

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas

Dissertação de mestrado

"AVALIAÇÃO DO EFEITO DA INJEÇÃO DE GÁS SOBRE A
FLOTAÇÃO DE INCLUSÕES EM UM DISTRIBUIDOR DE
LINGOTAMENTO CONTÍNUO"

Autor: Alexandre de Freitas Gomes de Mendonça

Orientador: Prof. Roberto Parreiras Tavares

Abril/2016

Alexandre de Freitas Gomes de Mendonça

Avaliação do efeito da injeção de gás sobre a flotação de inclusões em um distribuidor de lingotamento contínuo

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito parcial para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas.

Área de concentração: Metalurgia Extrativa.

Orientador: Prof. Roberto Parreiras Tavares.

Belo Horizonte
Universidade Federal de Minas Gerias
Escola de Engenharia
2016

M539a

Mendonça, Alexandre de Freitas Gomes de.

Avaliação do efeito da injeção de gás sobre a flotação de inclusões em um distribuidor de lingotamento contínuo [manuscrito] / Alexandre de Freitas Gomes de Mendonça. – 2016.
xxvi,161 f., enc.: il.

Orientador: Roberto Parreiras Tavares.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia.

Anexos: f.142-161.

Bibliografia: f.134-141.

1. Engenharia metalúrgica - Teses. 2. Metalurgia extrativa - Teses. 3. Aço- Inclusões - Teses. 4. Fundição contínua - Teses. 5. Modelos e construção de modelos - Teses. I. Tavares, Roberto Parreiras. II. Universidade Federal de Minas Gerais. Escola de Engenharia. III. Título.

CDU: 669(043)

Dedico esta obra a
Mel Guimarães, meu projeto maior,
e à memória de meu amado avô
Raimundo de Freitas Castro,
espírito de luz e anjo protetor,
que habita eternamente em meu coração.

AGRADECIMENTOS

O autor agradece em primeiro lugar ao Grande Arquiteto Do Universo, por sua divina permissão, sem a qual este trabalho não seria possível, e a todos aqueles que, direta ou indiretamente, colaboraram para a realização dele, em particular:

- À minha mãe, pelo suporte e altruísmo necessários para sempre seguir em frente;
- À minha esposa e filha, pelo carinho e compreensão em virtude dos momentos de ausência em função dos estudos;
- Ao Professor Roberto Parreiras Tavares, pelo apoio, confiança, coordenação dos estudos e inúmeras contribuições apresentadas ao longo da execução dos trabalhos;
- Aos gestores Adilson Yokishigue Suda e Flávio Viana Dinis Soares, por favorecerem o desenvolvimento técnico-científico de sua equipe;
- Aos engenheiros Hiuller Castro Araujo, Leonardo José de Oliveira Silva, André Afonso Nascimento, Rodrigo Seara Martins, Marlon José dos Anjos Silva e Bernardo Martins Braga, pelo apoio técnico no projeto de estudo;
- Ao técnico Paulo Antônio de Pádua, pela montagem dos aparatos experimentais no Laboratório de Simulação de Processos - LaSiP;
- À equipe de estudantes de graduação em Engenharia Metalúrgica: Felipe Alvarenga Araújo, Laura Oliveira Lamas, Lorena Campolina Milan Lucrécio, Gabriel Novaes da Silva, Melissa Souza de Faria, Daniel Andrade de Jesus, Augusto Luis Almeida Santos, Adrielle Cintra Filgueira e Pedro Henrique da Rocha Silva pelo compromisso durante a realização do modelamento físico;
- Aos amigos Angelo Quintiliano, Carolina Molinari, Homero Sampaio, Maximilian Pera, Priscila Catramby e Luiz Antão, pelos grandes momentos e incentivos;
- A todos ao redor do mundo que incentivam o acesso ao conhecimento livre, por disponibilizarem seus estudos na internet;
- À FAPEMIG, pelo apoio financeiro concedido ao projeto de número de processo TEC-PPM-0118-13, intitulado: “Modelagens Física e Matemática do Escoamento Multifásico em Reatores Metalúrgicos”;
- À CAPES/PROEX, ao programa de pós-graduação PPGEM/UFMG;
- À Universidade Federal de Minas Gerais, ao seu corpo docente e técnico e pela infraestrutura disponibilizada na realização dos experimentos.

SUMÁRIO

	Página
1. INTRODUÇÃO	1
2. OBJETIVOS	3
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	4
3.1. Processo de Lingotamento Contínuo	5
3.2. Distribuidor	5
3.2.1. Efeito dos modificadores de fluxos mecânicos no distribuidor	10
3.3. Influência das Inclusões nas Propriedades do Aço	12
3.4. Mecanismo de Flotação e Separação de Inclusões	17
3.5. Modelamento Físico	24
3.5.1. Modelamento do comportamento de inclusões	27
3.5.2. Transposição da vazão de injeção de gás do modelo para a escala Industrial	33
3.5.3. Modelamento da curva DTR	34
3.6. Diferentes Métodos Utilizados no Ensaio de Remoção de Inclusões Sólidas ...	37
3.7. Método de Quantificação de Inclusões Via Peneira	39
3.8. Método de Quantificação de Inclusões Via Sonda	40
3.8.1. Princípio de funcionamento da LiMCA e APS	42
3.8.2. Equação adotada na LiMCA	43
3.8.3. Circuito eletrônico, técnica de excitação e amplificação de sinal	45
3.8.4. Técnicas de processamento de sinal e aquisição de dados	48
3.8.5. Relato sobre o desenvolvimento da APS, <i>Aqueous Particle Sensor</i>	50
3.8.6. Projeto de nova sonda sensor APS	52
3.8.7. Limite de detecção da APS III	54
4. METODOLOGIA	56
4.1. Modelo Físico	57
4.1.2. Plugue com elemento poroso	59
4.1.3. Sistema de controle e automação do modelo físico	60
4.2. Procedimento Experimental para a Aquisição das Curvas DTR	62
4.3. Sistema da APS III	66
4.3.1. Procedimento experimental para as configurações estudadas com a APS III	68

	Página
4.3.2. Eficiência de remoção de inclusões com a APS III	73
4.4. Caracterização do Escoamento no Modelo Físico	75
4.4.1. Análise das cortinas de gás	75
4.4.2. Análise por colorimetria	76
4.5. Tratamento Estatístico de Dados	77
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	79
5.1. Análise da Cortina de Gás	79
5.1.1. Caracterização qualitativa das cortinas de gás para as vazões de plugue de 1, 2, 3, 4 e 8NI/min	79
5.1.2. Cortinas com deficiência de forma em função de baixa qualidade do plugue poroso	83
5.2. Ensaio com Injeção de Partículas	86
5.2.1. Ensaio sem injeção de gás	86
5.2.2. Ensaio para o distribuidor sem modificadores de fluxo e com injeção de gás	93
5.2.2.1. Volumes característicos	101
5.2.2.2. Relação volume pistonado e volume morto	105
5.2.3. Ensaio para o distribuidor com diques e barragens e com injeção de gás	108
5.2.3.1. Volumes característicos	116
5.2.3.2. Relação volume pistonado e volume morto	118
5.2.4. Efeito do uso de barreiras laterais no distribuidor sobre a eficiência de remoção de inclusões por injeção de gás	120
5.2.5. Efeito da obstrução parcial simétrica e assimétrica no plugue sobre a eficiência de remoção no distribuidor com diques e barragens	122
5.3. Avaliação do Efeito da Injeção de Gás na Granulometria das Partículas	125
5.3.1. Granulometria das partículas dos ensaios com distribuidor sem modificadores de fluxo	125
5.3.2. Velocidade terminal e tempo para flotação natural de partículas	128
5.4. Determinação da Configuração mais Eficiente para Remoção de Inclusões ..	130
6. CONCLUSÃO	131
7. RECOMENDAÇÃO DE TRABALHOS FUTUROS	133
8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	134

