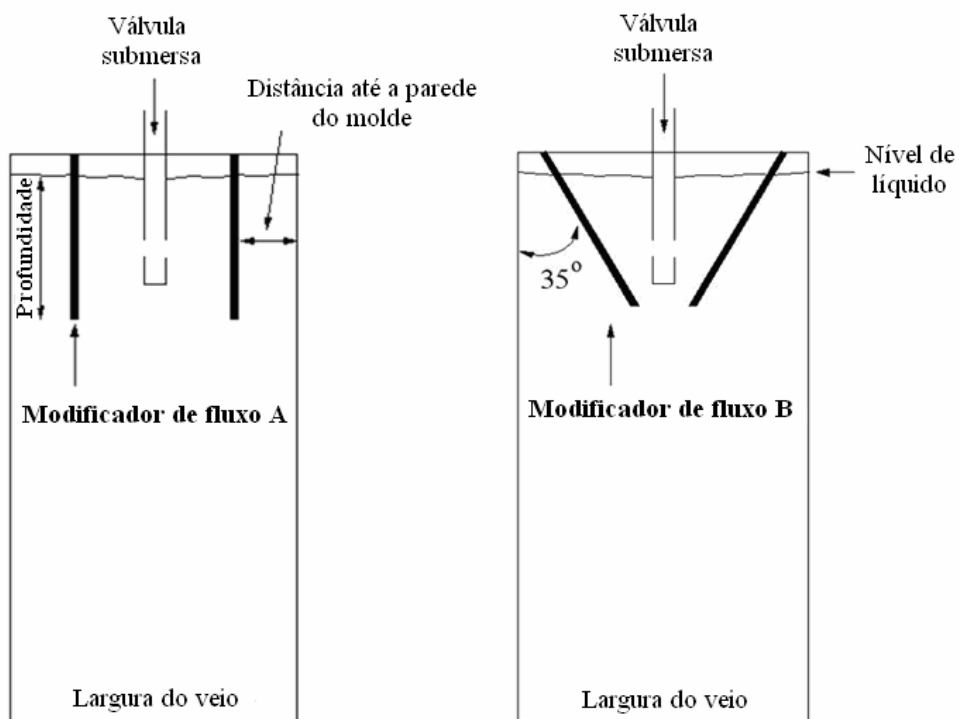


Figura 4.13: Localização dos modificadores de fluxo A e B no molde de lingotamento contínuo.



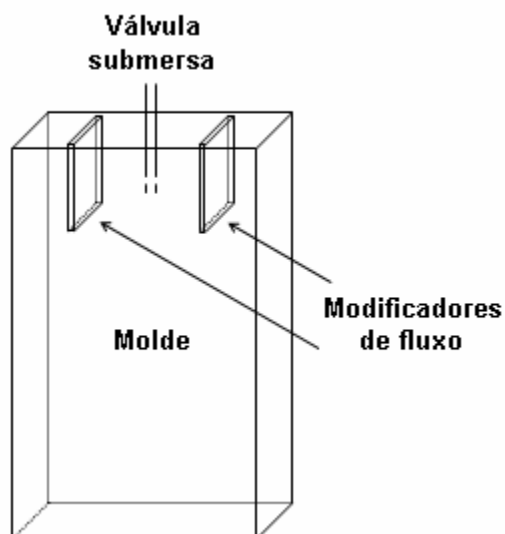


Figura 4.14: Modificadores de fluxo posicionados na parte superior do molde.

Na Tabela IV.2 são apresentadas as configurações dos modificadores de fluxo testadas no presente trabalho. Os efeitos do posicionamento do modificador de fluxo A no interior do molde (distância da parede e profundidade) também foram investigados.

Tabela IV.2: Configurações dos modificadores de fluxo utilizadas no presente trabalho.

<b>MODIFICADOR DE FLUXO A</b>		
A1	Profundidade = 13cm	Distância da parede = 19cm
A2	Profundidade = 13cm	Distância da parede = 14cm
A3	Profundidade = 13cm	Distância da parede = 9cm
A4	Profundidade = 14cm	Distância da parede = 19cm
A5	Profundidade = 14cm	Distância da parede = 14cm
A6	Profundidade = 14cm	Distância da parede = 9cm
A7	Profundidade = 15cm	Distância da parede = 19cm
A8	Profundidade = 15cm	Distância da parede = 14cm
A9	Profundidade = 15cm	Distância da parede = 9cm
<b>MODIFICADOR DE FLUXO B</b>		
B	Profundidade = 13cm	Ângulo 35° com a parede

Foram realizadas 5 réplicas de cada experimento, considerando o molde sem os modificadores de fluxo e com as configurações dos modificadores de fluxo citadas acima.

## 4.2 – Modelamento Matemático

Para o modelamento matemático foi utilizado o software comercial ANSYS CFX 11.0, que é baseado na técnica dos volumes finitos. Nesta formulação, o domínio escolhido é dividido em volumes de controle. As equações de conservação de massa, de quantidade de movimento e das grandezas de turbulência são discretizadas e resolvidas utilizando-se métodos iterativos para cada volume de controle. Além disto, o software permite escolher modelos de turbulência e simular o escoamento nos estados estacionário ou transiente.

O modelamento matemático do escoamento do aço no molde foi realizado considerando o molde sem os modificadores de fluxo e com as diferentes configurações de modificadores de fluxo, conforme apresentado no item 4.1.2.4. Para o desenvolvimento do estudo, foram feitas as seguintes considerações:

- água é fluido newtoniano e incompressível;
- sistema é isotérmico;
- propriedades físicas da água são uniformes no domínio;
- efeito do pó fluxante ou camada de escória na superfície livre pode ser desprezado;
- superfície livre é plana e sem oscilações de nível.

Para a simulação do escoamento turbulento tridimensional do fluido no molde de lingotamento contínuo, utilizando o software comercial ANSYS CFX 11.0, foram seguidos os seguintes passos:

- 1º passo: Construção da geometria e da malha do sistema;
- 2º passo: Configuração da simulação: estágios estacionário ou transiente;
- 3º passo: Solução das equações de conservação;
- 4º passo: Pós-processamento dos resultados.

Cada passo será explicado detalhadamente a seguir.

#### 4.2.1 – Construção da geometria e da malha

Para realização da simulação foi considerado apenas um quarto do veio, considerando a simetria apresentada pelo domínio de cálculo a ser utilizado no presente trabalho, conforme ilustrado na Figura 4.15. A consideração da simetria faz com que o tempo necessário para a simulação seja bem menor do que se fosse realizado o modelamento do molde completo.

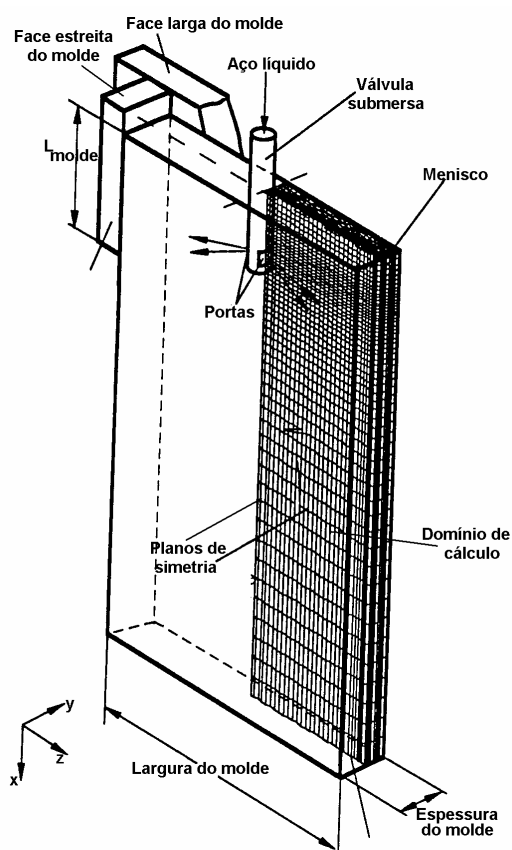


Figura 4.15: Visão esquemática da região modelada (Pereira et al., 2001).

Para construção da geometria de 1/4 do sistema foi utilizado um software tipo CAD, próprio para elaboração de desenhos tridimensionais. O desenho segue as dimensões do modelo físico do molde, em escala 1:3 em relação ao sistema de lingotamento contínuo instalado na Aciaria 2 da Usiminas.

A geometria criada foi, então, importada pelo ANSYS *WorkBench*, módulo do CFX que divide o domínio em um número finito de elementos de volume, constituindo a malha. Neste módulo, pode-se realizar o controle do tamanho dos elementos de volume, além do refinamento em regiões específicas em que ocorra maior turbulência ou maiores gradientes dos parâmetros de escoamento, fazendo com que os resultados nestas regiões sejam mais precisos.

A forma básica dos elementos de volume gerados durante a construção da malha foi tetraédrica. Nas regiões próximas às paredes, à válvula submersa e aos modificadores de fluxo, onde os gradientes de velocidade são mais elevados, a forma utilizada foi a prismática, que refina a região próxima à parede e mantém as regiões paralelas à mesma grosseiras, evitando o aumento do tempo de simulação. Para construção da malha pode-se utilizar os seguintes comandos:

- *Mesh Controls*: diminuem os tetraedros nos locais de maiores gradientes e/ou de turbulência do fluido, sendo que o refinamento pode ser feito a partir de pontos, linhas e triângulos, conforme exemplificado na Figura 4.16;
- *Inflated Boundary*: gera elementos de volume prismáticos, evitando que ocorram distorções no domínio devido à necessidade de tetraedros muito pequenos. Este recurso cria elementos de volume prismáticos na região normal às paredes e que mostram-se grosseiros nas regiões paralelas às mesmas, conforme apresentado na Figura 4.17.

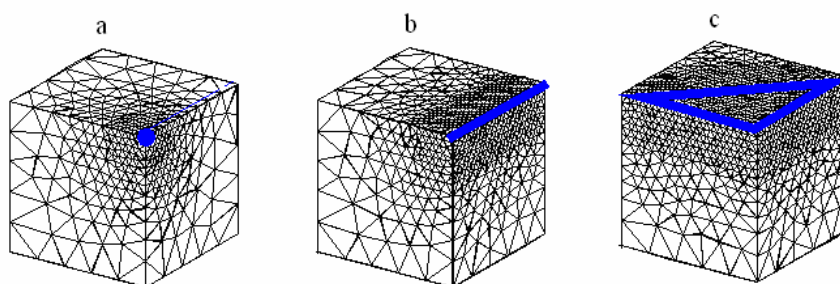


Figura 4.16: Exemplos de *Mesh Controls*. a) ao redor de um ponto, b) ao longo de uma linha, c) em torno de um triângulo (CFX – *Mesh Help*).

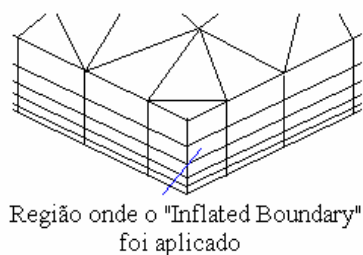


Figura 4.17: Região de aplicação do *Inflated Boundary* (CFX – Mesh Help).

A geração de uma malha adequada é importante porque os resultados encontrados com a utilização do modelamento matemático devem ser independentes da malha utilizada. O estudo de independência da malha consiste da determinação da malha que, ao sofrer refinamentos consecutivos, não cause alterações significativas nos perfis das grandezas estudadas, tais como os perfis de velocidade e de grandezas de turbulência. A malha escolhida para realização das simulações deve garantir que, ao se utilizar malhas mais refinadas, os resultados finais não sofram alterações. A utilização de uma malha muito refinada melhora a precisão dos resultados, porém, aumenta o tempo de simulação, o que não é aconselhável.

É gerado então um arquivo (\*.cldb), que será a base de dados geométricos necessária para que se inicie a próxima fase do modelamento, a configuração da simulação.

#### 4.2.2 – Configuração da simulação

Para desenvolvimento do modelo, foi considerado um sistema tridimensional e isotérmico, sendo as simulações realizadas em duas etapas:

##### 1ª etapa: Regime Estacionário

Determinação dos perfis de velocidades, pressão, grandezas de turbulência  $k$  e  $\varepsilon$  para todo o domínio;

##### 2ª etapa: Regime Transiente

Usando os perfis obtidos acima, foram obtidos os perfis da concentração de traçador e geradas curvas de transição durante a formação da placa de mistura.

As condições de contorno foram estabelecidas nas paredes, na superfície livre e nos planos de simetria, além da determinação dos valores da vazão de entrada e da velocidade de saída do fluido do sistema, conforme apresentados na Tabela IV.3. Foi utilizado o valor de  $10^{-8}$  m<sup>2</sup>/s para a difusividade cinemática do fluido.

Tabela IV.3: Condições de contorno utilizadas para simulação.

<b>Paredes</b>	Influência da parede no escoamento: sem escorregamento Rugosidade: parede plana (lisa)
<b>Superfície livre</b>	Escorregamento livre
<b>Entrada</b>	Vazão = 0,1 kg/s
<b>Saída</b>	Velocidade = $8,7 \times 10^{-3}$ m/s

Para discretização da equação de conservação foi utilizado o esquema de interpolação *high resolution*. Para simulação da turbulência foi utilizado o modelo de turbulência do tipo *k-ε*, proposto por Launder e Spalding (1972) e nível de turbulência na entrada de 5%. No estado transiente foi utilizado um fator de relaxação (*false time step*) de 0,1s. Este fator é um pseudo salto de tempo, que permite a resolução de um problema estacionário como um “falso” transiente. Para simulação do estado transiente foi utilizado um máximo de 100 iterações para cada salto de tempo de 1s.

No caso do estudo de independência da malha foi utilizado o esquema de interpolação *upwind* e para simulação da turbulência foram testados os modelos de turbulência do tipo *k-ε*, *k-ω* e RNG *k-ε*, níveis de turbulência de 5% e 10% e saltos de tempo de 0,1s, 0,5s e 1s.

Para simulação da transição de qualidades, foi definida uma variável que corresponde à concentração de traçador. Esta variável foi criada durante a configuração para o estado estacionário que, neste caso, possuiu valor uniforme em todo o domínio (unidade = kg/m<sup>3</sup>). Para o caso de regime transiente, foram utilizados os valores de concentração de traçador na saída do distribuidor, obtidos no modelo físico, como dados de entrada do molde, conforme apresentado na Figura 4.18. Para obtenção dos resultados foi resolvida a equação de transferência de massa para o traçador.

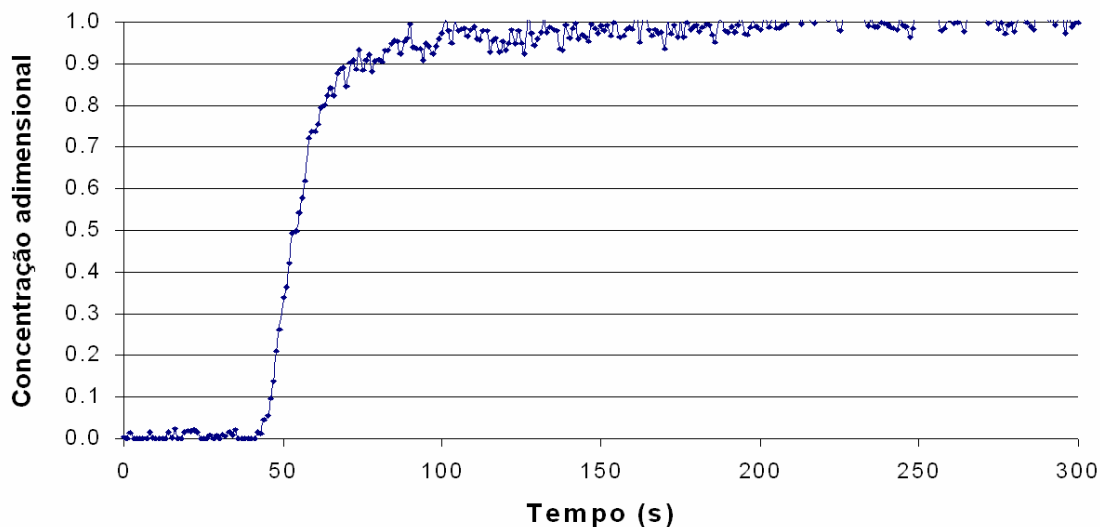


Figura 4.18: Gráfico dos valores de concentração de traçador na saída do distribuidor, obtidos no modelo físico (Torres, 2009).

Durante a simulação em regime transiente foi realizado o monitoramento da concentração média de traçador na saída do molde, visando determinar a concentração do traçador a cada intervalo de tempo pré-determinado. Assim, à medida que a simulação avança, a curva F de transição é gerada. Para o monitoramento na saída do molde foi utilizada a seguinte expressão: `areaAve(Tracador)@Saida`, que calcula a média da concentração do traçador na área de saída do molde. Nesta fase da simulação somente a equação de conservação do traçador é resolvida.

O critério de convergência para término das simulações em regime estacionário e transiente foi estabelecido como sendo a raiz quadrada média RMS (*Root Mean Square*) de  $10^{-6}$ .

Esta etapa gera um arquivo (\*.cfx) que contém as configurações estabelecidas no CFX-Pre 11.0, além do arquivo de definição (\*.def), que contém as informações necessárias para que o CFX-Solver resolva as equações de conservação.

#### 4.2.3 – Solução das equações de conservação

O CFX-Solver gera todas as soluções de velocidades, pressão, grandezas de turbulência e concentração de traçador, no caso do estado transiente, para a simulação do problema especificado no CFX-Pre 11.0, a partir da seleção do arquivo de definições criado durante a configuração da simulação. Esta fase do modelamento é a que demanda mais tempo.

Durante a solução do problema, gráficos dos resíduos são continuamente registrados, mostrando se a solução está convergindo conforme o critério de convergência estabelecido no CFX-Pre.

Ao final da simulação, quando o critério de convergência é atingido, são gerados dois arquivos:

- (\*.out) onde se encontra o resumo da simulação, contendo as configurações utilizadas e os resultados de cada iteração realizada;
- (\*.res) que contém todos os resultados obtidos e é utilizado pelo CFX-Post para o pós-processamento e visualização dos mesmos.

Para a simulação do estado transiente é realizada uma configuração prévia que permite que as equações de conservação de massa e quantidade de movimento e as do modelo de turbulência não sejam resolvidas novamente, prevalecendo os resultados obtidos no estado estacionário. Para tal, são desabilitados no CFX os itens *solve fluid* e *solve turbulence*, situados em *insert>solver>expert parameter>model over-rides*, que resolvem, respectivamente, as equações de conservação global de massa e de quantidade de movimento e as equações diferenciais parciais adicionais de turbulência.

A simulação termina quando os resíduos da equação de conservação de massa, das três componentes da equação de conservação de quantidade de movimento, das equações do modelo de turbulência e da variável que descreve a dispersão do traçador (no caso do regime transiente) alcançam o critério de convergência, estabelecido como sendo RMS  $10^{-6}$ .



São obtidos como resultados os valores de velocidade, pressão e de grandezas de turbulência em cada elemento de volume que compõe o domínio, e as curvas de transição para diferentes configurações de modificadores de fluxo.

