

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e
Materiais - PPGE3M**

FELIPE DAS DÔRES MACHADO

**MODELAGEM FÍSICA DE REMOÇÃO DE INCLUSÕES EM DISTRIBUIDOR
DE LINGOTAMENTO CONTÍNUO DE TARUGOS**

**Porto Alegre
2014**

FELIPE DAS DÔRES MACHADO

**MODELAGEM FÍSICA DE REMOÇÃO DE INCLUSÕES EM DISTRIBUIDOR
DE LINGOTAMENTO CONTÍNUO DE TARUGOS**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e Materiais da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia, modalidade Acadêmica.

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

**Porto Alegre
2014**

FELIPE DAS DÔRES MACHADO

**MODELAGEM FÍSICA DE REMOÇÃO DE INCLUSÕES EM DISTRIBUIDOR
DE LINGOTAMENTO CONTÍNUO DE TARUGOS**

Essa Dissertação foi analisada e julgada adequada para obtenção do título de Mestre em Engenharia e aprovada em sua forma final pelo Orientador e pela Banca Examinadora designada pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e Materiais da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Prof. Dr. -Ing. Antônio Cezar Faria Vilela

Aprovado em: ___/___/___

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Dr. Magda Galant François

Prof. Dr. Wagner Viana Bielefeldt

Prof. Dr. Nilson Romeu Marcílio

Dedico aos meus pais, à
minha irmã e a todos que
me apoiaram em mais uma
etapa da minha vida.

AGRADECIMENTOS

À minha família que sempre apoia as minhas escolhas e está sempre ao meu lado. Eu amo vocês e nunca me esquecerei dos valores que me foram ensinados. Pai e mãe, sem vocês nada disso teria acontecido.

Ao Prof. Dr. -Ing. Antônio Cezar Faria Vilela pelo conhecimento e confiança nesses anos em que estive no Laboratório de Siderurgia da UFRGS.

À Prof. Dr. INPL Magda Galant François pela amizade e por acreditar em mim no momento em que eu mais precisei. Eu sou muito grato por tudo.

Ao Laboratório de Processamento Mineral (LAPROM) e ao Laboratório de Estudos Ambientais para a Metalurgia (LEAMet) pelo apoio e estrutura disponibilizada.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo apoio concedido por meio de bolsas de mestrado.

À Plástica – Indústria e Comércio de Plásticos Ltda pela confiança e doação do material polimérico utilizado nos experimentos dessa dissertação.

Aos bolsistas de iniciação científica do LaSid, agradeço muito pela ajuda que me foi fornecida ao longo deste trabalho.

Aos amigos que me acompanharam nessa jornada. Muito obrigado.

RESUMO

A importância de um escoamento adequado em distribuidores de lingotamento contínuo, quando o objetivo é produzir aços limpos (clean steels), vem sendo largamente discutida e estudada nas últimas décadas. Esses estudos usualmente são realizados em modelos físicos e/ou numéricos, visto que em unidades industriais são de difícil execução. Nos modelos físicos, os estudos como a simulação da remoção de inclusões para diferentes condições de escoamento tem se mostrado bastante importante para o entendimento do escoamento no distribuidor e seus respectivos artifícios favorecedores de flotação de inclusões.

Este trabalho tem como objetivo estudar o comportamento da remoção de inclusões em um modelo físico do distribuidor de lingotamento contínuo de tarugos frente à modificação de escoamento no distribuidor. O ensaio proposto para quantificar a remoção de inclusões envolve a utilização de micropartículas de polietileno para simulação das inclusões sólidas de alumina e peneira metálica como método de captura de inclusões passantes pelo veio do distribuidor. Para fornecer suporte a este estudo, foram realizados estudos de qualificação do escoamento por meio do ensaio de linhas de fluxo e de quantificação dos tempos de residência e frações de volumes característicos por meio do ensaio de distribuição de tempos de residência. A técnica utilizada se mostrou confiável sob o ponto de vista experimental. Como resultados do comportamento da remoção de inclusões frente aos parâmetros estudados, têm-se especificamente para o distribuidor estudado que: o aumento da velocidade de lingotamento, em média, aumentou o percentual de inclusões passantes de 11,61 (1,8 m/min) para 17,45% (2,6 m/min); a presença do tubo longo, em média, aumentou o percentual de inclusões passantes de 2,79 (sem tubo longo) para 27,03% (com tubo longo); a presença das barreiras, em média, diminuiu o percentual de inclusões passantes de 16,16 (sem barreiras) para 13,65% (com barreiras).

Palavras-chave: Distribuidor. Remoção de inclusões. Modelagem física.

ABSTRACT

When the objective is to produce clean steels, the appropriated melt flow in the tundish is very important. It has been widely discussed and studied by researchers in the lasts decades. Physical and/or mathematical models are used to perform these studies because is very difficult to do it in industrial plants. In the physical models, the studies as the simulation of inclusion removal to different conditions of fluid flow have showed to be very important to understand the tundish and its respective tools to improve the inclusion removal. This work aims to study the behavior of inclusion flotation in a physical model of continuous casting tundish of steel billets in different kinds of fluid flow. The method proposed to quantify the inclusion removal involves the utilization of microparticles of polyethylene to simulate solid alumina inclusion and a metallic sieve in the strand as a method to catch the non-floated inclusions. The quantification of inclusion removal has the support of two others experiments to qualify de flow pattern by visual observation using dye tracer and quantify the residence time distribution of the model using acid tracer. The method used in this work to quantify inclusion removal showed to be reliable from an experimental point of view. As results of the behavior of the inclusion removal, the speed of ingoting increased the non-floated inclusions from 11.61 (1.8 m/min) to 17.45% (2.6 m/min), the presence of the submerged inlet shroud increased the non-floated inclusions from 2.79 (without) to 27.03% (with) and the presence of the dams the non-floated inclusions decreased from 16.16 (without) to 13.65% (with).

Keywords: Tundish. Inclusion removal. Physical Model.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1. Representação ilustrativa em corte de um típico distribuidor de lingotamento contínuo de aços especiais para tarugos.	21
Figura 2. Relação entre modelo e protótipo para o tamanho de diferentes inclusões (Alumina, Espinélio e CaS) e diferentes massas específicas de partículas de simulação de inclusões.....	28
Figura 3. Princípio de funcionamento da detecção de partículas via <i>Electric Sensing Zone</i> (ESZ).....	34
Figura 4. Eficiência de remoção de inclusões para diferentes materiais de partículas de simulação de inclusões.....	36
Figura 5. Representação ilustrativa do distribuidor e dos principais artifícios empregados na busca de melhorias na eficiência de remoção de inclusões da produção de aços longos..	38
Figura 6. Representação ilustrativa do posicionamento de uma câmara de redemoinho no distribuidor.....	40
Figura 7. Resultados de remoção de inclusões para diferentes configurações internas de distribuidor e simulação ou não da escória com querosene.....	41
Figura 8. Distribuição de bolhas de gás no tubo longo para diferentes pontos de injeção (flechas brancas indicam as posições de injeção).....	42
Figura 9. Número de partículas de escória coletados na saída do distribuidor com o tubo longo (a) alinhado e (b) desalinhado.	43
Figura 10. Representação esquemática do modelo físico de distribuidor de lingotamento contínuo.....	44
Figura 11. Ilustrações em três dimensões do distribuidor com as configurações estudadas nos ensaios de modelagem física.	46
Figura 12. Posicionamento das câmeras para o ensaio de linhas de fluxo. As flechas amarelas indicam as vistas frontal, lateral e superior.	51
Figura 13. Fluxograma da metodologia para escolha do modelo de escoamento a ser utilizado no ensaio de distribuição de tempos de residência.	53

Figura 14. Resultado do ensaio de linhas de fluxo para a configuração sem tubo longo e sem barreiras (Vista frontal).....	59
Figura 15. Resultado do ensaio de linhas de fluxo para a configuração sem tubo longo e sem barreiras (Vista lateral).....	59
Figura 16. Resultado do ensaio de linhas de fluxo para a configuração sem tubo longo e sem barreiras (Vista superior).	60
Figura 17. Resultado do ensaio de linhas de fluxo para a configuração sem tubo longo e com barreiras (Vista frontal).....	60
Figura 18. Resultado do ensaio de linhas de fluxo para a configuração sem tubo longo e com barreiras (Vista lateral).....	61
Figura 19. Resultado do ensaio de linhas de fluxo para a configuração sem tubo longo e com barreiras (Vista superior).	61
Figura 20. Resultado do ensaio de linhas de fluxo para a configuração com tubo longo e sem barreiras (Vista frontal).....	62
Figura 21. Resultado do ensaio de linhas de fluxo para a configuração com tubo longo e sem barreiras (Vista lateral).....	63
Figura 22. Resultado do ensaio de linhas de fluxo para a configuração com tubo longo e sem barreiras (Vista superior).	63
Figura 23. Resultado do ensaio de linhas de fluxo para a configuração com tubo longo e com barreiras (Vista frontal).....	64
Figura 24. Resultado do ensaio de linhas de fluxo para a configuração com tubo longo e com barreiras (Vista lateral).....	64
Figura 25. Resultado do ensaio de linhas de fluxo para a configuração com tubo longo e com barreiras (Vista superior).	65
Figura 26. Adimensional de tempo médio de residência (θ) para as configurações estudadas neste trabalho.	66
Figura 27. Tempo mínimo de residência (t_{min}) para as configurações estudadas neste trabalho.	67
Figura 28. Resultados de tempo mínimo de residência plotados sobre o gráfico de diâmetro de inclusão crítico em função do tempo de subida (Lei de Stokes).	68
Figura 29. Fração de volume Pistonado Disperso (Vpd) para as configurações estudadas neste trabalho.	69

Figura 30. Fração de volume Morto (V_d) para as configurações estudadas neste trabalho.....	69
Figura 31. Fração de volume de Curto-circuito (V_{cc}) para as configurações estudadas neste trabalho.	70
Figura 32. Fração de volume de Mistura (V_m) para as configurações estudadas neste trabalho.....	71
Figura 33. Relação entre Volume Pistonado Disperso e Volume Morto (V_{pd}/V_d) para as configurações estudadas.	72
Figura 34. Porcentual de inclusões passantes em função da combinação entre as variáveis presença das barreiras e a presença do tubo longo (Efeito de interação BC).....	75
Figura 35. Porcentual de inclusões passantes em função da variável presença do tubo longo (Efeito principal B).	76
Figura 36. Visualização em modelo físico do arraste de bolhas para o seio do escoamento gerado pela utilização de jato aberto (sem tubo longo).....	76
Figura 37. Porcentual de inclusões passantes em função da variável velocidade de lingotamento (Efeito principal A).....	77
Figura 38. Porcentual de inclusões passantes em função da combinação entre as variáveis presença do tubo longo e a velocidade de lingotamento (Efeito de interação AB).....	78
Figura 39. Porcentual de inclusões passantes em função da variável presença das barreiras (Efeito principal C).....	79
Figura 40. Porcentual de inclusões passantes em função da combinação entre as variáveis presença das barreiras e a velocidade de lingotamento (Efeito de interação AC).....	80
Figura 41. Porcentual de microinclusões passantes em função da combinação entre a presença do tubo longo e a presença das barreiras.	81
Figura 42. Porcentual de macroinclusões passantes em função da combinação entre a presença do tubo longo e a presença das barreiras.	82
Figura 43. Medidas do modelo físico do distribuidor nas vistas frontal, lateral e superior.....	98
Figura 44. Medidas das barreiras nas vistas frontal, lateral e superior.	99
Figura 45. Sistema de injeção do modelo físico.	100

Figura 46. Sistema de leitura de condutividade do modelo físico.....	100
Figura 47. Sistema de captura de partículas via peneira metálica do modelo físico.....	101
Figura 48. Repetitividade das curvas de distribuição de tempos de residência para as configurações testadas neste trabalho	102
Figura 49. Repetitividade das curvas de distribuição de tempos de residência para as configurações testadas neste trabalho (continuação).....	103
Figura 50. Adimensionais de dispersão para curvas DTRs para vaso fechado com baixo e alto desvio do escoamento pistonado.	106
Figura 51. Número de tanques em série para curvas DTRs com baixo e alto desvio do escoamento pistonado.....	106
Figura 52. Dois modelos de compartimentos aplicados ao distribuidor e suas respectivas curvas de DTRs para os respectivos escoamentos com (a) e sem curto-circuito (b)	108
Figura 53. Resultados do modelo de dispersão e modelo de tanques em série para as configurações estudadas neste trabalho.....	112
Figura 54. Curvas de distribuição de tempo de residência (DTR) no modelo do distribuidor para as configurações.....	113
Figura 55. Curvas de distribuição de tempo de residência para diferentes velocidades de lingotamento nas configurações estudadas neste trabalho....	115
Figura 56. Tempo médio de residência adimensional e dimensional em função da velocidade de lingotamento.....	116

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Propriedades de viscosidade e massa específica do aço a 1600 °C e da água a 20 °C.	22
Tabela 2. Equações de similaridade de Froude para modelo e protótipo.	26
Tabela 3. Principais características dos modelos físicos de distribuidores e métodos de ensaio utilizados por diversos autores.	31
Tabela 4. Simulação das inclusões apresentada por diversos pesquisadores.	35
Tabela 5. Indicação dos artifícios modificadores de escoamento usados por diferentes autores em trabalhos de modelagem física da remoção de inclusões de distribuidores.	38
Tabela 6. Variáveis e intervalo de pesquisa estudados neste trabalho.	47
Tabela 7. Números adimensionais de Reynolds e Froude para as três velocidades de lingotamento empregadas neste estudo.	48
Tabela 8. Adimensional Gr/Re^2 para as três velocidades de lingotamento empregadas neste estudo.	49
Tabela 9. Ordem de realização dos ensaios de linhas de fluxo (velocidade de lingotamento de 2,2 m/min).	50
Tabela 10. Ordem de realização dos ensaios de distribuição de tempos de residência.	52
Tabela 11. Método de cálculo para as frações de volumes característicos do modelo de compartimentos.	54
Tabela 12. Distribuição de diâmetro de inclusão na usina e de partículas de simulação de inclusões no modelo.	56
Tabela 13. Ordem de realização dos ensaios de remoção de inclusões.	57
Tabela 14. Resultados das porcentagens de inclusões passantes do ensaio de remoções de inclusões.	73
Tabela 15. Análise de variância (ANOVA) para porcentagem de inclusões passantes pelo veio.	73
Tabela 16. Resultados das porcentagens de microinclusões passantes do ensaio de remoção de inclusões.	80

Tabela 17. Resultados das porcentagens de macroinclusões passantes do ensaio de remoção de inclusões.....	81
Tabela 18. Resumo dos resultados obtidos nos ensaios de linhas de fluxo, distribuição de tempos de residência e remoção de inclusões.....	85
Tabela 19. Média, desvio-padrão e coeficiente de variação (CV) dos resultados dos tempos de residência e variância. Os CVs maiores do que 20% são grifados em cinza.....	104
Tabela 20. Resultados do modelo de dispersão e tanques em série para as configurações estudadas neste trabalho.	109
Tabela 21. Resultados do modelo de compartimentos para as configurações estudadas neste trabalho.	110
Tabela 22. Resultados do modelo de compartimentos para as configurações estudadas neste trabalho (continuação).....	111
Tabela 23. Tempos do ensaio de remoção de inclusões para as velocidades de lingotamento: 1,8 m/min, 2,2 m/min e 2,6 m/min.....	114
Tabela 24. Tempo médio de residência para as configurações estudadas neste trabalho.....	117

LISTA DE SIGLAS

ABS	Acrilonitrila Butadieno Estireno;
Al ₂ O ₃	Óxido de alumínio (Alumina);
ANOVA	<i>One Way Analysis of Variance</i> (Análise de Variância);
CV	Coeficiente de variação;
KMnO ₄	Permanganato de potássio;
PE	Polietileno;
PEBDL	Polietileno de Baixa Densidade Linear;
PP	Polipropileno;
PS	Poliestireno;
PVC	Policloreto de Vinil;
SiO ₂	Óxido de silício (Sílica).

LISTA DE SÍMBOLOS

C	Adimensional de concentração de traçador na saída;
c	Concentração de traçador na saída (mol/L);
D/uL	Adimensional de dispersão;
D	Coeficiente de dispersão (m ² /s);
\bar{d}	Diâmetro médio (m);
Fr	Número adimensional de Froude;
g	Gravidade (m/s ²);
L	Comprimento característico (m);
m_c	Massa de partículas de simulação de inclusões coletadas no filtro (g);
m_i	Massa injetada no ensaio (g);
n_{mi}	Número de inclusões no modelo;
n_{pi}	Número de inclusões no protótipo;
N	Número de tanques dispostos em série;
Q	Vazão volumétrica no distribuidor (L/h);
q	Volume de traçador injetado (L);
r	Raio crítico da inclusão
r_j	Raio do jato de entrada do modelo (m);
$R_{inc,m}$	Raio da inclusão no modelo (μm);
$R_{inc,p}$	Raio da inclusão no protótipo (μm);
Re	Número adimensional de Reynolds;
T_0	Temperatura inicial do jato de água na entrada do modelo (°C);
T_∞	Temperatura da água no modelo (°C);
\bar{t}	Tempo de residência médio teórico (s);
t_{cc}	Instante de tempo em que é identificado o final do curto-circuito na curva DTR (s);
t_i	Tempo de injeção das partículas de simulação de inclusões (s);
t_{min}	Tempo mínimo de residência (s);
t_{trans}	Período de tempo de transiente do distribuidor durante a troca de panela (s);
u	Velocidade característica do fluido (m/s);

V	Volume de líquido ocupado no distribuidor (L);
V_{cc}	Fração de volume de Curto-circuito (%);
V_d	Fração de volume Morto (%);
V_m	Fração de volume de Mistura (%);
V_{pd}	Fração de volume Pistonado Disperso (%);
V_p	Velocidade terminal da partícula (m/s);
ν	Viscosidade cinemática (m ² /s);
β	Coefficiente de expansão volumétrica da água (°C ⁻¹);
γ	Tensão interfacial (N/m);
η_r	Eficiência de remoção (%);
θ	Adimensional de tempo;
λ	Fator de escala (adimensional);
μ	Viscosidade dinâmica (kg/m.s);
ρ	Massa específica (kg/m ³);
σ^2	Variância (adimensional).

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	18
2	OBJETIVOS	20
3	ESTUDOS DE MODELAGEM FÍSICA SOBRE REMOÇÃO DE INCLUSÕES EM DISTRIBUIDORES	21
3.1	PRINCÍPIOS RELACIONADOS À MODELAGEM FÍSICA DA REMOÇÃO DE INCLUSÕES NO DISTRIBUIDOR.....	23
3.1.1	Critérios de similaridade para a modelagem de escoamento do aço líquido na modelagem física	23
3.1.2	Critérios de similaridade para a simulação de inclusões não metálicas na modelagem física	25
3.2	DIFERENTES MÉTODOS UTILIZADOS NO ENSAIO DE REMOÇÃO DE INCLUSÕES SÓLIDAS	30
3.2.1	Método de quantificação de inclusões via peneira	33
3.2.2	Método de quantificação de inclusões via sensor	33
3.2.3	Material de simulação de inclusões	34
3.3	UMA BREVE DISCUSSÃO SOBRE OS RESULTADOS OBTIDOS NA MODELAGEM FÍSICA DE REMOÇÃO DE INCLUSÕES SÓLIDAS	37
4	METODOLOGIA	44
4.1	MODELO FÍSICO ISOTÉRMICO DO DISTRIBUIDOR	44
4.1.1	Configurações de distribuidor estudadas neste trabalho	45
4.1.2	Critérios de similaridade do modelo físico	47
4.2	ENSAIO DE LINHAS DE FLUXO	50
4.3	ENSAIO DE DISTRIBUIÇÃO DE TEMPOS DE RESIDÊNCIA	51
4.4	ENSAIO DE REMOÇÃO DE INCLUSÕES	54
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	58
5.1	ENSAIO DE LINHAS DE FLUXO	58
5.1.1	Distribuidor sem tubo longo e sem barreiras	58
5.1.2	Distribuidor sem tubo longo e com barreiras	60
5.1.3	Distribuidor com tubo longo e sem barreiras	62
5.1.4	Distribuidor com tubo longo e com barreiras	63
5.2	ENSAIO DE DISTRIBUIÇÃO DE TEMPOS DE RESIDÊNCIA	65
5.2.1	Tempo médio de residência	66

5.2.2	Tempo mínimo de residência	67
5.2.3	Frações de volumes característicos.....	68
5.2.4	Relação entre Volume Pistonado Disperso e Volume Morto	71
5.3	ENSAIO DE REMOÇÃO DE INCLUSÕES	72
5.3.1	Resultados da quantificação da remoção de inclusões.....	72
5.3.2	Efeito de diferentes condições de escoamento na flotação de micro e macroinclusões	80
5.4	ESCOLHA DA MELHOR CONFIGURAÇÃO TESTADA	83
6	CONCLUSÕES	86
7	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	89
	REFERÊNCIAS	90
	APÊNDICE A - Medidas do modelo físico do distribuidor e barreiras e posicionamento do tubo longo e barreiras no modelo.....	98
	APÊNDICE B - Sistemas de injeção, leitura de condutividade e captura de partículas via peneira metálica.....	100
	APÊNDICE C – Análise da repetitividade dos ensaios de distribuição de tempos de residência	102
	APÊNDICE D – Determinação do modelo de escoamento para o ensaio de distribuição tempos de residência	105
	APÊNDICE E - Determinação do tempo de ensaio de remoção de inclusões	113
	APÊNDICE F – Efeito da velocidade de lingotamento no ensaio de distribuição de tempos de residência	115

1 INTRODUÇÃO

Aços com teor residual de inclusões não metálicas bastante reduzido (na ordem de ppm) têm chamado a atenção da indústria e dos pesquisadores nas últimas décadas, não somente em função da sua difícil fabricação, mas principalmente pela sua grande importância em diversas aplicações. Considerados aços limpos (clean steels), em parte devido a isso, eles apresentam melhores propriedades como resistência mecânica, ductilidade e durabilidade, segundo Sahai, Y.; Emi, T. (2007)¹. Além de que, esses aços suprem a necessidade de um rigoroso mercado de aplicações estruturais.

Na busca para atingir as rígidas especificações, têm-se estudado as origens das inclusões não metálicas²⁻¹⁵ e os métodos de reduzir ou impedir a incorporação das mesmas no aço¹⁶⁻²². As inclusões não metálicas podem ser de origem endógena e exógena e, normalmente, são constituídas por alumina, óxido de cálcio, sílica, óxido de manganês e outros^{1,23-26}. Elas são, não somente responsáveis pela perda de qualidade do aço, mas também por alguns problemas no processo. Inclusões de alumina que podem ser originadas no processo de desoxidação, por exemplo, também podem depositar-se na válvula submersa gerando uma obstrução parcial ou total da mesma. Este fenômeno é conhecido como “clogging” e prejudica a lingotabilidade dos aços.

O distribuidor tornou-se um importante equipamento nos estudos de remoção de inclusões via flotação, pois, ele é o último reator metalúrgico antes do início do processo de solidificação no molde em que o aço se encontra totalmente no estado líquido. Uma das ações que podem ser realizadas para melhorar a limpeza do aço no distribuidor é a modificação do escoamento do aço, de modo que este proporcione às inclusões um maior tempo para flotação e absorção pela escória sobrenadante ao aço líquido.

Com o objetivo de melhorar a qualidade do aço, a indústria siderúrgica, com o auxílio da comunidade científica, desenvolveu ao longo dos anos diferentes formatos de distribuidores e modificadores de escoamento, além de modificações de padrões operacionais. Dentre os últimos avanços tecnológicos estão os inibidores de turbulência posicionados no distribuidor para receber o jato de aço oriundo da panela e proporcionar um escoamento adequado às funções do distribuidor.

Devido às condições físico-químicas, ambientais e de custos, toda modificação no processo deveria preferencialmente passar por um estudo prévio, evitando possíveis erros e acidentes. O ideal seria o emprego de ferramentas de modelagem física e/ou matemática de forma a prever muitos dos fenômenos que ocorrem nos processos metalúrgicos. Essas ferramentas possibilitam a execução de diversos experimentos, que permitem estimar qualitativamente e quantitativamente as condições de escoamento no distribuidor. Deste modo é possível determinar se uma modificação é vantajosa ou não para a qualidade do aço. Estes ensaios podem envolver a visualização do escoamento, a quantificação dos volumes característicos (via curva de distribuição dos tempos de residência) e a quantificação da remoção de inclusões.

2 OBJETIVOS

O objetivo geral deste trabalho é estudar o comportamento da remoção de inclusões em um modelo físico do distribuidor de lingotamento contínuo de tarugos frente à variação dos seguintes parâmetros de ensaio: velocidade de lingotamento, presença de tubo longo e presença de barreiras.

Como objetivos específicos são empregados ensaios de modelagem física em um modelo físico do distribuidor de lingotamento contínuo para os seguintes parâmetros: velocidade de lingotamento (1,8 m/min, 2,2 m/min e 2,6 m/min), com/sem a presença de tubo longo e com/sem a presença de barreiras. Esses parâmetros são estudados a partir da:

- Qualificação do escoamento interno do modelo físico do distribuidor por meio do ensaio de linhas de fluxo (ensaio de corante);
- Quantificação dos tempos de residência e das frações de volumes característicos de escoamento do modelo físico do distribuidor via ensaio de distribuição de tempo de residência (curvas DTR);
- Quantificação das inclusões não-flotantes no modelo físico do distribuidor por meio do ensaio de remoção de inclusões.

Este trabalho não possui o objetivo de determinar o melhor escoamento possível para o modelo de distribuidor de lingotamento contínuo estudado, e sim alterar a configuração do escoamento de forma a causar variações na remoção de inclusões. O objeto deste trabalho é basicamente definir um método confiável, para uso em modelos físicos, que permita quantificar a remoção de inclusões.

3 ESTUDOS DE MODELAGEM FÍSICA SOBRE REMOÇÃO DE INCLUSÕES EM DISTRIBUIDORES

O distribuidor possui a função de abastecer continuamente os moldes por meio da distribuição do aço pelos veios (Figura 1) sem que haja perturbações significativas na altura do aço no molde e na camada de escória. O aço, que deixa o distribuidor, deve apresentar homogeneidade térmica e química e estar o mais próximo possível da temperatura objetivada. No entanto, estas não são as únicas funções do distribuidor, pois ele também pode atuar na diminuição, controle e prevenção de aumento dos teores residuais de inclusões não metálicas no aço líquido.

Os estudos do escoamento no interior do distribuidor, realizados diretamente na planta, são de difícil implementação. O distribuidor e o aço são opacos e impossibilitam a visualização do escoamento no interior do distribuidor. Além disso, há risco de segurança ao realizar testes onde as temperaturas de trabalho são geralmente entre 1550 e 1600 °C. Desta forma, o uso de modelos físicos e/ou numéricos têm sido de grande valor para os estudos de escoamento. Usualmente água tem sido empregada como fluido simulador de aço líquido, pois a viscosidade cinemática da água a 20 °C é similar a do aço a 1600 °C (Tabela 1).

Figura 1. Representação ilustrativa em corte de um típico distribuidor de lingotamento contínuo de aços especiais para tarugos.

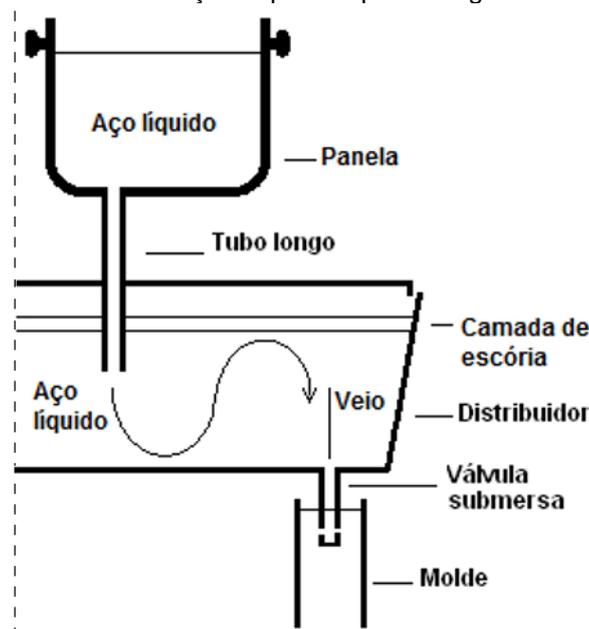


Tabela 1. Propriedades de viscosidade e massa específica do aço a 1600 °C e da água a 20 °C.

Propriedade	Água (20°C)	Aço (1600°C)
Viscosidade dinâmica (μ), kg/(m.s)	0,001	0,0064
Massa específica (ρ), kg/m ³	1000	7014
Viscosidade cinemática (ν), m ² /s	10 ⁻⁶	0,913 x 10 ⁻⁶

Fonte: Mazumdar, D.; Guthrie, I. L. R. (1999)²⁷.

O aço quando é vazado no distribuidor, percorre um caminho preferencial em direção ao molde. Este caminho, a uma dada velocidade média, ocorre em um determinado tempo, definido como tempo de residência teórico (\bar{t}) e é calculado via a equação 1. No entanto, o tempo de residência teórico difere da realidade devido em parte aos diversos caminhos que o aço percorre no interior do distribuidor e a existência de regiões com baixa velocidade de escoamento ou quase nula. Isso implica que o escoamento no distribuidor pode ser previsto por uma curva de distribuição de tempos de residência (DTR), onde diferentes frações do escoamento permanecem diferentes tempos no interior do distribuidor, e não por um tempo médio estabelecido segundo a equação 1. .

$$\bar{t} = \frac{V}{Q} = \frac{\text{Volume do distribuidor}}{\text{Vazão de entrada no distribuidor}} \quad (1)$$

A curva DTR pode ser obtida em modelos físicos e/ou matemáticos. Nos modelos físicos é obtida por meio de um ensaio onde se injeta um traçador na entrada de água do distribuidor e, mede-se a concentração do traçador (ou outra variável que permita avaliar a concentração, como condutividade elétrica) nas saídas dos veios ao longo do tempo. Maiores informações podem ser obtidas na literatura específica²⁸⁻³².

O ensaio de distribuição de tempo de residência tem como objetivo caracterizar o escoamento de modo a fornecer melhores condições para o cumprimento das funções do distribuidor quanto à flotação de inclusões, homogeneidade térmica e química do aço. Esse ensaio também auxilia a modelagem de simulação numérica da remoção de inclusões no distribuidor a partir dos tempos de residência mínima, média e de pico.

3.1 PRINCÍPIOS RELACIONADOS À MODELAGEM FÍSICA DA REMOÇÃO DE INCLUSÕES NO DISTRIBUIDOR

O entendimento do papel das forças que interagem em cada tipo de fenômeno é fundamental na escolha dos critérios de similaridade a serem utilizados para a simulação em modelos físicos. Estes devem reproduzir os fenômenos de interesse e estabelecer as relações entre o modelo e o protótipo.

Pode-se inferir que, devido à diversidade dos fenômenos, é impossível que se possam manter, em um mesmo modelo físico, todos os critérios de similaridade e obter resultados para diferentes fenômenos com o mesmo rigor. Este assunto foi discutido em diversas contribuições que são recomendadas aos leitores interessados^{1,33-35}. Estas contribuições citadas apresentam o embasamento teórico que depois foi empregado por vários outros pesquisadores³⁶⁻⁴⁴.

Quando o objetivo é simular a remoção de inclusões no distribuidor, torna-se necessário que o escoamento e os fenômenos de remoção de inclusões sejam similares à situação real. Certamente não é possível manter todas as condições idênticas à situação real. No entanto, é possível manter alguns critérios de similaridade tanto para o escoamento quanto para os fenômenos de remoção que proporcionem resultados satisfatórios. Esses critérios serão apresentados mais detalhadamente a seguir.

3.1.1 Critérios de similaridade para a modelagem de escoamento do aço líquido na modelagem física

Para que os resultados, tanto dos modelos físicos quanto numéricos, possam ser utilizados com alguma segurança, eles devem obedecer a critérios de similaridade (geométrica, dinâmica, cinemática, térmica e química) e as respectivas forças que governam os fenômenos envolvidos. Este assunto foi largamente discutido por diversos autores e recomenda-se a leitura dos respectivos trabalhos^{1,45-47}.

No modelo físico do distribuidor, a similaridade geométrica é mantida quando todas as medidas envolvidas possuem a mesma proporção que o distribuidor real (protótipo), conforme o fator de escala do modelo (λ). A

similaridade cinemática é geralmente mantida automaticamente após manter-se a similaridade geométrica e dinâmica. Essa similaridade dita que os vetores de velocidade no modelo e protótipo devem possuir direção, sentido e magnitude de mesma proporção, conforme o fator de escala.

Os critérios de similaridade térmica e química normalmente não são levados em consideração. Entretanto, é possível realizar ensaios de perdas de temperatura mantendo as mesmas razões de gradiente de temperatura e transferência de calor entre o modelo e o protótipo. Da mesma forma, para a simulação de reações químicas deve-se manter a mesma razão entre a transferência de massa e taxa de reação do modelo e protótipo.

Para se manter a similaridade dinâmica no modelo do distribuidor, as forças envolvidas no escoamento do modelo e protótipo devem ser as mesmas ou proporcionais ao fator de escala. Para escoamentos isotérmicos e de regime permanente no distribuidor, as forças mais importantes a serem consideradas são as forças de inércia, gravitacionais e viscosas. Onde a relação entre as forças de inércia (transporte de momento convectivo) e as forças viscosas (transporte de momento difusivo) é dada pelo adimensional de Reynolds. Enquanto que a relação entre as forças de inércia e as forças gravitacionais é dada pelo adimensional de Froude.

No entanto, para se manter simultaneamente similaridade de Reynolds e Froude deve-se empregar um fator de escala igual a 1, isto é, os modelos devem ser construídos em escala plena¹. Para o caso de modelos em escala reduzida não é possível manter similaridade de Reynolds e Froude simultaneamente. Logo, deve-se fazer a escolha de qual adimensional é mais importante na simulação do escoamento em função do fenômeno que deve ser estudado. Os pesquisadores que trabalham com remoção de inclusões no distribuidor têm preferido a similaridade de Froude por conveniência nos cálculos de escala do modelo, por exemplo, a simulação de tamanho de inclusão. Para os leitores interessados são recomendados trabalhos mais específicos³³.