	Página
APÊNDICE	142
A.1. Análise granulométrica a laser das partículas de vidro fundido de borossilicato	142
A.2. Curvas DTR para distribuidor sem modificadores de fluxo	144
A.3. Curvas de nível da superfície de resposta dos volumes característicos do distribuidor sem modificadores de fluxo	146
A.4. Curvas DTR para distribuidor com diques e barragens	149
A.5. Análise dimensional da Razão Residual de inclusões (RRI)	151
A.6. Superfícies de respostas dos testes de eficiência de remoção	152
A.7. Resultados de distribuição granulométrica e eficiência de partícula para distribuidor sem e com modificadores de fluxo, e sem injeção de gás	153
A.8. Resultados dos ensaios de eficiência de partícula para distribuidor sem modificadores de fluxo (DT-SMF) com injeção de gás	154
A.9. Resultados dos ensaios de eficiência de partícula para distribuidor com diques e barragens (DT-DB) com injeção de gás	157

LISTA DE FIGURAS

	Página
Figura 3.1: Conjunto de reatores e equipamentos utilizados no processo de lingotamento contínuo (METSOC, 2000)	4
Figura 3.2: Papel do distribuidor, necessidades técnicas e ganho de produtividade (SINGH & KORIA, 1993)	5
Figura 3.3: Distribuidor de lingotamento contínuo com controladores e modificadores de fluxo (SCHADE <i>et al.</i> , 2003)	6
Figura 3.4: Montagem do difusor de argônio no distribuidor (ROGLER <i>et al.</i> , 2004)	8
Figura 3.5: Plugue poroso para injeção de gás em distribuidor (VESUVIUS, 2005)	8
Figura 3.6: Origem das inclusões do aço (NASCIMENTO, 2008)	15
Figura 3.7: Morfologia, composição e tamanhos típicos de inclusões (ZHANG <i>et al.</i> , 2003)	16
Figura 3.8: Indicação de defeito na superfície da chapa causada por alumina (NASCIMENTO, 2008)	16
Figura 3.9: Representação esquemática do distribuidor simples, equipado apenas com difusor de argônio para a remoção de inclusões (ROGLER <i>et al.</i> , 2004)	18
Figura 3.10: Esquema representando os ângulos críticos (ROGLER, 2004)	19
Figura 3.11: Perfil de velocidades do aço no distribuidor (WANG <i>et al.</i> , 2005)	21
Figura 3.12: Distribuição da concentração de inclusões com raio de 20 μ m no distribuidor, após 25 minutos de operação [10^{10} n/m ³] (WANG <i>et al.</i> , 2005)	21
Figura 3.13: Contribuição da adesão entre bolha e partícula na remoção de inclusões (WANG <i>et al.</i> , 2005)	22
Figura 3.14: Efeito do tamanho de bolha sobre a remoção de inclusões (WANG <i>et al.</i> , 2005)	22
Figura 3.15: Efeito do tamanho de inclusão na eficiência de remoção (WANG <i>et al.</i> , 2005)	23
Figura 3.16: Efeito da taxa de injeção de gás inerte na remoção de inclusões (WANG <i>et al.</i> , 2005)	24
Figura 3.17: Representação esquemática da interação entre metal-escória com a injeção de gás (ZHANG <i>et al.</i> , 2006)	24

Figura 3.18: Diagramas de força para o escoamento de partículas (SESHADRI <i>et al.</i> , 2010)	27
Figura 3.19: Relação entre modelo e protótipo industrial para o tamanho de diferentes inclusões (alumina, espinélio e sulfeto de cálcio, CaS) e diferentes massas específicas de partículas de simulação de inclusões	31
Figura 3.20: Parâmetros de uma curva DTR	37
Figura 3.21: Princípio da Zona de Sensibilidade Elétrica (ZSE), CHAKRABORTY (2010)	43
Figura 3.22: Circuito elétrico para corrente de excitação (CHAKRABORTY, 2010)	45
Figura 3.23: Sequência de sinais gerados no aparelho LIMCA (CHAKRABORTY, 2010)	47
Figura 3.24: Analisador de amplitude de pulso (LARSEN, 2005)	49
Figura 3.25: Parâmetros de pico complementares estudados com o processador de sinal digital (CARROZA, 1999)	49
Figura 3.26: Configuração do modelo experimental de água a frio usado por TANAKA (1986)	52
Figura 3.27: Partículas padrões de diâmetro 140 μm (FREIRE, 2011)	53
Figura 3.28: Representação gráfica da medição da APS III (CHAKRABORTY, 2010)	54
Figura 4.1: Vista esquemática do modelo físico com indicação dos medidores de vazão e condutivímetros (TAVARES, 2008)	57
Figura 4.2: Desenho técnico do modelo físico do distribuidor (em mm)	58
Figura 4.3: Modelo físico do distribuidor de lingotamento contínuo	58
Figura 4.4: Plugue com elemento poroso de dimensões (20x150x20)mm	59
Figura 4.5: Rotâmetro analógico, manômetro em U e válvulas agulhas	60
Figura 4.6: Tela do sistema de controle utilizado durante a operação do sistema	61
Figura 4.7: Cartões remotos <i>Ethertrack</i> e <i>switch</i>	62
Figura 4.8: Posicionamento dos sensores de condutividade em cada veio	63
Figura 4.9: Posicionamento simétrico dos plugues no distribuidor para A: 28cm, B: 56cm e C: 84cm, todos em relação a válvula longa	64

	Página
Figura 4.10: Desenho do posicionamento dos diques e barragens (em mm)	65
Figura 4.11: APS III - <i>Aqueous Particle Sensor III</i> (CHAKRABORTY, 2010)	66
Figura 4.12: Interface do programa DASyLab para aquisição de dados da APS III	67
Figura 4.13: Fixação da sonda APS III no saída do distribuidor (a), com detalhe na centralização de seu orifício com a entrada do veio (b)	68
Figura 4.14: Barreiras laterais (a) no distribuidor, e detalhe da contenção (b) na cortina de gás pelas barragens laterais (NASCIMENTO, 2008)	70
Figura 4.15: Plugues com obstrução parcial de (a) 20% simétrico, (b) 40% simétrico, (c) 60% simétrico, (d) 25% simétrico, (e) 50% simétrico e (d) sem obstrução	70
Figura 5.1: Aspecto visual das cortinas de gás para as vazões de 1NI/min (a esquerda) e 2NI/min (a direita)	80
Figura 5.2: Aspecto visual das cortinas de gás para as vazões de 3NI/min (a esquerda) e 4NI/min (a direita)	81
Figura 5.3: Aspecto visual da cortina de gás para a vazão de 8NI/min	82
Figura 5.4: Plugue com trincas (ou "marcas de laminação")	83
Figura 5.5: Aspecto visual das cortinas de gás para as vazões de 1NI/min (a esquerda) e 4NI/min (a direita)	84
Figura 5.6: Comparação da eficiência de remoção de partículas entre as configurações básicas do distribuidor sem injeção de gás	87
Figura 5.7: Imagens da injeção de corante no distribuidor sem modificadores de fluxo e sem injeção de gás, para os instantes 3, 9, 18 e 45s	88
Figura 5.8: Imagens da injeção de corante no distribuidor com diques e barragens e sem injeção de gás, para os instantes 3, 9, 18 e 45s	89
Figura 5.9: Imagens da injeção de corante no distribuidor com inibidor de turbulência e sem injeção de gás, para os instantes 3, 9, 18 e 45s	90
Figura 5.10: Imagens da injeção de corante no distribuidor com diques, barragens e inibidor de turbulência, e sem injeção de gás, para os instantes 3, 9, 18 e 45s	91
Figura 5.11: Comparação da eficiência de remoção de partículas do distribuidor sem diques e barragens, sem e com injeção de gás variando a posição do plugue	94