#### ***4.2.4 – Pós-processamento dos resultados***

O CFX-Post 11.0 permite a visualização e análise dos resultados obtidos na simulação através de várias variáveis, tais como: velocidade, pressão, energia cinética de turbulência, taxa de dissipação da energia cinética de turbulência, entre outras.

A visualização dos resultados pode ser feita através da criação de campos de vetores, geração de planos de contorno, linhas de corrente, além da utilização de uma escala de cores para descrever os valores das variáveis de interesse nos resultados obtidos.

### **4.3 – Validação do Modelo Matemático**

Todo modelamento matemático do escoamento turbulento necessita ser validado por modelamento físico ou utilizando dados obtidos industrialmente porque os modelos de turbulência são normalmente modelos semi-empíricos.

A validação do modelo matemático foi efetuada através da comparação das previsões do modelo matemático com os resultados obtidos durante o modelamento físico, expressos em termos das curvas de transição (curvas F).

## 5 – RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 5.1 – Testes Preliminares

Inicialmente foi feito um estudo de independência da malha e testes com diferentes modelos e níveis de turbulência na alimentação, além da verificação de diferentes saltos de tempo, visando determinar a configuração de discretização que otimize os aspectos de precisão e tempo de simulação.

No presente estudo, a independência da malha foi avaliada a partir do acompanhamento das curvas  $F$  obtidas durante a simulação do estado transiente para cada configuração, considerando-se como critério de convergência a obtenção de um resíduo das equações de conservação igual ou inferior a  $RMS 10^{-6}$ .

Primeiramente, foi realizado o estudo de independência da malha utilizando o molde sem modificadores de fluxo. As malhas utilizadas foram identificadas como casos, sendo que a sua numeração obedece à ordem de realização das simulações. A cada simulação realizada, o refinamento feito foi tal que, o ensaio mais recente possuísse um tamanho dos elementos de volume cerca de 20% menor que seu anterior, mantendo-se as demais características constantes.

As Figuras 5.1 e 5.2 apresentam a localização dos refinamentos utilizados e a Tabela V.1 especifica o tamanho dos elementos de volume gerados para construção da malha.

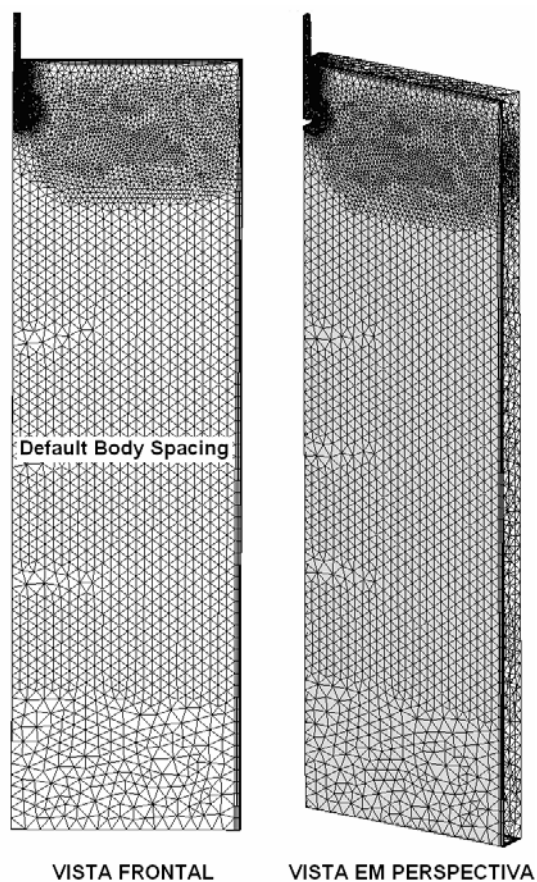


Figura 5.1: Vista frontal e vista em perspectiva do molde com a localização do comando *Default Body Spacing*, que define o valor do tamanho dos elementos de volume utilizados.

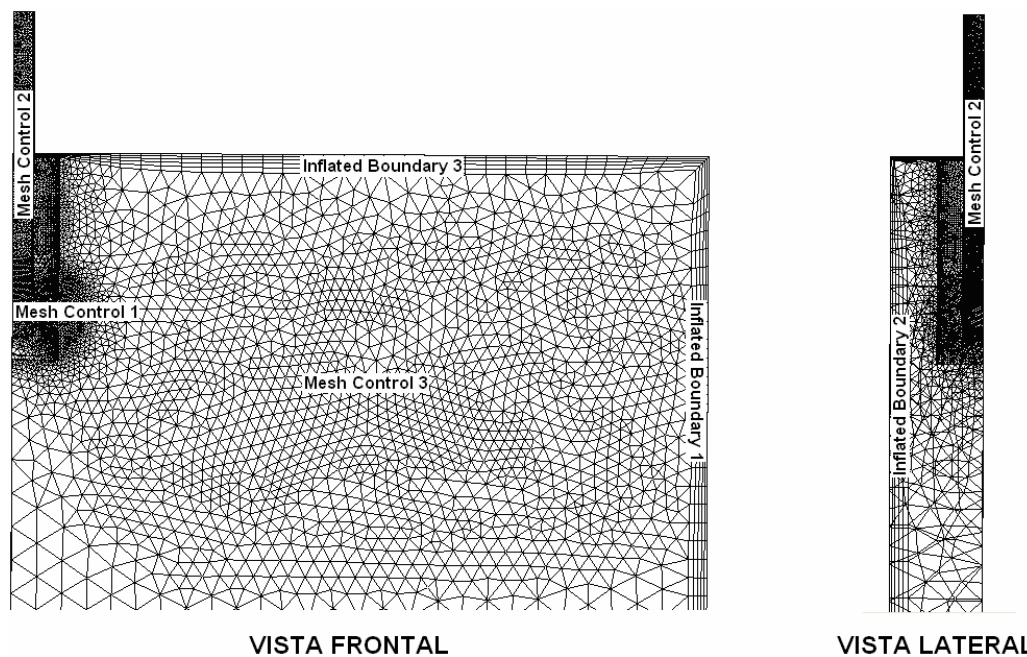


Figura 5.2: Localização dos comandos *Mesh Control* e *Inflated Boundary* no molde.

Tabela V.1: Especificação da construção da malha para os Casos 1, 2 e 3 do molde sem modificador de fluxo.

<b>Parâmetro</b>	<b>CASO 1</b>	<b>CASO 2</b>	<b>CASO 3</b>
Número de elementos de volume	176.236	312.438	540.471
Número de nós	41.806	70.483	115.049
<i>Default Body Spacing</i> (m)	0,02	0,016	0,0128
<i>Mesh Control 1</i> 'Saída válvula submersa bifurcada' <i>Length scale</i> (m) / <i>Radius</i> (m)	Length scale 0,00125 Radius 0,02	Length scale 0,001 Radius 0,02	Length scale 0,0008 Radius 0,02
<i>Mesh Control 2</i> (m) 'Válvula submersa bifurcada' <i>Length scale</i> (m) / <i>Radius</i> (m)	Length scale 0,0015625 Radius 0,018	Length scale 0,00125 Radius 0,018	Length scale 0,001 Radius 0,018
<i>Mesh Control 3</i> (m) 'Parte superior molde' <i>Length scale</i> (m) / <i>Radius</i> (m)	Length scale 0,00625 Radius 0,06	Length scale 0,005 Radius 0,06	Length scale 0,004 Radius 0,06
<i>Inflated Boundary 1</i> (m) 'Parede largura'	0,01	0,008	0,0064
<i>Inflated Boundary 2</i> (m) 'Parede espessura'	0,01	0,008	0,0064
<i>Inflated Boundary 3</i> (m) 'Superfície livre'	0,01	0,008	0,0064
Modelo de turbulência	$k-\varepsilon$	$k-\varepsilon$	$k-\varepsilon$
Nível de turbulência (entrada)	5%	5%	5%
Esquema de interpolação	Upwind	Upwind	Upwind

Foram obtidos, então, gráficos de  $C_n$  (definida na equação 4.2) em função do tempo para cada caso testado, determinando uma curva F. O critério para a especificação do comprimento da placa de mistura foi a utilização do intervalo de tempo transcorrido entre as concentrações adimensionais de 0,2 e 0,8, sendo a análise de semelhança entre as curvas realizada através da visualização das mesmas.

Na Figura 5.3 são apresentados os resultados obtidos após a realização do estudo de independência da malha para os Casos 1, 2 e 3 do molde sem modificador de fluxo.

O gráfico apresentado mostra que as curvas dos Casos 2 e 3 são bastante próximas, não havendo variações significativas dentro da região de interesse. Então o tamanho de malha do Caso 2 foi escolhido por apresentar um menor número de elementos de volume e servirá como base para o restante dos testes.

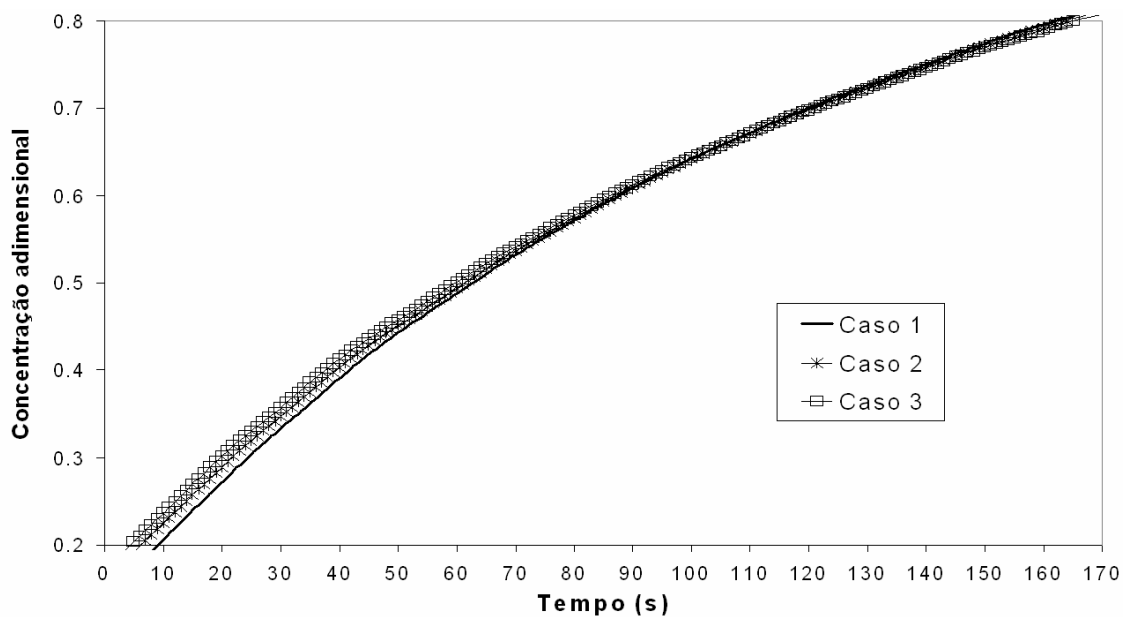


Figura 5.3: Comparação dos Casos 1, 2 e 3 das simulações realizadas para o molde sem modificador de fluxo.

Após a escolha do Caso 2 como base, foram testados os modelos de turbulência do tipo  $k$ - $\epsilon$ ,  $k$ - $\omega$  e RNG  $k$ - $\epsilon$ , conforme apresentado na Figura 5.4. Notou-se pouca diferença entre os modelos testados, optando-se então pela utilização do modelo de turbulência  $k$ - $\epsilon$  para as simulações posteriores.

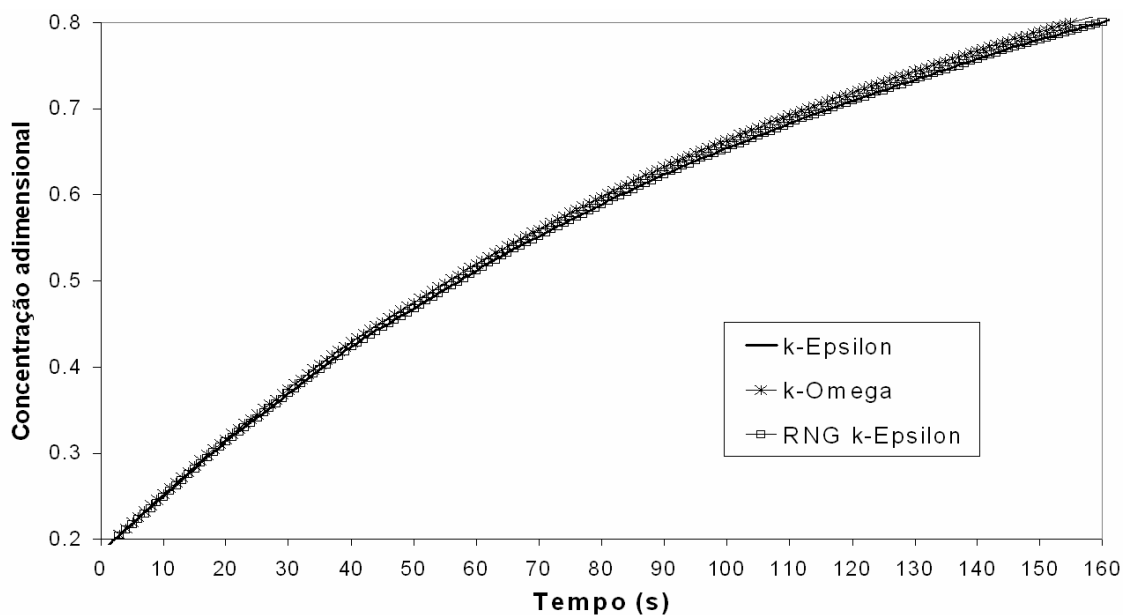


Figura 5.4: Comparação dos modelos de turbulência para o Caso 2, das simulações realizadas para o molde sem modificador de fluxo.

Os níveis de turbulência de 5% e de 10% na alimentação do molde foram testados para o Caso 2, conforme resultados apresentados na Figura 5.5. A figura mostra uma completa superposição das curvas, optando-se pela utilização do nível de turbulência de 5% para as simulações.

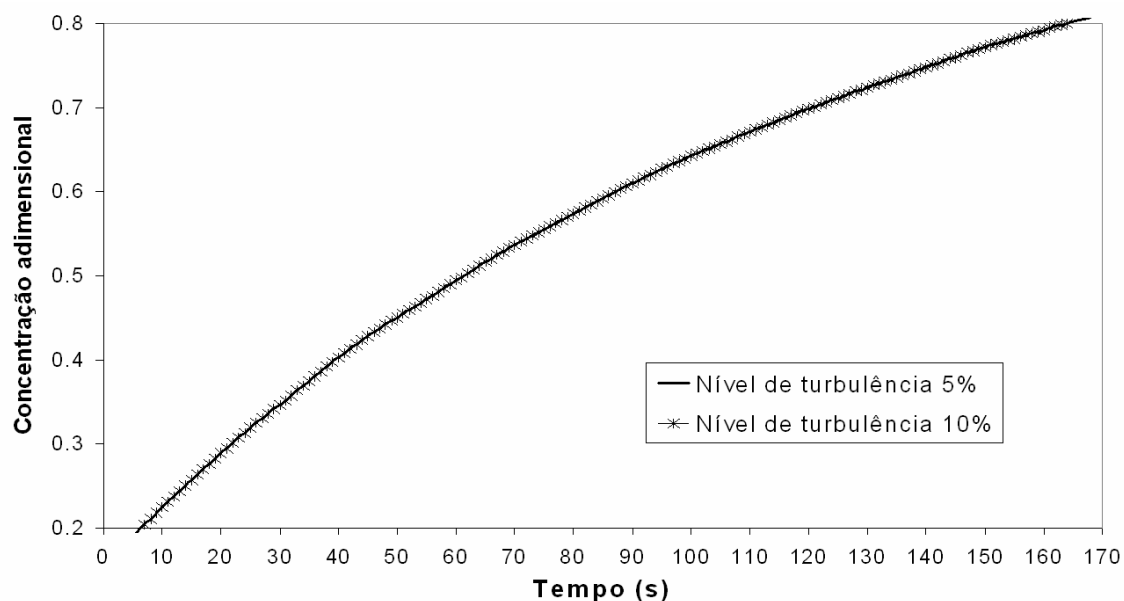


Figura 5.5: Comparação dos níveis de turbulência na alimentação do molde para o Caso 2, das simulações realizadas para o molde sem modificador de fluxo.

Os saltos de tempo de 1s, 0,5s e 0,1s foram testados para garantir a independência dos resultados em relação ao salto de tempo, conforme resultados apresentados na Figura 5.6. A figura também mostra uma completa superposição das curvas, optando-se pela utilização do salto de tempo de 1s, por ser mais rápido.

Após a escolha das configurações do Caso 2, foi realizado o estudo de independência da malha para o molde contendo os modificadores de fluxo. Para tal foi aplicado o *Inflated Boundary 4* na região dos modificadores de fluxo, conforme especificado na Tabela V.2. Foram utilizados dois refinamentos para cada modificador utilizado.

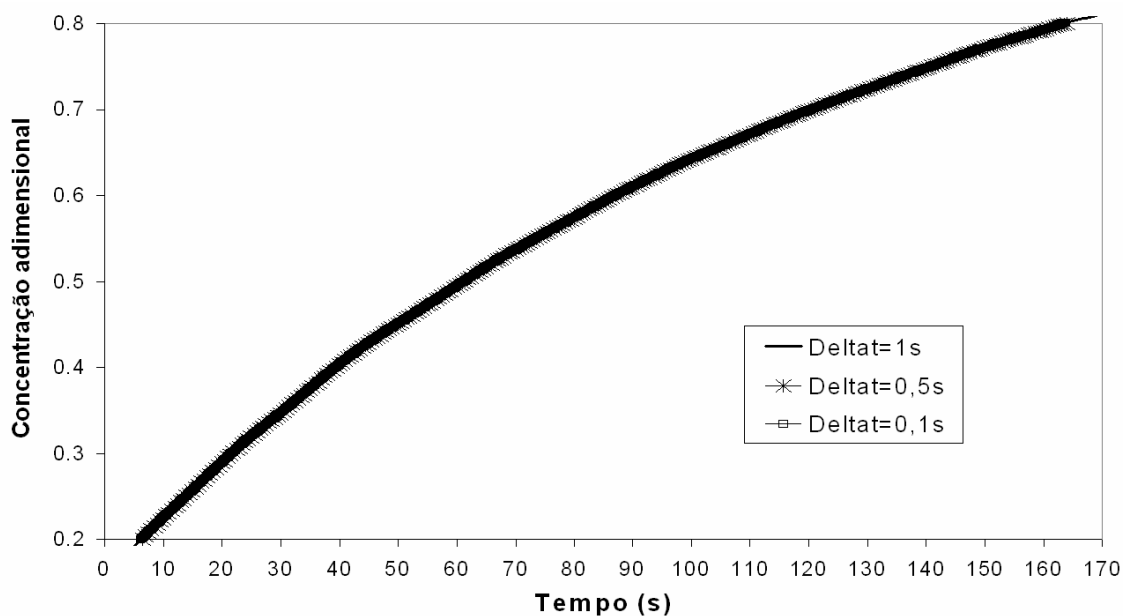


Figura 5.6: Comparação dos saltos de tempo para o Caso 2, das simulações realizadas para o molde sem modificadores de fluxo.