No Laboratório de Siderurgia da UFRGS existem dois modelos de distribuidores em escala 1:1, com similaridade de Reynolds e Froude para fins de pesquisa e ensino, tanto na universidade quanto para a indústria. Paralelamente, também foi construído um modelo de panela, em escala 1:3,

com similaridade de Froude. Nos modelos de distribuidor foram realizados estudos de escoamento com o objetivo de qualificá-los, isto é, aumentar o tempo médio de residência, eliminar o curto-circuito e reduzir o volume morto, além de se realizar estudos de emulsificação de escória⁴⁸⁻⁵⁰. Na panela foram empreendidos estudos de escoamento e tempos de mistura⁵¹. Os resultados destes modelos, independente do fator de escala, têm sido usados para melhorar o entendimento do comportamento do escoamento em equipamentos industriais. Para o caso do modelo da panela em escala reduzida, Pereira, J. A. M. (2011)⁵¹ mostrou resultados coerentes com dados colhidos na usina para validação do modelo com a indústria.

3.1.2 Critérios de similaridade para a simulação de inclusões não metálicas na modelagem física

No aço existe uma grande variedade de tipos de inclusões que diferem quanto à composição química, tamanho, origem e outros⁵². Devido a isso, há uma grande dificuldade em simulá-las com precisão em modelos físicos e matemáticos. Muitas variáveis estão envolvidas na formação de cada tipo de inclusões como: o aço produzido, o agente desoxidante utilizado, a composição da escória, as diferentes composições de refratário, entre outros.

Na busca da simulação das inclusões com o objetivo de estudar a remoção das mesmas, pesquisadores¹ têm apresentado critérios de similaridade e simplificações que forneçam a melhor representação e resultado possíveis. Entre as simplificações usualmente empregadas incluem-se a formação de inclusões no interior do distribuidor oriundas do desgaste de refratário, a reoxidação do banho, as reações entre refratário/aço e outros.

Mazumdar, D. e Evans, J. W.⁴⁶ apresentaram as limitações em representar realisticamente os sistemas multifásicos siderúrgicos, como: escória/aço, gás/aço, entre outros. Deve-se lembrar de que a simulação dos fenômenos que envolvem tensão superficial e/ou interfacial é extremamente difícil quando comparados aos outros fenômenos que ocorrem no distribuidor. Isso se deve em parte, ao grau de complexidade na escolha do material correto para a simulação das inclusões.

Pode-se afirmar que a principal forma de separação de inclusões do aço no distribuidor é a flotação seguida da captura pela camada de escória sobrenadante presente no distribuidor. A flotação obedece a um vetor de velocidade resultante de dois vetores, um relacionado à flotação de partícula via lei de Stokes (supondo inclusões esféricas) e outro relacionado com o vetor velocidade gerado pelo arraste da inclusão pelo escoamento do aço. Também deve ser levado em consideração, caso exista, um vetor originado pelo arraste da inclusão por injeção de gases no interior do escoamento^{33,53}.

No caso do uso de modelos em escala 1:1, os parâmetros de comprimentos, vazões, velocidades e tamanhos de inclusão permanecem iguais ao do protótipo. No entanto, para os modelos em escala reduzida é conveniente obedecer à similaridade de Froude que é mantida quando as equações apresentadas na Tabela 2 são respeitadas. Recomenda-se, aos leitores interessados, ler a referência específica³³.

Tabela 2. Equações de similaridade de Froude para modelo e protótipo.

Parâmetro	Equação
Velocidade (u)	$u_m = \sqrt{\lambda} \cdot u_p$ (a)
Comprimento característico (L)	$L_m = \lambda \cdot L_p$ (b)
Raio da inclusão (R)	$R_{inc,m} = \lambda^{0,25} \cdot R_{inc,p}$ (c)

λ = Fator de escala; m= Modelo; p= Protótipo.

Fonte: Sahai, Y.; Emi, T. (1996)³³

A Tabela 2 mostra as relações que existem entre a velocidade (a), o comprimento característico (b) e o raio das inclusões (c) entre o modelo e o protótipo de forma que a similaridade de Froude seja obedecida. Pode-se observar que as três variáveis são funções do fator de escala e este é usualmente um valor inferior a unidade, portanto, quando se obedece a similaridade de Froude e se faz uma redução de escala, faz-se também uma redução do tamanho de partícula de simulação das inclusões.

A equação do raio da inclusão (c) mostrada na Tabela 2 considera que a razão entre as massas específicas da partícula de simulação da inclusão e da água é a mesma que a razão entre as massas específicas da inclusão e do aço. Porém, esta relação é difícil de ser obedecida em termos de materiais para simular inclusões, inclusive pela diversidade de composição química das inclusões formadas no processo. Como solução, Sahai, Y.; Emi, T.³³

apresentaram a equação 2 que permite variar as relações de massas específicas do modelo e protótipo. Desse modo, um variado leque de possibilidades que permite não só levar em conta as composições químicas das diferentes espécies a serem simuladas, como também os diferentes tamanhos. O uso desta equação permite determinar o valor do raio da inclusão para qualquer relação de massa específica no modelo e em qualquer fator de escala. A leitura do trabalho citado é recomendada para conhecimento das considerações realizadas na dedução da equação 2³³.

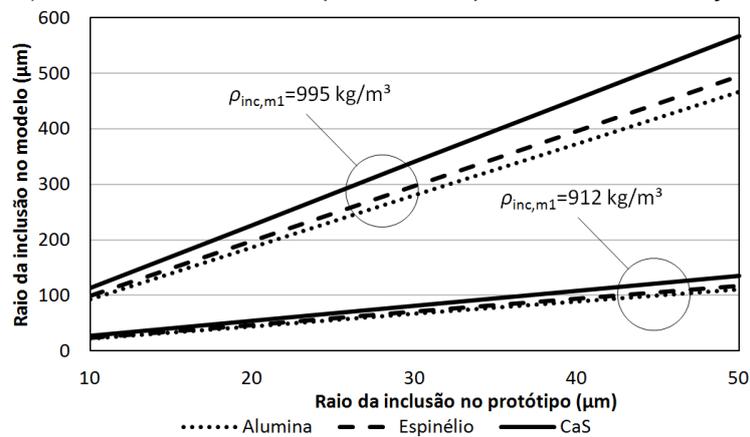
$$\frac{R_{inc,m}}{R_{inc,p}} = \lambda^{0,25} \left[\frac{\left(1 - \frac{\rho_{inc,p}}{\rho_{aço}}\right)}{\left(1 - \frac{\rho_{inc,m}}{\rho_{água}}\right)} \right]^{0,5} \quad (2)$$

A equação 2 estabelece a relação entre o raio da inclusão no modelo ($R_{inc,m}$) e o raio da inclusão no protótipo ($R_{inc,p}$), esta é dada por uma função do produto entre o fator de escala (λ) e as relações entre a massa específica da inclusão no equipamento industrial ($\rho_{inc,p}$) e a massa específica do aço ($\rho_{aço}$) com a massa específica do material empregado para simular a inclusão no modelo ($\rho_{inc,m}$) e a massa específica da água ($\rho_{água}$).

A equação 2 apresenta uma grande vantagem, pois permite simular inclusões pequenas com partículas maiores, isto é, supondo um modelo construído com fator de escala igual a 1 e o emprego de água ($\rho_{água} = 1000 \text{ kg/m}^3$) para simular aço ($\rho_{aço} = 7014 \text{ kg/m}^3$, Tabela 1), pode-se variar a massa específica do material empregado para simular inclusões da planta até a faixa granulométrica que se deseja simular. Exemplificando: buscando na literatura^{23,26} os valores das massas específicas para diferentes inclusões encontradas nos aços ($\rho_{Alumina} = 3960 \text{ kg/m}^3$, $\rho_{Espinélio} = 3580 \text{ kg/m}^3$ e $\rho_{CaS} = 2500 \text{ kg/m}^3$) e atribuindo diferentes massas específicas de materiais que podem simular as inclusões no modelo ($\rho_{inc,m1} = 912 \text{ kg/m}^3$ e $\rho_{inc,m2} = 995 \text{ kg/m}^3$) obtêm-se o gráfico apresentado na Figura 2. Onde, $\rho_{inc,m1}$ pode representar a massa específica do polipropileno¹⁴ e $\rho_{inc,m2}$ pode representar um material qualquer com massa específica similar à massa específica da água.

O caso em que a massa específica da inclusão no modelo é igual a 995 kg/m³ na Figura 2 permite a interpretação de que quanto mais próxima da massa específica da inclusão no modelo é da massa específica da água, maior é a relação entre o raio do modelo e protótipo. Em condições próximas a essas pode-se simular microinclusões com maiores diâmetros de partículas que simulam as inclusões.

Figura 2. Relação entre modelo e protótipo para o tamanho de diferentes inclusões (Alumina, Espinélio e CaS) e diferentes massas específicas de partículas de simulação de inclusões.



Observação: $\rho_{\text{Alumina}} = 3960 \text{ kg/m}^3$, $\rho_{\text{Espinélio}} = 3580 \text{ kg/m}^3$ e $\rho_{\text{CaS}} = 2500 \text{ kg/m}^3$.

Sahai, Y.; Emi, T.³³ também estudaram a relação entre modelo e protótipo da evolução do tamanho de inclusões com o objetivo de simular a aglomeração de inclusões. Essa simulação pode ser feita para diferentes fatores de escala por meio da correção na concentração das inclusões injetadas no ensaio (Equação 3). Assim é possível manter, segundo o fator de escala, a mesma proporção de colisões de inclusões no interior do modelo.

$$n_{mi} = \lambda^{-1,5} n_{pi} \quad (3)$$

Onde:

n_{mi} : Número de partículas presentes no modelo;

n_{pi} : Número de inclusões presentes no protótipo (equipamento industrial).

Para o caso de modelos em escala plena ($\lambda=1$), pode-se verificar que a aglomeração das inclusões pode ser modelada de forma adequada mantendo a mesma concentração de inclusões em ambos os sistemas. Para modelos em

escala reduzida ($\lambda < 1$) deve ser injetada uma concentração superior de partículas para manter a similaridade. Ou seja, quando o fator de escala é igual a 1/3 deve-se injetar aproximadamente 5,2 vezes mais inclusões do que no protótipo.

No entanto, a equação 3 leva somente em consideração a probabilidade de colisão entre as partículas e não considera as interações de aglomeração das inclusões. Logo, para se obter resultados coerentes com o fenômeno real, deve-se empregar materiais de simulação de inclusões que se comportem no modelo de forma similar às inclusões do protótipo. Para os leitores interessados, a descrição completa da dedução da equação 3 é apresentada no artigo citado³³.

Uma das considerações do pesquisador é simular a existência de uma camada de escória responsável pela captura das inclusões. Poucos autores tem utilizado essa abordagem no ensaio de remoção de inclusões em função da escolha do material de simulação para a escória e a consequente dificuldade em manter as mesmas razões de massa específica e de interações interfaciais e superficiais envolvidas no sistema escória/aço/inclusão. Rogler, J. P., et al.⁵⁴⁻⁵⁵ utilizaram querosene para simular a escória. Enquanto, Zhang, M. J., et al.⁵⁶ utilizaram querosene mais óleo de motor numa proporção mássica de 89/11.

Para a escolha de um material de simulação da escória, podem ser apresentadas três características importantes, mesmo que algumas sejam de difícil aplicação:

- Razão de massa específica similar entre modelo e protótipo para aço/água e escória/escória de simulação, conforme mostrado na equação 4;

$$\left(\frac{\rho_{esc,m}}{\rho_{agua}}\right)_m = \left(\frac{\rho_{esc,p}}{\rho_{aço}}\right)_p \quad (4)$$

Onde:

$\rho_{esc,m}$: Massa específica da escória no modelo (kg/m^3);

ρ_{agua} : Massa específica da água (kg/m^3);

$\rho_{esc,p}$: Massa específica da escória no protótipo (kg/m^3);

$\rho_{aço}$: Massa específica do aço (kg/m^3).

- Tensão interfacial escória/inclusão no protótipo ($\gamma_{esc,p/inc,p}$) similar a tensão interfacial entre o material que simula a escória e as partículas que simulam as inclusões ($\gamma_{esc,m/inc,m}$) conforme mostrado na equação 5.

$$\gamma_{esc,m/inc,m} = \gamma_{esc,p/inc,p} \quad (5)$$

- Tensão interfacial escória/aço ($\gamma_{esc,p/aço}$) similar a tensão interfacial entre o material que simula a escória e água ($\gamma_{esc,m/água}$), conforme mostrado na equação 6.

$$\gamma_{esc,m/água} = \gamma_{esc,p/aço} \quad (6)$$

Portanto, para simular a remoção das inclusões em modelos físicos deve-se manter os critérios de comprimento característico, concentração de inclusões, interações de aglomeração e simulação de escória. A manutenção destes critérios simultaneamente é difícil, mas pode proporcionar um resultado mais próximo entre o modelo e o protótipo.

3.2 DIFERENTES MÉTODOS UTILIZADOS NO ENSAIO DE REMOÇÃO DE INCLUSÕES SÓLIDAS

Esta seção tem o objetivo de mostrar os métodos empregados por diferentes pesquisadores na simulação de remoção de inclusões em distribuidores. Para isso, a Tabela 3 apresenta um resumo dos principais artigos encontrados na literatura e que será discutida a seguir.

Como apresentado na subseção 3.1.1, os modelos físicos em escala reduzida tem respeitado preferencialmente a similaridade de Froude. Este

critério de similaridade facilita o cálculo dos ajustes de escala como, por exemplo, para o tamanho das inclusões simuladas e a correção na concentração de inclusões.

Tabela 3. Principais características dos modelos físicos de distribuidores e métodos de ensaio utilizados por diversos autores.

Autor(es)/Ano	Características do modelo físico					Método de quantificação de inclusões	Método de injeção de partículas	Tempo de ensaio	Quantidade de material injetado	Concentração de inclusões no distribuidor
	Dimensões do fundo (LxPxH)	Número de veios	Escala	Formato do distribuidor	Crítérios de similaridade					
Joo, S.; Guthrie, R. I. L. (1993) ³⁹	5190x1100x680 mm	1 veio	1:1	Retangular	Froude e Reynolds	ESZ	Contínuo	$3\bar{t}$	5×10^5 partículas/min*	Não informado
Hojo, M., et al. (1996) ³⁷	7 t (Capacidade)	1 veio	1:2	Retangular	Froude	Turbidez	Pulso	\bar{t}	Não informado	Não informado
Cho, J.; Lee, H. (2001) ³⁷	1000x300x450 mm	1 veio	1:1	Retangular	Froude e Reynolds	Peneira	Contínuo	$t_i + \bar{t}$	20 g/min e variável	Não informado
Kim, H. (2003) ⁵⁸	70 t (Capacidade)	4 veios	1:1	Delta	Froude e Reynolds	ESZ	Contínuo	$2\bar{t}$	Não informado	$1-5 \times 10^8$ partículas/m ³
Rogler, J. P., et al (2005) ⁵⁵	1393x190x380 mm	1 veio	1:3	Retangular	Froude	Peneira	Pulso	$3\bar{t}$	6 g	49 ppm
Zhang, Q. Y., et al (2006) ⁵⁹	Não informado	1 veio	1:2	Não informado	Não informado	Peneira	Semi-contínuo (100s de injeção)	10 min	17,5 e 12,5 g	Não informado
Jin-gang, L., et al. (2007) ³⁸	780x400x400 mm	1 veio	1:2,5	Retangular	Froude	Peneira	Pulso	10 min	500 partículas	4×10^5 partículas/m ³ *
Qiang, Y., et al. (2009) ⁴¹	2250x244x400 mm	2 veios	1:3	Retangular	Froude	Peneira	Pulso	12 min	2 g	Não informado
Qiang, Y., et al (2010) ¹⁴	1665x480x420 mm	1 veio	1:2,5	Retangular	Froude	Peneira	Pulso	12 min	2 e 40 g	Não informado
Chattopadhyay, K., et al (2011) ³⁷	4380x1020x500 mm	4 veios	1:1	Delta	Froude e Reynolds	Não informado	Não utilizado	t_{trans}	Não há injeção	Não informado
Zhang, M. J., et al. (2011) ⁵⁶	2374x256x400 mm	2 veios	1:3	Retangular	Froude	Peneira	Pulso	$3\bar{t}$	200 g	Não informado
Seshadri, V., et al. (2012) ⁶⁰	60 t (Capacidade)	2 veios	1:3	Retangular	Froude	Peneira	Pulso	Não informado	Não informado	Não informado

\bar{t} = tempo de residência teórico do distribuidor.

t_i = tempo de injeção das partículas de simulação de inclusões.

* Calculado a partir dos dados apresentados no trabalho do respectivo autor.

t_{trans} = período transiente do distribuidor durante a troca de panela.

ESZ = *Electric Sensing Zone*.

É possível observar na Tabela 3 que o fator de escala reduzido é igual a 1/3 na maioria dos casos. Isso ocorre devido em parte aos modelos físicos muito pequenos sofrerem interferência no escoamento devido à proximidade das paredes. Logo, o fator de escala é limitado pelo tamanho final do modelo em relação ao equipamento real. Fatores de escala menores que 1/3 somente são encontrados em distribuidores de dimensão elevada. Pode-se exemplificar o estudo, não mostrado na Tabela 3, de distribuição de tempos de residência e modelagem matemática apresentado por Zhang, M. J.; Tanaguchi S.; Cai, K. (2000)⁶¹ onde o fator de escala do modelo utilizado pelos autores foi igual a 1/4.

Para a injeção de inclusões na simulação foram encontrados dois métodos comuns: contínuo e por pulso (Tabela 3). No primeiro, a alimentação ocorre continuamente de uma solução de inclusões durante o ensaio. Assim, uma concentração de inclusões de estabilização é atingida na saída do distribuidor ao longo do ensaio. No segundo método e, o mais comum, a injeção é realizada na forma de pulso e uma quantidade de inclusões pré-determinada é injetada de uma só vez em um tempo muito curto com relação ao tempo total de ensaio. Zhang, Q. Y., et al (2006)⁵⁹ ainda apresentaram um método de injeção semi-contínuo que ocorre nos primeiros 100 segundos de um total de 10 minutos de ensaio.

Os ensaios de remoção de inclusões, normalmente, são realizados em regime permanente. Essa operação representa a maior parte do tempo de operação de um distribuidor e simplifica uma série de fenômenos de formação de inclusões como, por exemplo, a emulsificação de escória durante a troca de panela. No entanto, é importante lembrar que o distribuidor apresenta maior ocorrência de inclusões no aço lingotado durante o regime transiente⁶² e ensaios durante esse período poderiam fornecer informações úteis à produção de aço limpos.

Segundo a Tabela 3, os tempos de ensaio variam entre um e três tempos de residência teórico. Não é percebido um padrão entre a escolha dos tempos, cada pesquisador possui um método para determinação do tempo de ensaio. Quanto à massa de inclusões injetada no ensaio, essas variam entre 2 a 200g. Enquanto que para os ensaios de injeção de forma contínua as vazões mássicas variam entre 20 e 147,5 g/min.

Entre os modelos físicos empregados nos estudos estão dois métodos predominantes de quantificação de inclusões não flotantes: um mais simples via peneira^{14,38,41-42,55,57,59-60,63}, e outro via sensor de quantificação de partículas que utiliza o método ESZ (Electric Sensing Zone)^{39,58,64}. Também é possível empregar a utilização do método de turbidez para realizar o ensaio. Para mais detalhes, recomenda-se a literatura específica³⁷. Detalhes dos dois primeiros métodos apresentados serão mostrados a seguir.

3.2.1 Método de quantificação de inclusões via peneira

O método de quantificação via peneira tem como objetivo capturar as partículas nos veios de saída do modelo físico para posterior secagem e pesagem, conforme apresentado por Qiang, Y., et al. (2009)⁴¹. Essa captura é realizada pela acoplagem de uma peneira metálica com tamanho de partícula passante menor que as partículas injetadas no distribuidor. Desse modo, não há perda de massa passante pela peneira. Esse método é considerado de maior simplicidade e facilidade de adaptação no modelo, comparado ao sistema via sensor que será apresentado a seguir. A quantificação da eficiência de remoção no distribuidor (inclusões flotantes) é dada com referência ao final do ensaio e calculada pela Equação 7. Essa equação também foi apresentada por Qiang, Y., et al. (2009)⁴¹ e outros autores^{57,55,59,38}.

$$\eta_r(\%) = \left[1 - \left(\frac{m_c}{m_i} \right) \right] \times 100 \quad (7)$$

Onde η_r representa a eficiência de remoção, m_c representa massa de partículas de simulação de inclusões coletas na saída do distribuidor e m_i representa a massa injetada no distribuidor.

A análise da flotação de inclusões também pode ser feita por meio da utilização do termo “porcentual de inclusões passantes” e este é calculado pela razão entre a massa coletada no filtro (m_c) e a massa injetada no ensaio (m_i) vezes cem.

Este método permite mediante a análise granulométrica do material coletado após o ensaio, a análise do tamanho de inclusões passantes pelo veio. Esse procedimento permite quantificar a remoção de inclusões para diferentes tamanhos e como se comportam para diferentes escoamentos.

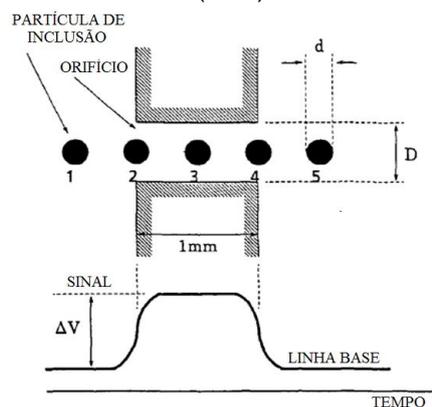
3.2.2 Método de quantificação de inclusões via sensor

O método ESZ é o princípio de funcionamento do sistema LiMCA (Liquid Metal Cleanliness Analyser) que inicialmente foi concebido para utilização no processamento do alumínio (LiMCA Al) e depois adaptado para aço líquido

(LiMCA Fe). O equipamento mais atual adaptado para o uso em água recebeu o nome de Aqueous Particle Sensor III (APS III).

Chakraborty, A. (2010)⁶⁴ demonstrou detalhadamente o princípio de funcionamento do sistema APS III. O método ESZ emprega dois eletrodos alimentados por uma corrente elétrica constante, que sinalizam uma diferença de tensão quando ocorre um aumento da resistência pela ação da passagem de partículas não condutoras (Figura 3). Esse método garante mais informações quanto ao tamanho e quantidade de inclusões ao longo do ensaio, mas a aplicação é mais difícil e mais cara que um método de separação via peneiras. Trabalhos comparativos entre os dois métodos não foram encontrados na literatura pesquisada.

Figura 3. Princípio de funcionamento da detecção de partículas via *Electric Sensing Zone* (ESZ).



Fonte: Adaptado de JOO, S.; GUTHIE, R. I. L.(1993)³⁹.

3.2.3 Material de simulação de inclusões

Aços especiais normalmente são fabricados usando alumínio como agente desoxidante. Na reação de desoxidação, o alumínio reage com o oxigênio dissolvido no aço formando a inclusão de alumina (Al_2O_3). Esta, por ser não-molhável no aço tende a aglomerar-se e formar clusters de alumina responsáveis por severos problemas de processo. A alumina apresenta massa específica de 3900 kg/m^3 e ângulo de contato inclusão/aço de 144° . Para mais dados de ângulo de contato para inclusões sólidas recomenda-se a literatura citada⁶⁵.

Nesse contexto, os autores vêm empregando diversos materiais de simulação de inclusões (Tabela 4) e, entre eles, os mais utilizados são: o polietileno (PE) e o polipropileno (PP). Ambos os materiais apresentam massa específica inferior a da água e ângulo de contato superior a 90°. Ou seja, esses materiais não são molháveis pela água (hidrofóbicos). Basicamente por esses motivos, a maioria dos pesquisadores afirma que é possível simular as inclusões presentes no aço com tais materiais. No entanto, é considerada a simulação de um único tipo de inclusão. Visto que na situação real há uma complexa variedade de inclusões presentes no aço⁷.

Na Tabela 4 são apresentados dados quanto à simulação da escória no modelo, inclusões simuladas, tamanho de partículas, massa específica e molhabilidade material/água dos materiais empregados pelos principais trabalhos encontrados.

Tabela 4. Simulação das inclusões apresentada por diversos pesquisadores.

Autor(es)/Ano	Simulação da escória	Material de simulação para inclusões	Inclusões do protótipo simuladas	Distribuição de tamanho de partícula no modelo	Distribuição de tamanho de partícula no protótipo	Massa específica (kg/m ³)	Molhabilidade material/água
Joo, S.; Guthrie, R. I. L (1993) ³⁹	Não considerado	Microesferas de vidro ocas	Alumina e/ou sílica	20 – 110 µm	Não informado	295	Não informado
Hojo, M., et al. (1996) ³⁷	Não considerado	Vidro em forma de bolhas	Não informado	53 – 88 µm	80 – 100 µm	260	Não informado
Cho, J.; Lee, H.. (2001) ⁵⁷	Não considerado	PE, PVC e ABS	Não informado	$\bar{d}=421$ µm (PE) $\bar{d}=144$ µm (PVC) $\bar{d}=536$ µm (ABS)	Não informado	850 (PE) 1358 (PVC) 1040 (ABS)	102° (PE) 87° (PVC) 72° (ABS)
Kim, H. (2003) ⁵⁸	Não considerado	Microesferas de Vidro Ocas	Não informado	100-300 µm	Não informado	Não informado	Considerado hidrofóbico
Rogler, J. P., et al (2005) ⁵⁵	Querosene	PEBDL	Alumina e/ou aluminatos	53-75 e 75-106 µm	25-36 e 36-51 µm	920	105°
Zhang, Q. Y., et al (2006) ⁵⁹	Não considerado	PE	Alumina e/ou sílica	100-140, 140-283 e 283-424 µm	Não informado	1020	91° (considerado hidrofóbico)
Jin-gang, L., et al. (2007) ³⁸	Não considerado	PS	Não especificado	$\bar{d}=1$ mm	Não informado	Não informado	91°
Qiang, Y., et al. (2009) ⁴¹	Não considerado	PP	Silica	120-160 µm	55-73 µm	912	118°
Qiang, Y., et al (2010) ⁴⁴	Não considerado	PP	Alumina	96-120 e 120-160 µm	51-64 e 64-86 µm	912	118°
Chattopadhyay, K., et al (2011) ³⁶	Grânulos de PEBDL	Grânulos de PEBDL	Emulsificação da escória	Não informado	Não informado	920	Não informado
Zhang, M. J., et al. (2011) ⁵⁶	Querosene +óleo	Esferas de Al ₂ O ₃	Não informado	44-500 µm	10-100 µm	980	Não informado
Seshadri, V., et al. (2012) ⁶⁰	Não considerado	Polímero	Não informado	50-100 e 100-200 µm	10-15 e 15-30 µm	970	Não informado

\bar{d} : diâmetro médio de partícula;

PE: Polietileno;

PEBDL: Polietileno de Baixa Densidade Linear;

PP: Polipropileno

PVC: Policloreto de vinil;

ABS: Acrilonitrila Butadieno Estireno;

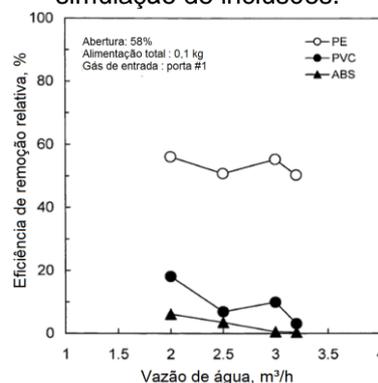
PS: Poliestireno;

Al₂O₃: Alumina.

Cho, J.; Lee, H. (2001)⁵⁷ mostraram que a eficiência de remoção na modelagem física diminui quando o material utilizado na simulação das inclusões possui ângulo de contato com a água menor que 90° (Figura 4), como por exemplo o PVC e o ABS. O polietileno (PE) possui ângulo de contato de 102° e, segundo os resultados dos autores, apresenta aproximadamente 20% maior eficiência de remoção do que o ABS e PVC que apresentam ângulo de contato de 72° e 87°, respectivamente. Isso se explica devido a molhabilidade maior que o PVC e o ABS apresentam que, conseqüentemente, sofrem maior influência das forças de inércia do escoamento e são arrastadas para o veio. Na prática, a maioria das inclusões estudadas no aço são alumina e sílica que não são molháveis pelo aço. Devido a isso, os autores defendem que os materiais utilizados como simuladores das inclusões devem apresentar interação com a água do mesmo modo que as inclusões apresentam com o aço, como por exemplo: polietileno (PE) e polipropileno (PP). Esse assunto foi abordado anteriormente na subseção 3.1.2.

A emulsificação da escória e a flotação das respectivas partículas emulsionadas podem ser simuladas em modelo físico por meio da utilização de grânulos poliméricos. Essas partículas são colocadas na superfície da água formando uma camada de simulação da escória. As partículas quando emulsionadas e passantes pelo veio são capturadas e quantificadas para o cálculo da eficiência de remoção dessas inclusões emulsionadas. Parâmetros de ensaio utilizados por Chattopadhyay, K., et al (2011)³⁶ nesse tipo de ensaio podem ser vistos nas tabelas 3 e 4. Outros trabalhos podem ser encontrados na literatura⁶⁶⁻⁶⁷.

Figura 4. Eficiência de remoção de inclusões para diferentes materiais de partículas de simulação de inclusões.



Fonte: Adaptado de CHO, J.; LEE, H. (2001)⁵⁷.

3.3 UMA BREVE DISCUSSÃO SOBRE OS RESULTADOS OBTIDOS NA MODELAGEM FÍSICA DE REMOÇÃO DE INCLUSÕES SÓLIDAS

Os estudos em modelos físicos do distribuidor buscam quantificar e/ou qualificar o escoamento do aço líquido frente à aplicação de diferentes parâmetros de práticas operacionais, como a velocidade de lingotamento, o nível de aço líquido do distribuidor, a presença de modificadores de escoamento e outros. Estes estudos fornecem informações sobre a influência dos parâmetros sobre o cumprimento das funções do distribuidor como a eficiência de remoção de inclusões^{26,54,58,68-78}. Adicional a isso, os estudos sobre a aplicação de gases no processo (ex.: injeção de gás no tubo longo e no fundo do distribuidor) também buscam entender a influência dos parâmetros de injeção de gases na captura das inclusões presentes no aço e posterior flotação, como diâmetro de bolha, vazão de gás, homogeneidade de injeção e outros^{36,40,42,55,57,59-60,63,79}.

Trabalhos que envolvem o estudo do escoamento via a utilização de ensaios de distribuição de tempo de residência (DTR) quantificam os volumes característicos (volume morto, pistonado, mistura e curto-circuito) e mostram como estes volumes influenciam nas funções do distribuidor. Alguns trabalhos são recomendados para o efeito do formato do distribuidor (inclinação da parede, tamanho, número de veios, etc.)⁶⁸⁻⁷¹ e o efeito de modificadores de escoamento (barreiras, diques, inibidores de turbulência, etc.)^{26,54-55,59,69,72-78}.

Zheng, S.; Zhu, M. Y. (2006)⁷² listaram alguns princípios sobre os volumes característicos para distribuidores multiveios com o máximo de razão de separação de inclusões possível, são eles resumidamente:

- Mínima fração de volume morto;
- Grande razão entre volume pistonado e morto;
- Escoamento direcionado a superfície;
- Existência de regiões de mistura;
- Homogeneidade entre os veios;
- Inexistência de curto-circuito.

Como afirmado anteriormente, a modificação do escoamento é objetivo de estudo na eficiência de produção de aços limpos no distribuidor e pode ser realizada por meio da ação de artifícios posicionados no interior do distribuidor. A Figura 5 mostra a maioria dos modificadores de escoamento e alguns artifícios utilizados para favorecer a remoção de inclusões empregados na indústria atualmente. São eles: barreiras, barreiras com furos, diques, tubo longo, injeção de gases inertes no tubo longo, cortinas de gás no fundo do distribuidor, inibidores de vórtice e inibidores de turbulência. Na Tabela 5 é mostrada uma relação dos autores apresentados nas Tabelas 3 e 4 e os seus respectivos modificadores de escoamento estudados na modelagem física da remoção de inclusões do distribuidor de lingotamento contínuo de aços.

Figura 5. Representação ilustrativa do distribuidor e dos principais artifícios empregados na busca de melhorias na eficiência de remoção de inclusões da produção de aços longos..

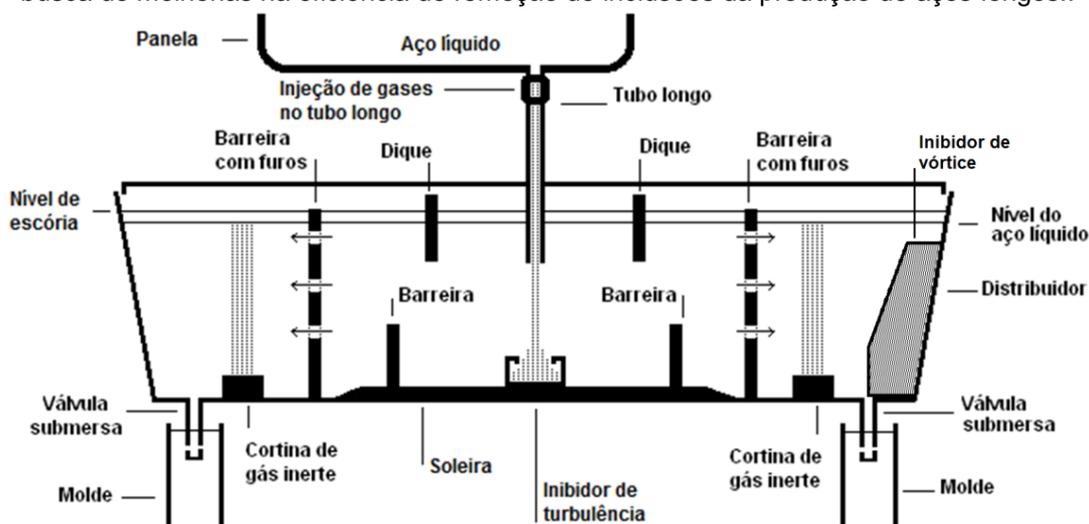


Tabela 5. Indicação dos artifícios modificadores de escoamento usados por diferentes autores em trabalhos de modelagem física da remoção de inclusões de distribuidores.

