

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO E DO DESPORTO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
Escola de Engenharia
Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais
PPGEM

**ESTUDOS DE FLUXO EM UM DISTRIBUIDOR DE
LINGOTAMENTO CONTÍNUO**

André Mendes Wollmann

Dissertação para obtenção do título de Mestre em Engenharia

Porto Alegre
1999

ESCOLA DE ENGENHARIA
BIBLIOTECA

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO E DO DESPORTO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
Escola de Engenharia
Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais
PPGEM

**ESTUDOS DE FLUXO EM UM DISTRIBUIDOR DE
LINGOTAMENTO CONTÍNUO**

André Mendes Wollmann

Engenheiro Metalúrgico

Trabalho realizado no Centro de Tecnologia da Escola de Engenharia da UFRGS, dentro do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais – PPGEM, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia.

Área de Concentração: Metalurgia Extrativa.

Porto Alegre

1999

Essa Dissertação foi julgada adequada para obtenção do título de Mestre em Engenharia, área de concentração Metalurgia Extrativa e aprovada em sua forma final, pelo Orientador e pela Banca Examinadora do Curso de Pós-Graduação.

Orientador: Prof. Dr.-Ing. Antônio Cezar Faria Vilela

Banca Examinadora:

Dra. Magda Galant François, PPGEM/RHAE

Dr. Joaquin Bas Guirao, Gerdau – Aços Finos Piratini

Prof. Dr. Roberto Parreiras Tavares, Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG)

Prof. Dr. Telmo Roberto Strohaecker

Coordenador do PPGEM

Aos meus pais, verdadeiros exemplos de pessoas honestas e trabalhadoras.

AGRADECIMENTOS

Ao professor Antônio Cezar Faria Vilela pela orientação recebida durante a realização desse trabalho.

Ao Dr. Joaquin Bas Guirao pela confiança e crédito dado aos pesquisadores e estudantes do Laboratório de Siderurgia.

Ao Mestre Julio Morales e aos bolsistas Geraldo André Fagundes, Levi dos Santos Inhaia, Mário Silveira da Silva, Paulo de Senna Junior, Vinicius Aimi, Rodrigo Machado Goulart e Marcelo Dondoni pelo apoio recebido durante a realização da parte experimental desse trabalho.

A Dra. Magda Galant François, ao Mestre Rodrigo Belloc Soares, ao Engenheiro Paulo Leal e a todos os funcionários da aciaria da Aços Finos Piratini que, através das suas sugestões e críticas, colaboraram para que este trabalho trilhasse o caminho em busca de resultados práticos e de fácil implementação industrial.

A Universidade Federal do Rio Grande do Sul pela infra-estrutura disponibilizada.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPQ – pelo apoio concedido através de bolsas de pesquisa.

A Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio Grande do Sul – FAPERGS – e a Gerdau – Aços Finos Piratini pelo apoio financeiro.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	VIII
LISTA DE TABELAS.....	XI
LISTA DE SÍMBOLOS.....	XII
RESUMO	XIV
ABSTRACT	XV
1. INTRODUÇÃO	1
2. PARTE TEÓRICA.....	3
2.1. INCLUSÕES NÃO-METÁLICAS NO AÇO DO DISTRIBUIDOR.....	3
2.1.1. <i>Aumento do Nível de Inclusões no Distribuidor.....</i>	4
2.1.2. <i>Como melhorar a Flotação de Inclusões no Distribuidor.....</i>	6
2.1.3. <i>Como alterar o tempo médio de residência, os volumes característicos e a orientação do fluxo no distribuidor.....</i>	6
2.2. MÉTODO MAIS UTILIZADO PARA ESTUDAR O ESCOAMENTO E OS TEMPOS DE RESIDÊNCIA NO DISTRIBUIDOR	8
2.3. MODELAMENTO FÍSICO DO FLUXO DE AÇO NO DISTRIBUIDOR	8
2.3.1. <i>Princípios do Modelamento Físico</i>	8
2.3.2. <i>Visualização do Fluxo no modelo Físico</i>	14
2.4. DETERMINAÇÃO DA CURVA DE DISTRIBUIÇÃO DOS TEMPOS DE RESIDÊNCIA	14
2.4.1. <i>Curvas DTR normalizadas</i>	18
2.4.2. <i>Área sob a curva DTR.....</i>	19
2.4.3. <i>Normalização da Curva DTR a partir de dados de condutividade</i>	20
2.4.4. <i>Interpretação das curvas DTR</i>	21
2.4.5. <i>Cálculo dos tempos de residência e dos volumes característicos</i>	26
2.4.6. <i>Heterogeneidade entre os veios de um distribuidor.....</i>	29
2.5. EFEITO DA TEMPERATURA SOBRE O FLUXO NO DISTRIBUIDOR.....	31
3. PARTE EXPERIMENTAL.....	33
3.1. DISTRIBUIDOR.....	33
3.2. MODELO FÍSICO	35
3.2.1. <i>Condições gerais de ensaios no modelo físico</i>	37
3.2.2. <i>Números de Re, Fr e Gr/Re^2.....</i>	38
3.3. MODIFICADORES DE FLUXO TESTADOS	41
3.4. ENSAIOS DE VISUALIZAÇÃO DO ESCOAMENTO	42
3.5. CURVAS DTR E CÁLCULO DOS VOLUMES CARACTERÍSTICOS	43
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	51
4.1. ESCOAMENTO DO FLUIDO	51
4.1.1. <i>Sem barreiras versus barreira 1.....</i>	51
4.1.2. <i>Barreira 1 versus barreira 2</i>	54
4.1.3. <i>Barreira 1 versus Barreira 3.....</i>	55
4.1.4. <i>Barreira 3 versus barreiras 3 e 4.....</i>	57
4.2. CURVAS DTR.....	60
4.2.1. <i>Reprodutibilidade dos ensaios</i>	60
4.2.2. <i>Média e Desvio-Padrão dos Tempos de Residência e Volumes Característicos.....</i>	61
4.2.3. <i>Identificação do curto-circuito.....</i>	64
4.2.4. <i>Homogeneidade entre veios</i>	65
4.2.5. <i>Tempo Médio de Residência.....</i>	67
4.2.6. <i>Tempo Mínimo de Residência</i>	68
4.2.7. <i>Volumes Característicos.....</i>	69
4.2.8. <i>Relação entre volume pistonado disperso e volume morto</i>	72
4.3. QUADRO COMPARATIVO ENTRE TODAS AS BARREIRAS	73
4.4. BARREIRA UTILIZADA NO DISTRIBUIDOR INDUSTRIAL.....	76
5. CONCLUSÕES	77

6. SUGESTÕES.....	78
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	81
ANEXO A	86
ANEXO B.....	89

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Velocidade de flotação da inclusão sob efeito da velocidade do fluido (V_f).....	3
Figura 2. Velocidade de flotação de inclusões de alumina no aço líquido (segundo Knüppel, et al.). Figura retirada do livro: Continuous Casting of Steel de Hans Schrewe ⁽²¹⁾	4
Figura 3. Desenhos esquemáticos mostrando a) passagem de escória da panela para o distribuidor e b) emulsificação da escória do distribuidor durante a troca da panela. ⁽²³⁾	5
Figura 4. Foto ilustrando a exposição do aço do distribuidor ao ar. ⁽²⁴⁾	5
Figura 5. Barreira com furos utilizada para melhorar a flotação de inclusões no interior do distribuidor da Bethlehem Steel Corporation ⁽²⁶⁾	7
Figura 6. Uso de barreiras do tipo “dam” e “weir”. ⁽¹⁾	7
Figura 7. Efeito das barreiras sobre o fluxo no interior de um distribuidor com dois veios. ⁽⁶⁾	7
Figura 8. Equivalência entre as velocidades (v) e as acelerações (a) no protótipo e num modelo com o fator de escala (λ) 1:2.	9
Figura 9. Desenho esquemático mostrando a diferença de temperatura entre o aço da panela e o aço que está no distribuidor. Também são mostradas as temperaturas equivalentes para simulação no modelo em água.	13
Figura 10. Visualização da movimentação de um corante no interior de um modelo físico estudado por Singh e Koria ⁽⁵⁾ . Fotografias tiradas a 15s (a) e 45 s (b) após o instante de injeção do traçador.....	14
Figura 11. Diferentes trajetórias do fluido em um distribuidor com barreiras. ⁽⁶⁾	15
Figura 12. Gráfico mostrando a distribuição dos tempos de residência do aço no interior de um distribuidor cujo o tempo de residência teórico é igual a 1080 segundos.	15
Figura 13. Desenho esquemático representando um ensaio para determinar a distribuição dos tempos de residência do aço líquido no interior de um distribuidor de lingotamento contínuo.	16
Figura 14. a) Relação entre Absorbância e a concentração de $KMnO_4$ ⁽¹⁾ na água. b) relação entre a concentração de KCl e a condutividade da água ⁽⁴⁴⁾	16
Figura 15. Comparação entre as curvas DTR na planta industrial com o uso de Cu (média real), no modelo físico utilizando uma solução a base de NaCl e via modelamento matemático. ⁽¹⁹⁾	17
Figura 16. Típica curva de distribuição dos tempos de residência para o fluido do distribuidor ⁽²⁾ . Onde: t_n representa o valor normalizado de tempo após o instante de injeção de traçador (Equação 4) e C_n representa o valor normalizado de concentração de traçador (Equação 5).....	18
Figura 17. Desenho esquemático mostrando a medição da concentração de traçador na saída do distribuidor. ...	19
Figura 18. Desenho esquemático que representa o modelo de mistura utilizado para interpretar o comportamento de fluxo no interior do distribuidor	22
Figura 19. Curva DTR para um distribuidor hipotético formado somente por volume de mistura ⁽⁴⁷⁾	22
Figura 20. Desenho esquemático mostrando o comportamento do fluxo pistonado no interior do distribuidor. ...	23
Figura 21. Curva resultante de um DTR (adição de traçador em pulso) para um distribuidor hipotético onde todo o fluxo é totalmente pistonado. ⁽⁴⁷⁾	23
Figura 22. Desenho esquemático que representa o modelo de mistura considerando o volume pistonado disperso (V_{pd}).....	23
Figura 23. Desenho esquemático mostrando o comportamento do fluxo pistonado disperso no interior do distribuidor ⁽²⁾	24
Figura 24. Curva resultante de um ensaio DTR (adição de traçador em pulso) para um distribuidor hipotético onde todo o fluxo é pistonado disperso. ⁽⁴⁷⁾	24
Figura 25. Vários tipos de curvas DTR. Curva a: volume de mistura. Curva b: volume pistonado + volume morto. Curva c: Fluxo real. ⁽⁴⁾	25
Figura 26. Desenho esquemático que representa o modelo de mistura utilizado para interpretar o comportamento de fluxo no interior do distribuidor na presença de um fluxo de curto-circuito.	25
Figura 27. Curva DTR onde o primeiro pico de concentração representa a existência de um fluxo de curto-circuito (a direita do gráfico é mostrado um desenho esquemático do distribuidor analisado) ⁽⁵⁾	26
Figura 28. Vários tipos de curvas DTR. Curva a: volume de mistura. Curva b: volume pistonado + volume morto. Curva c: Fluxo de curto-circuito. Curva d: fluxo real. ⁽⁴⁾	26
Figura 29. a) Curva DTR mostrando o t_n mínimo e o t_n $C_{máx.}$; b) curva DTR mostrando o intervalo de tempo em que ocorre o curto-circuito.	29
Figura 30. a) desenho esquemático do modelo físico de um distribuidor com formato de “T” que foi estudado por Costa ⁽⁴⁴⁾ ; b) curvas DTR para o distribuidor mostrado na figura “a”; c) vista superior do modelo físico do distribuidor assimétrico estudado por Robertson e Perkins ⁽⁴⁸⁾ ; d) curvas DTR para o distribuidor mostrado na figura “c”.	30
Figura 31. Comparativo entre as curvas DTR dos veios internos e externos para a configuração de barreiras A e B estudadas por Morales et al. ⁽⁴⁹⁾	31

Figura 32. Desenho esquemático do distribuidor utilizado por Lowry e Sahai para estudar efeitos térmicos no fluxo de fluido. ⁽³³⁾	32
Figura 33. Visualização do fluxo isotérmico na metade do modelo do distribuidor apresentado na Figura 32. O comportamento do fluxo é mostrado a: a) 0,3 unidades de tempo; b) 0,7 unidades de tempo e c) 1,5 unidades de tempo. ⁽³³⁾	32
Figura 34. Visualização do fluxo não- isotérmico na metade do modelo do distribuidor apresentado na Figura 32. O comportamento do fluxo é mostrado a: a) 0,3 unidades de tempo; b) 0,7 unidades de tempo e c) 1,5 unidades de tempo ⁽³³⁾ . A água de entrada está 40°C mais quente que a água do distribuidor.....	32
Figura 35. Desenho esquemático em três dimensões do distribuidor de lingotamento contínuo da Gerdau - Aços Finos Piratini.	33
Figura 36. Vista lateral do distribuidor ilustrando a presença da válvula longa da panela e do sistema haste-tampão.....	33
Figura 37. Desenho em vistas do distribuidor modelado.	34
Figura 38. Exemplos de distribuidores do tipo a) T e b) delta. ⁽⁵⁰⁾	34
figura 39. Foto do modelo físico do distribuidor de lingotamento contínuo da Aços Finos Piratini. Os tampões dos veios 2 e 3 são de acrílico e o tampão do veio 1 é de madeira.....	35
Figura 40. Fotos laterais do modelo físico mostrando em detalhe a) a submersão do jato de entrada do distribuidor (válvula longa da panela) e b) o jato de entrada com corante.....	36
Figura 41. Esquema do sistema hidráulico construído para o modelo físico do distribuidor de lingotamento contínuo da Aços Finos Piratini.	37
Figura 42. Desenho esquemático mostrando a relação entre vazão de lingotamento (Q_s) e velocidade de lingotamento (v_l).....	38
Figura 43. Movimentação do corante no modelo físico sem barreiras.....	40
figura 44. Desenhos em três dimensões do distribuidor mostrando as barreiras testados.	41
figura 45. Imagens após 12 s do instante de injeção. As filmagens que deram origem a essas imagens foram feitas conforme os ângulos representados através das setas vermelhas.....	43
Figura 46. Curva DTR gerada a partir dos dados apresentados na: a) curva DTR em detalhe mostrando pico de concentração referente ao curto circuito; b) curva DTR na íntegra; b) identificação do pico de concentração para os veios laterais; b) identificação do segundo pico de concentração para o veio central	48
Figura 47. Ensaio com corante no modelo do distribuidor sem barreiras. Vistas frontal, lateral e superior. A esquerda das fotos é indicado o tempo transcorrido após o instante de injeção do traçador.	51
Figura 48. Ensaio com corante no modelo do distribuidor sem barreiras e no modelo com barreira 1. Vista Lateral. A esquerda das fotos é indicado o tempo transcorrido após o instante de injeção do traçador.	52
Figura 49. Ensaio com corante no distribuidor sem barreiras e no distribuidor com barreira 1. Vista frontal. A esquerda das fotos é indicado o tempo transcorrido após o instante de injeção do traçador.	53
Figura 50. Ensaio com corante no distribuidor sem barreiras e no distribuidor com barreira 1. Vista superior. A esquerda das fotos é indicado o tempo transcorrido após o instante de injeção do traçador.	53
Figura 51. Ensaio com corante no distribuidor com a barreira 1 e no distribuidor com a barreira 2. Vista frontal. A esquerda das fotos é indicado o tempo transcorrido após o instante de injeção do traçador.	54
Figura 52. Ensaio com corante no distribuidor com a barreira 1 com a barreira 2. Vistas lateral e superior. A esquerda das fotos é indicado o tempo transcorrido após o instante de injeção do traçador	55
Figura 53. Ensaio com corante no distribuidor com a barreira 1 e no distribuidor com a barreira 3. Vista frontal. A esquerda das fotos é indicado o tempo transcorrido após o instante de injeção do traçador.	56
Figura 54. Ensaio com corante no distribuidor com a barreira 1 e no distribuidor com a barreira 3. Vistas lateral e superior. A esquerda das fotos é indicado o tempo transcorrido após o instante de injeção do traçador.	57
Figura 55. Ensaio com corante no distribuidor com a barreira 3 e no distribuidor com a barreira 3 e 4. Vista frontal. A esquerda das fotos é indicado o tempo transcorrido após o instante de injeção do traçador.....	58
Figura 56. Ensaio com corante no distribuidor com a barreira 3 e no distribuidor com a barreira 3 e 4. Vistas lateral e superior. A esquerda das fotos é indicado o tempo transcorrido após o instante de injeção do traçador.....	59
Figura 57. Reprodutibilidade das curvas DTR. a) distribuidor sem barreiras; b) distribuidor com barreira 1 e c) distribuidor com barreira 2.....	60
Figura 58. Reprodutibilidade das curvas DTR. a) distribuidor com barreira 3 e b) distribuidor com barreira 3 e barreira 4.	61
Figura 59. Curva DTR do distribuidor sem barreiras mostrando em detalhe a presença de um volume de curto-circuito para o veio central.....	64
Figura 60. Eliminação do curto-circuito promovida pelo uso da barreira 1.....	64
Figura 61. Curvas DTR dos veios laterais e do veio central. a) distribuidor sem barreiras; b) distribuidor com barreira 1 e c) distribuidor com barreira 2;.....	65
Figura 62. Curvas DTR dos veios laterais e do veio central: a) distribuidor com a barreira 3 e b) distribuidor com a barreira 3 e a barreira 4.....	66

figura 63. Grau de homogeneidade entre os veios definido pela Equação 27 em função da barreira. Em verde é apresentado o melhor resultado e em vermelho o pior resultado.	67
Figura 64. Gráfico correlacionando a barreira utilizada com o tempo médio de residência normalizado (tn médio) dos veios laterais e do veio central. Em verde é apresentado o melhor resultado e em vermelho o pior resultado.	67
Figura 65. Gráfico correlacionando a barreira utilizada com o tempo médio de residência normalizado (tn médio) do distribuidor como um todo (média ponderada entre os veios). Em verde é apresentado o melhor resultado e em vermelho o pior resultado.	68
Figura 66. Gráfico correlacionando a barreira utilizada com o tempo mínimo de residência normalizado (tn mínimo) dos veios laterais e do veio central. Em verde é apresentado o melhor resultado e em vermelho o pior resultado.	69
Figura 67. Gráfico correlacionando a barreira utilizada com o tempo mínimo de residência normalizado (tn mínimo) do distribuidor como um todo (média ponderada entre os veios). Em verde é apresentado o melhor resultado e em vermelho o pior resultado.	69
Figura 68. Volumes característicos do fluido que vai para os veios laterais. Em verde é apresentado o melhor resultado e em vermelho o pior resultado.	70
Figura 69. Volumes característicos do fluido que vai para os veio central. Em verde é apresentado o melhor resultado e em vermelho o pior resultado.	71
Figura 70. Turbulência gerada pelo jato da panela no modelo com as barreiras 3 e 4: a) ensaio com corante (imagem após 12s da injeção); b) desenho esquemático da turbulência gerada pelo jato de entrada do distribuidor e confinada pela barreira 4.	71
Figura 71. Volumes característicos do distribuidor como um todo. Em verde é apresentado o melhor resultado e em vermelho o pior resultado.	72
Figura 72. Relação entre volume pistonado disperso e volume morto em função das barreiras testadas. Análise por veio. Em verde é apresentado o melhor resultado e em vermelho o pior resultado.	72
Figura 73. Este gráfico mostra, para todo o volume líquido do distribuidor, a relação entre volume pistonado e volume morto em função das barreiras testadas. Em verde é apresentado o melhor resultado e em vermelho o pior resultado.	73
Figura 74. Vista superior do distribuidor industrial mostrando o posicionamento da barreira 2.	76
Figura 75. Arraste de escória no modelo físico (escória simulada com querosene).....	79
Figura 76. Inibidor de turbulência estudado por Bolger e Saylor ⁽⁵¹⁾ ;	79
Figura 77. a) efeito das velocidades de lingotamento sobre as curvas DTR de um modelo estudado por Sahai e Burval ⁽³²⁾ ; b) diversos tipos de tubo longo do tipo boca de sino estudados por He et al. ⁽⁹⁾ ; c) tubo longo fora do prumo;	80
Figura 78. Controladores de condutividade utilizados no modelo físico.	86
Figura 79. Sensores de condutividade utilizados no modelo físico.....	86
Figura 80. Micro-computador utilizado para armazenar os dados de condutividade	87
Figura 81. Bombas hidráulicas utilizadas no modelo físico.	87
Figura 82. Medidores de vazão utilizados no modelo físico.	88
Figura 83. Desenho em vistas do modelo físico com a barreira tipo 1.....	89
Figura 84. Desenho em vistas do modelo físico com a barreira tipo 2.....	90
Figura 85. Desenho em vistas do modelo físico com a barreira tipo 3.....	91
Figura 86. Desenho em vistas do modelo físico com a barreira tipo 4.....	92
Figura 87. Desenho em vistas do modelo físico com as barreiras tipo 3 e tipo 4.....	93

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Simplificações consideradas na análise do fluxo no distribuidor.	9
Tabela 2. Definição dos números de Froude e de Reynolds	10
Tabela 3. Cálculo dos números de Reynolds e de Froude para o distribuidor industrial (aço a 1600°C) e para o modelo em água (20°C). Valores normalizados em relação ao valor calculado para o aço.	11
Tabela 4. Propriedades físicas da água a 20°C e do aço a 1600°C.....	11
Tabela 5. Condições de trabalho no modelo físico.....	37
Tabela 6. Resultados de um ensaio DTR.	45
Tabela 7. Resultados de todos os ensaios DTR.....	62
Tabela 8. Percentual de desvio em relação a média para todos os parâmetros identificados a partir das curvas DTR.....	63
Tabela 9. Parâmetros analisados via curva DTR. Pior resultado em vermelho e melhor resultado em verde.....	74
Tabela 10. Parâmetros analisados via curva DTR para os veios laterais. Pior resultado em vermelho e melhor resultado em verde.	75
Tabela 11. Parâmetros analisados via curva DTR para os veio central. Pior resultado em vermelho e melhor resultado em verde.	75

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Descrição	Unidade
μ	viscosidade molecular absoluta	kg/m/s
ρ	densidade	kg/m ³
λ	fator de escala.	adimensional
β	coeficiente de expansão volumétrico	°C ⁻¹
(D-Do)	condutividade relativa	mS/m*
μ_{eff}	viscosidade efetiva	kg/m/s
ρ_f	densidade do fluido	kg/m ³
ρ_p	densidade da inclusão	kg/m ³
Δt_n	intervalo de tempo normalizado transcorrido entre medidas sucessivas de concentração	adimensional
a	aceleração do fluido	m/s ²
A	constante da reta que define a relação entre concentração de traçador e a diferença de condutividade	(kg/m ² /mS)*
c	concentração de traçador medida na saída do distribuidor	kg/m ³
C_n	concentração normalizada de traçador	adimensional
D	condutividade absoluta	mS/m*
d	diâmetro da inclusão	m
Do	condutividade da água do modelo antes da injeção de traçador	mS/m*
Fr	número de Froude	adimensional
g	aceleração da gravidade	m/s ²
Gh	grau de homogeneidade entre veios	%
Gr	número de Grashof	adimensional
K	coeficiente de calibração de um ensaio DTR	m/mS*
L	comprimento característico do sistema	m
m	abreviatura de modelo	-
p	abreviatura de protótipo	-
q	quantidade de traçador injetado	kg
Q_e	vazão de entrada do distribuidor	m ³ /min
Q_s	vazão de saída do distribuidor	m ³ /min
q_s	quantidade de traçador que sai do distribuidor em um intervalo de tempo Δt	kg
Re	número de Reynolds	adimensional
Ret	número de Reynolds turbulento	adimensional
s	dimensão do lado do molde	mm ou m
t	tempo transcorrido após o instante de injeção de traçador em um ensaio DTR	s
T_∞	temperatura do líquido do distribuidor (líquido mais frio)	°C
t_{cc}	tempo normalizado que identifica o final do curto-circuito	adimensional
t_n	tempo normalizado	adimensional
$t_n C_{máx}$	instante em que a curva DTR atinge o valor máximo de concentração	adimensional
t_n médio	tempo de residência médio normalizado	adimensional

* mS: mili Siemens = unidade de condutividade. 1 mS = 1 ohm⁻¹

<u>Símbolo</u>	<u>Descrição</u>	<u>Unidade</u>
tn médio_vc	tempo médio de residência normalizado do fluido que vai para o veio central	adimensional
tn médio_vl	tempo médio de residência normalizado do fluido que vai para os veios laterais	adimensional
tn mínimo	tempo de residência mínimo normalizado	adimensional
tn mínimo	instante em que aparece o primeiro sinal traçador na válvula de saída	adimensional
T _o	temperatura do líquido da panela	°C
tr	Tempo de residência teórico	s
v	Velocidade do fluido	m/s
V	Volume do distribuidor	m ³
V _{cc}	Volume de curto-circuito	%
V _d	Volume de fluxo estagnado ou volume morto	%
V _f	Velocidade do fluido	m/s
v _l	Velocidade de lingotamento	m/min
V _m	volume de fluxo misturado ou volume de mistura	%
V _p	volume de fluxo pistonado ou volume pistonado	%
V _{pd}	volume pistonado disperso	%
V _s	velocidade de flotação das inclusões segundo a lei de Stokes	m/s

Resumo

Nos últimos anos, as exigências de qualidade dos aços estão aumentando rapidamente. Isso vem fazendo com que o distribuidor de lingotamento contínuo seja utilizado para ajudar na remoção das inclusões do aço líquido.

A flotação de inclusões é afetada diretamente pelas condições de escoamento no distribuidor. Portanto, alterando o fluxo de fluido no distribuidor é possível melhorar a limpeza inclusionária do aço.

Para alterar o escoamento no interior de um distribuidor é comum o uso de modificadores de fluxo, também chamados de barreiras. Para projetar corretamente as barreiras é comum o uso de modelos que trabalham com água como fluido de simulação, ou seja, modelos físicos.

Nesse trabalho são apresentados resultados experimentais de visualização de escoamento e distribuição dos tempos de residência no modelo físico do distribuidor da Gerdau - Aços Finos Piratini.

Ao final do estudo pôde-se concluir que os objetivos inicialmente propostos foram alcançados. Ou seja, configurou-se uma barreira de fácil utilização no distribuidor industrial e que cria condições de fluxo favoráveis à flotação de inclusões.

1. Introdução

O distribuidor de lingotamento contínuo foi concebido, inicialmente, como tendo funções de distribuir o aço líquido para os moldes e atuar como um reservatório durante a troca de painéis, possibilitando o sequenciamento de corridas. Nos últimos anos, as crescentes e severas exigências de qualidade dos aços vem fazendo com que o distribuidor seja utilizado para ajudar na remoção das inclusões do aço líquido.

A eficiência do distribuidor em promover a flotação de inclusões requer um controle rigoroso das condições de fluxo no seu interior. Se o fluxo de metal não estiver devidamente controlado ele pode deteriorar a qualidade do aço produzido na panela.

Para controlar o escoamento de metal líquido e facilitar a flotação das inclusões no distribuidor é comum a utilização de modificadores de fluxo. Os modificadores de fluxo, também chamados de barreiras, direcionam o fluxo para superfície e aumentam o tempo médio de residência do aço no distribuidor. Desta forma as inclusões tem maiores chances de alcançar a escória do distribuidor, que por sua vez deve ter capacidade de absorvê-las.

Para otimizar o fluxo de fluido no distribuidor através do uso de barreiras são utilizadas as técnicas de modelamento físico ^{(1) a (15)} e modelamento matemático ^{(16) a (20)}.

Os modelos matemáticos simulam o comportamento do aço líquido no distribuidor utilizando a equação de Navier-Stokes para o regime turbulento. Resolvendo essa equação obtêm-se a distribuição espacial das velocidades de fluxo no interior do distribuidor.

Nos modelos físicos, a água é utilizada para simular o fluxo de aço líquido. Para simular o fluxo no distribuidor, o modelamento físico em escala plena ou escala reduzida tem sido mais utilizado que o modelamento matemático. No modelo físico um traçador é injetado ao jato de entrada da água e sua concentração é medida nas saídas. A concentração do traçador plotada contra o tempo (distribuição dos tempos de residência) torna possível calcular o tempo disponível para a flotação de inclusões (tempo médio de residência). A distribuição dos tempos de residência também possibilita que se dete

termine os volumes característicos do distribuidor (volume morto, de mistura, pistonado disperso e de curto-circuito). Se o traçador injetado no modelo físico for um corante é possível visualizar a movimentação do fluxo.

O objetivo desse trabalho é determinar uma configuração de barreiras que crie condições de escoamento favoráveis a flotação de inclusões e que seja de fácil utilização no distribuidor de lingotamento contínuo da Gerdau – Aços Finos Piratini.

Para atingir tal objetivo várias barreiras foram testadas em um modelo físico em escala 1:1. Os resultados de visualização do escoamento e distribuição dos tempos de residência serão discutidos nesse trabalho.

2. Parte Teórica

2.1. Inclusões Não-Metálicas no Aço do Distribuidor

Como as inclusões são mais leves que o aço, elas podem ser removidas por flotação até a escória.

Em condições de fluxo laminar a velocidade de flotação das inclusões (V_s) no aço líquido pode ser calculada segundo a lei de Stokes dada pela Equação 1.

$$V_s = g \cdot (\rho_f - \rho_p) \cdot d^2 / (18 \cdot \mu) \quad \text{Equação 1}$$

Onde d é o diâmetro da inclusão, ρ_p é a densidade da inclusão, ρ_f é a densidade do fluido, μ é a viscosidade molecular do fluido e g é a aceleração da gravidade.

A Figura 2 mostra a velocidade de flotação de inclusões no aço líquido. Percebe-se que uma inclusão de 100 microns possui uma velocidade de flotação de aproximadamente 0,3 cm/s, o que representa 18 centímetros em 1 minuto.

Quando o fluido está em movimento a velocidade de flotação da inclusão calculada pela lei de Stokes terá um acréscimo vertical dado pela velocidade do fluido (V_f), como mostra a Figura 1.

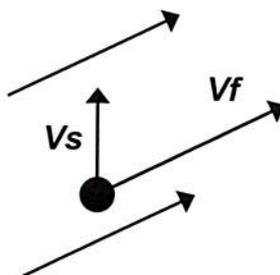


Figura 1. Velocidade de flotação da inclusão sob efeito da velocidade do fluido (V_f).

Formula de acordo com G.G.Stokes: + para $Re < 0.03$
 Formula de acordo com C.W.Oseen: o para $Re < 2$
 Formula de acordo com W.Gumz: • I para $0.6 < Re < 8$
 II para $8 < Re < 300$
 III para $300 < Re < 2500$

--- Extrapolação além do intervalo validado

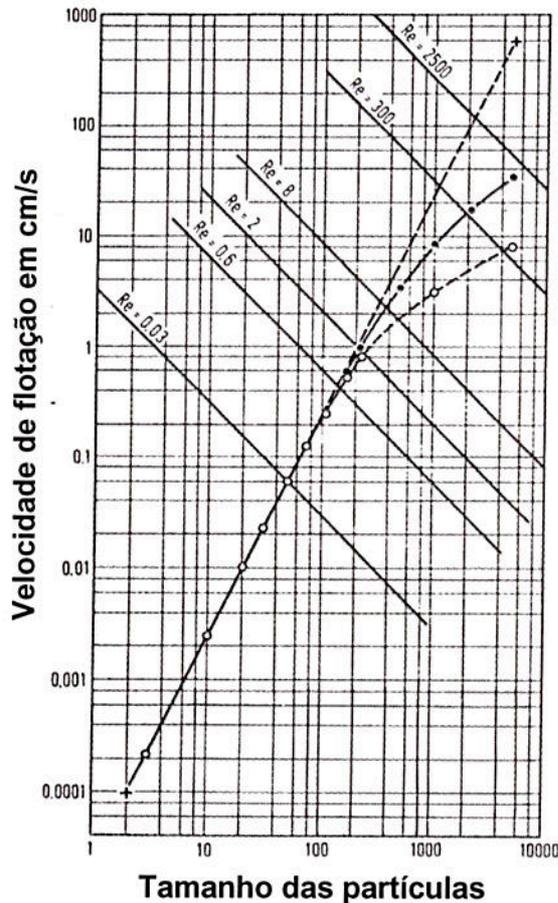


Figura 2. Velocidade de flotação de inclusões de alumina no aço líquido (segundo Knüppel, et al.). Figura retirada do livro: Continuous Casting of Steel de Hans Schrewe⁽²¹⁾.

2.1.1. Aumento do Nível de Inclusões no Distribuidor

Durante sua transferência pelo distribuidor, o aço líquido interage com os refratários, escória e atmosfera. Onde essas interações são adequadamente bem controladas, o distribuidor pode funcionar como um “refinador” contínuo; mas onde elas não estiverem sob controle o distribuidor pode funcionar como um contínuo contaminador do aço.

Segundo Kimura et al.⁽²²⁾ os principais fatores que contribuem para o aumento do nível de inclusões no aço do distribuidor são:

1. Passagem de escória da panela para o distribuidor;
2. Arraste de escória do distribuidor;
3. Reoxidação do aço líquido;

A passagem de escória da panela para o distribuidor se dá devido a formação de vórtice como mostra a Figura 3a.

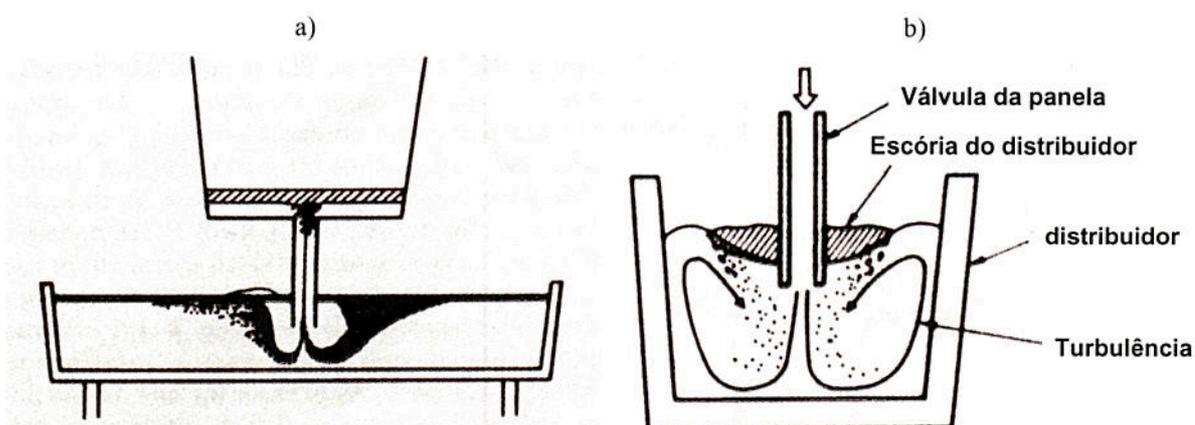


Figura 3. Desenhos esquemáticos mostrando a) passagem de escória da panela para o distribuidor e b) emulsificação da escória do distribuidor durante a troca da panela.⁽²³⁾

O arraste de escória do distribuidor durante a troca da panela é mostrada na Figura 3b. Durante a troca de panela, o nível do distribuidor desce. O aço da próxima panela inicia o reenchimento do distribuidor com vazões superiores a vazão normal de trabalho até que o nível de trabalho seja restabelecido. O aumento da vazão aumenta a energia cinética do jato da panela, causa fluxo turbulento na região de vazamento do distribuidor, arrasta a escória do distribuidor para dentro do aço líquido e, portanto, piora a qualidade do aço⁽²³⁾.

Um exemplo de reoxidação no lingotamento contínuo é mostrado na Figura 4, onde percebe-se que o aço líquido fica exposto ao ar devido a turbulência da superfície.



Figura 4. Foto ilustrando a exposição do aço do distribuidor ao ar.⁽²⁴⁾

2.1.2. Como melhorar a Flotação de Inclusões no Distribuidor

As principais características que um distribuidor deve ter para garantir uma boa flotação de inclusões são⁽²⁵⁾:

1. Não deve existir fluxo de curto circuito no distribuidor. O fluxo de curto circuito é caracterizado por uma porção de fluido que entra e sai do distribuidor em um curto intervalo de tempo. Nesse caso as inclusões, por maiores que sejam, não terão tempo suficiente para flotar até a escória;
2. O escoamento deve permitir que a maior parte do aço mova-se próximo a superfície para que as inclusões possam ser absorvidas pela escória;
3. O volume morto deve ser minimizado, pois este reduz o tempo médio de residência do aço no distribuidor e, conseqüentemente, as inclusões terão menos tempo para flotar;
4. Aumentar o tempo médio de residência do aço no distribuidor para aumentar as chances das inclusões flotarem;
5. O volume de aço no distribuidor deve ser o maior possível. Quanto maior o volume do distribuidor maior é o tempo médio de residência do aço no seu interior;
6. Maximizar o volume de fluxo pistonado no distribuidor, pois ele garante a flotação das inclusões (o fluxo pistonado será abordado com mais detalhes no item 2.4.4);
7. A turbulência gerada pelo jato da panela deve ser isolada;
8. A escória deve ter capacidade de absorver as inclusões, ou seja, deve-se objetivar trabalhar com uma escória básica e líquida.

2.1.3. Como alterar o tempo médio de residência, os volumes característicos e a orientação do fluxo no distribuidor

A forma mais tradicional e econômica para aumentar o tempo médio de residência no distribuidor e facilitar a chegada das inclusões à escória se dá através do uso de barreiras. A Figura 5 mostra um distribuidor onde utiliza-se uma barreira com furos que variam em tamanho e orientação. A Figura 6 mostra, esquematicamente, barreiras que vão do fundo do distribuidor até uma altura inferior ao nível de fluido (“dams”) e barreiras que obstruem o fluxo desde a superfície do fluido até uma altura acima do fundo do distribuidor (“weirs”).

A Figura 7 mostra o efeito das barreiras sobre o fluxo em um distribuidor com dois veios modelado por Schade et al.⁽⁶⁾.

A combinação de barreiras mostrada na Figura 6 e na Figura 7 é muito utilizada pois cria um fluxo ascendente que favorece a flotação das inclusões.