Figura 5.12: Imagens da injeção de corante no distribuidor sem diques e barragens, com vazão de plugue de 2NI/min a 56cm de afastamento da válvula longa para os instantes 3, 9, 18 e 30s	96
Figura 5.13: Curvas de nível da superfície de resposta para a eficiência de remoção de partículas para distribuidor sem diques e barragens, e com injeção de gás de 1, 2, 3 e 4NI/min para as posições a 28, 56 e 84cm da válvula longa	97
Figura 5.14: Análise de variância para a eficiência de remoção de partículas para as configurações do distribuidor sem diques e barragens, e com injeção de gás de 1, 2, 3 e 4NI/min para as posições a 28, 56 e 84cm da válvula longa	98
Figura 5.15: Análise dos efeitos principais na eficiência de remoção de partículas para as configurações do distribuidor sem diques e barragens, e com injeção de gás de 1, 2, 3 e 4NI/min para as posições a 28, 56 e 84cm da válvula longa	99
Figura 5.16: Análise das Interações entre as vazões de 1, 2, 3 e 4NI/min e as posições de plugue a 28, 56 e 84cm da válvula longa na eficiência de remoção de partículas para o distribuidor sem diques e barragens .	100
Figura 5.17: Médias e intervalos com 95% de confiança para os volumes pistonados do distribuidor sem modificadores de fluxo, sem e com injeção de gás de 1, 2, 3 e 4NI/min para as posições de plugue 28, 56 e 84cm	102
Figura 5.18: Médias e intervalos com 95% de confiança para os volumes mortos do distribuidor sem modificadores de fluxo, sem e com injeção de gás de 1, 2, 3 e 4NI/min para as posições de plugue 28, 56 e 84cm	103
Figura 5.19: Médias e intervalos com 95% de confiança para os volumes de mistura do distribuidor sem modificadores de fluxo, sem e com injeção de gás de 1, 2, 3 e 4NI/min para as posições de plugue 28, 56 e 84cm	104
Figura 5.20: Médias e intervalos com 95% de confiança para a razão V_p/V_m , para distribuidor sem modificadores de fluxo, sem e com injeção de gás de 1, 2, 3 e 4NI/min e para as posições de plugue 28, 56 e 84cm	106

Figura 5.21: Correlação entre a eficiência de remoção de partículas e a razão entre volume pistonado e volume morto (V_p/V_m) para as vazões de 0, 1, 2, 3 e 4NI/min e posição de plugue a 28, 56 e 84cm da válvula longa do distribuidor sem diques e barragens	107
Figura 5.22: Comparação da eficiência de remoção de partículas do distribuidor com diques e barragens, sem e com injeção de gás variando a posição do plugue	109
Figura 5.23: Imagem da injeção de corante no distribuidor com diques e barragens, com vazão de plugue de 3NI/min a 56cm de afastamento da válvula longa para os instantes 3, 9,18 e 30s	111
Figura 5.24: Curvas de nível da superfície de resposta para a eficiência de remoção de partículas para distribuidor sem diques e barragens, e com injeção de gás de 1, 2, 3, 4 e 8NI/min para as posições a 28, 56 e 84cm de plugue da válvula longa	112
Figura 5.25: Análise de variância para a eficiência de remoção de partículas para as configurações do distribuidor com diques e barragens, e com injeção de gás de 1, 2, 3, 4 e 8NI/min para as posições a 28, 56 e 84cm da válvula longa	113
Figura 5.26: Análise dos efeitos principais na eficiência de remoção de partículas para as configurações do distribuidor com diques e barragens, e com injeção de gás de 1, 2, 3, 4 e 8NI/min para as posições a 28, 56 e 84cm da válvula longa	114
Figura 5.27: Análise das Interações entre as vazões de 1, 2, 3, 4 e 8NI/min e as posições de plugue a 28, 56 e 84cm da válvula longa na eficiência de remoção de partículas para o distribuidor com diques e barragens .	115
Figura 5.28: Médias e intervalos com 95% de confiança para volumes pistonados, para distribuidor com diques e barragens, sem e com injeção de gás de 1, 2, 3, 4 e 8NI/min para plugue na posição 56cm	116
Figura 5.29: Médias e intervalos com 95% de confiança para os volumes mortos, para distribuidor com diques e barragens, sem e com injeção de gás de 1, 2, 3, 4 e 8NI/min para plugue na posição 56cm	117
Figura 5.30: Médias e intervalos com 95% de confiança para volumes de mistura, para distribuidor com diques e barragens, sem e com injeção de gás de 1, 2, 3, 4 e 8NI/min para plugue na posição 56cm	118

Figura 5.31: Médias e intervalos com 95% de confiança para a razão entre volume pistonado e volume morto (V_p/V_m), para distribuidor com diques e barragens, sem e com injeção de gás de 1, 2, 3, 4 e 8NI/min para plugue na posição 56cm	119
Figura 5.32: Correlação entre a eficiência de remoção de partículas e a razão entre volume pistonado e volume morto (V_p/V_m) para as vazões de 0, 1, 2, 3, 4 e 8NI/min e posição de plugue a 56cm da válvula longa do distribuidor com diques e barragens	120
Figura 5.33: Comparação da eficiência de remoção de inclusões entre os ensaios sem e com uso de moldura, para o distribuidor com diques e barragens, vazões de 1, 2, 3 e 4NI/min e posição de plugue a 56cm da válvula longa	121
Figura 5.34: Avaliação da eficiência de remoção de inclusões para plugue com obstrução simétrica de 20%, 40% e 60%, e assimétrica de 25% e 50%, para o distribuidor com diques e barragens, vazão de 4NI/min e posição de plugue a 28cm da válvula longa	124
Figura 5.35: Comportamento da distribuição granulométrica para o ensaio off-line e do distribuidor sem diques e barragens, sem e com injeção de gás de 1, 2, 3 e 4NI/min para as posições a 28, 56 e 84cm da válvula longa	126
Figura 5.36: Comportamento da distribuição granulométrica do retido acumulado para o ensaio off-line e do distribuidor sem diques e barragens, sem e com injeção de gás de 1, 2, 3 e 4NI/min, para as posições de plugue a 28, 56 e 84cm da válvula longa	127
Figura 5.37: Comportamento da velocidade terminal e do tempo natural para flotação de partículas de dimensões de 20 a 140 μ m no modelo físico	129
Figura 5.38: Coeficiente de remoção de inclusões (r_m) para flotação natural das partículas de dimensões entre 20 a 140 μ m no modelo físico	130

	Página
Figura A.1: Laudo da verificação da distribuição granulométrica acumulada das partículas da norma ASTM C169 aplicadas nos testes	142
Figura A.2: Valores acumulados característicos do tamanho de partícula	143
Figura A.3: Curva DTR para o distribuidor sem modificadores de fluxo e sem injeção de gás	144
Figura A.4: Curvas DTR para distribuidor sem modificadores de fluxo e com cortina de gás com vazão de 1NI/min para as posições de plugue 28, 56 e 84cm	144
Figura A.5: Curvas DTR para distribuidor sem modificadores de fluxo e com cortina de gás com vazão de 2NI/min para as posições de plugue 28, 56 e 84cm	145
Figura A.6: Curvas DTR para distribuidor sem modificadores de fluxo e com cortina de gás com vazão de 3NI/min para as posições de plugue 28, 56 e 84cm	145
Figura A.7: Curvas DTR para distribuidor sem modificadores de fluxo e com cortina de gás com vazão de 4NI/min para as posições de plugue 28, 56 e 84cm	145
Figura A.8: Curvas de nível da superfície de resposta dos volumes pistonados para distribuidor sem modificadores de fluxo, com injeção de gás de 1 a 4NI/min, e variando a posição de plugue entre 28 a 84cm	146
Figura A.9: Curvas de nível da superfície de resposta dos volumes mortos para distribuidor sem modificadores de fluxo, com injeção de gás de 1 a 4NI/min, e variando a posição de plugue entre 28 a 84cm	147
Figura A.10: Curvas de nível da superfície de resposta dos volumes de mistura para distribuidor sem modificadores de fluxo, com injeção de gás de 1 a 4NI/min, e variando a posição de plugue entre 28 a 84cm	148
Figura A.11: Curvas de nível da superfície de resposta da razão entre o volume pistonado (V_p) e o volume morto (V_m), para distribuidor sem modificadores de fluxo, com injeção de gás de 1 a 4NI/min, e variando a posição de plugue entre 28 a 84cm	149
Figura A.12: Curvas DTR para distribuidor com cortina de gás com vazão de 1, 2, 3, 4 e 8NI/min, com plugue posicionado a 56cm da válvula longa	150