Autor(es)/Ano	Inibidor de turbulência	Barreira	Barreira com furos	Dique	Eliminador de vórtice	Injeção de gases pelo fundo	Injeção de gases no tubo longo	Camara de redemoinho
Joo, S.; Guthrie, R. I. L (1993) ³⁹	-	✓	-	✓	-	-	-	-
Hojo, M., et al. (1996) ³⁷	-	-	✓	-	-	-	-	-
Cho, J.; Lee, H. (2001) ⁵⁷	-	-	-	-	-	-	✓	-
Kim, H. (2003) ⁵⁸	✓	-	-	-	-	-	-	-
Rogler, J. P., et al (2005) ⁵⁵	✓	-	-	-	✓	✓	-	-
Zhang, Q. Y., et al (2006) ⁵⁹	-	✓	-	✓	-	-	✓	-

Tabela 5. Indicação dos artifícios modificadores de escoamento usados por diferentes autores em trabalhos de modelagem física da remoção de inclusões de distribuidores (continuação)

Autor(es)/Ano	Inibidor de turbulência	Barreira	Barreira com furos	Dique	Eliminador de vórtice	Injeção de gases pelo fundo	Injeção de gases no tubo longo	Camara de redemoinho
Jin-gang, L., et al. (2007) ³⁸	✓	✓	-	✓	-	-	-	-
Qiang, Y., et al. (2009) ⁴¹	-	-	✓	-	-	-	-	✓
Qiang, Y., et al (2010) ¹⁴	-	✓	-	✓	-	-	-	✓
Chattopadhyay, K., et al (2011) ³⁶	✓	-	-	-	-	-	✓	-
Zhang, M. J., et al. (2011) ⁵⁶	✓	-	-	-	-	✓	-	-
Seshadri, V., et al. (2012) ⁶⁰	✓	-	-	-	-	✓	-	-

Os trabalhos de modelagem física de remoção de inclusões, normalmente, utilizam inibidores de turbulência. Porém, são poucos que comparam a presença e a ausência deste no distribuidor^{38,55}. Rogler, J. P., et al.⁵⁵ encontraram aumento de 19,8% na remoção de inclusões quando se utiliza o inibidor de turbulência comparado com o distribuidor sem modificadores de escoamento. Jin-gang, L., et al.³⁸ encontraram melhoria na remoção de inclusões de 11,7% com o mesmo estudo. Durante a abertura da panela, Chattopadhyay, K., et al.⁶⁶ concluíram que a presença do inibidor também diminui a quantidade de inclusões passantes (melhor eficiência de remoção) e melhora a homogeneidade entre os veios quanto à quantidade de inclusões passantes.

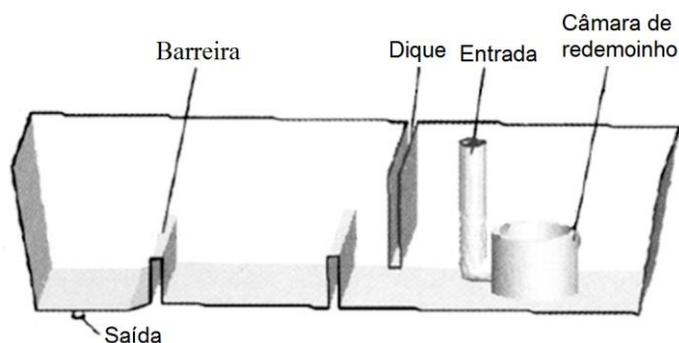
O estudo em modelos físicos do distribuidor com o uso de barreiras associadas a diques têm se mostrado favorável a remoção de inclusões e é bastante frequente entre os autores listados nas Tabelas 3, 4 e 5.^{14,38-39,43,59,81-}

⁸² Estudos como distância entre barreiras, altura de barreiras e diques podem ser encontrados nesses trabalhos.

Jin-gang, L., et al.³⁸, ao modificarem o escoamento do distribuidor utilizando uma combinação de barreiras e diques, obtiveram 1,3% de inclusões passantes pelo veio comparado a 6% na configuração sem modificadores de escoamento. Esse comportamento é atribuído, em parte, a uma diminuição dos volumes de curto-circuito e morto. Ray, S. K., et al.⁸⁰ também estudaram o uso desses artifícios e concluíram que a utilização das barreiras e diques também melhoram os resultados de inclusões passantes pelo veio durante o período transiente do distribuidor.

Outro modificador de escoamento usado, e não citado anteriormente, é a câmara de redemoinho, apresentada na Figura 6. Diversos trabalhos de modelagem matemática e/ou física^{14,41,75-85} são encontrados na literatura empregando este modificador de escoamento. Esse artifício do distribuidor gera um movimento circulatório no aço e pode fazer com que este perca energia cinética aliviando e/ou restringindo a turbulência na zona de impacto. Qiang, Y., et al.^{14,41}, mediante a realização do ensaio de remoção de inclusões em modelo físico, estudaram a influência deste artifício no escoamento do aço no distribuidor e suas consequências na passagem de inclusões para o veio. Nestes trabalhos foram encontrados benefícios sobre o escoamento do distribuidor que favorecem a flotação de inclusões quando se utiliza a câmara de redemoinho. Os autores atribuíram esses benefícios aos fenômenos de colisão e aglomeração gerados pelo escoamento turbilhonado.

Figura 6. Representação ilustrativa do posicionamento de uma câmara de redemoinho no distribuidor.



Fonte Adaptado de Qiang Y., et al. (2010)¹⁴.

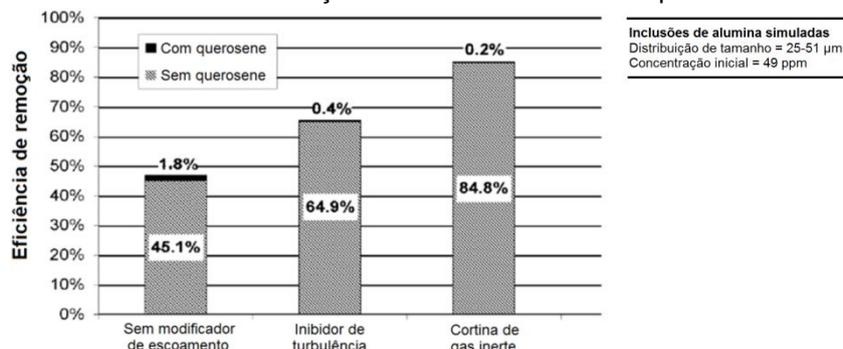
Vórtices podem se formar na região do veio e arrastar escória e/ou bolhas de ar para o molde e, conseqüentemente, prejudicarem a qualidade do processo e a do aço lingotado. McLean, A. (1996)¹⁷ complementa que a presença de vórtice sobre o veio favorece a passagem do aço presente na parte superior do distribuidor para o veio. Essa parcela de aço no distribuidor apresenta maior quantidade de inclusões. Com isso, patentes e estudos científicos com inibidores de vórtices de diferentes formatos vêm sendo apresentados^{17,54,55}. Rogler, J. P., et al. (2005)⁵⁵ estudaram em modelo de água do distribuidor um inibidor de vórtice fixado acima do veio e como resultado foi obtido a ausência de formação de vórtices prejudiciais sobre o veio em todos os ensaios realizados.

A utilização de gás inerte no distribuidor com o objetivo de capturar inclusões é uma das práticas mais recentes de produção para aços limpos^{43,54,79,85-87}. Normalmente é empregada associada aos modificadores de escoamento já conhecidos como barreiras e inibidores de turbulência. Entre as aplicações mais comuns dos gases estão a injeção pelo fundo do distribuidor e a injeção no tubo longo (Figura 5)^{40,42,55,60}.

Os estudos^{12,14,54,88} relatam que devido a não molhabilidade das inclusões no aço a remoção das inclusões é favorecida com a captura das mesmas pelas bolhas de gás e em sequência a ascensão em direção à escória. Essa abordagem no distribuidor é necessária para inclusões muito pequenas que não conseguem dentro do tempo hábil flotar e serem capturadas pela escória. Wang, F., et al. (1996)⁸⁶, além de afirmarem que as bolhas capturam as inclusões e favorecem a remoção de inclusões no distribuidor, defendem que as bolhas podem absorver elementos dissolvidos no aço como oxigênio, nitrogênio e hidrogênio.

Rogler, J. P., et al. (2005)⁵⁵ obtiveram resultados 19,9 e 39,7% melhores na eficiência de remoção ao comparar o distribuidor sem artifícios com a aplicação do inibidor de impacto e a cortina de gás no fundo do distribuidor, respectivamente (Figura 7). Os autores também estudaram o aumento da vazão de gás e concluíram que existe uma vazão limite benéfica à eficiência de remoção. A limitação relatada foi atribuída à turbulência causada pelo gás na superfície do banho. Desse modo, pode-se formar macroinclusões oriundas da escória e que podem ser direcionadas para os veios. Esta conclusão também foi apresentada por Ramos-Banderas, A., et al. (2003)⁷⁹.

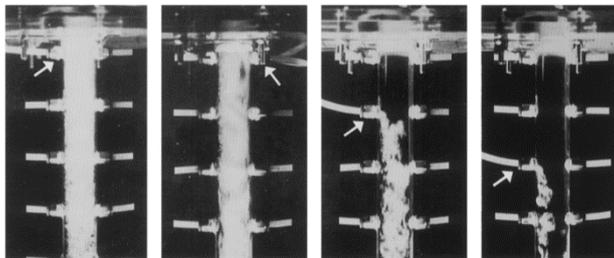
Figura 7. Resultados de remoção de inclusões para diferentes configurações internas de distribuidor e simulação ou não da escória com querosene.



Fonte: Adaptado de Rogler, J. P., et al. (2005)⁵⁵.

Cho, J.; Lee, H.⁵⁷ ao injetarem gases no tubo longo, mostraram que a eficiência de remoção de inclusões não depende majoritariamente da vazão de gás injetada e sim da homogeneidade das bolhas no fluxo de água do tubo longo. Além disso, os autores atingiram maior homogeneidade de bolhas no fluxo para o ponto de injeção mais próximo da válvula gaveta (Figura 8). Wang L., et al. (1996)⁸⁶ realizaram um estudo mais detalhado quanto à distribuição de bolhas no tubo longo. Na busca da melhor eficiência de remoção de inclusões, os autores usaram como variáveis de estudo a abertura da válvula gaveta, vazão de gás injetado e posição de injeção. Aconselha-se, aos interessados no aprofundamento do assunto, a leitura dos respectivos autores citados^{57,86}.

Figura 8. Distribuição de bolhas de gás no tubo longo para diferentes pontos de injeção (flechas brancas indicam as posições de injeção).



Fonte: Cho, J.; Lee, H. (2001)⁵⁷.

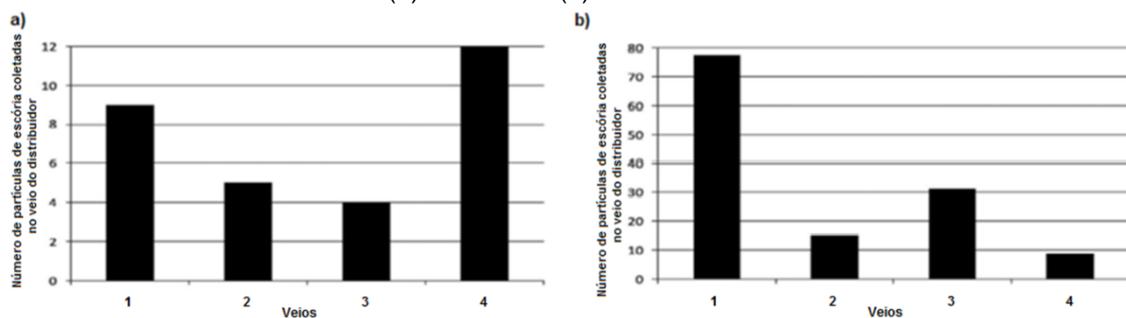
Outros autores simulam a presença da camada de escória nos ensaios de remoção de inclusões, como pode ser visto na Tabela 4. Rogler, J. P., et al. (2005)⁵⁵, ao utilizarem uma camada de querosene sobre a água em um distribuidor sem artifícios, obtiveram um aumento de até 1,8% na remoção de inclusões (Figura 7). No trabalho, isto foi atribuído ao impedimento de que a formação de vórtices próximos à superfície formem inclusões reentrantes no banho. Desta forma, a camada de querosene atua no sentido de absorver e diminuir esse efeito sobre as inclusões absorvidas pela escória.

Rogler, J. P., et al. (2005)⁵⁵ consideraram em sua pesquisa a concentração de inclusões óxidas de alumínio presentes no aço líquido, em função do oxigênio total, para simulá-las na modelagem física de remoção de inclusões. Essa abordagem é interessante, visto que Qiang, Y., et al. (2010)¹⁴ mostraram que o efeito da concentração de inclusões está diretamente ligado ao porcentual de inclusões removidas do aço. Essa conclusão foi atribuída ao fato de haver maior probabilidade de colisão entre as partículas. Dessa maneira,

são formadas inclusões maiores que são mais fáceis de flotar. Zhang, L., et al. (2000)⁴³, Cho, J.; Lee, H. (2001)⁵⁷ e Kim, H. (2003)⁵⁸ também estudaram esse efeito em seus trabalhos.

Chattopadhyay, K., et al. (2011)^{36,66-67,89} têm apresentado trabalhos que visam a simulação da emulsificação da escória durante o período transiente do distribuidor com o intuito de quantificá-la por meio da contagem das inclusões passantes pelo veio. Nos trabalhos citados, os autores estudaram a influência de diferentes parâmetros como a presença de inibidor, profundidade de tubo longo e outros. Entre as conclusões presentes, a inclinação do tubo longo no distribuidor se mostra fortemente influente na desqualificação da homogeneidade dos veios e no aumento da densidade inclusionária do aço lingotado durante o período estudado (Figura 9). Nota-se que a escala dos gráficos (a) e (b) são diferentes. Enquanto que a escala do gráfico (a) apresenta 12 partículas de escória passantes pelo veio, o gráfico (b) mostra que o desalinhamento do tubo longo eleva a escala em até 80 partículas de escória passantes pelo veio.

Figura 9. Número de partículas de escória coletadas na saída do distribuidor com o tubo longo (a) alinhado e (b) desalinhado.



Fonte: Adaptado de Chattopadhyay, K., et al. (2011)³⁶.

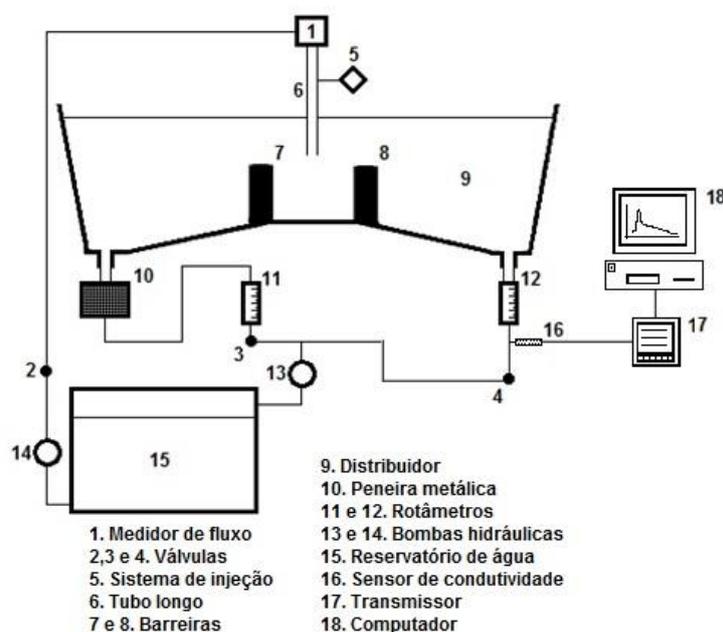
4 METODOLOGIA

Os materiais e métodos deste trabalho são divididos em: modelo físico isotérmico do distribuidor, ensaio de linhas de fluxo, ensaio de distribuição de tempos de residência e ensaio de remoção de inclusões.

4.1 MODELO FÍSICO ISOTÉRMICO DO DISTRIBUIDOR

O modelo físico isotérmico do distribuidor de lingotamento contínuo de tarugos utilizado neste trabalho pertence ao Laboratório de Siderurgia do Centro de Tecnologia da UFRGS situado no Campus do Vale e é similar a um distribuidor industrial instalado em uma usina siderúrgica. O modelo é construído em acrílico, em escala 1:1, e as medidas são apresentadas no apêndice A. Este modelo utiliza água à temperatura ambiente como fluido de simulação do aço líquido e segue os critérios de similaridade de Reynolds e Froude, assim como todos os autores apresentados na Tabela 3 que utilizam modelos em escala 1:1. O modelo também apresenta dois veios, tubo longo, barreiras e corresponde a um distribuidor de capacidade igual a 4 toneladas. A Figura 10 mostra uma representação esquemática do modelo físico.

Figura 10. Representação esquemática do modelo físico de distribuidor de lingotamento contínuo.



Como por ser visualizada na Figura 9, a entrada de fluxo de água do modelo físico é dotada de um medidor de vazão do tipo magnético [1] e nas saídas de fluxo de água de cada veio estão posicionados os rotâmetros [11 e 12]. Esses acessórios são responsáveis por controlar o regime permanente correspondente à velocidade de lingotamento que deseja simular no modelo. A água utilizada nos ensaios é oriunda de um reservatório [15]. Nesse sistema há tubulações dotadas de válvulas [2, 3 e 4] e bombas hidráulicas [13 e 14] que enviam e retiram a água do distribuidor [9]. O sistema de injeção [5] é posicionado na entrada do distribuidor para utilização nos ensaios de linhas de fluxo, distribuição de tempos de residência e remoção de inclusões. Por motivo de simetria, o sistema de separação de partículas via peneira metálica [10] é acoplado em somente um dos veios. A mesma consideração é realizada para o sistema de condutividade, composto por um sensor de condutividade [16], um transmissor [17] e um computador [18] que armazena os dados de condutividade. A malha adotada para a peneira é de aço inox e apresenta classificação de 400 mesh com abertura de 37 μm . O modelo também é dotado de um tubo longo [6] e duas barreiras [7 e 8].

No apêndice B são ilustrados os seguintes equipamentos utilizados nos ensaios de modelagem física: sistema de injeção, sistema de leitura de condutividade e o sistema de captura de partículas via peneira metálica.

4.1.1 Configurações de distribuidor estudadas neste trabalho

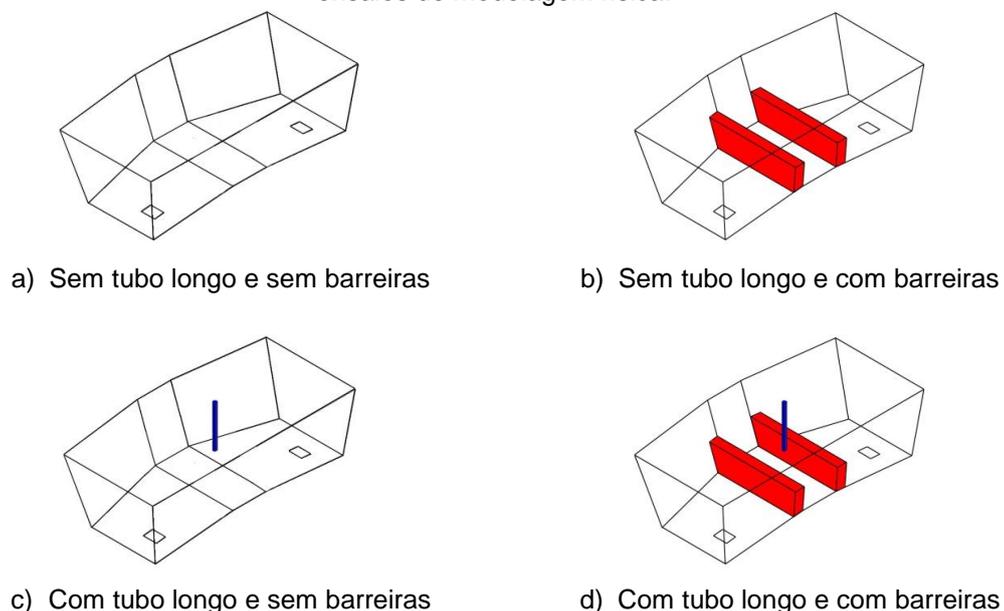
Para este trabalho são estudadas quatro configurações de distribuidor no modelo físico. São elas: sem tubo longo e sem barreiras, sem tubo longo e com barreiras, com tubo longo e sem barreiras e com tubo longo e com barreiras. As configurações podem ser vistas na Figura 11. O motivo pela utilização das diferentes configurações está de acordo com o objetivo geral do trabalho, que visa estudar o comportamento da remoção de inclusões em diferentes condições de escoamento. Logo, foram escolhidos parâmetros que modificam o escoamento positivamente e negativamente quanto à remoção de inclusões e que poderiam ser identificados no ensaio de remoção de inclusões na forma de mais ou menos inclusões passantes pelo veio. Lembrando que, as configurações escolhidas não tiveram o objetivo de otimizar o distribuidor e sim

somente obter os diferentes perfis de escoamento para estudo sob o ponto de vista da remoção de inclusões.

A configuração com tubo longo e com barreiras também foi escolhida por já ter sido estudada neste modelo físico do Laboratório de Siderurgia da UFRGS. Este estudo foi apresentado no trabalho de Daoud, I. L. A., et al.⁹⁰, onde os autores mostraram o efeito das barreiras por meio da aplicação da técnica de velocimetria por acompanhamento de partículas. Os autores mostraram que esse escoamento foi positivo sob o ponto de vista da remoção de inclusões. Logo, espera-se que esta configuração apresente no ensaio de remoção uma influência positiva sobre as inclusões passantes.

Outro motivo pela utilização das barreiras no distribuidor se deve ao fato deste ser um dos artifícios mais simples e mais utilizados pelos pesquisadores apresentados na Tabela 5. O posicionamento e as medidas das barreiras e do tubo longo no distribuidor são apresentados no apêndice A.

Figura 11. Ilustrações em três dimensões do distribuidor com as configurações estudadas nos ensaios de modelagem física.



A Tabela 6 exibe os parâmetros de ensaio e os intervalos de pesquisa. O parâmetro velocidade de lingotamento também foi escolhido com o objetivo de modificar o escoamento e também pelo fato de ser um parâmetro facilmente empregado no modelo físico. As velocidades de lingotamento estudadas correspondem à velocidade mínima, média e máxima utilizadas na usina em

que o distribuidor está instalado. Os ensaios serão realizados com a combinação destas variáveis e intervalos de pesquisa.

Tabela 6. Variáveis e intervalo de pesquisa estudados neste trabalho.

Variáveis de pesquisa	Intervalo de pesquisa		
	Mínimo	Médio	Máximo
Velocidade de lingotamento	1,8 m/min	2,2 m/min	2,6 m/min
Presença de tubo longo	Sem	---	Com
Presença de barreiras	Sem	---	Com

4.1.2 Critérios de similaridade do modelo físico

O cálculo dos números adimensionais de Reynolds e Froude que garantem a similaridade dinâmica do modelo são apresentados nas equações 8 e 9, respectivamente.

$$Re = \frac{uL\rho}{\mu} \quad (8)$$

$$Fr = \frac{u^2}{gL} \quad (9)$$

Onde:

u : velocidade característica do fluido (m/s);

L : comprimento característico (Diâmetro do jato de entrada = 0,028 m);

ρ : massa específica do fluido (Água = 1000 kg/m³);

μ : viscosidade dinâmica do fluido (Água = 0,001 kg/m.s)

g : aceleração da gravidade ($g = 9,81 \text{ m/s}^2$).

Para calcular o número de Reynolds deve-se conhecer a velocidade característica do fluido (u) que varia de acordo com a velocidade de lingotamento e é dada pela equação 8. A velocidade do jato de entrada no modelo é escolhida como a velocidade característica do fluido no modelo.

$$u = Q/\pi r_j^2 \quad (8)$$

Onde:

Q : vazão de entrada no modelo (1,8 m/min - 3,1 m³/h; 2,2 m/min - 3,8 m³/h; 2,6 m/min - 4,5 m³/h);

r_j : raio do jato de entrada no modelo (0,028 m).

Para as velocidades de lingotamento empregadas no estudo, as velocidades características do modelo físico são: 0,69 m/s, 0,84 m/s, 0,99 m/s, respectivamente para 1,8 m/min, 2,2 m/min e 2,6 m/min.

Os resultados dos números adimensionais de Reynolds e Froude para as três velocidades de lingotamento são apresentados na Tabela 7. Como Reynolds é uma relação entre as forças de inércia e as forças viscosas, os valores elevados encontrados indicam que as forças de inércia são muito superiores às forças viscosas na região do jato de entrada. Enquanto que Froude é a relação entre as forças de inércia e as forças gravitacionais. Assim, os valores encontrados para o número de Froude indicam uma superioridade das forças de inércia sobre as forças gravitacionais. Lembrando que as forças de inércia podem apresentar menor relevância fora da região do jato de entrada, onde as velocidades de escoamento podem ser menores.

Tabela 7. Números adimensionais de Reynolds e Froude para as três velocidades de lingotamento empregadas neste estudo.

Número Adimensional	Velocidade de lingotamento		
	1,8 m/min	2,2 m/min	2,6 m/min
Número de Reynolds (Re)	39157	47999	56841
Número de Froude (Fr)	7,12	10,70	15,00

O modelo apresentado é considerado isotérmico, ou seja, não considera a similaridade térmica dada pelo adimensional de Gr/Re^2 no qual é calculado pela equação 9. Esse adimensional apresenta a relevância da convecção natural no distribuidor por meio da relação entre as forças de empuxo e as forças de inércia, conforme apresentado por Joo, S.; Guthrie, R. I. L. (1993)³⁹.

$$\frac{Gr}{Re^2} = \frac{gL\beta(T_0 - T_\infty)}{v^2} \quad (9)$$

Onde:

β : coeficiente de expansão volumétrica da água ($\beta = 2,93 \cdot 10^{-4} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$);

Gr : número adimensional de Grashof;

$T_0 - T_\infty$: diferença de temperatura entre a água no jato de entrada e no seio do escoamento ($^\circ\text{C}$).

O valor para a diferença de temperatura entre a água no jato de entrada e no modelo ($T_0 - T_\infty$) pode ser calculado a partir da equação 10 apresentada por Lowry, M. I.; Sahai, Y. (1991)⁹¹.

$$(T_0 - T_\infty)_{modelo} = 1,33 \times (T_0 - T_\infty)_{protótipo} \quad (10)$$

Ao considerar a típica diferença de temperatura entre o aço na panela e no distribuidor seja igual a 30 $^\circ\text{C}$, conforme apresentado por Wollmann A. M. (1999)⁹². O valor de ($T_0 - T_\infty$) para o modelo deve ser igual a 39,9 $^\circ\text{C}$. Os resultados do adimensional de Gr/Re^2 para as três velocidades de lingotamento são apresentadas na Tabela 8.

Tabela 8. Adimensional Gr/Re^2 para as três velocidades de lingotamento empregadas neste estudo.

Número adimensional	Velocidade de lingotamento		
	1,8 m/min	2,2 m/min	2,6 m/min
Gr/Re^2	0,0016	0,0011	0,0008

Os valores baixos encontrados para o adimensional Gr/Re^2 indicam que o número de Reynolds apresenta superioridade ao número de Grashof. Como Reynolds é a relação entre as forças de inércia e as forças viscosas, para esse caso há uma predominância das forças de inércia. Conseqüentemente, para os valores encontrados de adimensional Gr/Re^2 , as forças de inércia apresentam predominância sobre as forças de empuxo tornando-as passíveis de desconsideração e possibilitando o uso do modelo isotérmico. No entanto, a velocidade do escoamento no distribuidor pode chegar a valores mais baixos podendo tornar as forças de empuxo maiores. Desse modo, futuramente deve-se estudar o modelo físico não isotérmico também. Essas conclusões também foram encontradas por Wollmann, A. M. (1999)⁹².

4.2 ENSAIO DE LINHAS DE FLUXO

A motivação do ensaio de linha de fluxo é estudar qualitativamente os escoamentos propostos para este trabalho, identificando as características do escoamento que são favoráveis e desfavoráveis (ex. curto-circuito) para a remoção de inclusões. Espera-se que este ensaio forneça suporte para o entendimento dos resultados do ensaio de remoção de inclusões.

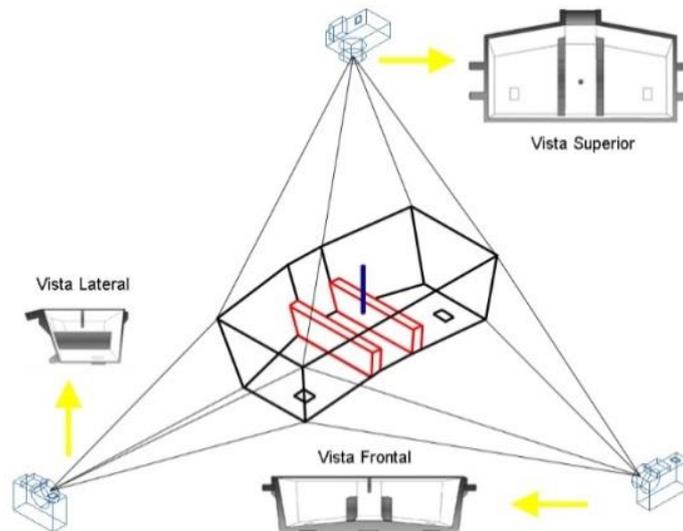
A metodologia empregada para o ensaio de linhas de fluxo é baseada no trabalho de Wollmann, A. M. (1999)⁹². Este ensaio é operado com o distribuidor em regime permanente e devido este ensaio ser preferencialmente qualitativo a velocidade de lingotamento utilizada é a intermediária (2,2 m/min). Para a visualização do escoamento é injetado um pulso de 3 segundos (aprox. 400 ml de volume) de uma solução de flutuação neutra de permanganato de potássio (KMnO₄). A injeção ocorre após o período de estabilização do escoamento (10 minutos) para que não haja interferências ao experimento.

O caminho em que o corante escoar no distribuidor é acompanhado por meio de câmeras filmadoras posicionadas nas três vistas do modelo conforme mostrado na Figura 12. As posições das câmeras permitem a visualização das vistas frontal, lateral e superior. Os ensaios são filmados e, posteriormente, as imagens são editadas com intervalos de tempos padronizados e/ou de acordo com o que se deseja enfatizar. A ordem de realização dos ensaios de linhas de fluxo é mostrada na Tabela 9.

Tabela 9. Ordem de realização dos ensaios de linhas de fluxo (velocidade de lingotamento de 2,2 m/min).

Tratamento	Tubo	Barreiras	Vista	Tratamento	Tubo	Barreiras	Vista
1	Não	Não	Frontal	7	Não	Sim	Lateral
2	Sim	Sim	Superior	8	Sim	Sim	Lateral
3	Sim	Sim	Frontal	9	Sim	Não	Lateral
4	Não	Não	Lateral	10	Não	Sim	Frontal
5	Sim	Não	Frontal	11	Não	Sim	Superior
6	Não	Não	Superior	12	Sim	Não	Superior

Figura 12. Posicionamento das câmeras para o ensaio de linhas de fluxo. As flechas amarelas indicam as vistas frontal, lateral e superior.



4.3 ENSAIO DE DISTRIBUIÇÃO DE TEMPOS DE RESIDÊNCIA

A motivação do ensaio de distribuição de tempos de residência é estudar quantitativamente os escoamentos propostos para este trabalho, determinando parâmetros, como tempo mínimo de residência, tempo médio de residência. O objetivo de ensaio também é fornecer suporte aos resultados encontrados no ensaio de remoção de inclusões.

O método empregado para o ensaio de distribuição de tempos de residência consiste na injeção de um traçador ácido (Ácido clorídrico em concentração de 6%) e leitura da condutividade na saída do modelo ao longo do tempo de ensaio e após a injeção do traçador. As condições de injeção são as mesmas descritas para o ensaio de linhas de fluxo (subseção 4.2). Devido ao erro experimental, os ensaios foram realizados em triplicata e de forma aleatória para todas variáveis de pesquisa e suas combinações (presença de barreiras, tubo longo e velocidade de lingotamento), conforme mostrado na Tabela 10. Uma análise é realizada sobre a repetitividade das curvas DTR com intuito de avaliar a qualidade dos ensaios e é apresentada no Apêndice C.

Tabela 10. Ordem de realização dos ensaios de distribuição de tempos de residência.