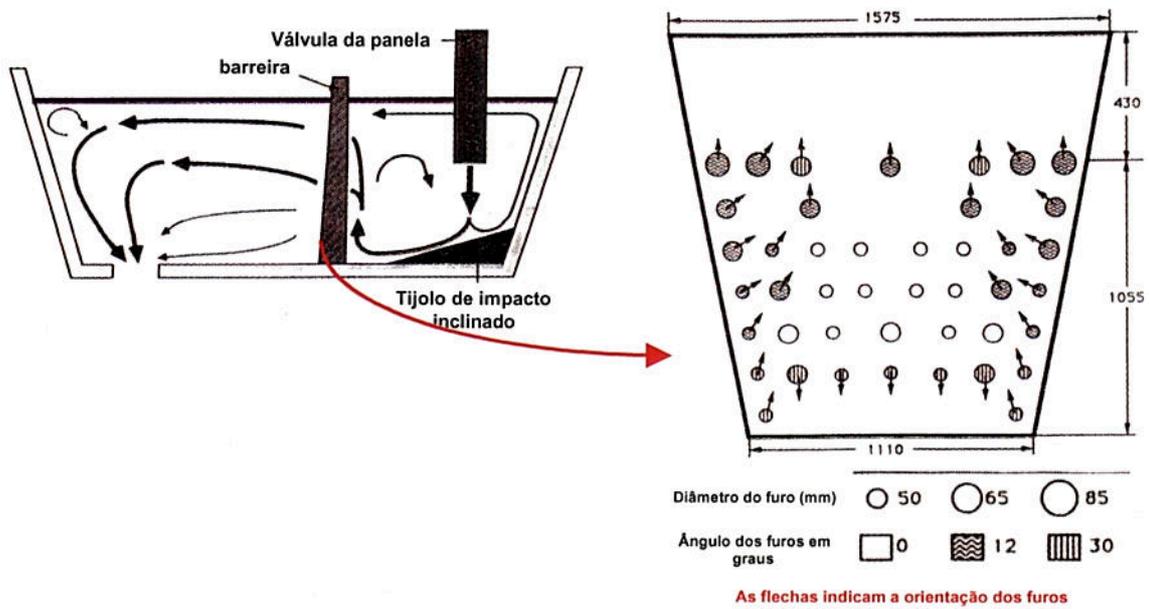


Figura 5. Barreira com furos utilizada para melhorar a flotação de inclusões no interior do distribuidor da Bethlehem Steel Corporation ⁽²⁶⁾.

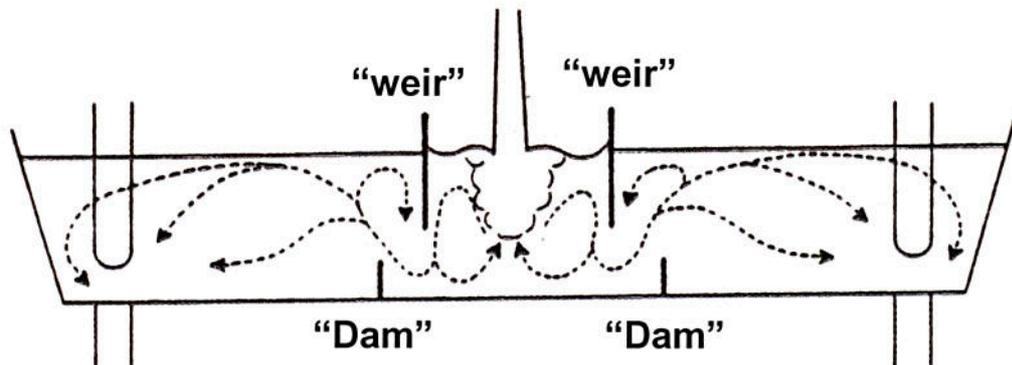


Figura 6. Uso de barreiras do tipo “dam” e “weir”.⁽¹⁾

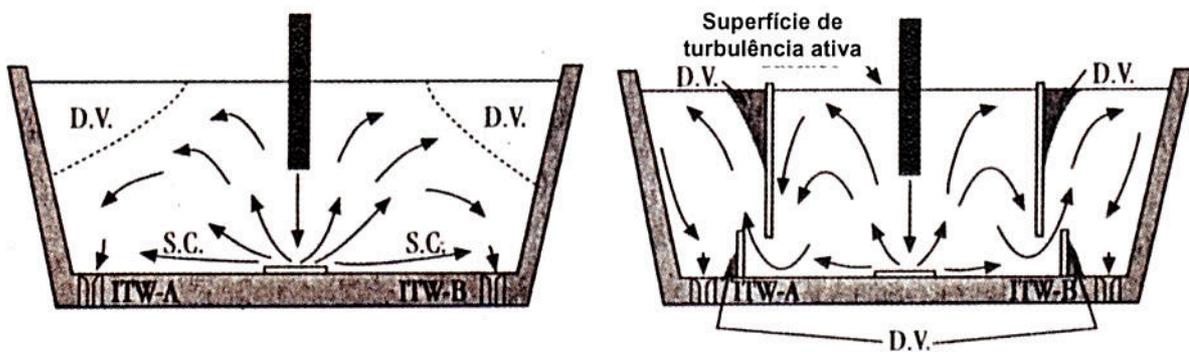


Figura 7. Efeito das barreiras sobre o fluxo no interior de um distribuidor com dois veios.⁽⁶⁾

2.2. Método mais utilizado para estudar o escoamento e os tempos de residência no distribuidor

Desde o início da década de 70 ⁽²⁷⁾ e ⁽²⁸⁾ os modelos físicos tem sido utilizados como uma ferramenta prática, efetiva e de baixo custo para testar o efeito de barreiras sobre a flotação de inclusões. Os modelos físicos de distribuidores são construídos com paredes de acrílico e utilizam a água como fluido de simulação. Utiliza-se a água pois esta é de fácil manuseio, representa de forma realística o comportamento do aço líquido e possibilita que sejam feitas medições de maneira mais fácil e com um baixo custo.

2.3. Modelamento Físico do Fluxo de Aço no Distribuidor

2.3.1. Princípios do Modelamento Físico

Para satisfazer a necessidade de que o modelo físico represente, o mais fielmente possível, o comportamento do fluxo no distribuidor industrial, vários critérios de similaridade devem ser satisfeitos. Segundo Heaslip et al. ⁽²⁹⁾ os principais critérios são

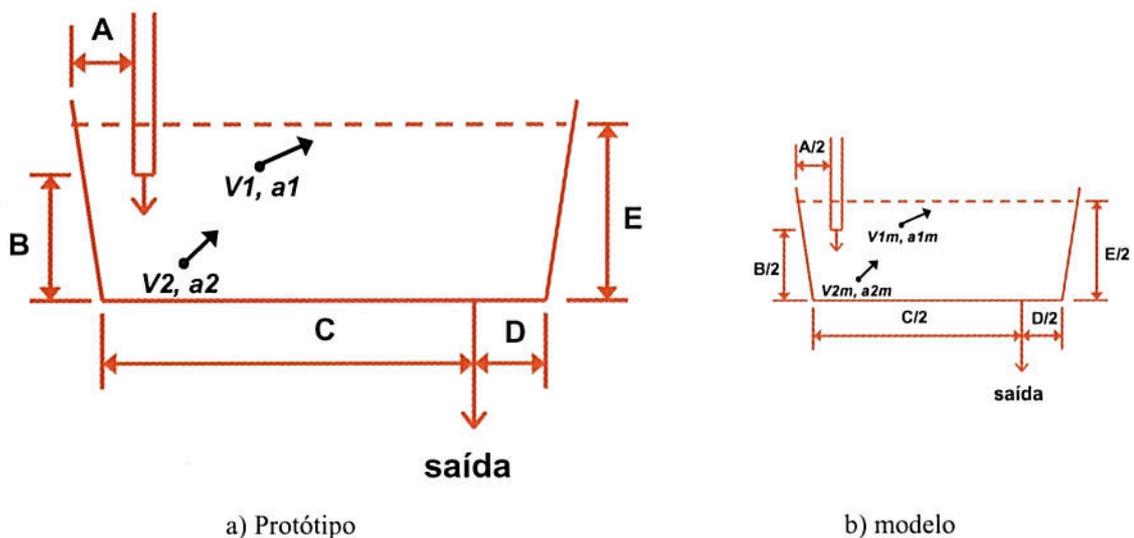
- Similaridade Geométrica
- Similaridade Cinemática
- Similaridade Dinâmica
- Similaridade Térmica

2.3.1.1. Similaridade Geométrica

Esse critério refere-se ao fator de escala (λ). A similaridade geométrica requer que a razão entre todos os comprimentos sejam mantidas constantes. Uma equivalência de um para um é atingida em modelos a água em escala plena, os quais tem a vantagem de incorporar de forma direta novos modificadores de fluxo. Normalmente, modelos em escala plena ⁽¹⁾, ⁽⁶⁾, ⁽⁹⁾, ⁽²⁹⁾ e ⁽³⁰⁾ são preferidos para utilização em laboratórios industriais, enquanto que modelos reduzidos são mais utilizados em laboratórios de institutos de pesquisas e universidades ⁽²⁾, ⁽³⁾, ⁽⁴⁾, ⁽⁵⁾ e ⁽⁷⁾. Contudo, modelos em escala plena requerem grandes quantidades de água e o custo de construção é bastante alto. Modelos em escala reduzida, que normalmente são construídos em escala 1:3 ou 1:4, podem ser construídos com um custo comparativamente bem menor. Outro benefício do modelamento em escala reduzida é a maior rapidez na obtenção de resultados ⁽²⁴⁾.

2.3.1.2. Similaridade Cinemática e Dinâmica

A similaridade cinemática é atingida quando as linhas de fluxo do modelo são geometricamente similares as linhas de fluxo do distribuidor industrial (protótipo). Isso significa dizer que as razões entre as velocidades correspondentes, bem como entre as acelerações, devem ser as mesmas através do escoamento (exemplo mostrado na Figura 8). Pode-se concluir, então, que para garantir a similaridade cinemática entre o modelo e protótipo deve existir similaridade geométrica e a magnitude das forças em locais correspondentes em cada sistema deve possuir uma relação fixa; esse tipo de semelhança denomina-se similaridade dinâmica.



$$v_1/v_{1m}=v_2/v_{2m} \text{ e } a_1/a_{1m}=a_2/a_{2m}$$

Figura 8. Equivalência entre as velocidades (v) e as acelerações (a) no protótipo e num modelo com o fator de escala (λ) 1:2.

Tabela 1. Simplificações consideradas na análise do fluxo no distribuidor.

1. Fluxo isotérmico;
2. Fluxo sem a presença de qualquer fase gasosa normalmente gerada pelo arraste de ar promovido pelo jato aberto da panela ou pela injeção proposital de algum gás como o argônio;
3. Jato da panela imerso no distribuidor; caso o jato não esteja imerso a força de inércia deve romper as forças de tensão superficial fazendo com que esta última torne-se relevante no modelamento do distribuidor.

Sob as condições citadas na Tabela 1 as forças que devem ser consideradas no modelamento físico do fluxo no distribuidor são as forças de inércia, gravitacional e viscosa. Conforme descrito por Heaslip et al. ⁽²⁹⁾:

1. A força de inércia atua no jato da panela, na propagação do mesmo ao longo do distribuidor e nas ondulações que são geradas na superfície livre do distribuidor;
2. A força gravitacional atua no jato descendente da panela e no fluxo que passa através dos orifícios de saída do distribuidor.
3. A força viscosa influencia na propagação, ao longo do distribuidor, do jato proveniente da panela.

A razão entre as forças gravitacional, de inércia e viscosa geram os números adimensionais de Reynolds e de Froude, definidos pelas equações apresentadas abaixo.

Tabela 2. Definição dos números de Froude e de Reynolds

$1) \text{ Número de Froude (Fr)} = \frac{v^2}{g \cdot L} = \frac{\text{Força de Inércia } (\rho \cdot v^2 \cdot L^2)}{\text{Força gravitacional } (\rho \cdot L^3 \cdot g)}$
$2) \text{ Número de Reynolds (Re)} = \frac{v \cdot L \cdot \rho}{\mu} = \frac{\text{Força de Inércia } (\rho \cdot v^2 \cdot L^2)}{\text{Força viscosa } (\mu \cdot v \cdot L)}$

Onde:

v é a velocidade do fluido (m/s)

g é a aceleração da gravidade (m/s²)

L é o comprimento característico do sistema (m)

μ é a viscosidade molecular absoluta do fluido (kg/m/s)

ρ é a densidade do fluido (kg/m³)

Conforme mostra a Tabela 3 para satisfazer a similaridade simultânea entre os números de Reynolds (Re) e de Froude (Fr) é necessário utilizar um modelo em água construído em escala plena. O Re do modelo em escala plena é praticamente igual ao Re do distribuidor industrial pois a viscosidade cinemática da água a 20°C é muito semelhante a viscosidade cinemática do aço a 1600°C (Tabela 4). A viscosidade cinemática é a razão entre a viscosidade absoluta e a densidade do líquido.

Tabela 3. Cálculo dos números de Reynolds e de Froude para o distribuidor industrial (aço a 1600°C) e para o modelo em água (20°C). Valores normalizados em relação ao valor calculado para o aço.

Número	Distribuidor industrial	Modelo físico em escala plena
Reynolds	1	1,1
Froude	1	1,0

Tabela 4. Propriedades físicas da água a 20°C e do aço a 1600°C.

Propriedade	Água (20°C)	Aço (1600°C)
Viscosidade absoluta (kg.m/s)	$1 \cdot 10^{-3}$	$6,4 \cdot 10^{-3}$
Densidade (kg/m ³)	$1 \cdot 10^3$	$7,08 \cdot 10^3$
Viscosidade cinemática (m ² /s)	$1 \cdot 10^{-6}$	$0,9 \cdot 10^{-6}$

No caso de modelos reduzidos, os pesquisadores têm optado por satisfazer a similaridade entre os números de Froude. Nesse caso as equações que determinam as vazões de saída (Qs) e as vazões de entrada (Qe) do modelo são:⁽³¹⁾

$$Q_s \text{ do modelo} = Q_s \text{ protótipo} \times \lambda^{5/2}$$

$$Q_e \text{ do modelo} = Q_e \text{ protótipo} \times \lambda^{5/2}$$

Onde λ é o fator de escala.

No modelamento em escala reduzida, ao desconsiderar o número de Reynolds, considera-se que a força de inércia é muito superior a força viscosa. De fato isso ocorre em regimes turbulentos. No entanto, em regimes laminares a força viscosa é equivalente a força de inércia e, conseqüentemente, o número de Reynolds passa a ser relevante. Segundo Sahai e Burval⁽³²⁾, para baixas velocidades de lingotamento o regime no distribuidor deixa de ser predominante turbulento para ser laminar. Nesse casos, portanto, o número de Reynolds deve ser considerado.

Sahai e Burval⁽³²⁾ também consideram que em condições isotérmicas de fluxo no interior do distribuidor a força gravitacional não interfere no fluxo de fluido. Portanto o uso do número de Froude como um critério de similaridade é desprezível. Os referidos autores propõe que em regimes turbulentos a similaridade deve basear-se na equivalência do número de Reynolds turbulento.

$$\text{Número de Reynolds turbulento (Ret)} = \frac{v \cdot L \cdot \rho}{\mu_{\text{eff}}} = \frac{\text{Força de Inércia } (\rho \cdot v^2 \cdot L^2)}{\text{Força viscosa efetiva } (\mu_{\text{eff}} \cdot v \cdot L)}$$

Onde:

v é a velocidade do fluido (m/s)

L é o comprimento característico do sistema (m)

ρ é a densidade do fluido (kg/m³)

μ_{eff} é a viscosidade efetiva que representa a soma da viscosidade molecular e viscosidade turbulenta. (kg/m/s)

O número de Reynolds turbulento é similar ao número de Reynolds convencional. A diferença é que o primeiro considera a viscosidade efetiva e o segundo considera viscosidade molecular. O termo viscosidade efetiva refere-se a soma da viscosidade molecular e da viscosidade turbulenta. Sendo que a viscosidade turbulenta é uma função do fluxo e não é uma propriedade do fluido.

Sahai e Burval⁽³²⁾ comprovaram que em um distribuidor em regime turbulento, o termo $VL\rho$ é proporcional a viscosidade efetiva (μ_{eff}) para um grande intervalo de vazões e tamanhos do distribuidor, tanto para a água como para o aço. Em outras palavras, para o mesmo fluido e tamanho do distribuidor, assim que a velocidade aumenta a viscosidade efetiva também aumenta na mesma proporção mantendo o número de Reynolds turbulento constante.

Portanto, no modelamento isotérmico do fluxo no distribuidor, que é geralmente turbulento, a similaridade geométrica deve ser mantida e o modelo pode ser operado a qualquer vazão dentro do regime turbulento⁽³²⁾. Desta forma, o critério de similaridade utilizando o número de Reynolds turbulento é naturalmente satisfeito se o distribuidor opera no regime turbulento.

2.3.1.3. Similaridade Térmica

No passado a similaridade térmica era desconsiderada no modelamento do fluxo no interior do distribuidor, pois acreditava-se que os gradientes térmicos eram pequenos e as forças convectivas eram irrelevantes^{(1) e (29)}. Contudo estudos recentes^{(33) e (34)} têm mostrado que fenômenos térmicos que ocorrem no distribuidor podem alterar significativamente o fluxo de fluido. O caráter não isotérmico do fluxo no distribuidor é muito importante, por exemplo, no sequenciamento de corridas, quando um aço mais quente ou mais frio proveniente da panela mistura-se com o aço do distribuidor. A diferença de densidades gerada a partir da diferença de temperaturas faz com que surjam forças de empuxo. São estas forças que fazem com que o perfil de fluxo sob condições não-isotérmicas seja diferente do perfil de fluxo gerado em condições isotérmicas.

Portanto, para simular condições não-isotérmicas de fluxo no modelamento físico deve-se considerar as ações da força de empuxo (convecção natural), da força de inércia (convecção forçada) e da força gravitacional^{(35) e (36)}. A razão entre a força de inércia e a força gravitacional dá origem ao número de Froude (ver Tabela 2, página 10) e a razão entre a força de empuxo e a força de inércia dá origem ao número Gr/Re^2 , sendo:

$$\frac{Gr}{Re^2} = \frac{g \cdot L \cdot \beta \cdot (T_o - T_\infty)}{v^2}$$

Onde: Re é o número de Reynolds
 Gr é número de Grashof
 g é a aceleração da gravidade (m/s²)
 L é o comprimento característico (m)
 β é o coeficiente de expansão volumétrico (°C⁻¹)
 T_o é a temperatura do líquido da panela (°C)
 T_∞ é a temperatura do líquido do distribuidor (°C)
 v é a velocidade do fluido (m/s)

Considerando o número de Gr/Re² e o número de Froude, Lowry e Sahai⁽³³⁾ mostraram que a diferença de temperatura na água do modelo deve ser 1,33 maior do que a diferença de temperaturas encontrada no aço. Veja a equação abaixo.

$$(T_o - T_\infty)_m = 1,33 \times (T_o - T_\infty)_p \quad \text{Equação 2}$$

Onde: m representa o modelo
 p representa o protótipo (distribuidor industrial)
 T_o é a temperatura do líquido mais quente (°C)
 T_∞ é a temperatura do líquido mais frio (°C)

Aplicando a *Equação 2*, para simular uma diferença de 30°C na temperatura do aço líquido em um modelo que trabalha com água a 10°C, deve-se adicionar água a 50°C como mostra, esquematicamente, a Figura 9.

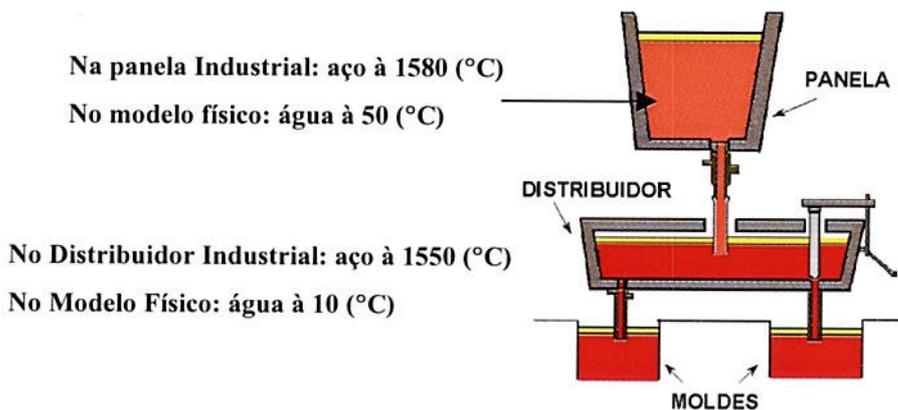


Figura 9. Desenho esquemático mostrando a diferença de temperatura entre o aço da panela e o aço que está no distribuidor. Também são mostradas as temperaturas equivalentes para simulação no modelo em água.

Como visto até agora, a simulação das condições de fluxo não-isotérmicas no modelo físico, levam em consideração apenas a diferença entre a temperatura do aço da panela e a temperatura do aço do distribuidor. Para levar em consideração os efeitos das perdas térmicas para o ambiente (condução de calor através das paredes e radiação pela superfície livre do

distribuidor) é preciso utilizar o modelamento matemático como ferramenta de simulação.^{(34),(37) e (38)}

2.3.2. Visualização do Fluxo no modelo Físico

O fluxo no modelo físico pode ser facilmente estudado pela observação da movimentação de um corante na água (Figura 10). Os corantes mais utilizados são o permanganato de potássio^{(1), (3), (9), (10), (15) e (39)} e o azul de metileno^{(2), (5) a (8), (11) e (17)}. A movimentação do corante pode ser facilmente registrada através de filmagens ou seqüências de fotografias. Isso permite que se avalie a eficiência de modificadores de fluxo sobre a flotação de inclusões. Obviamente um fluxo que passa próximo a superfície facilita a chegada das inclusões à escória. Como a velocidade de flotação das inclusões é uma resultante da velocidade de Stokes e da velocidade do próprio fluido, a flotação é favorecida por uma orientação ascendente do fluxo (veja página 3, Figura 1).

Regiões onde a velocidade de fluxo é bastante lenta a ponto de ser considerada estagnada (volume morto) são facilmente identificadas através de ensaios com injeção de corante no modelo. Regiões de volume morto demoram para ser preenchidas por corante como mostra a Figura 10.



Figura 10. Visualização da movimentação de um corante no interior de um modelo físico estudado por Singh e Korla⁽⁵⁾. Fotografias tiradas a 15s (a) e 45 s (b) após o instante de injeção do traçador.

2.4. Determinação da Curva de Distribuição dos Tempos de Residência

O tempo de residência teórico (t_r) do aço líquido no interior do distribuidor é facilmente calculado de acordo com a Equação 3.

$$t_r = \frac{V}{Q_s} \quad \text{Equação 3}$$

Onde: t_r é dado em segundos
 V é o volume de líquido do distribuidor em m^3
 Q_s é a vazão de saída do distribuidor em m^3 / s

Como uma porção de fluido pode seguir diversos caminhos desde a entrada até a saída do distribuidor (Figura 11), existe uma distribuição dos tempos de residência (DTR) ao invés de um valor único. A Figura 12 mostra a distribuição dos tempos de residência em um distribuidor onde o tempo de residência teórico é igual a 1080s.

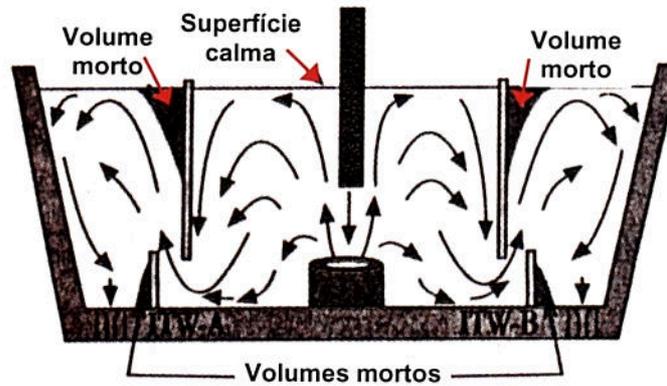


Figura 11. Diferentes trajetórias do fluido em um distribuidor com barreiras.⁽⁶⁾

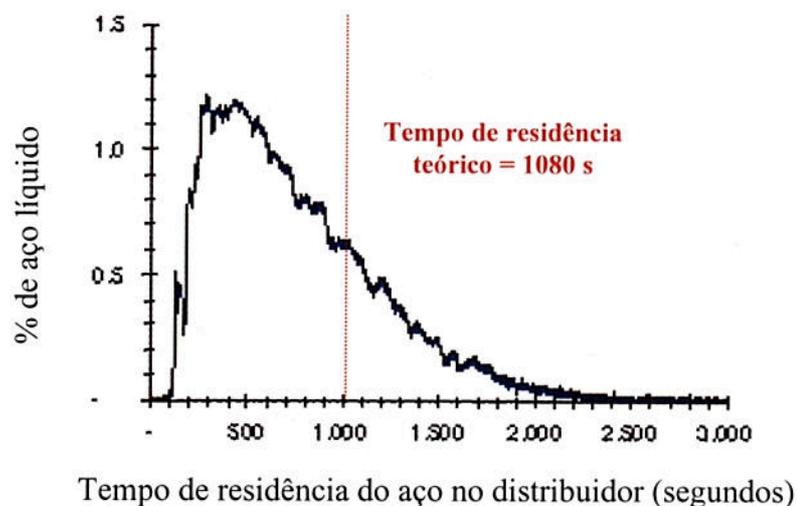
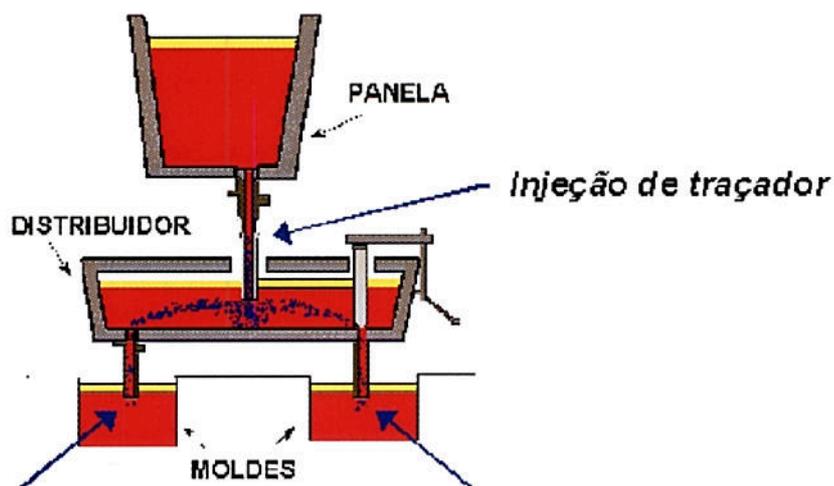


Figura 12. Gráfico mostrando a distribuição dos tempos de residência do aço no interior de um distribuidor cujo o tempo de residência teórico é igual a 1080 segundos.

Para determinar a distribuição dos tempos de residência é preciso marcar uma porção de fluido que entra no distribuidor e, de alguma forma, identificá-la nas saídas. Para tanto, é comum adicionar um traçador ao jato de entrada do distribuidor e medir sua concentração nas saídas, como mostra esquematicamente a Figura 13. A técnica mais utilizada para a adição do traçador é a adição em pulso que consiste na adição de traçador durante um curto intervalo de tempo se comparado ao tempo de residência teórico.



Medições da concentração de traçador nas saídas das válvulas

Figura 13. Desenho esquemático representando um ensaio para determinar a distribuição dos tempos de residência do aço líquido no interior de um distribuidor de lingotamento contínuo.

Nos modelos em água de distribuidores os traçadores mais utilizados são soluções a base de ácidos (H_2SO_4 ⁽³⁹⁾ ou HCl ^{(8), (40)}), sais ($NaCl$ ⁽¹⁹⁾ ou KCl ^{(4), (20) e (41)}) ou corantes (azul de metileno^{(2) e (17)} ou permanganato de potássio^{(1), (3) e (9)}). No entanto, as soluções a base de sal não são indicadas pois possuem uma densidade bastante diferente à da água. Com isto pode-se modificar o fluxo no interior do modelo e conseqüentemente alterar-se a distribuição dos tempos de residência^{(42) e (43)}.

Quando utiliza-se um traçador a base de um ácido ou de um sal é comum determinar-se a concentração nas saídas do distribuidor através de medições de condutividade^{(19), (20), (39), (40) e (41)}, enquanto que quando é utilizado algum corante mede-se a concentração através da absorvância^{(1), (2) e (3)}. Tanto as variações de condutividade como as variações de absorvância são diretamente proporcionais a concentração de traçador conforme mostra a Figura 14.

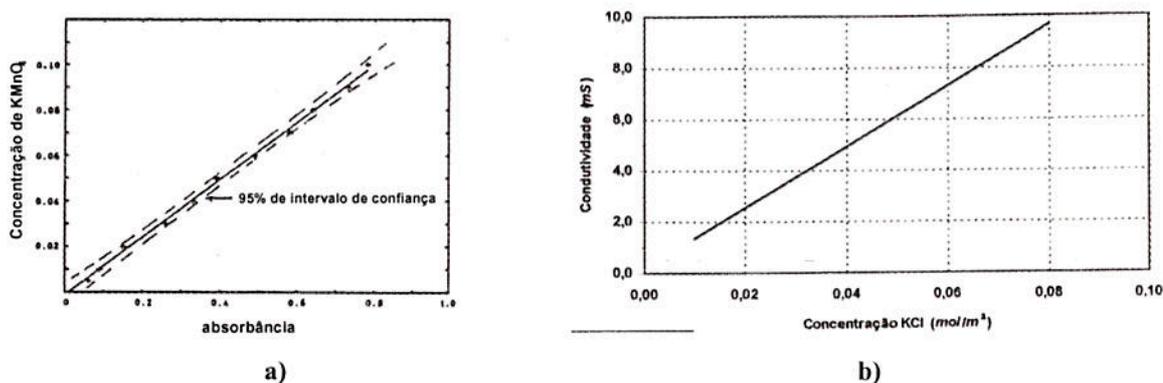


Figura 14. a) Relação entre Absorvância e a concentração de $KMnO_4$ ⁽¹⁾ na água. b) relação entre a concentração de KCl e a condutividade da água⁽⁴⁴⁾.

Na literatura há uma série de trabalhos que divulgam o resultado de testes industriais utilizando cobre como traçador do aço líquido^{(3), (19) e (20)}. Normalmente testes desse tipo não são utilizados para encontrar a melhor barreira a ser utilizada no distribuidor, mas sim para validar modelos físico ou matemáticos. A Figura 15 compara os resultados obtidos em testes industriais utilizando cobre e resultados de modelamento físico e matemático.

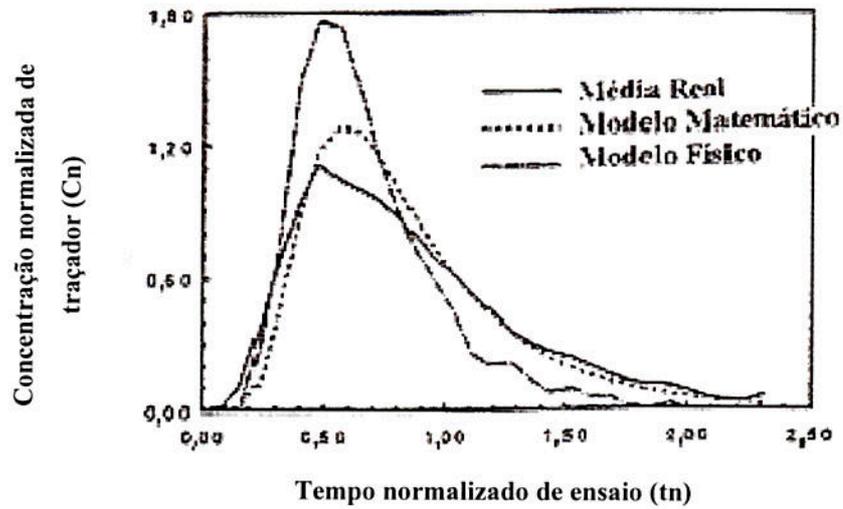


Figura 15. Comparação entre as curvas DTR na planta industrial com o uso de Cu (média real), no modelo físico utilizando uma solução a base de NaCl e via modelamento matemático.⁽¹⁹⁾

2.4.1. Curvas DTR normalizadas

As curvas DTR normalmente são apresentadas de forma normalizada, ou seja, considerando os valores de tempo e concentração normalizados; respectivamente t_n e C_n calculados segundo a Equação 4 e a Equação 5. Desta forma é possível comparar curvas DTR de distribuidores diferentes ou de um mesmo distribuidor, traçadas a partir de condições diferenciadas de volume (V), vazão (Q_s) ou quantidade de traçador injetado (q).

$$t_n = \frac{t}{t_r} \quad \text{Equação 4}$$

$$C_n = \frac{c}{q/V} \quad \text{Equação 5}$$

Onde: t_n é o tempo normalizado
 C_n é a concentração de traçador normalizada
 t representa o tempo transcorrido (s) após o instante de injeção do traçador ;
 t_r representa o tempo de residência teórico (s) definido na Equação 3;
 c representa a concentração de traçador medida na saída do distribuidor (kg/m^3);
 q representa a quantidade de traçador injetado (kg);
 V é igual ao volume de líquido do distribuidor (m^3)

Percebe-se que o denominador da Equação 5 representa a concentração máxima que o traçador poderia atingir se ele fosse perfeitamente diluído em todo o volume do distribuidor.

A Figura 16 mostra um exemplo de uma curva DTR traçada a partir de valores normalizados de concentração e tempo. Na curva DTR, o tempo normalizado (t_n) igual a zero representa o momento de injeção do traçador.

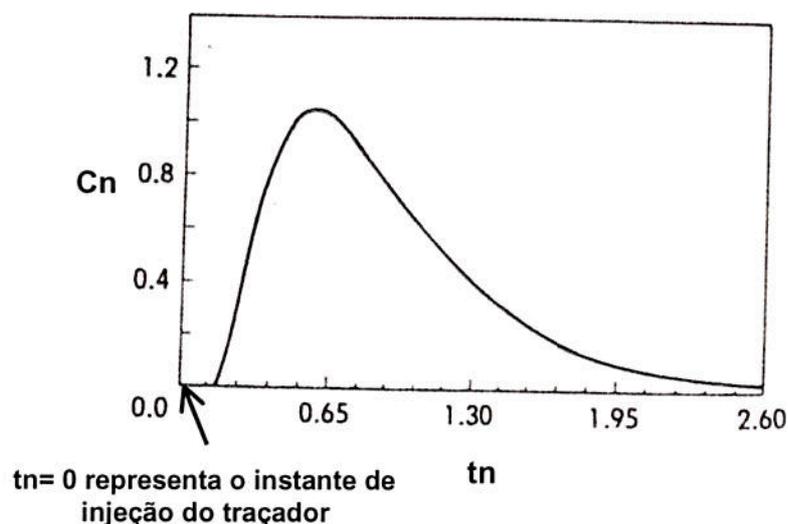


Figura 16. Típica curva de distribuição dos tempos de residência para o fluido do distribuidor⁽²⁾. Onde: t_n representa o valor normalizado de tempo após o instante de injeção de traçador (Equação 4) e C_n representa o valor normalizado de concentração de traçador (Equação 5).

2.4.2. Área sob a curva DTR

Observando a Figura 17 pode-se dizer que o volume de fluido (v_f) que passa pelo orifício de saída do distribuidor no intervalo de tempo Δt é dado pela Equação 6 .

$$v_f = Q_s \cdot \Delta t \quad \text{Equação 6}$$

, onde Q_s representa a vazão de saída do distribuidor.

A quantidade de traçador que sai do distribuidor (q_s) no intervalo de tempo Δt pode ser calculada a partir da Equação 7.

$$q_s = c \cdot v_f \quad \text{Equação 7}$$

Onde c é o valor médio de concentração de traçador medido: na saída do distribuidor e durante o intervalo de tempo Δt (Figura 17).

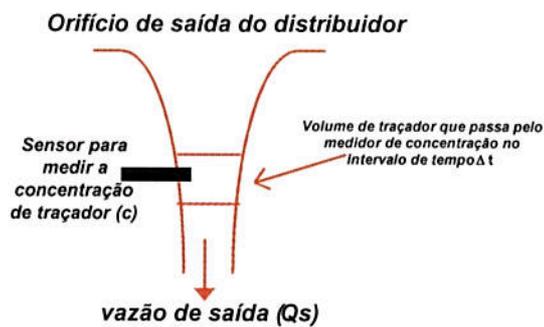


Figura 17. Desenho esquemático mostrando a medição da concentração de traçador na saída do distribuidor.

Substituindo a Equação 6 na Equação 7, tem-se:

$$q_s = c \cdot Q_s \cdot \Delta t \quad \text{Equação 8}$$

Para saber a quantidade total (q) de traçador que passou pela saída do distribuidor durante todo o ensaio DTR faz-se o seguinte cálculo:

$$\sum_{t=0}^{t=\infty} q_s = q = \sum_{t=0}^{t=\infty} (c \cdot Q_s \cdot \Delta t) \quad \text{Equação 9}$$

Como $Q_s = V / t_r$ (Equação 3) tem-se:

$$\sum_{t=0}^{t=\infty} \left(c \cdot V \cdot \frac{\Delta t}{t_r} \right) = q \quad \text{Equação 10}$$

Ou ainda,

$$\sum_{t=0}^{t=\infty} \left(\frac{c \cdot V}{q} \cdot \frac{\Delta t}{t_r} \right) = 1 \quad \text{Equação 11}$$

Como a concentração normalizada de traçador (C_n) é dada pela expressão $C_n = c \cdot V / q$ (Equação 5) e o tempo normalizado (t_n) é dado pela relação t/t_r (Equação 4), tem-se que:

$$\sum_{t_n=0}^{t_n=\infty} \left(C_n \cdot \Delta t_n \right) = 1 \quad \text{Equação 12}$$

Logo, pela Equação 12, a área sob a curva DTR normalizada (Figura 16) é igual a 1.

2.4.3. Normalização da Curva DTR a partir de dados de condutividade

Como é descrito no capítulo 2.4, a concentração de traçador pode ser determinada a partir de medições de condutividade da água no orifício de saída do modelo físico.

A Equação 13 mostra que a concentração de traçador é proporcional a condutividade relativa ($D - D_0$).

$$c = A \cdot (D - D_0) \quad \text{Equação 13}$$

Onde: D é a condutividade medida após o instante de injeção de traçador (mS/m);
 D_0 é a condutividade inicial da água no modelo (mS/m)
 A é a constante da reta (kg/m²/mS)
 c é a concentração calculada de traçador (kg/m³).

Substituindo a Equação 13 na Equação 11 tem-se:

$$\sum_{t=0}^{t=\infty} \left(\frac{A \cdot (D - D_0) \cdot V}{q} \cdot \frac{\Delta t}{t_r} \right) = \sum_{t=0}^{t=\infty} \left(K \cdot (D - D_0) \cdot \frac{\Delta t}{t_r} \right) = 1 \quad \text{Equação 14}$$

Onde K (coeficiente de calibração de um ensaio DTR) é uma constante do ensaio DTR e é dado pela Equação 15.

$$K = \frac{A \cdot V}{q} \quad \text{Equação 15}$$

Onde: K é o coeficiente de calibração de um ensaio DTR (m/mS)
 A é a constante da reta que define a relação entre concentração e diferença de condutividades (kg/m²/mS)
 q é a quantidade de traçador adicionado (kg).
 V é o volume de líquido do distribuidor (m³)

Pela Equação 14 o valor de K pode ser facilmente calculado através da expressão:

$$K = \frac{tr}{\sum_{tn=0}^{tn=\infty} (D - D_0) \cdot \Delta t} \quad \text{Equação 16}$$

Como $\Delta t_n = \Delta t / tr$, igualando a Equação 14 a Equação 12 tem-se que:

$$\sum_{tn=0}^{tn=\infty} (C_n \cdot \Delta t_n) = \sum_{tn=0}^{tn=\infty} (K \cdot (D - D_0) \cdot \Delta t_n)$$

=

Ou seja, sabendo-se o valor de K, a concentração normalizada (Cn) pode ser facilmente calculada através da expressão:

$$C_n = K \cdot (D - D_0) \quad \text{Equação 17}$$

Esta forma de calcular Cn (Equação 17) torna-se bastante prática se não souber-se a quantidade de traçador adicionado no ensaio DTR ou a constante “A” (Equação 13) que define a correlação entre a condutividade e a concentração de traçador.