Figura A.13: Superfície de resposta para a eficiência de remoção de partículas para distribuidor sem diques e barragens, e com injeção de gás de 1, 2, 3 e 4NI/min para as posições a 28, 56 e 84cm da válvula longa	152
Figura A.14: Superfície de resposta para a eficiência de remoção de partículas para distribuidor com diques e barragens, e com injeção de gás de 1, 2, 3,4 e 8NI/min para as posições a 28, 56 e 84cm da válvula longa	152

LISTA DE TABELAS

	Página
Tabela III.1: Típico condicionamento de limpeza do aço para atender a várias aplicações de aço (ZHANG & THOMAS, 2003)	14
Tabela III.2: Propriedades físicas do aço e da água (MAZUMDAR <i>et al.</i> , 1999)	25
Tabela III.3: Números adimensionais e suas definições (SZEKELY <i>et al.</i> , 1988)	25
Tabela III.4: Relações adimensionais entre o modelo (m) e o protótipo (p) obtidas utilizando o número de Froude (NASCIMENTO, 2008)	26
Tabela III.5: Equações de velocidade terminal de partículas em meio fluido com seus respectivos domínios de validade (SESHADRI <i>et al.</i> , 2010)	28
Tabela III.6: Principais características dos modelos físicos de distribuidores e modelos de ensaio utilizados por diversos autores (Machado, 2014)	38
Tabela IV.1: Transposição da distribuição granulométrica das inclusões entre modelo a frio e protótipo industrial	71
Tabela V.1: Eficiência de remoção de partículas para configurações sem injeção de gás	86
Tabela V.2: Eficiência de remoção de partículas para as configurações do distribuidor sem diques e barragens, e com injeção de gás de 1, 2, 3 e 4NI/min para as posições a 28, 56 e 84cm da válvula longa	94
Tabela V.3: Volumes característicos para o distribuidor sem modificadores de fluxo, sem e com injeção de gás de 1, 2, 3 e 4NI/min, para as posições de plugue a 28, 56 e 84cm da válvula longa	101
Tabela V.4: Relação entre o volume pistonado (V_p) e o volume morto (V_m) dos dados experimentais para distribuidor sem modificadores de fluxo, com e sem injeção de gás e variando a posição de plugue	105
Tabela V.5: Eficiência de remoção de partículas para as configurações do distribuidor com diques e barragens, sem e com vazão de gás de 1, 2, 3 e 4NI/min para as posições a 28, 56 e 84cm da válvula longa	108
Tabela V.6: Volumes característicos para distribuidor com dique e barragem, sem e com injeção de gás e plugue na posição 56cm	116
Tabela V.7: Relação entre o volume pistonado (V_p) e o volume morto (V_m) para distribuidor com dique e barragem, com e sem injeção de gás e plugue na posição 56cm	118

Tabela V.8: Eficiência de remoção de partículas para o distribuidor com diques e barragens, e injeção de gás de 1, 2, 3 e 4NI/min, para a posição a 56cm da válvula longa, sem e com moldura	121
Tabela V.9: Eficiência de remoção de partículas para o distribuidor com diques e barragens, injeção de gás de 4NI/min para a posição a 28cm da válvula longa	123
Tabela V.10: Distribuição granulométrica média do retido simples para o ensaio <i>off-line</i> e do distribuidor sem diques e barragens, sem e com injeção de gás de 1, 2, 3 e 4NI/min, posições de plugue a 28, 56 e 84cm da válvula longa	125
Tabela V.11: Distribuição granulométrica média do retido acumulado para o ensaio <i>off-line</i> e do distribuidor sem diques e barragens, sem e com injeção de gás de 1, 2, 3 e 4NI/min, posições de plugue a 28, 56 e 84cm da válvula longa	127
Tabela V.12: Velocidades terminais e tempos para flotação natural para a faixa granulométrica de partículas da APS III	128
Tabela A.1: Valores de volumes pistonados para distribuidor sem modificadores de fluxo, sem e com injeção de gás e variando a posição de plugue	146
Tabela A.2: Valores de volumes mortos para distribuidor sem modificadores de fluxo, com e sem injeção de gás e variando a posição de plugue	147
Tabela A.3: Valores de volumes de mistura para distribuidor sem modificadores de fluxo, sem e com injeção de gás e variando a posição de plugue	148
Tabela A.4: Razão entre o volume pistonado (V_p) e o volume morto (V_m) dos dados experimentais para distribuidor sem modificadores de fluxo, sem e com injeção de gás e variando a posição de plugue	149
Tabela A.5: Volumes característicos e razão entre o volume pistonado (V_p) e o volume morto (V_m) dos dados experimentais para distribuidor com diques e barragens, sem e com injeção de gás para a posição de plugue 56 cm	150
Tabela A.6: Distribuição granulométrica e eficiência de partícula da APS III para distribuidor sem e com modificadores de fluxo, e sem injeção de gás ...	153
Tabela A.7: Distribuição granulométrica e eficiência de partícula da APS III para distribuidor sem modificadores de fluxo, e com injeção de gás a 28cm da válvula longa	154

	Página
Tabela A.8: Distribuição granulométrica e eficiência de partícula da APS III para distribuidor sem modificadores de fluxo, e com injeção de gás a 56cm da válvula longa	155
Tabela A.9: Distribuição granulométrica e eficiência de partícula da APS III para distribuidor sem modificadores de fluxo, e com injeção de gás a 84cm da válvula longa	156
Tabela A.10: Distribuição granulométrica e eficiência de partícula da APS III para distribuidor com diques e barragens, e com injeção de gás a 28cm da válvula longa	157
Tabela A.11: Distribuição granulométrica e eficiência de partícula da APS III para distribuidor com diques e barragens, e com injeção de gás a 56cm da válvula longa	158
Tabela A.12: Distribuição granulométrica e eficiência de partícula da APS III para distribuidor com diques e barragens, e com injeção de gás a 84cm da válvula longa	159
Tabela A.13: Distribuição granulométrica e eficiência de partícula da APS III para distribuidor com diques, barragens, barreiras laterais e com injeção de gás a 56cm da válvula longa	160
Tabela A.14: Distribuição granulométrica e eficiência de partícula da APS III para distribuidor com diques e barragens, e com injeção de gás a 56cm da válvula longa em um plugue com obstrução parcial	161

NOMENCLATURA

A_{DTR}	Área de baixo da curva de distribuição de tempos de residência;
A_m	Área no modelo (m ²);
A_p	Área no protótipo (m ²);
$APS III$	<i>Aqueous Particle Sensor 3</i> ;
$A(s)$	Número de partículas de dimensão 's' que entra no distribuidor por unidade de tempo (partículas/min);
$A(x)$	Representa a área da seção transversal do orifício (m ²);
$B(s)$	Número de partículas de tamanho 's' que sai de um veio do distribuidor por unidade de tempo (partículas/min);
CLP	Controlador Lógico Programável;
C_i	Concentração medida para cada tempo de aquisição dos dados (mols);
$C_{média}$	Concentração média (mols);
C_n	Concentração adimensional;
C_{n_i}	Concentração adimensional para um instante adimensional θ ;
CV	Coefficiente de variação;
d	Diâmetro da partícula (m);
D_o	Diâmetro do orifício (m);
ρ_f	Densidade do fluido (kg/m ³);
ρ_p	Densidade da partícula (kg/m ³);
DOE	<i>Design of Experiments</i> , Projeto de Experimentos;
DP	Desvio padrão;
$DT-DB$	Distribuidor com diques e barragens;
$DT-DBI$	Distribuidor com diques, barragens e inibidor de turbulência;
$DT-I$	Distribuidor com inibidor de turbulência;
$DT-SMF$	Distribuidor sem modificadores de fluxo;
DTR	Distribuição de tempos de residência;
f	Fração do volume da partícula no orifício;
f	Fator de arraste;
$f_{mistura}$	Fração de volume mistura;
f_{morto}	Fração de volume morto;
$f_{pistonado}$	Fração de volume pistonado;
Fr	Número de Froude;
Fr_m	Número de Froude Modificado;