Tratamento	Velocidade (m/min)	Tubo	Barreiras	Tratamento	Velocidade (m/min)	Tubo	Barreira
1	2,6	NÃO	NÃO	19	1,8	SIM	SIM
2	1,8	NÃO	NÃO	20	2,6	NÃO	SIM
3	2,6	NÃO	NÃO	21	2,6	SIM	SIM
4	1,8	SIM	NÃO	22	2,2	SIM	SIM
5	2,6	SIM	NÃO	23	1,8	SIM	NÃO
6	2,2	SIM	NÃO	24	2,2	NÃO	NÃO
7	2,2	NÃO	NÃO	25	2,6	SIM	SIM
8	1,8	NÃO	NÃO	26	2,6	SIM	NÃO
9	2,2	SIM	NÃO	27	2,2	SIM	NÃO
10	2,6	NÃO	NÃO	28	2,2	SIM	SIM
11	1,8	SIM	SIM	29	2,2	NÃO	SIM
12	2,2	NÃO	SIM	30	1,8	SIM	SIM
13	2,6	NÃO	SIM	31	1,8	NÃO	SIM
14	2,2	SIM	SIM	32	2,6	SIM	SIM
15	1,8	NÃO	SIM	33	2,6	NÃO	SIM
16	2,6	SIM	SIM	34	1,8	NÃO	NÃO
17	2,2	NÃO	SIM	35	1,8	SIM	NÃO
18	1,8	NÃO	SIM	36	2,2	NÃO	NÃO

Como apresentado na subseção 4.1, o sensor de condutividade para a leitura da condutividade é posicionado em apenas um dos dois veios por motivo de simetria do distribuidor. O sensor de condutividade envia o sinal para um computador que processa e armazena os dados de condutividade a cada segundo. A duração de ensaio utilizada é de 30 minutos, tempo suficiente para a condutividade voltar ao valor inicial antes da injeção do traçador. Os dados capturados são tratados com o auxílio de uma planilha de “software” de computador que permite plotar as curvas DTRs e quantificar os resultados esperados para o ensaio, por exemplo, o tempo médio de residência ($\bar{\theta}$) calculado via equação 11, o tempo mínimo dado instantâneo em que o traçador atinge o veio do distribuidor determinado pela visualização da curva DTR e a variância adimensional (σ_{θ}^2) calculada via equação 12. Essas equações foram apresentadas por Sahai, Y.; Emi, T. (1996)²⁸.

$$\bar{\theta} = \frac{\sum_i C_i \theta_i}{\sum_i C_i} \quad (11)$$

$$\sigma_{\theta}^2 = \frac{\sum_i \theta_i^2 C_i}{\sum_i C_i} - \bar{\theta}^2 \quad (12)$$

Onde:

θ : Adimensional de tempo ($\theta = t/\bar{t}$);

\bar{t} : Tempo de residência teórico ($\bar{t} = V/Q$);

V : Volume do distribuidor (L);

Q : Vazão volumétrica no distribuidor (L/h);

C : Adimensional de concentração de traçador na saída ($C = c/(q/V)$);

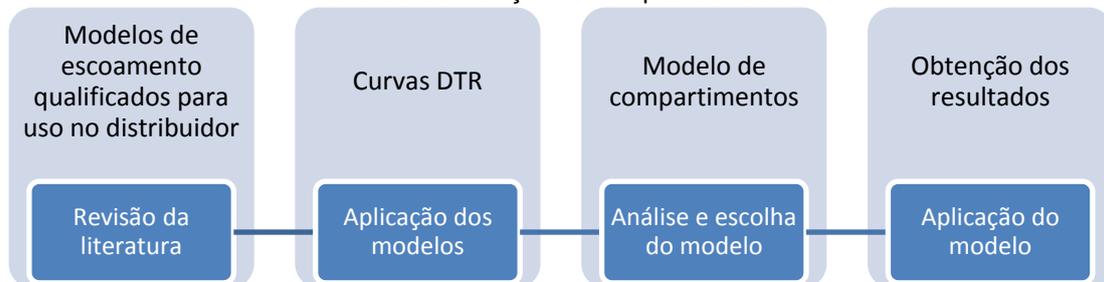
c : Concentração de traçador na saída (mol/L);

q : Volume de traçador injetado (L);

σ_{θ}^2 : Variância adimensional.

Para determinação do modelo de escoamento utilizado no ensaio de distribuição de tempos de residência é realizada uma metodologia conforme a Figura 13. Primeiramente é realizada uma revisão na literatura sobre modelos de escoamento que podem ser aplicados ao distribuidor, seguido da aplicação dos modelos encontrados nas curvas DTR deste trabalho. Por fim, os resultados dos modelos são analisados, o melhor modelo é escolhido e os resultados irão fornecer as informações para a análise quantitativa dos escoamentos deste trabalho.

Figura 13. Fluxograma da metodologia para escolha do modelo de escoamento a ser utilizado no ensaio de distribuição de tempos de residência.



A motivação para essa escolha de método surgiu pela apresentação do cálculo dos volumes pistonados e de mistura apresentada por Sahai, Y.; Emi, T. (1996)²⁸. Os autores mostraram que para os casos onde a curva DTR de um reator apresenta largo desvio da curva DTR gerada por um reator de mistura em série com um reator pistonado, deve-se utilizar o método de dispersão para calcular o adimensional de dispersão ao invés de utilizar o método de compartimentos. No entanto, o modelo de escoamento mais utilizado para aplicação em distribuidores é o modelo de compartimentos, cuja metodologia

de cálculo foi apresentada por François, M. B. G., et al. (2005)⁹³. Assim, se motivou estudar qual modelo de escoamento seria o mais adequado às configurações testadas neste trabalho.

Com base no que é apresentado no Apêndice D, o modelo de escoamento escolhido para avaliação das curvas DTR deste trabalho é o modelo de compartimentos. A Tabela 11 apresenta o método de cálculo empregado para a quantificação das frações de volumes do reator, conforme o método de cálculo apresentados por François, M. B. G., et al (2005)⁹³.

Tabela 11. Método de cálculo para as frações de volumes característicos do modelo de compartimentos.

Fração de volume Pistonado Disperso (V_{pd})	$V_{pd}(\%) = \frac{(\theta_{min} + \theta_{Cmáx})}{2} \times 100$
Fração de volume Morto (V_d)	$V_d(\%) = 100 - \left[\left(\sum_{\theta=0}^{\theta=2} C_i \Delta\theta_i \right) \cdot \left(\frac{\sum_{\theta=0}^{\theta=2} C_i \theta_i}{\sum_{\theta=0}^{\theta=2} C_i} \right) \right]$
Fração de volume de Curto-circuito (V_{cc})	$V_{cc}(\%) = \left(\sum_{\theta=0}^{\theta=t_{cc}} C_i \theta_i \right) \times 100$
Fração de volume de Mistura (V_m)	$V_m(\%) = 100 - V_p - V_{cc} - V_d$

Onde:

C_i : Adimensional de concentração de traçador no instante i ;

θ_{min} : Adimensional de tempo do instante em que o traçador aparece na saída do distribuidor;

$\theta_{Cmáx}$: Adimensional de tempo do instante em que a curva DTR atinge seu valor máximo de concentração;

t_{cc} : Instante de tempo em que é identificado o final do curto-circuito na curva DTR (h).

4.4 ENSAIO DE REMOÇÃO DE INCLUSÕES

O ensaio de remoção de inclusões é realizado com o distribuidor mantido em regime permanente e após a estabilização do escoamento (10 min) é realizada a injeção das partículas de simulação de inclusões de alumina na forma de pulso (3 segundos). A escolha da injeção em forma de pulso foi

realizada devido a simplicidade e por ser usado como método usual entre a maioria dos autores apresentados na Tabela 3.

Para formar uma mistura homogênea capaz de ser injetada no distribuidor é realizada a mistura de uma amostra de polietileno previamente homogeneizada e com massa igual a 30 g a uma solução de álcool etílico absoluto. O volume total da mistura é igual a 150 ml. A distribuição de diâmetro da amostra de polietileno será apresentada posteriormente. Comparando com a Tabela 3, a massa de partículas injetadas está coerente com o encontrado nos trabalhos dos autores que utilizam a injeção na forma de pulso.

De acordo com a massa de micropartículas de polietileno injetada no distribuidor (30 g) e o volume do mesmo (0,560 m³), a concentração de inclusões simulada no ensaio de remoção de inclusões é apresentada no cálculo a seguir:

$$\frac{30 \text{ g de PE}}{0,560 \text{ m}^3 \text{ de água}} \times \frac{1 \text{ m}^3 \text{ água}}{1000000 \text{ g}} =$$

$$5,36 \times 10^{-5} \text{ g de PE/g de água} \cong 53,6 \text{ mg/L ou } 53,6 \text{ ppm}$$

Como mostrado no cálculo, neste ensaio é simulada uma concentração de 53,6 ppm de inclusões de alumina. Lembrando que não foi realizado um estudo de concentração de inclusões no aço e sabe-se que diferentes concentrações de inclusões simuladas no modelo podem modificar o resultado final da remoção de inclusões, conforme apresentado por Qiang, Y., et al. (2010)¹⁴.

O material utilizado para simular as inclusões de alumina foi escolhido com base no trabalho de Cho, J.; Lee, H. (2001)⁵⁷, no qual, o polietileno demonstrou ser o material mais adequado. Os resultados dos autores que levaram a essa escolha são mostrados na subseção 3.3

Por meio da Equação 2 apresentada por Sahai, Y.; Emi, T.²⁸, os resultados para a distribuição de diâmetro de partícula das inclusões de alumina ($\rho_{\text{Alumina}} = 3900 \text{ kg/m}^3$) correspondentes na usina ao utilizar micropartículas de polietileno ($\rho_{\text{Polietileno}} = 960 \text{ kg/m}^3$) é mostrada na Tabela 12, onde, é considerado o fator de escala igual a 1 e a massa específica do aço igual a 7014 kg/m³, segundo Mazumdar, D.; Guthrie, I. L. R. (1999)²⁷.

Tabela 12. Distribuição de diâmetro de inclusão na usina e de partículas de simulação de inclusões no modelo.

Classificação de inclusão por tamanho	Microinclusão			Macroinclusão		
Diâmetro de inclusão na usina (µm)	<10	<20	<50	<75	<100	<140
Diâmetro de partícula no modelo (µm)	<35,5	<71	<177,5	<266	<355	<500
Composição mássica cumulativa (%)	1%	3,5%	29,6%	57,7%	75,2%	98%

A Tabela 12 mostra a distribuição de partículas utilizada para o ensaio de remoção de inclusões, essa distribuição de diâmetro equivale aproximadamente às inclusões encontradas no distribuidor (protótipo). As partículas são separadas em micro e macroinclusões, conforme a classificação apresentada por Chiaverini, V. (1996)⁵². Essa classificação será utilizada posteriormente para analisar a remoção de inclusões frente a variação de tamanho de inclusões e escoamento. A metodologia para esse estudo é apresentada a seguir.

O tempo de ensaio de dois tempos de residência teóricos é determinado por meio dos ensaios de distribuição de tempo de residência para todas as configurações empregadas no modelo do distribuidor, conforme apresentado no Apêndice E. A metodologia das curvas de distribuição de tempo de residência utilizadas no Apêndice E foi apresentada na subseção 4.3.

O método de quantificação de partículas escolhido é via peneira metálica. Assim como a maioria dos autores encontrados na Tabela 3, esse método foi escolhido também pela simplicidade e fácil adaptação no modelo, comparado ao método de quantificação de partículas via sensor apresentado na subseção 3.2.2. Por razões de simetria, é acoplada uma peneira metálica em somente um dos veios com o objetivo de capturar as micropartículas de polietileno no ensaio de remoção de inclusões (Figura 1). A peneira permite a passagem de partículas menores do que 37 µm, conseqüentemente, cerca de 1% da amostra utilizada no ensaio de remoção de inclusões não é capturada pela peneira.

A quantificação das inclusões via peneira é realizada capturando as partículas nos veios de saída do modelo físico para posterior secagem e pesagem. O cálculo do percentual das inclusões passantes (η_r) é dado pela razão entre a massa coletada no filtro (m_c) e a massa injetada no ensaio (m_i), conforme Equação 13.

$$\eta_r(\%) = \left(\frac{m_c}{m_i} \right) \times 100 \quad (13)$$

Todas as condições de ensaios são realizadas em duplicata e de forma aleatória de acordo com o mostrado na Tabela 13.

Tabela 13. Ordem de realização dos ensaios de remoção de inclusões.

Tratamento	Velocidade (m/min)	Tubo	Barreiras	Tratamento	Velocidade (m/min)	Tubo	Barreiras
1	1,8	SIM	NÃO	13	2,6	NÃO	SIM
2	2,6	SIM	NÃO	14	2,6	NÃO	NÃO
3	2,6	NÃO	NÃO	15	2,6	SIM	NÃO
4	2,2	NÃO	NÃO	16	2,2	SIM	SIM
5	1,8	NÃO	NÃO	17	1,8	SIM	SIM
6	2,2	SIM	SIM	18	2,6	SIM	SIM
7	1,8	NÃO	SIM	19	2,6	NÃO	SIM
8	2,2	SIM	NÃO	20	2,2	NÃO	SIM
9	2,6	SIM	SIM	21	1,8	NÃO	SIM
10	2,2	NÃO	SIM	22	1,8	SIM	SIM
11	2,2	NÃO	NÃO	23	2,2	SIM	NÃO
12	1,8	NÃO	NÃO	24	1,8	SIM	NÃO

Para o estudo do comportamento da remoção de inclusões para diferentes tamanhos, as partículas passantes já secas e pesadas são passadas por uma análise granulométrica por difração a laser com o objetivo de acompanhar a evolução de tamanho de partícula durante a passagem das inclusões no modelo do distribuidor. Foi utilizado o equipamento, modelo Cilas 1090, pertencente ao Laboratório de Processamento Mineral do Centro de Tecnologia da UFRGS situado no Campus do Vale. O equipamento de análise granulométrica expõe as inclusões sob a ação da agitação por infravermelho antes de analisar o tamanho das inclusões.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados e discussão são divididos em: qualificação do escoamento, curvas de distribuição de tempo de residência, quantificação de remoção de inclusões e escolha da melhor configuração testada.

5.1 ENSAIO DE LINHAS DE FLUXO

Os resultados do ensaio de linha de fluxo são apresentados a seguir nas vistas frontal, lateral e superior para as configurações possíveis entre a presença ou não das barreiras e tubo longo, conforme mostrado anteriormente na Tabela 9. Nos ensaios apresentados desde a Figura 14 até a Figura 25, o tempo é mostrado na forma de escala de cor cinza. Quanto mais claro o tom de cinza, maior é o tempo de ensaio após a injeção do corante. As flechas amarelas indicam os fluxos preferenciais e os círculos pontilhados em vermelho indicam as zonas mortas.

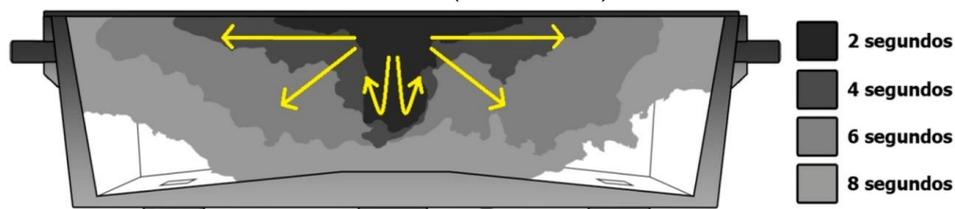
5.1.1 Distribuidor sem tubo longo e sem barreiras

Para a configuração sem tubo longo e sem barreiras, visualizada pela vista frontal na Figura 14, a penetração do jato é pequena devida à diminuição das forças de inércia gerada pelo choque do jato com a interface ar/água e consequente quebra dos vetores de velocidade do escoamento. Este comportamento faz com que o corante não atinja o fundo do distribuidor nos primeiros segundos de ensaio. Além disso, bolhas de ar geradas pelo choque do jato de entrada com a interface ar/água são arrastadas para o seio do banho fazendo com que essa configuração apresente um escoamento preferencialmente ascendente. O arraste das bolhas será discutido com mais detalhes nos resultados do ensaio de remoção de inclusões.

Mesmo apresentando um escoamento preferencialmente ascendente, na Figura 14 pode ser visto que o escoamento também apresenta linhas de fluxo descendentes, que são visualizadas na vista lateral (Figura 15). É possível perceber que essas linhas de fluxo descendentes e direcionadas aos veios caracterizam um curto-circuito. Lembrando que o curto-circuito pode ser

definido por linhas de fluxo que se direcionam para as saídas do distribuidor sem percorrer o escoamento ideal do reator⁹². O escoamento ideal é caracterizado por um fluxo que entra no distribuidor, ascende em direção à superfície, atinge o maior contato possível com a escória para que aumente as possibilidades de remoção de inclusões e, só então, se direcione para os veios. Salienta-se que a grandeza do curto-circuito para as quatro configurações de distribuidor será quantificada no ensaio de distribuição de tempos de residência.

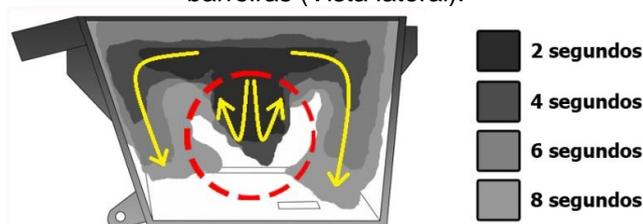
Figura 14. Resultado do ensaio de linhas de fluxo para a configuração sem tubo longo e sem barreiras (Vista frontal).



Observação: Flechas amarelas indicam as linhas de fluxo preferenciais.

Na Figura 15 (vista lateral) é representada, em círculo pontilhado vermelho, a zona morta gerada pelo escoamento no interior do distribuidor. Essa região no distribuidor reduz o tempo de residência do aço no distribuidor e desfavorece a remoção de inclusões devido o menor tempo para flotação.

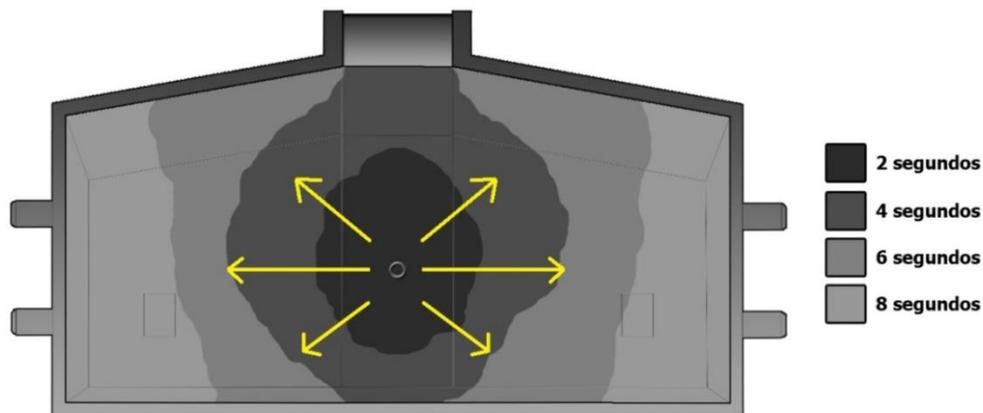
Figura 15. Resultado do ensaio de linhas de fluxo para a configuração sem tubo longo e sem barreiras (Vista lateral).



Observação: Flechas amarelas indicam as linhas de fluxo preferenciais e o círculo pontilhado vermelho indica a zona morta.

Quanto à distribuição do escoamento visualizada na vista superior (Figura 16) que se dá preferencialmente na superfície do distribuidor, pode-se afirmar que há uma boa distribuição do escoamento. Essa boa dispersão aumenta a área de contato entre as inclusões e a escória e, conseqüentemente, favorece a remoção de inclusões.

Figura 16. Resultado do ensaio de linhas de fluxo para a configuração sem tubo longo e sem barreiras (Vista superior).

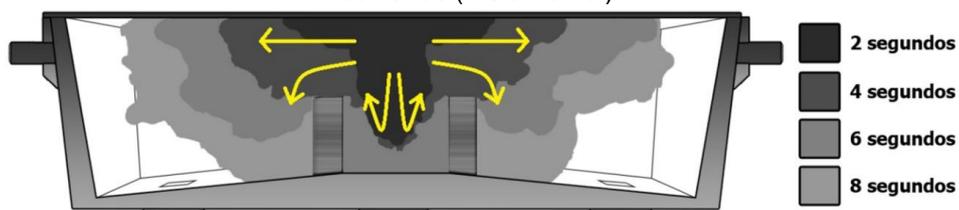


Observação: Flechas amarelas indicam as linhas de fluxo preferenciais.

5.1.2 Distribuidor sem tubo longo e com barreiras

Quando são empregadas as barreiras e não é utilizado o tubo longo no modelo (Figura 17, vista frontal), o escoamento também ocorre de forma preferencialmente ascendente como na configuração anterior. No entanto, há uma menor velocidade no fluxo ascendente gerada pela quebra dos vetores de velocidade no choque do jato com a interface ar/água e com a interface das barreiras. Assim, as linhas de fluxo ascendentes perdem força com relação às descendentes e, diferentemente da situação anterior, fazem com que o fluxo descendente se direcione aos veios antes de o escoamento ascendente atingir toda a superfície do distribuidor. Isso pode ser visto comparando a Figura 17 com a Figura 14 da configuração anterior, onde o escoamento atinge toda a superfície do distribuidor em 8 segundos, enquanto que nesta configuração isso não se ocorre. Esse escoamento acarretará em um aumento no percentual de inclusões passantes que será confirmado nos resultados do ensaio de remoção.

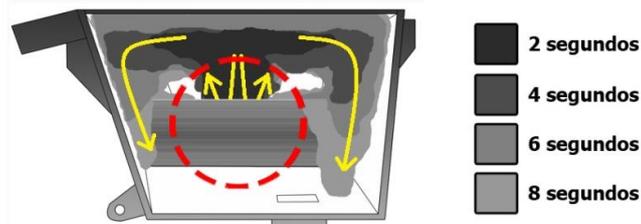
Figura 17. Resultado do ensaio de linhas de fluxo para a configuração sem tubo longo e com barreiras (Vista frontal).



Observação: Flechas amarelas indicam as linhas de fluxo preferenciais.

O curto-circuito dessa configuração pode ser visto na Figura 18 (vista lateral) e são as linhas de fluxo descendente representadas nesta vista lateral. Também é visualizada a permanência do volume morto (círculo pontilhado vermelho) no mesmo local da configuração anterior, mesmo após a utilização de barreiras.

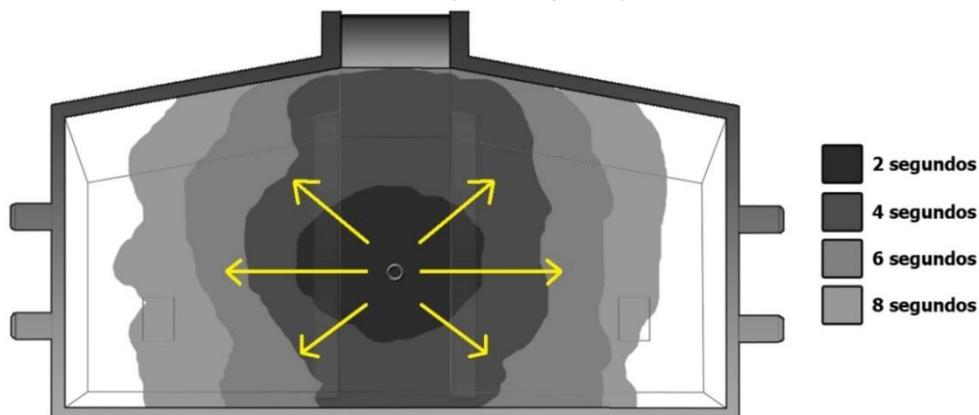
Figura 18. Resultado do ensaio de linhas de fluxo para a configuração sem tubo longo e com barreiras (Vista lateral).



Observação: Flechas amarelas indicam as linhas de fluxo preferenciais e o círculo pontilhado vermelho indica a zona morta.

Na Figura 19 (vista superior) é confirmada a diminuição de força das linhas de fluxo ascendente comparado à configuração sem tubo longo e sem barreiras. Visto que na mesma escala de tempo a configuração sem barreiras atinge toda a superfície da escória e com barreiras isso não ocorre. Desfavorecendo o maior contato superficial entra as inclusões e a escória.

Figura 19. Resultado do ensaio de linhas de fluxo para a configuração sem tubo longo e com barreiras (Vista superior).



Observação: Flechas amarelas indicam as linhas de fluxo preferenciais.

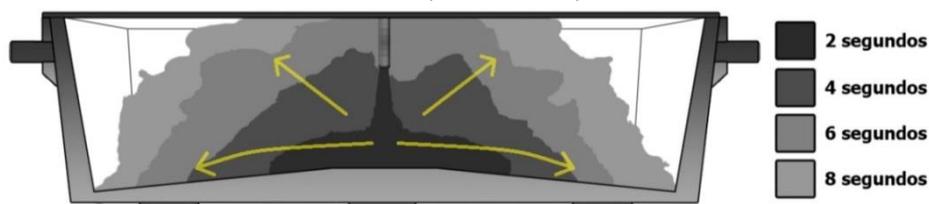
Essa configuração é um simples exemplo de que apesar de haver a presença das barreiras, o curto-circuito permanece no distribuidor. Isso mostra que, quando as barreiras não estão posicionadas no local mais adequado ou não apresentam o correto formato para o distribuidor, elas podem não cumprir

a função de eliminar o curto-circuito, como mostrado nos resultados de Jingang, L., et al. (2007)³⁸. Salienta-se que este trabalho não tem como objetivo otimizar o distribuidor.

5.1.3 Distribuidor com tubo longo e sem barreiras

Quando é empregado o tubo longo e não utilizadas as barreiras (Figura 20, vista frontal), o jato de entrada atinge o fundo do distribuidor mais facilmente comparado às duas configurações anteriores, este fato justifica-se devido à ausência da diminuição das forças de inércia gerada pelo choque do jato com a interface ar/água e/ou com a interface das barreiras. Com o aumento da velocidade na parte inferior do distribuidor, as linhas de fluxo do escoamento se tornam preferencialmente descendentes e direcionadas aos veios. Essa característica mostra a existência de um curto-circuito maior que as configurações sem o tubo longo. Comparando com os tempos, em 4 segundos o escoamento atingiu os veios, enquanto que nas duas últimas configurações (Figura 14 e Figura 17) isso não ainda não ocorreu. Na indústria, o aço solidificado no molde com essas condições de escoamento poderia apresentar uma maior concentração e diâmetro de inclusões.

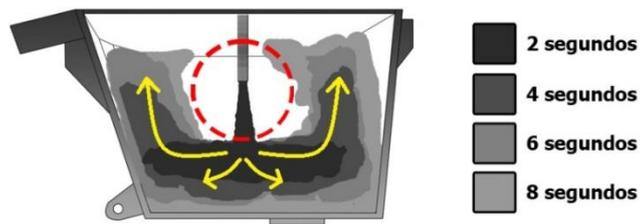
Figura 20. Resultado do ensaio de linhas de fluxo para a configuração com tubo longo e sem barreiras (Vista frontal).



Observação: Flechas amarelas indicam as linhas de fluxo preferenciais.

A vista lateral para a configuração com tubo longo e sem barreiras (Figura 21) mostra a zona morta localizada no interior do escoamento (círculo pontilhado vermelho), as linhas de fluxo descendentes (curto-circuito) e as linhas de fluxo ascendentes responsáveis pela dispersão do escoamento na parte superior do distribuidor.

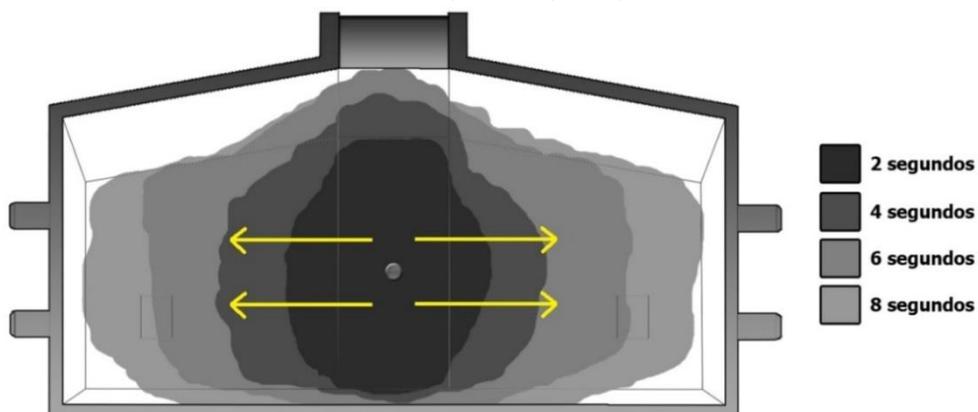
Figura 21. Resultado do ensaio de linhas de fluxo para a configuração com tubo longo e sem barreiras (Vista lateral).



Observação: Flechas amarelas indicam as linhas de fluxo preferenciais e o círculo pontilhado vermelho indica a zona morta.

A vista superior observada na Figura 22 mostra que o escoamento possui uma menor propagação na superfície do distribuidor e isso ocorre com preferência nas regiões centrais das paredes frontal e traseira. Na prática, isto deveria provocar uma menor exposição das inclusões à escória e, conseqüentemente, um menor grau de limpeza no aço solidificado visto que as inclusões possuiriam menor probabilidade de serem absorvidas pela escória.

Figura 22. Resultado do ensaio de linhas de fluxo para a configuração com tubo longo e sem barreiras (Vista superior).

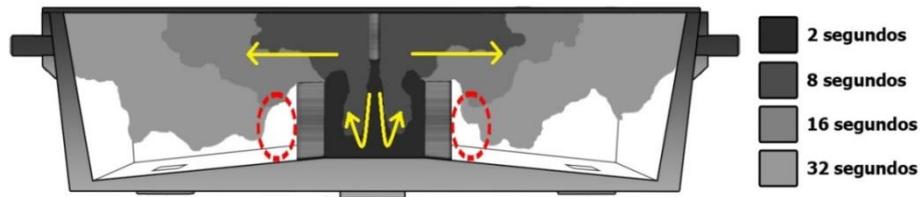


Observação: Flechas amarelas indicam as linhas de fluxo preferenciais.

5.1.4 Distribuidor com tubo longo e com barreiras

Comparado à configuração anterior, a presença do tubo longo associado às barreiras (Figura 23, vista frontal) faz com que o escoamento se torne mais próximo do ideal, eliminando o curto-circuito que havia e aumentando o contato com a superfície do distribuidor. O escoamento dessa configuração é preferencialmente ascendente e só há o direcionamento para os veios após um bom contato com a superfície.

Figura 23. Resultado do ensaio de linhas de fluxo para a configuração com tubo longo e com barreiras (Vista frontal).

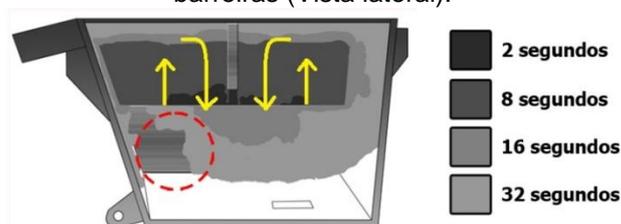


Observação: Flechas amarelas indicam as linhas de fluxo preferenciais e os círculos pontilhados vermelhos indicam as zonas mortas.

Diferentemente da configuração com barreiras e sem tubo longo, a proximidade do tubo longo gera um confinamento da turbulência do jato. Esse efeito faz com que o escoamento seja muito mais lento e favorável à flotação de inclusões. Apesar de o ensaio de linhas de fluxo ser uma ferramenta qualitativa, qualitativamente é possível perceber no maior tempo de ensaio. Essa configuração apresenta 32 segundos de ensaio (Figura 23) para o corante atingir a mesma área que as demais configurações apresentam 8 s de ensaio.

Nas vistas frontal (Figura 23) e lateral (Figura 24) as zonas mortas representadas por círculos pontilhados em vermelho apresentam tamanho menor do que as configurações anteriores (Figura 15, Figura 18 e Figura 21) e se encontram próximas às barreiras como apresentado por Sahai, Y.; Emi, T. (2007)¹. Isso se deve em parte a maior dispersão do escoamento provocado pelo efeito de inibidor de turbulência que barreiras possuem. Na indústria, essa configuração poderia provocar melhor homogeneidade térmica e química no interior do distribuidor, cumprindo melhor as suas funções metalúrgicas.

Figura 24. Resultado do ensaio de linhas de fluxo para a configuração com tubo longo e com barreiras (Vista lateral).

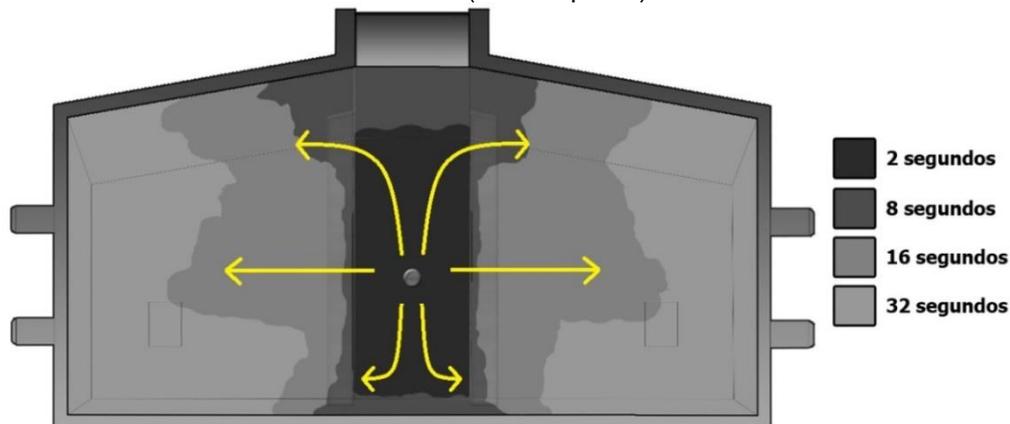


Observação: Flechas amarelas indicam as linhas de fluxo preferenciais e os círculos pontilhados vermelhos indicam as zonas mortas.

Como pode ser visto na Figura 25 (vista superior), o escoamento seguido durante o ensaio apresenta uma boa dispersão na região superior do

distribuidor. Em paralelo com a vista lateral (Figura 24), observa-se que o corante não atinge o veio mesmo após 32 segundos de ensaio. Esse comportamento favorece a flotação das inclusões por meio de uma maior área de contato entre inclusão/escória e um maior tempo de residência para flotação.

Figura 25. Resultado do ensaio de linhas de fluxo para a configuração com tubo longo e com barreiras (Vista superior).



Observação: Flechas amarelas indicam as linhas de fluxo preferenciais.

Enquanto que a configuração com barreiras e sem tubo longo é um exemplo de uso incorreto de barreiras no distribuidor, a configuração com tubo longo e com barreiras mostrou que o uso de barreiras nessas condições é favorável ao distribuidor. Assim, como afirmado os autores Jin-gang, L., et al.³⁸ e Ray, S. K., et al.⁸⁰.

Dentre as quatro configurações analisadas e sob o ponto de vista do ensaio de linhas de fluxo, a configuração com tubo longo e com barreiras é a que apresenta melhores resultados. Os motivos são listados a seguir:

- Escoamento ascendente passando próximo à superfície;
- Menor zona morta;
- Ausência de curto-circuito;
- Menor velocidade de escoamento (análise qualitativa).