2.4.4. Interpretação das curvas DTR

Segundo Szekely e Themelis⁽⁴⁵⁾ o comportamento do fluxo no interior do distribuidor pode ser representado por um modelo chamado de modelo de mistura. O modelo de mistura

(Figura 18) nos indica que o volume total do distribuidor é composto por: um volume de fluxo misturado (volume de mistura), um volume de fluxo pistonado (volume pistonado) e um volume de fluxo estagnado (volume morto).

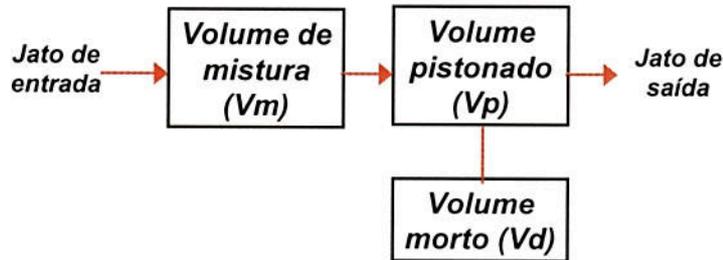


Figura 18. Desenho esquemático que representa o modelo de mistura utilizado para interpretar o comportamento de fluxo no interior do distribuidor .

No volume de mistura o traçador injetado é dispersado instantaneamente e uniformemente por todo o distribuidor. A curva DTR para um distribuidor hipotético composto exclusivamente por um fluxo misturado é mostrada na Figura 19. Observa-se que o traçador aparece na saída do distribuidor imediatamente após ter sido injetado.

Tratando-se de flotação de inclusões o volume de mistura deve ser minimizado no distribuidor, pois ele representa uma porção de fluido que movimenta-se de maneira turbulenta⁽³⁾ podendo causar arraste de escória no distribuidor⁽⁴⁶⁾.

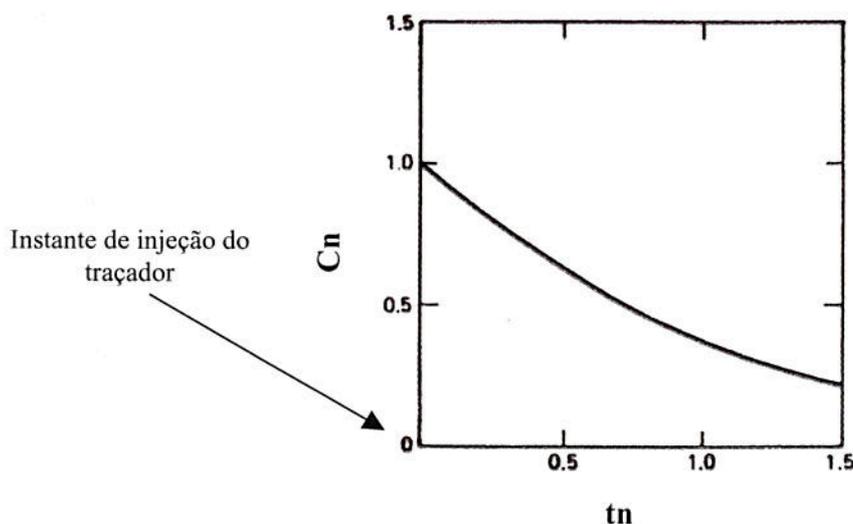


Figura 19. Curva DTR para um distribuidor hipotético formado somente por volume de mistura⁽⁴⁷⁾.

O volume pistonado é caracterizado por um fluxo que passa pelo distribuidor sem se misturar. A Figura 20 mostra, esquematicamente, o avanço de uma porção de traçador

injetada em um distribuidor constituído exclusivamente de fluxo pistonado. Nesse caso a curva DTR resultante é mostrada na Figura 21.

O volume pistonado é favorável a flotação das inclusões pois representa um fluxo uniforme que atravessa toda a seção do distribuidor gerando uma maximização do tempo de residência.

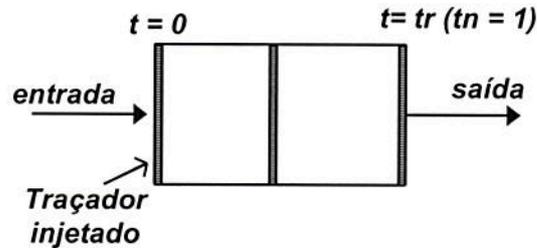


Figura 20. Desenho esquemático mostrando o comportamento do fluxo pistonado no interior do distribuidor.

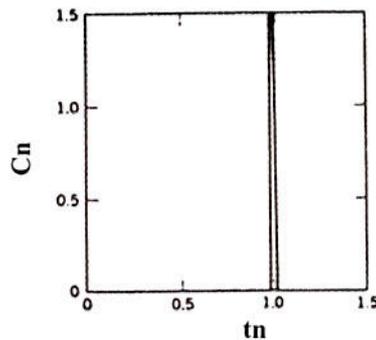


Figura 21. Curva resultante de um DTR (adição de traçador em pulso) para um distribuidor hipotético onde todo o fluxo é totalmente pistonado. ⁽⁴⁷⁾

Sahai e Ahuja ⁽²⁾ propuseram que o modelo de mistura considere, ao invés do volume pistonado, o volume pistonado disperso conforme mostra a Figura 22.

O volume pistonado disperso considera que o traçador possa difundir axialmente e longitudinalmente conforme mostra, esquematicamente, a Figura 23.

A curva DTR resultante de um fluxo exclusivamente pistonado disperso é mostrado na Figura 24.

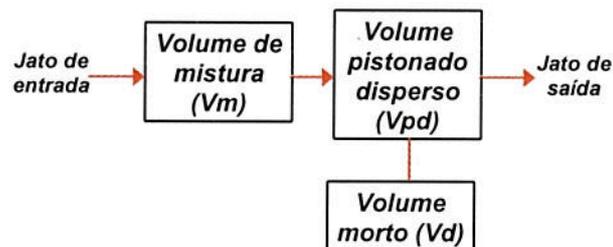


Figura 22. Desenho esquemático que representa o modelo de mistura considerando o volume pistonado disperso (Vpd)

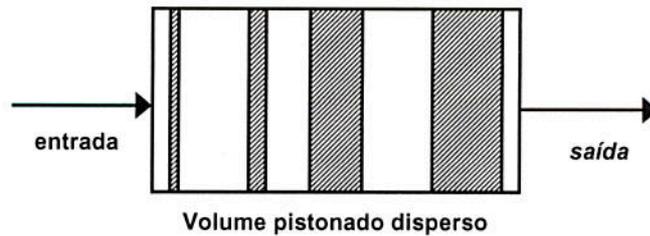


Figura 23. Desenho esquemático mostrando o comportamento do fluxo pistonado disperso no interior do distribuidor⁽²⁾.

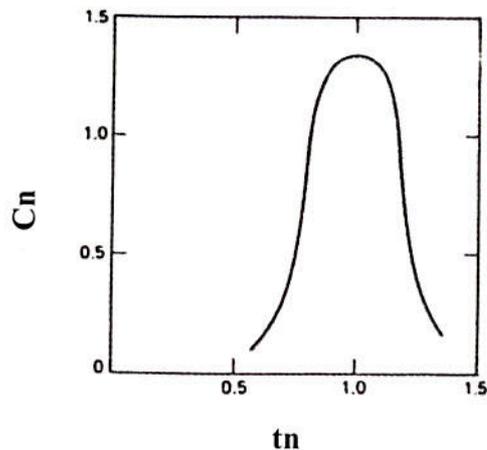


Figura 24. Curva resultante de um ensaio DTR (adição de traçador em pulso) para um distribuidor hipotético onde todo o fluxo é pistonado disperso.⁽⁴⁷⁾

O volume morto é representado pela porção de fluido que se move tão lentamente no distribuidor que pode ser considerada como estagnada. O fato de existir zonas de fluxo estagnado faz com que haja uma outra porção de fluido que se movimenta mais rapidamente no distribuidor. Pode-se dizer então, que as inclusões contidas nesse fluxo mais rápido de fluido podem não ter tempo suficiente para flotar. Além disso, o volume morto gera uma região de baixa temperatura no distribuidor. Portanto o distribuidor tem que ser projetado para possuir o menor percentual de volume morto possível.

Segundo Szekely e Themelis⁽⁴⁷⁾ a presença de volume morto na curva DTR é indicada pela presença do pico de concentração em um tempo inferior ao tempo de residência teórico. A curva DTR de um sistema composto de volume pistonado e volume morto é mostrada na curva b da Figura 25.

A Figura 25 mostra um comparativo entre as curvas DTR ideais e a curva DTR de um distribuidor real.

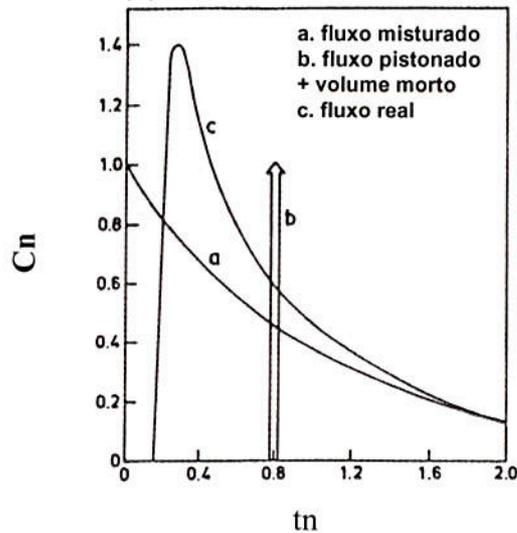


Figura 25. Vários tipos de curvas DTR. Curva a: volume de mistura. Curva b: volume pistonado + volume morto. Curva c: Fluxo real.⁽⁴⁾

Outro tipo de fluxo que pode ser observado no distribuidor é o fluxo de curto-circuito (Figura 26). Em uma situação real o volume de curto-circuito é representado pelo primeiro pico de concentração indicado na Figura 27. Esse pico de concentração indica que parte do traçador entra e sai do distribuidor em um curto intervalo de tempo.

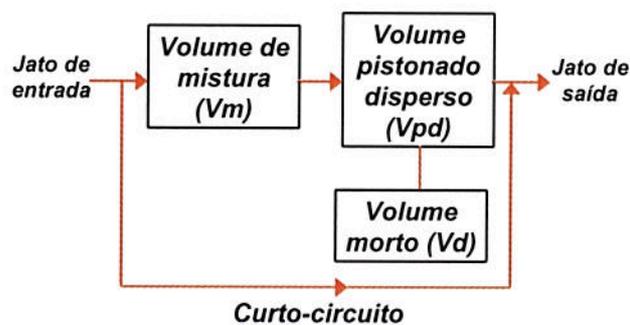


Figura 26. Desenho esquemático que representa o modelo de mistura utilizado para interpretar o comportamento de fluxo no interior do distribuidor na presença de um fluxo de curto-circuito.

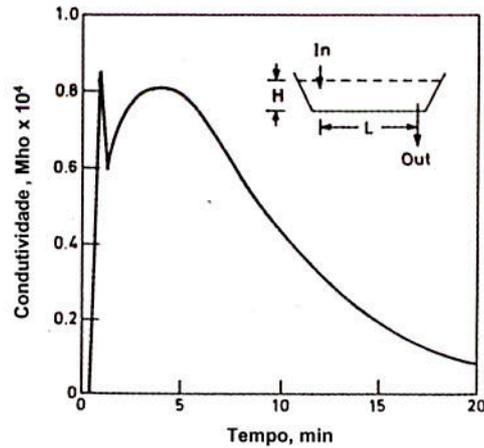


Figura 27. Curva DTR onde o primeiro pico de concentração representa a existência de um fluxo de curto-circuito (a direita do gráfico é mostrado um desenho esquemático do distribuidor analisado) ⁽⁵⁾

Segundo Singh e Koria ⁽⁴⁾ em um distribuidor hipotético onde apenas existe a presença de um fluxo de curto-circuito, todo o traçador injetado seria percebido na saída do distribuidor no mesmo momento de sua adição, como mostra esquematicamente a curva c da Figura 28.

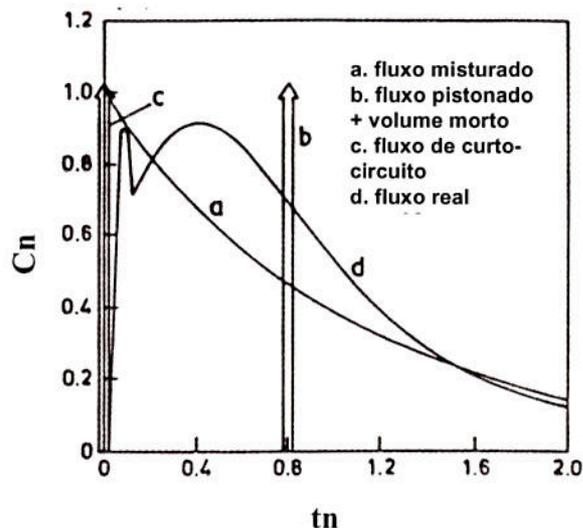


Figura 28. Vários tipos de curvas DTR. Curva a: volume de mistura. Curva b: volume pistonado + volume morto. Curva c: Fluxo de curto-circuito. Curva d: fluxo real. ⁽⁴⁾

2.4.5. Cálculo dos tempos de residência e dos volumes característicos

A partir das curvas DTR pode-se calcular o tempo de residência do aço no distribuidor e os percentuais de volume morto, de mistura, pistonado disperso e de curto-circuito ⁽⁴⁵⁾.

O tempo de residência médio é dado pela Equação 18.

$$t_n \text{ médio} = \frac{\sum_{t_n=0}^{t_n=\infty} C_n \cdot t_n \cdot \Delta t_n}{\sum_{t_n=0}^{t_n=\infty} C_n \cdot \Delta t_n} \quad \text{Equação 18}$$

Onde C_n é a concentração normalizada de traçador
 t_n é o tempo normalizado transcorrido após a injeção do traçador
 Δt_n é o intervalo de tempo normalizado transcorrido entre medidas sucessivas de concentração

Caso o intervalo de tempo normalizado (Δt_n) entre as medições de concentração seja constante, a Equação 18 simplifica-se para:

$$t_n \text{ médio} = \frac{\sum_{t_n=0}^{t_n=\infty} C_n \cdot t_n}{\sum_{t_n=0}^{t_n=\infty} C_n} \quad \text{Equação 19}$$

Para o caso de determinar-se a curva DTR a partir dos valores de condutividade, substitui-se a Equação 17 na Equação 19 e obtêm-se:

$$t_n \text{ médio} = \frac{\sum_{t_n=0}^{t_n=\infty} (D - D_0) \cdot t_n}{\sum_{t_n=0}^{t_n=\infty} (D - D_0)} \quad \text{Equação 20}$$

Onde D é a condutividade medida após o instante de injeção de traçador
 D_0 é a condutividade medida no exato instante de injeção do traçador

Caso queira-se calcular o valor do tempo médio de residência não normalizado a partir dos dados de condutividade pode-se utilizar a Equação 21 deduzida a partir da Equação 20.

$$t \text{ médio} / t_r = \frac{\sum_{t/tr=0}^{t/tr=\infty} (D - D_0) \cdot t / t_r}{\sum_{t/tr=0}^{t/tr=\infty} (D - D_0)} \rightarrow t \text{ médio} = \frac{\sum_{t=0}^{t=\infty} (D - D_0) \cdot t}{\sum_{t=0}^{t=\infty} (D - D_0)} \quad \text{Equação 21}$$

Para um distribuidor composto de volume de curto-circuito (V_{cc}), volume morto (V_d), volume de mistura (V_m) e volume pistonado disperso (V_{pd}) tem-se que o volume total do distribuidor (V) é dado pela expressão:

$$V = V_m + V_{pd} + V_d + V_{cc} \quad \text{Equação 22}$$

As equações utilizadas para calcular cada um desses volumes estão muito bem descritas no trabalho de Singh e Koria⁽⁷⁾ e são exibidas a seguir.

$$V_d (\%) = (1 - t_n \text{ médio}) \cdot 100 \quad \text{Equação 23}$$

$$V_{pd} (\%) = \frac{(t_n \text{ mínimo} + t_n C_{\text{máx}}) \cdot 100}{2} \quad \text{Equação 24}$$

$$V_{cc} (\%) = 100 \cdot \left(\sum_{t_n=0}^{t_n=t_{cc}} C_n \cdot \Delta t_n \right) \quad \text{Equação 25}$$

$$V_m (\%) = 100 - V_{pd} (\%) - V_d (\%) - V_{cc} (\%) \quad \text{Equação 26}$$

Onde: t_n mínimo é o instante em que aparece o primeiro sinal traçador na válvula de saída
 $t_n C_{\text{máx}}$ é o instante em que a curva DTR atinge o valor máximo de concentração
 t_{cc} é o tempo normalizado que identifica o final do curto-circuito

A Figura 29a mostra, em uma curva DTR, o tempo de residência mínimo normalizado (t_n mínimo) e o tempo em que a concentração de traçador atinge seu valor máximo ($t_n C_{\text{máx}}$).

Esses valores são utilizados no cálculo do percentual de volume pistonado disperso, conforme mostra a Equação 24.

O volume de curto-circuito é dado pela área sob o pico de concentração que identifica o curto-circuito na curva DTR (Figura 29b). Para cálculo dessa área pode-se utilizar a Equação 25. O tempo normalizado que identifica o término do curto-circuito (t_{cc}) é mostrado, em destaque, na Figura 29b.

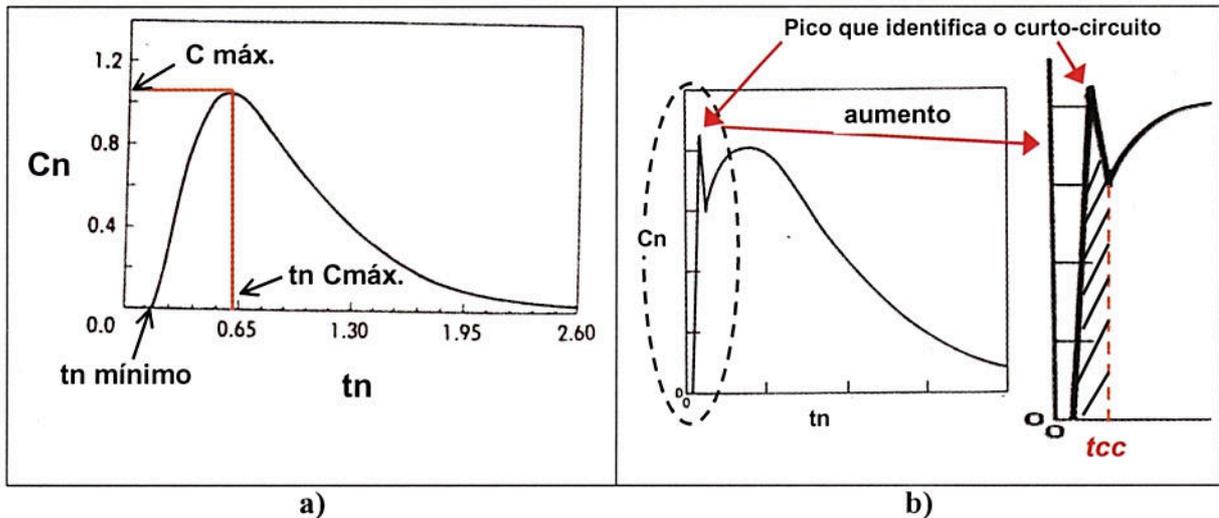


Figura 29. a) Curva DTR mostrando o t_n mínimo e o t_n $C_{máx.}$; b) curva DTR mostrando o intervalo de tempo em que ocorre o curto-circuito.

2.4.6. Heterogeneidade entre os veios de um distribuidor

Em distribuidores assimétricos ou com mais de dois veios é comum observar diferenças nas curvas DTR dos veios, como mostra a Figura 30. Geralmente, sem o uso de modificadores de fluxo, os veios que estão mais próximos do jato de entrada apresentam tempos de residência menores do que os veios mais afastados do jato de entrada. Evidentemente o tempo disponível para a flotação de inclusões no aço difere de um veio para outro. Como conseqüência tem-se um produto de qualidade heterogênea sendo produzido.

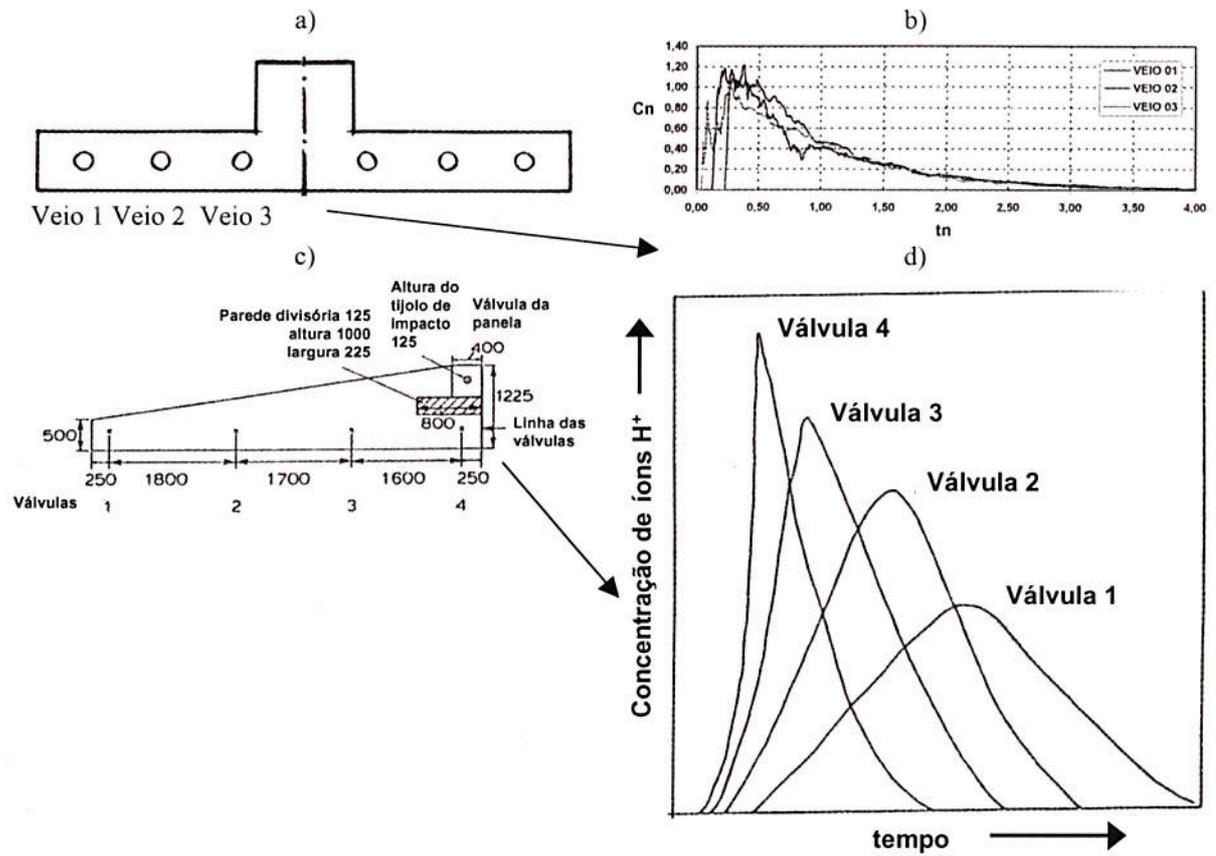


Figura 30. a) desenho esquemático do modelo físico de um distribuidor com formato de “T” que foi estudado por Costa ⁽⁴⁴⁾; b) curvas DTR para o distribuidor mostrado na figura “a”; c) vista superior do modelo físico do distribuidor assimétrico estudado por Robertson e Perkins ⁽⁴⁸⁾; d) curvas DTR para o distribuidor mostrado na figura “c”.

Em um modelo físico de um distribuidor com 4 veios (Figura 31), Morales et al.⁽⁴⁹⁾ mostrou que a escolha correta dos modificadores de fluxo pode reduzir bastante a heterogeneidade entre as curvas DTR. Nesse caso, a configuração de barreiras “B”, se comparada a configuração “A”, faz com que as curvas DTR dos veios externos seja muito semelhante as curvas DTR dos veios internos.

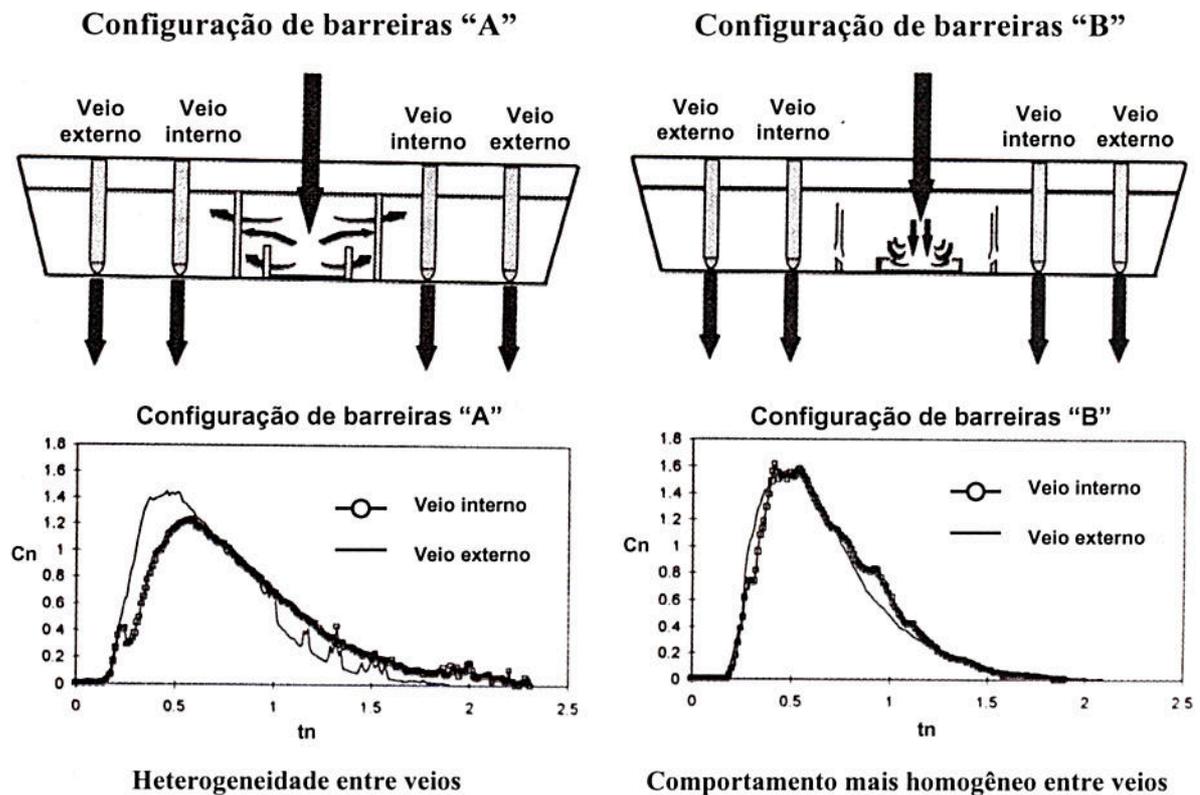


Figura 31. Comparativo entre as curvas DTR dos veios internos e externos para a configuração de barreiras A e B estudadas por Morales et al.⁽⁴⁹⁾

2.5. Efeito da temperatura sobre o fluxo no distribuidor

Com auxílio de um modelo físico construído em uma escala 1 para 3 (Figura 32), Lowry e Sahai⁽³³⁾ demonstraram a diferença entre um fluxo isotérmico (Figura 33) e um fluxo não-isotérmico (Figura 34). A visualização do fluxo no modelo foi obtida com auxílio de um corante. O fluido sob condições isotérmicas entra no distribuidor e se move pelo fundo desde a válvula mais perto do jato de entrada até a parede final. A partir daí observa-se um retorno do fluxo em direção ao jato de entrada.

No escoamento não isotérmico, o fluxo de fluido quente dirigi-se inicialmente em direção a válvula 4, mas sobe rapidamente sobre o fluido mais frio e flui ao longo da superfície do distribuidor.

A propriedade física que gera esse fenômeno é a variação da densidade em função da temperatura. Tanto a água como o aço ficam menos densos com o aumento da temperatura e uma força de empuxo é adicionada à velocidade de fluxo.

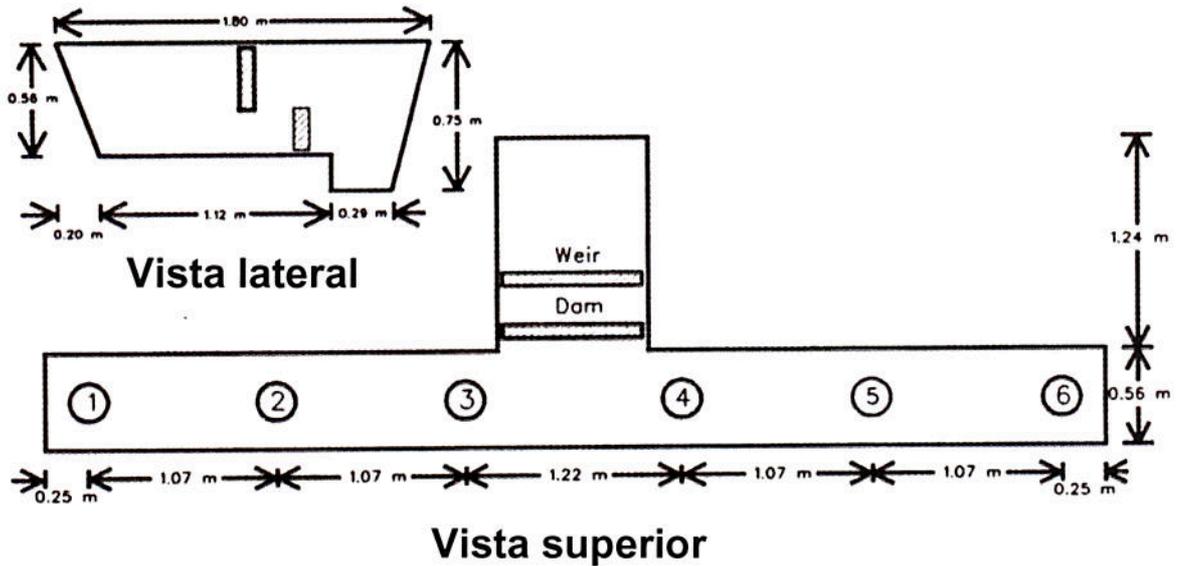
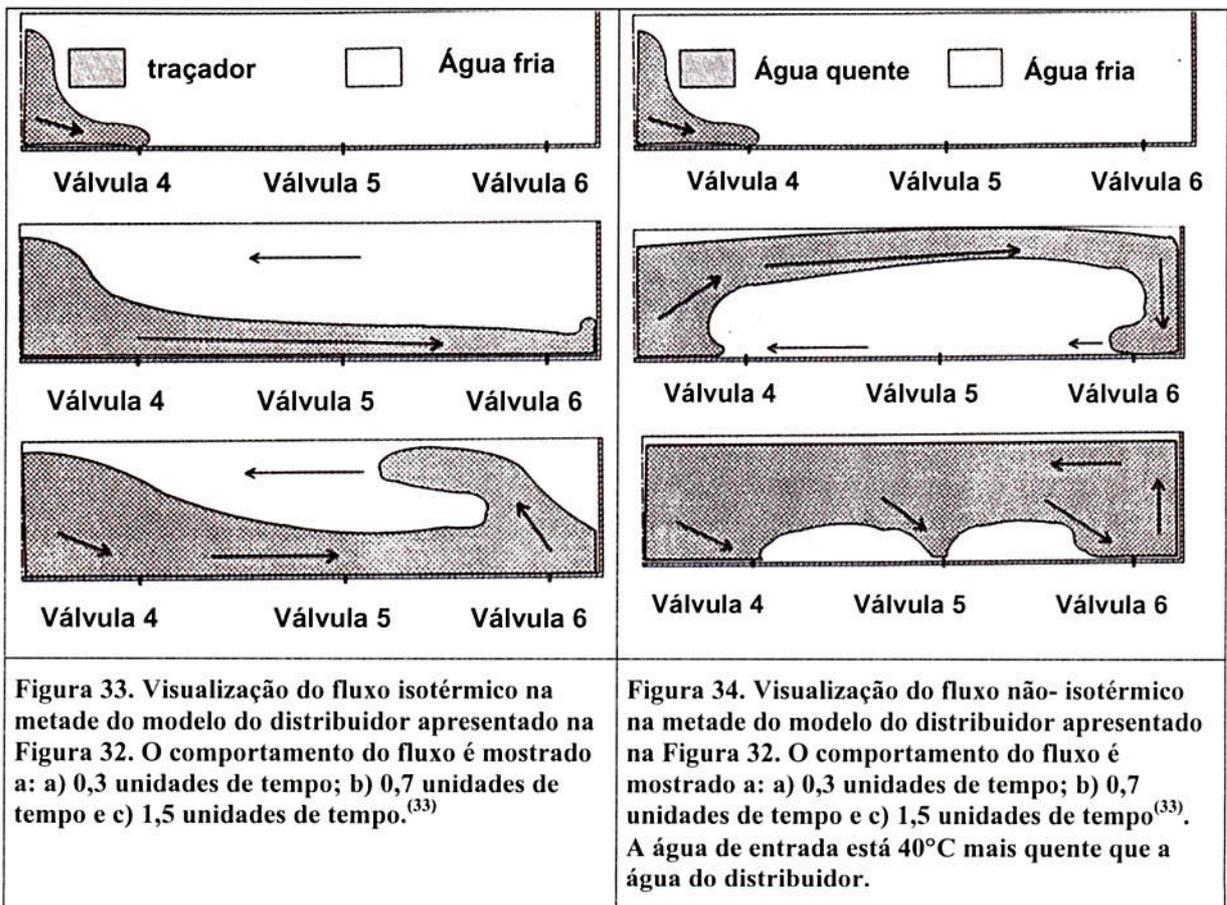


Figura 32. Desenho esquemático do distribuidor utilizado por Lowry e Sahai para estudar efeitos térmicos no fluxo de fluido.⁽³³⁾



3. Parte Experimental

3.1. Distribuidor

O desenho em três dimensões do distribuidor modelado é mostrado na Figura 35.

A Figura 36 mostra o posicionamento da válvula longa da panela e o sistema haste tampão utilizado para controlar o fluxo de aço que passa pelas válvulas do distribuidor.

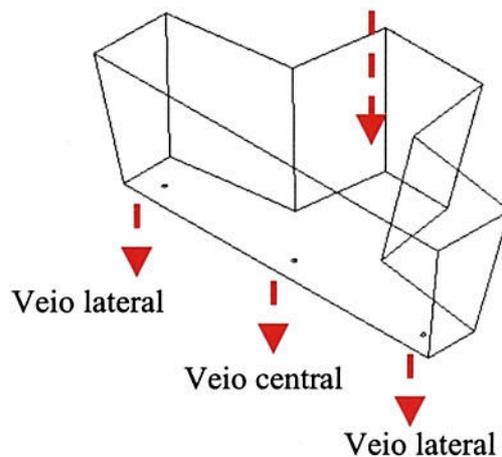


Figura 35. Desenho esquemático em três dimensões do distribuidor de lingotamento contínuo da Gerdau - Aços Finos Piratini.

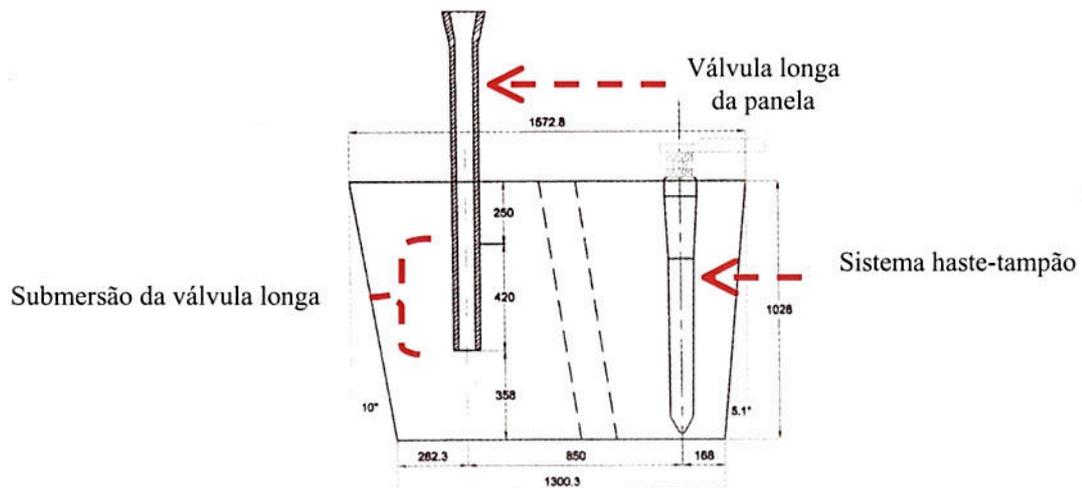


Figura 36. Vista lateral do distribuidor ilustrando a presença da válvula longa da panela e do sistema haste-tampão.

A vista superior apresentada na Figura 37 indica que o distribuidor é do tipo Delta-T, ou seja, é uma combinação entre os formatos T e delta (Figura 38).