$f(s)$	Fração de tamanho de partícula;
g	Aceleração da gravidade (m/s^2);
Gu	Número adimensional de Guthrie;
H_0	Hipótese nula;
H_1	Hipótese alternativa;
H_{ind}	Altura da coluna de aço no distribuidor industrial (m);
H_{mod}	Altura da coluna de água no modelo físico (m);
h_o	Altura do orifício (m);
I	Corrente elétrica (A);
I	Corrente constante que flui através do orifício (A);
k	Constante física;
L	Comprimento característico (m);
L_m	Comprimento no modelo (m);
L_o	Comprimento geométrico do orifício (m);
L_p	Comprimento no protótipo (m);
m	Modelo;
m_c	Massa de partículas coletas na saída do distribuidor (g);
m_i	Massa de partículas injetada no distribuidor (g);
N_d	Número de partículas detectadas por uma sonda por minuto (partículas/min);
N_{ensaio}	Número de mols de traçador (mols);
$N_{T,inc\ veio}$	Número total de inclusões que saem em um veio por unidade de tempo;
N_{TP}	Número total de partículas que sair no veio;
n_{mi}	Número de partículas presentes no modelo;
n_{pi}	Número de inclusões presentes no protótipo industrial;
N_{pp}	Número de partículas detectadas por ml de polpa;
N_{ps}	Número de partículas por grama de pó seco;
N_{sv}	Número de inclusões que saem através do veio;
N_{ti}	Número total de inclusões adicionadas na válvula longa;
<i>Off-line</i>	Teste em béquer para avaliação da entrada de partículas no distribuidor;
p	Protótipo;
PSD	Processador de sinal digital;
Q_{detec}	Vazão através do detector (m^3/s);
Q_{ind}	Vazão de gás no distribuidor industrial (m^3/s);

Q_m	Vazão no modelo (m^3/s);
Q_{mod}	Vazão de gás no modelo físico (m^3/s);
Q_p	Vazão no protótipo (m^3/s);
Q_{pa}	Densidade de partículas adicionadas na água (g/ml);
Q_T	Vazão total de entrada no distribuidor (m^3/s);
$Q_{T,VL}$	Vazão total na válvula longa (m^3/s);
r	Raio da partícula (m);
R	Resistência elétrica (Ω);
R_B	Resistência <i>Ballast</i> ;
Re	Número de Reynolds;
Re_t	Número de Reynolds turbulento;
r_m	Coefficiente de remoção de inclusões;
r_o	Raio do orifício (m);
RRI	Razão Residual de Inclusões, quantidade de partículas de cada faixa granulométrica que passa pelo veio do distribuidor em relação à adicionada (partículas/s);
$SIER$	<i>Steady-state Inclusion Entrainment Rate</i> , quantidade total de partículas que passam pelo veio no tempo (partículas/s);
T	Temperatura ($^{\circ}C$);
\bar{t}	Tempo de residência teórico (s);
t_{fn}	Tempo para flotação natural de partícula (s);
t_i	Tempo referente a cada aquisição i de condutividade pelo sensor na saída do distribuidor (s);
t_m	Tempo no modelo (s);
t_p	Tempo no protótipo (s);
$TX_{inc\ detec}$	Taxa de inclusões contadas no detector (partículas/s);
\bar{v}	Velocidade média do fluido (m/s);
V	Diferença de potencial (V);
$V_{distribuidor}$	Volume do distribuidor (m^3);
v_m	Velocidade no modelo (m/s);
V_m	Volume no modelo (m^3);
v_p	Velocidade no protótipo (m/s);
V_p	Volume no protótipo (m^3);
v_t	Velocidade terminal da partícula (m/s);
y	Vazão de aspiração através da sonda APS III (ml/min);

ZSE Zona de Sensibilidade Elétrica.

Letras gregas:

α	Erro do tipo I;
α_m	Fator de amplificação do sinal da LiMCA/APS para um meio específico;
β	Erro do tipo II;
$\gamma_{esc,m/água}$	Tensão interfacial escória/água, no modelo (J/m ²);
$\gamma_{esc,m/inc,m}$	Tensão interfacial escória/inclusão no modelo (J/m ²);
$\gamma_{esc,p/aço}$	Tensão interfacial escória/aço, no protótipo (J/m ²);
$\gamma_{esc,p/inc,p}$	Tensão interfacial escória/inclusão no protótipo (J/m ²);
ΔV	Diferença de tensão quando a partícula passa através do orifício (V);
η_r	Eficiência de remoção de partículas;
θ_A	Ângulo crítico de fixação entre bolha e partícula (rad);
θ_C	Ângulo de colisão entre bolha e partícula (rad);
θ_n	Tempo adimensional;
$\bar{\theta}$	Tempo adimensional médio do reator;
λ	Fator de escala entre modelo e protótipo;
μ	Viscosidade dinâmica (Pa·s);
μ_{eff}	Viscosidade efetiva do fluido (Pa·s);
ν	Viscosidade cinemática (m ² /s);
ρ	Massa específica (kg/m ³);
$\rho_{aço}$	Massa específica do aço (kg/m ³);
$\rho_{água}$	Massa específica da água (kg/m ³);
ρ_e	Resistividade elétrica do fluido de trabalho (Ω);
ρ_{eff}	Resistividade elétrica efetiva dentro do orifício (Ω);
$\rho_{esc,m}$	Massa específica da escória no modelo (kg/m ³);
$\rho_{esc,p}$	Massa específica da escória no protótipo (kg/m ³);
ρ_s	Resistividade elétrica da partícula (Ω);
σ	Tensão superficial (N/m).

RESUMO

A produção de aços de alta qualidade interna e superficial exige das empresas siderúrgicas desenvolvimentos de processos produtivos especiais, com alto rigor de controle. Isto é feito para atender a uma demanda de mercado cada vez mais exigente de aplicações de aços com alto desempenho e elevado nível de limpidez.

A aciaria faz uso de diversas técnicas para controle e redução das inclusões não metálicas presentes no aço. Entre elas, destacam-se: o controle do teor de oxigênio nos aços no convertedor, a prática de desoxidação do aço no vazamento, o processo de flotação de inclusões no refino secundário e o uso dos modificadores de fluxos no distribuidor do lingotamento contínuo. Em particular, no distribuidor existem modificadores de fluxo como os diques, barragens e inibidores de turbulência, que podem agregar condições favoráveis à remoção dessas inclusões.

A remoção de inclusões no distribuidor de lingotamento contínuo tem sido intensamente investigada por meio de modelamento físico e matemático. Recentemente, a injeção de gás no distribuidor tem sido considerada como uma alternativa para aprimorar a remoção de inclusões. Vários trabalhos vêm sendo desenvolvidos analisando os efeitos da injeção de gás e sua interação com as inclusões. No entanto, há espaço para mais investigações envolvendo o efeito da vazão do gás, da localização do sistema de injeção de gás e da distribuição das bolhas na eficiência de remoção de inclusões.