5.2 ENSAIO DE DISTRIBUIÇÃO DE TEMPOS DE RESIDÊNCIA

Os resultados do ensaio de distribuição de tempos de residência (DTR) são apresentados a seguir nas configurações possíveis entre a presença ou não

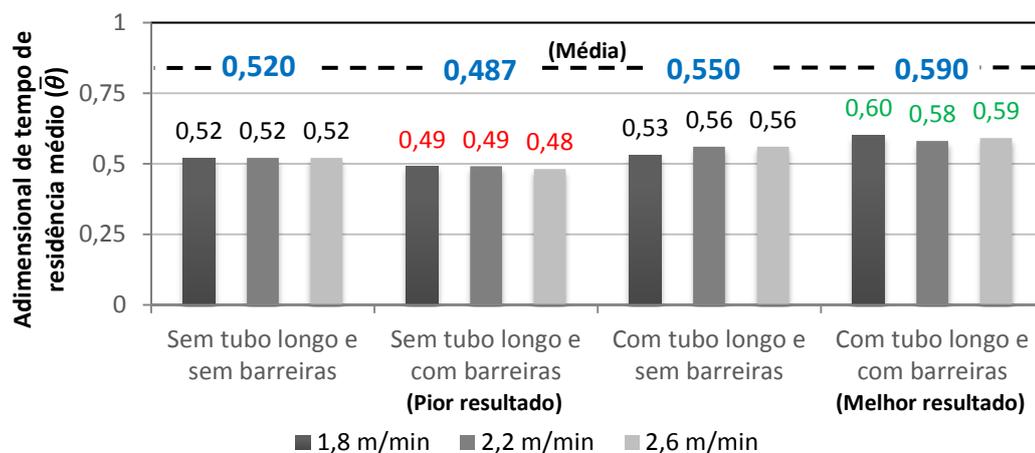
das barreiras e tubo longo e em três velocidades de lingotamento, conforme a Tabela 10. Na Figura 26 até a Figura 33 são destacadas com o melhor resultado em negrito de cor verde e o pior resultado em negrito de cor vermelha.

Devido à velocidade de lingotamento não apresentar efeito sobre a maioria dos resultados obtidos com as curvas de DTR (olhar Apêndice F), os tempos médios e mínimos de residência e as frações de volumes característicos são discutidos com os resultados das médias dos valores para diferentes velocidades de lingotamento.

5.2.1 Tempo médio de residência

A Figura 26 mostra o tempo médio de residência normalizado para as configurações testadas neste trabalho. Percebe-se que a pior configuração é a sem tubo longo e com barreiras, cuja média dos resultados para as velocidades de lingotamento apresentada em azul é igual a 0,487. Enquanto que a melhor configuração de distribuidor é a com tubo longo e com barreiras, apresentando o tempo médio normalizado de 0,590. Ou seja, esta é a configuração que proporciona maior tempo para flotação das inclusões e, conseqüentemente, na indústria deveria proporcionar uma maior remoção de inclusões no distribuidor.

Figura 26. Adimensional de tempo médio de residência ($\bar{\theta}$) para as configurações estudadas neste trabalho.

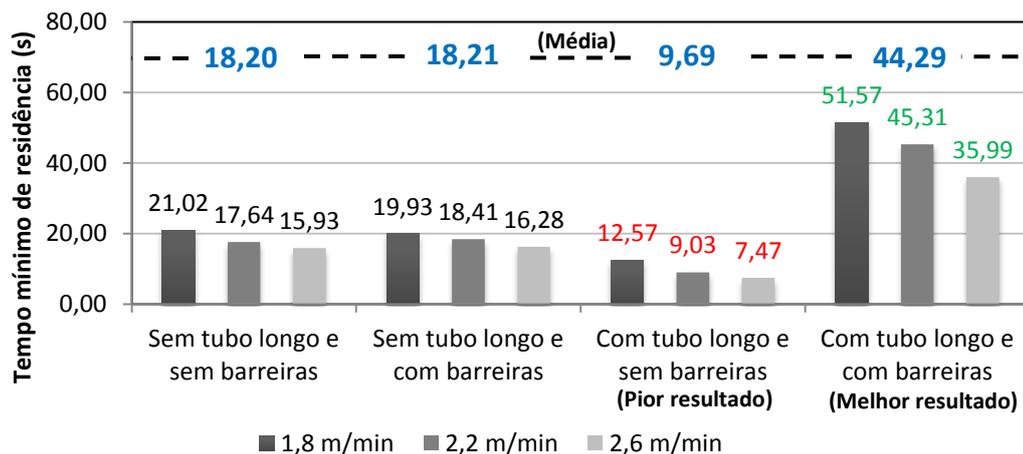


Observação: No gráfico são destacados o melhor (verde) e o pior resultado (vermelho) e a média dos valores de cada configuração (azul).

5.2.2 Tempo mínimo de residência

Os resultados de tempo mínimo de residência são apresentados na Figura 27. A configuração com tubo longo e sem barreiras apresenta o pior resultado entre as médias de velocidades de lingotamento (9,69 s). Esse resultado se deve ao escoamento preferencialmente descendente e com curto-circuito descrito nos resultados do ensaio de linhas de fluxo dessa configuração (subseção 5.1.3). A configuração que apresenta maior tempo mínimo e, conseqüentemente, melhor possibilidades de flotação de inclusões é a configuração com tubo longo e com barreiras cujo valor médio do adimensional de tempo mínimo é igual a 44,29 s.

Figura 27. Tempo mínimo de residência (t_{min}) para as configurações estudadas neste trabalho.



Observação: No gráfico são destacados o melhor (verde) e o pior resultado (vermelho) e a média dos valores de cada configuração (azul).

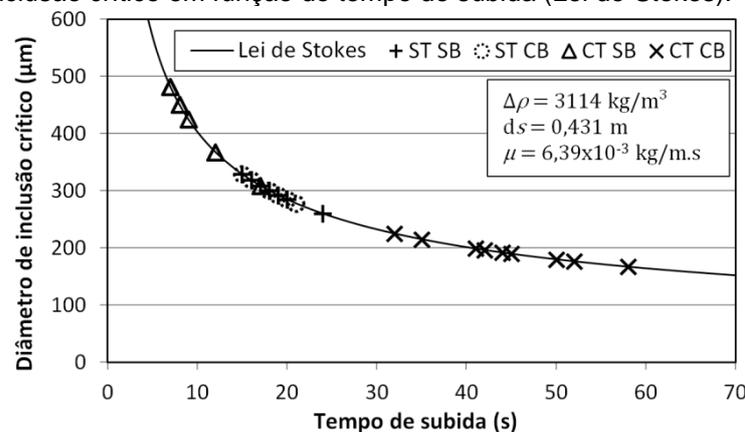
Na Figura 28, os resultados de tempo mínimo de residência são confrontados com o diâmetro de inclusão crítica para flotação no distribuidor. Este diâmetro é dado com base na velocidade terminal da partícula (lei de Stokes - Equação 14) e corresponde ao diâmetro mínimo possível de flotar e atingir a escória no distribuidor dentro do tempo mínimo de residência. As condições assumidas na equação 14 são: inclusões esféricas de alumina, diferença de massa específica entre o aço líquido e a inclusão de alumina ($\Delta\rho$) igual a 3114 kg/m^3 , distância para a inclusão atingir a escória igual à altura do banho metálico no distribuidor ($0,431 \text{ m}$) e viscosidade dinâmica do aço líquido ($\mu = 6,39 \times 10^{-3} \text{ kg/m.s}$). Apesar dessa abordagem não considerar os efeitos de

arraste dados pelas forças de inércia do escoamento ela é válida para fins didáticos e comparativos.

$$V_p = \frac{2}{9} \frac{r^2 g \Delta \rho}{\mu} \quad (14)$$

Onde, V_p é a velocidade terminal da partícula (m/s), r é o raio da inclusão crítica (m) e g é a aceleração da gravidade (9,81 m/s²).

Figura 28. Resultados de tempo mínimo de residência plotados sobre o gráfico de diâmetro de inclusão crítica em função do tempo de subida (Lei de Stokes).



Observação: Sem tubo longo e sem barreiras (ST SB), sem tubo longo e com barreiras (ST CB), com tubo longo e sem barreiras (CT SB) e com tubo longo e com barreiras (CT CB).

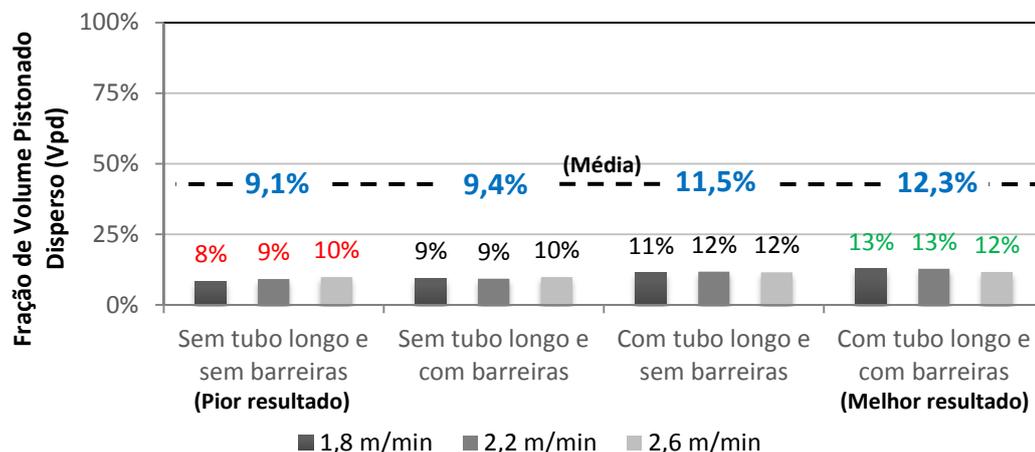
É possível interpretar com a Figura 28 que a configuração com tubo longo e com barreiras proporciona melhores condições de flotação de inclusões com diâmetro de inclusão crítica entre aproximadamente 180 e 230 µm. Enquanto que a configuração com tubo longo e sem barreiras apresenta valores entre aproximadamente 300 e 480 µm. Esses resultados são esperados por que as configurações CT CB e CT SB apresentam o maior e o menor tempo mínimo de residência, respectivamente.

5.2.3 Frações de volumes característicos

A Figura 29 mostra que o maior valor de Volume Pistonado Disperso para as configurações estudadas é atingido com a utilização do tubo longo associado às barreiras (12,3%). Enquanto que o menor valor é para a

configuração sem tubo longo e sem barreiras (9,1%). O Volume Pistonado Disperso está associado a melhores condições de flotação de inclusões. Logo, quanto maior for esse valor melhor é a condição de remoção de inclusões no distribuidor.

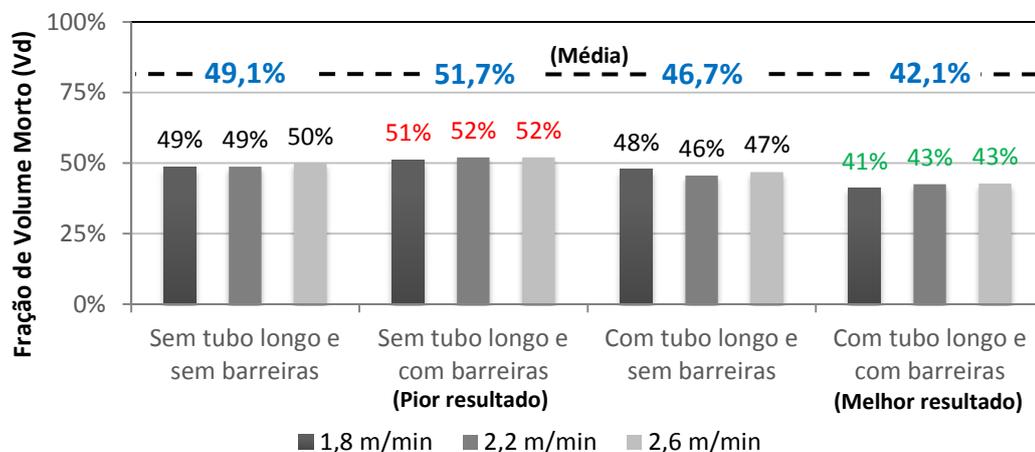
Figura 29. Fração de volume Pistonado Disperso (Vpd) para as configurações estudadas neste trabalho.



Observação: No gráfico são destacados o melhor (verde) e o pior resultado (vermelho) e a média dos valores de cada configuração (azul).

A condição de menor Volume Morto (Figura 30) é a configuração com tubo longo e com barreiras (42,1%). A pior condição de Volume Morto é a configuração sem tubo longo e com barreiras (51,7%). O volume morto no distribuidor é necessário que seja o menor possível, dado que este volume é uma região quase estagnada no distribuidor que diminui o tempo de residência do aço e desfavorece a remoção de inclusões.

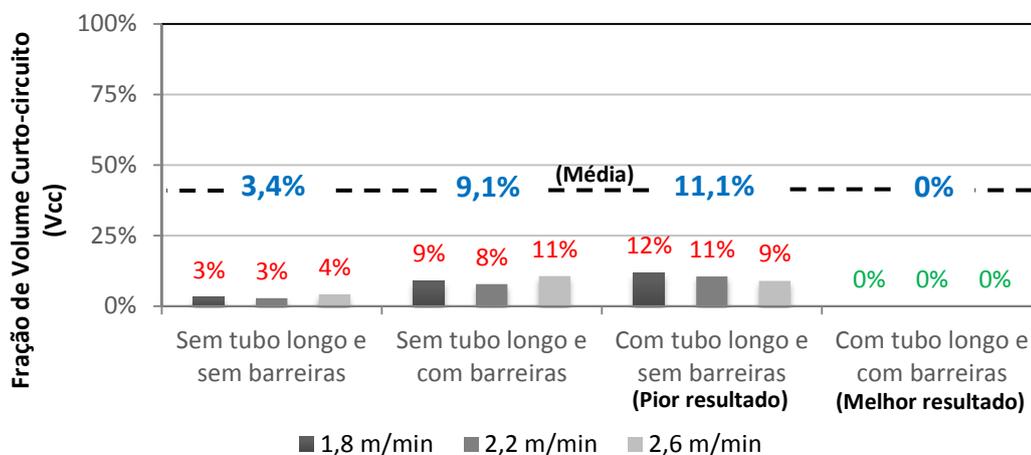
Figura 30. Fração de volume Morto (Vd) para as configurações estudadas neste trabalho.



Observação: No gráfico são destacados o melhor (verde) e o pior resultado (vermelho) e a média dos valores de cada configuração (azul).

O curto-circuito no distribuidor é prejudicial devido à diminuição das possibilidades de flotação das inclusões. Como apresentado na Figura 31, a única configuração com ausência de curto-circuito é a com tubo longo e com barreiras. O curto-circuito para a configuração sem tubo longo e sem barreiras utilizando o mesmo modelo estudado neste trabalho são confirmados no trabalho de Badaraco, R. L., et al. (2003)⁹⁴ ao utilizarem a técnica com planos de laser em modelo físico e a simulação numérica do escoamento.

Figura 31. Fração de volume de Curto-circuito (Vcc) para as configurações estudadas neste trabalho.



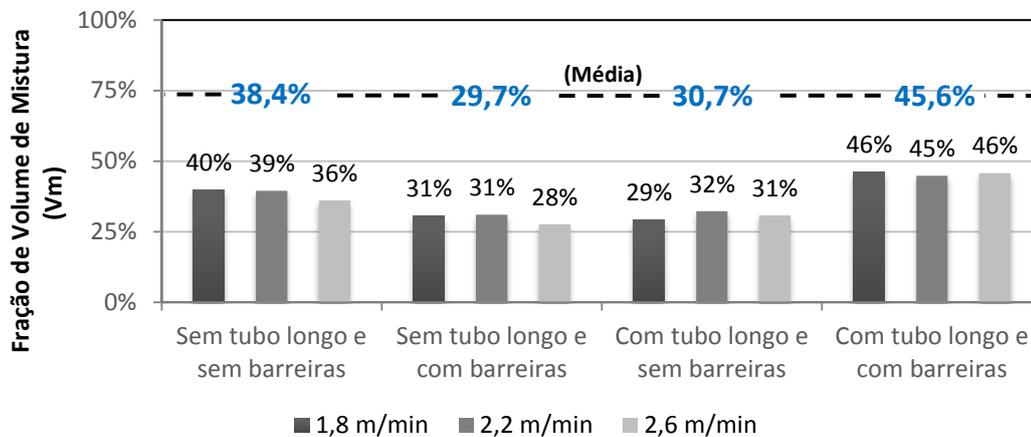
Observação: No gráfico são destacados o melhor (verde) e o pior resultado (vermelho) e a média dos valores de cada configuração (azul).

A fração de volume de curto-circuito aumenta quando são utilizadas as barreiras na configuração sem tubo longo. Isso é mostrado pelo ensaio de linhas de fluxo dessa configuração (subseção 5.1.2) por meio de uma intensificação das linhas de fluxo descendentes em direção ao veio quando se utiliza as barreiras. No entanto, na configuração com tubo longo e com barreiras (subseção 5.1.4), o efeito das barreiras elimina a existência do curto-circuito que existe na configuração com tubo longo e sem barreiras. Vale ressaltar que ambos os casos são um exemplo de coerência entre os ensaios de DTR e linhas de fluxo.

A Figura 32 mostra o comparativo das frações de volume de mistura para as diferentes configurações e o maior valor encontrado é para a configuração com tubo longo e com barreiras (45,6%). Atribui-se a isso ao confinamento da turbulência gerada pelo jato de entrada no interior das barreiras promovendo

uma maior mistura do escoamento no distribuidor (discutido na subseção 5.1.4).

Figura 32. Fração de volume de Mistura (V_m) para as configurações estudadas neste trabalho.



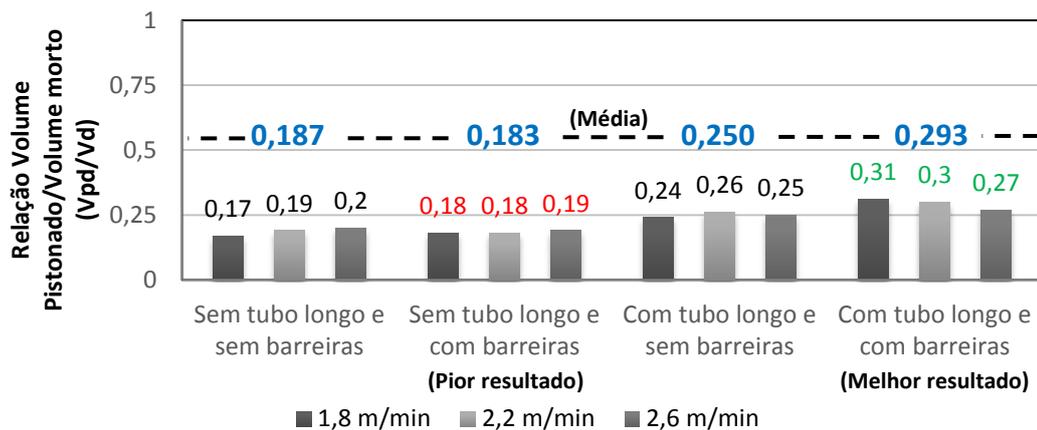
Observação: No gráfico é destacada a média de cada configuração (azul).

5.2.4 Relação entre Volume Pistonado Disperso e Volume Morto

A relação entre o Volume Pistonado Disperso (V_{pd}) e o Volume Morto (V_d) é um bom índice para o estudo da remoção de inclusões a partir do ensaio de distribuição de tempo de residência. Como o volume pistonado disperso auxilia no direcionamento das inclusões à escória em escoamentos preferencialmente ascendentes e o volume morto diminui o tempo de residência do aço (prejudicial à flotação das inclusões) espera-se que o primeiro aumente o máximo possível e o último diminua. Logo, quanto maior for a relação V_{pd}/V_d , melhor são as condições de flotação de inclusões.

Na Figura 33 a maior relação V_{pd}/V_d é encontrada na configuração com tubo longo e com barreiras (0,293) caracterizando o melhor escoamento para flotação de inclusões. O menor resultado de 0,183 pertence à configuração sem tubo longo e com barreiras.

Figura 33. Relação entre Volume Pistonado Disperso e Volume Morto (Vpd/Vd) para as configurações estudadas.



Observação: No gráfico são destacados o melhor (verde) e o pior resultado (vermelho) e a média dos valores de cada configuração (azul).

Sob o ponto de vista do ensaio de distribuição de tempo de residência, a configuração com tubo longo e com barreiras é a melhor dentre as estudadas neste trabalho. Os motivos são listados a seguir:

- Maior tempo médio de residência;
- Maior tempo mínimo de residência;
- Maior Volume Pistonado Disperso;
- Menor Volume Morto;
- Ausência de Volume de Curto-circuito;
- Maior Relação Vpd/Vd.

5.3 ENSAIO DE REMOÇÃO DE INCLUSÕES

Esta subseção é subdividida em: determinação do tempo de ensaio, resultados da quantificação da remoção de inclusões e efeito de diferentes condições de escoamento na flotação de micro e macroinclusões.

5.3.1 Resultados da quantificação da remoção de inclusões

Os resultados das porcentagens de inclusões passantes obtidos com a matriz experimental do ensaio de remoção de inclusões são apresentados na Tabela 14. A variável resposta percentual de inclusões passantes deve ser entendida como a quantidade de inclusões que entram no distribuidor e

atingem o veio de modo que caracterizam a passagem para o molde. Ou então, as inclusões que não são captadas pela camada de escória presente, em tese, na superfície do banho.

Tabela 14. Resultados das porcentagens de inclusões passantes do ensaio de remoções de inclusões.

Tratamento	Velocidade (m/min)	Tubo	Barreiras	Repetições	
				1 (%)	2 (%)
1	1,8	Não	Não	2,89	2,22
2	2,2	Não	Não	2,35	3,08
3	2,6	Não	Não	2,42	2,39
4	1,8	Sim	Não	22,48	22,67
5	2,2	Sim	Não	32,01	31,74
6	2,6	Sim	Não	33,93	35,74
7	1,8	Não	Sim	2,65	2,94
8	2,2	Não	Sim	3,19	3,20
9	2,6	Não	Sim	3,19	2,90
10	1,8	Sim	Sim	18,43	18,62
11	2,2	Sim	Sim	23,73	25,91
12	2,6	Sim	Sim	28,45	30,61

Com o auxílio de um “software” de estatística é calculada a análise de variância (ANOVA) para determinar os efeitos principais e de interação envolvidos no ensaio de remoção de inclusões a um nível de significância de 5%. Para um efeito ser significativo a esse nível de significância, ele deve apresentar Valor-P inferior a 0,05. Os resultados da análise de variância são mostrados na Tabela 15.

Tabela 15. Análise de variância (ANOVA) para porcentagem de inclusões passantes pelo veio.

Fontes de variação	GDL	SQ	SQ _{aj}	MQ	F _{calc}	Valor-P
Repetição	1	0,000165	0,000165	0,000165	3,41	0,092
Velocidade de lingotamento (A)	2	0,01431	0,014315	0,007157	147,40	0,000
Presença do tubo longo (B)	1	0,35259	0,352595	0,352595	7261,36	0,000
Presença das barreiras (C)	1	0,003775	0,003775	0,003775	77,74	0,000
Interação AB	2	0,013813	0,013813	0,006906	142,23	0,000
Interação AC	2	0,000200	0,000200	0,000100	2,06	0,173
Interação BC	1	0,005263	0,005263	0,005263	108,38	0,000
Interação ABC	2	0,000263	0,000263	0,000132	2,71	0,110
Erro	11	0,000534	0,000534	0,000049		
Total	23	0,390924				

GDL: Grau de liberdade; SQ: Somatório ao quadrado; SQ_{aj}: Somatório ao quadrado ajustado; MQ: Médias quadradas ou variância; F_{crit}: F calculado. R² = 99,86%; R² ajustado = 99,71%
Observação: Em negrito são destacados os efeitos não significativos a um nível de significância de 5%.

A Tabela 15 mostra que o efeito na repetição não apresenta Valor-P inferior a 0,05, o que prova que é suficiente realizar os ensaios de remoção de inclusões em duplicata, desde que sejam mantidas as mesmas condições de laboratório empregadas neste trabalho.

Todos os efeitos principais são significativos, são eles: velocidade de lingotamento, presença do tubo longo e presença das barreiras. Dentre os efeitos de interação que são significativos estão as interações: “velocidade de lingotamento*presença de tubo longo” (Interação AB) e “presença de tubo longo*presença das barreiras” (Interação BC). Para a interação dupla “velocidade de lingotamento*presença de barreiras” (Interação AC) e para interação tripla “velocidade de lingotamento*presença de tubo longo*presença das barreiras” (Interação ABC) não foi possível comprovar o efeito a um nível de significância de 5%.

Sobre a intensidade dos efeitos, é possível compará-los por meio do valor de F_{calc} . Desse modo, os efeitos que são significativos podem ser listados em ordem de maior intensidade para menor intensidade:

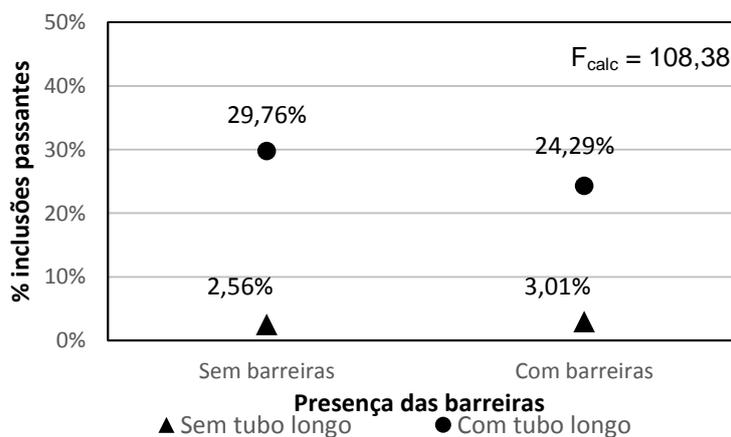
- Presença do tubo longo: $F_{\text{calc}} = 7261,36$;
- Velocidade de lingotamento: $F_{\text{calc}} = 147,40$;
- Interação AB: $F_{\text{calc}} = 142,23$;
- Interação BC: $F_{\text{calc}} = 108,38$;
- Presença das barreiras: $F_{\text{calc}} = 77,74$.

Além disso, também são mostrados que os resultados apresentam boa repetitividade. Visto que o coeficiente de determinação (R^2) e o coeficiente de determinação ajustado (R^2_{ajustado}) apresentam valores superiores a 99%.

A seguir, os resultados dos efeitos principais e de interação são apresentados com padronização das escalas entre os gráficos. Desta maneira é possível comparar a intensidade do efeito da variável (velocidade de lingotamento, presença do tubo e das barreiras) sobre a variável resposta (porcentual de inclusões passantes). Com o mesmo objetivo, nas imagens dos efeitos principais e de interação, o valor teste F é destacado quando o efeito é significativo e o valor-P quando o efeito não é significativo.

Para melhor entendimento, preferiu-se antecipar o efeito de interação entre a presença ou não do tubo longo e a presença ou não das barreiras (Figura 34, interação BC). Os outros efeitos serão apresentados em ordem de intensidade, conforme listado anteriormente. O efeito de interação BC se mostra importante na quantidade de inclusões passantes. Os motivos atribuídos a esse efeito significativo são discutidos a seguir.

Figura 34. Porcentual de inclusões passantes em função da combinação entre as variáveis presença das barreiras e a presença do tubo longo (Efeito de interação BC)



Observação: No canto superior direito é destacado o valor-P da análise de variância.

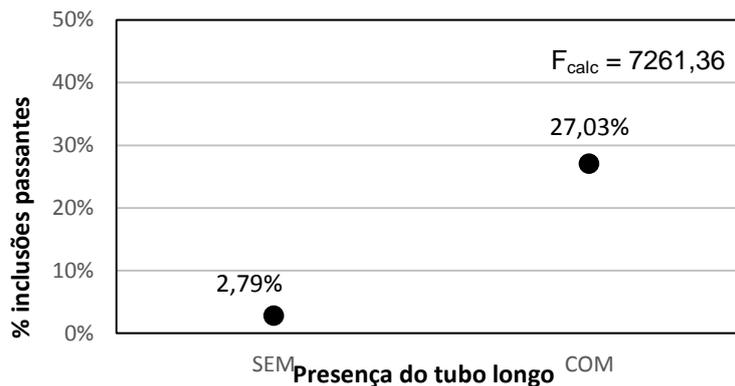
A configuração com tubo longo e sem barreiras apresenta escoamento descendente (mostrado na subseção 5.1.3) e a presença das barreiras converte esse escoamento em ascendente eliminando o curto-circuito (ver subseção 5.1.4). Essa modificação no escoamento faz com que o percentual de inclusões passe de 29,76 para 24,29%.

A configuração sem tubo longo e sem barreiras com 2,56% de inclusões passantes aumenta para 3,01% quando utilizado as barreiras. Isso se deve em parte a modificação no escoamento que aumenta a fração de volume de curto-circuito de 3,4 para 9,1% (subseção 5.2.3). Além de diminuir o adimensional de tempo médio de residência de 0,520 para 0,487 (subseção 5.2.1) e a relação V_{pd}/V_d de 0,187 para 0,183 (subseção 5.2.4).

O efeito principal da presença do tubo longo (Figura 35) se mostra bastante influente sobre a quantidade de inclusões passantes pelo veio (2,79% sem tubo longo e 27,03% com tubo longo). Essa diferença nos resultados pode ser atribuída ao arraste de bolhas gerado quando o jato de entrada atravessa a

interface ar/água nas configurações sem o tubo longo (Figura 36). As bolhas arrastadas podem capturar as inclusões e aumentar a eficiência de remoção das inclusões, como apresentado pelos autores Wang, F., et al. (1996)⁸⁶, Cho, J.; Lee, H. (2001)⁵⁷ e Rogler, J. P. et al. (2004)⁶³ e discutido anteriormente na subseção 3.3.

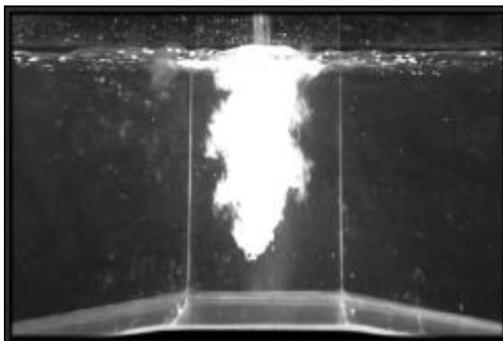
Figura 35. Porcentual de inclusões passantes em função da variável presença do tubo longo (Efeito principal B).



Observação: No canto superior direito é destacado o valor de F_{calc} da análise de variância.

Zheng, S.; Zhu, M. Y. (2006)⁷² apresentaram que para se obter a maior eficiência de remoção de inclusões no distribuidor é necessário se ter um escoamento com inexistência de curto-circuito. No entanto, as configurações sem tubo longo, conforme os ensaios de linhas de fluxo e distribuição de tempos de residência apresentam curto-circuito e também os melhores resultados de remoção de inclusões (Figura 35). Logo, é possível afirmar que um escoamento no distribuidor que possui curto-circuito pode sim, sob algumas condições, apresentar melhor eficiência de remoção que uma configuração sem curto-circuito.

Figura 36. Visualização em modelo físico do arraste de bolhas para o seio do escoamento gerado pela utilização de jato aberto (sem tubo longo).

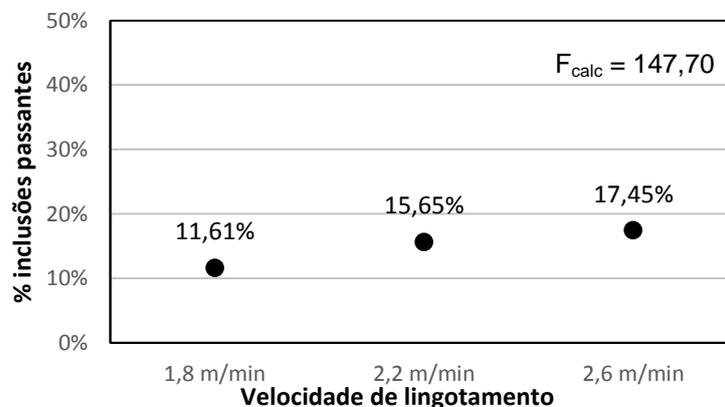


Ao abordar a presença ou não do tubo longo deve-se lembrar que a sua ausência aumenta a formação de inclusões via reoxidação do banho metálico. Enquanto que a presença do tubo longo evita a reoxidação do aço. Logo, os resultados que envolvem a ausência do tubo longo não consideram a quantificação da reoxidação via exposição do aço líquido à atmosfera reoxidante. Tal quantificação poderia elevar o valor de inclusões passantes acima ou não das configurações com a presença do tubo longo.

Caso, na indústria, os resultados da reoxidação elevassem os valores de inclusões passantes, mesmo assim o curto-circuito não seria o principal causador dessa má operação do distribuidor e sim, a reoxidação do banho que como solução poderia ser diminuída com uma inertização com gás inerte no jato de aço oriundo da panela, por exemplo. Assim, se manteria a existência das bolhas no interior do escoamento, responsável pela captura das inclusões, e se quebraria um paradigma de uma configuração de distribuidor com curto-circuito que necessariamente apresenta uma má operação sob o ponto de vista da remoção de inclusões.

Na Figura 37 apresenta-se o efeito da velocidade de lingotamento sobre o percentual de inclusões passantes. Verifica-se que o aumento da velocidade de lingotamento permite uma maior passagem de inclusões para o veio (11,61 para 17,45%). Este resultado é coerente, dado que o aumento da velocidade de lingotamento teoricamente aumenta o vetor de velocidade de arraste da inclusão, dificultando a sua flotação.

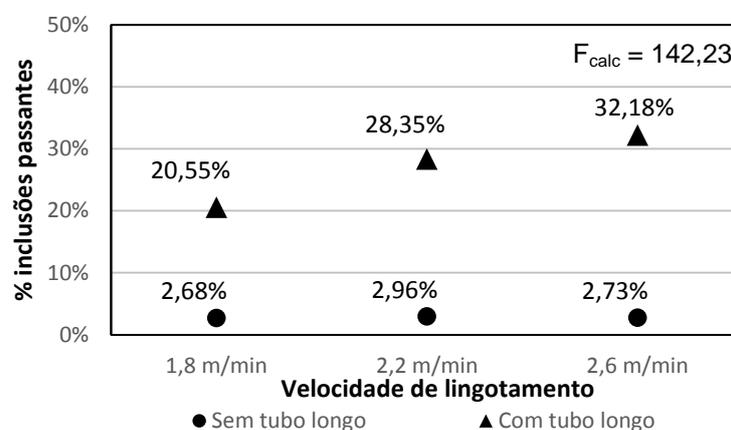
Figura 37. Percentual de inclusões passantes em função da variável velocidade de lingotamento (Efeito principal A).