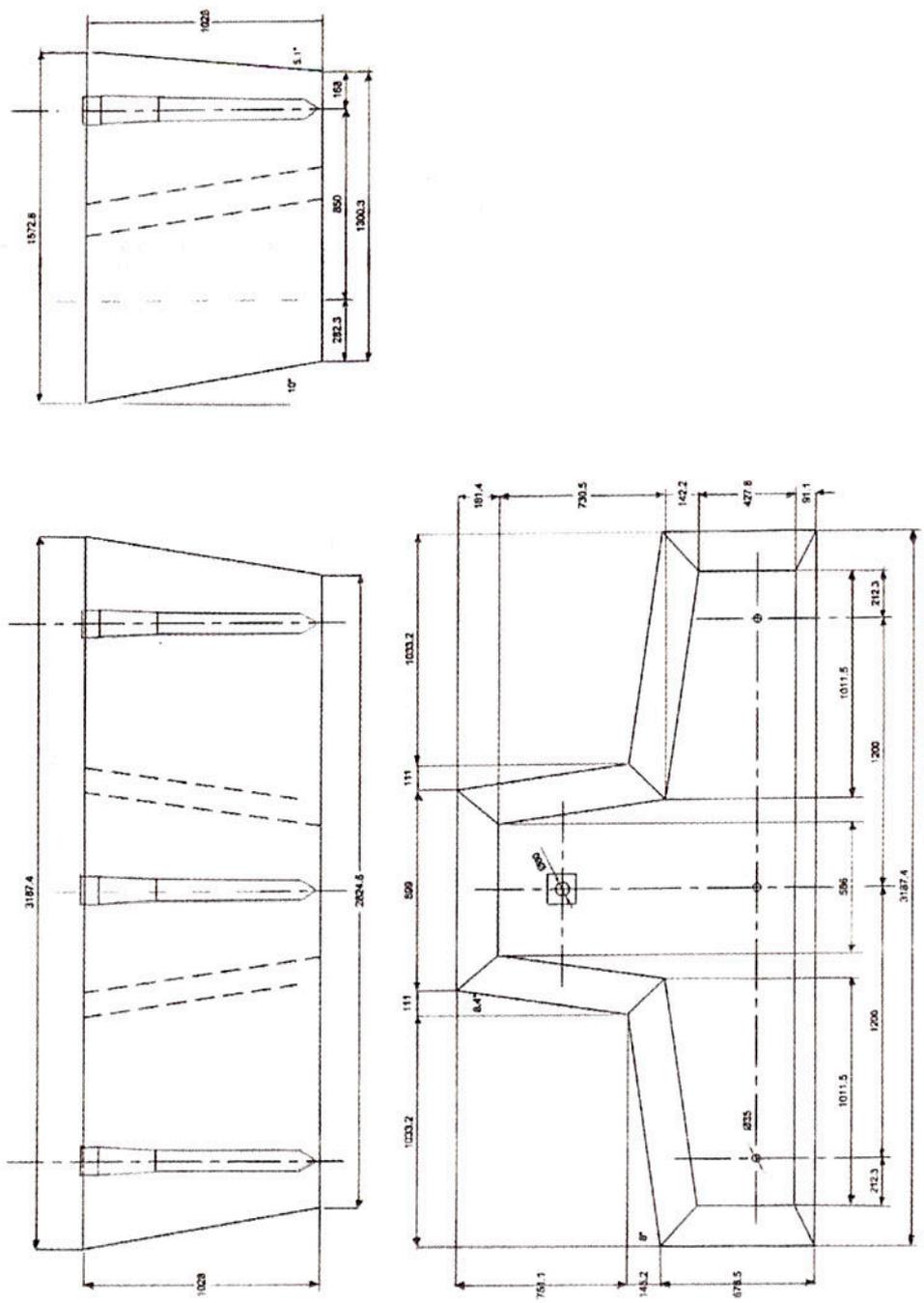


Figura 37. Desenho em vistas do distribuidor modelado.

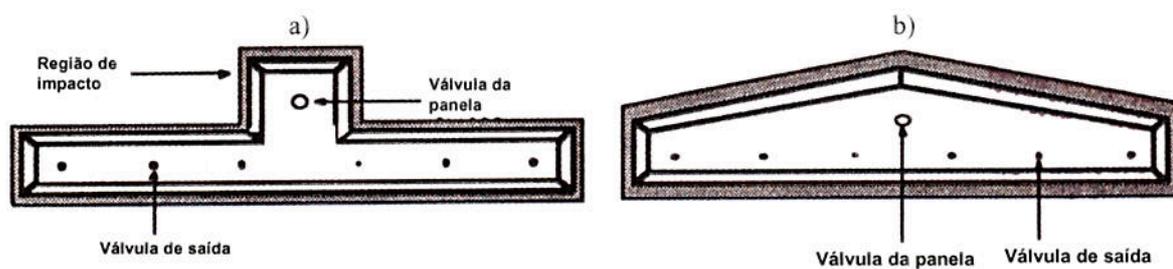


Figura 38. Exemplos de distribuidores do tipo a) T e b) delta.⁽⁵⁰⁾

3.2. Modelo Físico

O modelo (figura 39) foi construído em escala 1:1 e com paredes de acrílico com 18 mm de espessura.

O motivo de ter-se optado por construir um modelo físico em escala plena deve-se aos seguintes motivos:

1. Disponibilidade de recursos financeiros;
2. Satisfazer as necessidades de similaridade entre os números de Reynolds e Froude do modelo e do distribuidor industrial;
3. Possibilidade de adaptar-se no modelo barreiras em tamanho real de uso;
4. Existência de espaço físico suficiente para instalação do modelo.

A água à temperatura ambiente foi utilizada como fluido de simulação.

Na Figura 40 é mostrada a submersão do jato de entrada no modelo.

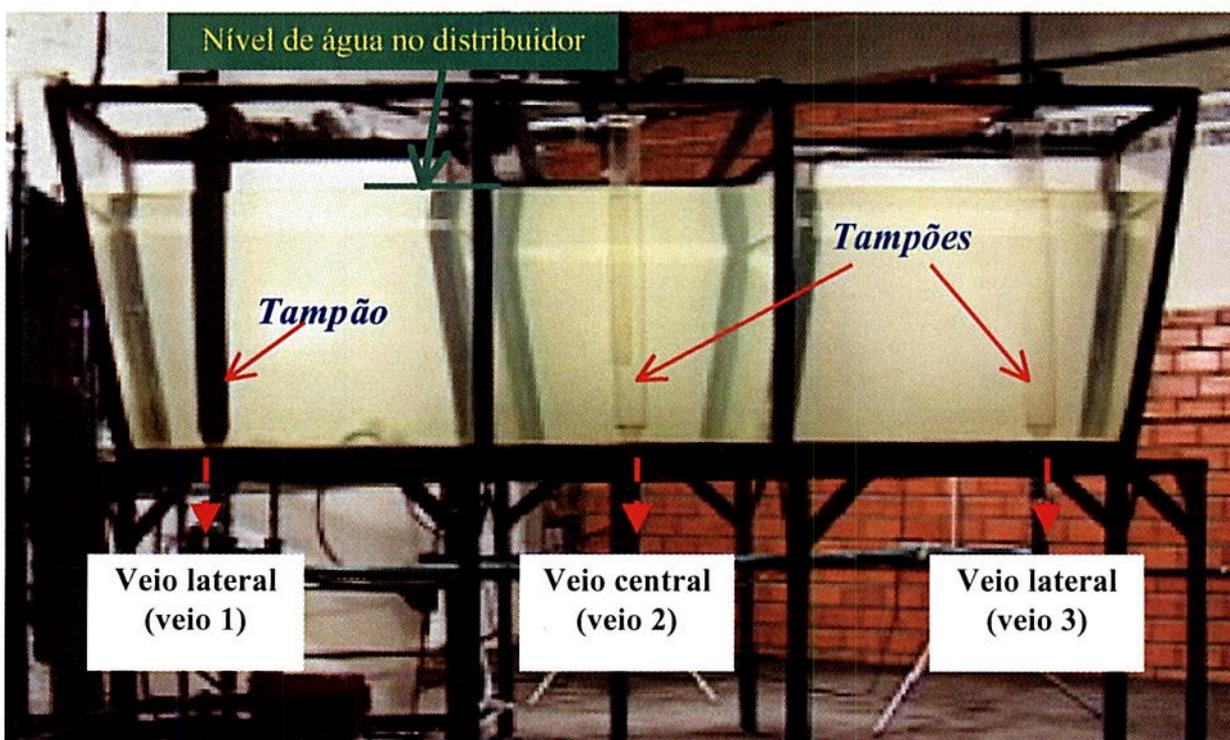


figura 39. Foto do modelo físico do distribuidor de lingotamento contínuo da Aços Finos Piratini. Os tampões dos veios 2 e 3 são de acrílico e o tampão do veio 1 é de madeira.



Figura 40. Fotos laterais do modelo físico mostrando em detalhe a) a submersão do jato de entrada do distribuidor (válvula longa da panela) e b) o jato de entrada com corante.

O sistema hidráulico apresentado na Figura 41 foi construído de modo a:

1. realizar medições contínuas e regulagens das vazões na entrada e em cada uma das três válvulas de saída do modelo;
2. trabalhar com o sistema em circuito fechado (água em recirculação);
3. trabalhar com o sistema em circuito aberto (água do distribuidor sendo eliminada).

Os tampões mostrados na figura 39 não foram utilizados para controlar as vazões de saída do distribuidor. Eles foram posicionados no modelo apenas para simular o seu efeito como um obstáculo ao fluxo. As vazões de saída foram controladas através de registros hidráulicos do tipo globo como mostra esquematicamente a Figura 41.

No anexo A são mostrados em detalhes os seguintes equipamentos utilizados no modelamento físico: bombas hidráulicas, rotâmetros e o medidor de vazão magnético.

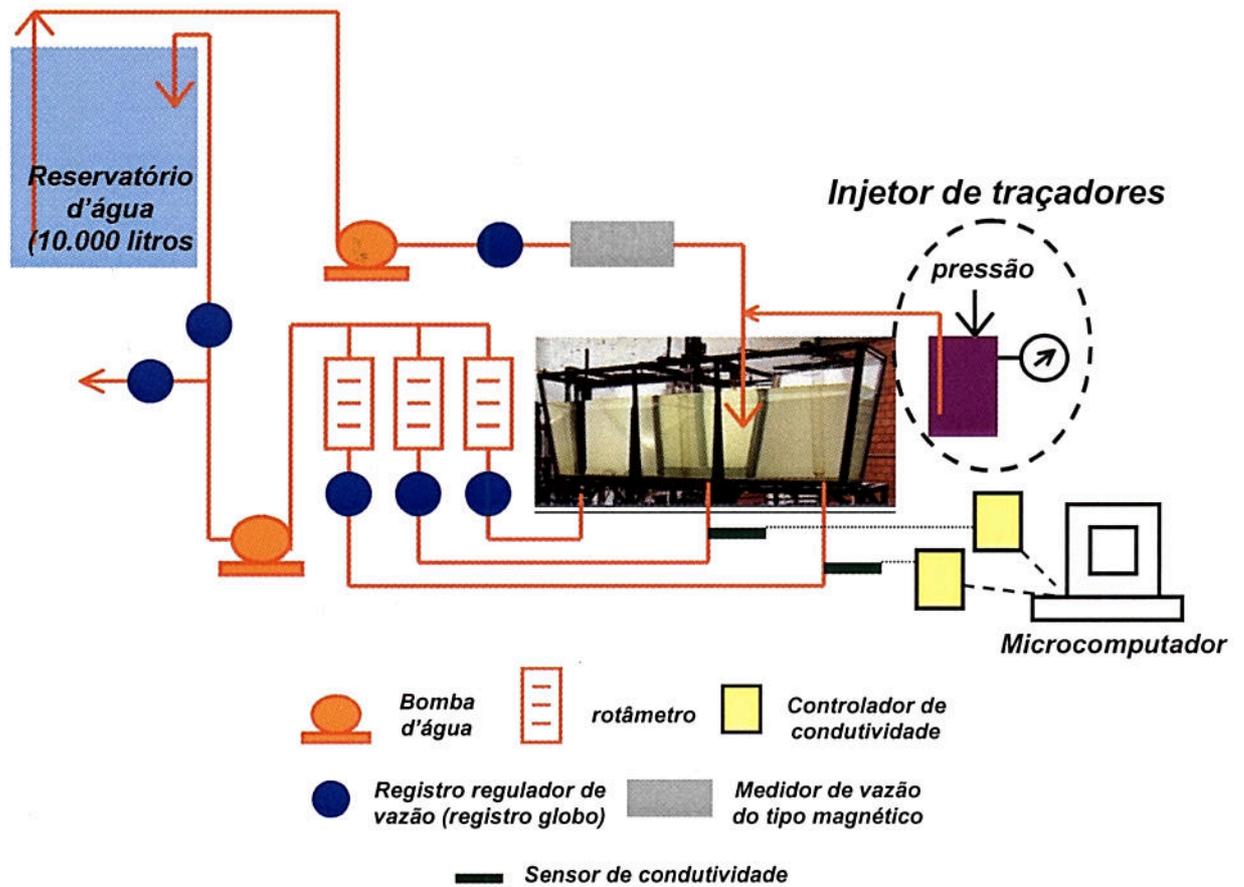


Figura 41. Esquema do sistema hidráulico construído para o modelo físico do distribuidor de lingotamento contínuo da Aços Finos Piratini.

3.2.1. Condições gerais de ensaios no modelo físico

Todos os ensaios com traçadores foram realizados com o distribuidor operando em regime permanente, ou seja, com o nível de líquido em uma altura constante e a vazão de entrada igual a soma das vazões nas três válvulas de saída.

A Tabela 5 apresenta um resumo das condições dos ensaios realizados no modelo físico. Vale citar que as vazões utilizadas no modelo correspondem a uma velocidade de lingotamento de 1,03 m/min, considerando uma seção de lingotamento de 180mm (Figura 42)

Tabela 5. Condições de trabalho no modelo físico

Nível de trabalho (H)	750 mm	Diâmetro das válvulas de saída (ds)	36 mm
Volume de trabalho (V)	1,8 m ³	Vazão de entrada (Qe)	6 m ³ /h
Vazões de saída por veio (Qs)	2 m ³ /h	Diâmetro da válvula de entrada (de)	65 mm
Número de válvulas de saída	3		

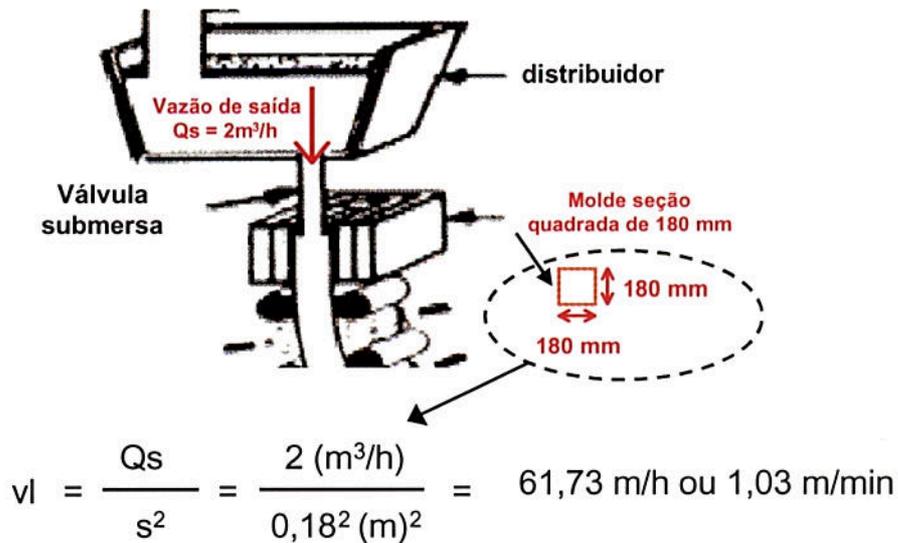


Figura 42. Desenho esquemático mostrando a relação entre vazão de lingotamento (Q_s) e velocidade de lingotamento (v_l).

3.2.2. Números de Re, Fr e Gr/Re^2

As variáveis necessárias para calcular os números de Reynolds, Froude e Gr/Re^2 são apresentadas abaixo:

- Comprimento característico (L) = diâmetro da válvula longa da panela (d_e) = **0,065 m**
- Velocidade característica do fluido (v) = velocidade média de fluxo na válvula longa da panela (v_e) = **0,50 m/s**
- Viscosidade absoluta da água à 20°C (μ) = **0,001 kg.m/s**
- Densidade da água a 20°C (ρ) = **1000 kg/m³**
- Aceleração da gravidade (g) = **9,81 m/s²**
- Coeficiente de expansão volumétrico da água (β) = **$2,93 \cdot 10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$**
- $(T_o - T_\infty)$ típica do aço = 30 °C = $(T_o - T_\infty)$ equivalente da água (segunda a Equação 2) = **39,9 °C**

É importante salientar que o comprimento característico do sistema (L) foi considerado como sendo o diâmetro da válvula longa. Da mesma forma a velocidade característica do fluido (v) foi considerada com sendo a velocidade média do fluido na válvula longa. Para calcular essa velocidade utiliza-se a expressão:

$$v = \frac{Q_e}{(\pi \cdot d_e^2)/4} = \frac{6 \text{ (m}^3\text{/h)}}{\pi \cdot 0,065^2 / 4 \text{ (m}^2\text{)}} = 1808 \text{ m/h ou } 0,5 \text{ m/s}$$

Os valores dos números de Re, Fr e Gr/Re² são apresentados a seguir:

Cálculo do número de Reynolds (Re)

$$\text{Número de Reynolds (Re)} = \frac{v \cdot L \cdot \rho}{\mu} = \frac{\text{Força de Inércia } (\rho \cdot v^2 \cdot L^2)}{\text{Força viscosa } (\mu \cdot v \cdot L)}$$

$$\text{Número de Reynolds (Re)} = \frac{\text{Força de inércia}}{\text{Força viscosa}} = \frac{0,5 \cdot 0,065 \cdot 1000}{0,001} = \mathbf{32500}$$

Cálculo do número de Froude (Fr)

$$\text{Número de Froude (Fr)} = \frac{v^2}{g \cdot L} = \frac{\text{Força de Inércia } (\rho \cdot v^2 \cdot L^2)}{\text{Força gravitacional } (\rho \cdot L^3 \cdot g)}$$

$$\text{Número de Froude (Fr)} = \frac{\text{Força de inércia}}{\text{Força gravitacional}} = \frac{0,5^2}{9,81 \cdot 0,065} = \frac{0,25}{0,64} = \mathbf{0,39}$$

Cálculo do número de Gr/Re²

$$\frac{Gr}{Re^2} = \frac{\text{Força de empuxo}}{\text{Força de inércia}} = \frac{g \cdot L \cdot \beta \cdot (T_o - T_\infty)}{v^2}$$

$$\frac{Gr}{Re^2} = \frac{\text{Força de empuxo}}{\text{Força de inércia}} = \frac{9,81 \cdot 0,065 \cdot 2,93 \cdot 10^{-4} \cdot 39,9}{0,5^2} = \mathbf{0,03}$$

O valor bastante elevado encontrado para o Re ($=32500$) indica que a força de inércia é muito superior a força viscosa. Esse argumento é utilizado, muitas vezes, para considerar desprezível a força viscosa, ou seja, considerar desnecessária a similaridade do número de Reynolds.

O valor do Fr indica que a força de inércia corresponde a 39% da força gravitacional.

Para as condições de velocidade, comprimento característico e diferença de temperatura consideradas, o valor de Gr/Re^2 é bastante reduzido ($=0,03$). Isso indica que a força de empuxo é desprezível em relação a força de inércia.

Fazendo uma síntese do que foi exposto a respeito dos números de Re , Fr e Gr/Re^2 pode-se dizer que, para o distribuidor em análise, as forças mais importantes são a de inércia e a gravitacional, ou seja, o critério mais importante a ser satisfeito deve ser o de Froude. Os experimentos com corante, no entanto, mostram que a velocidade do fluxo no distribuidor é, em muitos pontos bastante inferior a considerada nos cálculos dos números adimensionais feitos anteriormente. A Figura 43 mostra claramente que a velocidade do fluido gira em torno de $0,03$ m/s, ou seja, quase 17 vezes menor do que a velocidade na válvula longa ($0,5$ m/s). Reduzindo a velocidade do fluido a força de inércia passa a ser menor e, conseqüentemente, as forças de empuxo e viscosa passam a ter maior relevância. Com esta análise pode-se dizer, então, que os números de Re e Gr/Re^2 deveriam, a princípio, ser considerados.

O fato de trabalhar-se com um modelo em escala plena faz com os números de Fr e Re sejam automaticamente satisfeitos. O número de Gr/Re^2 , no entanto, foi desconsiderado pois pretende-se, em trabalhos futuros, utilizar-se ferramentas matemáticas para simular o fluxo não isotérmico no distribuidor de lingotamento contínuo da Gerdau - Aços Finos Piratini.

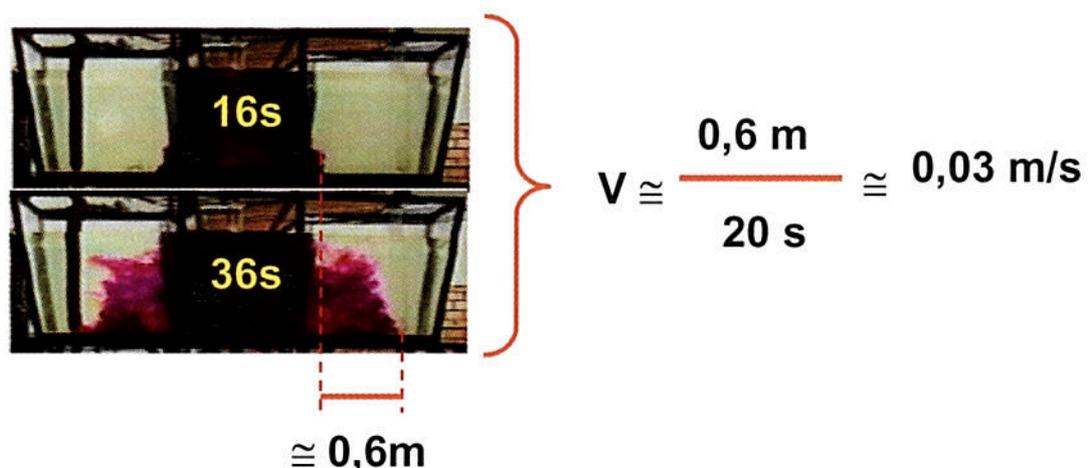


Figura 43. Movimentação do corante no modelo físico sem barreiras.

3.3. Modificadores de fluxo testados

Todas as barreiras (modificadores de fluxo) testadas são mostradas na figura 44.

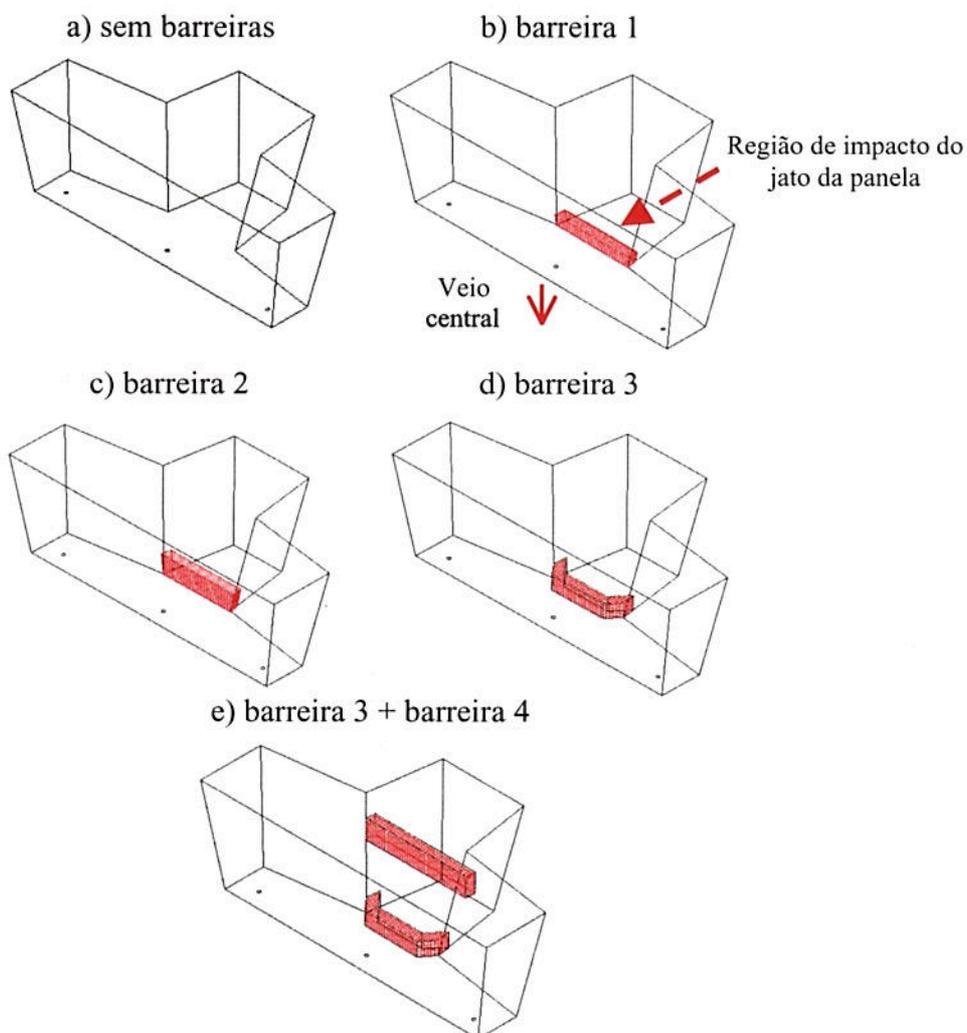


figura 44. Desenhos em três dimensões do distribuidor mostrando as barreiras testados.

A barreira 1 possui 100 mm de altura e 100 mm de espessura e está posicionada entre a zona de impacto do jato da panela e o veio central. A barreira 2 está posicionada exatamente no mesmo lugar da barreira 1, porém possui 200 mm de altura. A barreira 3 possui 150 mm de altura e está mais próxima do veio central do que a barreira 1. A barreira 4 está imersa 200 mm abaixo do nível de líquido e foi posicionada entre a barreira 3 e a região de impacto do jato da panela.

É importante citar que a modificação nas dimensões das barreiras seguiu uma evolução lógica. A barreira 1 foi projetada visando eliminar fluxos que entrassem e, em um curto intervalo de tempo, saíssem do distribuidor. A barreira 2 foi testada para verificar o

efeito do aumento da altura da barreira 1. A barreira 3 foi pensada com intuito de verificar o efeito de aproximar a barreira 1 do veio central. A barreira 4 em conjunto com a barreira 3 foi testada pois (como descrito no capítulo 2.1.3, página 7) esta combinação de barreiras proporciona um fluxo ascendente que favorece a flotação das inclusões.

No Anexo B são mostradas os desenhos em vistas das barreiras.

3.4. *Ensaio de visualização do escoamento*

O corante utilizado para visualizar a movimentação do fluido no interior do distribuidor foi o permanganato de potássio (KMnO_4). As injeções desse traçador foram realizadas através de um sistema pneumático conectado próximo ao jato de entrada do distribuidor (Figura 41, página 37). Os tempos de injeção variaram de 2 a 3 segundos, sendo que os volumes injetados variaram entre 300 e 500 ml de solução à 0,1 g/l de KMnO_4 .

A movimentação do corante dentro do modelo foi acompanhada através de filmagens feitas com uma câmera filmadora digital Sony VX1000. Os ângulos de filmagem e as respectivas imagens geradas são mostrados na figura 45. Para obter as imagens a partir das filmagens foi utilizado um video cassete JVC HR-S5400U e uma placa de captura de imagens MIRÓ DC30plus instalada em um microcomputador Pentium II 400 MHz.

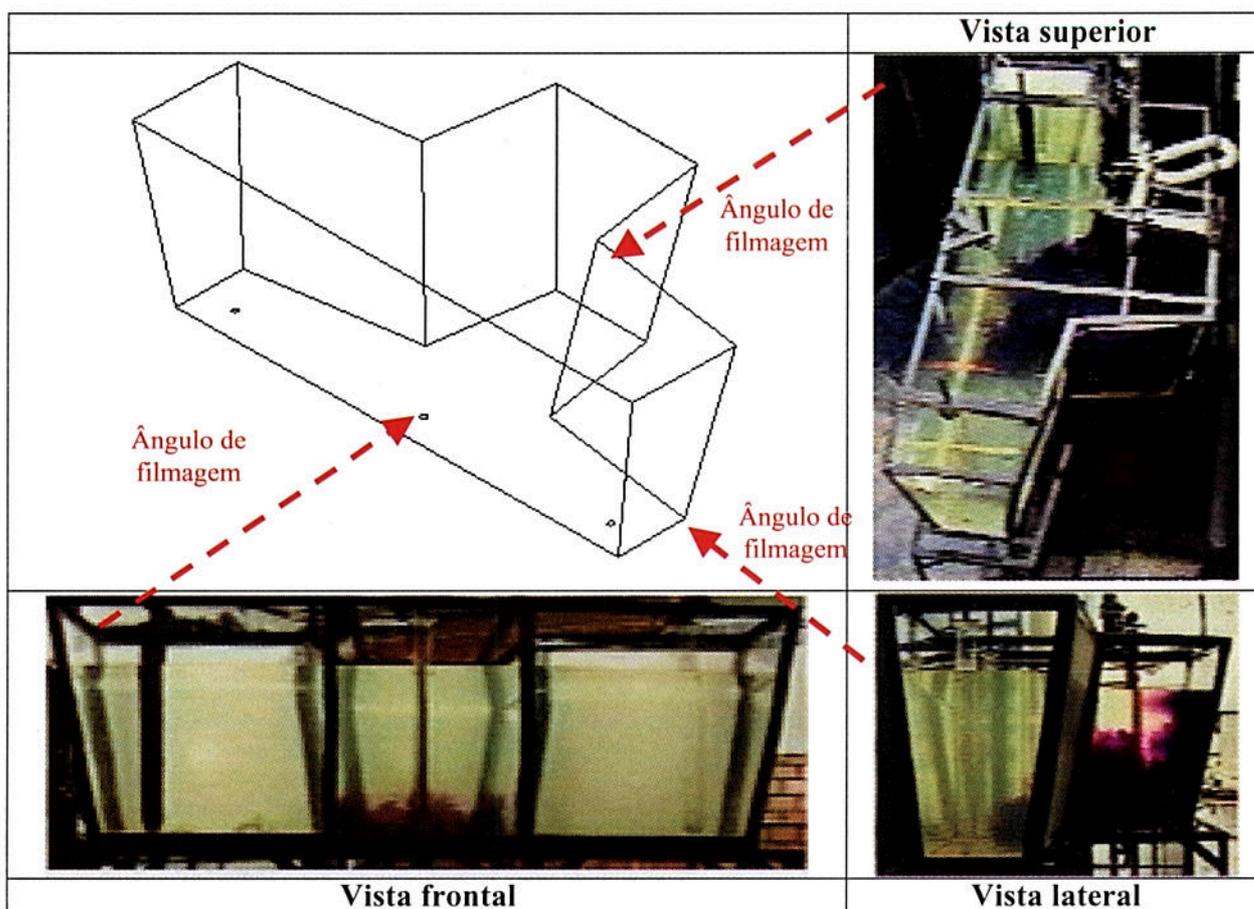


figura 45. Imagens após 12 s do instante de injeção. As filmagens que deram origem a essas imagens foram feitas conforme os ângulos representados através das setas vermelhas.

3.5. *Curvas DTR e Cálculo dos Volumes Característicos*

O traçador utilizado para determinar as curvas de distribuição dos tempos de residência (ou curvas DTR) foi uma solução de HCl a 2%. As condições de injeção foram idênticas as descritas para a injeção do KMnO_4 (capítulo 3.4. Ensaios de visualização do escoamento - página 42).

Para cada barreira testada foram realizados quatro ensaios de determinação das curvas DTR (ensaios DTR).

A alteração da condutividade da água gerada pelo HCl foi captada por dois sensores de condutividade. Um dos sensores foi posicionado no veio central e outro em um dos veios laterais (Figura 41, página 37); devido a simetria do distribuidor julgou-se desnecessário colocar sensores de condutividade em ambos os veios laterais.

Os dados de condutividade foram processados pelos seus respectivos controladores e armazenados, de um em um segundo, em um banco de dados instalado em um microcomputador (Figura 41, página 37). Cada ensaio DTR teve duração de uma hora após o momento de injeção do traçador. Esse período de tempo demonstrou ser suficiente para a condutividade da água voltar a apresentar os valores anteriores à injeção de traçador.

Maiores informações sobre os condutivímetros (conjunto sensores de condutividade mais controladores) podem ser obtidas no anexo A.

De posse do banco de dados com os valores de condutividade e com o auxílio de uma planilha eletrônica foi possível: traçar as curvas DTR; determinar os tempos de residência e calcular os volumes característicos. A seguir é mostrado um exemplo.

Exemplo de um ensaio DTR

1º passo. Cálculo do tempo de residência teórico (tr).

O tempo de residência teórico - tr é dado pela razão entre o volume de líquido no distribuidor (V) e a vazão de trabalho (Qs), considerando os três veios do distribuidor.

$$tr = \frac{V}{Qs} = \frac{1,8 (m^3)}{3 (veios) \cdot 2 (m^3 / h / veio)} = 0,3h = 18,0min = 1080 s$$

2º Passo. Cálculo dos tempos normalizados.

O tempo normalizado- tn (coluna 1 da Tabela 6) foi calculado dividindo o tempo medido após a injeção do traçador (coluna 2 da Tabela 6) pelo tempo de residência teórico (tr = 1080s).

3º Passo: Cálculo da condutividade relativa (D-Do).

O valor de condutividade relativa é dado pela valor de condutividade medido a qualquer instante após a injeção de traçador menos o valor de condutividade medido no exato instante de injeção do traçador. Os valores de condutividade medidas para o veio central e para os veios laterais são apresentados, respectivamente, nas colunas 3 e 4 da Tabela 6; estão destacados em azul os valores de condutividade inicial. As colunas 5 e 6 da Tabela 6 mostram, respectivamente, os valores de condutividade relativa para o veio central e para os veios laterais.

Tabela 6. Resultados de um ensaio DTR.

coluna 1	coluna 2	coluna 3	coluna 4	coluna 5	coluna 6	coluna 7	coluna 8	coluna 9	coluna 10
tempo após a injeção de traçador		condutividade absoluta (mS/m)		condutividade relativa (mS/m)		condutividade relativa (mS/m) x tempo (s)		concentração normalizada (Cn)	
normalizado (tn)	(s)	veio central	veios laterais	veio central	veios laterais	veio central	veios laterais	veio central	veios laterais
-	0	11,47	13,92						
0,00	1	11,46	13,85	0	0	0	0	-	-
0,00	2	11,53	13,96	0,06	0,04	0,12	0,08	0,01	0,02
0,00	3	11,51	13,94	0,04	0,02	0,12	0,06	0,01	0,01
0,00	4	11,52	13,91	0,05	0	0,2	0	0,01	-
0,00	5	11,42	13,94	0	0,02	0	0,1	-	0,01
0,01	6	11,44	13,9	0	0	0	0	-	-
0,01	7	11,41	13,9	0	0	0	0	-	-
0,01	8	11,5	13,9	0,03	0	0,24	0	0,00	-
0,01	9	11,46	13,9	0	0	0	0	-	-
0,01	10	11,45	13,89	0	0	0	0	-	-
0,01	11	11,44	13,87	0	0	0	0	-	-
0,01	12	11,46	13,86	0	0	0	0	-	-
0,01	13	11,5	13,9	0,03	0	0,39	0	0,00	-
0,013	14	17,58	13,94	6,11	0,02	85,54	0,28	0,92	0,01
0,01	15	17,71	13,89	6,24	0	93,6	0	0,93	-
0,01	16	21,1	13,9	9,63	0	154,08	0	1,44	-
0,02	17	23,6	13,96	12,13	0,04	206,21	0,68	1,82	0,02
0,02	18	23,72	13,93	12,25	0,01	220,5	0,18	1,83	0,00
0,02	19	25,12	13,95	13,65	0,03	259,35	0,57	2,04	0,01
0,02	20	25,17	13,88	13,7	0	274	0	2,05	-
0,02	21	26,1	13,89	14,63	0	307,23	0	2,19	-
0,02	22	26,23	13,86	14,76	0	324,72	0	2,21	-
0,02	23	26,18	13,92	14,71	0	338,33	0	2,20	-
0,02	24	26,21	13,94	14,74	0,02	353,76	0,48	2,21	0,01
0,02	25	26,01	13,92	14,54	0	363,5	0	2,18	-
0,02	26	25,36	13,86	13,89	0	361,14	0	2,08	-
0,03	27	25,25	13,96	13,78	0,04	372,06	1,08	2,06	0,02
0,03	28	23,45	13,87	11,98	0	335,44	0	1,79	-
0,03	29	23,62	14,01	12,15	0,09	352,35	2,61	1,82	0,04
0,03	30	21,77	14	10,3	0,08	309	2,4	1,54	0,04
0,03	31	21,48	13,93	10,01	0,01	310,31	0,31	1,50	0,00
0,03	32	20,39	13,93	8,92	0,01	285,44	0,32	1,34	0,00
0,03	33	19,59	14	8,12	0,08	267,96	2,64	1,22	0,04
0,03	34	19,05	13,95	7,58	0,03	257,72	1,02	1,14	0,01
0,03	35	18,08	13,99	6,61	0,07	231,35	2,45	0,99	0,03
0,03	36	17,88	13,91	6,41	0	230,76	0	0,96	-
0,03	37	16,96	13,94	5,49	0,02	203,13	0,74	0,82	0,01
0,04	38	16,95	13,86	5,48	0	208,24	0	0,82	-
0,04	39	16,17	14,03	4,7	0,11	183,3	4,29	0,70	-
0,04	40	16,03	13,92	4,56	0	182,4	0	0,68	-
0,04	41	15,81	13,83	4,34	0	177,94	0	0,65	-
0,04	42	15,58	13,91	4,11	0	172,62	0	0,62	-
0,04	43	15,6	13,91	4,13	0	177,59	0	0,62	-
0,04	44	15,9	13,93	4,43	0,01	194,92	0,44	0,66	0,00
0,04	45	15,93	13,88	4,46	-	200,7	0	0,67	-
0,04	46	16,18	13,97	4,71	0,05	216,66	2,3	0,71	0,02
0,04	47	16,05	14,01	4,58	0,09	215,26	4,23	0,69	0,04
0,044	48	16,34	14,1	4,87	0,18	233,76	8,64	0,73	0,08
0,05	49	16,47	14,21	5	0,29	245	14,21	0,75	0,13
0,05	50	17,35	14,25	5,88	0,33	294	16,5	0,88	0,15
0,05	51	18,07	14,17	6,6	0,25	336,6	12,75	0,99	0,12
0,05	52	19,1	14,4	7,63	0,48	396,76	24,96	1,14	0,22
0,05	53	21,37	14,59	9,9	0,67	524,7	35,51	1,48	0,31
Para simplificar a apresentação dessa tabela os dados referentes ao intervalo de tempo entre 54 e 3597 segundos não são apresentados									
3,33	3598	11,51	13,88	0,04	0	143,92	0	0,0	-
3,33	3599	11,54	13,98	0,07	0,06	251,93	215,94	0,0	0,0
3,33	3600	11,46	13,91	0	0	0	0	-	-
somatório				7.210	2.339	3.233.587	1.724.317		

4º Passo: Cálculo do coeficiente de calibração (K) e da concentração normalizada (Cn).

Como a quantidade de traçador adicionada nos ensaios DTR não era perfeitamente quantificada a cada ensaio, para calcular os valores de concentração normalizada (Cn), optou-se por utilizar o coeficiente de calibração (K) (Equação 16, página 21),.

Os valores do coeficiente “K” são calculados a seguir:

Veio central

$$K = \frac{tr}{\sum_{tn=0}^{tn=\infty} (D - D_0) \cdot \Delta t} = \frac{1080 \text{ s}}{7210 \text{ (mS/m)} \cdot 1 \text{ (s)}} = 0,15 \text{ (m/mS)}$$

Veios Laterais

$$K = \frac{tr}{\sum_{tn=0}^{tn=\infty} (D - D_0) \cdot \Delta t} = \frac{1080 \text{ s}}{2339 \text{ (mS/m)} \cdot 1 \text{ (s)}} = 0,46 \text{ (m/mS)}$$

Como a concentração normalizada é dada multiplicando o valor de “K” pelo valor da condutividade relativa (Equação 17, página 21) tem-se:

Veio central

$$C_n = 0,15 \cdot (D - D_0)$$

Veios Laterais

$$C_n = 0,46 \cdot (D - D_0)$$

Os valores de Cn para todo o ensaio são mostrados na coluna 9 e 10 da Tabela 6.