Para o presente trabalho foi usado um modelo físico construído em uma escala 1:3 de um distribuidor industrial de 40 toneladas de capacidade nominal, para analisar o efeito da injeção de gás no padrão do fluxo de fluido e na remoção de inclusões. Foi avaliada a eficiência global de remoção de inclusões, na saída do sistema, para diferentes posições e vazões de injeções dos plugues, isso para duas configurações internas específicas do distribuidor, por método *on-line* de contagem de inclusões. Também foram realizados experimentos para a determinação de curvas de distribuição de tempos de residência, DTR, para algumas condições específicas de escoamento. Com isso foi possível confrontar a eficiência de remoção de inclusões efetiva com os parâmetros de escoamento obtidos pelas curvas DTR e caracterizar qual configuração de sistema é mais eficiente para a limpidez do aço.

O estudo comprova que existe melhoria na eficiência de remoção de inclusões do aço líquido para distribuidor com modificadores de fluxo em relação aos sem modificadores. Para a configuração do distribuidor com injeção de gás, novamente tem-se uma melhor eficiência de remoção de inclusões, tanto nas configurações sem e com modificadores de fluxo.

Em linhas gerais, a análise das curvas de distribuição de tempos de residência mostrou que a relação entre o volume pistonado e o volume morto diminuía à medida que a vazão de gás injetada e a eficiência de remoção aumentavam. Desta forma, a análise exclusiva dos volumes característicos do escoamento do distribuidor não é suficiente para concluir qual é a melhor configuração interna do distribuidor objetivando a máxima eficiência de remoção de inclusões.

A melhor eficiência de remoção de inclusões foi para a configuração do distribuidor com diques e barragens, com plugue posicionado a 56cm de afastamento da válvula longa e operando com uma vazão entre 2 e 3NI/min, isso por apresentar uma eficiência de remoção de inclusões de 75%, e por ter um nível de perturbação aceitável na interface metal/escória pelo afloramento do gás.

ABSTRACT

The technological development of steel grades with high internal and superficial quality requires special manufacturing processes with accurate control. This development is aimed at supplying steel products with high mechanical performance and cleanliness level to competitive markets.

The steelmaking industry uses several techniques to control and reduce the effects of non-metallic inclusions in steel. The main control items are the oxygen content of the steel in the converter, practice of steel deoxidation, floatation of inclusions during secondary refining and the use of flow modifiers in the tundish. There are different kinds of flow modifiers, such as weirs, dams and impact pad (turbulence reducing) that can lead to appropriate conditions for inclusion removal.

The removal of inclusions in the continuous casting tundish has been intensively investigated through physical and mathematical modeling. Recently, gas injection in the tundish has been considered as an alternative to improve inclusion removal. Several works have analyzed the effects of the gas injection and its interaction with the inclusions. However, there are opportunities for more investigations regarding the effect of gas flow rate, location of the gas injection system and bubble distribution on the inclusion removal efficiency.

In the present work, a physical model of an industrial tundish with nominal capacity of 40 metric tonnes, built in a 1:3 scale, was used to analyze gas injection and its effect on the fluid flow pattern and inclusion removal. The overall inclusion removal efficiency was evaluated in the system output for different positions and rates of gas injection flow from the plugs, for two specific tundish internal settings, using online inclusions counting method. Also, experiments were carried out to determine residence time distribution curves, RTD, for specific flow conditions. The parameters determined the removal efficiency were compared to the RTD curves to decide which system configuration is more efficient for the cleanliness of the steel.

The study demonstrates that there is improvement in the efficiency of inclusion removal for tundish with flow modifiers compared to tundish without flow modifiers.

Configurations of tundish with gas injection have a better inclusion removal efficiency, in both configurations, without and with flow modifiers.

In general, analysis of residence time distribution curves demonstrated that the ratio between the plug volume and dead volume decreased as the injected gas flow rate and removal efficiency increased. Thus, only the analysis of the characteristic volumes of the tundish is not sufficient to conclude which internal tundish configuration is the best one aiming at maximum efficiency of inclusions removal.

The best inclusion removal efficiency was obtained in a tundish with weir and dam, with plug positioned at 56cm of distance from the ladle shroud and operating with gas flow rate between 2 to 3Nl/min. This configuration presented a removal efficiency of 75%, and has an acceptable disturbance level in the metal/slag interface due to the gas release.

1. INTRODUÇÃO

A aciaria, responsável pela elaboração do aço líquido, possui três etapas principais de processos: refino primário, refino secundário e o lingotamento contínuo. As etapas de refino são responsáveis pelo acerto de composição química, limpidez e ajuste de temperatura dos aços para o lingotamento. Esse último, por sua vez, é responsável pela solidificação do aço líquido de forma controlada, assegurando o atendimento da qualidade interna e superficial do aço sólido.

Em uma condição ideal, é desejável que o aço líquido, após o refino, apresente um nível de inclusões que não comprometa a sua lingotabilidade e, principalmente, a qualidade interna e superficial de produto no final da linha de laminação ou trefilação. Inúmeras técnicas são aplicadas para esse controle nos refinamentos e no lingotamento. No lingotamento, em particular, o distribuidor pode ser projetado para desempenhar esse papel, além das funções originais de reservatório e distribuição do aço líquido.

Para maximizar a oportunidade de flotação de inclusões em um distribuidor, é conveniente inserir modificadores de fluxo em seu interior. Em geral, esses modificadores são estruturas sólidas que atuam como obstáculos físicos e alteram o padrão de escoamento, agregando ao aço melhor resultado de qualidade. Além dos modificadores de fluxo tradicionais, o uso de cortina de gás (SINHA *et al.*, 1993) pode também desempenhar papel similar e favorecer a flotação de inclusões.

Na indústria, a cortina de gás pode ser criada pela colocação de um plugue com elemento poroso na base do distribuidor, que é alimentado pela injeção de um gás inerte, normalmente argônio. O gás argônio, ao se desprender do elemento poroso, cria uma série de bolhas de gás que sobem até a superfície do aço líquido no distribuidor. Durante esse percurso de ascensão, as bolhas que colidirem com as partículas de inclusões não metálicas, poderão aderir a elas, conduzindo-as para a escória do distribuidor em um processo similar ao de flotação (NASCIMENTO, 2008).

Com base nesses fatos, a remoção de inclusões no distribuidor de lingotamento contínuo tem sido intensamente investigada por meio de modelamentos físicos e matemáticos. Recentemente, a injeção de gás no distribuidor tem sido considerada como uma alternativa para aprimorar a remoção de inclusões. Vários trabalhos (MORALES *et al.*, 2003; ROGLER, 2004; SESHADRI *et al.*, 2012; ZHANG *et al.*, 2011)

vêm sendo desenvolvidos analisando os efeitos da injeção de gás e sua interação com as inclusões. No entanto, há espaço para mais investigações envolvendo o efeito da vazão do gás, da localização do sistema de injeção de gás e da distribuição das bolhas ao longo da superfície do plugue na eficiência de remoção de inclusões.

O presente trabalho visou elucidar as mudanças geradas no sistema, submetido à injeção de gás, assim como, determinar a melhor configuração do distribuidor, entre duas geometrias internas submetidas a três possibilidades de posicionamento do plugue poroso para vários níveis de vazão de gás. A eficiência de remoção de inclusões de cada sistema de estudo foi analisada pelo emprego da sonda de contagem de inclusões APS III, *Aqueous Particle Sensor*. As inclusões foram simuladas por esferas de vidro de borossilicato, de tamanho conhecido e vazão de injeção da polpa de inclusões controlada. A sonda APS III fez a contagem *on-line* de inclusões na saída do veio. Adicionalmente, a análise dos volumes característicos foi feita através do levantamento de curvas de distribuição de tempos de residência, DTR (SAHAI e EMI, 1996). Por fim, foram confrontados a eficiência de remoção efetiva com os parâmetros de escoamento obtidos pelas curvas DTR e apontada qual configuração é mais adequada.