Tabela V.2: Especificação da construção da malha para os Refinamentos 1 e 2 do Caso 2, do molde com os modificadores de fluxo.

<b>Parâmetro</b>	<b>Refinamento 1</b>	<b>Refinamento 2</b>
<i>Default Body Spacing</i> (m)	0,016	0,0128
<i>Mesh Control 1</i> 'Saída válvula submersa bifurcada'	Length scale 0,001	Length scale 0,001
<i>Length scale</i> (m) / <i>Radius</i> (m)	Radius 0,02	Radius 0,02
<i>Mesh Control 2</i> (m) 'Válvula submersa bifurcada'	Length scale 0,00125	Length scale 0,00125
<i>Length scale</i> (m) / <i>Radius</i> (m)	Radius 0,018	Radius 0,018
<i>Mesh Control 3</i> (m) 'Parte superior molde'	Length scale 0,005	Length scale 0,005
<i>Length scale</i> (m) / <i>Radius</i> (m)	Radius 0,06	Radius 0,06
<i>Inflated Boundary 1</i> (m) 'Parede largura'	0,008	0,008
<i>Inflated Boundary 2</i> (m) 'Parede espessura'	0,008	0,008
<i>Inflated Boundary 3</i> (m) 'Superfície livre'	0,008	0,008
<i>Inflated Boundary 4</i> (m) 'Modificador'	0,01	0,008

Nas Figuras de 5.7 a 5.9 encontram-se apresentados, para exemplificação, os resultados dos Refinamentos 1 e 2 aplicados aos modificadores A1, A9 e B, respectivamente.

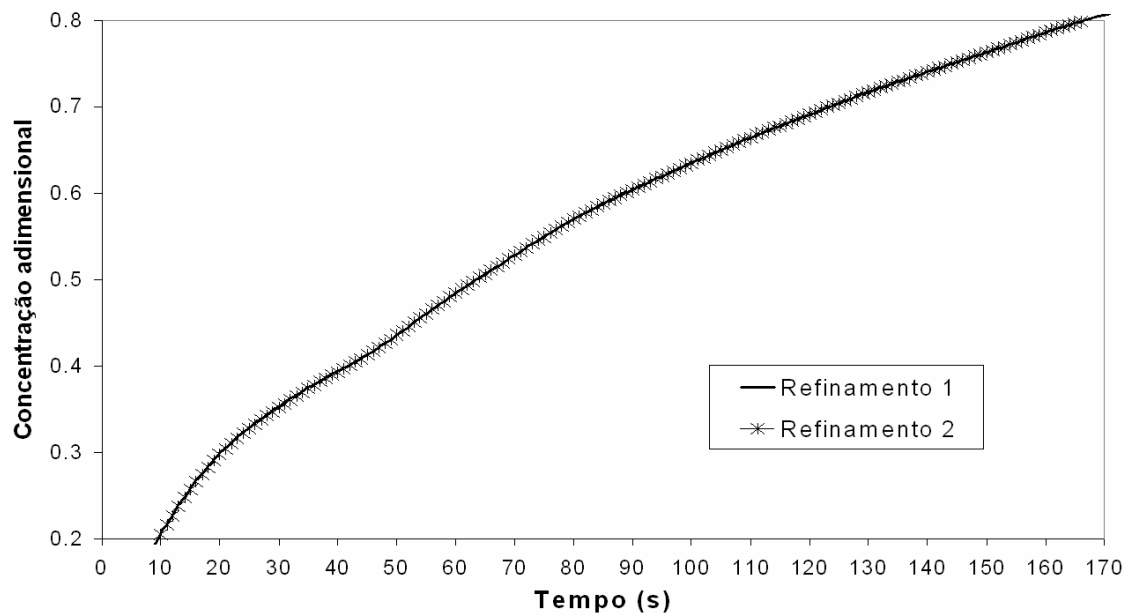


Figura 5.7: Comparação entre os refinamentos 1 e 2 utilizando o modificador A1.

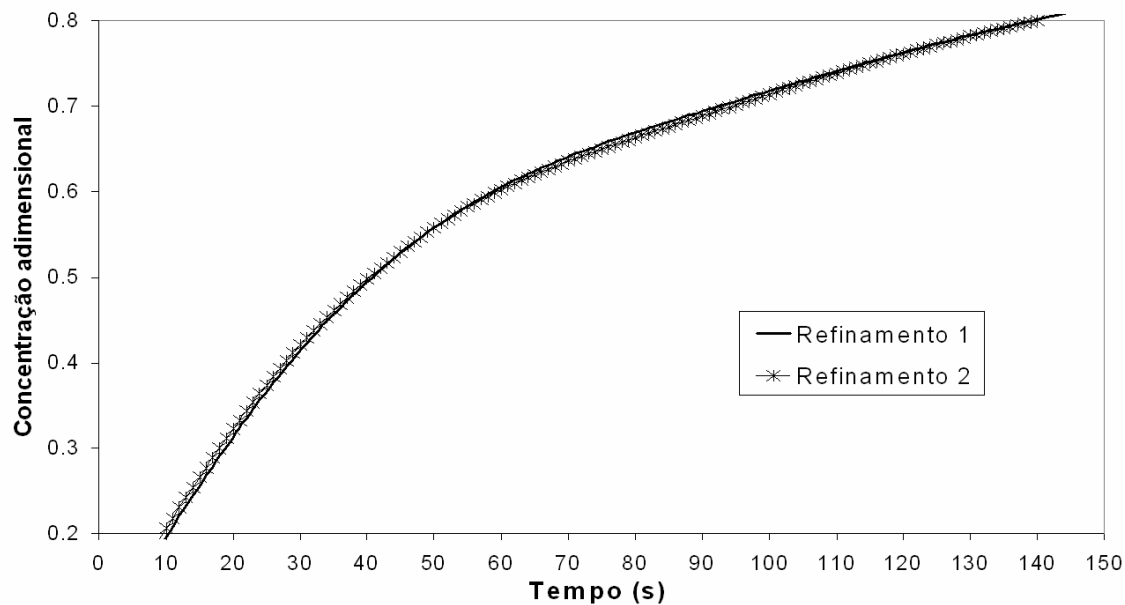


Figura 5.8: Comparação entre os refinamentos 1 e 2 utilizando o modificador A9.



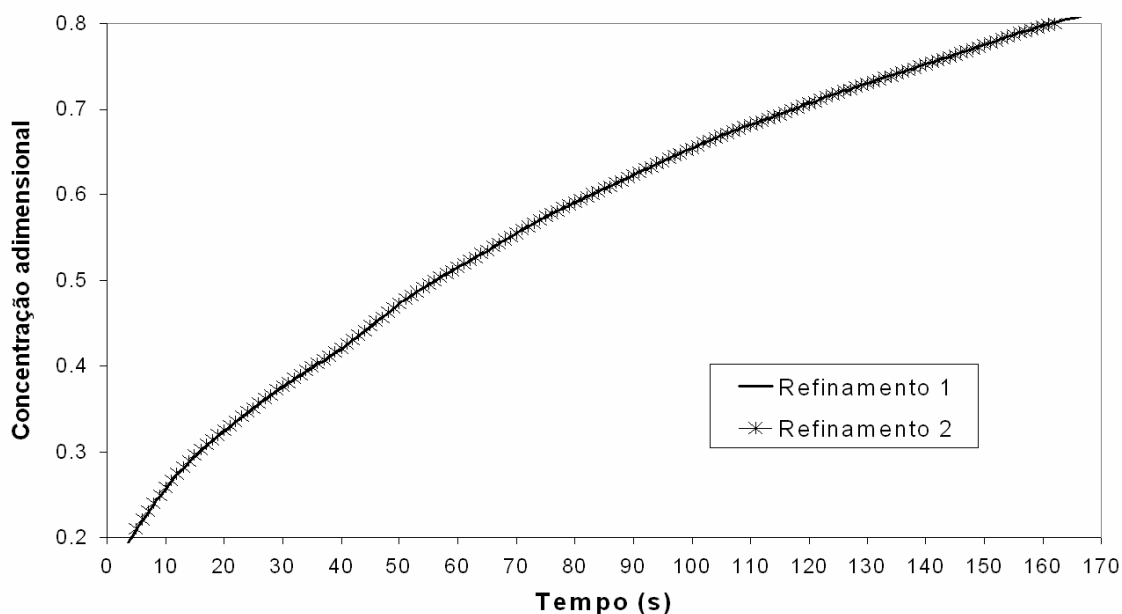


Figura 5.9: Comparação entre os refinamentos 1 e 2 utilizando o modificador B.

A partir da análise dos gráficos observa-se que o refinamento da malha na região do modificador de fluxo não alterou os resultados obtidos para os modificadores de fluxo testados. Sendo assim, foi utilizada a malha com menor número de elementos de volume de cada modificador testado para realização das simulações.

O próximo passo foi realizar as simulações matemáticas do escoamento no molde utilizando o esquema de interpolação *high resolution* para discretização da equação de conservação. Para simulação da turbulência foi utilizado então o modelo de turbulência do tipo  $k-\epsilon$ , nível de turbulência de 5% e saltos de tempo de 1s.

No caso do estado estacionário foi necessária a realização de testes com diferentes fatores de relaxação (*false time step*) devido à dificuldade apresentada por alguns casos contendo modificadores de fluxo em atingir a convergência. Sendo assim, os gráficos de RMS foram acompanhados até que a melhor situação de convergência para cada caso fosse obtida, considerando-se a estabilização das oscilações.

O modelamento matemático do estado transiente foi avaliado a partir do acompanhamento das curvas F obtidas para cada configuração, considerando-se como

critério de convergência a obtenção de um resíduo da equação de conservação igual a RMS  $10^{-6}$ .

Durante a realização das simulações matemáticas notou-se que, ao se aplicar um maior refinamento da malha nas regiões próximas às paredes, a convergência dos resultados se tornava melhor. Sendo assim, foi aplicado o *Inflated Boundary* na parede e na saída da válvula submersa, além da redução da malha próximo à espessura da parede, superfície livre, modificador de fluxo e parede e saída da válvula. A malha utilizada e os refinamentos aplicados encontram-se especificados na Tabela V.3

Tabela V.3: Especificação da malha utilizada para as simulações matemáticas.

<b>Parâmetro</b>	<b>Valor</b>
<i>Default Body Spacing</i> (m)	0,016
<i>Mesh Control 1</i> 'Saída válvula submersa bifurcada' <i>Length scale</i> (m) / <i>Radius</i> (m)	Length scale 0,001 Radius 0,02
<i>Mesh Control 2</i> (m) 'Válvula submersa bifurcada' <i>Length scale</i> (m) / <i>Radius</i> (m)	Length scale 0,00125 Radius 0,018
<i>Mesh Control 3</i> (m) 'Parte superior molde' <i>Length scale</i> (m) / <i>Radius</i> (m)	Length scale 0,005 Radius 0,06
<i>Inflated Boundary 1</i> (m) 'Parede largura'	0,008
<i>Inflated Boundary 2</i> (m) 'Parede espessura'	0,001
<i>Inflated Boundary 3</i> (m) 'Superfície livre'	0,001
<i>Inflated Boundary 4</i> (m) 'Modificador'	0,0005
<i>Inflated Boundary 5</i> (m) 'Parede válvula'	0,0005
<i>Inflated Boundary 6</i> (m) 'Saída válvula'	0,0005

Nas Figuras de 5.10 a 5.12 são apresentados os resíduos das equações de conservação de massa e de quantidade de movimento obtidos durante a simulação do estado estacionário, utilizando o esquema de discretização *high resolution*, para as configurações sem modificador e com os modificadores A7 e B, respectivamente. As três configurações escolhidas ilustram a convergência da maioria dos resíduos das equações de conservação a valores inferiores a RMS  $10^{-6}$ .

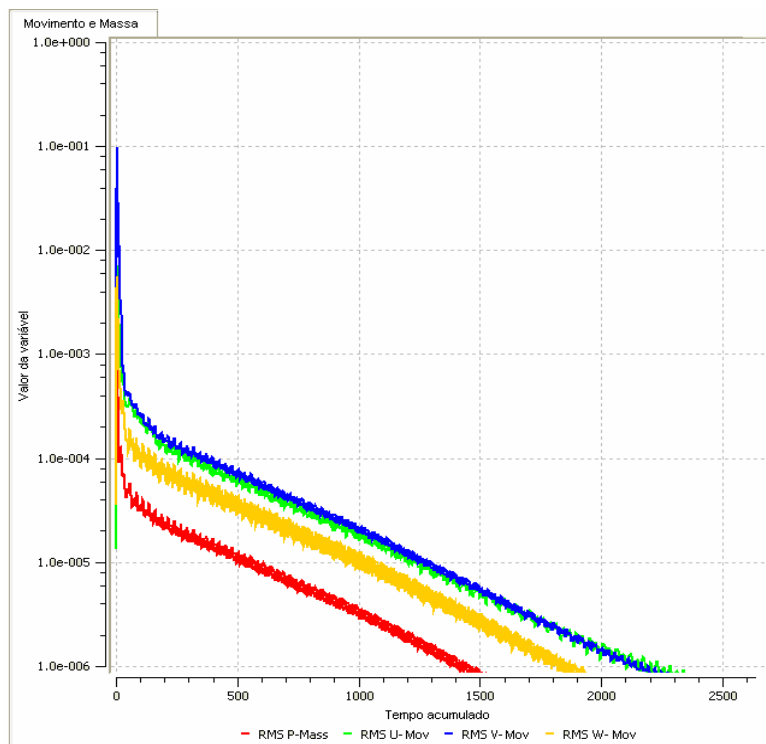


Figura 5.10: Resíduos das equações de conservação de massa e de quantidade de movimento da configuração sem modificador de fluxo.

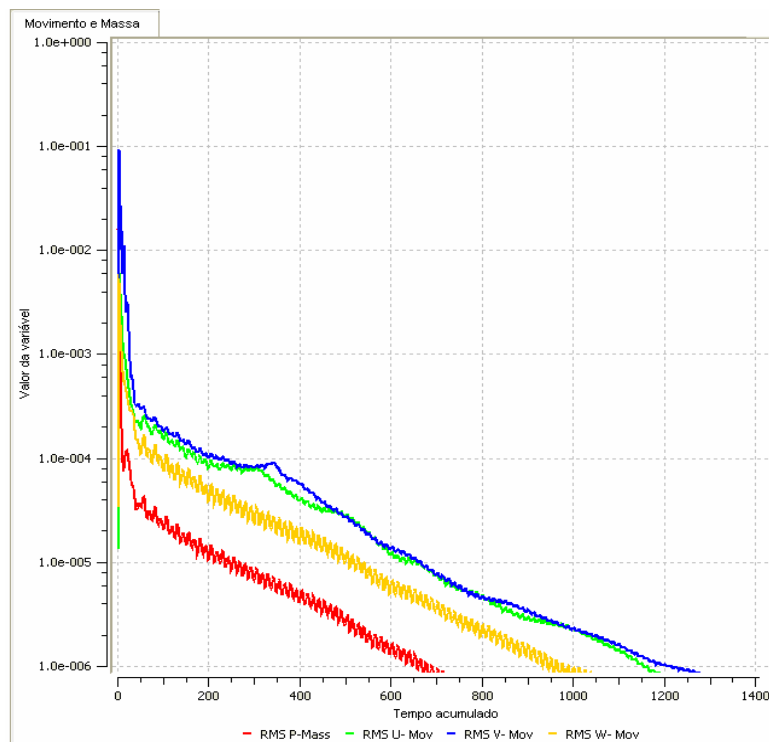


Figura 5.11: Resíduos das equações de conservação de massa e de quantidade de movimento da configuração com o modificador A7.

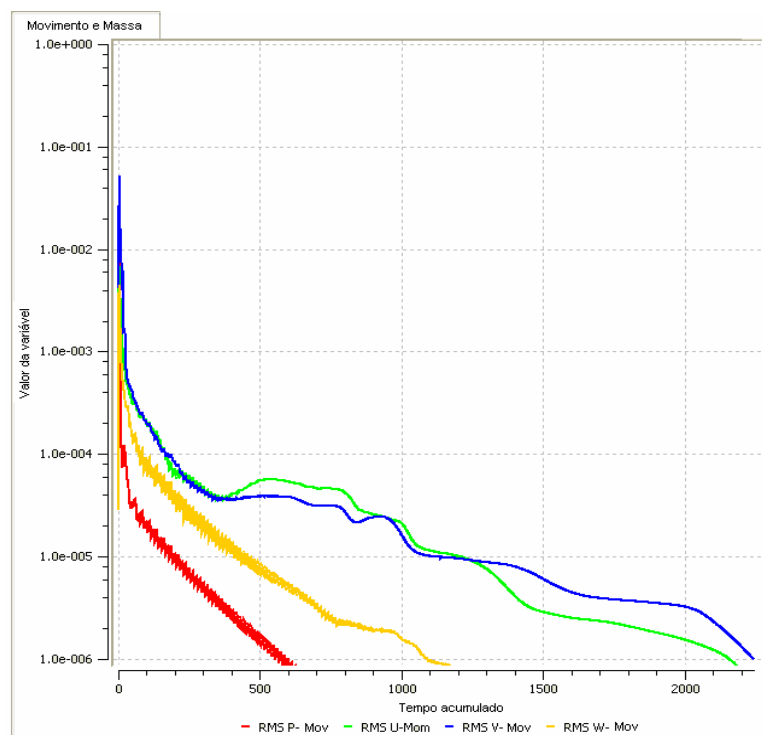


Figura 5.12: Resíduos das equações de conservação de massa e de quantidade de movimento da configuração com o modificador B.

Para finalização da etapa dos testes preliminares foi realizada a comparação dos esquemas de interpolação *upwind* e *high resolution* visando avaliar o efeito dos mesmos nos resultados obtidos. Nas Figuras de 5.13 a 5.15 são apresentadas as curvas F das configurações com os modificadores A4, A6 e B. Pela análise das figuras nota-se uma diferença entre os resultados obtidos pelos dois esquemas.

Para justificar a escolha de utilização do esquema *high resolution* para as simulações, vale lembrar que cada volume de controle envolve um ponto nodal, conforme apresentado na Figura 5.16. Para discretização das equações de conservação é necessário estimar o valor das variáveis dependentes nas interfaces dos volumes de controle. O esquema de discretização *upwind* assume, no termo de convecção, que o valor da variável dependente na interface do volume de controle é o valor do ponto nodal anterior (definido em função do sentido de escoamento) e o esquema *high resolution* faz uma interpolação usando valores nos pontos nodais adjacentes. Por isto o esquema *high resolution* é considerado mais acurado quando comparado ao *upwind* e foi escolhido para realização das simulações, apesar do esquema *upwind* ser mais

robusto e mais rápido. Se os resultados fossem próximos, seria mais interessante usar o esquema *upwind*.