5º passo: Identificação dos tempos mínimos de residência.

Para reduzir a influência de ruídos na medição de condutividade, considerou-se com tempo mínimo o momento em que o valor da concentração normalizada (Cn) fosse > 0,05. Isso representa aproximadamente 5% do valor máximo encontrados nos ensaios DTR (Cn máximo gira em torno de 1,0). Na Tabela 6 os valores de concentração normalizada mostram o momento (valores destacados em vermelho nas colunas 1 e 2) em que o traçador começa a ser percebido pelos sensores de condutividade (valores destacados em vermelho colunas 9 e 10).

Veio central

tn mínimo = 0,013

Veios Laterais

tn mínimo = 0,044

6º Passo. Cálculo do tempo de residência médio (t médio)

O tempo de residência médio é definido pela Equação 21 mostrada na página 28. A seguir são mostrados os cálculos de t médio para os veios central e laterais.

Veio central

$$t \text{ médio} = \frac{\sum_{t=0}^{t=\infty} (D - D_0) \cdot t}{\sum_{t=0}^{t=\infty} (D - D_0)} = \frac{3133587 \text{ (mSlm.s)}}{7210 \text{ (mSlm)}} = 449 \text{ s (ou 7,5 min)}$$

Veios Laterais

$$t \text{ médio} = \frac{\sum_{t=0}^{t=\infty} (D - D_0) \cdot t}{\sum_{t=0}^{t=\infty} (D - D_0)} = \frac{1724317 \text{ (mSlm.s)}}{2339 \text{ (mSlm)}} = 737 \text{ s (ou 12,3 min)}$$

7º Passo. Cálculo do tempo de residência médio normalizado (tn médio).

Veio central

$$tn \text{ médio} = \frac{t \text{ médio}}{tr} = \frac{449 \text{ s}}{1080 \text{ s}} = 0,42$$

Veios Laterais

$$tn \text{ médio} = \frac{t \text{ médio}}{tr} = \frac{737 \text{ s}}{1080 \text{ s}} = 0,68$$

8º Passo: Curvas DTR

Para traçar as curvas DTR (Figura 46b) utilizam-se os dados apresentados nas colunas 1, 9 e 10 da Tabela 6.

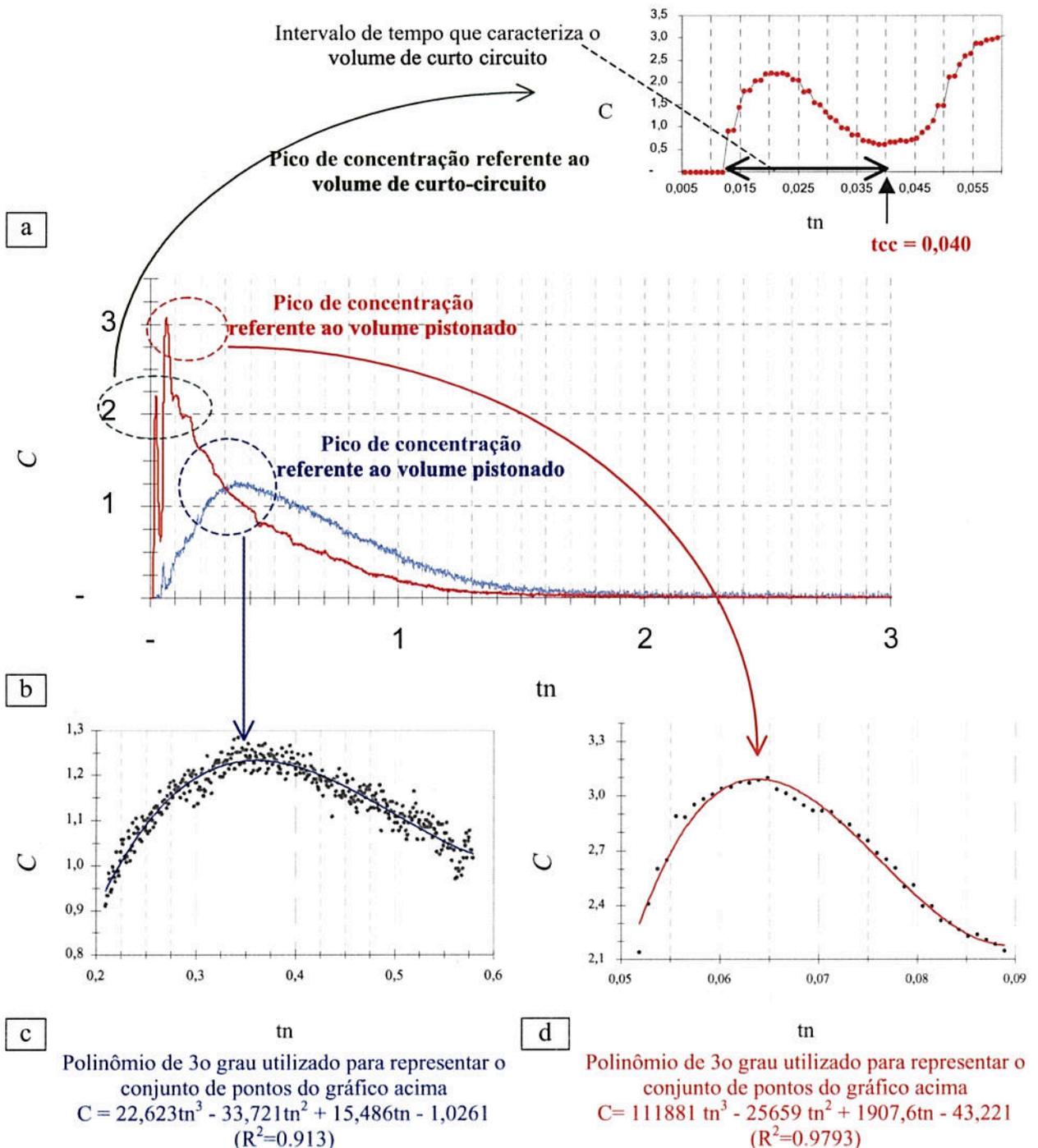


Figura 46. Curva DTR gerada a partir dos dados apresentados na: a) curva DTR em detalhe mostrando pico de concentração referente ao curto circuito; b) curva DTR na íntegra; b) identificação do pico de concentração para os veios laterais; b) identificação do segundo pico de concentração para o veio central

9º Passo. Cálculo do volume de curto circuito (Vcc).

A Figura 46b mostra, entre outras coisas, o pico de concentração referente ao curto-circuito para o veio central do distribuidor sem barreiras. Tendo sido identificado o intervalo de tempo em que ocorre o curto-circuito (Figura 46a) aplica-se a equação mostrada abaixo para calcular o percentual de volume de curto-circuito. Maiores detalhes podem ser obtidos no capítulo 2.4.5 (página 28).

Veio central

$$\mathbf{Vcc} = 100 \cdot \left(\sum_{t_n = 0}^{t_n = t_{cc}} C_n \cdot \Delta t_n \right) = 100 \cdot \left(\sum_{t_n = 0}^{t_n = 0,04} C_n \cdot \Delta t_n \right) = 100 \cdot 0,05 = \mathbf{5\%}$$

Veios Laterais

Inexiste curto-circuito

10º Passo. Cálculo do volume pistonado disperso (Vpd).

Para determinar o % de volume pistonado é necessário determinar o tempo em que a concentração é máxima ($t_n C_{max}$), conforme mostra a Equação 24 apresentada na página 28. A Figura 46b mostra os picos de concentração referentes aos veios laterais e ao veio central. Percebe-se pela Figura 46c e Figura 46d que existe um polinômio de terceiro grau que representa muito bem os dados da região do pico de concentração. Ao derivarmos o polinômio de 3º grau obtemos um polinômio de 2º grau onde uma das raízes representa o instante (t_n) onde a curva DTR atinge o máximo de concentração. Os valores de $t_n C_{máx}$ e volumes pistonados do veio central e dos veios laterais são apresentados a seguir:

Veio central

$$\mathbf{Vpd} = \frac{(t_n C_{máx} + t_n \text{mínimo}) \cdot 100}{2 \cdot t_n \text{médio}} = \frac{(0,064 + 0,013) \cdot 100}{2} = \mathbf{4\%}$$

Veios Laterais

$$\mathbf{Vpd} = \frac{(t_n C_{máx} + t_n \text{mínimo}) \cdot 100}{2 \cdot t_n \text{médio}} = \frac{(0,36 + 0,044) \cdot 100}{2} = \mathbf{20\%}$$

11º Passo. Cálculo do volume morto (Vd).

O volume morto foi calculado conforme a Equação 23, página 28. A seguir são apresentados os cálculos para os veios laterais e para o veio central.

Veio central

$$\mathbf{Vd} = (1 - 0,42) \cdot 100 = \mathbf{58 \%}$$

Veios Laterais

$$\mathbf{Vd} = (1 - 0,68) \cdot 100 = \mathbf{32 \%}$$

12º Passo. Cálculo do volume de mistura (Vm)

O volume de mistura foi calculado conforme a Equação 26, página 28.

Veio central

$$\mathbf{Vm} = 100 - V_{pd} (\%) - V_d (\%) - V_{cc} (\%) = 100 - 4 - 58 - 5 = \mathbf{33\%}$$

Veios Laterais

$$\mathbf{Vm} = 100 - V_{pd} (\%) - V_d (\%) - V_{cc} (\%) = 100 - 20 - 32 - 0 = \mathbf{48\%}$$

4. Resultados e Discussão

4.1. Escoamento do Fluido

4.1.1. Sem barreiras versus barreira 1



A Figura 47 mostra o escoamento dentro do distribuidor sem barreiras. Observa-se, principalmente através da vista lateral, a presença de um fluxo que entra e sai do distribuidor em um curto intervalo de tempo. As inclusões presentes nessa porção de fluido, chamado de fluxo de curto-circuito, provavelmente não atingirão a escória pois terão muito pouco tempo para flotar.

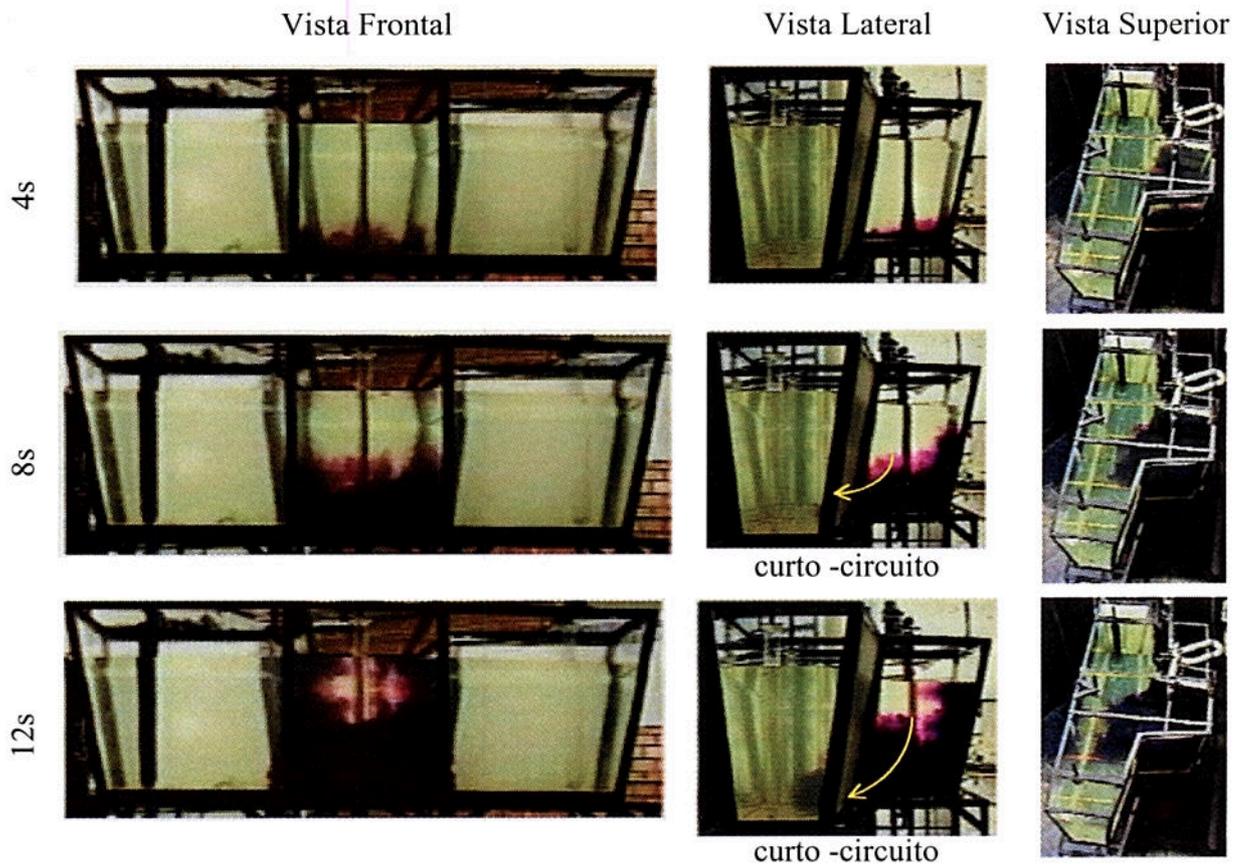


Figura 47. Ensaio com corante no modelo do distribuidor sem barreiras. Vistas frontal, lateral e superior. A esquerda das fotos é indicado o tempo transcorrido após o instante de injeção do traçador.

A eliminação do curto-circuito foi obtida utilizando-se a barreira 1 (Figura 46).

A Figura 48 e a Figura 49 mostram que além de eliminar o curto-circuito, a barreira 1 garante um fluxo que circula próximo a superfície, ou seja, próximo à escória no distribuidor industrial. Facilita-se dessa forma a remoção das inclusões.

O uso da barreira 1, no entanto, gera um volume morto na região entre o veio lateral e a própria barreira, como pode ser visto na Figura 48 (instante 40 s).

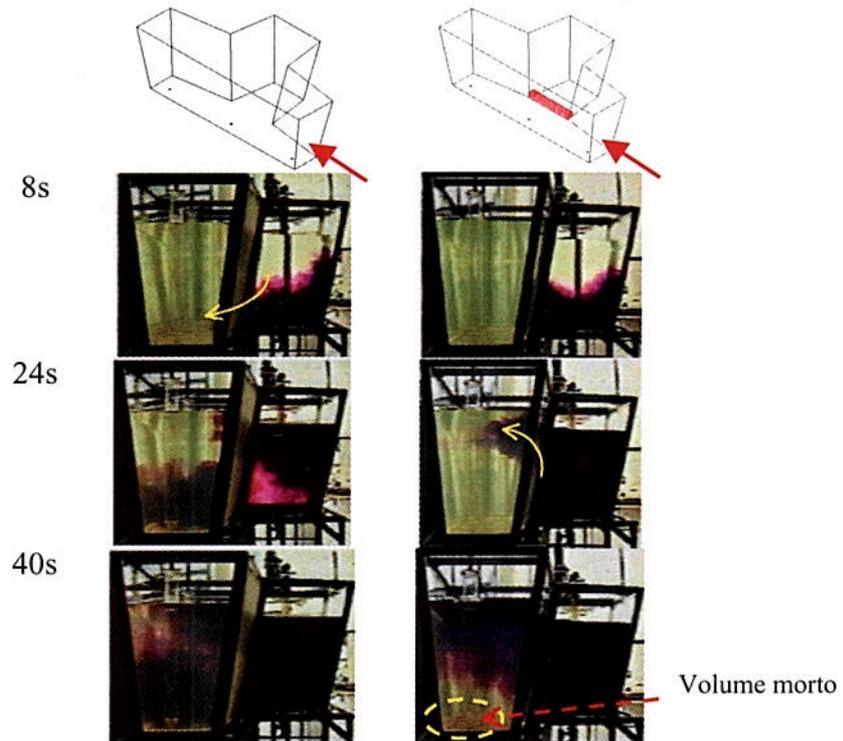


Figura 48. Ensaio com corante no modelo do distribuidor sem barreiras e no modelo com barreira 1. Vista Lateral. A esquerda das fotos é indicado o tempo transcorrido após o instante de injeção do traçador.

O escoamento do fluido observado de uma vista superior é mostrado na Figura 50. Chama a atenção a presença de um volume morto, no distribuidor sem barreiras, nas regiões assinaladas em amarelo.

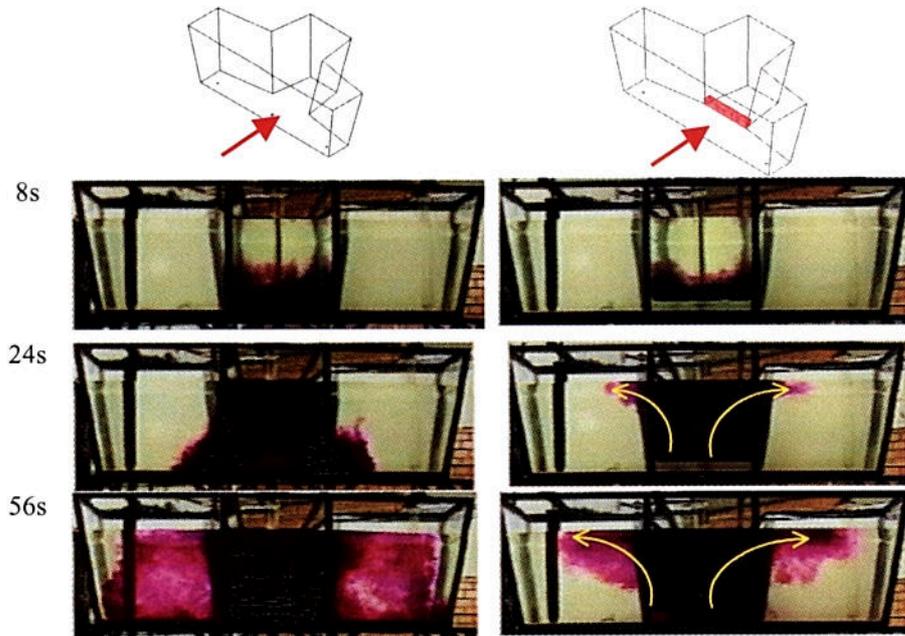


Figura 49. Ensaio com corante no distribuidor sem barreiras e no distribuidor com barreira 1. Vista frontal. A esquerda das fotos é indicado o tempo transcorrido após o instante de injeção do traçador.

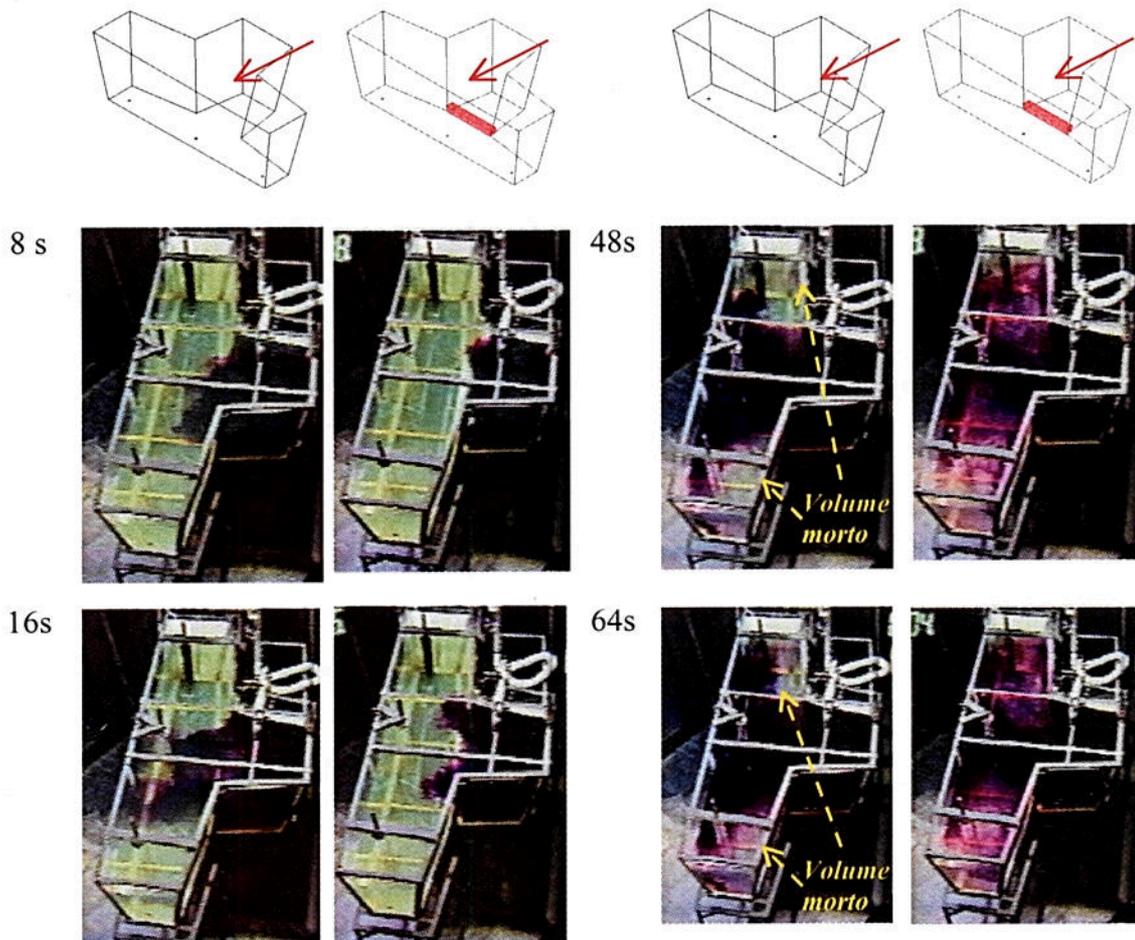


Figura 50. Ensaio com corante no distribuidor sem barreiras e no distribuidor com barreira 1. Vista superior. A esquerda das fotos é indicado o tempo transcorrido após o instante de injeção do traçador.

4.1.2. Barreira 1 versus barreira 2



Percebe-se pela Figura 51 e pela Figura 52 que o aumento da altura da barreira de 100 mm (barreira 1) para 200 mm (barreira 2) não altera a orientação do fluxo. Ou seja, assim como constatado para a barreira 1 (capítulo 4.1.1), a barreira 2 facilita a chegada das inclusões à escória.

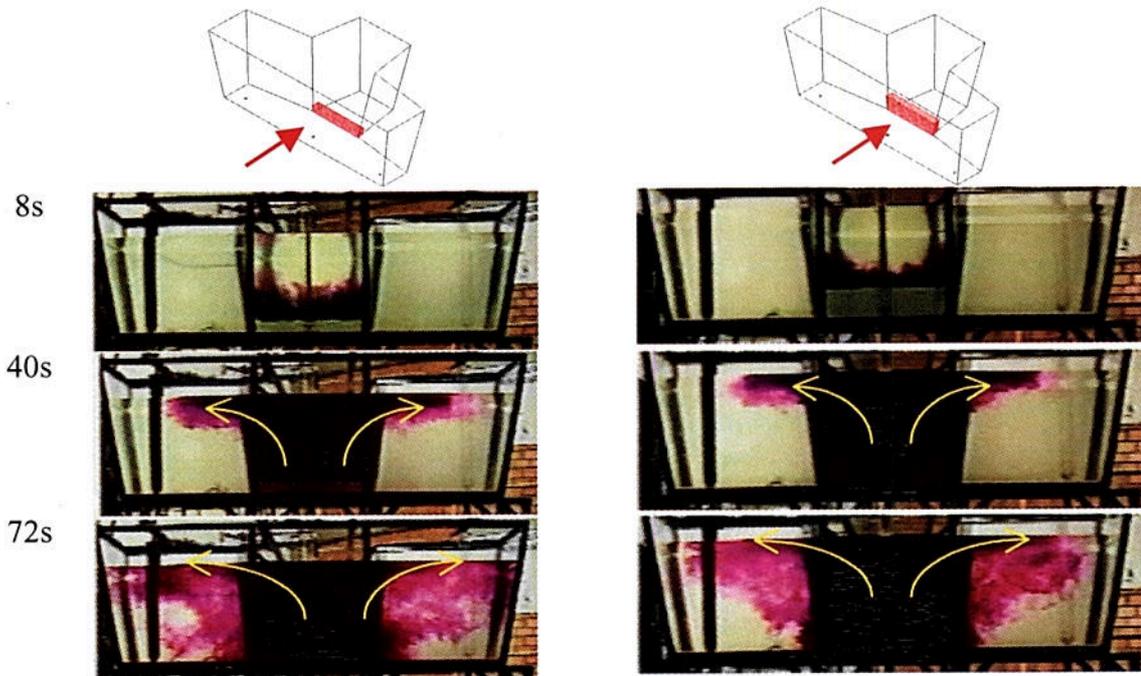


Figura 51. Ensaio com corante no distribuidor com a barreira 1 e no distribuidor com a barreira 2. Vista frontal. A esquerda das fotos é indicado o tempo transcorrido após o instante de injeção do traçador.

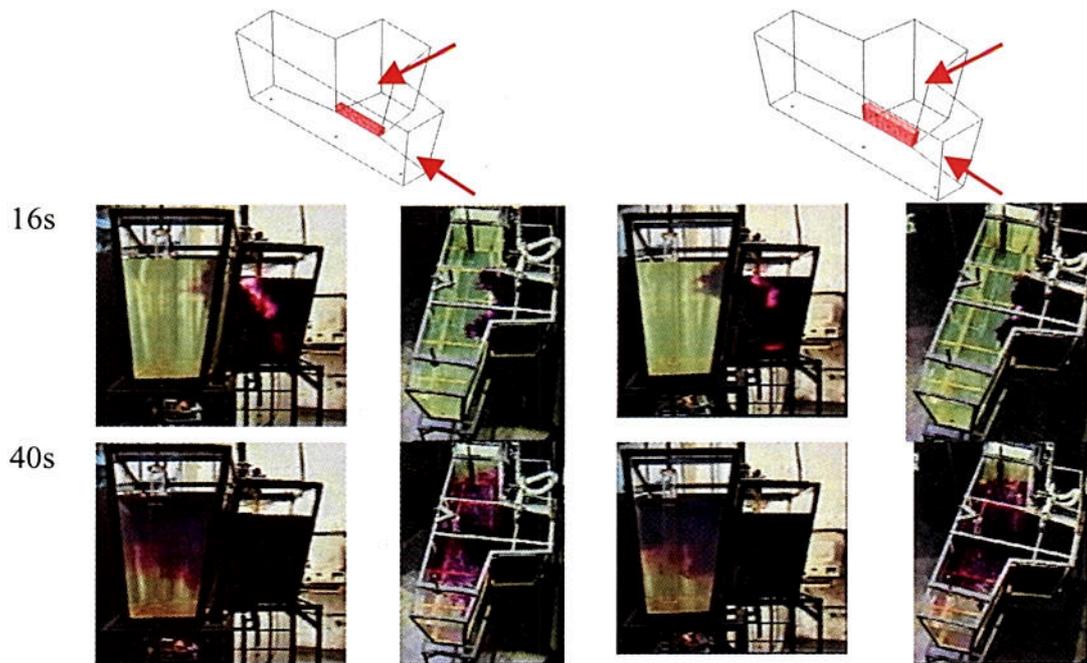
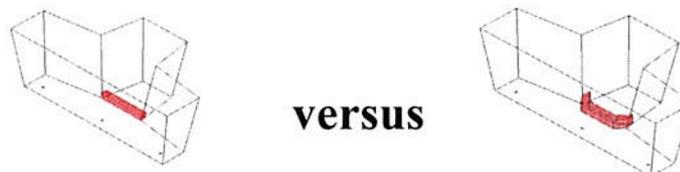


Figura 52. Ensaio com corante no distribuidor com a barreira 1 com a barreira 2. Vistas lateral e superior. A esquerda das fotos é indicado o tempo transcorrido após o instante de injeção do traçador

4.1.3. Barreira 1 versus Barreira 3



A Figura 53 mostra a movimentação do corante no modelo com a barreira 1 e a movimentação do corante no modelo com a barreira 3. Ambas condições permitem que o fluxo aproxime-se da superfície, ou seja, que o aço líquido aproxime-se da escória no distribuidor industrial facilitando a remoção das inclusões. Observa-se também (instante 88s) que o uso da barreira 3 gera um volume morto considerável na região dos tampões dos veios laterais.

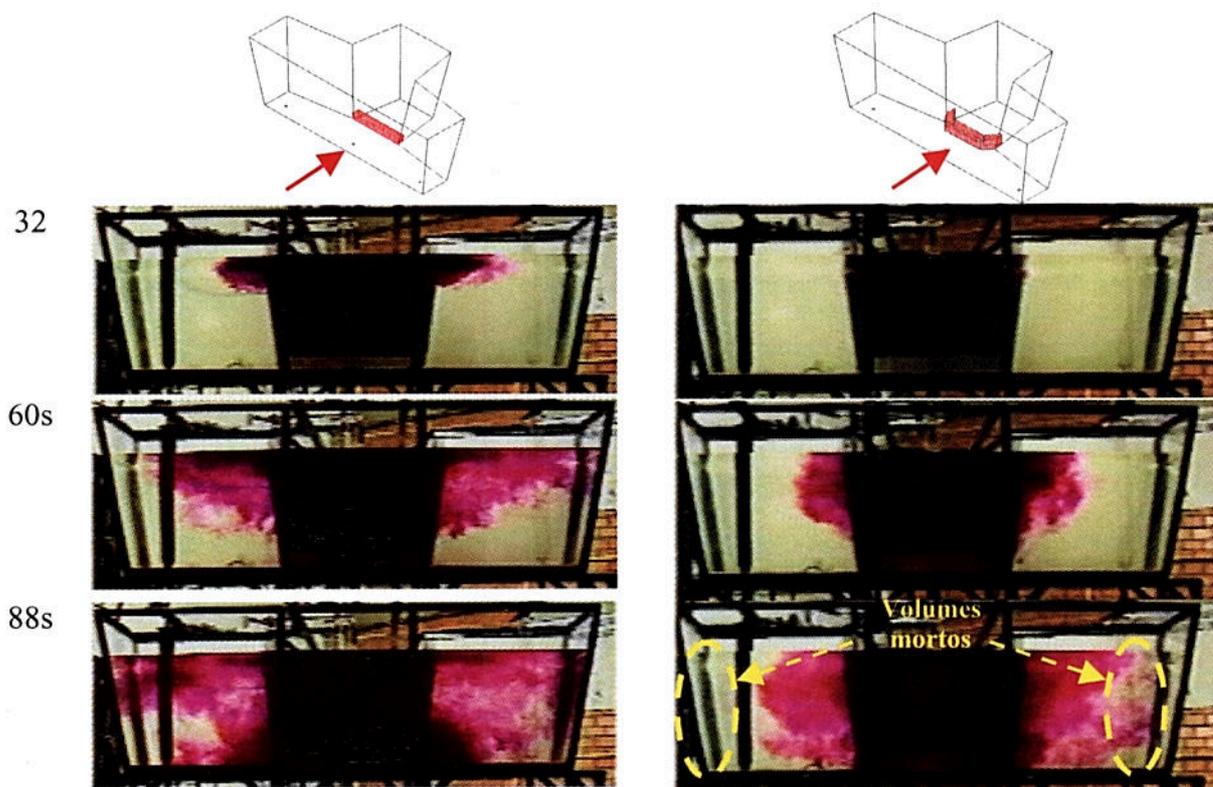


Figura 53. Ensaio com corante no distribuidor com a barreira 1 e no distribuidor com a barreira 3. Vista frontal. A esquerda das fotos é indicado o tempo transcorrido após o instante de injeção do traçador.

O escoamento do fluido observado das vistas superior e lateral é mostrado na Figura 54. A vista lateral mostra que o uso da barreira 1 ou da barreira 3 direciona o fluido para a superfície, fato já observado através da vista frontal (Figura 53). Também é observado, através da vista lateral, a presença de um volume morto entre a barreira e o veio central (instante 48s). Como constatado na Figura 53 observa-se, agora na Figura 54 (vista superior – barreira 3), uma grande região de fluxo estagnado na região marcada em amarelo (instante 48s).

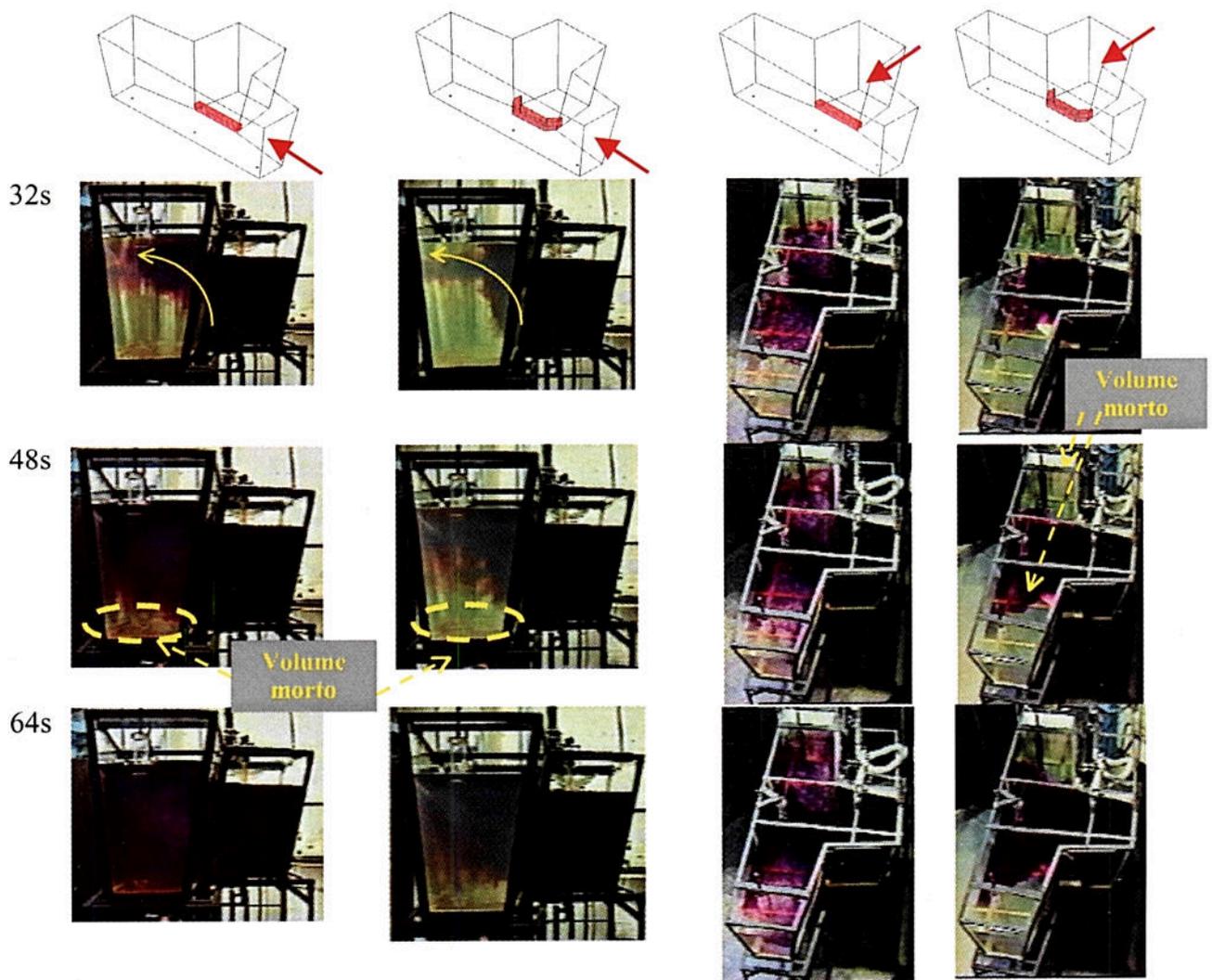
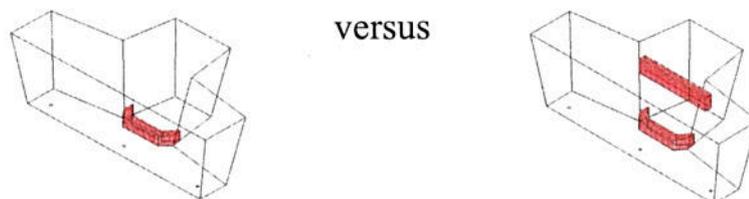


Figura 54. Ensaio com corante no distribuidor com a barreira 1 e no distribuidor com a barreira 3. Vistas lateral e superior. A esquerda das fotos é indicado o tempo transcorrido após o instante de injeção do traçador.

4.1.4. Barreira 3 versus barreiras 3 e 4



A Figura 55 mostra que o uso da barreira 4 em conjunto com a barreira 3 promove, assim como quando utiliza-se somente a barreira 3, um bom contato entre o fluxo de fluido (aço líquido) e a superfície (escória).

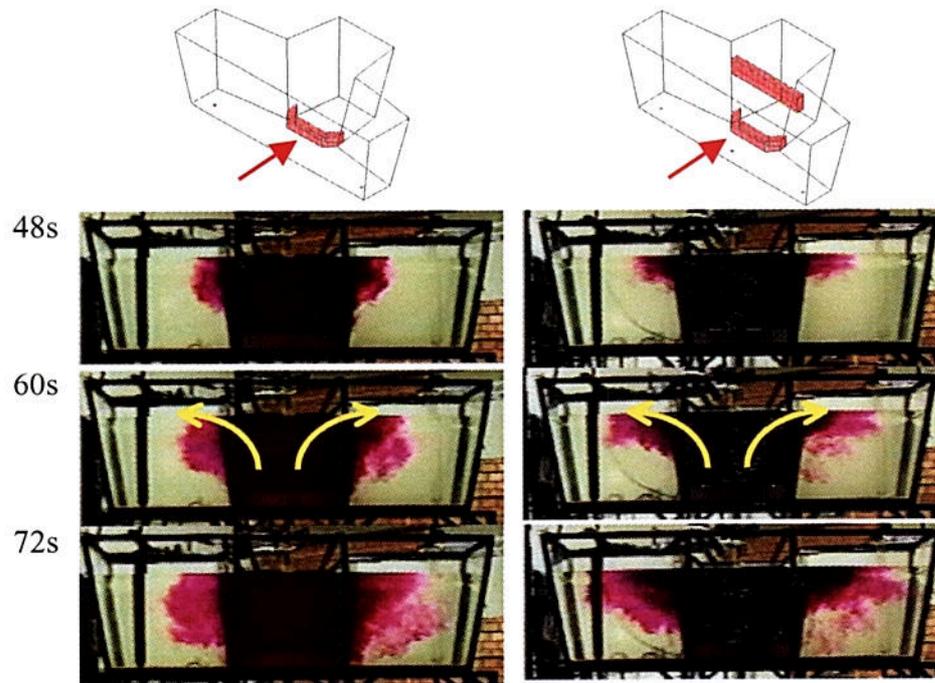


Figura 55. Ensaio com corante no distribuidor com a barreira 3 e no distribuidor com a barreira 3 e 4. Vista frontal. A esquerda das fotos é indicado o tempo transcorrido após o instante de injeção do traçador.