2. OBJETIVOS

O presente trabalho tem os seguintes objetivos:

- Avaliar a eficiência da remoção de inclusões em um modelo físico de distribuidor usando o sensor APS III (*Aqueous Particle Sensor*), em regime de altura de coluna d'água constante (estacionário), sem e com uso de modificadores de fluxo sólidos, variando parâmetros de operação como a posição de plugue e a vazão de gás injetada;
- Confrontar os resultados dos volumes característicos de escoamento da curva de distribuição dos tempos de residências (DTR) com os resultados da eficiência de remoção obtidos pelo sensor APS III;
- Identificar, dentre as configurações testadas, a que favorece o melhor resultado em termos de flotação de inclusões no distribuidor.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo serão apresentadas as características do distribuidor de lingotamento contínuo, conceitos relativos à curva de distribuição de tempos de residência e à fundamentação do sensor para contagem de inclusões em meio aquoso, APS III. Para isso, serão apresentados e discutidos estudos realizados por vários autores sobre o modelamento físico em distribuidores pelo uso dessas técnicas.

3.1. Processo de Lingotamento Contínuo

O lingotamento contínuo de aços é considerado como um dos principais desenvolvimentos tecnológicos para a obtenção de produtos siderúrgicos, substituindo os métodos convencionais de lingotamento. Isso em virtude da alta produtividade, excepcional rendimento, excelente qualidade superficial e interna do produto, sem mencionar a enorme capacidade e versatilidade para produzir uma gama imensa de categorias de aço (BARBOSA, 2002).

O lingotamento contínuo de aços consiste essencialmente na utilização de três reatores metalúrgicos: a panela, o distribuidor e o molde. Na Figura 3.1 é apresentado um desenho esquemático do conjunto de reatores e equipamentos utilizados no lingotamento contínuo.

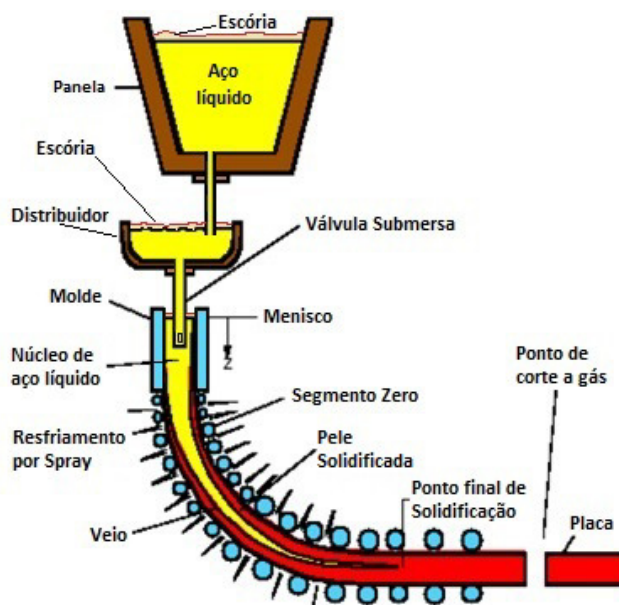


Figura 3.1: Conjunto de reatores e equipamentos utilizados no processo de lingotamento contínuo (METSOC, 2000).

3.2. Distribuidor

O distribuidor, localizado entre a panela e o molde, possui a função primária de servir como um reservatório, suprindo o aço líquido necessário para o molde no intervalo de troca de panelas, além de abastecer continuamente os moldes por meio da distribuição do aço para os veios 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, essas não são as únicas funções do distribuidor, pois ele também pode atuar no controle de inclusões não metálicas no aço líquido. Segundo SINGH & KORIA (1993), esse reservatório deixou sua função básica para servir como um reator metalúrgico. A Figura 3.2 resume as suas funções.



Figura 3.2: Papel do distribuidor, necessidades técnicas e ganho de produtividade (SINGH & KORIA, 1993).

Para uma melhor compreensão do papel do distribuidor, na Figura 3.3 é apresentado um distribuidor de um veio com seus controladores e modificadores de fluxo dentro do contexto da máquina de lingotamento.

- | | |
|-------------------------------|------------------------------------|
| ① Válvula gaveta de panela; | ⑥ Plugue poroso (Difusor de gás); |
| ② Válvula longa (Tubo longo); | ⑦ <i>Baffler</i> ; |
| ③ Inibidor de turbulência; | ⑧ Pó de cobertura; |
| ④ Dique (Barragem superior); | ⑨ Válvula interna de distribuidor; |
| ⑤ Barragem inferior; | ⑩ Tampão. |

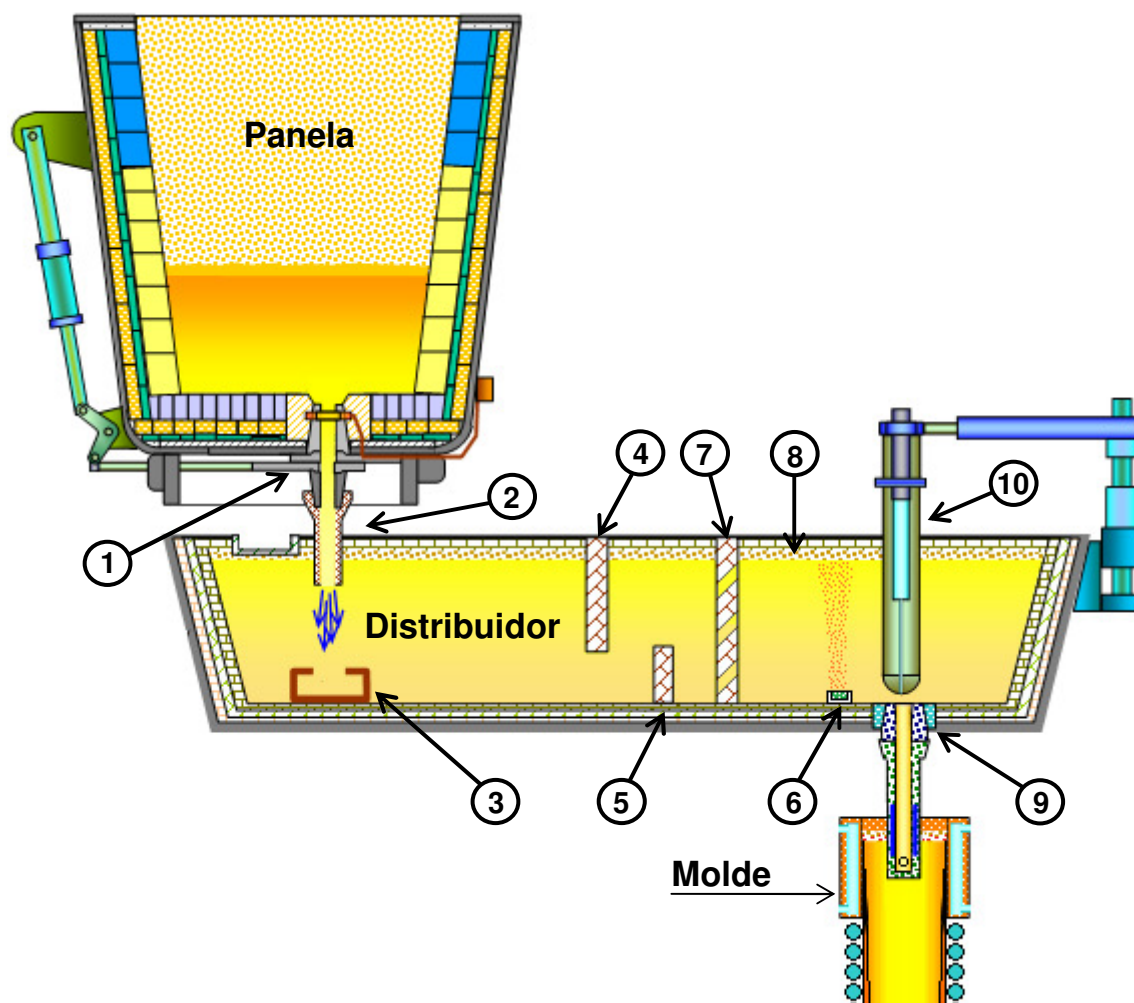


Figura 3.3: Distribuidor de lingotamento contínuo com controladores e modificadores de fluxo (SCHADE *et al.*, 2003).