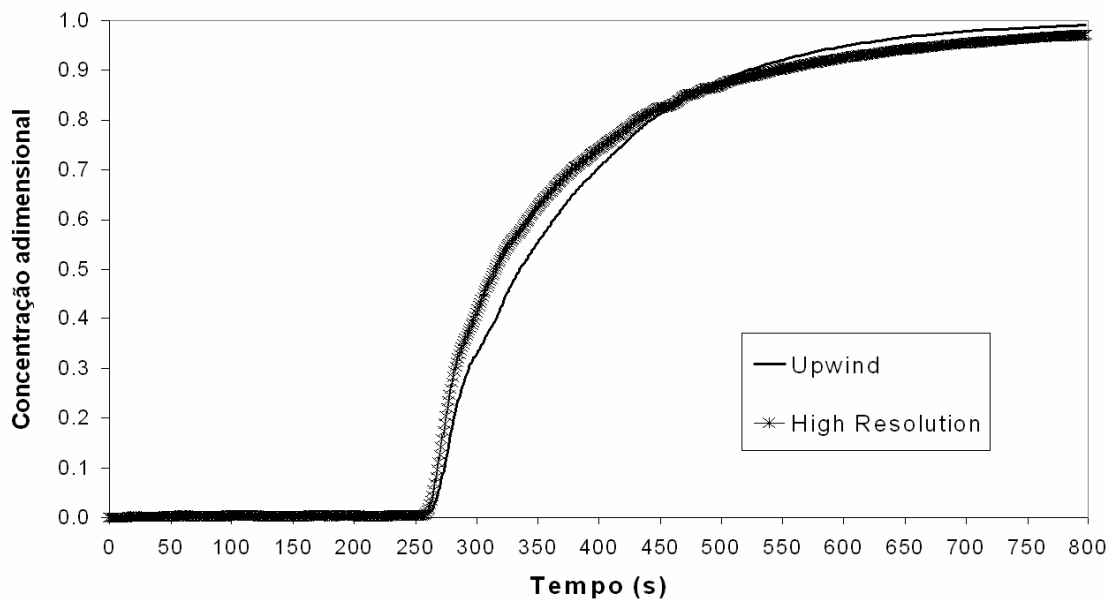


Figura 5.13: Comparação entre os esquemas de interpolação *upwind* e *high resolution* para a configuração com o modificador de fluxo A4.

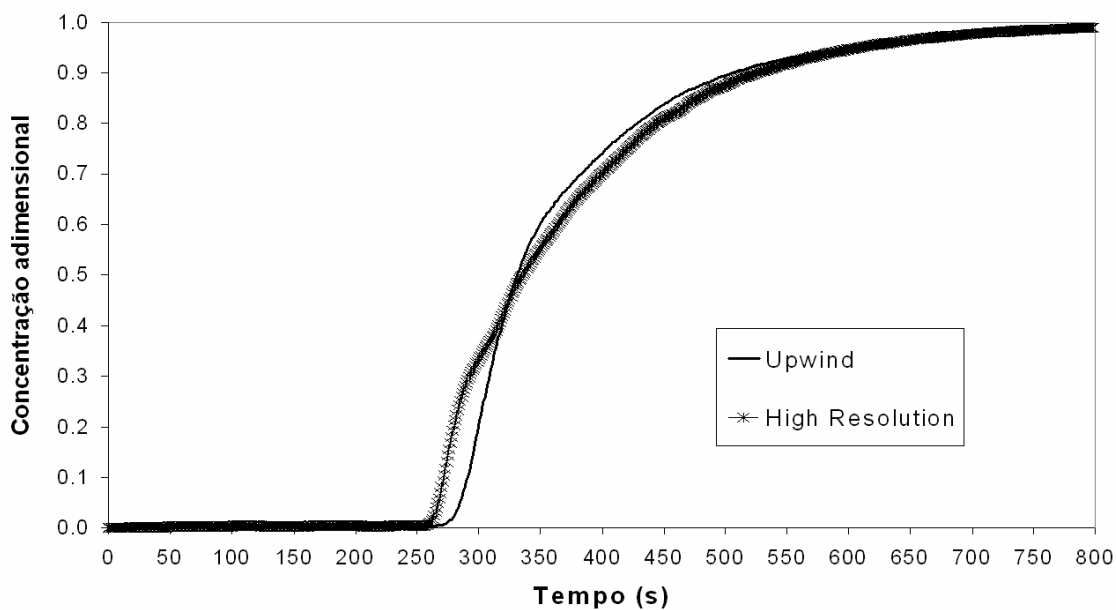


Figura 5.14: Comparação entre os esquemas de interpolação *upwind* e *high resolution* para a configuração com o modificador de fluxo A6.

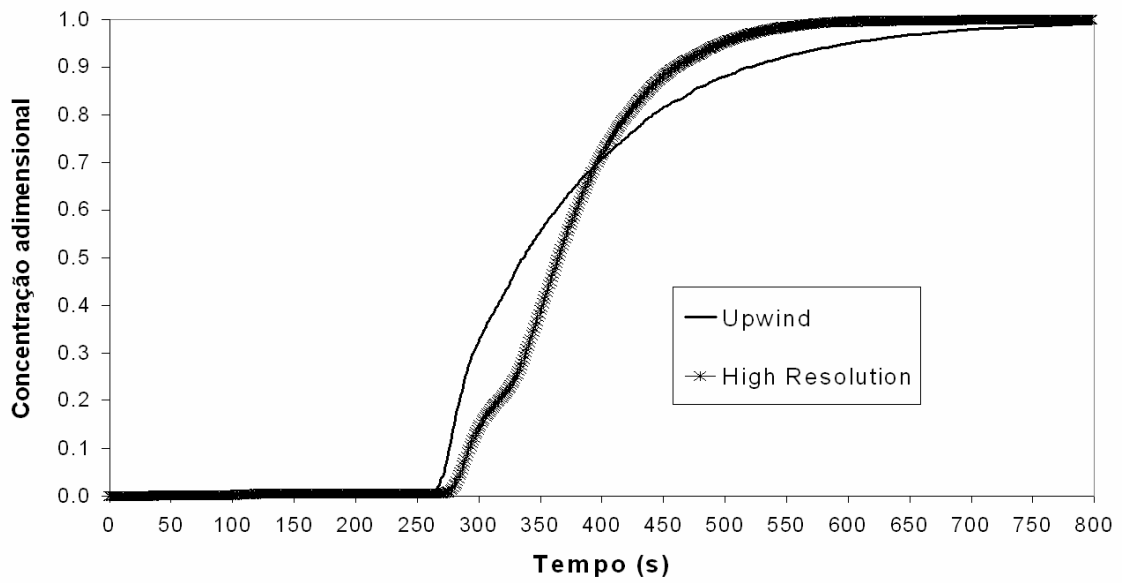


Figura 5.15: Comparação entre os esquemas de interpolação *upwind* e *high resolution* para a configuração com o modificador de fluxo B.

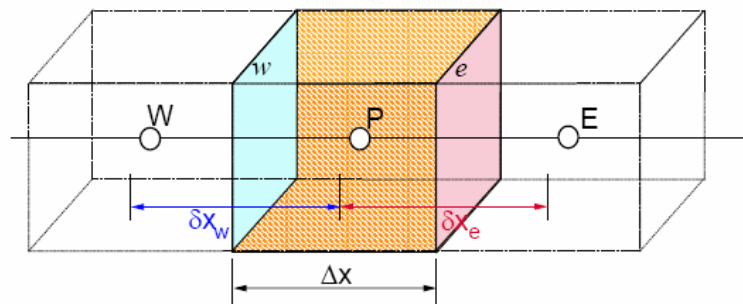


Figura 5.16: Ilustração de três volumes de controle com três pontos nodais (W, P e E) e duas interfaces (*w* e *e*).

## **5.2 – Efeitos dos Modificadores de Fluxo no Molde**

Para avaliação dos efeitos dos modificadores de fluxo no escoamento do molde optou-se pela apresentação, conforme itens a seguir, dos perfis de velocidade, do comprimento da placa de mistura obtida para cada configuração e dos níveis de turbulência observados na superfície livre do molde.

### **5.2.1 – Perfis de velocidade**

As Figuras 5.17 e 5.18 mostram os vetores de velocidade na região do molde para as configurações sem modificador e com o modificador A1, e com os modificadores A9 e B, respectivamente. Através da visualização de como o fluido escoava dentro do molde pode-se realizar uma avaliação do efeito dos modificadores de fluxo na redução da placa de mistura. Para uma melhor análise do fluxo que entra pela válvula submersa, as Figuras 5.19 a 5.22 apresentam os vetores de velocidade somente na região superior do molde para as mesmas configurações citadas acima.

Os modificadores de fluxo provocam alterações significativas no padrão de escoamento do fluido no interior do molde, particularmente na região superior do molde. Estas alterações afetam a curva de transição durante o lingotamento seqüencial de aços com diferentes qualidades. Com a utilização dos modificadores de fluxo a zona de recirculação inferior torna-se menos intensa, o que favorece a minimização da mistura das diferentes qualidades de aço.

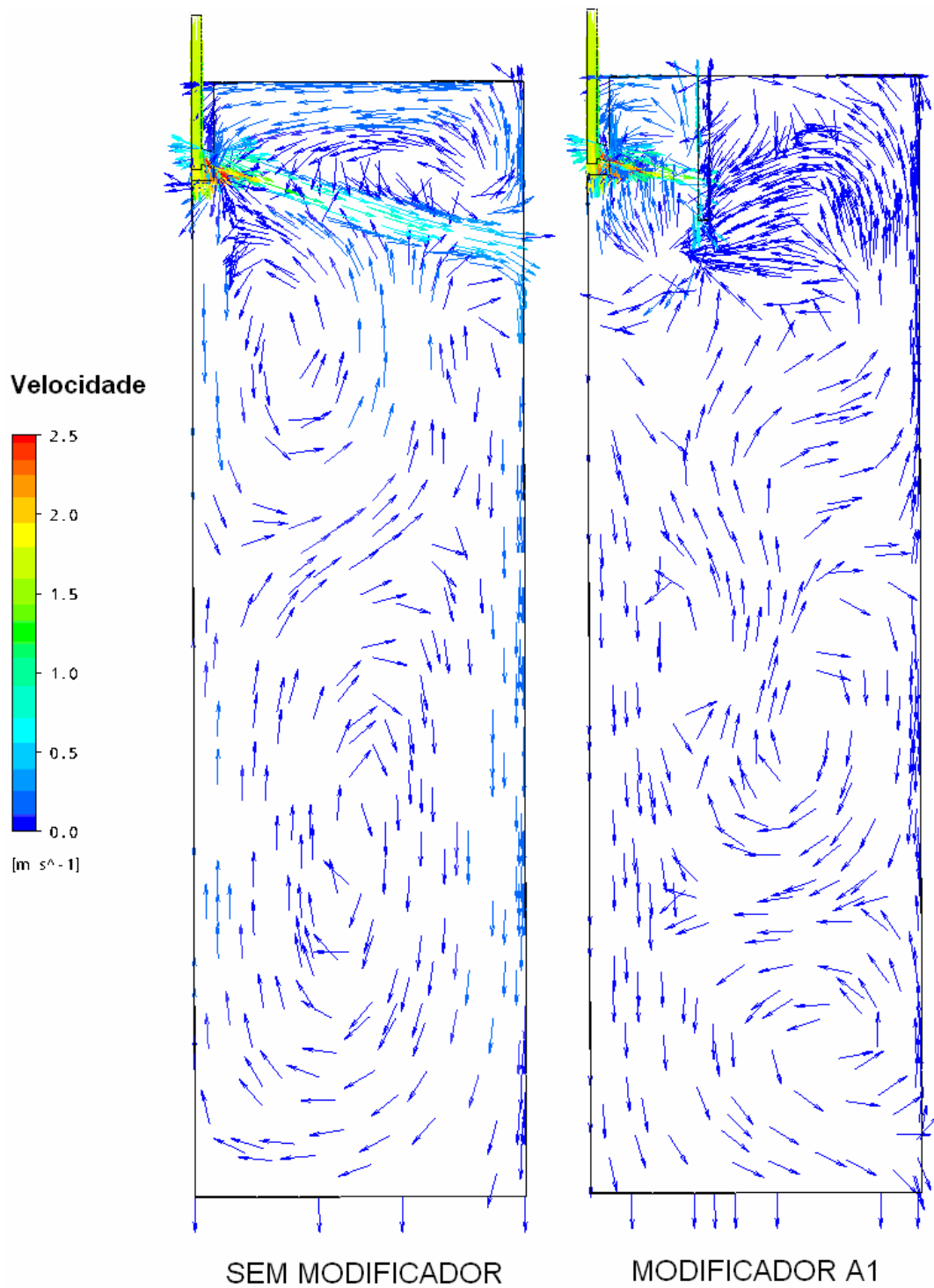


Figura 5.17: Perfis de velocidade no molde das configurações sem modificador e com modificador de fluxo A1.



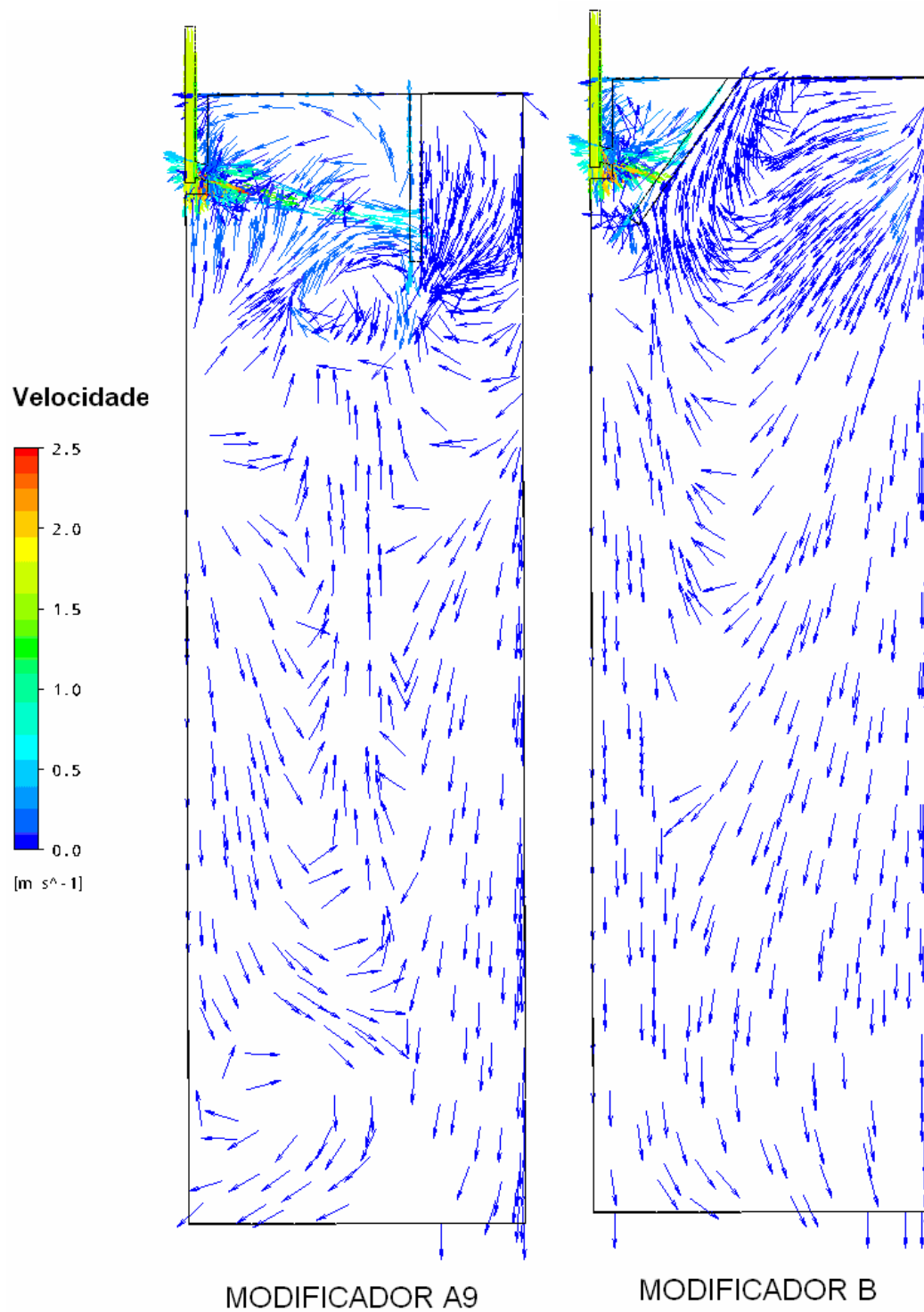


Figura 5.18: Perfis de velocidade no molde das configurações com os modificadores de fluxo A9 e B.

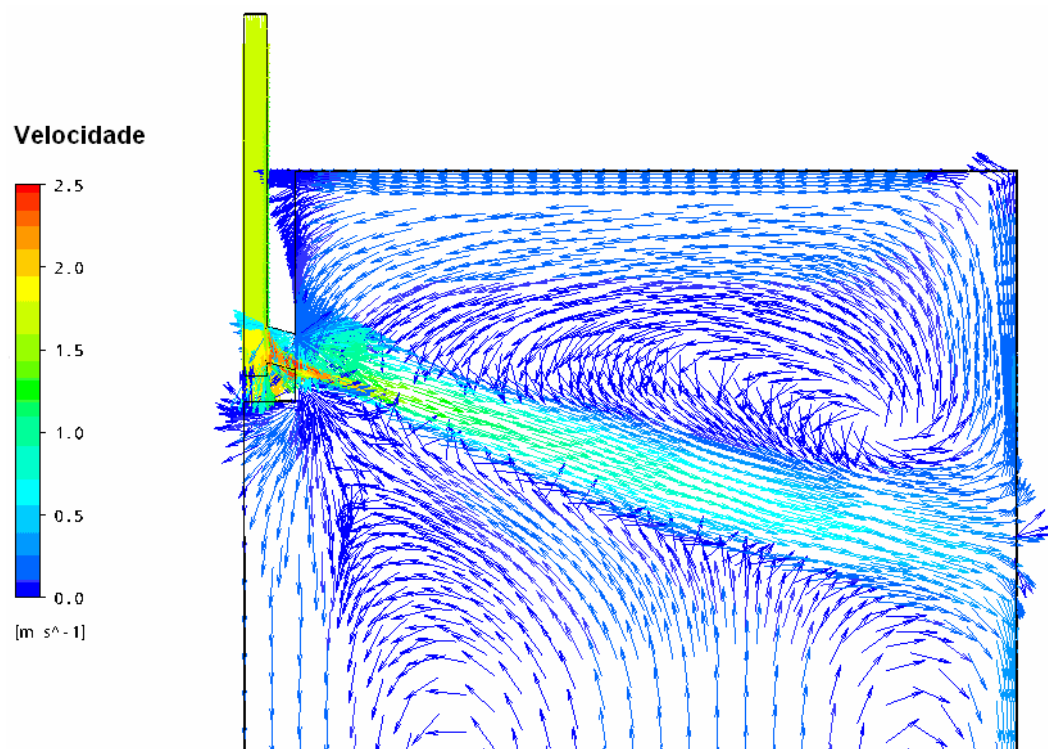


Figura 5.19: Perfil de velocidade, na região superior do molde, da configuração sem modificador de fluxo.