A Figura 56 mostra a existência de um volume morto entre a barreira 3 e o veio central, seja a barreira utilizada isoladamente ou em conjunto com a barreira 4. Na mesma figura observa-se, através da vista superior, que o volume morto gerado pelo uso da barreira 3 é eliminado com o auxílio da barreira 4 (instante 64s).

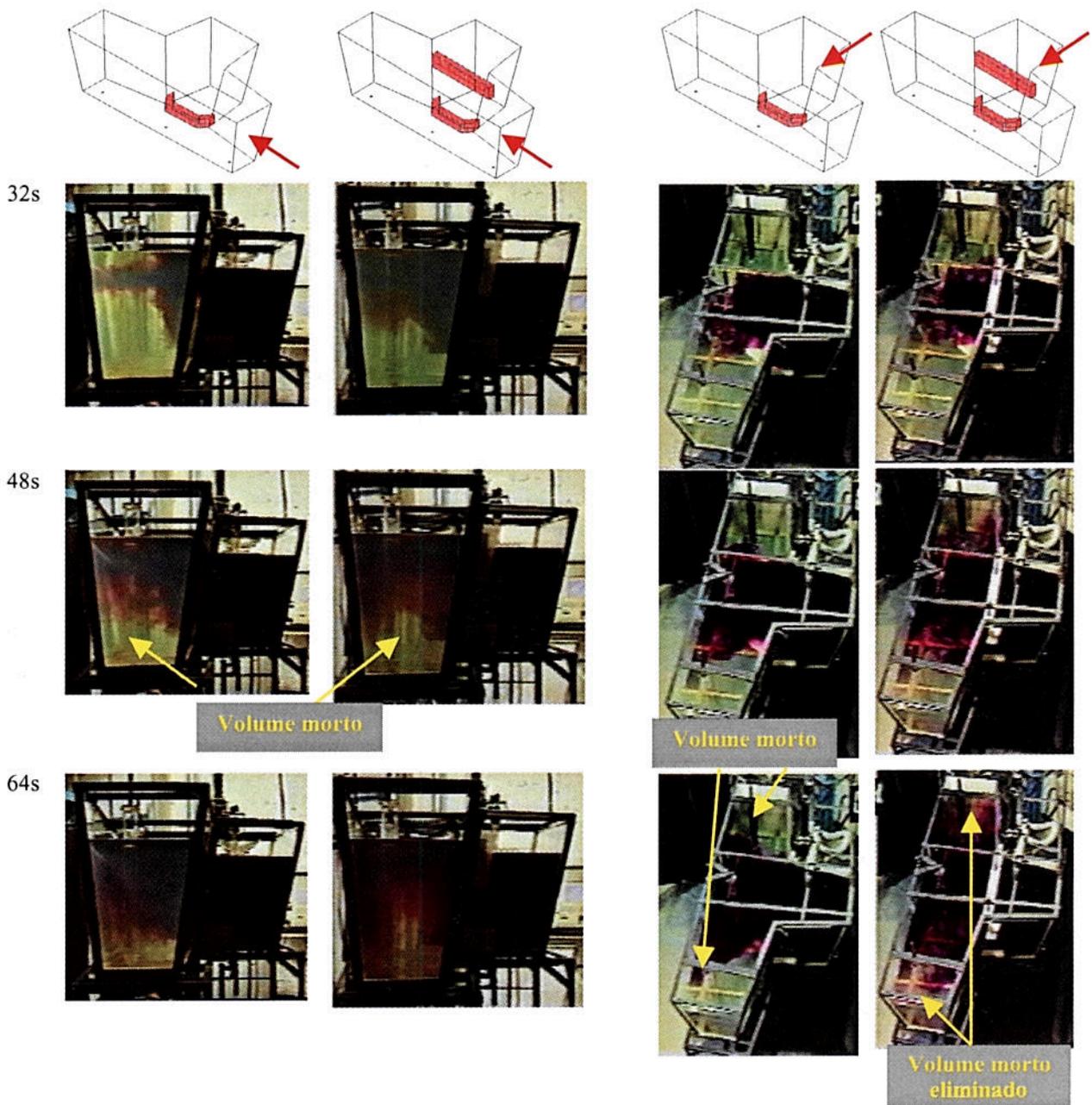


Figura 56. Ensaio com corante no distribuidor com a barreira 3 e no distribuidor com a barreira 3 e 4. Vistas lateral e superior. A esquerda das fotos é indicado o tempo transcorrido após o instante de injeção do traçador.

4.2. Curvas DTR

4.2.1. Reprodutibilidade dos ensaios

A reprodutibilidade dos ensaios DTR pode ser facilmente observada nas curvas apresentadas na Figura 57 (barreiras 1, 2 e 3) e na Figura 58 (barreiras 3 e barreiras 3 e 4).

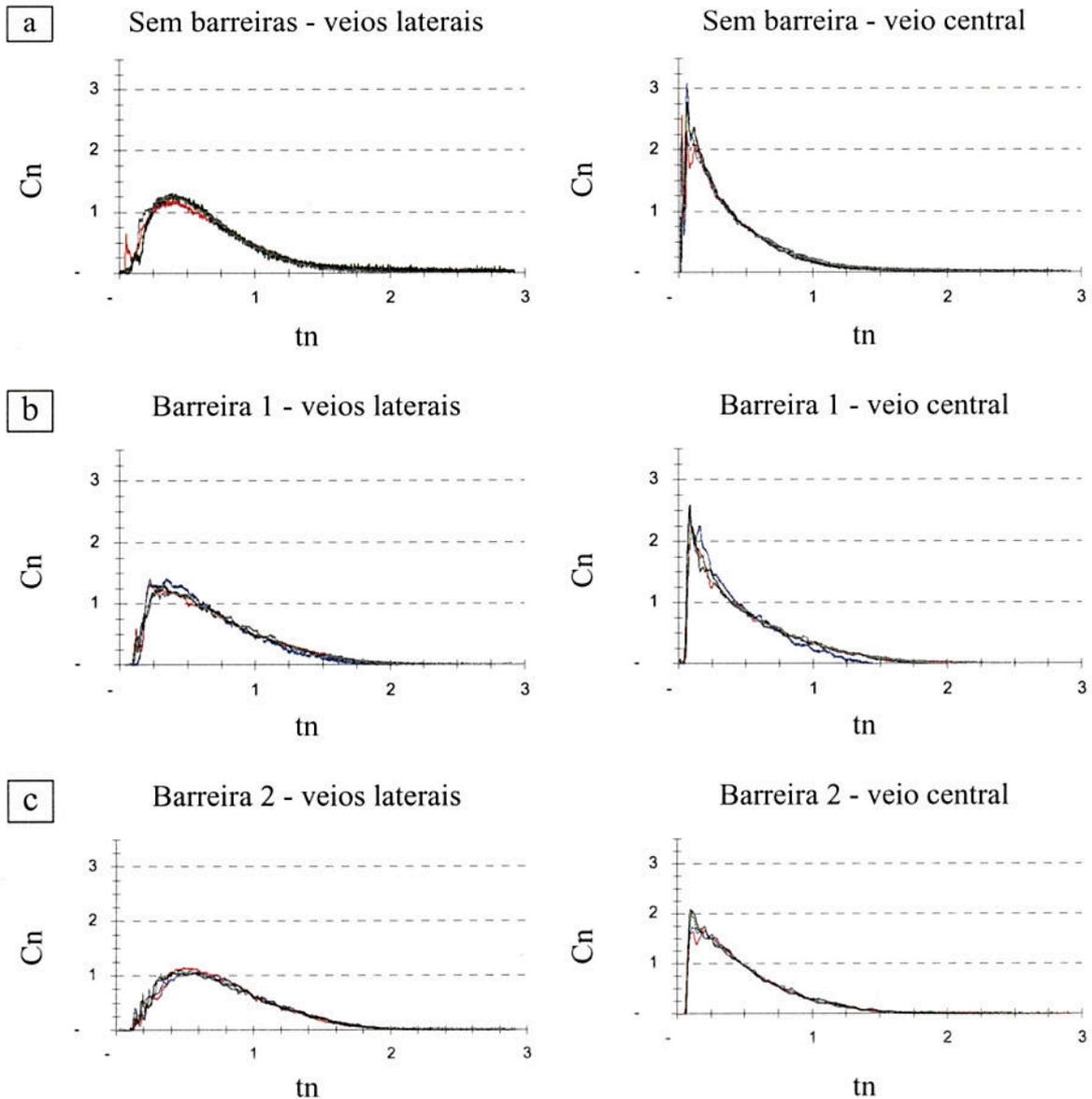


Figura 57. Reprodutibilidade das curvas DTR. a) distribuidor sem barreiras; b) distribuidor com barreira 1 e c) distribuidor com barreira 2.

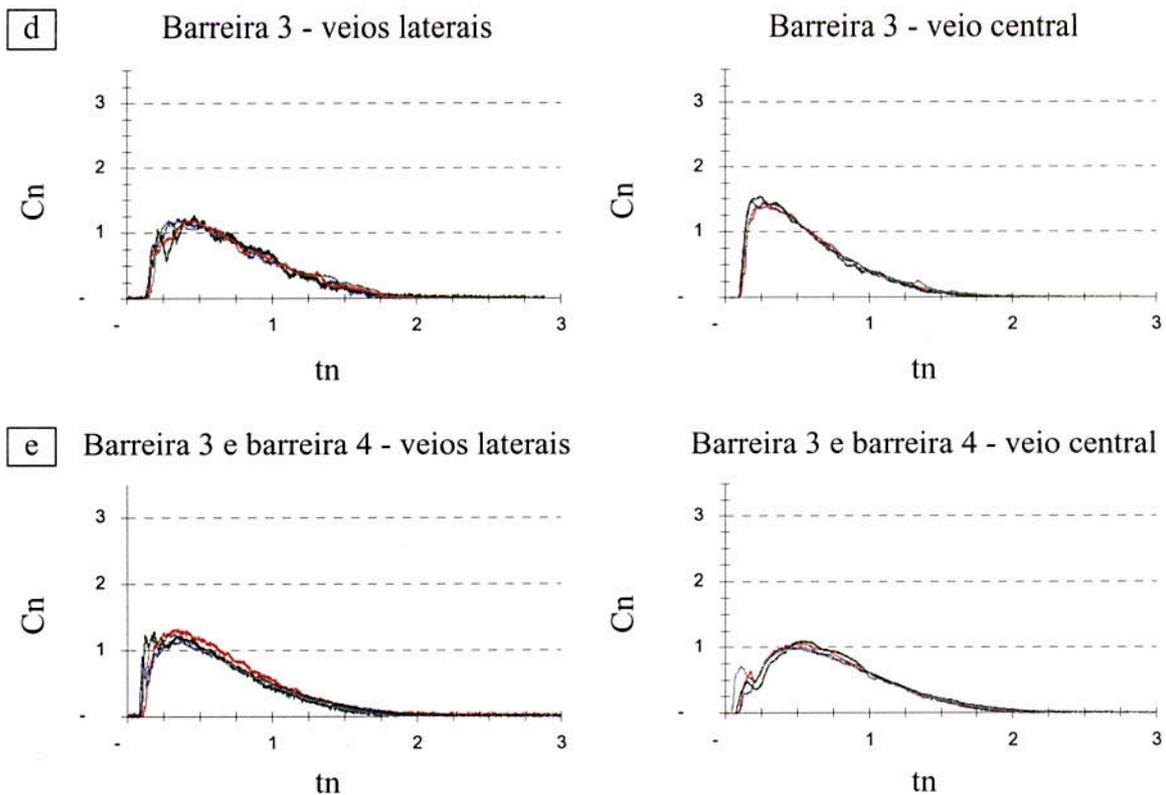


Figura 58. Reprodutibilidade das curvas DTR. a) distribuidor com barreira 3 e b) distribuidor com barreira 3 e barreira 4.

4.2.2. Média e Desvio-Padrão dos Tempos de Residência e Volumes Característicos

Para cada ensaio DTR foram determinados os tempos mínimo e médio de residência e calculados os volumes característicos. Os resultados são mostrados na Tabela 7. Os valores referentes a todo o distribuidor representam a média ponderada de todos os veios, ou seja:

$$\frac{2}{3} \times \boxed{\text{Valor do tempo de residência ou volume dos veios laterais}} + \frac{1}{3} \times \boxed{\text{Valor do tempo de residência ou volume do veio central}}$$

No caso do distribuidor sem barreiras tem-se para o tempo médio de residência de todo o distribuidor (acompanhe pela Tabela 7):

$$\frac{2}{3} \times 0,71 + \frac{1}{3} \times 0,45 = 0,62$$

A Tabela 8 mostra o % de desvio em relação a média para todos os parâmetros analisados. Percebe-se que para apenas alguns casos (marcados em vermelho) os valores encontrados foram superiores a 20%.

Tabela 7. Resultados de todos os ensaios DTR.

VEIOS LATERAIS						VEIO CENTRAL						TODO O DISTRIBUIDOR					
Tempo médio de residência normalizado						Tempo médio de residência normalizado						Tempo médio de residência normalizado					
ensaio	sem barreiras	barreira 1	barreira 2	barreira 3	barreiras 3 e 4	ensaio	sem barreiras	barreira 1	barreira 2	barreira 3	barreiras 3 e 4	ensaio	sem barreiras	barreira 1	barreira 2	barreira 3	barreiras 3 e 4
1	0,74	0,68	0,80	0,73	0,73	1	0,48	0,49	0,52	0,62	0,75	1	0,65	0,62	0,71	0,69	0,74
2	0,68	0,65	0,79	0,70	0,64	2	0,42	0,40	0,51	0,58	0,78	2	0,59	0,57	0,70	0,66	0,69
3	0,75	0,68	0,80	0,75	0,67	3	0,43	0,47	0,50	0,57	0,80	3	0,64	0,61	0,70	0,69	0,71
4	0,65	0,70	0,80	0,76	0,64	4	0,49	0,52	0,52	0,62	0,75	4	0,60	0,64	0,71	0,71	0,68
média	0,71	0,68	0,80	0,74	0,67	média	0,45	0,47	0,51	0,60	0,77	média	0,62	0,61	0,70	0,69	0,70
desvio	0,05	0,02	0,00	0,03	0,04	desvio	0,04	0,05	0,01	0,03	0,02	desvio	0,03	0,03	0,01	0,02	0,03
Tempo mínimo de residência normalizado						Tempo mínimo de residência normalizado						Tempo mínimo de residência normalizado					
ensaio	sem barreiras	barreira 1	barreira 2	barreira 3	barreiras 3 e 4	ensaio	sem barreiras	barreira 1	barreira 2	barreira 3	barreiras 3 e 4	ensaio	sem barreiras	barreira 1	barreira 2	barreira 3	barreiras 3 e 4
1	0,042	0,098	0,119	0,145	0,114	1	0,012	0,038	0,056	0,108	0,097	1	0,032	0,077	0,098	0,133	0,108
2	0,044	0,132	0,123	0,132	0,094	2	0,013	0,048	0,059	0,099	0,078	2	0,034	0,104	0,102	0,121	0,089
3	0,076	0,099	0,130	0,139	0,089	3	0,018	0,046	0,069	0,104	0,048	3	0,056	0,081	0,108	0,127	0,075
4	0,048	0,104	0,118	0,159	0,096	4	0,012	0,048	0,068	0,103	0,044	4	0,036	0,085	0,101	0,140	0,079
média	0,053	0,108	0,122	0,144	0,098	média	0,014	0,045	0,062	0,103	0,067	média	0,040	0,087	0,102	0,130	0,088
desvio	0,016	0,017	0,006	0,011	0,011	desvio	0,003	0,005	0,005	0,004	0,025	desvio	0,011	0,012	0,004	0,008	0,015
Volume de Mistura						Volume de Mistura						Volume de Mistura					
ensaio	sem barreiras	barreira 1	barreira 2	barreira 3	barreiras 3 e 4	ensaio	sem barreiras	barreira 1	barreira 2	barreira 3	barreiras 3 e 4	ensaio	sem barreiras	barreira 1	barreira 2	barreira 3	barreiras 3 e 4
1	53	49	47	42	50	1	40	42	41	43	49	1	49	46	45	42	48
2	48	42	46	44	44	2	34	34	40	39	48	2	44	40	44	42	45
3	52	46	50	47	50	3	37	41	41	40	51	3	47	44	47	45	50
4	44	47	49	50	44	4	43	45	43	44	49	4	43	47	47	48	46
média	49	46	48	46	47	média	38	41	41	41	48	média	46	44	46	44	47
desvio	4	3	2	3	4	desvio	3	4	1	2	3	desvio	3	3	2	3	3
Volume Pistonado						Volume Pistonado						Volume Pistonado					
ensaio	sem barreiras	barreira 1	barreira 2	barreira 3	barreiras 3 e 4	ensaio	sem barreiras	barreira 1	barreira 2	barreira 3	barreiras 3 e 4	ensaio	sem barreiras	barreira 1	barreira 2	barreira 3	barreiras 3 e 4
1	21	20	33	31	23	1	3	7	11	19	30	1	15	15	26	27	26
2	20	23	34	26	21	2	4	6	11	18	30	2	14	17	26	24	24
3	23	22	30	29	17	3	4	6	9	17	28	3	17	17	23	25	21
4	21	23	31	26	20	4	4	7	9	18	26	4	16	18	24	23	22
média	21	22	32	28	20	média	4	7	10	18	29	média	15	17	25	25	23
desvio	1	1	2	2	3	desvio	0	0	1	1	2	desvio	1	1	2	2	2
Volume Morto						Volume Morto						Volume Morto					
ensaio	sem barreiras	barreira 1	barreira 2	barreira 3	barreiras 3 e 4	ensaio	sem barreiras	barreira 1	barreira 2	barreira 3	barreiras 3 e 4	ensaio	sem barreiras	barreira 1	barreira 2	barreira 3	barreiras 3 e 4
1	26	32	20	27	27	1	52	51	48	38	25	1	35	38	29	31	26
2	32	35	21	30	36	2	58	60	49	42	22	2	41	43	30	34	31
3	25	32	20	25	33	3	57	53	50	43	20	3	36	39	30	31	29
4	35	30	20	24	36	4	51	48	48	38	25	4	40	36	29	29	32
média	29	32	20	26	33	média	55	53	49	40	23	média	38	39	30	31	30
desvio	5	2	0	3	4	desvio	4	5	1	3	2	desvio	3	3	1	2	3
Volume de Curto-Circuito						Volume de Curto-Circuito						Volume de Curto-Circuito					
ensaio	sem barreiras	barreira 1	barreira 2	barreira 3	barreiras 3 e 4	ensaio	sem barreiras	barreira 1	barreira 2	barreira 3	barreiras 3 e 4	ensaio	sem barreiras	barreira 1	barreira 2	barreira 3	barreiras 3 e 4
1	5	-	-	-	-	1	-	-	-	-	-	1	3	-	-	-	-
2	4	-	-	-	-	2	-	-	-	-	-	2	2	-	-	-	-
3	1	-	-	-	-	3	-	-	-	-	-	3	1	-	-	-	-
4	3	-	-	-	-	4	-	-	-	-	-	4	2	-	-	-	-
média	3	-	-	-	-	média	-	-	-	-	-	média	2	-	-	-	-
desvio	1	-	-	-	-	desvio	-	-	-	-	-	desvio	1	-	-	-	-
Volume pistonado/Volume Morto						Volume pistonado/Volume Morto						Volume pistonado/Volume Morto					
ensaio	sem barreiras	barreira 1	barreira 2	barreira 3	barreiras 3 e 4	ensaio	sem barreiras	barreira 1	barreira 2	barreira 3	barreiras 3 e 4	ensaio	sem barreiras	barreira 1	barreira 2	barreira 3	barreiras 3 e 4
1	0,81	0,62	1,63	1,17	0,87	1	0,06	0,13	0,24	0,50	1,22	1	0,44	0,40	0,89	0,89	0,98
2	0,63	0,65	1,64	0,88	0,57	2	0,06	0,10	0,22	0,43	1,36	2	0,36	0,40	0,87	0,70	0,76
3	0,92	0,68	1,51	1,15	0,52	3	0,07	0,12	0,18	0,39	1,39	3	0,46	0,43	0,77	0,80	0,73
4	0,62	0,76	1,57	1,06	0,57	4	0,07	0,15	0,18	0,49	1,01	4	0,39	0,49	0,81	0,81	0,69
média	0,74	0,68	1,60	1,07	0,67	média	0,07	0,12	0,20	0,45	1,25	média	0,41	0,43	0,83	0,80	0,79
desvio	0,15	0,06	0,08	0,13	0,16	desvio	0,01	0,02	0,03	0,05	0,17	desvio	0,05	0,04	0,06	0,08	0,13

Tabela 8. Percentual de desvio em relação a média para todos os parâmetros identificados a partir das curvas DTR.

	VEIOS LATERAIS					VEIO CENTRAL					TODO O DISTRIBUIDOR				
	Tempo médio de residência normalizado					Tempo médio de residência normalizado					Tempo médio de residência normalizado				
<i>desvio / média (%)</i>	sem barreiras	barreira 1	barreira 2	barreira 3	barreiras 3 e 4	sem barreiras	barreira 1	barreira 2	barreira 3	barreiras 3 e 4	sem barreiras	barreira 1	barreira 2	barreira 3	barreiras 3 e 4
	6,7	3,2	0,4	3,4	6,4	8,3	10,0	2,3	4,5	3,1	5,0	4,9	0,8	3,2	3,9
	Tempo mínimo de residência normalizado					Tempo mínimo de residência normalizado					Tempo mínimo de residência normalizado				
<i>desvio / média (%)</i>	sem barreiras	barreira 1	barreira 2	barreira 3	barreiras 3 e 4	sem barreiras	barreira 1	barreira 2	barreira 3	barreiras 3 e 4	sem barreiras	barreira 1	barreira 2	barreira 3	barreiras 3 e 4
	30,1	15,4	4,5	8,0	11,3	19,5	10,8	8,2	3,7	37,6	28,8	13,9	4,2	6,3	17,1
	Volume de Mistura					Volume de Mistura					Volume de Mistura				
<i>desvio / média (%)</i>	sem barreiras	barreira 1	barreira 2	barreira 3	barreiras 3 e 4	sem barreiras	barreira 1	barreira 2	barreira 3	barreiras 3 e 4	sem barreiras	barreira 1	barreira 2	barreira 3	barreiras 3 e 4
	8,7	5,9	3,7	7,5	7,9	9,1	10,8	3,6	5,2	5,7	5,8	7,2	3,4	6,0	5,4
	Volume Pistonado					Volume Pistonado					Volume Pistonado				
<i>desvio / média (%)</i>	sem barreiras	barreira 1	barreira 2	barreira 3	barreiras 3 e 4	sem barreiras	barreira 1	barreira 2	barreira 3	barreiras 3 e 4	sem barreiras	barreira 1	barreira 2	barreira 3	barreiras 3 e 4
	6,1	6,7	5,1	9,0	12,4	5,2	6,2	13,9	5,1	7,7	5,9	5,9	6,2	7,1	8,9
	Volume Morto					Volume Morto					Volume Morto				
<i>desvio / média (%)</i>	sem barreiras	barreira 1	barreira 2	barreira 3	barreiras 3 e 4	sem barreiras	barreira 1	barreira 2	barreira 3	barreiras 3 e 4	sem barreiras	barreira 1	barreira 2	barreira 3	barreiras 3 e 4
	16,2	6,6	1,8	9,6	13,0	6,9	8,9	2,4	6,7	10,1	8,2	7,6	1,9	7,0	9,3
	Volume de Curto-Circuito					Volume de Curto-Circuito					Volume de Curto-Circuito				
<i>desvio / média (%)</i>	sem barreiras	barreira 1	barreira 2	barreira 3	barreiras 3 e 4	sem barreiras	barreira 1	barreira 2	barreira 3	barreiras 3 e 4	sem barreiras	barreira 1	barreira 2	barreira 3	barreiras 3 e 4
	46,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	46,0	-	-	-	-
	Volume pistonado/Volume Morto					Volume pistonado/Volume Morto					Volume pistonado/Volume Morto				
<i>desvio / média (%)</i>	sem barreiras	barreira 1	barreira 2	barreira 3	barreiras 3 e 4	sem barreiras	barreira 1	barreira 2	barreira 3	barreiras 3 e 4	sem barreiras	barreira 1	barreira 2	barreira 3	barreiras 3 e 4
	19,9	9,4	4,7	12,5	25,0	7,7	14,2	14,9	10,8	13,9	11,8	9,8	6,7	9,9	16,5

4.2.3. Identificação do curto-circuito

A Figura 59 mostra, de forma parcial, a curva DTR para o distribuidor sem barreiras. Observa-se, pelo primeiro pico de concentração, a presença de um fluxo de curto-circuito para o veio central. Isso vem ao encontro do que foi observado através dos ensaios de visualização do escoamento (capítulo 4.1.1, página 51).

A Figura 60 mostra que o uso da barreira 1 eliminou o pico de concentração que caracteriza o volume de curto-circuito.

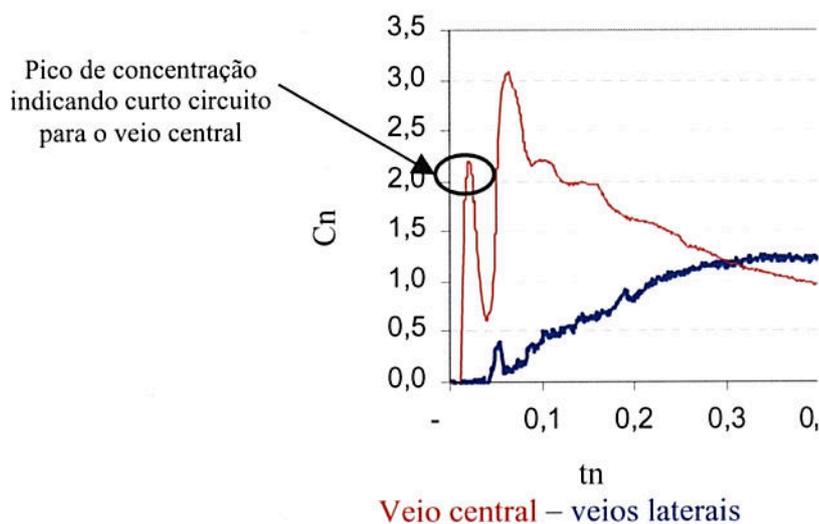


Figura 59. Curva DTR do distribuidor sem barreiras mostrando em detalhe a presença de um volume de curto-circuito para o veio central.

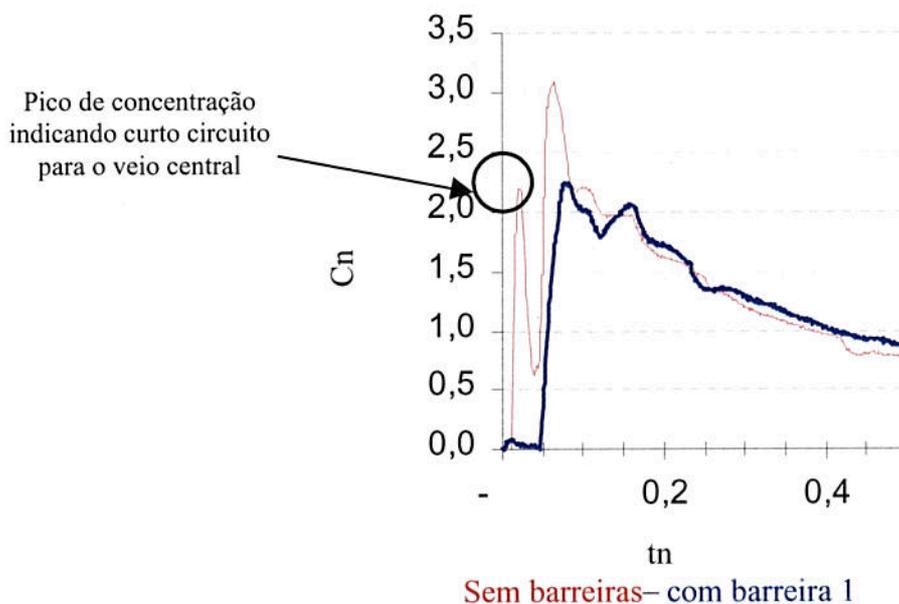


Figura 60. Eliminação do curto-circuito promovida pelo uso da barreira 1.

4.2.4. Homogeneidade entre veios

Como pode ser visto na Figura 61, quando o distribuidor está operando sem barreiras, com a barreira 1 ou com a barreira 2, a curva DTR dos veios laterais está defasada no tempo em relação a curva DTR do veio central. Esse efeito de heterogeneidade entre os veios é reduzido sensivelmente quando utiliza-se uma barreira posicionada mais perto do veio central do que as barreiras 1 ou 2, ou seja, quando utiliza-se a barreira 3 (Figura 62a). A Figura 62b mostra que o uso da barreira 4 em conjunto com a barreira 3 gera condições de homogeneidade entre as curvas DTR tão boas quanto quando utiliza-se a barreira 3 isoladamente.

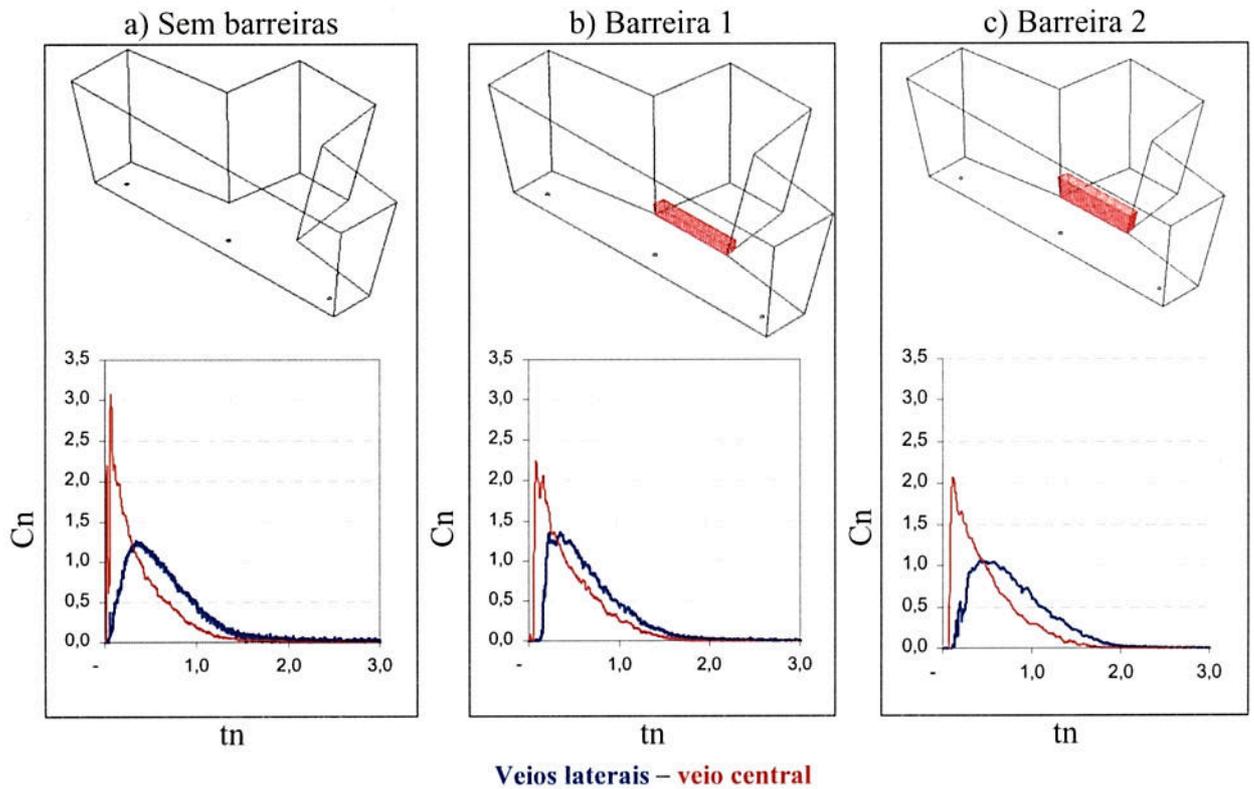


Figura 61. Curvas DTR dos veios laterais e do veio central. a) distribuidor sem barreiras; b) distribuidor com barreira 1 e c) distribuidor com barreira 2;

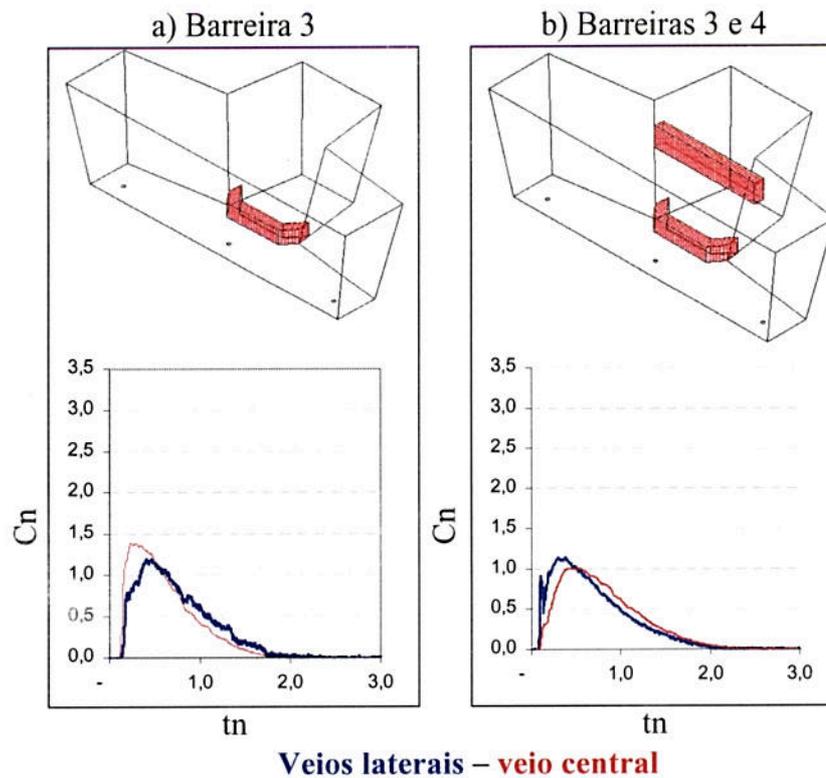


Figura 62. Curvas DTR dos veios laterais e do veio central: a) distribuidor com a barreira 3 e b) distribuidor com a barreira 3 e a barreira 4.

Pode-se definir um grau de homogeneidade entre os veios conforme a equação mostrada abaixo. Quando o grau de homogeneidade é igual a 100% os tempos médios de residência para ambos os veios são iguais. Isso significa dizer que o tempo disponível para a flotação é, em média, igual para os veios laterais e para o veio central. A figura 63 mostra que o maior grau de homogeneidade é atingido utilizando-se a barreira 3 e 4 e o menor grau de homogeneidade é obtido com o uso da barreira 2 ou quando não utiliza-se nenhuma barreira no distribuidor.

$$Gh (\%) = 100 - 100 \cdot \text{valor absoluto} \cdot \left(\frac{(tn \text{ médio}_{vl} - tn \text{ médio}_{vc})}{tn \text{ médio}_{vc}} \right) \quad \text{Equação 27}$$

Onde:

$tn \text{ médio}_{vl}$ é o tempo médio de residência normalizado do fluido que vai para os veios laterais
 $tn \text{ médio}_{vc}$ é o tempo médio de residência normalizado do fluido que vai para o veio central

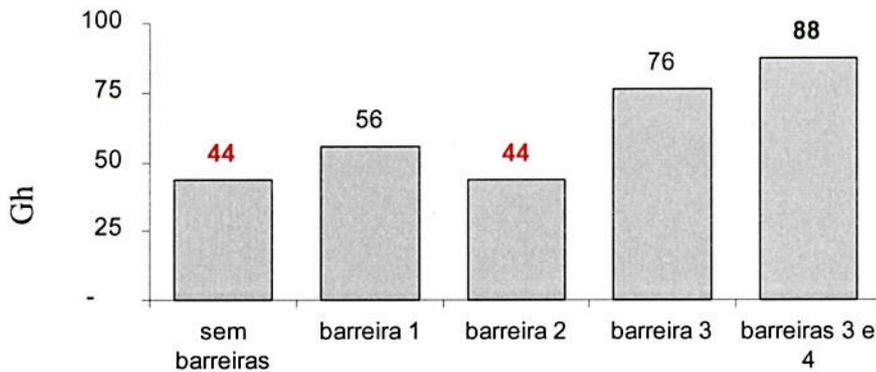


figura 63. Grau de homogeneidade entre os veios definido pela Equação 27 em função da barreira. Em verde é apresentado o melhor resultado e em vermelho o pior resultado.

4.2.5. Tempo Médio de Residência

A Figura 64 mostra os tempos médios de residência normalizados dos veios laterais e do veio central para as diversas configurações de barreiras testadas. Pode-se ver que o maior tempo de residência médio para o aço que sai pelos veios laterais é obtido com o uso da barreira 2, enquanto que o menor tempo é atingido quando utiliza-se as barreiras 3 e 4 simultaneamente. Ao analisar-se a condição de distribuição dos tempos de residência do veio central percebe-se que a melhor condição é atingida quando utiliza-se as barreiras 3 e 4 simultaneamente, enquanto que a pior condição é dada com o distribuidor sem barreiras.

Também percebe-se pelo gráfico da Figura 64 que o tempo médio de residência dos veios laterais é maior do que o tempo médio de residência do veio central, a exceção do distribuidor com barreiras 3 e 4. A partir daí pode-se dizer que o uso da barreira 4 em conjunto com a barreira 3 melhora as condições de flotação do aço que sai pelo veio central em detrimento das condições de flotação do aço que sai pelos veios laterais.

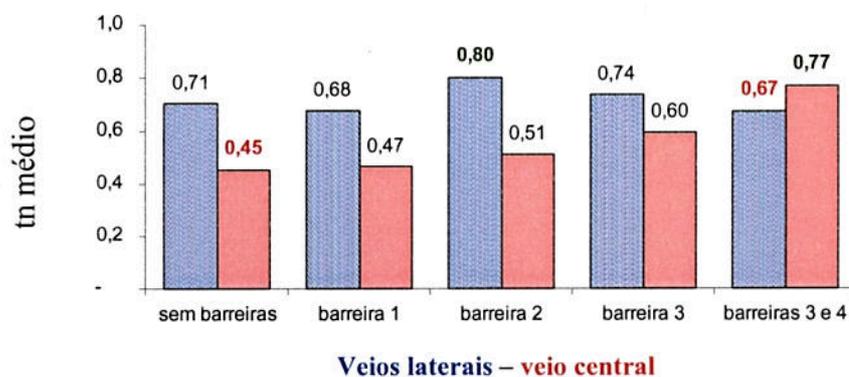


Figura 64. Gráfico correlacionando a barreira utilizada com o tempo médio de residência normalizado (tn médio) dos veios laterais e do veio central. Em verde é apresentado o melhor resultado e em vermelho o pior resultado.