Observação: No canto superior direito é destacado o valor de F_{calc} da análise de variância.

Para o caso do efeito da velocidade de lingotamento sobre a presença do tubo longo (Figura 38) é possível afirmar que a presença do tubo longo é mais sensível ao aumento da velocidade de lingotamento do que as configurações sem o tubo longo. Enquanto que a passagem de inclusões com tubo longo passa de 20,55 para 32,18%, com o aumento da velocidade de lingotamento, sem tubo longo não há variação significativa com o aumento da velocidade de lingotamento. Isso pode ser atribuído ao efeito das bolhas no seio do banho que apresentam maior influência na captura de inclusões do que o efeito que aumento da velocidade possui sobre o percentual de inclusões passantes.

Figura 38. Percentual de inclusões passantes em função da combinação entre as variáveis presença do tubo longo e a velocidade de lingotamento (Efeito de interação AB)



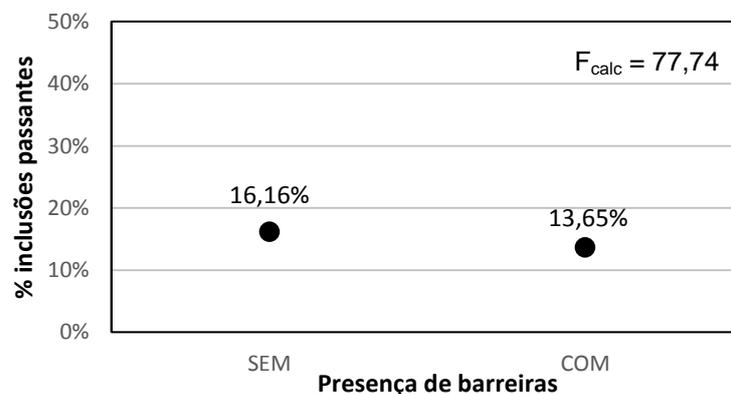
Observação: No canto superior direito é destacado o valor de F_{calc} da análise de variância.

A Figura 38 também mostra um quebra de paradigma para o distribuidor de lingotamento contínuo. Normalmente na indústria, quando não se atinge os critérios de limpeza inclusionária em um determinado aço, umas das primeiras decisões a serem tomadas é a diminuição da velocidade de lingotamento. Como pode ser visto na Figura 38, a velocidade de lingotamento apresenta maior intensidade sobre a remoção de inclusões nas configurações com tubo longo (20,55 em 1,8 m/min para 32,18% em 2,6 m/min). Enquanto que a configuração sem tubo longo não apresenta efeito com tamanha intensidade (2,68 em 1,8 m/min para 2,73% em 2,6 m/min). Portanto, em algumas configurações, a melhora na remoção de inclusões ao diminuir a velocidade de lingotamento pode apresentar maior custo (menor produção de aço) do que a modificação do escoamento. Visto que o efeito da velocidade de lingotamento

sobre a remoção de inclusões pode ser muito pequeno frente a modificação do escoamento.

A presença das barreiras no distribuidor (Figura 39) mostra um efeito de diminuição na passagem de inclusões para o molde de 16,16 para 13,65%. Lembrando que esse resultado é uma média entre as configurações com tubo longo e sem tubo longo e possui como objetivo avaliar o comportamento médio das barreiras em todas as configurações testadas. Logo, permanece a interpretação de que para o caso sem tubo longo as barreiras são maléficas e para o caso com tubo longo as barreiras são benéficas (ver comentário da Figura 34).

Figura 39. Porcentual de inclusões passantes em função da variável presença das barreiras (Efeito principal C)

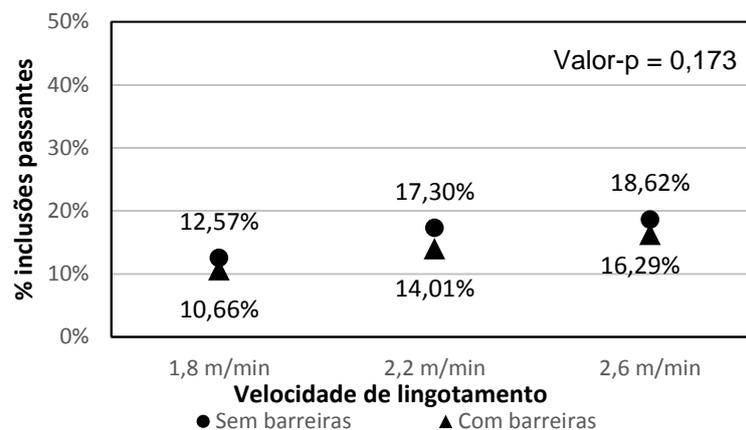


Observação: No canto superior direito é destacado o valor de F_{calc} da análise de variância.

Na Figura 40, o efeito de interação da presença ou não das barreiras com o aumento da velocidade de lingotamento não se mostra significativo à passagem de inclusões não flotantes para o molde. Como pode ser visto, o valor-P apresentado é igual a 0,143 e maior que 0,05, caracterizando que não há efeito significativo sobre as inclusões passantes.

Conforme o ensaio de remoção de inclusões, a configuração com tubo longo e com barreiras é a melhor quando se deseja evitar reoxidação do aço. Quando o efeito da reoxidação do banho não é limitante na qualidade do aço, a configuração aconselhada é a sem tubo longo e sem barreiras, que também possui um menor custo operacional. Uma análise mais detalhada será feita na subseção 5.4.

Figura 40. Percentual de inclusões passantes em função da combinação entre as variáveis presença das barreiras e a velocidade de lingotamento (Efeito de interação AC)



Observação: No canto superior direito é destacado o valor-p da análise de variância.

5.3.2 Efeito de diferentes condições de escoamento na flotação de micro e macroinclusões

A Tabela 16 e a Tabela 17 mostram os resultados do ensaio de remoção de inclusões separados em microinclusões (<50 μm , protótipo), e macroinclusões (≥ 50 μm , protótipo) para todos os ensaios realizados. Além de apresentar a média, desvio-padrão e coeficiente de variação (CV) dos resultados. O tamanho correspondente das microinclusões e macroinclusões no modelo pode ser visto na Tabela 12.

Tabela 16. Resultados das porcentagens de microinclusões passantes do ensaio de remoção de inclusões.

Amostra	Velocidade (m/min)	Tubo	Barreiras	Repetições		Média (%)	Desvio	CV (%)
				1 (%)	2 (%)			
1	1,8	Não	Não	4,06	3,41	3,74	0,0023	6,15
2	2,2	Não	Não	3,33	4,34	3,84	0,0036	9,31
3	2,6	Não	Não	3,19	3,68	3,44	0,0017	5,04
4	1,8	Sim	Não	26,48	29,54	28,01	0,0108	3,86
5	2,2	Sim	Não	39,60	42,54	41,07	0,0104	2,53
6	2,6	Sim	Não	41,07	37,34	39,21	0,0132	3,36
7	1,8	Não	Sim	4,08	4,11	4,10	0,0001	0,26
8	2,2	Não	Sim	4,36	4,87	4,62	0,0018	3,91
9	2,6	Não	Sim	3,67	3,98	3,83	0,0011	2,87
10	1,8	Sim	Sim	25,93	26,83	26,38	0,0032	1,21
11	2,2	Sim	Sim	27,16	30,42	28,79	0,0115	4,00
12	2,6	Sim	Sim	36,10	44,06	40,08	0,0281	7,02

Tabela 17. Resultados das porcentagens de macroinclusões passantes do ensaio de remoção de inclusões.

Amostra	Velocidade (m/min)	Tubo	Barreiras	Repetições		Média (%)	Desvio	CV (%)
				1 (%)	2 (%)			
1	1,8	Não	Não	2,38	1,70	2,04	0,0024	11,79
2	2,2	Não	Não	1,92	2,53	2,23	0,0022	9,69
3	2,6	Não	Não	2,09	1,83	1,96	0,0009	4,69
4	1,8	Sim	Não	20,74	19,68	20,21	0,0037	1,85
5	2,2	Sim	Não	28,70	27,04	27,87	0,0059	2,11
6	2,6	Sim	Não	30,82	35,04	32,93	0,0149	4,53
7	1,8	Não	Sim	2,03	2,43	2,23	0,0014	6,34
8	2,2	Não	Sim	2,68	2,48	2,58	0,0007	2,74
9	2,6	Não	Sim	2,99	2,43	2,71	0,0020	7,31
10	1,8	Sim	Sim	15,16	15,05	15,11	0,0004	0,26
11	2,2	Sim	Sim	22,24	23,95	23,10	0,0060	2,62
12	2,6	Sim	Sim	25,13	24,75	24,94	0,0013	0,54

A Figura 41 e a Figura 42 mostram os resultados das médias das quatro configurações testadas para micro e macroinclusões passantes pelo veio no ensaio de remoção de inclusões, respectivamente. Na comparação entre as duas figuras pode ser visto que os valores de microinclusões passantes são maiores do que para os resultados de macroinclusões em todas as configurações. Esse comportamento é esperado, dado que as inclusões maiores possuem o tempo de flotação menor e a remoção se torna mais fácil.

Figura 41. Porcentual de microinclusões passantes em função da combinação entre a presença do tubo longo e a presença das barreiras.

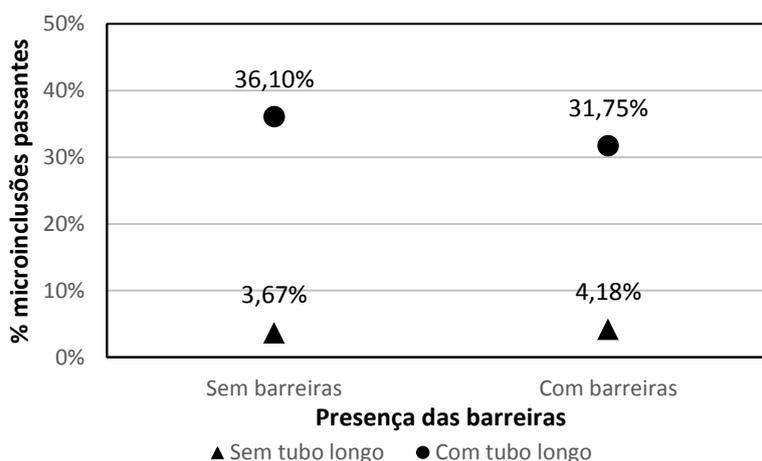
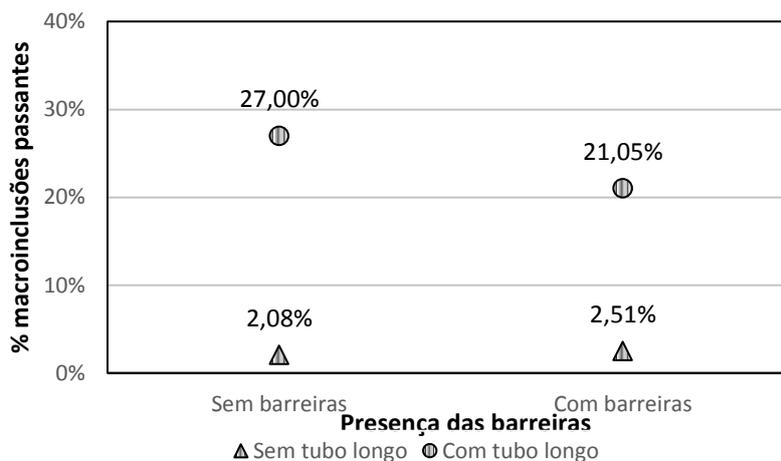


Figura 42. Porcentual de macroinclusões passantes em função da combinação entre a presença do tubo longo e a presença das barreiras.



A Figura 41 mostra que a configuração que menos possui microinclusões passantes pelo veio é a configuração sem tubo longo e sem barreiras (3,67%) e o mesmo é encontrado na Figura 42 para macroinclusões (2,08%). Novamente, a existência do curto-circuito nessa configuração não influenciou fortemente na passagem de inclusões devido a existência de bolhas no interior do escoamento, como mostrado na Figura 36. O pior resultado é encontrado na configuração com tubo longo e sem barreiras, onde 36,10% das microinclusões são passantes (Figura 41) e 27,00% das macroinclusões são passantes (Figura 42). Isso ocorre devido em parte a existência do elevado curto-circuito que impossibilita a separação das inclusões no distribuidor. Nota-se, que nessa configuração não há o arraste de bolhas para o interior do escoamento aumentado fortemente a quantidade de inclusões passantes.

É possível ordenar, com base nos dados da Figura 41 e da Figura 42, as diferenças entre remoção de micro e macroinclusões nas quatro configurações. São elas, ordenadas de maior diferença para menor diferença:

- Configuração com tubo longo e com barreiras: 10,7%;
- Configuração com tubo longo e sem barreiras: 9,1%;
- Configuração sem tubo longo e com barreiras: 1,67%;
- Configuração sem tubo longo e sem barreiras: 1,59%.

As configurações com tubo longo apresentam maior diferença na separação de micro e macroinclusões passantes comparadas às configurações sem o tubo longo. As configurações sem tubo longo possuem o efeito das bolhas de

ar no seio do banho que é bastante influente na remoção de inclusões e fazem com que as bolhas de ar também possam ser utilizadas para estreitar a distribuição de tamanho de inclusões passantes pelo veio do distribuidor.

A configuração com tubo longo e com barreiras se mostrou com a maior diferença (10,7%). Isso pode ser entendido pelas características do escoamento dessa configuração. Onde, por exemplo, não há arraste de bolhas para o interior do escoamento, não há existência de curto-circuito e há maior tempo de residência para flotação das inclusões, conforme apresentado anteriormente nos ensaios realizados.

5.4 ESCOLHA DA MELHOR CONFIGURAÇÃO TESTADA

A Tabela 18 mostra um resumo dos principais resultados obtidos para os ensaios de linhas de fluxo, distribuição de tempos de residência e remoção de inclusões. Os melhores resultados são indicados e destacados em verde e os piores são indicados e destacados em vermelho. A seguir são discutidas as configurações em ordem de melhor para pior configuração.

Dentro das limitações da modelagem física e sob o ponto de vista da remoção de inclusões, a melhor configuração é a sem barreiras e sem tubo longo, apresentado 2,56% de inclusões passantes. Essa configuração apresenta escoamento preferencialmente ascendente em direção à superfície e arraste de bolhas para o interior do escoamento favorecendo a remoção de inclusões. Apesar de possuir curto-circuito de 3,4%, 3º melhor adimensional de tempo médio de residência ($\bar{\theta} = 0,520$), 3º melhor tempo mínimo de residência ($t_{min} = 18,20$ s) e 3º melhor relação de V_{pd}/V_d igual a 0,187, a escolha dessa configuração atribui-se principalmente a existência das bolhas que podem ter levado ao menor resultado de inclusões passantes pelo veio, mesmo havendo a existência de curto-circuito.

Não se aconselha a utilização das barreiras testadas para aumentar a eficiência de remoção de inclusões. De acordo com os ensaios realizados neste trabalho, a qualidade do aço produzido utilizando essas barreiras tenderia a piorar. Visto que o volume de curto-circuito aumenta de 3,4 para 9,1%, o adimensional de tempo médio diminui de 0,520 para 0,487, o tempo mínimo passa de 18,20 para 18,21 s, a relação V_{pd}/V_d cai de 0,187 para 0,183

e o percentual de inclusões passantes aumenta de 2,08 para 2,51%. Mesmo assim, a diferença para o 3º melhor resultado de remoção de inclusões é bastante grande (21,05%), atribui-se principalmente a existência das bolhas. Isso não significa que outras barreiras empregadas nesse distribuidor não seriam favoráveis à remoção de inclusões, como barreiras mais altas, em posições diferentes e/ou com furos. Isso significa que a posição e o formato das barreiras não apresentaram bons resultados para a remoção de inclusões.

A configuração com tubo longo e com barreiras apresenta um escoamento preferencialmente ascendente, sem a presença de curto-circuito, com o maior tempo mínimo ($t_{min} = 44,29$ s) e médio de residência ($\bar{\theta} = 0,590$) e melhor relação V_{pd}/V_d dentre as configurações estudadas ($V_{pd}/V_d = 0,293$). Mesmo apresentando os melhores resultados no ensaio de linhas de fluxo e distribuição de tempo de residência, os resultados de remoção de inclusões ficaram em 3º lugar com 21,05%. Isso confirma que, mesmo uma configuração que possui a maioria dos resultados de escoamento favoráveis para remoção de inclusões, esta configuração pode não ser a melhor opção. Nesse caso, isso pode ter ocorrido devido não haver o arraste de bolhas para o interior do escoamento aumentando bastante os resultados de inclusões passantes pelo veio.

A configuração com tubo longo e sem barreiras se mostrou como a pior configuração sob o ponto de vista da remoção de inclusões, apresentado 29,76% de inclusões passantes. A configuração apresentou escoamento preferencialmente descendente, pior resultado de curto-circuito (11,1%), pior resultado de tempo mínimo de residência ($t_{min} = 9,69$ s). Apesar de apresentar 2º melhor resultado de adimensional de tempo médio ($\bar{\theta} = 0,550$) e 2º melhor resultado de relação V_{pd}/V_d igual a 0,250. Novamente comparados às configurações sem tubo longo, a falta de bolhas no interior do escoamento faz com que as inclusões passantes aumentem.

Tabela 18. Resumo dos resultados obtidos nos ensaios de linhas de fluxo, distribuição de tempos de residência e remoção de inclusões.

	Sem barreiras e sem tubo longo	Com barreiras e sem tubo longo	Sem barreiras e com tubo longo	Com barreiras e com tubo longo
Fluxo ascendente em direção à superfície (Tempo em segundos após a injeção do corante)	 4s SIM	 4s SIM	 4s NÃO	 16s SIM
Arraste de bolhas	SIM	SIM	NÃO	NÃO
Presença de volume de curto-circuito	SIM – 3,4% Olhar Figuras 12 e 27 a).	SIM – 9,1% Olhar Figuras 15 e 27 - b).	SIM – 11,1% (Pior resultado) Olhar Figuras 18 e 27 - c).	NÃO – 0% (Melhor resultado) Olhar Figuras 21 e 27 - d).
Adimensional do tempo médio de residência (valor médio entre as velocidades)	0,520	0,487 (Pior resultado)	0,550	0,590 (Melhor resultado)
Tempo mínimo de residência (valor médio entre as velocidades)	18,20	18,21	9,69 (Pior resultado)	44,29 (Melhor resultado)
Relação Vpd/Vd (valor médio entre as velocidades)	0,187	0,183 (Pior resultado)	0,250	0,293 (Melhor resultado)
% inclusões passantes	2,56% (Melhor resultado)	3,01%	29,76% (Pior resultado)	24,29%
% microinclusões passantes	3,67% (Melhor resultado)	4,18%	36,10% (Pior resultado)	31,75%
% macroinclusões passantes	2,08% (Melhor resultado)	2,51%	27,00% (Pior resultado)	21,05%
	(1° Lugar)	(2° Lugar)	(4° Lugar)	(3° Lugar)

Observação: Na tabela são indicados e destacados os melhores (verde) e os piores resultados (vermelho).

6 CONCLUSÕES

O ensaio de modelagem física de remoção de inclusões se mostrou confiável sob o ponto de vista experimental. Visto que os ensaios de remoção de inclusões apresentaram repetitividade e resultados de remoção de inclusões coerentes com o esperado em cada escoamento proposto.

A partir dos resultados obtidos neste estudo de modelagem física especificamente para o distribuidor, o tubo longo e as barreiras utilizadas, as conclusões sobre o comportamento da remoção de inclusões para os parâmetros de ensaio velocidade de lingotamento, presença de barreiras e presença de tubo longo são mostradas a seguir.

A remoção de inclusões mostrou diminuição frente ao aumento de velocidade de lingotamento. O percentual de inclusões passantes pelo veio em média para 1,8 m/min foi igual a 11,61%, subindo para 15,65% em 2,2 m/min e 17,45% em 2,6 m/min. Esse parâmetro se mostrou como o segundo de maior intensidade entre os três parâmetros testados.

A presença do tubo longo no distribuidor se mostrou negativo sob o ponto de vista da remoção de inclusões. O ensaio de remoção de inclusões mostrou que as inclusões passantes, em média, aumentaram de 2,79 (sem tubo longo) para 27,03% (com tubo longo). Durante o trabalho, a existência do arraste de bolhas para o interior do escoamento foi atribuída a esse comportamento. Esse parâmetro se mostrou como o parâmetro de maior intensidade sobre a remoção de inclusões.

Quanto a utilização das barreiras utilizadas nesse distribuidor, concluiu-se que a remoção de inclusões, em média, aumentou. Visto que as inclusões passantes pelo veio, em média, diminuíram de 16,16 (sem barreiras) para 13,65% (com barreiras). Esse parâmetro apresentou a menor intensidade entre os três parâmetros testados.

Ainda sob o ponto de vista da remoção de inclusões e combinando os parâmetros estudados, conclui-se ao comparar a configuração sem tubo longo e sem barreiras com a configuração sem tubo longo e com barreiras que ocorre:

- Diminuição do contato superficial inclusão/escória (subseção 5.1.2);

- Permanência do curto-circuito e aumento do mesmo de 3,4 para 9,1% (subseções 5.1.2 e 5.2.3);
- Diminuição do adimensional de tempo médio de residência de 0,520 para 0,487 (subseção 5.2.1);
- Diminuição na relação V_{pd}/V_d de 0,187 para 0,183 (subseção 5.2.4);
- Aumento do percentual de inclusões passantes de 2,56 para 3,01% (subseção 5.3).

A partir desses resultados conclui-se que para os casos em que se utiliza o jato aberto e a reoxidação do banho não é limitante na qualidade do aço produzido, não é aconselhável modificar o escoamento utilizando as barreiras deste estudo. Ou seja, mudar da configuração sem tubo longo e sem barreiras para a configuração sem tubo longo com barreiras não é uma boa opção.

Ao utilizar no distribuidor a configuração com tubo longo e sem barreiras obtêm-se com os resultados de linhas de fluxo, distribuição de tempos de residência e remoção de inclusões que:

- Escoamento preferencialmente descendente (subseção 5.1.3);
- Pior resultado de fração de volume de curto-circuito igual a 11,1% (subseções 5.1.3 e 5.2.3);
- Pior resultado de tempo mínimo de residência no valor de 9,69 s (subseção 5.2.2);
- Pior resultado de percentual de inclusões passantes pelo veio elevado e igual a 29,76% (subseção 5.3).

Portanto, conclui-se que essa configuração é a pior dentre as quatro configurações de distribuidor testadas neste trabalho. No entanto, ao comparar a configuração com tubo longo e sem barreiras com a configuração com tubo longo e com barreiras ocorre:

- Modificação do escoamento de descendente para ascendente em direção à superfície (subseção 5.1.4);
- Eliminação do curto-circuito de 11,1 para 0% (subseção 5.2.3);
- Aumento do adimensional de tempo médio de residência de 0,550 para 0,590 (subseção 5.2.1);

- Aumento do tempo mínimo de residência de 9,69 para 44,29 s (subseção 5.2.2);
- Aumento da relação V_{pd}/V_d de 0,250 para 0,293 (subseção 5.2.4);
- Diminuição o porcentual de inclusões passantes pelo veio de 29,76 para 24,29% (subseção 5.3).

Porém, a melhor configuração estudada neste trabalho é a configuração sem tubo longo e sem barreiras que apresentou 2,56% de inclusões passantes pelo veio. Além de apresentar os seguintes resultados:

- escoamento preferencialmente ascendente (subseção 5.1.1);
- Arraste de bolhas para o interior do escoamento favorecendo a remoção de inclusões (Figura 36);
- 3º melhor adimensional de tempo médio de residência ($\bar{\theta} = 0,520$);
- 3º melhor relação de V_{pd}/V_d igual a 0,187.

7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Uma dificuldade encontrada no trabalho foi a limitação da modelagem física de remoção de inclusões em simular as inclusões formadas no aço via reoxidação do aço na utilização de jato aberto. Aconselha-se estudar a termodinâmica e a cinética de formação de inclusões via reoxidação do banho para associar esse estudo ao modelo físico. Também é interessante realizar a mesma associação com a modelagem matemática e após comparar os resultados com a validação na indústria.

Este trabalho utilizou o método de peneiras para quantificar as partículas passantes do ensaio de remoção de inclusões. Aconselha-se estudar o outro método presente na literatura via ESZ e comparar os resultados entre os dois métodos.

O ensaio de remoção de inclusões pode ser melhorado nos quesitos distribuição granulométrica e concentração das partículas de simulação das inclusões. É possível em parceria com a indústria escolher uma qualidade de aço com distribuição granulométrica e concentração de inclusões conhecida para adaptar na modelagem física. Assim, pode-se também expressar os resultados do ensaio de remoção de inclusões em função do diâmetro de inclusão e concentração de inclusões passantes.

O modelo físico deste trabalho opera em condições isotérmicas e os fenômenos de convecção podem afetar no escoamento e na remoção de inclusões. Sugere-se continuar esse estudo de remoção de inclusões adaptando o modelo físico para operar em condições não isotérmicas.

Aconselha-se seguir esse estudo para validação na indústria e comprovar que os resultados obtidos na modelagem física correspondem com a aplicação industrial.

REFERÊNCIAS

1. SAHAI, Y.; EMI, T. Tundish technology for clean steel production. World Scientific Publishing Company, 2007.
2. BESSHO, N. Removal of Inclusion from Molten Steel In Continuous Casting Tundish. ISIJ International, v. 32, n. 1 , p. 157- 63, 1992.
3. JANKE, D. Improvement of Castability and Quality of Continuously Cast Steel. ISIJ International, v. 40, n. 1, p. 31-9, 2000.
4. SASAI, K. Reoxidation Behavior of Molten Steel in Tundish. ISIJ International, v. 40, n. 1, p. 40-7, 2000.
5. SOLHED, H. A Theoretical and Experimental Study of Continuous-Casting Tundishes Focusing on Slag-Steel Interaction. Metallurgical and Materials Transactions, v. 33B, p. 173-85, 2002.
6. KOVAC, P. Steel Cleanliness Improvement Through Tundish Configuration Optimizing. Metalurgija, v. 42, n. 4, p. 249-55, 2003.
7. ZHANG, L.; THOMAS, B. G. State of the Art in Evaluation and Control of Steel Cleanliness. ISIJ International, v. 43, n. 3, p. 271–91, 2003.
8. ZHANG, L.; THOMAS, B. G. Inclusions in continuous casting of steel. XXIV National Steelmaking Symposium, Mexico, p. 138-83, 2003.
9. FACO, R. Levantamento das inclusões nos principais grupos de aços produzidos em aciaria do triplo LD. Dissertação – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Sao Paulo, 2005
10. ANDERSSON, M. Some Aspects on Grain Refining Additions with Focus on Clogging during Casting. ISIJ International, v. 46, n. 6, p. 814–23, 2006.
11. JANISZEWSKI, K. Removal of liquid non metallic inclusion from molten steel using the method filtration. Metal, Hradec nad Moravicí, 2006.
12. ZHANG, L.; THOMAS, B. G. State of the Art in the Control of Inclusions during Steel Ingot Casting. Metallurgical and Materials Transactions, v. 37B, 733-61, 2006.
13. PARK, J. Control of MgO Al₂O₃ Spinel Inclusions in Stainless Steels. ISIJ International, v. 50 , n. 10, p. 1333–46, 2010.
14. QIANG, Y.; ZONG-SHU, Z., QIN-FU, H. Aggregation Kinetics of Inclusions in Swirling Flow Tundish for Continuous Casting. Journal of iron and steel research international, v. 17, p. 06- 10, 2010.
15. CHOUDHARY, S. Influence of Modified Casting Practice on Steel Cleanliness. ISIJ International, v. 51, n. 4, p. 557–65, 2011.

16. TANAKA, H. Technology for Cleaning of Molten Steel in Tundish. ISIJ International, v. 34, n. 11, p. 868-75, 1994.
17. MCLEAN, A. Some Perspectives on the Quest for Steel Quality. ISIJ International, v. 36, p. S10-S13, 1996.
18. NAKANISH, K. Japanese State of the Art Continuous Casting Process. ISIJ International. v. 36, p. S14-S17, 1996.
19. MARUKAWA, K.; HARA, S. ; SANO, M. Prospect for Innovative Steel-making Process in the Forth- coming Century. ISIJ International, v. 41, p. S36-S4, 2001.
20. MAZUMDAR, D., et al. Reduction of Tundish Skull and Yield Improvement in Steel Plants Through Physical Modeling of Steelmaking Tundish Systems. Transactions of Indian Institute of Metals, v.64, n. 6, p. 593–605, 2011.
21. BRUCKHAUS, R.; FANDRICH, R. Trends in Steelmaking 2012. Indian Institute of Metals, Publicado online, 2013.
22. MAZUMDAR, D. Tundish Metallurgy: Towards Increased Productivity and Clean Steel. Transactions of Indian Institute of Metals. Publicado online, 2013.
23. BIELEFELDT, W. V. Estudo do tratamento com cálcio na fabricação do aço SAE 8620. Dissertação de mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2005.
24. BIELEFELDT, W. V., et al. Evolução das inclusões no processamento do aço SAE 8620 via aciaria elétrica. In: Congresso Anual da ABM - Internacional, 59, São Paulo, p. 1020-9, 2004.
25. MARCON, L. Estudo da evolução das inclusões do aço SAE 8620 com o tratamento de inclusões com cálcio em escala laboratorial. Dissertação de mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2007.
26. KIESSLING, R. Non metallic inclusions in steels. vol. I-IV, Londres: Institute of Materials, 1978.
27. MAZUMDAR, D.; GUTHRIE, I. L. R. The physical and mathematical modeling of continuous casting tundish systems. ISIJ Intern., v. 39, n. 6, p. 524-47, 1999.
28. SAHAI, Y.; EMI, T. Melt flow characterization in continuous casting, ISIJ International, v. 36, n. 6, p. 667-72, 1996.
29. 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.

30. BARRETO, J.; BARRN MEZA, M. A.; MORALES R. D. Physical and Mathematical Modeling of Steel Flow and Heat Trans-fer in Tundishes under Non-isothermal and Non-adiabatic Conditions. *ISIJ International*, v. 36, n. 5, p. 543-552, 1996.
31. CHO, M.; KIM C. Simple Tundish Mixing Model of Continuous Casting during a Grade Transition. *ISIJ International*, v. 46, n. 10, p. 1416–20, 2006.
32. MURALIKRISHNA, A.; BAGUI, S.; MAZUMDAR, D. Modeling and Measurements of Intermixing Time in a Water Model of a Four Strand Steelmaking Tundish System. *Trans Indian Inst Met*, v. 66, n. 3, p.281–95, 2013.
33. SAHAI, Y.; EMI, T. Criteria for water modeling of melt flow and inclusion removal in continuous casting tundishes. *The iron and steel institute of Japan international*, v. 36, p. 1166-73, 1996.
34. SAHAI, Y.; AHUJA, R. Fluid dynamics of continuous casting tundishes – Physical Modeling. *Proc. Steelmaking Conf., ISS-AIME, Washington DC*, v. 69, p. 677-87, 1986.
35. SINHA, A. K.; SAHAI, Y. Mathematical modeling of inclusion transport and removal in continuous casting tundishes. *The iron and steel institute of Japan international*, v. 33, p. 556-65, 1993.
36. CHATTOPADHYAY, K.; ISAC, M.; GUTHRIE, R. I. L. Physical and Mathematical Modelling to Study the Effect of Ladle Shroud Mis-alignment on Liquid Metal Quality in a Tundish. *The iron and steel institute of Japan international*, v. 51, p. 759-68, 2011.
37. HOJO, M., et al. Oxide inclusion control in ladle and tundish for producing Clean stainless steel. *The iron and steel institute of Japan international*, v. 36, p. 128-31, 1996.
38. JIN-GANG, L., et al. Water modeling of optimizing tundish flow field. *Journal of iron and steel research*, v. 14, p. 13-9, 2007.
39. JOO, S.; GUTHRIE, R. I. L. Inclusion behavior and heat-transfer phenomena in steelmaking tundish operations Part I. aqueous. *Metallurgical transactions*, v. 24, p. 755-65, 1993.
40. NASCIMENTO, R. P. Remoção de inclusões não-metálicas do aço líquido através do borbulhamento de Argônio pelo fundo distribuidor de lingotamento contínuo da Arcelor Mittal Tubarão. *Dissertação de Mestrado. Ouro Preto: Universidade Federal de Ouro Preto, Out. 2008.*
41. QIANG, Y., et al. Water Modeling of Swirling Flow Tundish for Steel Continuous Casting. *Journal of iron and steel research international*, v. 16, p. 17-22, 2009.

42. ZHANG, M. J., et al. Physical and mathematical modeling of inclusion removal with gas bottom-blowing in continuous casting tundish. *Journal of mining and metallurgy*, v. 47, p. 37-44, 2011.
43. ZHANG, L.; TANIGUSHI, S.; CAI, K. Fluid flow and inclusion removal in continuous casting tundish. *Metallurgical and materials transactions*, v. 31, p. 253-66, 2000.
44. MIKI, Y., et al. Model of inclusion removal during RH degassing of steel. *Iron and Steelmaker*, v. 24, p. 31-8, 1997.
45. SZEKELY, J.; EVANS, J. W.; BRIMACOMBE, J. K. The mathematical and physical modeling of primary metals processing operations. Wiley-Interscience, Nova York, 1988.
46. MAZUMDAR, D.; EVANS, J. W. Modeling of steelmaking process. CRC Press, 2009.
47. SZEKELY, J. Fluid flow phenomena in metals processing. Department of materials science and engineering, Massachusetts Institute of Technology. Academic Press, 1979.
48. FRANÇOIS, M. G.; BOCK, M. L.; VILELA, A. C. F. How to choose a good flow modifier/tundish set in the continuous casting of steel. XXXVII Seminário de aciaria, Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais – ABM, Porto Alegre, p. 388-97, 2006.
49. PEREIRA, J. A. M. et al. Physical and numerical modelling of steel process optimization. *Steel grips*, v. 5, n. 1, 2007.
50. WOLLMANN, A. M. et al. Modelamento Físico do Distribuidor de Lingotamento Contínuo da Aços Finos Piratini. 11º Seminário de Aciaria do IAS, Imprensa Amalevi, Buenos Aires, 1997.
51. PEREIRA, J. A. M. Modelamento físico de uma panela siderúrgica não cilíndrica agitada com gás. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2011.
52. CHIAVERINI, V. Aços e ferros fundidos. 7.ed. SÃO PAULO: ABM, 1996. 599p.
53. CHATTOPADHYAY, K.; ISAC, M. Dimensionless numbers for tundish modelling and the Guthrie number (Gu). *Ironmaking and Steelmaking*, v. 39, p. 273-83, 2012.
54. ROGLER, J. P.; HEASLIP, L. J.; MEHRVAR, M. Inclusion removal in a tundish by gas bubbling. *Canadian Metallurgical Quarterly*, v. 43, p. 407-16, 2004.
55. ROGLER, J. P.; HEASLIP, L. J.; MEHRVAR, M. Physical modelling of inclusion removal in a tundish by gas bubbling. *Canadian metallurgical quarterly*, v. 44, p. 357-68, 2005.