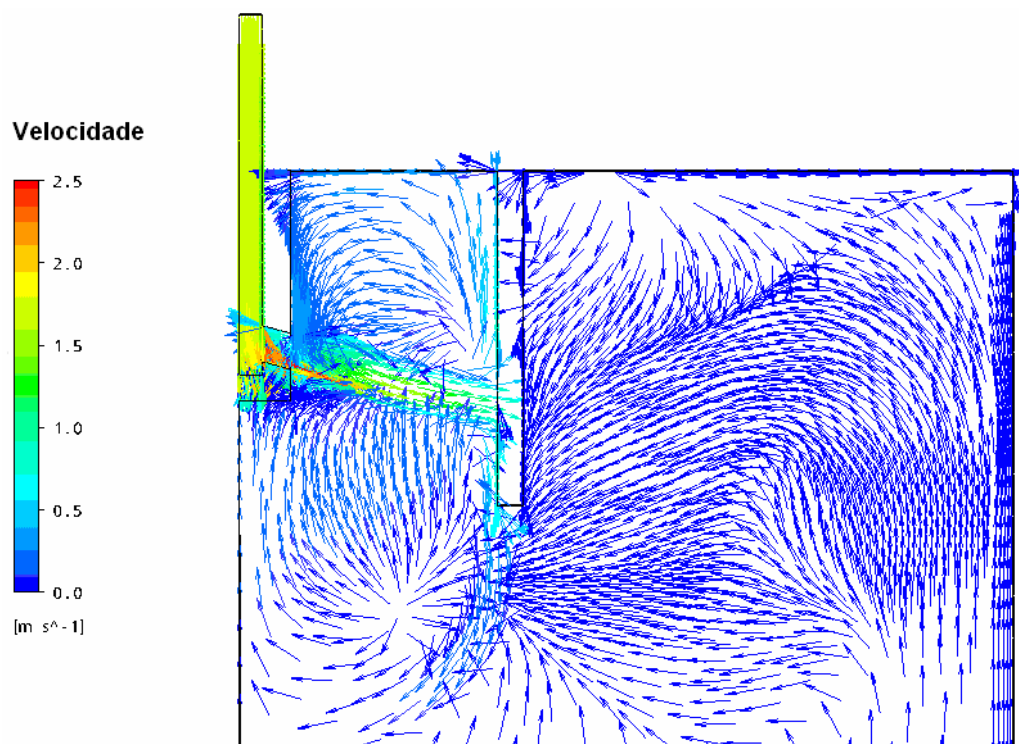


Figura 5.20: Perfil de velocidade, na região superior do molde, da configuração com o modificador de fluxo A1.

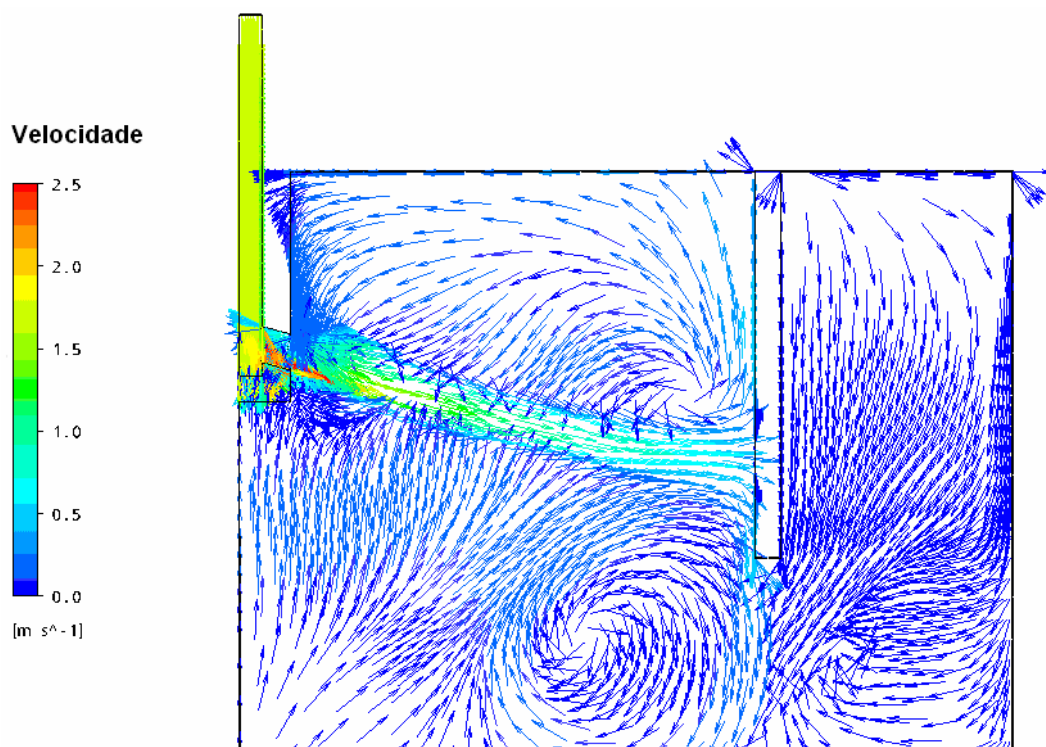


Figura 5.21: Perfil de velocidade, na região superior do molde, da configuração com o modificador de fluxo A9.

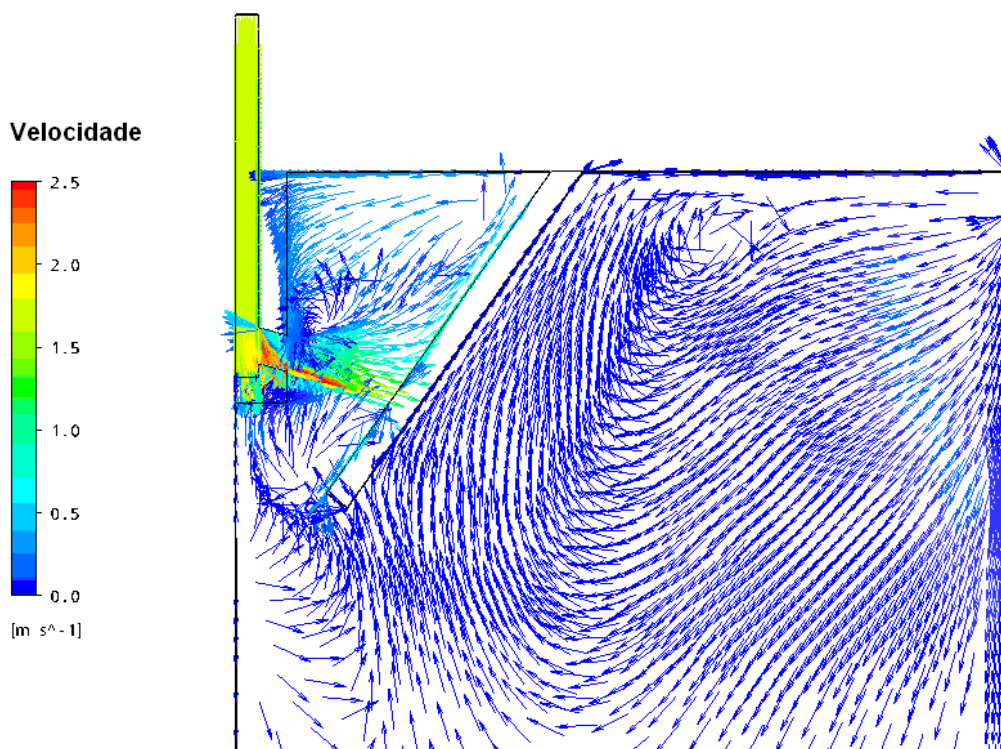


Figura 5.22: Perfil de velocidade, na região superior do molde, da configuração com o modificador de fluxo B.

Porém, como o fluxo que sai da válvula submersa incide diretamente sobre os modificadores, criando uma região de recirculação na parte superior do molde entre a válvula e o modificador, torna-se interessante a análise do fluxo que ocorre em algum plano abaixo da superfície livre. Para tal, foi criado um plano 0,05m abaixo da superfície livre para verificação dos perfis de velocidade, conforme apresentados nas Figuras 5.23 e 5.24.

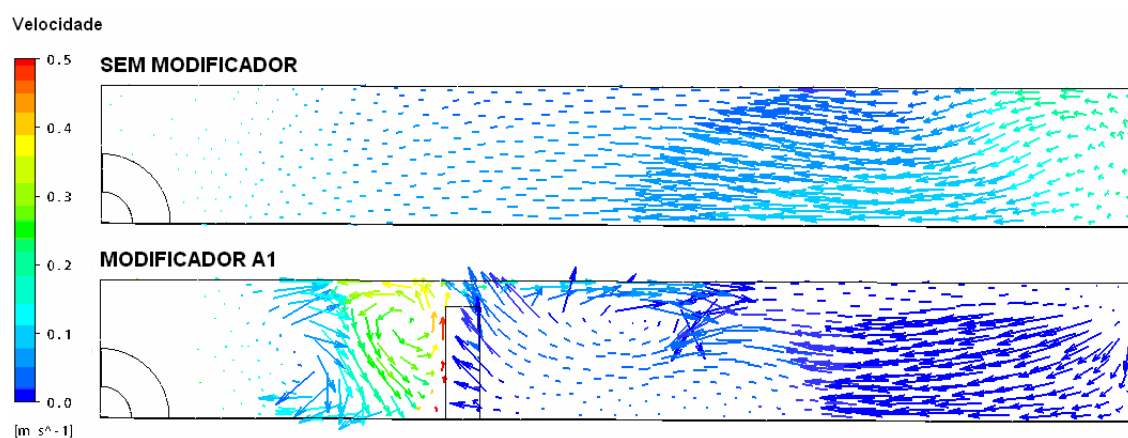


Figura 5.23: Perfis de velocidade no plano 5cm abaixo da superfície livre, das configurações sem modificador e com o modificador de fluxo A1.

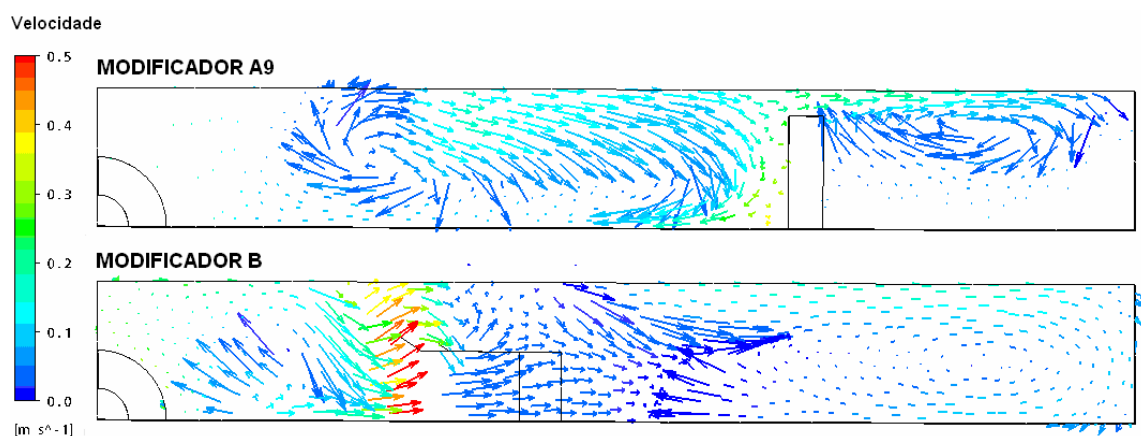


Figura 5.24: Perfis de velocidade no plano 5cm abaixo da superfície livre, das configurações com os modificadores de fluxo A9 e B.

Como pode-se notar, o fluido que incide sobre o modificador de fluxo é direcionado para a região livre entre o modificador e a parede do molde. Este é um ponto importante que deve ser estudado com mais detalhes, pois a passagem do fluido nesta região pode afetar o processo de solidificação da fina pele de aço junto a parede, podendo ocasionar defeitos superficiais ou até mesmo a ruptura do produto sendo lingotado.

### 5.2.2 – Comprimento da placa de mistura

A partir das curvas de transição de qualidades obtidas pelo modelamento matemático para as diferentes configurações, pôde-se realizar o cálculo do comprimento da placa de mistura. As Figuras 5.25 a 5.28 apresentam as curvas de transição obtidas para as configurações sem modificador e com os modificadores A1 a A9 e B.

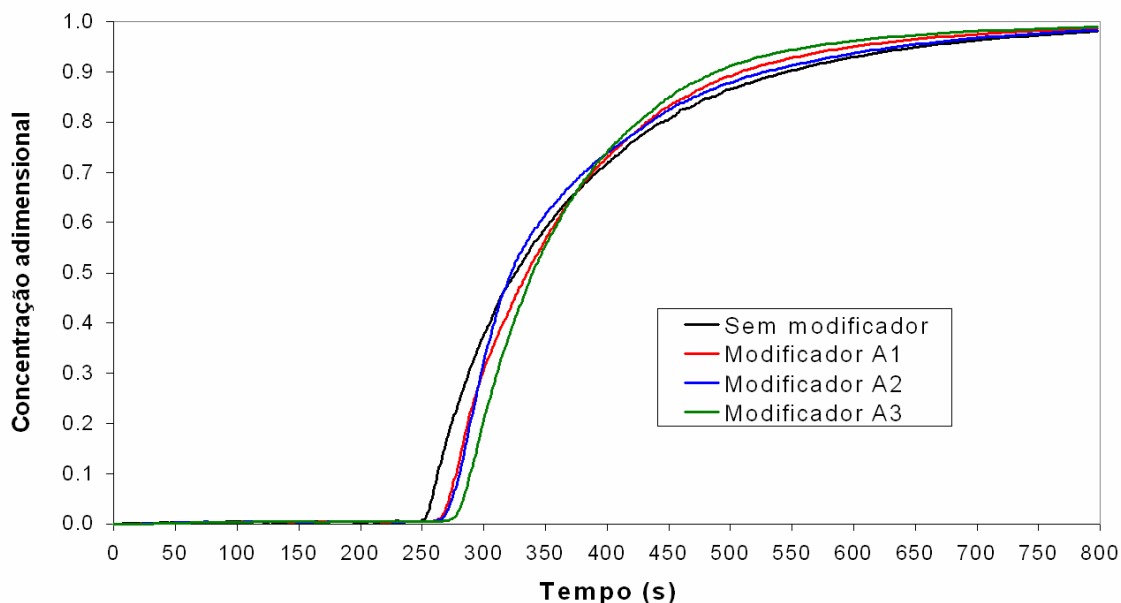


Figura 5.25: Curvas de transição das configurações sem o modificador e com os modificadores A1, A2 e A3, obtidas pelo modelamento matemático.

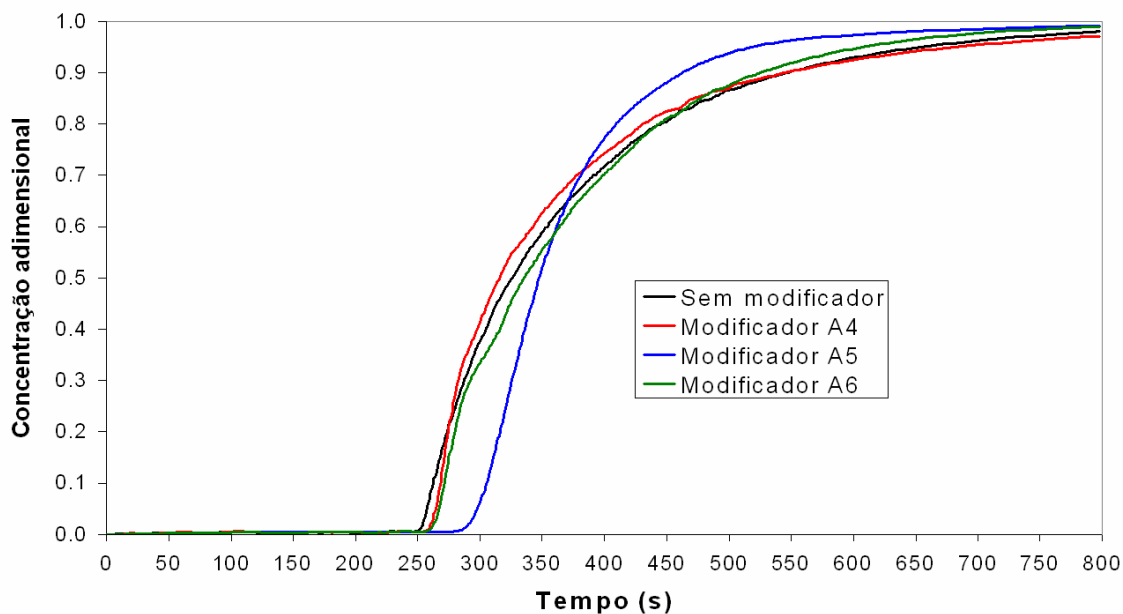


Figura 5.26: Curvas de transição das configurações sem o modificador e com os modificadores A4, A5 e A6, obtidas pelo modelamento matemático.

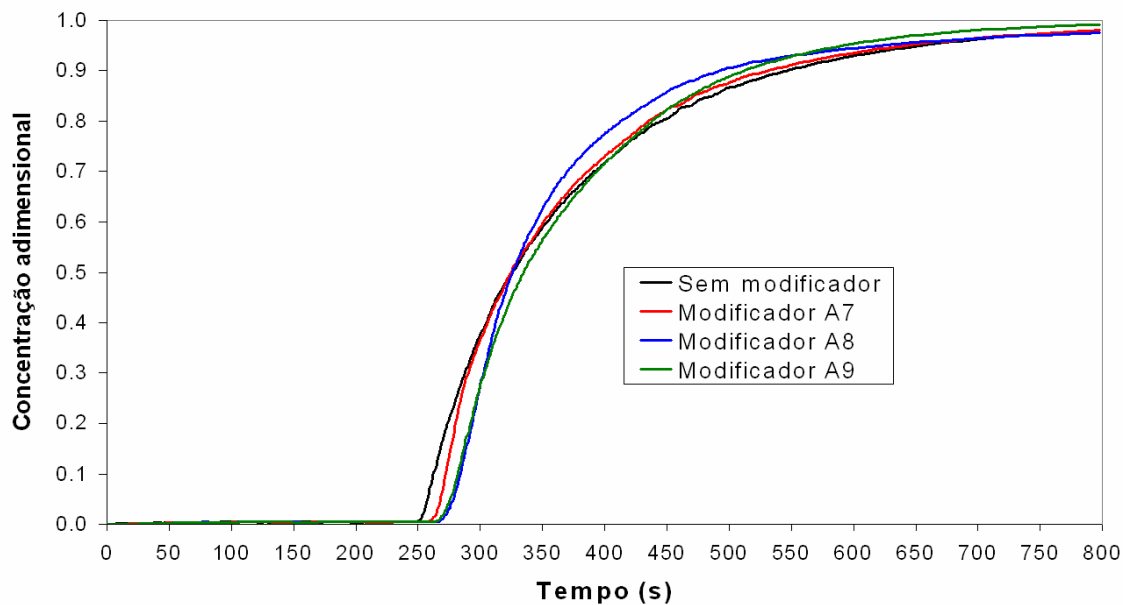


Figura 5.27: Curvas de transição das configurações sem o modificador e com os modificadores A7, A8 e A9, obtidas pelo modelamento matemático.