Ao observar o comportamento médio de todo o distribuidor, ou seja, ponderando a contribuição de cada veio, percebe-se que o maior tempo médio de residência é atingido com o uso da barreira 2 ou da barreira 3 e 4 enquanto que menor tempo médio é dado pelo uso da barreira 1 (Figura 65). Ou seja, com o uso da barreira 2 ou da barreira 3 e 4 as inclusões terão o maior tempo para chegarem até a escória e com o uso da barreira 1 as inclusões terão o menor tempo para chegarem até a escória.

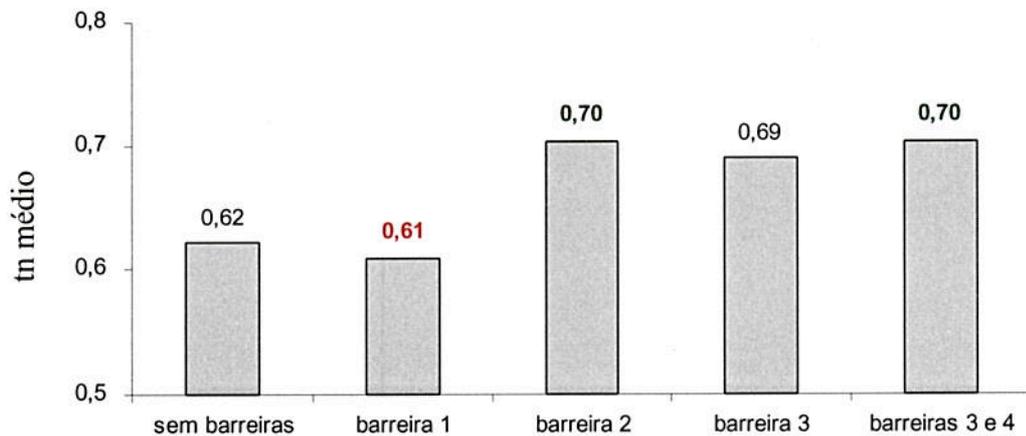


Figura 65. Gráfico correlacionando a barreira utilizada com o tempo médio de residência normalizado (t_n médio) do distribuidor como um todo (média ponderada entre os veios). Em verde é apresentado o melhor resultado e em vermelho o pior resultado.

4.2.6. Tempo Mínimo de Residência

A Figura 66 mostra os tempos mínimos de residência dos veios laterais e do veio central para as diversas barreiras testadas. Percebe-se que a melhor condição de flotação de inclusões, ou seja, o maior tempo de residência mínimo, tanto para os veios laterais quanto para o veio central, é atingido com o uso da barreira 3. Pode-se afirmar também que a pior condição é dada quando trabalha-se com o distribuidor sem barreiras. As mesmas considerações valem para o distribuidor como um todo (Figura 67). Outro fato importante que pode ser constatado através do gráfico da Figura 66 é que o tempo mínimo do veio central sempre é menor que o tempo mínimo dos veios laterais.

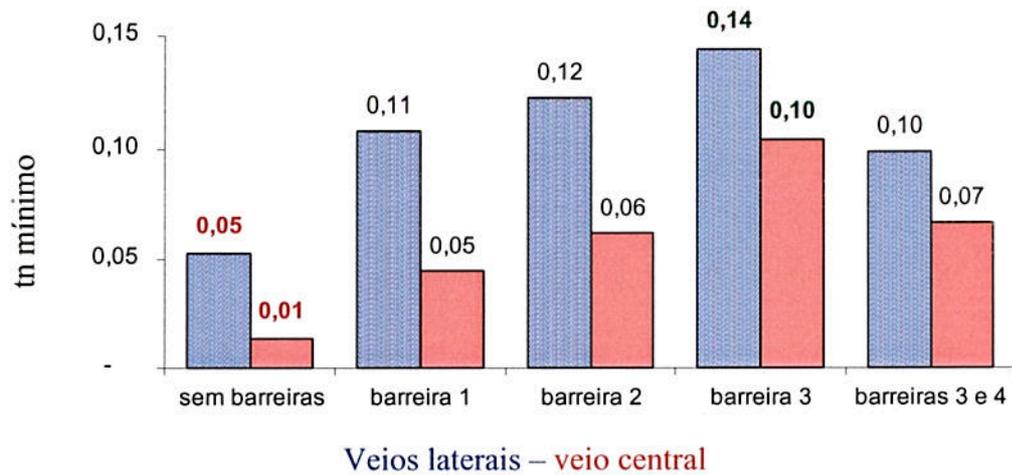


Figura 66. Gráfico correlacionando a barreira utilizada com o tempo mínimo de residência normalizado (t_n mínimo) dos veios laterais e do veio central. Em verde é apresentado o melhor resultado e em vermelho o pior resultado.

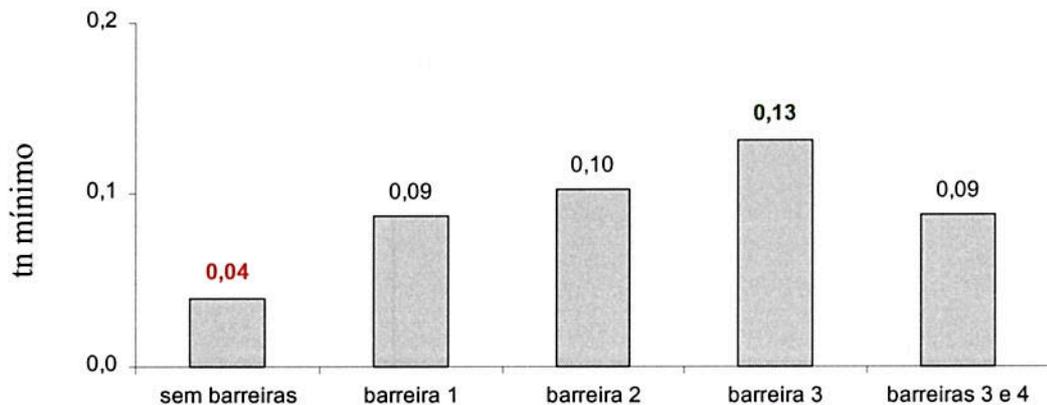


Figura 67. Gráfico correlacionando a barreira utilizada com o tempo mínimo de residência normalizado (t_n mínimo) do distribuidor como um todo (média ponderada entre os veios). Em verde é apresentado o melhor resultado e em vermelho o pior resultado.

4.2.7. Volumes Característicos

A Figura 68 mostra os volumes característicos para o fluido que circula no distribuidor e alimenta os veios laterais. Percebe-se que:

- 1- Para todas as condições testadas o maior volume é o de mistura;
- 2- O volume de mistura possui aproximadamente os mesmos valores para o distribuidor sem barreiras e para o distribuidor com qualquer uma das barreiras testadas.
- 3- A barreira 2 apresenta o maior volume pistonado disperso e o menor volume morto, ou seja, apresenta as melhores condições de fluxo para a flotação das inclusões.
- 4- O menor volume pistonado disperso e o maior volume morto são atingidos quando utiliza-se as barreiras 3 e 4 simultaneamente;
- 5- Não foi observado volume de curto-circuito para os veios laterais.

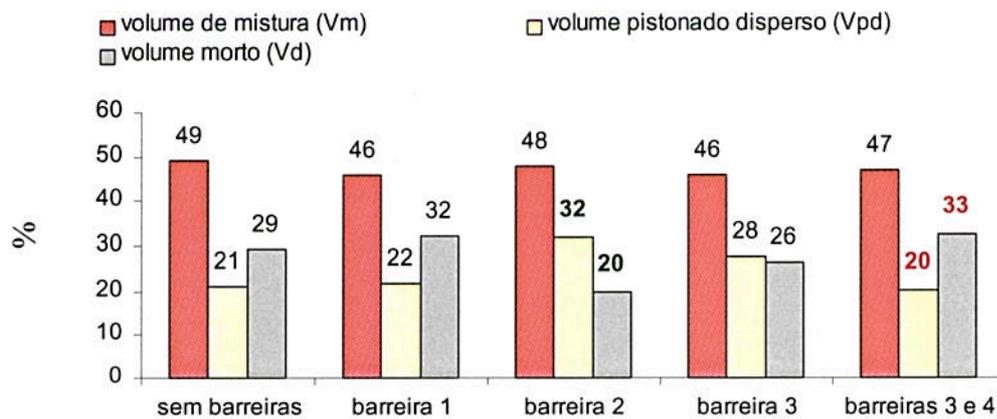


Figura 68. Volumes característicos do fluido que vai para os veios laterais. Em verde é apresentado o melhor resultado e em vermelho o pior resultado.

Os volumes característicos para o fluido que circula no distribuidor e alimenta o veio central são mostrados na Figura 69. Observa-se que:

1. Comparando todas as condições testadas o maior volume de mistura é atingido com o uso das barreiras 3 e 4. Isso pode ser atribuído ao fato de que a barreira 4 confina a turbulência gerada pelo jato de entrada do distribuidor, como mostra a Figura 70;
2. Para o distribuidor sem barreiras, com barreira 1 ou com barreira 2, o maior volume presente é o morto;
3. Para o distribuidor com barreira 3 ou barreira 3 e 4, o maior volume é o de mistura;
4. O maior volume pistonado disperso e o menor volume morto são atingidos com o uso das barreiras 3 e 4 simultaneamente;
5. O distribuidor sem barreiras apresenta as piores condições possíveis, ou seja, possui o maior volume morto, apresenta volume de curto-circuito e possui o menor volume pistonado;
6. Qualquer uma das barreiras testadas inibe o volume de curto-circuito observado no distribuidor sem barreiras.

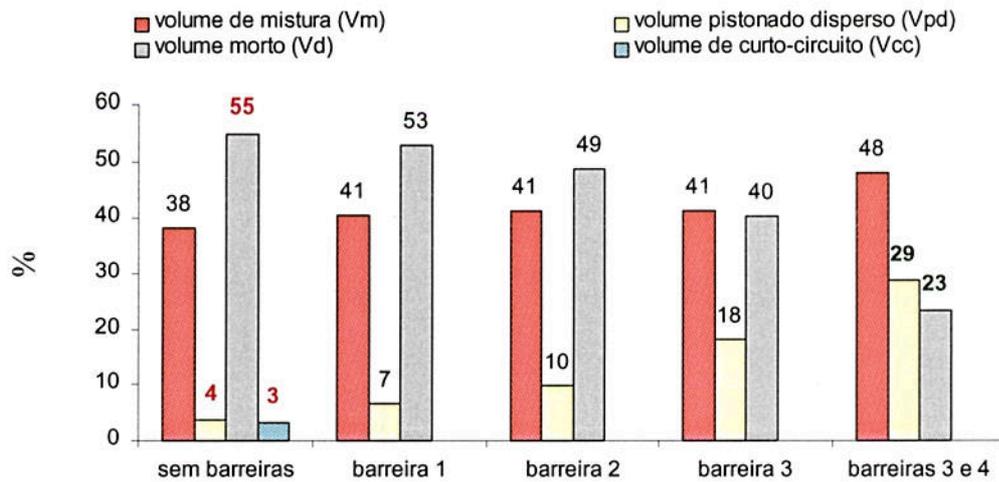


Figura 69. Volumes característicos do fluido que vai para os veio central. Em verde é apresentado o melhor resultado e em vermelho o pior resultado.

A Figura 71 mostra os volumes característicos para todo o distribuidor, onde:

1. as melhores condições de volume pistonado disperso são obtidas com o uso da barreira 2 ou o uso da barreira 3;
2. o menor volume morto é atingido com o uso da barreira 2 ou da barreira 3 e 4;
3. o maior volume morto refere-se ao uso da barreira 1;
4. o menor volume pistonado disperso refere-se ao distribuidor sem barreiras;
5. o volume de curto-circuito somente é observado no distribuidor sem barreiras

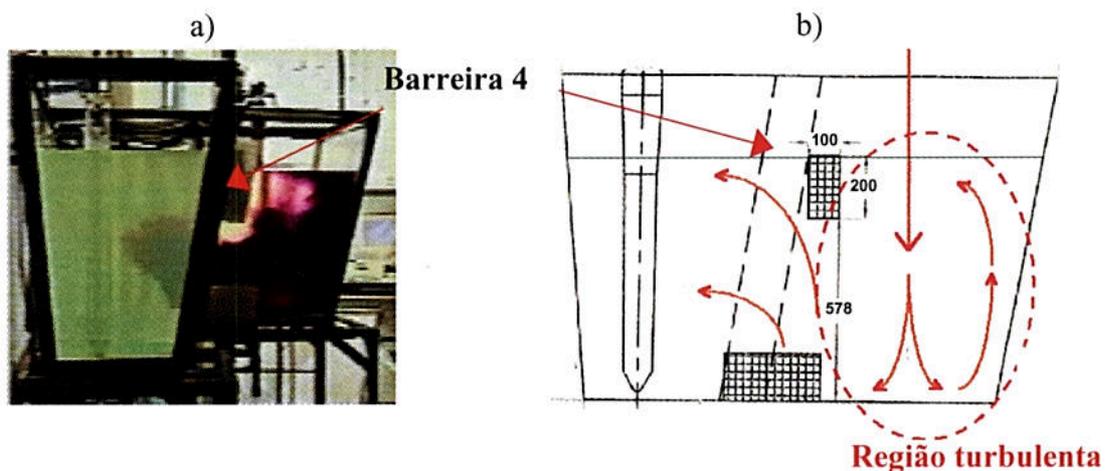


Figura 70. Turbulência gerada pelo jato da panela no modelo com as barreiras 3 e 4: a) ensaio com corante (imagem após 12s da injeção); b) desenho esquemático da trubulência gerada pelo jato de entrada do distribuidor e confinada pela barreira 4.

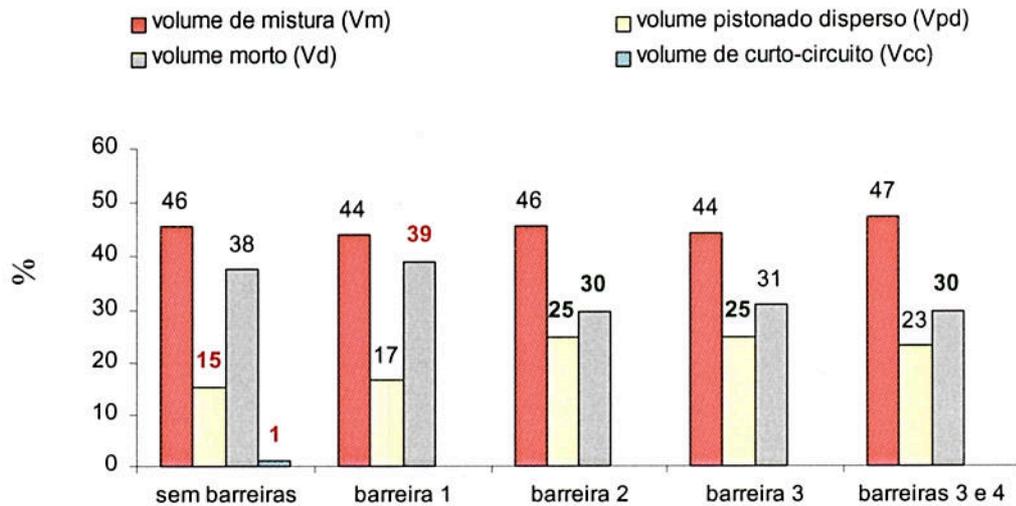


Figura 71. Volumes característicos do distribuidor como um todo. Em verde é apresentado o melhor resultado e em vermelho o pior resultado.

4.2.8. Relação entre volume pistonado disperso e volume morto

Uma maior relação entre volume pistonado e volume morto confere ao distribuidor condições de escoamento mais favoráveis a flotação de inclusões.

Sobre esse aspecto e com exceção ao que acontece com o uso das barreiras 3 e 4 simultaneamente, os veios laterais apresentam maiores chances de flotação do que o veio central. Pode-se dizer, então, que o uso da barreira 3 e 4 melhora as condições de flotação de inclusões para o veio central em detrimento dos veios laterais; esse fato já fora constatado através da análise dos tempos médios de residência (capítulo 4.2.5, página 67)

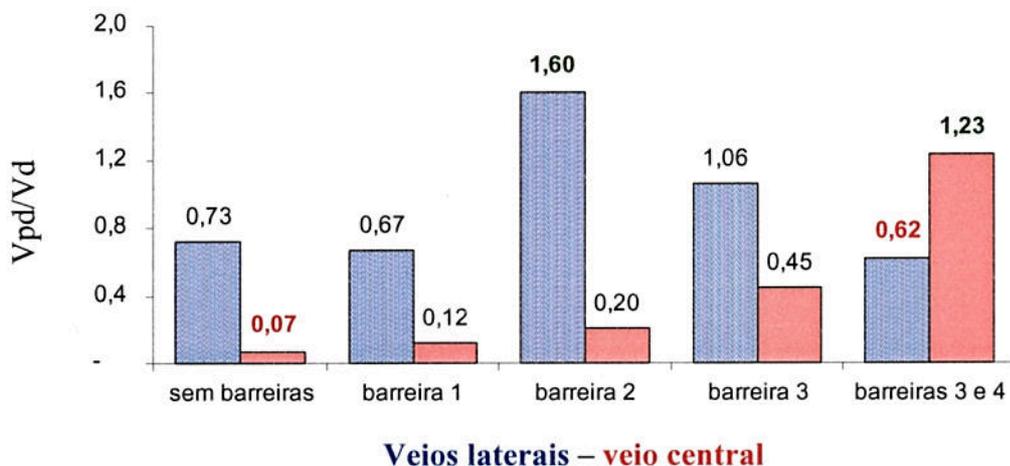


Figura 72. Relação entre volume pistonado disperso e volume morto em função das barreiras testadas. Análise por veio. Em verde é apresentado o melhor resultado e em vermelho o pior resultado.

Se considerar-se o distribuidor como um todo (Figura 73), a maior relação entre volume pistonado e volume morto é atingida como o uso da barreira 2 e a menor relação é obtida no distribuidor sem barreiras.

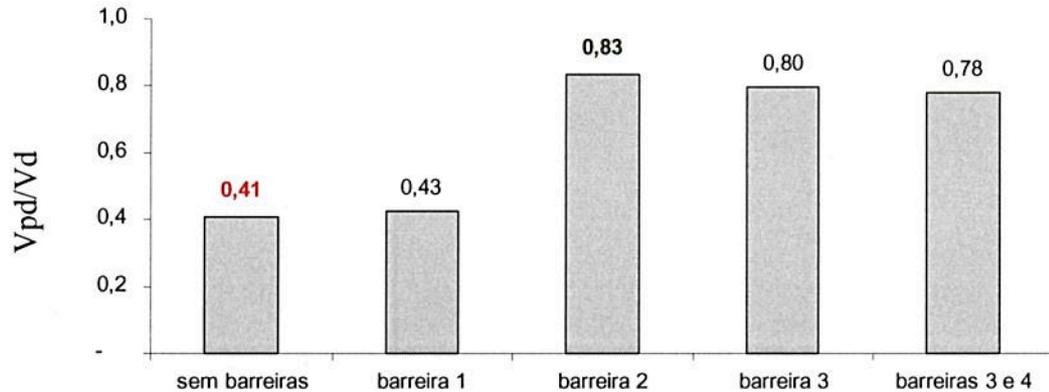


Figura 73. Este gráfico mostra, para todo o volume líquido do distribuidor, a relação entre volume pistonado e volume morto em função das barreiras testadas. Em verde é apresentado o melhor resultado e em vermelho o pior resultado.

4.3. Quadro Comparativo entre todas as Barreiras

A Tabela 9, a Tabela 10 e a Tabela 11 mostram uma síntese dos resultados obtidos para cada barreira testada. Para todos os parâmetros analisados o melhor resultado é destacado em verde, o pior resultado é destacado em vermelho e os resultados intermediários destacados em amarelo.

Analisando-se o distribuidor como um todo (Tabela 9) percebe-se que a presença dos piores resultados está concentrada entre o distribuidor sem barreiras e o distribuidor com barreira 1. Já os melhores resultados estão concentrados na barreira 2 e 3 mais 4.

Analisando o comportamento dos veios laterais (Tabela 10) percebe-se que os melhores resultados são obtidos com o uso da barreira 2.

Analisando-se o comportamento do veio central (Tabela 11) percebe-se que os melhores resultados são obtidos com o uso das barreiras 3 e 4.

Tabela 9. Parâmetros analisados via curva DTR. Pior resultado em vermelho e melhor resultado em verde.

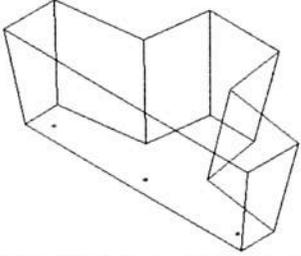
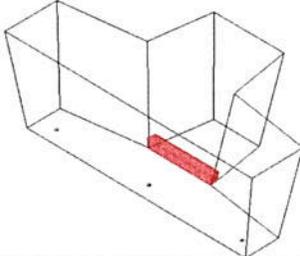
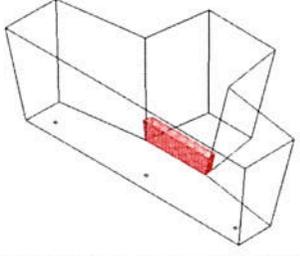
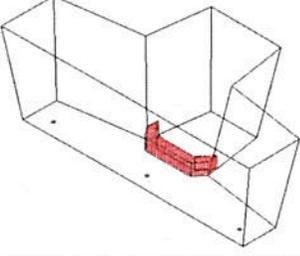
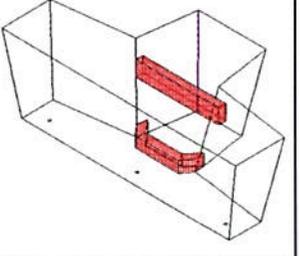
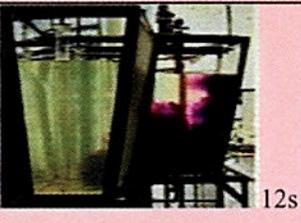
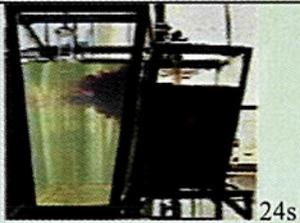
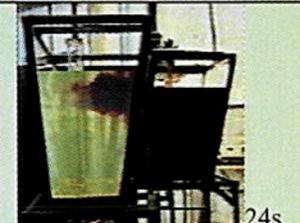
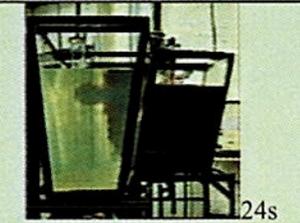
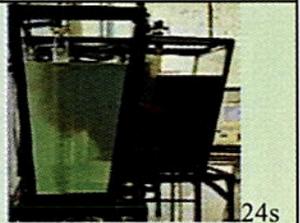
	Sem barreiras	Barreira 1	Barreira 2	Barreira 3	Barreiras 3 e 4
					
Fluxo passando próximo à escória	 32s	 32s	 44s	 44s	 44s
Curto-circuito	 12s	 24s	 24s	 24s	 24s
Grau de homogeneidade entre os veios	44%	56%	44%	76%	88%
Tempo médio de residência	0,62	0,61	0,70	0,69	0,70
Tempo mínimo de residência	0,04	0,09	0,10	0,13	0,09
Volume pistonado disperso / volume morto	0,41	0,43	0,83	0,80	0,78
Resultado Geral	5 1 zero	1 3 2	zero 2 4	zero 3 3	zero 2 4

Tabela 10. Parâmetros analisados via curva DTR para os veios laterais. Pior resultado em vermelho e melhor resultado em verde.

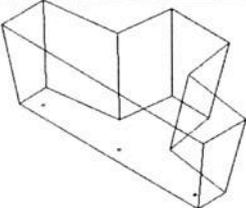
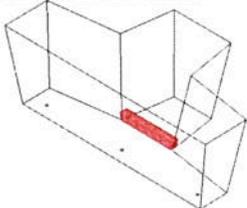
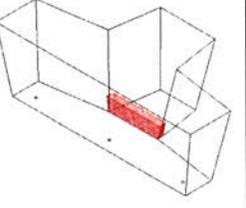
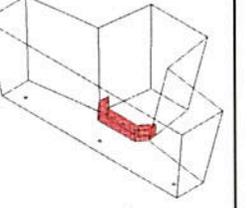
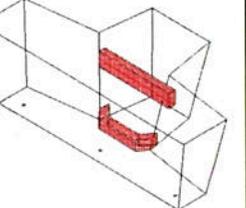
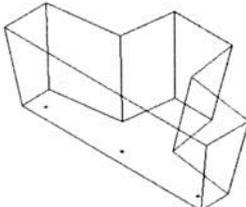
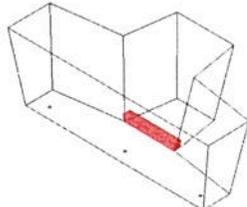
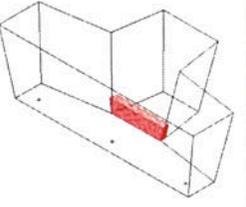
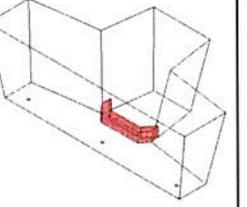
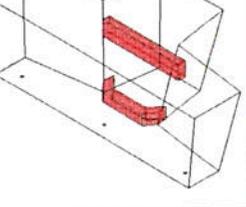
	Sem barreiras			Barreira 1			Barreira 2			Barreira 3			Barreiras 3 e 4		
															
Tempo médio de residência	0,71			0,68			0,80			0,74			0,67		
Tempo mínimo de residência	0,05			0,11			0,12			0,14			0,10		
Volume pistonado disperso / volume morto	0,74			0,68			1,60			1,07			0,63		
Resultado Geral	1	2	zero	Zero	3	Zero	zero	1	2	zero	2	1	2	1	Zero

Tabela 11. Parâmetros analisados via curva DTR para os veio central. Pior resultado em vermelho e melhor resultado em verde.

	Sem barreiras			Barreira 1			Barreira 2			Barreira 3			Barreiras 3 e 4		
															
Tempo médio de residência	0,45			0,47			0,51			0,60			0,77		
Tempo mínimo de residência	0,014			0,045			0,062			0,103			0,067		
Volume pistonado disperso / volume morto	0,07			0,12			0,20			0,45			1,25		
Resultado Geral	5	zero	zero	zero	3	zero	zero	3	zero	zero	2	1	zero	1	2

4.4. Barreira utilizada no distribuidor industrial

Devido aos resultados obtidos no modelo físico e a sua simplicidade, a barreira 2 está sendo utilizada no distribuidor industrial, como mostra a foto apresentada na Figura 74.

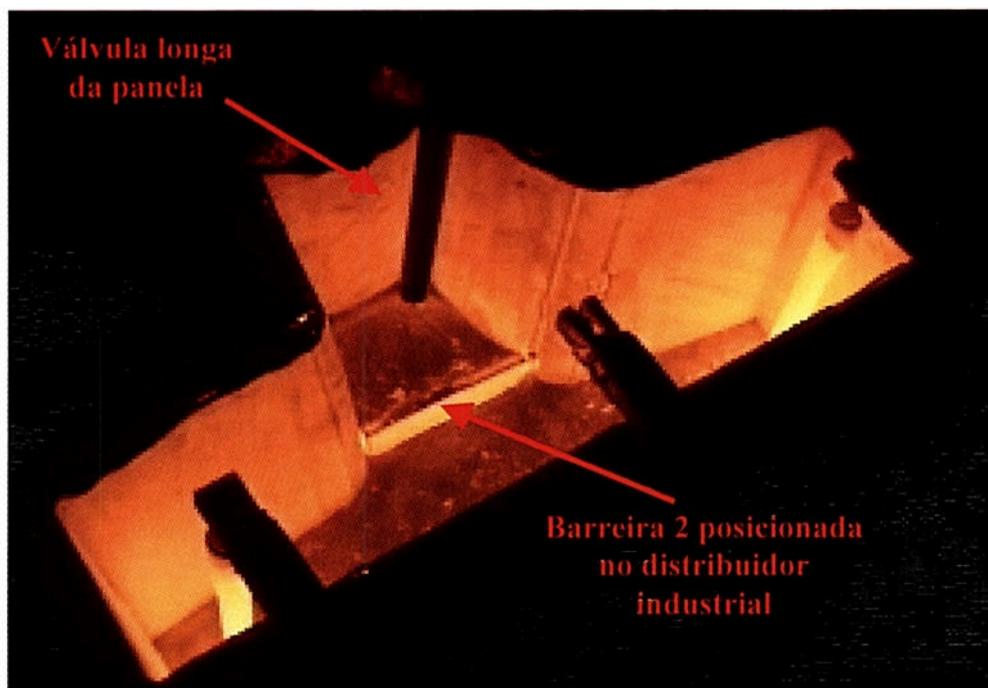


Figura 74. Vista superior do distribuidor industrial mostrando o posicionamento da barreira 2.

5. Conclusões

Através dos resultados desse estudo pode-se concluir que:

- Através de uma barreira bastante simples (barreira 1) posicionada no fundo do distribuidor entre a região de impacto do jato da panela e o veio central, é possível eliminar o volume de curto circuito observado no distribuidor sem barreiras. Reduz-se com isso a possibilidade de uma inclusão entrar no distribuidor através do jato de aço da panela e não ter tempo para flotar até a escória;
- A barreira 2 confere excelentes condições para a flotação de inclusões no distribuidor como um todo, a saber: a) apresenta o maior tempo de residência do aço no distribuidor; b) cria um escoamento que conduz a inclusão até a escória; c) gera o maior tempo de residência mínimo, d) produz um escoamento isento de fluxo de curto-circuito e e) possui a maior relação entre volume pistonado e volume morto;
- A barreira 2 está sendo utilizada no distribuidor industrial devido a sua simplicidade e bons resultados obtidos no modelo físico;
- Para gerar homogeneidade entre as curvas DTR dos veios central e laterais e garantir boas condições de flotação das inclusões, deveria-se utilizar as barreiras 3 e 4 em conjunto. No entanto, isso implicaria num aumento no custo de montagem do distribuidor. Em um levantamento de custos realizado em junho de 1999, constatou-se que a barreira 3 teria um custo 80% maior do que a barreira atualmente utilizada. Isso representa uma alteração de 2,5% no custo de montagem do refratário do distribuidor, sem considerar o custo da barreira 4. Portanto, para viabilizar o uso das barreiras 3 e 4 no distribuidor industrial, seria importante avaliar os seus benefícios através de análises de limpeza do aço, ou seja, avaliar os seus efeitos sobre perfil inclusionário nos tarugos e (ou) nas barras laminadas;
- Trabalhar sem barreiras confere ao distribuidor analisado as piores condições de flotação de inclusões;
- Ao analisar o comportamento do aço que circula no distribuidor e alimenta, exclusivamente, os veios laterais conclui-se que a melhor barreira a ser utilizada é a barreira 2, pois apresenta o maior tempo de residência médio e a maior relação entre volume pistonado e volume morto;
- Ao analisar o comportamento do aço que circula no distribuidor e alimenta, exclusivamente, o veio central conclui-se que a melhor barreira a ser utilizada é a barreira 3 e 4 utilizadas em conjunto, pois obtêm-se o maior tempo de residência médio e a maior relação entre volume pistonado e volume morto.

6. Sugestões

Neste trabalho estudou-se, com o auxílio de um modelo físico em escala 1:1, o comportamento do fluxo no interior do distribuidor de lingotamento contínuo da Gerdau – Aços Finos Piratini. Para tanto considerou-se: que todo o fluido no interior do distribuidor apresenta a mesma temperatura; que o nível de líquido no distribuidor é constante e que a vazão de fluido que entra no distribuidor é igual a vazão de fluido que sai do distribuidor. Essas condições são condizentes as encontradas durante o lingotamento a exceção dos momentos de início ou fim de lingotamento e na troca de panelas. Como tais situações podem contribuir para um aumento do nível de inclusões no aço, faz-se as seguintes sugestões para estudo no modelo físico:

1. Não há referência na literatura de algum estudo que tenha sido feito com intuito de comparar os resultados obtidos em um modelo em escala plena com um modelo em escala reduzida do mesmo distribuidor. O fato de existir um modelo em escala plena já construído facilita a realização de algum estudo nesse sentido. Isso poderia ajudar a elucidar as dúvidas existentes (em nível mundial) sobre a necessidade de trabalhar-se com modelos em escala plena ou a validade de trabalhar-se com modelos em escalas reduzidas de distribuidores de lingotamento contínuo;
2. Testar o efeito de trabalhar-se com apenas dois veios. Situações como estas acontecem na prática industrial quando da ocorrência, por exemplo, da obstrução de alguma válvula do distribuidor como consequência do resfriamento excessivo do aço (*freezing*);
3. Simular o fluxo não isotérmico, ou seja, o efeito gerado quando o aço que entra no distribuidor está a uma temperatura diferente do aço presente no distribuidor;

4. Simular o arraste de escória no distribuidor devido a turbulência gerada na troca da panela. No modelo físico, a escória pode ser simulada com querosene o que permite visualizar se há passagem de escória para os veios. A Figura 75 mostra a emulsificação de escória no modelo estudado neste trabalho;

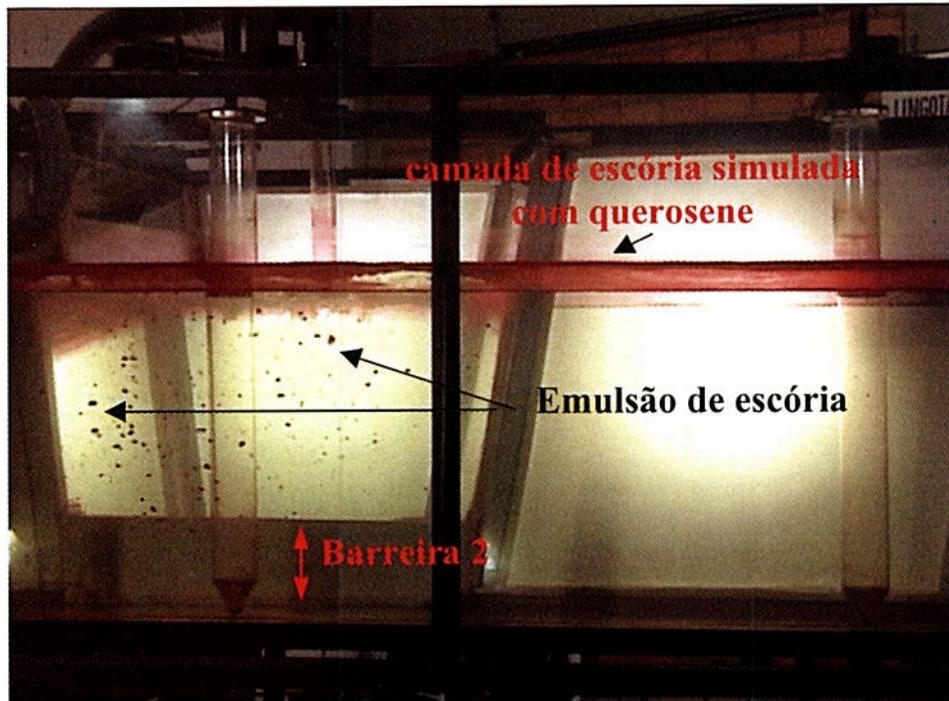


Figura 75. Arraste de escória no modelo físico (escória simulada com querosene)

5. Testar o efeito de peças anti-turbulência (Figura 76) sobre o arraste de escória em situações de troca de panela. Uma abordagem mais consistente sobre o efeito das peças anti-turbulência pode ser encontrada nos trabalhos de Bolger e Saylor⁽⁵¹⁾, Crowley e Lawson⁽⁵²⁾ e Morales et al.⁽⁴⁹⁾;

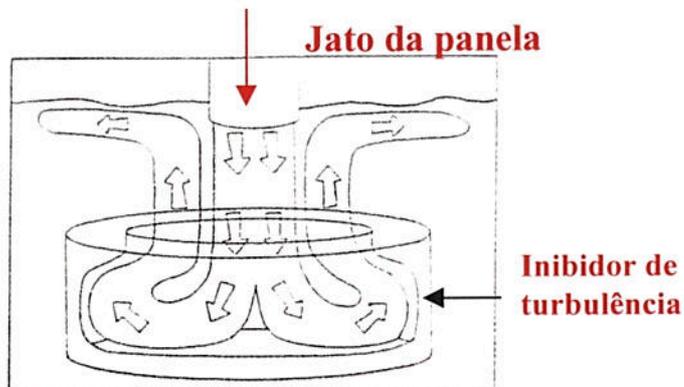


Figura 76. Inibidor de turbulência estudado por Bolger e Saylor⁽⁵¹⁾;

6. Comparar as curvas DTR traçadas para diferentes velocidades de lingotamento. A Figura 77a mostra o efeito de diversas velocidades de lingotamento sobre as curvas DTR de um distribuidor estudado por Sahai e Burval⁽³²⁾;
7. Testar no modelo físico o efeito de trabalhar-se com a válvula longa boca de sino como mostra a Figura 77b. Esse tipo de válvula é utilizado, pois permite a abertura submersa do jato da panela. Isso reduz o arraste de ar e escória para dentro do aço líquido do distribuidor;
8. Testar o efeito de trabalhar-se com o tubo longo fora do prumo como mostra a Figura 77c. Essa situação pode acontecer na prática industrial, caso o sistema de fixação do tubo longo não esteja bem regulado;

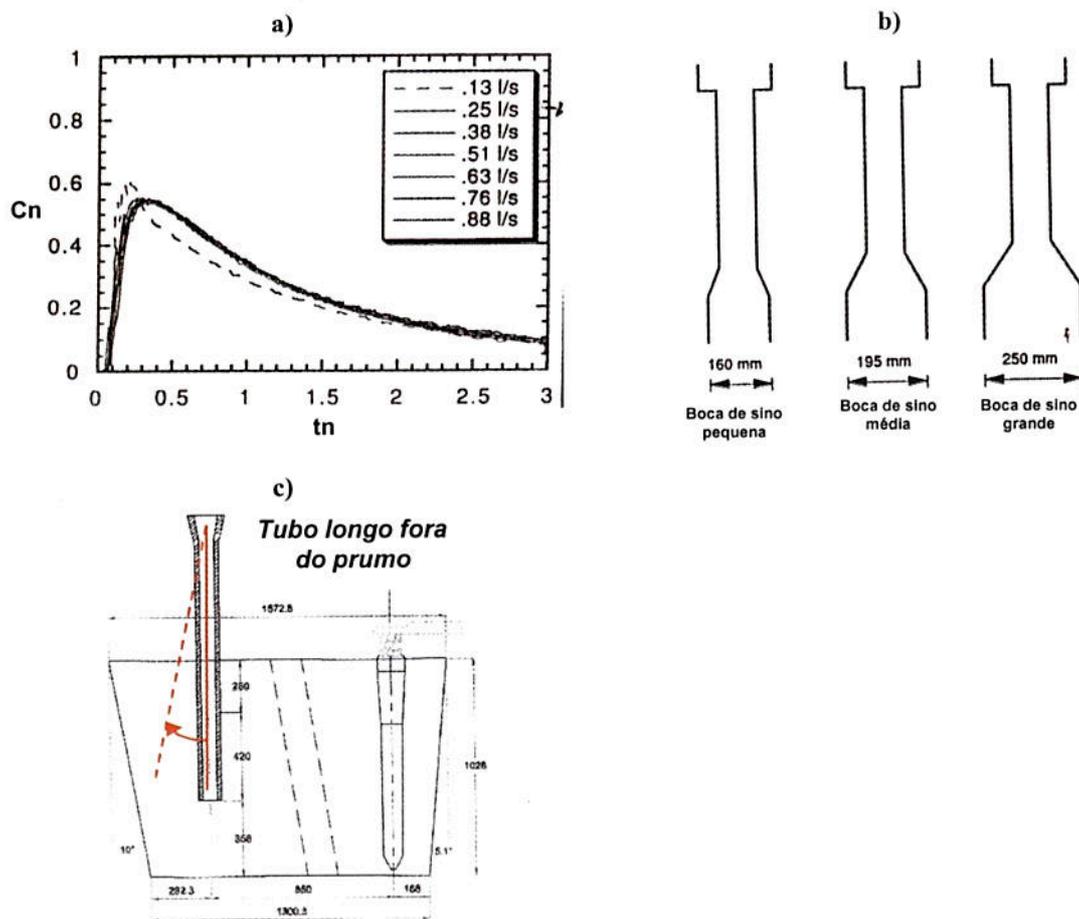


Figura 77. a) efeito das velocidades de lingotamento sobre as curvas DTR de um modelo estudado por Sahai e Burval⁽³²⁾; b) diversos tipos de tubo longo do tipo boca de sino estudados por He et al.⁽⁹⁾; c) tubo longo fora do prumo;

7. Referências Bibliográficas

- (1) KEMENY, F.; HARRIS, D.J. Fluid flow Studies in the tundish of a slab caster. **Proceedings of 2nd. Process Technology Conference**, 1981, Chicago, USA, Iron and Steel Society of AIME, v.2, p.232-245,.
- (2) SAHAI, Y.; AHUJA, R. Fluid flow and mixing of melt in steelmaking tundishes. **Ironmaking and Steelmaking**, v.13, n.5, p.241-247, 1986.
- (3) MARTINEZ, E. et al. Effects of fluid flow on the inclusion separation in continuous casting tundish. **Transactions ISIJ**, v.26, p.724-731, 1986.
- (4) SINGH, S.; KORIA, S.C. Model study of the dynamics of flow of steel melt in the tundish. **ISIJ International**, v.33, n.12, p.1228-1237, 1993.
- (5) SINGH, S.; KORIA, S.C. Physical modeling of steel flow in continuous casting tundish. **Ironmaking and Steelmaking**, v.20, n.3, p.221-230, 1993.
- (6) SCHADE, J.; SMITH, M.P.; PALMER, S.E. Doubling tundish volume at AK Steel's Middletown Works: Structural Criteria, design considerations and operation results. **Iron & Steelmaker**, v.23, n.10, p.93-103, out.1996.
- (7) SINGH, S.; KORIA, S. Study of fluid flow in tundishes due to different types of inlet streams. **Steel Research**, v.66, n.7, p.294-300, 1995.
- (8) CHATTERJEE, A.; AJMANI, S.K. Optimizing fluid flow in the tundish. **Steel Technology International**, p.155-160, 1994.
- (9) HE, Q.L.; KANE, P.A.; MEDINA. The effects of Bell-end Shrouding on the tundish fluid flows. In: 6th. INTERNATIONAL CONFERENCE ON REFINING PROCESSES, 1992, Lulea, Sweden, **SCANINJECT VI**, Part II, p.225-238.
- (10) WOLLMANN, A.M. et. al. Modelamento físico do distribuidor de lingotamento contínuo da Aços Finos Piratini". **Anais do 11^o Seminário de Aceria del IAS**, 1997, Buenos Aires, Argentina, Instituto Argentino de Siderurgia (IAS), p.143-152.
- (11) SINGH, S.; KORIA, S. Tundish steel melt dynamics with and without flow modifiers through physical modelling. **Ironmaking and Steelmaking**, v.23, n.3, p.255-263, 1996.
- (12) KORIA, S.; SINGH, S. Physical modeling of the effects of the flow modifier on the dynamics of molten steel flowing in a tundish. **ISIJ International**, v.34, n.10, p.784-793, 1994.
- (13) McPHERSON, N.A. The effect of tundish design on the quality of continuously cast steel slabs. **Metallurgical Plant and Technology**, n.3, p.40-51, 1986.