56. ZHANG, M. J., et al. Physical e mathematical modeling of inclusion removal with gas bottom-blowing in continuos casting tundish. *Journal of mining and metallurgy*, v. 47, p. 37-44, 2011.
57. CHO, J.; LEE, H. Cold model study on inclusion removal from liquid steel using fine gas bubbles. *The iron and steel institute of Japan international*, v. 41, p. 151-7, 2001.
58. KIM, H. Modelling Of Transport Phenomena In A Delta-Shaped, Four-Strand Tundish , Tese de Doutorado, Department of Mining, Mineral, and Material Engineering McGill University, Montreal, 2003.
59. ZHANG, Q. Y., WANG, L. T., XU, Z. R. A new method of removing inclusions in molten steel by injecting gas from shroud. *The iron and Steel Institute of Japan international*, v. 46, p. 1177-82, 2006.
60. SESHADRI, V., et al. A physical modelling study of inclusion removal in tundish using inert gas curtain. *Tecnologia em metalugia, materiais e mineração*, v. 9, p. 22-9, 2012.
61. ZHANG, L.; TANIGUSHI, S.; CAI, K. Fluid flow and inclusion removal in continuous casting tundish. *Metallurgical and materials transactions*, v. 31, p. 253-66, 2000.
62. TANAKA, H., et al. Quantitative analysis of contamination of molten steel in tundish. *The iron and steel institute of Japan international*, v. 33, p. 1238-43, 1993.
63. ROGLER, J. P.; HEASLIP, L. J.; MEHRVAR, M. Inclusion removal in a tundish by gas bubbling. *Canadian Metallurgical Quarterly*, v. 43, p. 407-16, 2004.
64. CHAKRABORTY, A. Development of an on-line aqueous particle sensor to study the performance of inclusions in a 12 tonne. *Dissertação de Mestrado*. Montreal: McGill University, 2010.
65. MILLMAN, S.; UNITED KINGDOM, C. Clean steel - Basic features and operating practices, IISI study on Clean Steel: State of the Art and Process Technology in Clean Steelmaking, Literature survey, IISI Committee on Technology (TECHCO), international Iron and Steel Institute, p. 39-60, 2004.
66. CHATTOPADHYAY, K.; ISAC, M.; GUTHRIE, R. I. L. Effect of submergence depth of the ladle shroud on liquid steel quality output from a delta shaped four strand tundish. *Ironmaking and Steelmaking*, v. 38, n. 5, p. 398-400, 2011
67. CHATTOPADHYAY, K., et al. Effect of vertical alignment of ladle shroud on transient steel quality output from multistrand tundish. *Ironmaking and Steelmaking*, v. 38, n. 2, p. 113-7, 2011..

68. SINGH, S.; KORIA, S. C. Model Study of the Dynamics Flow of Steel Melt in the Tundish. *ISIJ International*, v. 33, n. 12, p. 1228-37, 1993.
69. 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. 784-93, 1994.
70. MADIAS, J., et al. Design and Plant Experience Using an Advanced Pouring Box to Receive and Distribute the Steel in a Six Strand Tundish. *ISIJ International*, v. 39, n. 8, p. 787-94, 1999.
71. KUMAR, A.; MAZUMDAR, D.; KORIA, S. C. Experimental Validation of Flow and Tracer-Dispersion Models in a Four-Strand Billet-Casting Tundish. *Metallurgical and Materials Transactions*, v. 36B, p. 777-85, 2005.
72. ZHENG, S.; ZHU, M. Y. Optimization of baffles in six strand round bloom continuous casting tundish: a physical modelling study. *Ironmaking and Steelmaking*, v. 33, n. 5, p. 398-406, 2006.
73. KUMAR, A. Modeling of Fluid Flow and Residence Time Distribution in a Four-strand Tundish for Enhancing Inclusion Removal. *ISIJ International*, v. 48, n. 1, p. 38-47, 2008.
74. LIU, S., et al. Hydrodynamic and Mathematical Simulations of Flow Field and Temperature Profile in an Asymmetrical T-type Single-strand Continuous Casting Tundish. *ISIJ International*, v. 48, n. 12, p. 1712-21, 2008.
75. WANG, Y., et al. Numerical and Experimental Analysis of Flow Phenomenon in Centrifugal Flow Tundish. *ISIJ International*, v. 49, n. 10, p. 1542-50, 2009.
76. YANG, S., et al. Structure Optimization of Horizontal Continuous Casting Tundishes Using Mathematical Modeling and Water Modeling. *ISIJ International*, v. 49, n. 10, p. 1551-60, 2009.
77. MERDER, T.; WARZECHA, M. Optimization of a Six-Strand Continuous Casting Tundish: Industrial Measurements and Numerical Investigation of the Tundish Modifications. *Metallurgical and Materials Transactions*, v. 43B, p. 173-85, 2012.
78. RAMIREZ, R., et al. Characterisation of non-ideal flow behavior in continuous casting tundish. *Canadian Metallurgical Quarterly*, v. 52, n. 2, p. 166-74, 2013.
79. RAMOS-BANDERAS, A., et al. Mathematical simulation and modeling of steel flow with gas bubbling in trough type tundishes. *The iron and steel institute of Japan international*, v. 43, p. 653-62, 2003.
80. RAY, S. K.; ISAC, M.; GUTHRIE, R. I. L. Modelling performance of four-strand, 12 t, delta shaped continuous casting tundish fitted with different flow

- modifying arrangements for better steel quality. *Ironmaking and Steelmaking*, v. 38, p. 173-80, 2011.
81. FAN, C. M.; SHIE, R. J.; WANG, W. S. Studies by mathematical and physical modelling of fluid flow and inclusion removal phenomena in slab tundish for casting stainless steel using various flow control device designs. *Ironmaking and Steelmaking*, v. 30, p. 341-7, 2003.
 82. HOU, Q., et al. Modelling of Inclusion Motion and Flow Patterns in Swirling Flow Tundishes with Symmetrical and Asymmetrical Structures. *ISIJ International*, v. 48, n. 6, p. 787–92, 2008.
 83. WANG, F.; LI, B.; TSUKIHASHI, F. Large Eddy Simulation on Flow Structure in Centrifugal Flow Tundish. *ISIJ International*, v. 47, n. 4, p. 568–73, 2007.
 84. HOU, Q.; ZOU, Z. Comparison between Standard and Renormalization Group K- ϵ Models in Numerical Simulation Flow Tundish. *ISIJ International*, v. 45, n. 3, p. 325–30, 2005.
 85. KUMAR, D. S., et al. Forced flotation of inclusions in tundish. *Ironmaking and Steelmaking*, v. 36, p. 400-75, 2009.
 86. WANG, L.; LEE, H.; HAYES, P. A new approach to molten steel refining using fine gas bubbles. *The iron and steel institute of Japan international* v. 36, p. 17-24, 1996.
 87. ZHENG, X.; HAYES, P. C.; LEE, H. Particle removal from liquid phase using fine gas bubbles. *The iron and steel institute of Japan international* v. 37, p. 1091-7, 1997.
 88. ZHANG, L.; TANIGUSHI, S. Fundamentals of inclusion removal from liquid steel by bubble flotation. *International materials reviews*, v. 45, p. 59-82, 2000.
 89. CHATTOPADHYAY, K. Modeling of Transport Phenomena for Improved Steel Quality in a Delta Shaped Four Strand Tundish, *Mining and Materials Engineering McGill University, Montreal*, 2011.
 90. DAOUD, I. L. A., et al. Aplicação da técnica PIV em um modelo físico de distribuidor de lingotamento contínuo de aço. *Proceedings of ENCIT 2004 -- ABCM, Rio de Janeiro, Brazil, Nov. 29 -- Dec. 03, 2004*.
 91. LOWRY, M. I.; 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. 960-7, 1991.
 92. WOLMANN, A. M. Estudos de fluxo em um distribuidor de lingotamento contínuo. *Dissertação de Mestrado. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e Materiais – PPGE3M, 1999*.

93. FRANÇOIS, M. B. G.; BOCK, M. L. ; MATTIELLO, M. A. Z.; VILELA, A. C. F. Contribuição ao entendimento das curvas de determinação de tempos característicos(DTR) e dos volumes característicos em modelos físicos de distribuidor de lingotamento contínuo. 15^o Conferencia de Aceria, Instituto Argentino de Siderurgia - IAS, San Nicolás/Argentina, 2005.
94. BADARACO, R. L., et al. Simulação e validação de um modelo numérico de escoamento para distribuidor de lingotamento contínuo. XXXIV Seminário de Fusão, Refino e Solidificação dos Metais, Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais –ABM, Belo Horizonte/MG, 2003.
95. LEVENSPIEL, O. The Chemical Reactor Omnibook, OSU Book Stores, Inc., Corvallis, Oregon, 1996.

APÊNDICE A - Medidas do modelo físico do distribuidor e barreiras e posicionamento do tubo longo e barreiras no modelo

Figura 43. Medidas do modelo físico do distribuidor nas vistas frontal, lateral e superior.

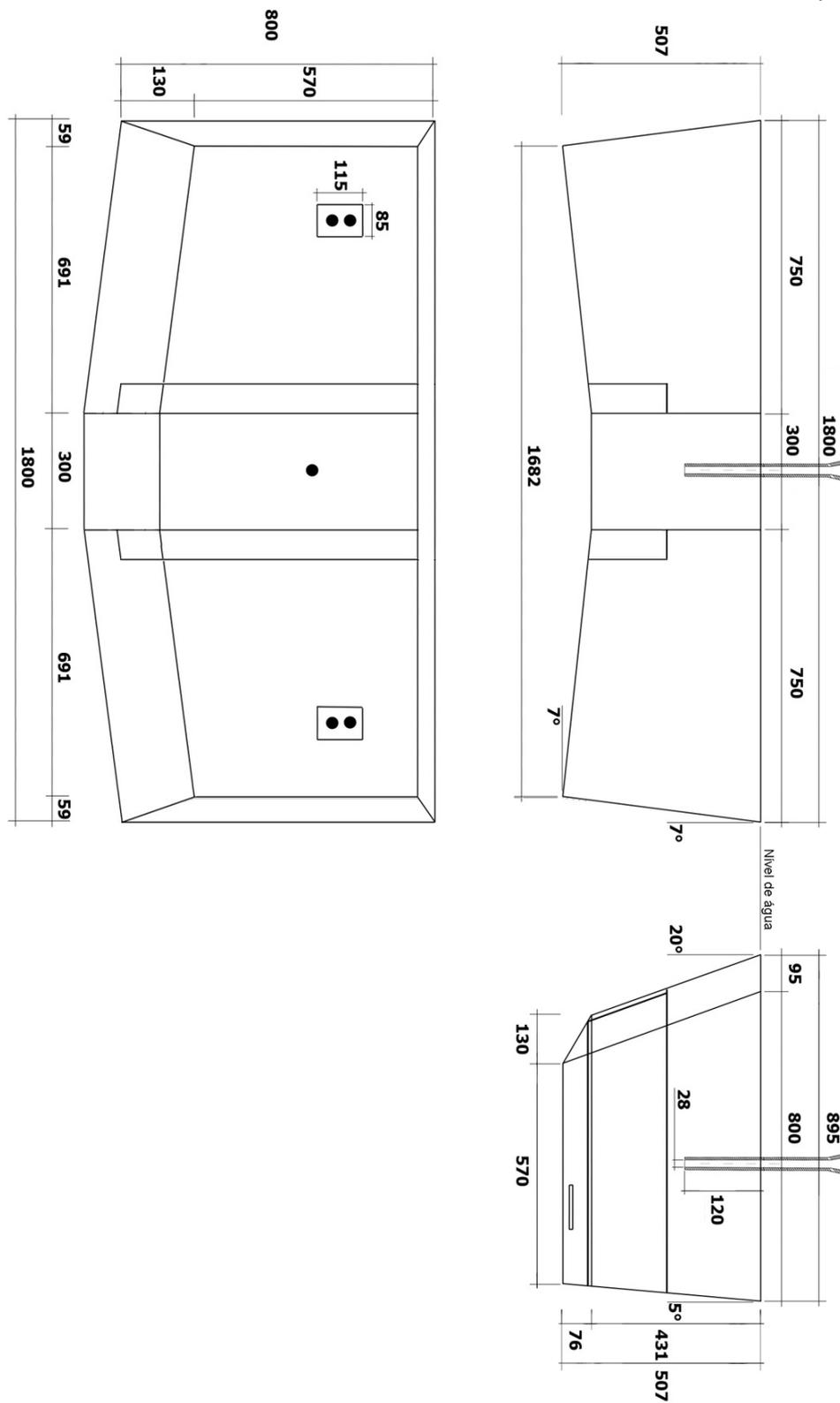
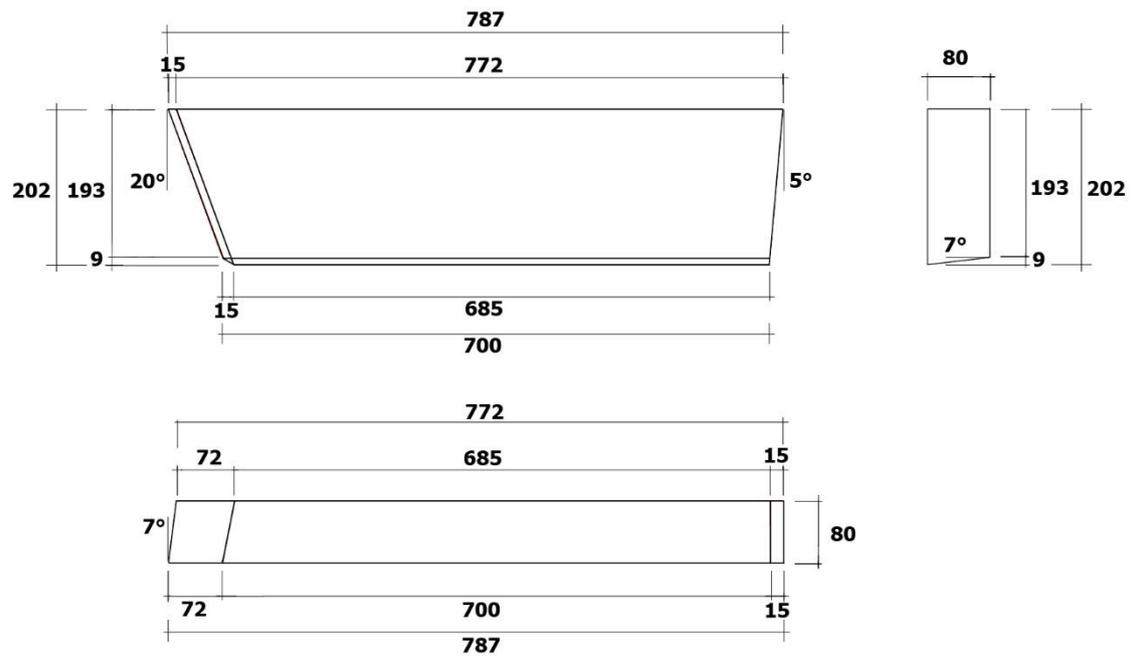


Figura 44. Medidas das barreiras nas vistas frontal, lateral e superior.

APÊNDICE B - Sistemas de injeção, leitura de condutividade e captura de partículas via peneira metálica

Figura 45. Sistema de injeção do modelo físico.



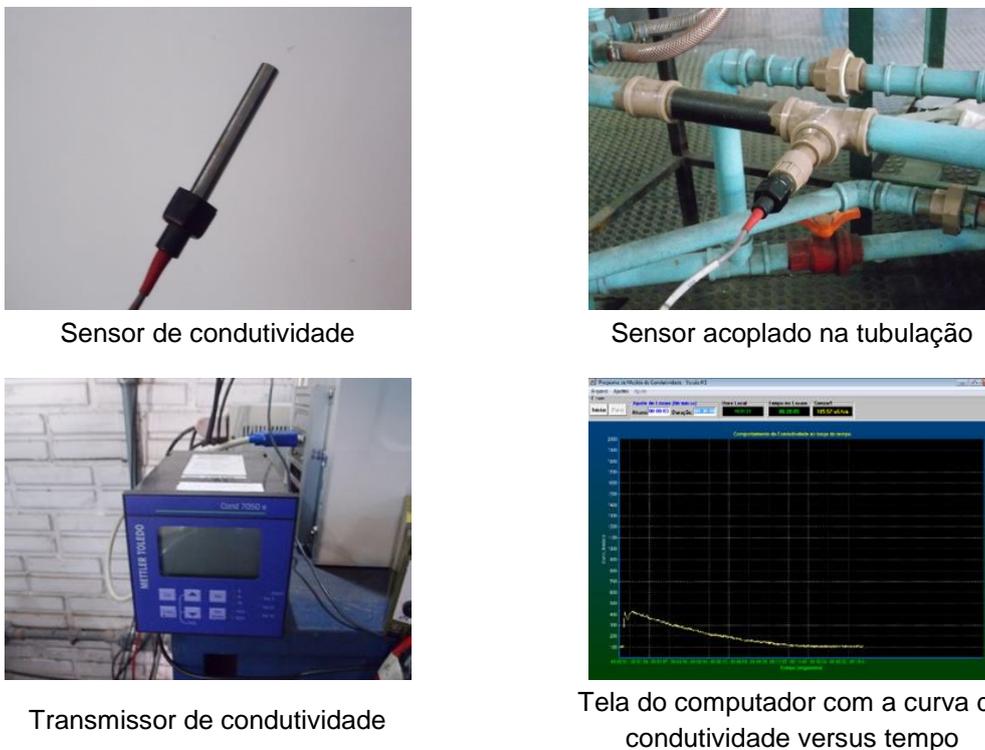
Injeção

Válvula conectora da injeção



Injeção acoplada na tubulação do modelo físico

Figura 46. Sistema de leitura de condutividade do modelo físico



Sensor de condutividade

Sensor acoplado na tubulação

Transmissor de condutividade

Tela do computador com a curva de condutividade versus tempo

Figura 47. Sistema de captura de partículas via peneira metálica do modelo físico.



Filtro



Câmara do filtro



Filtro acoplado à câmara



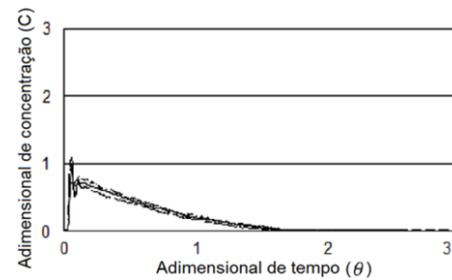
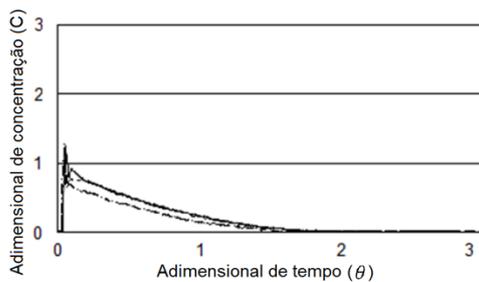
Sistema de captura de partículas acoplado à tubulação

APÊNDICE C – Análise da repetitividade dos ensaios de distribuição de tempos de residência

A repetitividade dos ensaios de distribuição de tempos de residência pode ser observada nas curvas DTR apresentadas na Figura 48 e Figura 49. Em gráfico são plotadas as três repetições mais a curva média de cada condição de ensaio. Nota-se que os resultados de repetitividade são satisfatórios frente ao efeito de ruído presente em cada ensaio. Comparados ao trabalho de Wollmann A. M. (1999)⁹², os resultados das curvas de distribuição de tempos de residência apresentam repetitividade similar.

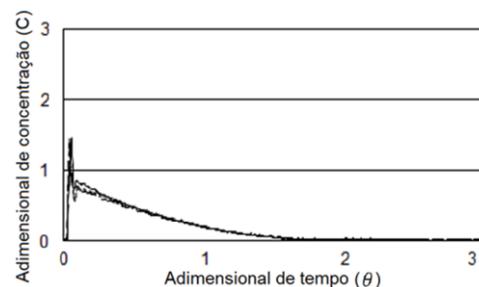
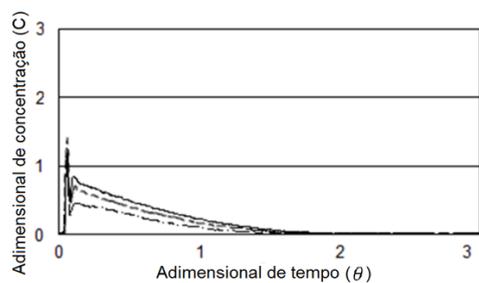
Figura 48. Repetitividade das curvas de distribuição de tempos de residência para as configurações testadas neste trabalho

Sem tubo longo e sem barreiras - 1,8 m/min Sem tubo longo e sem barreiras - 2,2 m/min



Sem tubo longo e sem barreiras - 2,6 m/min

Sem tubo longo e com barreiras - 1,8 m/min



Sem tubo longo e com barreiras - 2,2 m/min

Sem tubo longo e com barreiras - 2,6 m/min

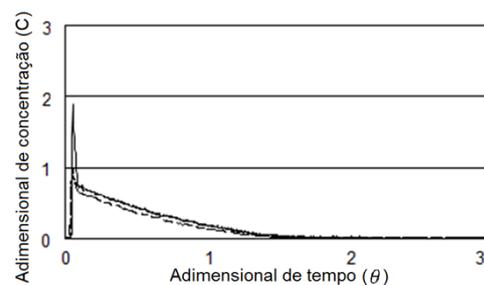
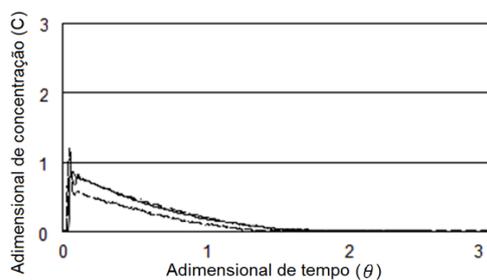
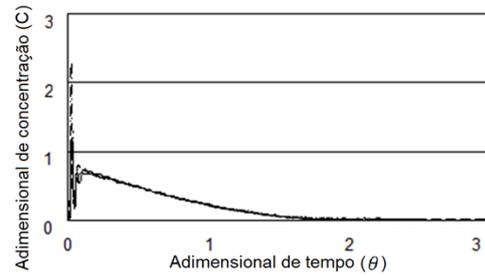
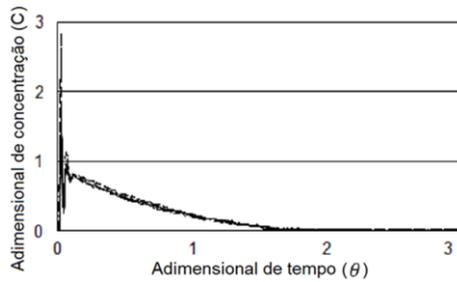


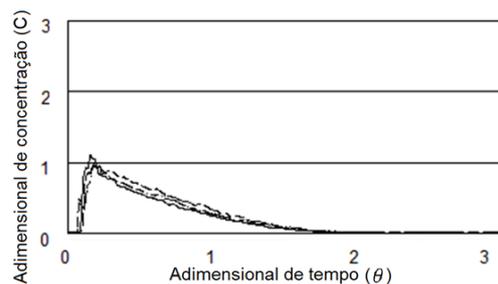
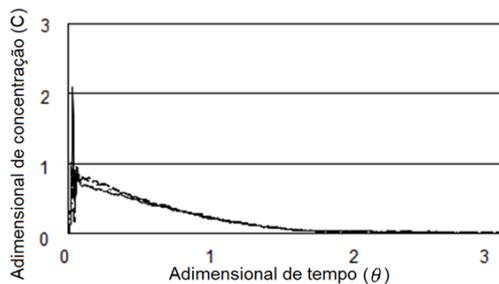
Figura 49. Repetitividade das curvas de distribuição de tempos de residência para as configurações testadas neste trabalho (continuação).

Com tubo longo e sem barreiras – 1,8 m/min Com tubo longo e com barreiras – 2,2 m/min



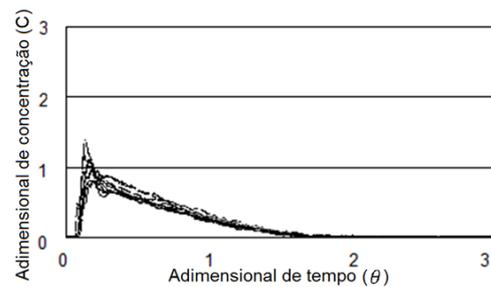
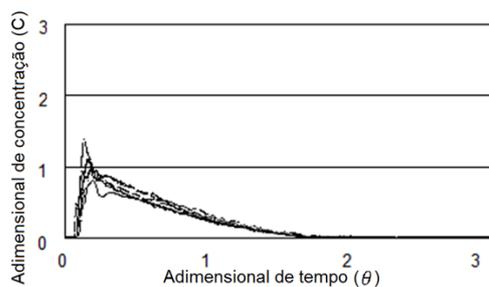
Com tubo longo e sem barreiras – 2,6 m/min

Com tubo longo e com barreiras – 1,8 m/min



Com tubo longo e com barreiras - 2,2 m/min

Com tubo longo e com barreiras - 2,6 m/min



Para todos os ensaios de DTR são quantificados o tempo médio de residência (Equação 11), o tempo mínimo de residência e a variância (Equação 12). Todos os resultados realizados estão organizados na Tabela 19, onde são apresentados os valores médios, desvios-padrão e coeficientes de variação (CV) para todos os parâmetros aplicados em cada configuração de ensaio. Além disso, os valores de CV maiores do que 20% são grifados em cinza.

A Tabela 19 mostra que os resultados, em grande maioria, apresentam baixo desvio-padrão em relação à média das repetições dos ensaios (coeficiente de variação - CV). Os maiores valores de CV estão associados a variância da configuração sem tubo longo e sem barreiras e o tempo mínimo da configuração com tubo longo e sem barreiras.

Tabela 19. Média, desvio-padrão e coeficiente de variação (CV) dos resultados dos tempos de residência e variância. Os CVs maiores do que 20% são grifados em cinza.

		Sem tubo longo e sem barreiras						Sem tubo longo e com barreiras					
Velocidade de lingotamento	Adimensional de tempo médio de residência						Adimensional de tempo médio de residência						
	R. 1	R. 2	R. 3	Média	Desvio	CV	R. 1	R. 2	R. 3	Média	Desvio	CV	
1,8 m/min	0,54	0,54	0,47	0,52	0,04	7,69%	0,51	0,51	0,47	0,49	0,02	4,08%	
2,2 m/min	0,56	0,48	0,53	0,52	0,04	7,69%	0,54	0,44	0,49	0,49	0,05	10,20%	
2,6 m/min	0,56	0,54	0,45	0,52	0,06	11,54%	0,49	0,46	0,50	0,48	0,02	4,17%	
		Tempo mínimo de residência (s)						Tempo mínimo de residência (s)					
		R. 1	R. 2	R. 3	Média	Desvio	CV	R. 1	R. 2	R. 3	Média	Desvio	CV
1,8 m/min		20,15	24,05	18,85	21,02	2,71	12,88%	20,80	18,85	20,15	19,93	0,99	4,98%
2,2 m/min		15,93	19,00	18,00	17,64	1,57	8,87%	21,24	15,93	18,05	18,41	2,67	14,52%
2,6 m/min		16,00	17,00	14,78	15,93	1,11	6,97%	16,13	17,92	14,78	16,28	1,57	9,67%
		Variância						Variância					
		R. 1	R. 2	R. 3	Média	Desvio	CV	R. 1	R. 2	R. 3	Média	Desvio	CV
1,8 m/min		0,167	0,154	0,13	0,15	0,019	12,67%	0,138	0,161	0,114	0,138	0,023	16,67%
2,2 m/min		0,184	0,118	0,142	0,148	0,033	22,30%	0,164	0,115	0,124	0,135	0,026	19,26%
2,6 m/min		0,173	0,24	0,11	0,174	0,065	37,36%	0,139	0,11	0,132	0,127	0,016	12,60%
		Com tubo longo e sem barreiras						Com tubo longo e com barreiras					
Velocidade de lingotamento	Adimensional de tempo médio de residência						Adimensional de tempo médio de residência						
	R. 1	R. 2	R. 3	Média	Desvio	CV	R. 1	R. 2	R. 3	Média	Desvio	CV	
1,8 m/min	0,54	0,54	0,51	0,53	0,02	3,77%	0,58	0,62	0,60	0,60	0,02	3,33%	
2,2 m/min	0,57	0,57	0,55	0,56	0,01	1,79%	0,59	0,62	0,53	0,58	0,04	6,90%	
2,6 m/min	0,59	0,55	0,55	0,56	0,02	3,57%	0,58	0,63	0,55	0,59	0,04	6,78%	
		Tempo mínimo de residência (s)						Tempo mínimo de residência (s)					
		R. 1	R. 2	R. 3	Média	Desvio	CV	R. 1	R. 2	R. 3	Média	Desvio	CV
1,8 m/min		11,70	16,90	9,10	12,57	3,97	31,60%	52,00	44,85	57,85	51,57	6,51	12,63%
2,2 m/min		12,21	7,97	6,90	9,03	2,81	31,13%	49,91	41,95	44,07	45,31	4,12	9,10%
2,6 m/min		7,17	8,06	7,17	7,47	0,52	6,93%	34,94	31,81	41,22	35,99	4,79	13,31%
		Variância						Variância					
		R. 1	R. 2	R. 3	Média	Desvio	CV	R. 1	R. 2	R. 3	Média	Desvio	CV
1,8 m/min		0,171	0,166	0,153	0,163	0,029	17,79%	0,16	0,151	0,147	0,152	0,007	4,61%
2,2 m/min		0,183	0,184	0,191	0,186	0,004	2,15%	0,138	0,146	0,12	0,135	0,013	9,63%
2,6 m/min		0,246	0,179	0,18	0,202	0,038	18,81%	0,138	0,173	0,128	0,146	0,024	16,44%

APÊNDICE D – Determinação do modelo de escoamento para o ensaio de distribuição tempos de residência

Neste trabalho são estudados diferentes modelos de escoamento, apresentados por Levenspiel, O. (1996)⁹⁵, com o intuito de escolher o modelo que melhor se adapte ao distribuidor deste estudo. Os três modelos, segundo os requisitos apresentados pelo autor, podem ser aplicados ao distribuidor: modelo de dispersão, modelo de tanques em série e modelo de compartimentos.

O modelo de dispersão qualifica o escoamento dos reatores não ideais (ou reais) baseado em dois escoamentos considerados ideais (reatores pistonado e mistura). Este modelo mostra o quão próximo o escoamento do reator está de um reator pistonado, mistura ou de um intermediário dos dois. A identificação do escoamento ocorre por meio do cálculo do adimensional de dispersão (D/uL) que dita a taxa de dispersão do reator. Para valores próximos do infinito, o reator possui um escoamento de mistura e para valores próximos de zero é caracterizado um escoamento pistonado. Isso pode ser visto na Figura 50 das curvas de DTR com diferentes adimensionais de dispersão para vasos fechados.

Segundo Levenspiel, O. (1996)⁹⁵, o método aconselhável para a determinação do adimensional de dispersão com alto desvio do escoamento pistonado ($D/uL > 0,01$) é via vaso fechado. Onde, um sistema de vaso fechado é caracterizado quando a injeção e as aferições de resultados (condutividade, por exemplo) são realizadas em estreitas tubulações de escoamento turbulento. Caso ao qual, o modelo empregado neste estudo se encontra. Assim, pode-se quantificar o adimensional de dispersão por meio da equação 14.

$$\sigma_{\theta}^2 = 2 \left(\frac{D}{uL} \right) - 2 \left(\frac{D}{uL} \right)^2 [1 - e^{-uL/D}] \quad (14)$$

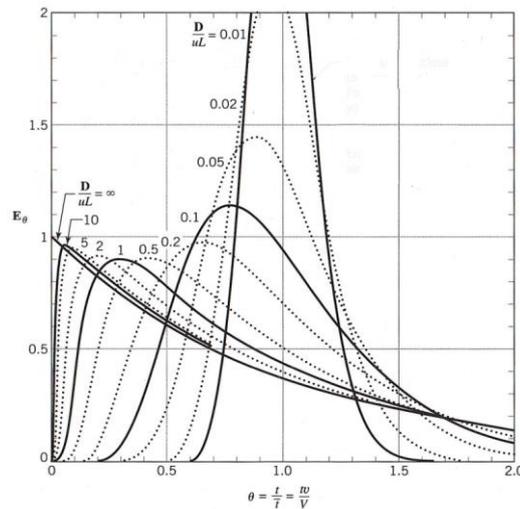
Onde:

D : Coeficiente de dispersão (m²/s);

u : Velocidade do escoamento (m/s)

L : Comprimento característico (m).

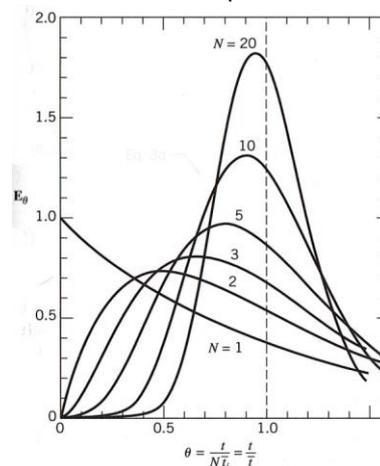
Figura 50. Adimensionais de dispersão para curvas DTRs para vaso fechado com baixo e alto desvio do escoamento pistonado.



Fonte: Levenspiel, O. (1996)^(9b).