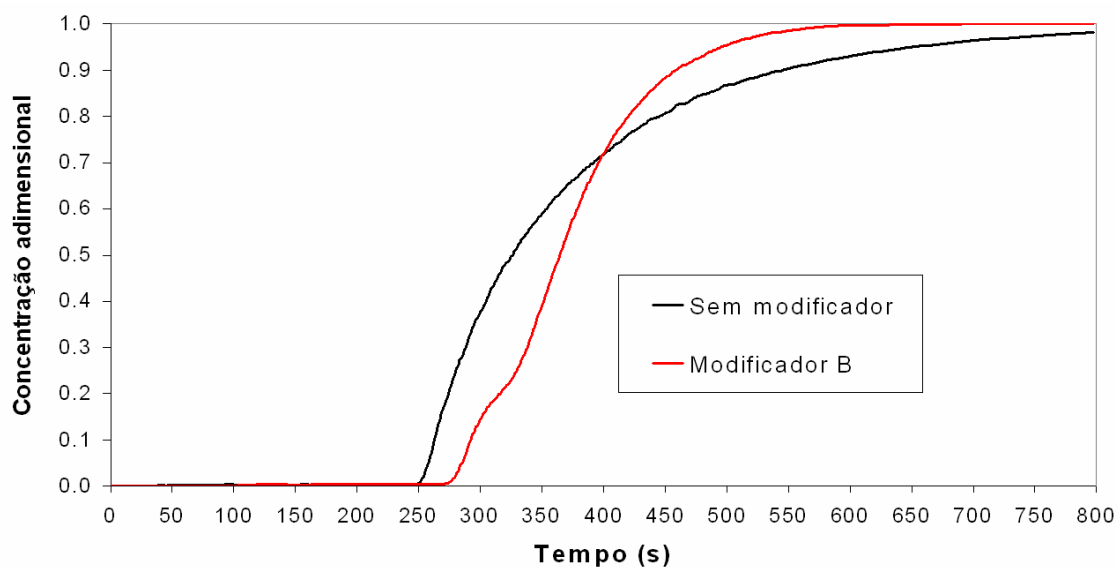


Figura 5.28: Curvas de transição das configurações sem o modificador e com o modificador B, obtidas pelo modelamento matemático.

A partir das curvas de transição obtidas pelo modelamento matemático foram calculados os tempos de transição e os comprimentos da placa de mistura para as diferentes configurações testadas. Os resultados são apresentados na Tabela V.4.

Tabela V.4: Tempos de transição e comprimento da placa de mistura obtidos pelo modelamento matemático.

Configuração	Tempo de Transição (s)	Comprimento da Placa de Mistura (m)
Sem modificador	176	4,58
Modificador A1	148	3,85
Modificador A2	149	3,88 <sup>(*)</sup>
Modificador A3	129	3,36
Modificador A4	159	4,14
Modificador A5	107	2,79 <sup>(*)</sup>
Modificador A6	157	4,09
Modificador A7	158	4,11
Modificador A8	123	3,20 <sup>(*)</sup>
Modificador A9	149	3,88
Modificador B	107	2,79

(\*) A convergência dos resíduos a valores menores do que  $\text{RMS } 10^{-5}$  não foi alcançada.

Em todos os casos, a utilização de modificadores de fluxo na parte superior do molde provocou uma redução do tempo de transição entre diferentes qualidades de aço levando, conseqüentemente, a reduções no comprimento da placa de mistura. No entanto, a obtenção de resíduos acima de  $10^{-6}$ , conforme especificado nos casos A2, A5 e A8, pode gerar dados menos confiáveis, sendo necessária a avaliação mais detalhada da malha utilizada. Cabe ressaltar que o modificador B apresentou o melhor resultado, representando uma redução de aproximadamente 40% do comprimento da placa de mistura.

As Figuras 5.29 a 5.32 mostram a evolução da concentração do traçador nos tempos de 50s, 100s, 150s e 200s após a injeção do mesmo no molde, para as configurações sem modificador e com os modificadores de fluxo A3 e B.

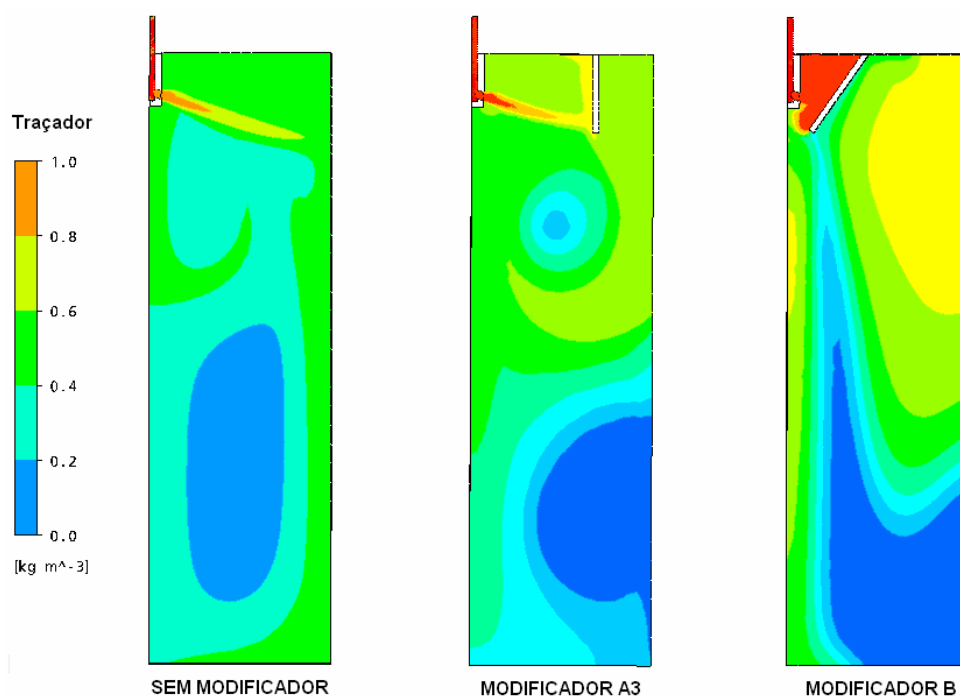


Figura 5.29: Evolução da concentração do traçador no tempo de 50s para as configurações sem modificador e com os modificadores de fluxo A3 e B, no plano de simetria.



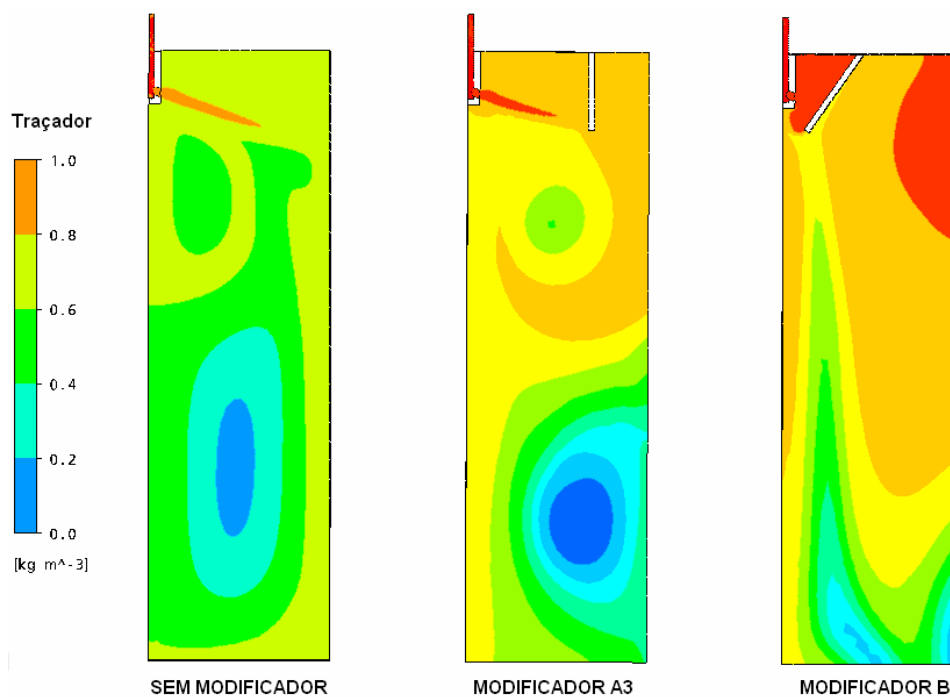


Figura 5.30: Evolução da concentração do traçador no tempo de 100s para as configurações sem modificador e com os modificadores de fluxo A3 e B, no plano de simetria.

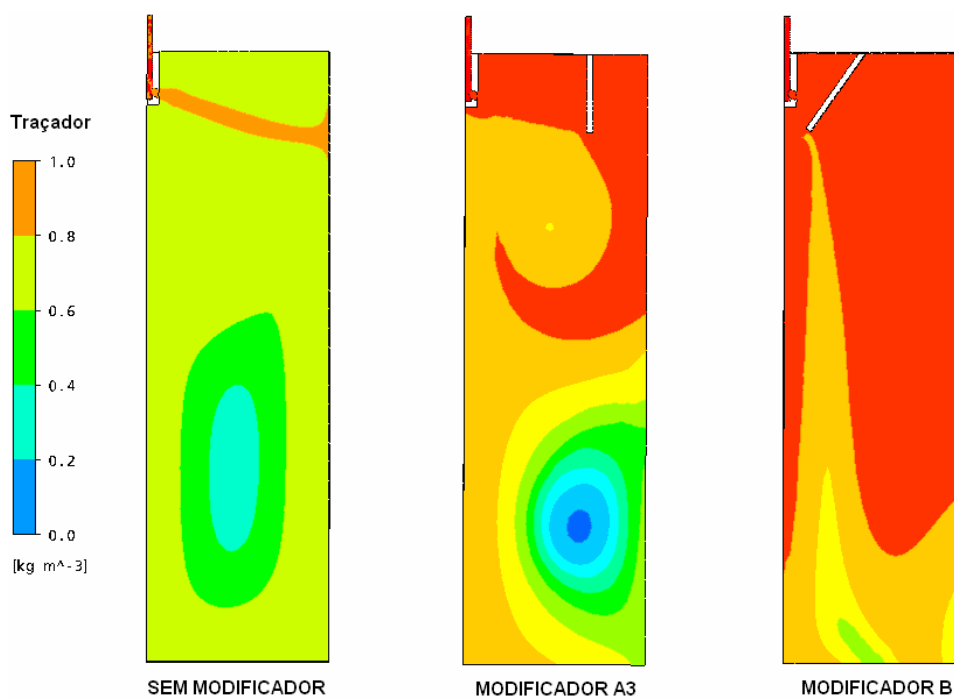


Figura 5.31: Evolução da concentração do traçador no tempo de 150s para as configurações sem modificador e com os modificadores de fluxo A3 e B, no plano de simetria.

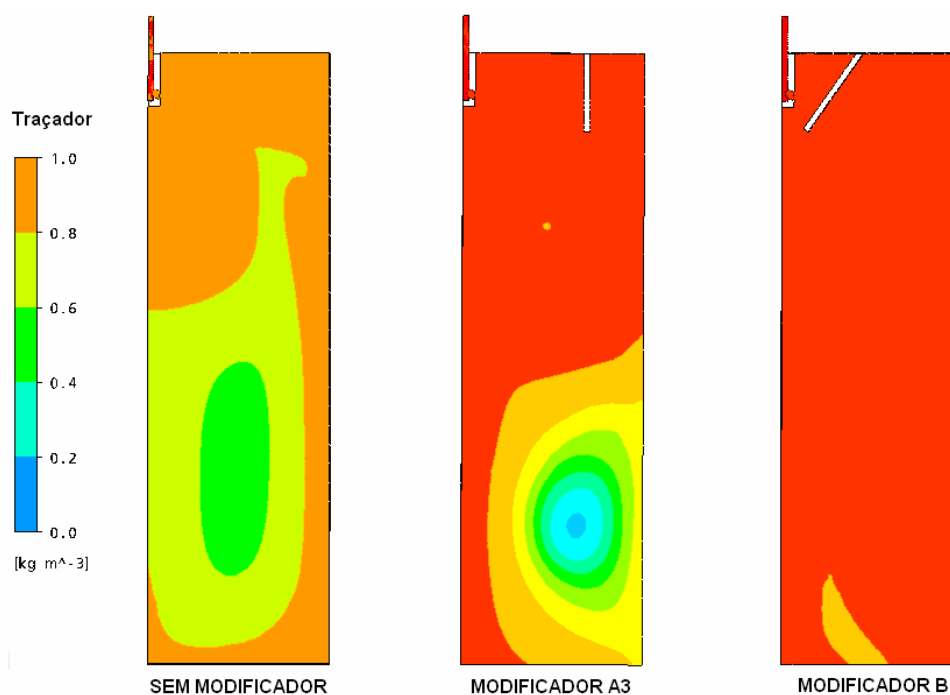


Figura 5.32: Evolução da concentração do traçador no tempo de 200s para as configurações sem modificador e com os modificadores de fluxo A3 e B, no plano de simetria.

A concentração do traçador dispersa mais rapidamente na configuração com o modificador B. Nos casos sem modificador e com o modificador A3 ocorre a formação de uma região de recirculação na parte inferior do molde bem definida. Porém, no caso do modificador A3, apesar desta região ser menor, observa-se ainda a presença de concentrações baixas de traçador. Durante a análise da evolução da dispersão destas concentrações é importante a observação destas regiões críticas pois as mesmas podem atrasar a transição de qualidades. Já no caso com o modificador B nota-se que não há formação de regiões de recirculação, favorecendo a rápida homogeneização do fluido e uma conseqüente redução do comprimento da placa de mistura.

### 5.2.3 – *Nível de turbulência na superfície livre*

A estimativa do nível de turbulência em cada região do sistema é obtida através dos valores da energia cinética de turbulência, importante parâmetro para o estudo do

comportamento do fluido, quando se quer investigar as flutuações de nível na superfície livre e a possível captura de pó fluxante.

As Figuras 5.33 a 5.36 mostram os perfis de distribuição da energia cinética de turbulência para as diferentes configurações utilizadas no estudo.

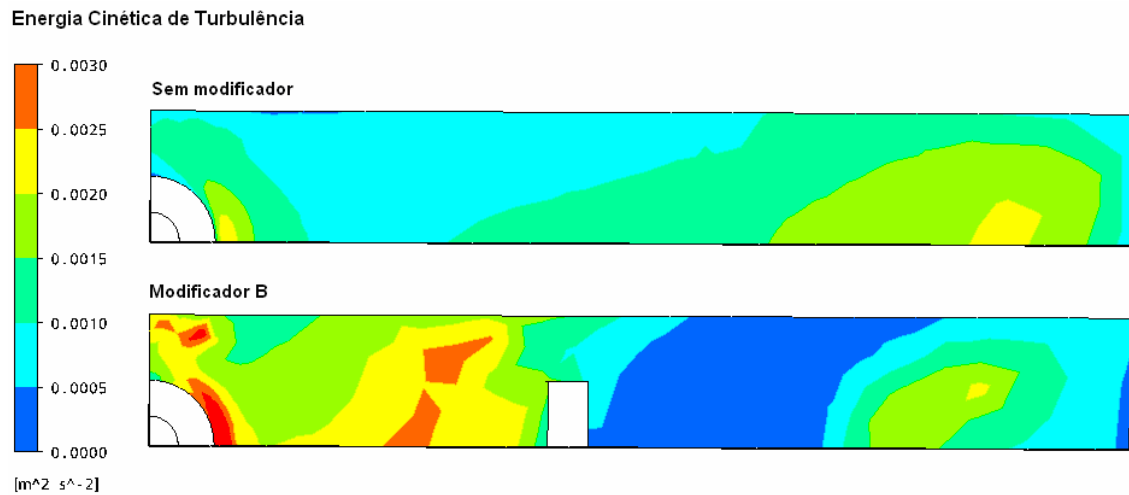


Figura 5.33: Energia cinética de turbulência na superfície livre das configurações sem modificador e com o modificador de fluxo B.

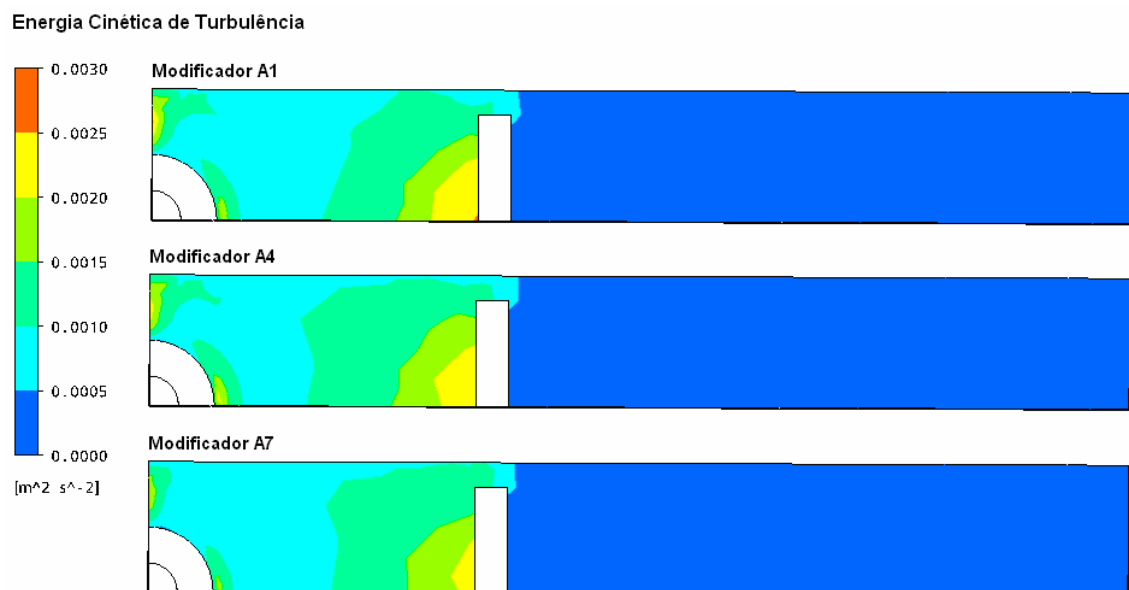


Figura 5.34: Energia cinética de turbulência na superfície livre das configurações com os modificadores de fluxo A1, A4 e A7.

## Energia Cinética de Turbulência

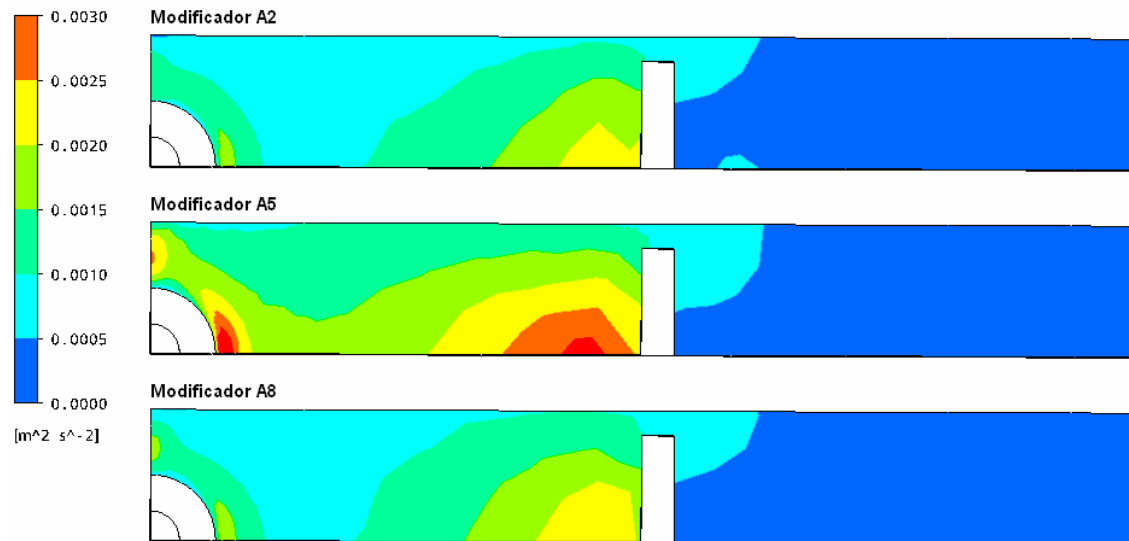


Figura 5.35: Energia cinética de turbulência na superfície livre das configurações com os modificadores de fluxo A2, A5 e A8.