- (14) FURTADO, H.S.; MELO, A.H.B. de; AZEVEDO, W.M. Avaliação por simulação experimental de escoamento induzido. **Metalurgia & Materiais**, v.52, n.453, p.303-308, 1996.
- (15) MADIAS, et. al. Design and plant experience using na advanced pouring box (APB) to receive and distribute the steel in a six strand casting. **Proceedings of Steelmaking Conference**, 1998, Iron and Steel Society, p.73-82.
- (16) SINHA, A.K.; SAHAI, Y. Mathematical modeling of inclusions transport and removal in continuous casting tundishes. **ISIJ International**, v.33, n.5, p.556-566, 1993.
- (17) HE, Y.; SAHAI, Y. Fluid Dynamics of continuous casting tundishes – mathematical modeling. **Tundish Metallurgy**, 1990, Iron and Steel Society, v.1, p.51-60.
- (18) SZEKELY, J.; EL-KADDAH, N. The mathematical modelling of three-dimensional heat flow, fluid flow and turbulence phenomena in tundishes. **Tundish Metallurgy**, 1990, Iron and Steel Society, v.1, p.61-76.
- (19) LOWRY, M.L.; SAHAI, Y. Investigation of steel flow in a continuous casting tundish with multiple hole baffles using mathematical models and tracer studies”. **Proceedings of Steelmaking Conference**, 1989, Iron and Steel Society, v.72, p. 71- 79.
- (20) CHUNG, S.; KWON, O. Improvement of tundish by the analysis of molten steel flow during ladle exchange at Pohang Works. **Proceedings of Steelmaking Conference**, 1999, Iron and Steel Society, p.191-198.
- (21) SCHREWE, H.F. **Continuous casting of steel: Fundamentals, principles and practice**. Düsseldorf: Stahleisen, 1987. 194p.
- (22) KIMURA, H.et al. Innovative Technologies in continuous casting tundish. **Nippon Steel Technical Report**, n.61, p.22-28, 1994.
- (23) MORI, M.; IWASAKI, M.; SAWADA, I. Analysis of heat transfer and fluid flow in continuous casting tundish. **Nippon Steel Technical Report**, n.48, p.34-40, 1991.
- (24) HEASLIP,L.J.; SCHADE,J. Physical modeling and visualization of liquid steel flow behaviour during continuous casting. **Iron & Steelmaker**, v.26, n.1, p.33-41, 1999.
- (25) BRIMAKOMBE, J.K.; SAMARASEKERA, I.V. Fundamental analysis of the continuous casting process for quality improvements. **Curso sobre lingotamento contínuo**, University of British Columbia, maio, 1999, Canada, Vancouver, p.A1-A12.
- (26) SCHMIDT, M.; RUSSO, T.; BEDERKA, D. Steel shrouding and tundish flow control to improve cleanliness and reduce plugging. **Tundish Metallurgy**, 1991, Iron and Steel Society, v.2, p.3-12.

- (27) ROBERTSON; A.D.; SHERIDAN, A.T. Water modelling of liquid steel at Swinden Laboratories. **Journal of Iron and Steel Institute**, v.208, p.625-632, 1970.
- (28) MADDEVER, W.J.; McLEAN, A.; LUCKETT, J.S.; FORWARD, G.E. An investigation of casting streams. **Canadian Metallurgical Quarterly**, v.12, n.1, p.79-88, 1973.
- (29) HEASLIP, L.J.; McLEAN; SOMMERVILLE, I.D. **Continuous Casting: Chemical and Physical Interactions during Transfer Operations**, 1983, Iron and Steel Society, v.1, p.67-84.
- (30) HARRIS, D.J.; YOUNG, J.D. Water modeling – a viable production tool. **Continuous Casting: Chemical and Physical Interactions during Transfer Operations**, 1983, Iron and Steel Society, v.1, p.99-112.
- (31) MAZUMBAR, et al. Similarity considerations in the physical modeling of steel making tundish systems. **Steel Research**, v.66, n.1, p. 14-19, 1995.
- (32) SAHAI, Y.; BURVAL, M.D. Validity of Reynolds and Froude similarity criteria for water modeling of melt flow in tundishes. **Proceedings of Electric Steelmaking Conference**, 1992, Iron and Steel Society, p.469-474.
- (33) LOWRY, M.L.; SAHAI, Y. Thermal effects on the flow of liquid steel in continuous casting tundishes. **ISS Transactions**, v.14, p.17-22, 1993.
- (34) SHACRABORTY, S.; SAHAI, Y. Effect of varying ladle stream temperature on melt flow and heat transfer in continuous casting tundishes. **ISIJ International**, v.3, n.9, p. 960-967, 1991.
- (35) SHENG, D.; KIM, C.; YOON, J.; HSIAO, T. Water model study convection pattern of molten steel flow in continuous casting tundish. **ISIJ International**, v.38, n.8, p.843-851, 1998.
- (36) SINHA, A.K.; VASSILICOS, A. Physical modeling of thermal effects on steel flow and mixing in tundish. **Ironmaking and Steelmaking**, v.25, n.5, p.387-393, 1998.
- (37) CHAKRABORTY, S.; SAHAI, Y. Mathematical modelling of transport phenomena in continuous casting tundishes. Part 1: Transient effects during ladle transfer operations. **Ironmaking and Steelmaking**, v.19, n.6, p.479-494, 1992.
- (38) JOO, S.; HAN, J.W.; GUTHRIE, R.I.L. Inclusion behaviour and heat-transfer phenomena in steelmaking tundish operations: part II. Mathematical model for liquid steel in tundishes. **Metallurgical Transactions B**, v.24B, p. 767-777, out. 1993.

- (39) MAZUMDAR, D.; YAMANOGLU, G.; GUTHRIE, R.I.L. Hydrodynamic performance of steelmaking tundish systems: a comparative study of three different tundish designs. **Steel Research**, v.68, n.7, p.293-300, 1997.
- (40) BARRETO, J.; BARRÓN, M.; MORALES, R. Physical and mathematical modeling of steel flow and heat-transfer in tundishes under non-isothermal and non-adiabatic conditions. **ISIJ International**, v.36, n.5, p.543-552, 1996.
- (41) LEE, S.M. et. al. Mathematical and physical modelling of 3-d fluid flow in a tundish with dam and weir. **Proceedings of The Sixth International Iron and Steel Congress**, 1990, Iron and Steel Institute of Japan (ISIJ), p.239-245.
- (42) DAMLE, C.; SAHAI, Y. The effect of tracer density on melt flow characterization in continuous casting tundishes – a modeling study. **ISIJ International**, v.35, n.2, p.163-169, 1995.
- (43) WOLLMANN, A.M. et. al. Estudos de fluxo no distribuidor de lingotamento contínuo da Aços Finos Piratini. **Anais do 29^o Seminário sobre Fusão, Refino e Solidificação dos Metais da ABM**, 1998, Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais (ABM), p. 295-310.
- (44) COSTA, J. **Otimização do fluxo de aço no distribuidor do lingotamento contínuo**. Campinas, 1997, 147p. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Curso de Pós-Graduação da Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade Estadual de Campinas.
- (45) SZEKELY, J.; THEMELIS, N.J. **Rate phenomena in process metallurgy**, New York: Wiley-Interscience, 1971.
- (46) CRAMB, A.W.; BYRNE, M. Tundish slag entrainment at Bethlehem's Burns Harbor (Indiana) slab caster. **ISS Transactions**, p. 49-56, 1988.
- (47) SZEKELY, J.; ILEGBUSI, J. **The physical and mathematical modeling of tundish operations**. New York: Springer-Verlag, 1989. 111p.
- (48) ROBERTSON, T.; PERKINS, A. Physical and mathematical modeling of liquid steel temperature in continuous casting. **Ironmaking and Steelmaking**, v.13, n.6, p. 301-310, 1986.
- (49) MORALES, R.D.; et al. Influence of a turbulence inhibitor on steel cleanliness processed in a bloom caster. **Proceedings of Steelmaking Conference**, 1988, Iron and Steel Society, p.325-333.
- (50) DORRICOTT, J.D.; HEASLIP, L.J. Asymmetric tundish and flow control principles in multistrand billet and bloom casters. **Tundish Metallurgy**, 1991, Iron and Steel Society, v.2, p.71-76.

- (51) BOLGER, D.; SAYLOR, K. Development of a turbulence inhibiting pouring pad/flow control device for the tundish. **Proceedings of Steelmaking Conference**, 1994, Iron and Steel Society, p.225-233.
- (52) CROWLEY, R.W.; LAWSON, G.D. Cleanliness improvements using a turbulence-suppressing tundish impact pad. **Proceedings of Steelmaking Conference**, 1995, Iron and Steel Society, p.629-636.

anexo A

Equipamentos utilizados no modelamento físico

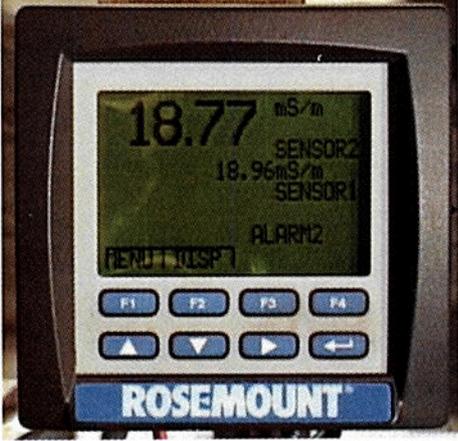
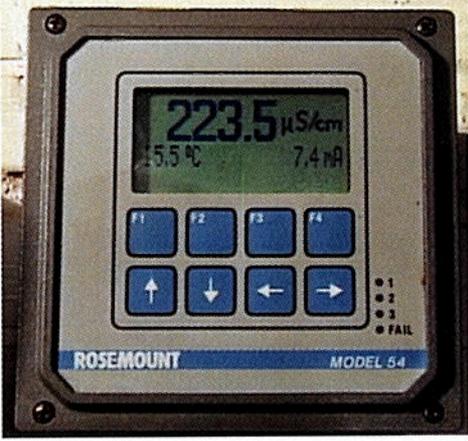
	
Controlador do sensor de condutividade utilizado em um dos veios laterais.	Controlador do sensor de condutividade utilizado no veio central.
Fabricante: Fisher & Rosemount	Fabricante: Fisher & Rosemount
Modelo: 2700	Modelo:514

Figura 78. Controladores de condutividade utilizados no modelo físico.

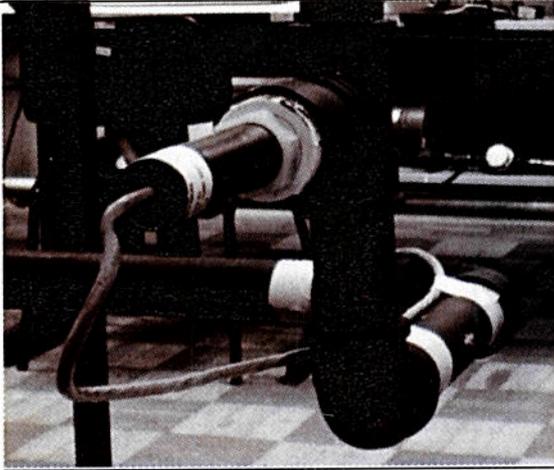
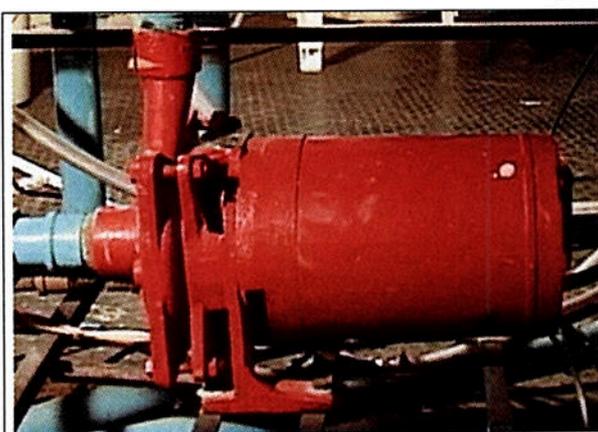
	
Sensor de condutividade conectado na tubulação de saída do modelo físico (veio lateral)	Sensor de condutividade conectado na tubulação de saída do modelo físico (veio lateral)
Fabricante: Fisher & Rosemount	Fabricante: Fisher & Rosemount

Figura 79. Sensores de condutividade utilizados no modelo físico



Figura 80. Micro-computador utilizado para armazenar os dados de condutividade



Bomba hidráulica utilizada para succionar a água de dentro do distribuidor.

Fabricante: Whorlington

Modelo D520, 1 ¼ x 1 x 5 (potência 2Hp)



Bomba hidráulica utilizada para alimentar o distribuidor com água.

Fabricante: Whorlington

Modelo D820, 2 ½ x 1 ½ x 5 (potência 5Hp)

Figura 81. Bombas hidráulicas utilizadas no modelo físico.

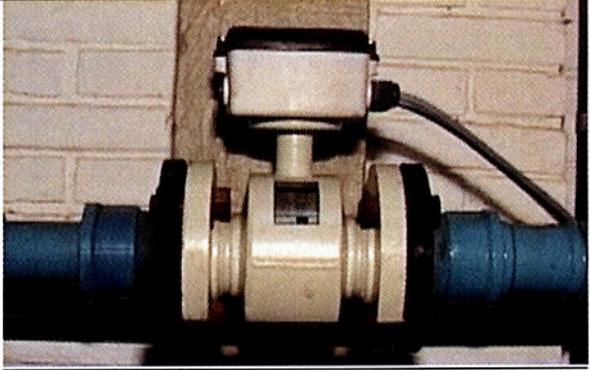
	
<p>Medidores de vazão do tipo rotâmetro.</p>	<p>Medidor de vazão do tipo magnético.</p>
<p>Fabricante: Conaut.</p>	<p>Fabricante: Danfoss</p>
<p>Modelo: 400.26.02.00.00, ϕ 1 ¼"; escala: 400 a 4000 NL/H.</p>	<p>Modelo D820, 2 ½ x 1 ½ x 5 (potência 5Hp)</p>

Figura 82. Medidores de vazão utilizados no modelo físico.

Anexo B

Desenho em vistas do distribuidor com as diversas barreiras testadas.

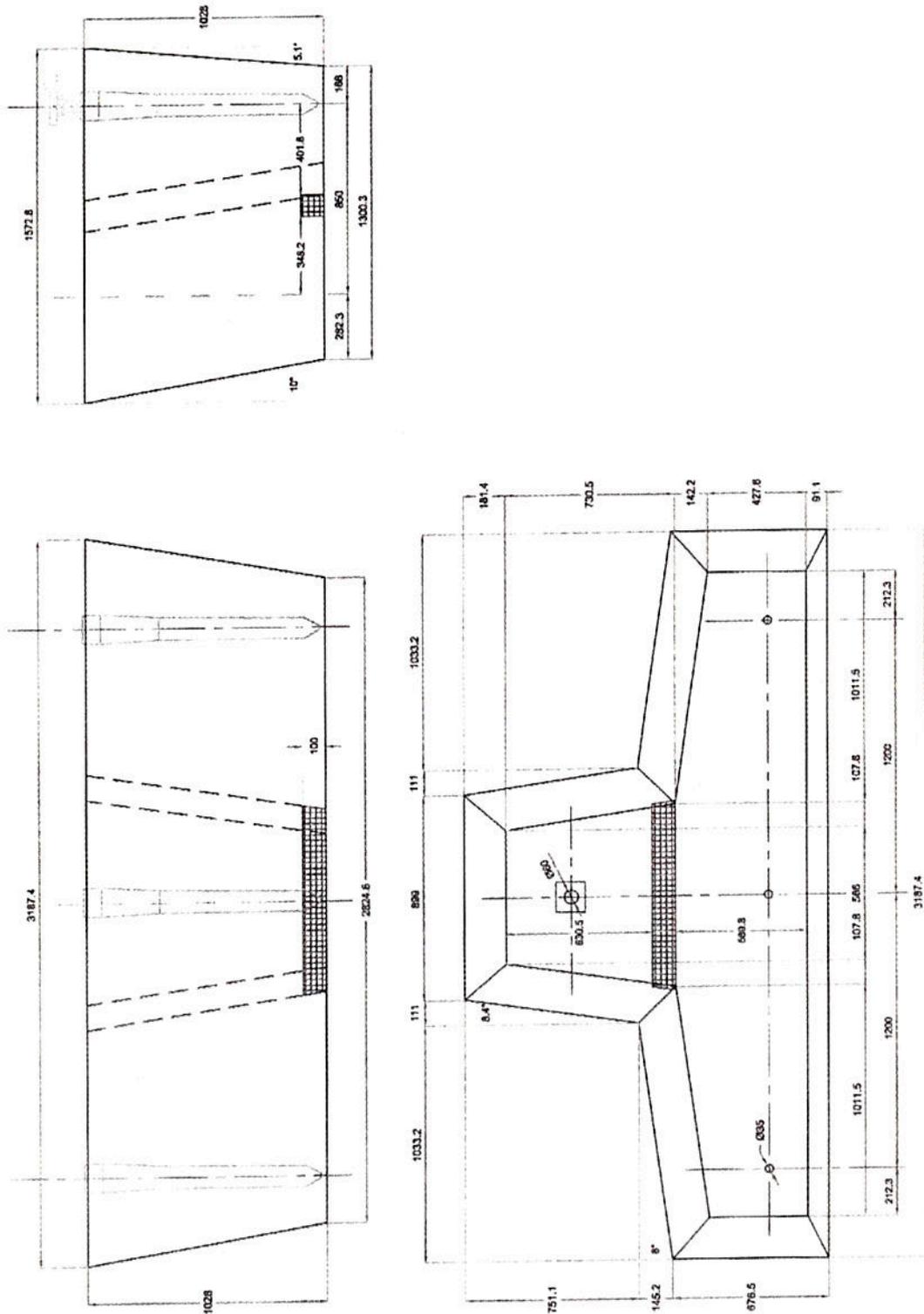


Figura 83. Desenho em vistas do modelo físico com a barreira tipo 1.

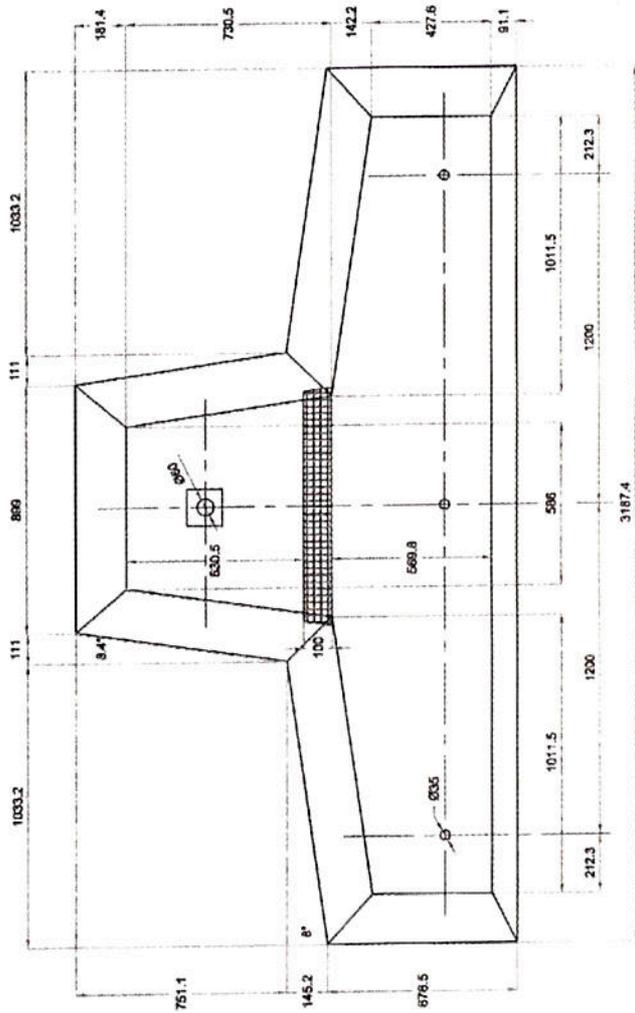
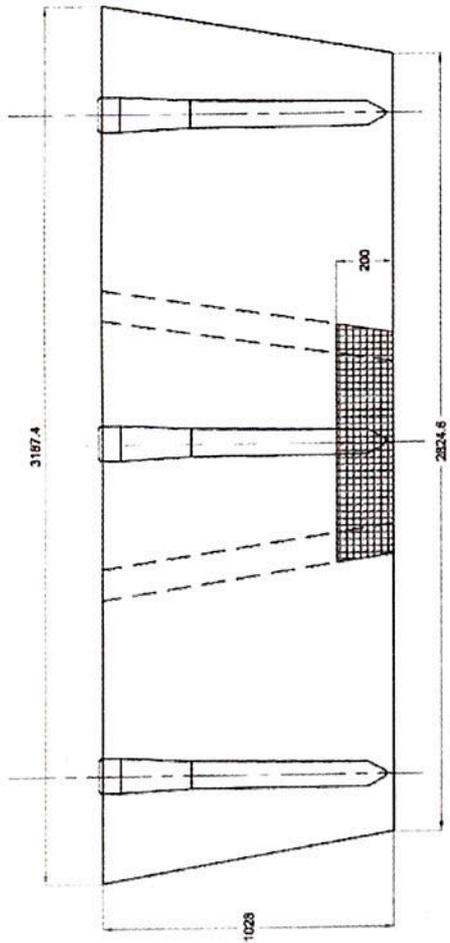
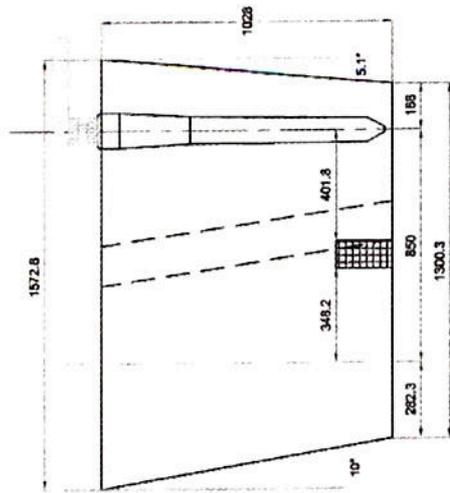


Figura 84. Desenho em vistas do modelo físico com a barreira tipo 2.

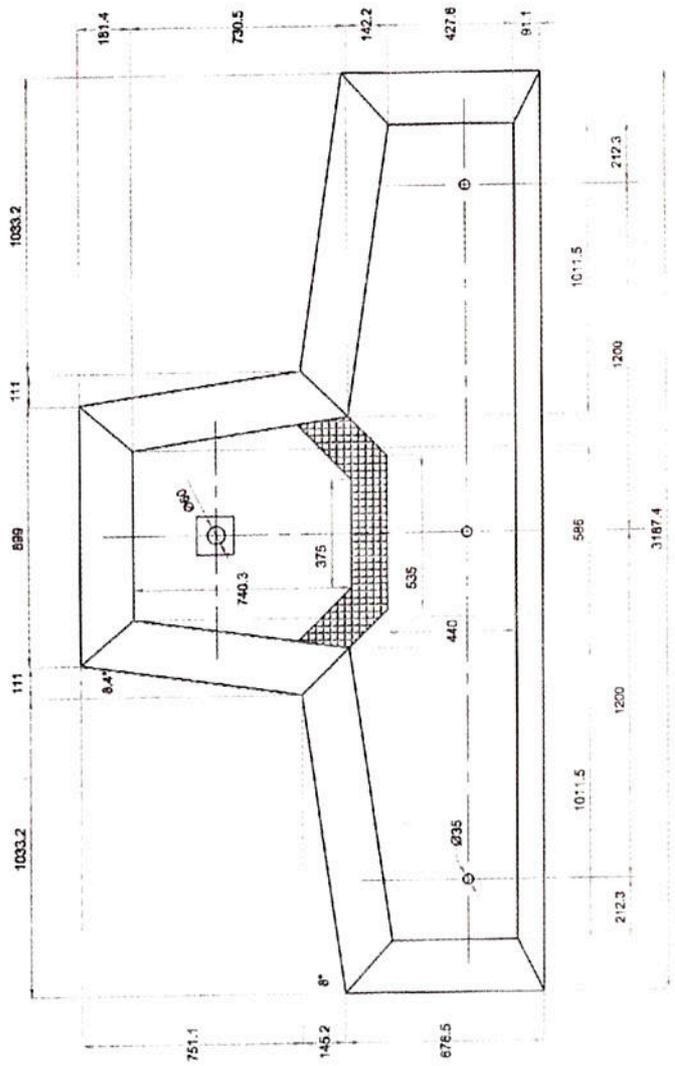
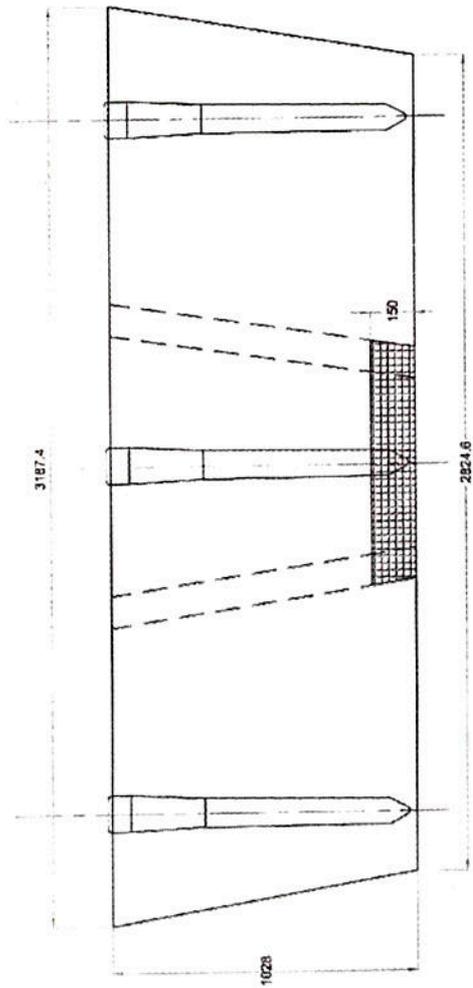
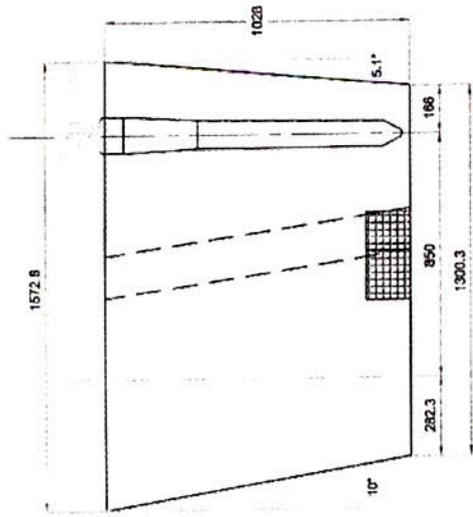


Figura 85. Desenho em vistas do modelo físico com a barreira tipo 3.

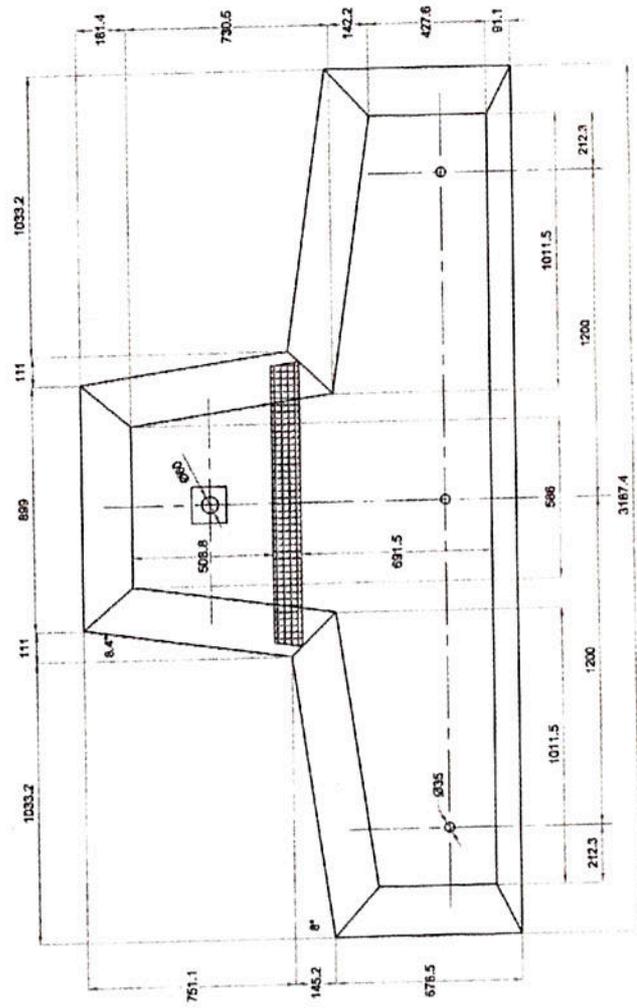
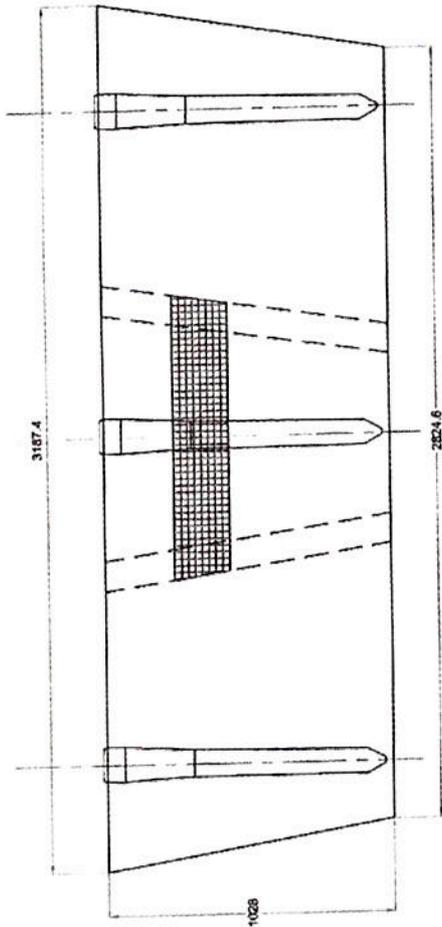
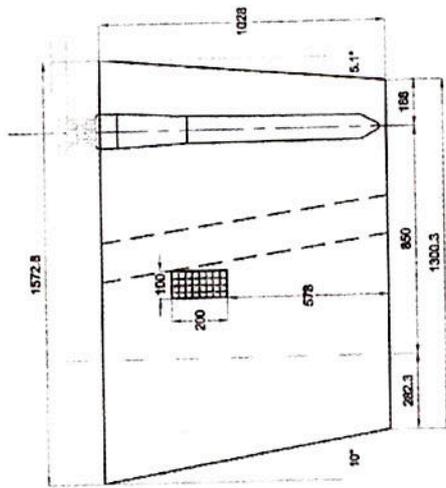


Figura 86. Desenho em vistas do modelo físico com a barreira tipo 4.

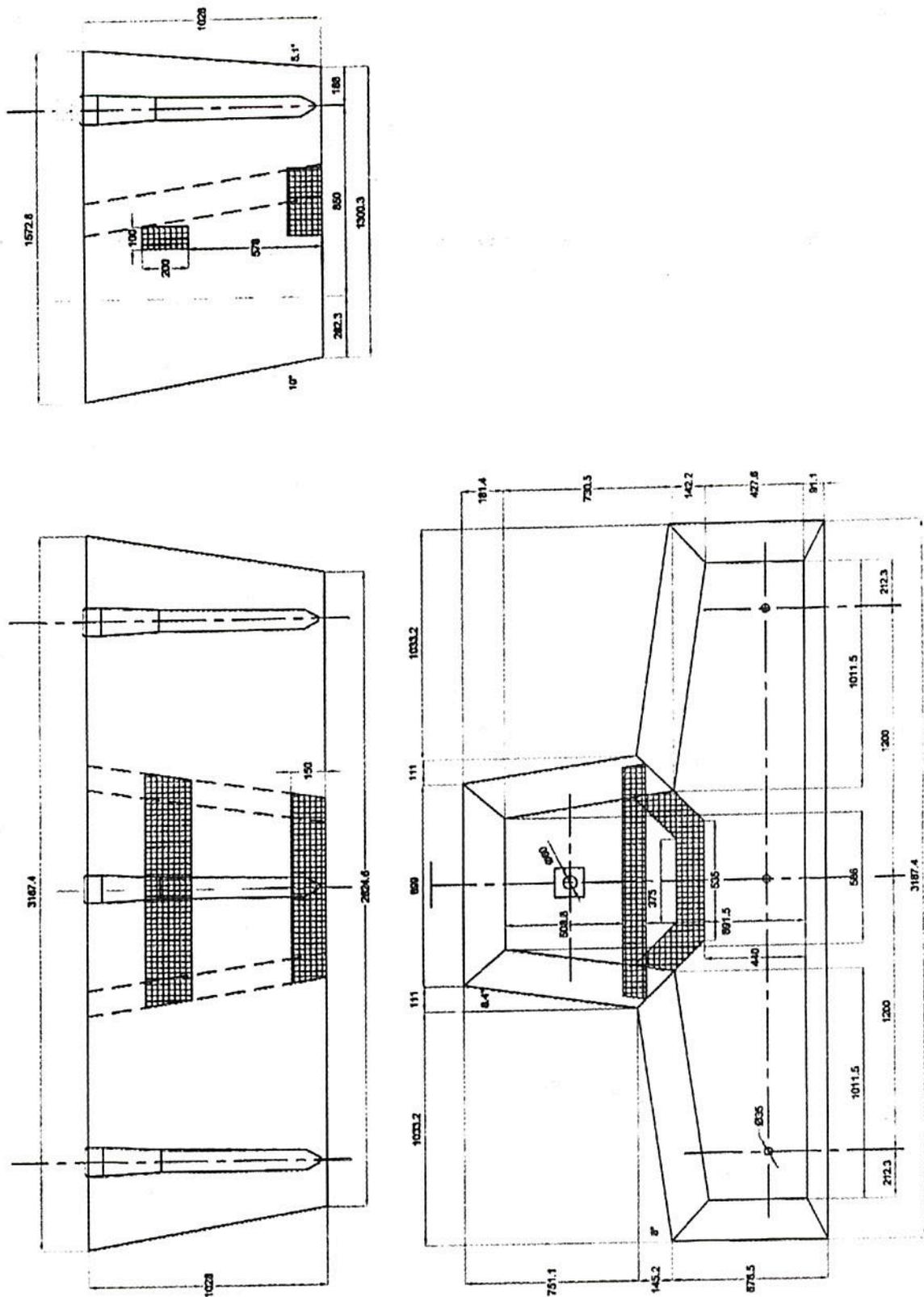


Figura 87. Desenho em vistas do modelo físico com as barreiras tipo 3 e tipo 4.