O método de tanques em série é bastante similar aos resultados do modelo de dispersão. Esse modelo representa o escoamento do reator por meio do número de tanques dispostos em série (N). Logo, um reator que apresenta o escoamento de $N=1$ possui comportamento de um reator de mistura e os reatores que apresentam um maior valor de N , como $N=20$ possuem comportamento próximo de um reator pistonado. A representação das curvas DTRs em função do número de tanques em série é mostrada na Figura 51.

Figura 51. Número de tanques em série para curvas DTRs com baixo e alto desvio do escoamento pistonado.



Fonte: Levenspiel, O. (1996)⁽⁹⁵⁾.

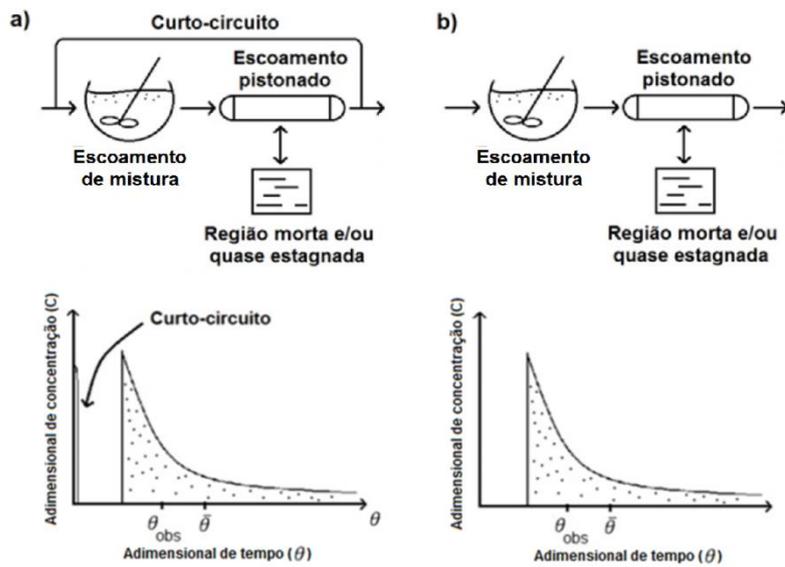
O cálculo do número de tanques em série (N) para experimentos em que a injeção é realizada na forma de pulso é dado pelo inverso da variância adimensional (σ_{θ}^2) da curva DTR, conforme pode ser visto na equação 15.

$$\sigma_{\theta}^2 = \frac{1}{N} \quad (15)$$

Com o foco na remoção de inclusões do distribuidor, o escoamento deve apresentar maior proporção de pistonado possível frente ao escoamento de mistura e menores zonas mortas. O volume pistonado auxilia no direcionamento das inclusões para a escória e diminui a turbulência no distribuidor na proporção em que se diminui o escoamento de mistura. A menor turbulência melhora a estabilidade da interface aço/escória e diminui a formação de novas inclusões. Portanto, quanto menor é o valor de adimensional de dispersão (D/uL) e maior é o valor do número de tanques em série (N), melhor é o escoamento sob o ponto de vista da remoção de inclusões. Visto que o inverso, ou seja, o aumento do adimensional de dispersão e a diminuição do número de tanques em série faz com que o escoamento do reator se afaste do escoamento pistonado ideal, se aproxime de um reator de mistura e aumente a cauda da curva DTR (aumento de zonas mortas).

O modelo de compartimentos divide o reator em volumes característicos, como: volume pistonado disperso, volume de curto-circuito, volume morto e volume de mistura. Esses volumes são quantificados por meio da aplicação de equações após a análise da curva DTR para saber qual método de cálculo a ser empregado. Inúmeras combinações dos escoamentos ideais (pistonado e mistura) podem ser utilizadas para representar os reatores reais e existem diferentes métodos de cálculo para cada um. Dentre as combinações apresentadas por Levenspiel, O. (1996)⁹⁵, o distribuidor pode ser representado por duas combinações mostradas na Figura 52. O adimensional do tempo de residência médio observado (θ_{obs}) também é representado e, como pode ser observado, é menor que o adimensional do tempo de residência médio ($\bar{\theta}$). Isso ocorre devido a existência da região morta e/ou quase estagnada.

Figura 52. Dois modelos de compartimentos aplicados ao distribuidor e suas respectivas curvas de DTRs para os respectivos escoamentos com (a) e sem curto-circuito (b)



O distribuidor é representado por um reator de mistura em série com um reator pistonado associado a uma região “morta” e/ou de escoamento quase estagnado. Pode haver a ocorrência de curto-circuito que na curva DTR é mostrado como um pico estreito no início da curva. Esses escoamentos no distribuidor podem ser quantificados por meio do modelo de compartimentos. O método de cálculo empregado para a quantificação das frações de volumes do reator, conforme o método de cálculo apresentados por François, M. B. G. (2005)⁹³ são apresentados a seguir nas equações 16 a 19.

$$V_{pd}(\%) = \frac{(\theta_{min} + \theta_{Cm\acute{a}x})}{2} \times 100 \quad (16)$$

$$V_d(\%) = 100 - \left[\left(\sum_{\theta=0}^{\theta=2} C_i \Delta \theta_i \right) \cdot \left(\frac{\sum_{\theta=0}^{\theta=2} C_i \theta_i}{\sum_{\theta=0}^{\theta=2} C_i} \right) \right] \quad (17)$$

$$V_{cc}(\%) = \left(\sum_{\theta=0}^{\theta=t_{cc}} C_i \theta_i \right) \times 100 \quad (18)$$

$$V_m(\%) = 100 - V_p - V_{cc} - V_d \quad (19)$$

Onde:

C_i : Adimensional de concentração de traçador no instante i ;

θ_{min} : Adimensional de tempo do instante em que o traçador aparece na saída do distribuidor;

$\theta_{Cmáx}$: Adimensional de tempo do instante em que a curva DTR atinge seu valor máximo de concentração;

t_{cc} : Instante de tempo em que é identificado o final do curto-circuito na curva DTR (h).

Os resultados da aplicação dos modelos de dispersão e tanques em série são mostrados na Tabela 20 e os resultados do modelo de compartimento são apresentados na Tabela 21. Em ambas as tabelas encontram-se as respectivas médias, desvios-padrão e coeficientes de variação dos resultados. Os cálculos de adimensional de dispersão para curvas DTR com alto desvio do escoamento pistonado e vaso fechado são realizados por meio da aplicação da Equação 14. O modelo de tanques em série é aplicado com a Equação 15. Para ambos os modelos, a variância utilizada nos cálculos encontra-se na Tabela 19. Os cálculos para o modelo de compartimento são realizados com as equações 16 a 19.

Tabela 20. Resultados do modelo de dispersão e tanques em série para as configurações estudadas neste trabalho.

Velocidade de lingotamento	Sem tubo longo e sem barreiras						Sem tubo longo e com barreiras					
	Modelo de dispersão - Adimensional de dispersão (D/uL)						Modelo de dispersão - Adimensional de dispersão (D/uL)					
	R. 1	R. 2	R. 3	Média	Desvio	CV	R. 1	R. 2	R. 3	Média	Desvio	CV
1,8 m/min	0,092	0,084	0,07	0,082	0,011	13,41%	0,075	0,089	0,061	0,075	0,014	18,67%
2,2 m/min	0,103	0,063	0,077	0,081	0,02	24,69%	0,09	0,062	0,067	0,073	0,015	20,55%
2,6 m/min	0,096	0,140	0,059	0,091	0,031	31,53%	0,076	0,058	0,072	0,068	0,009	13,24%
	Modelo de tanques em série – Número de tanques						Modelo de tanques em série – Número de tanques a					
	R. 1	R. 2	R. 3	Média	Desvio	CV	R. 1	R. 2	R. 3	Média	Desvio	CV
1,8 m/min	6,00	6,48	7,71	6,73	0,88	13,09%	7,23	6,20	8,73	7,39	1,28	17,27%
2,2 m/min	5,44	8,47	7,05	6,98	1,51	21,67%	6,10	8,66	8,04	7,60	1,33	17,56%
2,6 m/min	5,79	4,16	9,06	6,34	2,49	39,35%	7,17	9,11	7,55	7,95	1,03	12,95%
Velocidade de lingotamento	Com tubo longo e sem barreiras						Com tubo longo e com barreiras					
	Modelo de dispersão - Adimensional de dispersão (D/uL)						Modelo de dispersão - Adimensional de dispersão (D/uL)					
	R. 1	R. 2	R. 3	Média	Desvio	CV	R. 1	R. 2	R. 3	Média	Desvio	CV
1,8 m/min	0,094	0,091	0,084	0,09	0,009	10,00%	0,088	0,082	0,08	0,083	0,004	4,82%
2,2 m/min	0,102	0,103	0,107	0,104	0,003	2,88%	0,075	0,079	0,064	0,073	0,008	10,96%
2,6 m/min	0,144	0,1	0,1	0,114	0,025	21,93%	0,075	0,096	0,069	0,08	0,014	17,50%
	Modelo de tanques em série – Número de tanques						Modelo de tanques em série – Número de tanques					
	R. 1	R. 2	R. 3	Média	Desvio	CV	R. 1	R. 2	R. 3	Média	Desvio	CV
1,8 m/min	5,86	6,04	6,52	6,14	0,34	5,50%	6,26	6,63	6,81	6,57	0,28	4,28%
2,2 m/min	5,47	5,44	5,24	5,38	0,13	2,34%	7,23	6,86	8,34	7,48	0,77	10,27%
2,6 m/min	4,06	5,88	5,56	5,07	0,87	17,13%	7,23	5,77	7,84	6,94	1,06	15,32%

Observação: Os coeficientes de variação (CV) maiores do que 20% são grifados em cinza.

Ao analisar a Tabela 20, Tabela 21 e Tabela 22, os modelos de dispersão e tanques em série não apresentaram o mesmo grau de sensibilidade que o modelo de compartimentos. Dado que os coeficientes de variação em média nesses modelos apresentam 16,22 e 14,35%, respectivamente. Enquanto que o modelo de compartimentos apresenta 11,80% (Tabela 11). Isso ocorre por que os modelos de dispersão e tanques em série não consideram, por exemplo, a existência de curto-circuito no escoamento sem tubo longo e com barreiras. Quando comparados ao modelo de compartimentos, é mais vantajoso comparar os volumes característicos calculados via análise das características da curva DTR do que comparar com um valor que avalia a curva DTR de um modo geral (variância), caso dos modelos de dispersão e tanques em série.

Portanto, o modelo de dispersão não é aconselhado a sua utilização quando as curvas DTR apresentarem forte desvio curva DTR (a) apresentada na Figura 52, ao contrário do foi afirmado por Sahai, Y.; Emi, T. (1996)²⁸. O modelo de escoamento escolhido para aplicação nos ensaios de distribuição de tempos de residência é o modelo de compartimentos, cuja metodologia é apresentada na subseção 4.3.

Tabela 21. Resultados do modelo de compartimentos para as configurações estudadas neste trabalho.

	Sem tubo longo e sem barreiras						Sem tubo longo e com barreiras					
Velocidade de lingotamento	Fração de volume de Mistura (Vm)						Fração de volume de Mistura (Vm)					
	R. 1	R. 2	R. 3	Média	Desvio	CV	R. 1	R. 2	R. 3	Média	Desvio	CV
1,8 m/min	41,1%	44,4%	33,7%	39,8%	5,5%	13,82%	32,3%	32,3%	27,3%	30,6%	2,9%	9,48%
2,2 m/min	42,4%	34,7%	41,1%	39,4%	4,1%	10,41%	36,0%	21,2%	36,0%	31,0%	8,5%	27,42%
2,6 m/min	42,2%	35,5%	30,5%	36,1%	5,9%	16,37%	27,1%	23,3%	32,4%	27,6%	4,6%	16,67%
	Fração de volume Pistonado (Vp)						Fração de volume Pistonado (Vp)					
	R. 1	R. 2	R. 3	Média	Desvio	CV	R. 1	R. 2	R. 3	Média	Desvio	CV
1,8 m/min	9,0%	7,9%	8,4%	8,4%	0,5%	5,95%	9,6%	8,8%	9,6%	9,3%	0,4%	4,30%
2,2 m/min	7,9%	9,7%	9,7%	9,1%	1,0%	10,99%	10,1%	10,0%	7,5%	9,2%	1,5%	16,30%
2,6 m/min	9,2%	10,2%	10,2%	9,8%	0,6%	6,10%	9,8%	10,6%	8,9%	9,8%	0,8%	8,16%
	Fração de volume Morto (Vd)						Fração de volume Morto (Vd)					
	R. 1	R. 2	R. 3	Média	Desvio	CV	R. 1	R. 2	R. 3	Média	Desvio	CV
1,8 m/min	46,8%	46,2%	52,8%	48,6%	3,7%	7,61%	49,8%	50,5%	53,1%	51,1%	1,8%	3,52%
2,2 m/min	47,0%	51,7%	47,6%	48,7%	2,6%	5,34%	47,9%	57,1%	50,8%	52,0%	4,7%	9,04%
2,6 m/min	45,7%	49,3%	54,8%	49,9%	4,6%	9,22%	51,4%	54,2%	50,3%	52,0%	2,0%	3,85%
	Fração de volume de Curto-circuito (Vcc)						Fração de volume de Curto-circuito (Vcc)					
	R. 1	R. 2	R. 3	Média	Desvio	CV	R. 1	R. 2	R. 3	Média	Desvio	CV
1,8 m/min	3,1%	1,5%	5,0%	3,2%	1,8%	56,25%	8,4%	8,4%	10,0%	8,9%	0,9%	10,11%
2,2 m/min	2,7%	3,9%	1,7%	2,8%	1,1%	39,29%	6,0%	11,6%	5,7%	7,8%	3,3%	42,31%
2,6 m/min	3,0%	5,0%	4,6%	4,2%	1,1%	26,19%	11,6%	11,9%	8,3%	10,6%	2,0%	18,87%
	Relação Vp/Vd						Relação Vp/Vm					
	R. 1	R. 2	R. 3	Média	Desvio	CV	R. 1	R. 2	R. 3	Média	Desvio	CV
1,8 m/min	0,19	0,17	0,16	0,17	0,02	11,76%	0,19	0,17	0,18	0,18	0,01	5,56%
2,2 m/min	0,17	0,19	0,2	0,19	0,02	10,53%	0,21	0,18	0,15	0,18	0,03	16,67%
2,6 m/min	0,2	0,21	0,19	0,2	0,01	5,00%	0,19	0,2	0,18	0,19	0,01	5,26%

Observação: Os coeficientes de variação (CV) maiores do que 20% são grifados em cinza.

Tabela 22. Resultados do modelo de compartimentos para as configurações estudadas neste trabalho (continuação).

Velocidade de lingotamento	Com tubo longo e sem barreiras						Com tubo longo e com barreiras					
	Fração de volume de Mistura (Vm)						Fração de volume de Mistura (Vm)					
	R. 1	R. 2	R. 3	Média	Desvio	CV	R. 1	R. 2	R. 3	Média	Desvio	CV
1,8 m/min	31,1%	31,2%	25,1%	29,1%	3,5%	12,03%	44,4%	48,1%	46,2%	46,2%	1,9%	4,11%
2,2 m/min	31,4%	37,1%	28,2%	32,2%	4,5%	13,98%	45,3%	47,1%	42,0%	44,8%	2,6%	5,80%
2,6 m/min	30,4%	27,8%	34,0%	30,7%	3,1%	10,10%	45,4%	48,4%	43,2%	45,7%	2,6%	5,69%
	Fração de volume Pistonado (Vp)						Fração de volume Pistonado (Vp)					
	R. 1	R. 2	R. 3	Média	Desvio	CV	R. 1	R. 2	R. 3	Média	Desvio	CV
1,8 m/min	11,5%	11,0%	11,5%	11,3%	0,3%	2,65%	12,1%	12,7%	13,4%	12,7%	0,7%	5,51%
2,2 m/min	13,1%	10,3%	11,8%	11,7%	1,4%	11,97%	13,3%	13,8%	11,1%	12,7%	1,4%	11,02%
2,6 m/min	11,0%	13,5%	10,0%	11,5%	1,8%	15,65%	11,4%	11,9%	11,4%	11,6%	0,3%	2,59%
	Fração de volume Morto (Vd)						Fração de volume Morto (Vd)					
	R. 1	R. 2	R. 3	Média	Desvio	CV	R. 1	R. 2	R. 3	Média	Desvio	CV
1,8 m/min	46,0%	47,6%	49,8%	47,8%	1,9%	3,97%	43,6%	39,2%	40,3%	41,0%	2,3%	5,61%
2,2 m/min	44,6%	45,2%	46,9%	45,6%	1,2%	2,63%	41,3%	39,2%	46,9%	42,5%	4,0%	9,41%
2,6 m/min	46,3%	46,9%	47,0%	46,8%	0,4%	0,85%	43,0%	39,6%	45,5%	42,7%	2,9%	6,79%
	Fração de volume de Curto-circuito (Vcc)						Fração de volume de Curto-circuito (Vcc)					
	R. 1	R. 2	R. 3	Média	Desvio	CV	R. 1	R. 2	R. 3	Média	Desvio	CV
1,8 m/min	11,4%	10,3%	13,6%	11,8%	1,7%	14,41%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,00%
2,2 m/min	10,9%	7,4%	13,1%	10,5%	2,9%	27,62%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,00%
2,6 m/min	12,2%	11,8%	8,9%	11,0%	1,8%	16,36%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,00%
	Relação Vp/Vd						Relação Vp/Vm					
	R. 1	R. 2	R. 3	Média	Desvio	CV	R. 1	R. 2	R. 3	Média	Desvio	CV
1,8 m/min	0,25	0,23	0,23	0,24	0,01	4,17%	0,28	0,32	0,33	0,31	0,03	9,68%
2,2 m/min	0,29	0,23	0,25	0,26	0,03	11,54%	0,32	0,35	0,24	0,3	0,06	20,00%
2,6 m/min	0,24	0,29	0,21	0,25	0,04	16,00%	0,26	0,3	0,25	0,27	0,03	11,11%

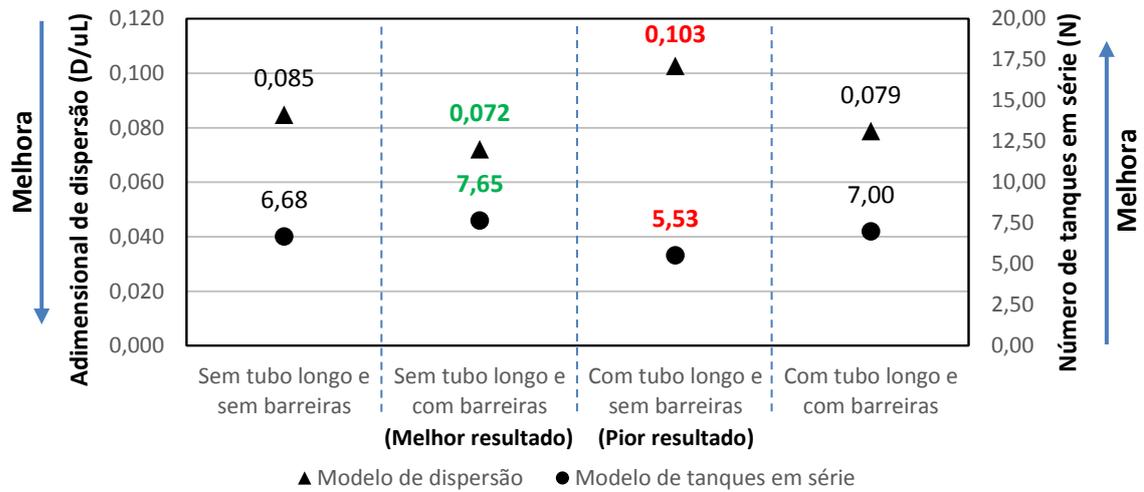
Observação: Os coeficientes de variação (CV) maiores do que 20% são grifados em cinza.

Como exemplo de uma análise equivocada de um escoamento, a seguir é apresentada a análise dos resultados dos modelos de dispersão e tanques em série para as quatro configurações de distribuidor estudadas neste trabalho, desconsiderando a velocidade de lingotamento.

Com base na Figura 53, o melhor resultado obtido é o escoamento da configuração “sem tubo longo e com barreiras” e o pior resultado é a configuração “com tubo longo e sem barreiras”. Entretanto, más interpretações podem ocorrer com a utilização exclusiva dos modelos de dispersão e/ou tanques em série quando aplicados ao distribuidor. Visto que os resultados apresentados na subseção 5.4 indicam a melhor configuração como sendo a configuração sem tubo longo e sem barreiras.

Como informação adicional, a Figura 53 também mostra que os resultados do modelo de dispersão indicam um alto desvio do escoamento pistonado com valores de adimensional de dispersão entre 0,072 e 0,103 ($D/uL > 0,01$). Assim como no modelo de tanques em série, onde os valores para tanques em série são entre 5,53 e 7,65 (alto desvio para $N < 50$).

Figura 53. Resultados do modelo de dispersão e modelo de tanques em série para as configurações estudadas neste trabalho.

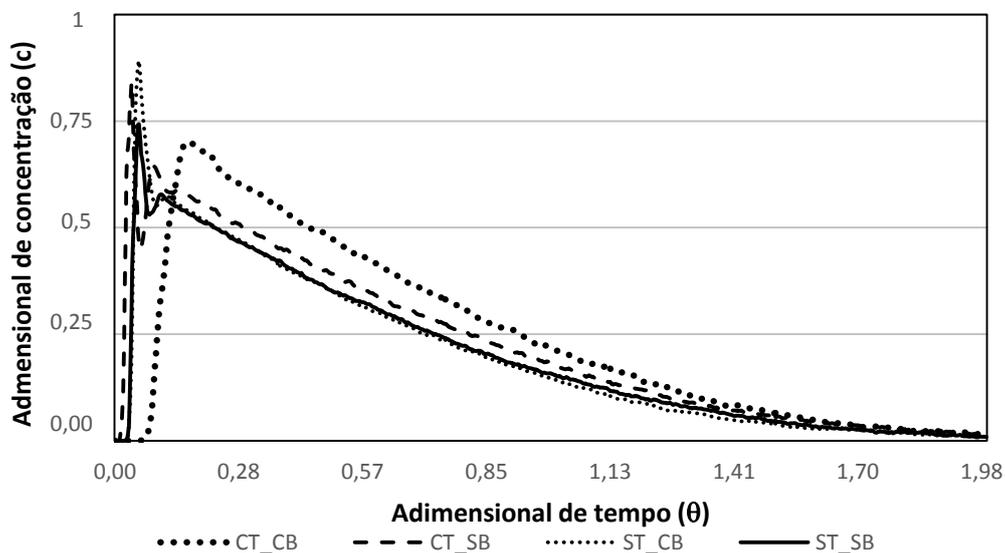


Observação: No gráfico são destacados o melhor (verde) e o pior resultado (vermelho).

APÊNDICE E - Determinação do tempo de ensaio de remoção de inclusões

Na Figura 54 são apresentados os resultados de distribuição de tempos de residência para as quatro configurações: sem tubo longo e sem barreiras; sem tubo longo e com barreiras, com tubo longo e sem barreiras e com tubo longo e com barreiras com o objetivo de determinar o tempo de ensaio de remoção de inclusões.

Figura 54. Curvas de distribuição de tempo de residência (DTR) no modelo do distribuidor para as configurações.



Observação: Com tubo longo e com barreiras (CT_CB); Com tubo longo e sem barreiras (CT_SB); Sem tubo longo e com barreiras (ST_CB); Sem tubo longo e sem barreiras (ST_SB).

Como resultado em todos os casos empregados no modelo do distribuidor (Figura 54), mais de 97,5% do traçador utilizado no ensaio de distribuição de tempo de residência é passante pelo veio em dois tempos de residência teóricos. Portanto, o tempo de duração do ensaio de remoção de inclusões é determinado por dois tempos de residência teóricos (\bar{t}), cujo cálculo é dado pela Equação 1.

Assim, os tempos de ensaio para as três velocidades de lingotamento estudadas (1,8 m/min, 2,2 m/min e 2,6 m/min) são apresentados na Tabela 23. Para os ensaios cuja velocidade de lingotamento é 1,8 m/min, o tempo antes de coletar as partículas passantes pelo veio do distribuidor é igual a 21,52

minutos. Para os ensaios de velocidade 2,2 e 2,6 m/min, os tempos são 17,67 e 14,73 minutos, respectivamente.

Tabela 23. Tempos do ensaio de remoção de inclusões para as velocidades de lingotamento: 1,8 m/min, 2,2 m/min e 2,6 m/min.

Parâmetro	Velocidade de lingotamento		
	1,8 m/min	2,2 m/min	2,6 m/min
Tempo de ensaio (min)	21,52	17,67	14,73

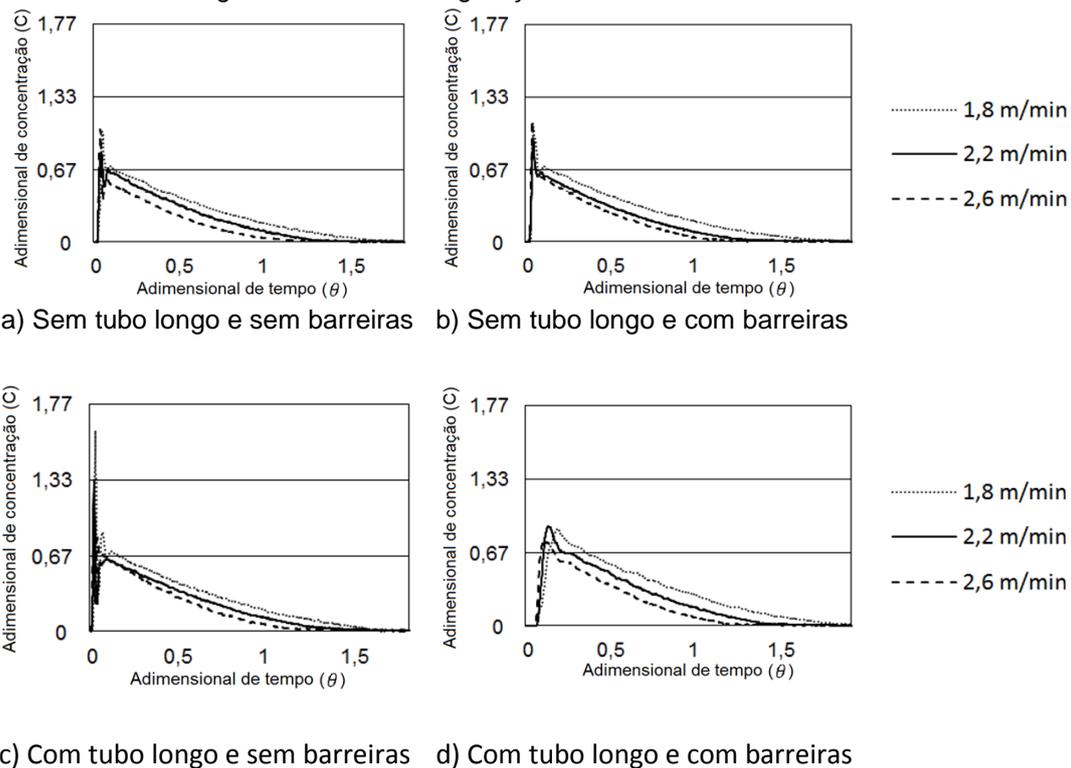
Com o tempo de ensaio em dois tempos de residência garante-se que toda a partícula teve a possibilidade de ser arrastada pelo escoamento até o veio. Também para os casos de diferentes velocidades de lingotamento se consegue manter uma mesma quantidade de fluido passante pelo veio, permitindo a comparação entre essas condições.

Outro motivo para se utilizar esse método de determinação de tempo de ensaio, por meio da análise de curva DTR, atribui-se ao fato de que existem as inclusões reentrantes. Caso este ensaio fosse operado com três tempos de residência como utilizado por Joo, S.; Guthrie, R. I. L (1993)³⁹, Rogler, J. P., et al (2005)⁵⁵ e Zhang, M. J., et al. (2011)⁵⁶, um tempo de residência seria quantificado somente inclusões reentrantes e passantes pelo veio. Aconselha-se que o tempo de ensaio de remoção seja determinado por meio da aplicação do ensaio de distribuição de tempos de residência e o tempo seria determinado quando todo o traçador fosse passante pelo veio.

APÊNDICE F – Efeito da velocidade de lingotamento no ensaio de distribuição de tempos de residência

A Figura 55 mostra que os resultados encontrados nos ensaios de distribuição de tempos de residência (curvas DTR) não mostram o efeito da variação de velocidade de lingotamento. Esse resultado também foi encontrado por Sahai, Y.; Emi, T. (1996)²⁸ e foi discutido que a existência de pequenas variações nas curvas DTR pode ser devido a erros experimentais. Somado a isso, esse comportamento é esperado dado que as curvas DTR são normalizadas em função do tempo de residência teórico do modelo. Assim, a variação da velocidade de lingotamento não deverá apresentar variação na curva DTR.

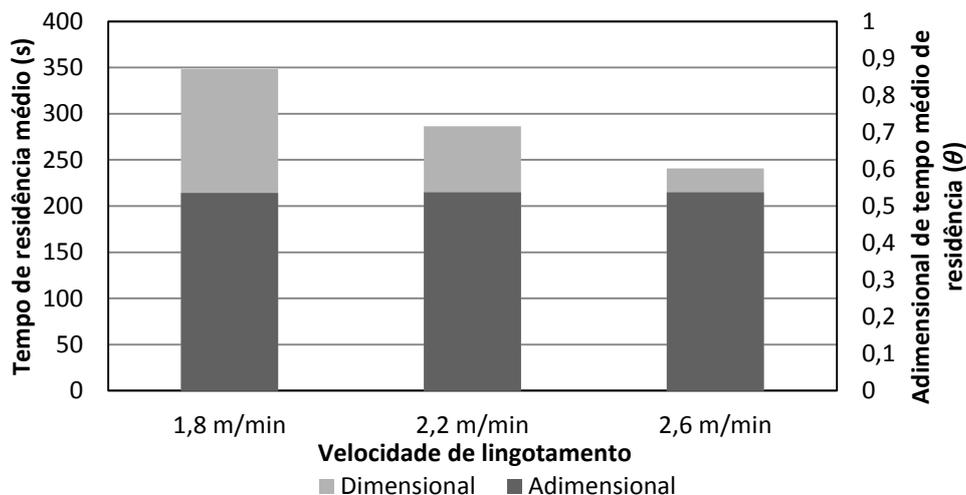
Figura 55. Curvas de distribuição de tempo de residência para diferentes velocidades de lingotamento nas configurações estudadas neste trabalho.



O comportamento da variação de velocidade de lingotamento deve ser visualizado nos parâmetros dimensionais e não nos adimensionais. Logo, os parâmetros obtidos com o ensaio de DTR, como o tempo mínimo de residência e o tempo médio de residência devem ser estudados na forma dimensional do

tempo (segundos, minutos, etc...). Como pode ser visto na Figura 56, o aumento da velocidade de lingotamento não gera variação no adimensional de tempo médio de residência. Ao contrário a este e como é esperado, o tempo de residência médio dimensional diminui com o aumento da velocidade de lingotamento. O mesmo raciocínio deve ser empregado para o tempo mínimo de residência.

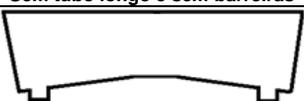
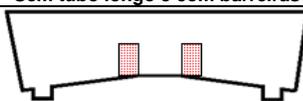
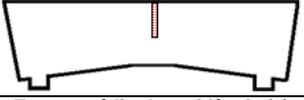
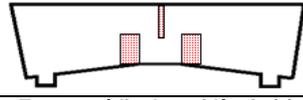
Figura 56. Tempo médio de residência adimensional e dimensional em função da velocidade de lingotamento.



Para o caso do tempo médio de residência, o valor adimensional apresenta maior importância no ensaio de DTR. Visto que ele permite a visualização do desvio deste adimensional frente ao adimensional do tempo de residência teórico igual a um. Lembrando que quanto menor é o adimensional do tempo médio, maior é a existência de volume morto no distribuidor. Devido a isso, os resultados de tempo médio de residência (subseção 5.2.1) são apresentados no modo adimensional. Os tempos médios de residência dimensionais são apresentados na Tabela 24.

No caso do tempo mínimo não há necessidade da utilização do tempo adimensional. Entretanto, o modo dimensional permite confrontar o tempo mínimo com o diâmetro de inclusão crítica calculado pela Lei de Stokes. Assim, pode-se obter um valor crítico para tamanho de inclusões que passam pelo veio do distribuidor sem flatarem e serem capturadas pela escória. Esse é o motivo pelo qual os resultados de tempo mínimo de residência estão apresentados na forma dimensional (subseção 675.2.2).

Tabela 24. Tempo médio de residência para as configurações estudadas neste trabalho.

		Sem tubo longo e sem barreiras						Sem tubo longo e com barreiras						
														
Velocidade de lingotamento	Tempo médio de residência (s)							Tempo médio de residência (s)						
	R. 1	R. 2	R. 3	Média	Desvio	CV	R. 1	R. 2	R. 3	Média	Desvio	CV		
1,8 m/min	351	351	306	335,83	26,27	7,82%	332	332	306	322,83	15,01	4,65%		
2,2 m/min	297	255	281	277,89	21,46	7,72%	287	234	260	260,19	26,55	10,20%		
2,6 m/min	251	242	202	231,47	26,25	11,34%	220	206	224	216,53	9,33	4,31%		
		Com tubo longo e sem barreiras						Com tubo longo e com barreiras						
														
Velocidade de lingotamento	Tempo médio de residência (s)							Tempo médio de residência (s)						
	R. 1	R. 2	R. 3	Média	Desvio	CV	R. 1	R. 2	R. 3	Média	Desvio	CV		
1,8 m/min	351	351	332	344,50	11,26	3,27%	377	403	390	390,00	13,00	3,33%		
2,2 m/min	303	303	292	299,13	6,13	2,05%	313	329	281	307,98	24,33	7,90%		
2,6 m/min	264	246	246	252,37	10,35	4,10%	260	282	246	262,83	18,11	6,89%		

Assim como os tempos adimensionais, as frações de volumes característicos (5.2.3) não apresentam variação em função da mudança da velocidade de lingotamento. Isso ocorre devido a esses valores serem calculados utilizando tempos adimensionais que são função da velocidade de lingotamento. Devido a isso, as frações de volumes característicos foram discutidas sempre em função das médias dos valores de cada velocidade de lingotamento.