## Energia Cinética de Turbulência

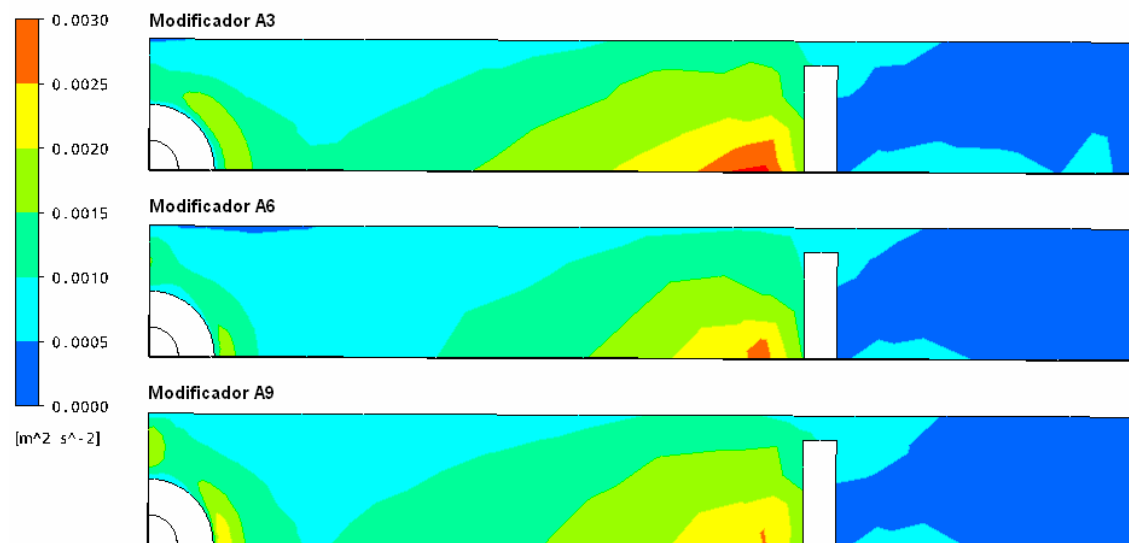


Figura 5.36: Energia cinética de turbulência na superfície livre das configurações com os modificadores de fluxo A3, A6 e A9.

Em todos os casos com modificadores, observa-se duas regiões de níveis de turbulência mais altos, uma junto à parede do modificador, na superfície voltada para o centro do molde, e outra próxima à válvula submersa.

Os valores da energia cinética de turbulência com o uso dos modificadores são ligeiramente mais elevados que os obtidos sem o uso dos modificadores, particularmente na região entre a válvula e o modificador. Huang e Thomas (1996b) propôs uma equação para estimar as oscilações de nível do aço no molde em decorrência da turbulência (Equação 5.1).

$$\rho_l \times k = 0,5 \times (\rho_l - \rho_f) \times g \times h \quad (5.1)$$

Onde:

$\rho_l$  = densidade do aço, considerada 7.000kg/m<sup>3</sup>;

$\rho_f$  = densidade do pó fluxante, considerada 2.500kg/m<sup>3</sup>;

$h$  = nível médio das oscilações (m);

$k$  = energia cinética de turbulência (m<sup>2</sup>/s<sup>2</sup>);

$g$  = aceleração da gravidade (m/s<sup>2</sup>).

Para estimar o valor de  $h$  foi utilizada a energia cinética de turbulência de 0,003 m<sup>2</sup>/s<sup>2</sup>, valor superior apresentado nas Figuras 5.33 a 5.36. Foi obtido então um valor máximo do nível alcançado pelas oscilações na superfície livre de aproximadamente 1mm. Este valor é pequeno, representando cerca de 0,09% do comprimento do modelo físico do molde de 1,12m.

Nas Figuras 5.34 a 5.36 é observada uma região estagnada à direita dos modificadores de fluxo. Esta situação é indesejável para o processo de fabricação do aço pois pode gerar o congelamento do menisco, que provoca problemas de qualidade superficial. Por isto é interessante a avaliação de modificadores de fluxo com larguras menores, que proporcionem uma maior passagem de fluido pela área livre entre o modificador e a parede do molde. Outro ponto a ressaltar é que, quanto maior a distância dos modificadores de fluxo da válvula submersa, maior são os valores de energia cinética de turbulência, reduzindo a região estagnada.

Ao realizar a análise das Figuras 5.34 e 5.36 nota-se que quanto maior a profundidade do modificador de fluxo, mantendo a mesma distância da válvula submersa, menores

são os valores de energia cinética de turbulência. Quando a análise é realizada na Figura 5.35 nota-se que os modificadores A5 e A8 apresentam um perfil que não está de acordo com o que foi explanado acima. Isto pode ser explicado por estas configurações terem apresentado um resíduo das equações diferenciais do  $k$  e do  $\epsilon$  elevados, não se conseguindo atender o critério de convergência especificado.

### 5.3 – Validação do Modelo Matemático

As Figuras 5.37 a 5.41 exemplificam a comparação entre os resultados obtidos pelos modelamentos físico e matemático utilizando os esquemas de interpolação *upwind* e *high resolution*, para as configurações sem modificador e com os modificadores de fluxo A1, A7, A9 e B, respectivamente.

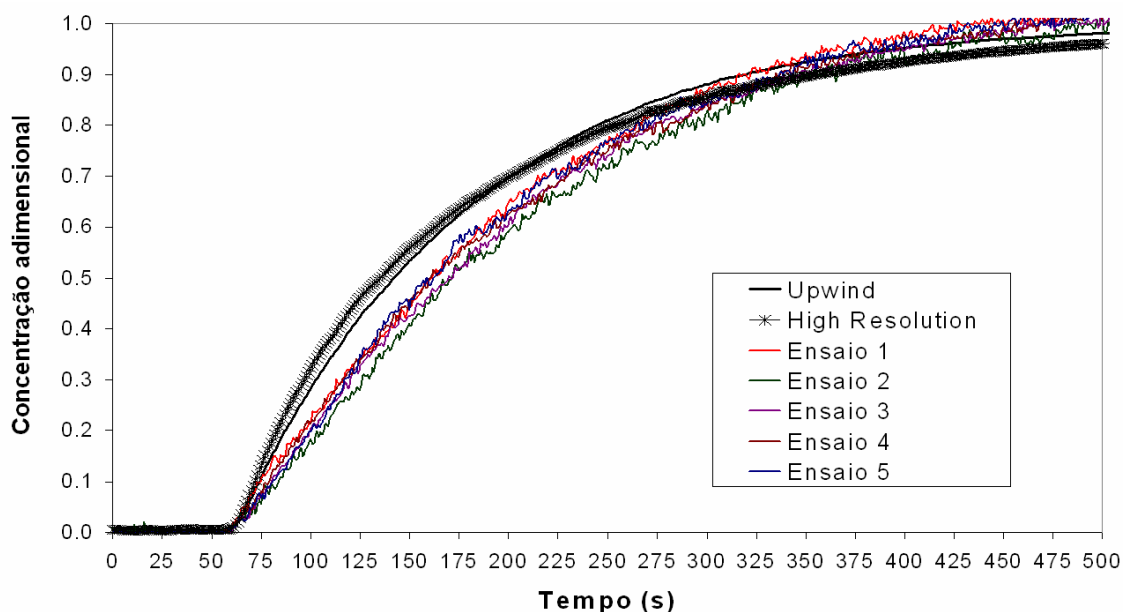


Figura 5.37: Comparação entre os resultados obtidos pelos modelamentos matemáticos e os dados experimentais para a configuração sem modificador de fluxo.

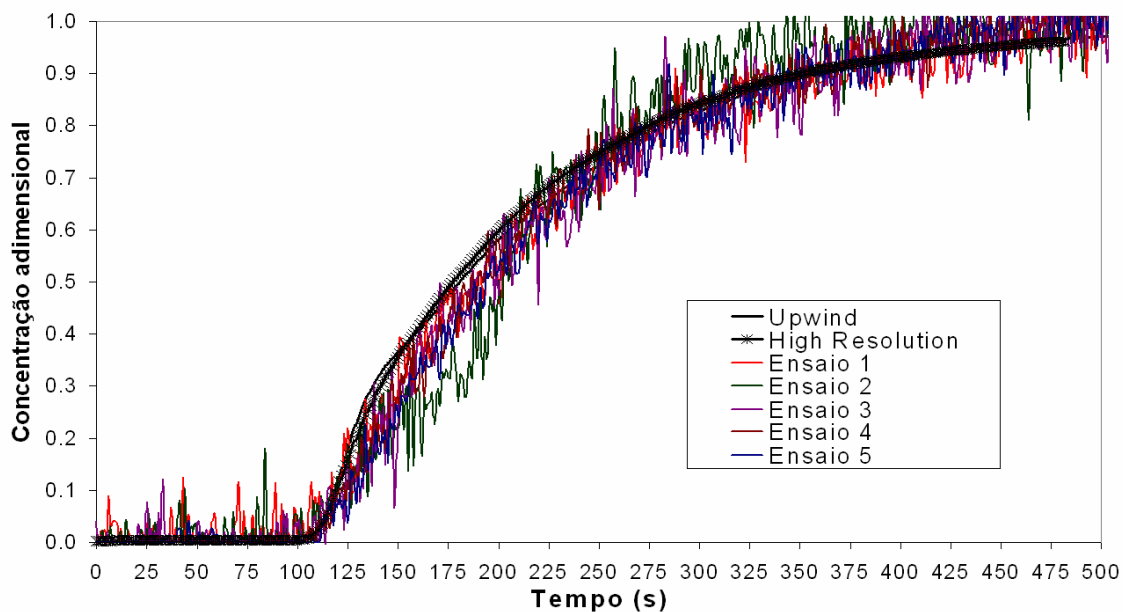


Figura 5.38: Comparação entre os resultados obtidos pelos modelamentos matemáticos e os dados experimentais para a configuração com o modificador de fluxo A1.

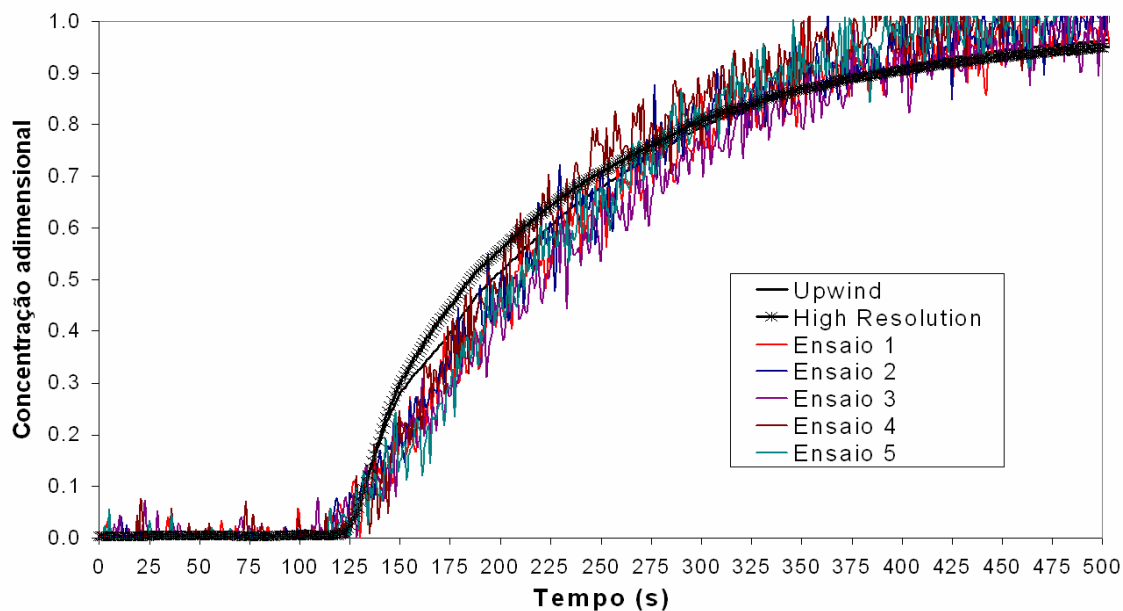


Figura 5.39: Comparação entre os resultados obtidos pelos modelamentos matemáticos e os dados experimentais para a configuração com o modificador de fluxo A7.

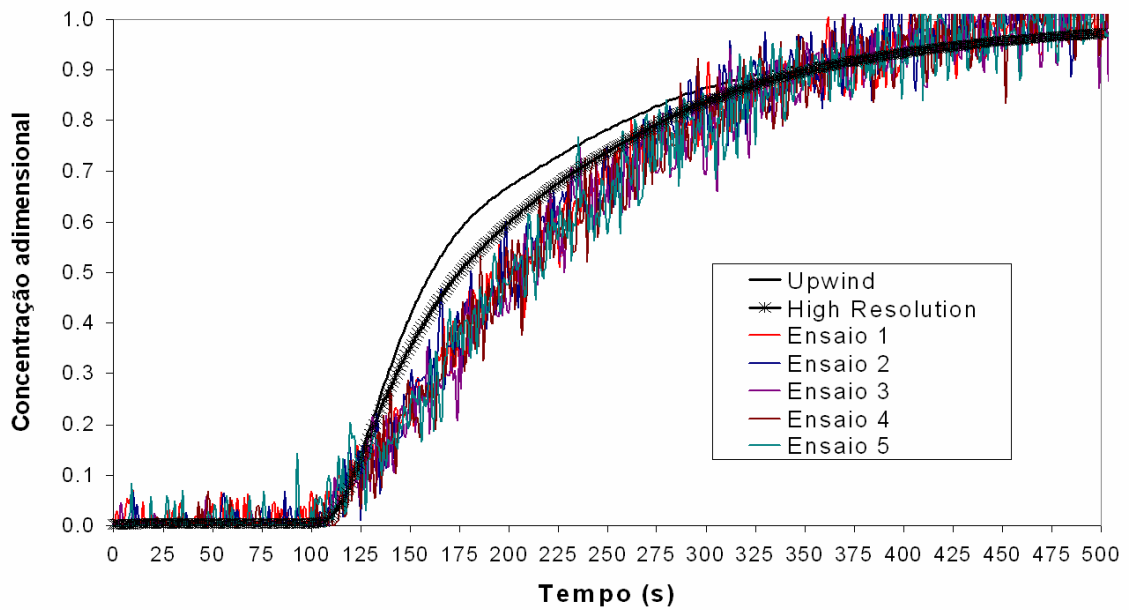


Figura 5.40: Comparação entre os resultados obtidos pelos modelamentos matemáticos e os dados experimentais para a configuração com o modificador de fluxo A9.

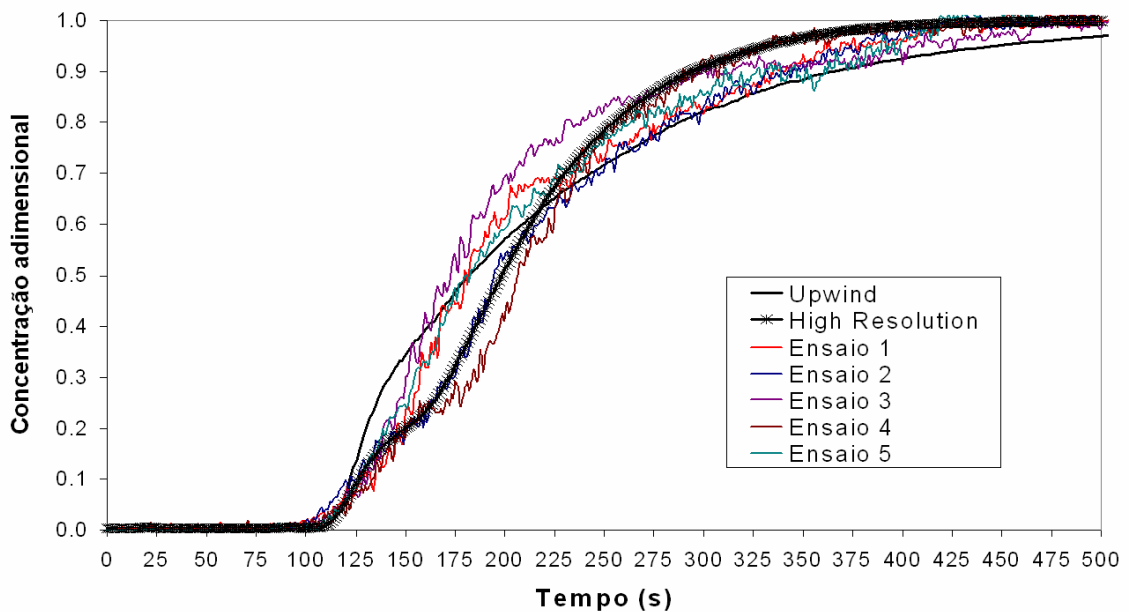


Figura 5.41: Comparação entre os resultados obtidos pelos modelamentos matemáticos e os dados experimentais para a configuração com o modificador de fluxo B.

A Tabela V.5 apresenta os tempos de transição obtidos pelo modelamento físico e pelo modelamento matemático utilizando o esquema de interpolação *high resolution*.



Tabela V.5: Comprimento da placa de mistura obtido pelos modelamentos físico e matemático.

	Comprimento da Placa de Mistura (m)		
	Modelamento Físico		Modelamento Matemático
	Valor	Desvio Padrão	Valor
<b>Sem modificador</b>	4,39	0,25	4,58
<b>Modificador A1</b>	3,61	0,26	3,85
<b>Modificador A2</b>	3,79	0,30	3,88 <sup>(*)</sup>
<b>Modificador A3</b>	3,83	0,20	3,36
<b>Modificador A4</b>	3,96	0,16	4,14
<b>Modificador A5</b>	3,94	0,30	2,79 <sup>(*)</sup>
<b>Modificador A6</b>	3,80	0,15	4,09
<b>Modificador A7</b>	3,76	0,42	4,11
<b>Modificador A8</b>	3,95	0,35	3,20 <sup>(*)</sup>
<b>Modificador A9</b>	4,02	0,20	3,88
<b>Modificador B</b>	3,13	0,47	2,79

(\*) A convergência dos resíduos a valores menores do que RMS  $10^{-5}$  não foi alcançada.

A maioria dos resultados obtidos pelo modelamento matemático encontram-se no intervalo dos resultados obtidos pelo modelamento físico. Sendo assim, pode-se concluir que o comprimento da placa de mistura obtido pelo modelamento matemático não difere estatisticamente do comprimento obtido pelo modelamento físico.

Como o desvio padrão da configuração com o modificador B ficou um pouco elevado quando comparado com as outras configurações, seria interessante a realização de mais experimentos a fim de minimizar a faixa obtida.

A Figura 5.42 apresenta a variação dos comprimentos da placa de mistura obtidos pelos modelamentos físico e matemático.

As diferenças encontradas para alguns dos valores das placas de mistura obtidos pelos modelamentos físico e matemático podem ter sua explicação nos seguintes pontos que necessitam ser estudados e analisados com maior profundidade:

- o modelo matemático assume que a velocidade de entrada do fluido pela válvula submersa é uniforme e que ocorre homogeneização perfeita para as velocidades na saída do molde. Estas condições certamente não são perfeitamente atendidas no modelo físico;

- a obtenção de resíduos acima de  $10^{-6}$  pode gerar dados menos confiáveis. A necessidade de avaliação mais detalhada da malha obtida é interessante, pois a mesma influencia na geração de resíduos mais próximos de  $10^{-6}$ . A utilização de um tempo de simulação maior para verificação do comportamento das curvas pode ser outra alternativa;
- a utilização de modelos de turbulência mais recentes (*Reynolds stress models*) pode ser outra alternativa a ser testada durante o modelamento matemático visando melhorar as previsões do escoamento do fluido no molde, apesar do seu custo computacional ser mais elevado.

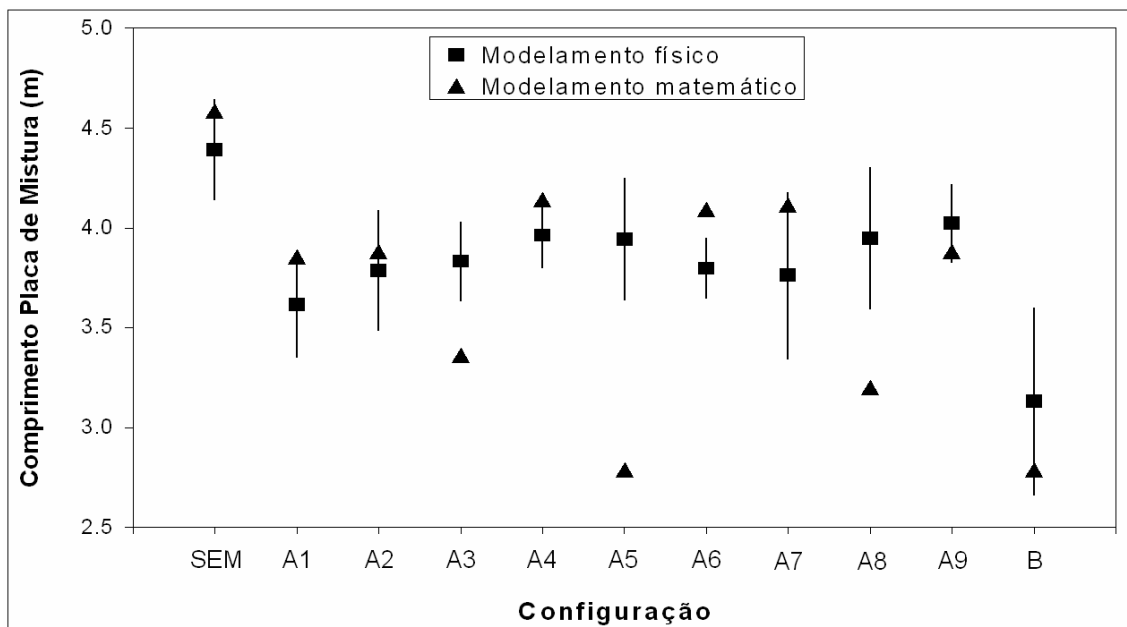


Figura 5.42: Variação do comprimento da placa de mistura de acordo com os modificadores de fluxo utilizados no molde.

Como houve uma boa concordância entre as previsões do modelo matemático e do modelo físico, conclui-se que o modelo matemático utilizado no estudo pode ser utilizado como uma ferramenta para simulação da formação da placa de mistura. Esta conclusão é relevante pois o modelo matemático configurado no trabalho pode ser utilizado para a simulação de novas configurações de modificadores, sem a necessidade de realização de modelagens físicas, diminuindo assim o custo para obtenção de resultados.

## 6 – CONCLUSÕES

Neste trabalho foram desenvolvidos os modelamentos físico e matemático da produção de placas de mistura durante o processo de lingotamento seqüencial de diferentes qualidades de aço, visando avaliar os efeitos do uso de modificadores de fluxo no molde sobre o comprimento da placa de mistura.

Através dos resultados alcançados no presente estudo, foi possível chegar às seguintes conclusões:

- pelos resultados obtidos durante o modelamento matemático, todos os modificadores de fluxo utilizados apontam para uma redução do comprimento da placa de mistura. A utilização do modificador B (peça com extremidades de geometria retangular e redução de largura na parte central) fornece a maior redução da placa (40%). Este ganho representa uma economia considerável para as indústrias siderúrgicas, sendo interessante a realização de testes na planta industrial para verificação dos resultados;
- os modificadores de fluxo afetam os perfis de velocidade propiciando um escoamento que favorece a redução da placa de mistura. Os níveis de energia cinética de turbulência na superfície livre, para as configurações propostas, foram mais elevados; entretanto, as variações em relação ao caso sem modificador foram pequenas e não causariam oscilações significativas no nível de fluido no molde;
- como os resultados obtidos pelo modelo matemático apresentam uma boa concordância com os do modelo físico, pode-se utilizar a configuração gerada no trabalho para análise de outras configurações de modificadores de fluxo, sem a necessidade de realização de experimentos. A visualização dos resultados obtidos pelo modelo matemático facilita a análise de pontos críticos no escoamento, facilitando a sugestão de mudanças visando alcançar a melhor configuração de modificadores de fluxo para diminuição do comprimento da placa de mistura.

## 7 – SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Com o intuito de dar continuidade ao trabalho de investigação do escoamento do aço líquido no processo de lingotamento contínuo, visando a diminuição da placa de mistura formada durante uma transição de qualidades de aço, utilizando-se modelamento matemático, sugere-se o desenvolvimento dos seguintes trabalhos:

- avaliar o efeito da redução da largura dos modificadores de fluxo utilizados no trabalho. A verificação de áreas estagnadas no molde leva a crer que esta redução pode evitar a formação de defeitos superficiais no produto de lingotamento;
- avaliar diferentes configurações dos modificadores de fluxo utilizando o modelo matemático configurado no trabalho;
- acoplar ao modelo matemático a solidificação do aço, visando avaliar os efeitos do escoamento do aço com os modificadores de fluxo e dos níveis de turbulência obtidos na formação da pele solidificada;
- avaliar o efeito de variações na vazão de alimentação na formação das placas de mistura, tanto menores quanto maiores que as usadas no presente trabalho, buscando analisar diferentes velocidades de lingotamento.

## 8 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALIZADEH, M., EDRIS, H., PISHEVAR, A. R. *Behavior of mixed grade during the grade transition for different conditions in the slab continuous casting*. ISIJ International, v.48, n.1, p.28-37, 2008.

ANDRADE, S. O. C. *Influência da geometria da válvula submersa sobre o fluxo de metal no molde de lingotamento contínuo*. 1984. 116f. Dissertação (Mestrado em Metalurgia Extrativa) – Escola de Engenharia da UFMG, Belo Horizonte.

BARRAL, C. E. P. *Efeito de parâmetros geométricos e operacionais sobre o comportamento do pó fluxante no molde de lingotamento contínuo de placas*. 2006. 85f. Dissertação (Mestrado em Metalurgia Extrativa) – Escola de Engenharia da UFMG, Belo Horizonte.

BIRD, R. B., STEWART, W. E., LIGHTFOOT, E. N. *Transport phenomena*. New York: John Wiley & Sons., 1960. 780p.

CHEN, H. S., PEHLKE, R. D. *Mathematical modeling of tundish operation and flow control to reduce transition slabs*. Metallurgical and Materials Transactions B, v.27B, p.745-756, out. 1996.

CRAVO, V. O. *Modelamento matemático da zona de mistura de aços em lingotamento contínuo*. 2006. 139f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais e Metalurgia) – Rede Temática em Engenharia de Materiais – REDEMAT, Ouro Preto.

FILHO, A. C. P. C., POLICARPO, F. F., SANTOS, H. S. O., TAVARES, R. P. *Avaliação do comprimento da placa de mistura no lingotamento contínuo através de modelagens física e matemática*. Tecnologia em Metalurgia e Materiais, São Paulo, v.5, n.1, p.17-21, jul.-set. 2008.

GUPTA, D., LAHIRI, A. K. *Water-modeling study of the surface disturbances in continuous slab caster*. Metallurgical and Materials Transactions B, v.25B, p.227-233, abr. 1994.

HUANG, X., THOMAS, B. G. *Modeling of steel grade transition in continuous slab casting process*. Metallurgical Transactions B, v.24B, n.2, p.379-393, abr. 1993.

HUANG, X., THOMAS, B. G. *Intermixing model of continuous casting during a grade transition*. Metallurgical and Materials Transactions B, v.27B, n.4, p.617-632, ago. 1996.

HUANG, X., THOMAS, B. G. *Modeling of transient flow phenomena in continuous casting of steel*. International Symposium on Computational Fluid Dynamics and Heat/Mass Transfer Modeling in the Metallurgical Industry, p.129-145, ago. 1996.

JFE 21st Century Foundation. *Chapter 2: Smelting, Refining and Continuous Casting. 2J(2) Continuous Caster*. Disponível em: <[http://www.jfe-21st-cf.or.jp/chapter\\_2/2j\\_2\\_img.html](http://www.jfe-21st-cf.or.jp/chapter_2/2j_2_img.html)>. Acesso em: 01 nov. 2008.

KAMAL, M., SAHAI, Y. *A simple innovation in continuous casting mold technology for fluid flow and surface standing waves control*. ISIJ International, v.46, n.12, p.1823-1832, 2006.

KREITH, F. *Princípios da transmissão de calor*. Tradução da 3ª edição americana. São Paulo: Edgard Blücher, 1977. 550p.

LI, B., TSUKIHASHI, F. *Vortexing flow patterns in a water model of slab continuous casting mold*. ISIJ International, v.45, n.1, p.30-36, 2005.

MASAL'SKII, T. S., GOROSTKIN, S. V., CHAIKOVSKII, Y. A., ZHELNIN, Y. M. *Methods of separating different grades of steel during continuous casting on section and slab casters*. Metallurgist, v.51, n.1-2, p.34-37, jan. 2007.

MIRANDA, R., BARRON, M. A., BARRETO, J., HOYOS, L., GONZALEZ, J. *Experimental and numerical analysis of the free surface in a water model of a slab continuous casting mold*. ISIJ International, v.45, n.11, p.1626-1635, 2005.

NAJJAR, F. M., THOMAS, B. G., HERSHEY, D. E. *Numerical study of steady turbulent flow through bifurcated nozzles in continuous casting*. Metallurgical and Materials Transactions B, v.26B, n.4, p.749-765, ago. 1995.

PANARAS, G. A., THEODORAKAKOS, A., BERGELES, G. *Numerical investigation of the free surface in a continuous steel casting mold model*. Metallurgical and Materials Transactions B, v.29B, p.1117-1126, out. 1998.

PATANKAR, S. V. *Numerical heat transfer and fluid flow*. Washington: McGraw Hill Book Company, 1980. 197p.

PEREIRA, R. O. S. *Modelamento matemático do escoamento turbulento, da transferência de calor e da solidificação no distribuidor e na máquina de lingotamento contínuo*. 2004. 313f. Tese (Doutorado em Metalurgia Extrativa) – Escola de Engenharia da UFMG, Belo Horizonte.

PEREIRA, R. O. S.; NETTO, P. G. Q., CASTRO, L. F. A., TAVARES, R. P. *Escoamento do aço no molde de lingotamento contínuo de placas*. Anais do 56º Congresso Anual da Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais – Internacional, p.1264-1273, 2001.

PICCONI, T. J., SINHA, A. K., MADDEN, M. A. *Intermix trials at Gary n°2 caster using different tundish configurations*. Steelmaking Conference Proceedings, p.101-110, 2001.

SESHADRI, V., SILVA, C. A., SILVA, I. A. *Physical modeling simulations of refining processes in Brazilian Steel Industry*. Scandinavian Journal of Metallurgy, v.34, p.340-352, 2005.

SHEN, B., SHEN, H., LIU, B. *Instability of fluid flow and level fluctuation in continuous thin slab casting mould*. ISIJ International, v.47, n.3, p.427-432, 2007.

SHEN, B. Z., SHEN, H. F., LIU, B. C. *Water modelling of level fluctuation in thin slab continuous casting mould*. Ironmaking and Steelmaking, v.36, n.1, p.33-38, 2009.

SINHA, A. K., VASSILICOS, A. *Physical modeling study of effect of a turbulence suppressor device on flow and mixing in the dual strand tundish*. Steelmaking Conference Proceedings, p.111-125, 2001.

SIVARAMAKRISHNAN, S., BAI, H., THOMAS, B. G., VANKA, S. P., DAUBY, P. H., ASSAR, M. B. *Transient flow structures in continuous casting of steel*. 83<sup>rd</sup> Steelmaking Conference Proceedings, v.83, p.541-557, 2000.

SZEKELY, J., THEMELIS, N. J. *Rate phenomena in process metallurgy*. New York: Wiley Interscience, 1971. 784p.

SZEKELY, J., YADOYA, R. T. *The physical and mathematical modeling of the flow field in the mold region in continuous casting systems: Part I. model studies with aqueous systems*. Metallurgical and Materials Transactions B, v.3, n.10, p.2673-2680, 1972 apud THOMAS, B. G., ZHANG, L. *Review: Mathematical modeling of fluid flow in continuous casting*. ISIJ International, v.41, n.10, p.1181-1193, 2001.

TAVARES, R. P. *Apostila de Fenômenos de Transporte*, abr. 2007.



TAVARES, R. P. *Relatório científico do projeto de pesquisa: Modelamento matemático e físico da zona de mistura no lingotamento contínuo*. CNPq / Processo: 302 238 / 2004 – 2. Mar. 2008.

THOMAS, B. G. *Modeling study of intermixing in tundish and strand during a continuous-casting grade transition*. Iron and Steelmaker (ISS Transactions), v.24, n.12, p.83-96, 1997.

THOMAS, B. G. *Fluid flow in the mold*. Chapter 14 in Making, shaping and treating of steel, 11<sup>th</sup> edition, v. 5, Casting Volume, A. Cramb, editor, AISE Steel Foundation, p.14.1-14.41, 2003.

THOMAS, B. G., MIKA, L. J., NAJJAR, F. M. *Simulation of fluid flow inside a continuous slab-casting machine*. Metallurgical Transactions B, v.21B, p.387-400, abr. 1990.

THOMAS, B. G., O'MALLEY, R. SHI, T., MENG, Y., CREECH, D., STONE, D. *Validation of fluid flow and solidification simulation of a continuous thin-slab caster*. Modeling of Casting, Welding, and Advanced Solidification Processes IX, p.769-776, ago. 2000.

THOMAS, B. G., ZHANG, L. *Review: Mathematical modeling of fluid flow in continuous casting*. ISIJ International, v.41, n.10, p.1181-1193, 2001.

TORRES, F. F. *Modelamento físico da formação da placa de mistura no lingotamento contínuo de placas: efeitos de modificadores de fluxo no molde*. 2009. 18f. Relatório de Iniciação Científica (Curso de Graduação em Engenharia Metalúrgica da UFMG) – Escola de Engenharia da UFMG, Belo Horizonte.

VANKA, S. P., THOMAS, B. G. *Study of transient flow structures in the continuous casting of steel*. NSF Design & Manufacturing Grantees Conference, p.1-14, jan. 2001.

WOLLMANN, A. M. *Estudos de fluxo em um distribuidor de lingotamento contínuo*. 1999. 94f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Minas) – Escola de Engenharia da UFRGS, Porto Alegre.

XING-GUO, Z., WEN-XIAO, Z., JUN-ZE, J., EVANS, J. W. *Flow of steel in mold region during continuous casting*. Journal of Iron and Steel Research, International, v.14, n.2, p.30-35, 41, 2007.

XIU, W. T., CARLSSON, G. *Water model studies of fluid flow in cc-moulds when submerged entry nozzles are used*. Scandinavian Journal of Metallurgy, v.12, p.121-128, 1983.

YAO, M., ICHIMIYA, M., TAMIYA, M., SUZUKI, K., SUGIYAMA, K., MESAKI, R. *Trans. Iron Steel Inst. Jpn.*, v.24, n.2, 1984 apud THOMAS, B. G., ZHANG, L. *Review: Mathematical modeling of fluid flow in continuous casting*. ISIJ International, v.41, n.10, p.1181-1193, 2001.

YEH, J-L., HWANG, W-S., CHOU, C-L. *The development of a mathematical model to predict composition distribution in casting slab and intermix slab length during ladle changeover period and its verification by physical model*. ISIJ International, v.33, n.5, p.588-594, 1993.

YU, Q., DICKINSON, D., SKAGEN, R. *Determination of transition slab weight for grade change during continuous casting*. AISTech Proceedings, v.2, p.169-180, 2005.

YUAN, Q., SHI, T., VANKA, S. P., THOMAS, B. G. *Simulation of turbulent flow and particle transport in the continuous casting of steel*. Computational Modeling of Materials, Minerals and Metals Processing, p.491-500, 2001.

YUAN, Q., THOMAS, B. G., VANKA, S. P. *Study of transient flow and particle transport in continuous steel caster molds: Part I. Fluid flow*. Metallurgical and Materials Transactions B, v.35B, p.685-702, ago. 2004.

ZHANG, L., YANG, S., CAI, K., LI, J., WAN, X., THOMAS, B. G. *Investigation of fluid flow and steel cleanliness in the continuous casting strand*. Metallurgical and Materials Transactions B, v.38B, n.1, p.63-83, fev. 2007.

ZIMMERMAN, T. A., SCHMIDT, M. *A dynamic mathematical model for grade-mixing in tundish and strand*. ISSTech Conference Proceedings, p.1173-1192, 2003.

## 9 – BIBLIOGRAFIA

BARBOSA, F. A. *Modelamentos matemático e físico do escoamento do aço líquido em diferentes projetos de distribuidor do lingotamento contínuo da USIMINAS*. 2002. 188f. Dissertação (Mestrado em Metalurgia Extrativa) – Escola de Engenharia da UFMG, Belo Horizonte.

COSTA, A. M. *Modelamento matemático da zona de mistura no lingotamento contínuo*. 2003. 110f. Dissertação (Mestrado em Metalurgia Extrativa) – Escola de Engenharia da UFMG, Belo Horizonte.

FRANÇA, J. L., VASCONCELLOS, A. C., BORGES, S. M., MAGALHÃES, M. H. A. *Manual para normalização de publicações técnico-científicas*. Belo Horizonte: Editora UFMG, 1990. 167p.

NBR 6023:2000 – Elaboração de Referências.

VERSTEEG, H. K., MALALASEKERA, W. *An introduction to computational fluid dynamics: The finite volume method*. Harlow: Longman Scientific & Technical, 1995. 257p.