Para o controle de fluxo do aço do distribuidor para o molde, o tampão pode ser substituído por uma válvula gaveta, similar à usada para controle de fluxo da panela para o distribuidor.

Cada modificador de fluxo apresentado na Figura 3.3 possui funções específicas. A seguir serão apresentados os principais modificadores de fluxo utilizados nos distribuidores das máquinas de lingotamento contínuo que serão alvo desse estudo.

Inibidor de Turbulência:

Este dispositivo é projetado para reorientar o escoamento do fluido em direção à superfície livre do distribuidor objetivando aumentar o escoamento pistonado e controle da turbulência na superfície. Dessa forma ele concentra a dissipação de energia do fluxo de aço advindo da panela, isto favorece:

- A aglomeração de inclusões (formação de *clusters*);
- Redução da perturbação na superfície do aço evitando reoxidação e/ou emulsificação de escória.

Dique (Barragem Superior):

O dique é um tipo de obstáculo ao escoamento direto do aço, que conduz o fluxo de aço do distribuidor a passar por sua abertura na parte inferior. Esse método reduz a passagem de escória de panela para próximo da saída do distribuidor durante o lingotamento e em eventuais reduções do nível de aço, seja na troca de panela, troca de aços incompatíveis (controle de mistura) ou encerramento da operação do distribuidor.

Barragem Inferior:

A barragem inferior também é um tipo de obstáculo ao escoamento que é montada na base do distribuidor, e normalmente após o dique, sempre na ordem: tubo longo, dique, barragem inferior, válvula interna de distribuidor. Ela tem a função de direcionar o fluxo de aço da saída do dique para a superfície livre da parte superior do distribuidor, favorecendo o direcionamento das inclusões para a escória e eliminando o fenômeno do curto-circuito (passagem direta do aço da panela para a saída do distribuidor). Apenas como referência inicial, a altura dessa barragem pode chegar a um terço do nível de trabalho no distribuidor, mas deve ser ajustada de acordo com o volume de aço que permanecerá no final da vida deste reator, podendo ou não possuir furo de drenagem.

Plugue poroso (Difusor de gás):

Outro modificador de fluxo que tem um grande potencial para utilização no distribuidor é o plugue poroso para injeção de gás e formação de uma cortina. Por funcionar como um filtro em toda altura do aço líquido no interior do distribuidor, a injeção de gás contribui para o direcionamento do fluxo para a superfície. Além disso, NASCIMENTO (2008) relata que ela propicia a interação entre o gás e as inclusões não metálicas, acarretando em uma melhora significativa na limpidez do aço. Normalmente, o gás utilizado é o argônio, injetado por um difusor fabricado de material refratário poroso. Na Figura 3.4 é apresentado um desenho esquemático da montagem simétrica de difusores em um distribuidor de dois veios.

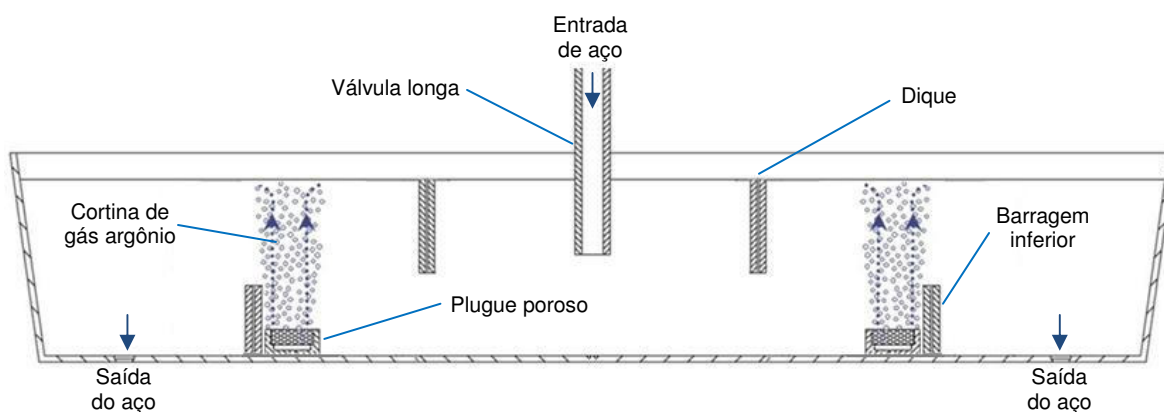


Figura 3.4: Montagem do difusor de argônio no distribuidor (ROGLER *et al.*, 2004).

Na Figura 3.5 é apresentado um plugue poroso industrial utilizado para injeção de argônio no interior do distribuidor, detalhando suas principais partes.

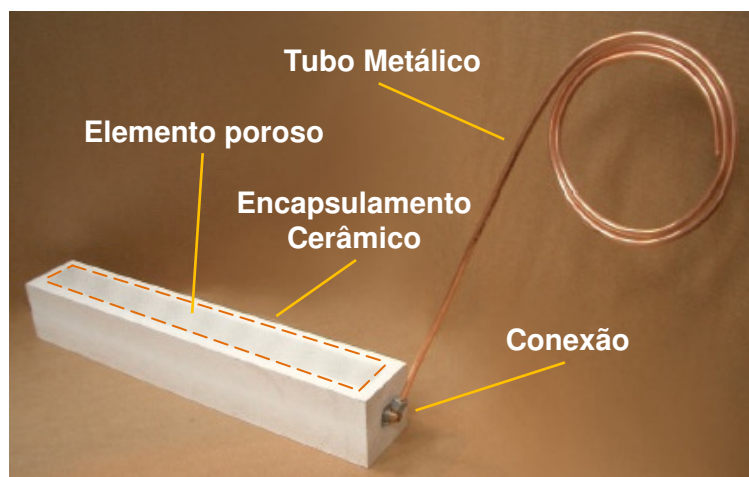


Figura 3.5: Plugue poroso para injeção de gás em distribuidor (VESUVIUS, 2005).

Além das funções particulares do dique e barragem, com a combinação desses dois dispositivos consegue-se modificar a direção do fluxo de forma a conduzir as inclusões para a superfície, interface entre o aço líquido e a escória, evitando que elas cheguem até a saída do distribuidor, sendo levadas para o molde. Para que ocorra esse efeito, se faz necessária a montagem de dique e barragem nessa ordem, no sentido da válvula longa para a saída do distribuidor. O dimensionamento e o posicionamento otimizados dessas duas peças dentro do distribuidor, potencializa a remoção de inclusões.

Nesse contexto, o distribuidor, na operação do lingotamento contínuo, é também visto como sendo um reator que atua na diminuição, controle e prevenção de aumento dos teores residuais de inclusões não metálicas no aço líquido pela flotação e a separação de inclusões. De forma análoga, os conceitos da utilização de inibidor de turbulência, válvula submersa e molde tiveram uma grande evolução. Atualmente, a utilização desses dispositivos, aliados às técnicas do emprego do argônio, estão voltadas para a obtenção de aços com baixo nível de inclusões.

Segundo SILVA (1992), as características do escoamento do aço no distribuidor podem ser convenientemente modificadas com a alteração do posicionamento e configuração dos dispositivos de controle do fluxo metálico e pela injeção de gás, que é capaz de reduzir as zonas mortas e aumentar o grau de homogeneização térmica e química do metal líquido.

Vários métodos físicos e químicos têm sido desenvolvidos para remover inclusões do aço líquido a fim de se obter um aço limpo. A injeção de gás inerte pelo fundo do distribuidor é um método atualmente empregado para promover a flotação e a remoção de inclusões eficiente através da colisão e da aderência entre as bolhas e inclusões.

A remoção de partículas suspensas ou dispersas em um líquido pelo arraste de bolhas de gás em ascensão é um processo de separação utilizado em diversos setores para separar uma partícula de um fluido. A remoção de inclusões não-metálicas em banhos de aço líquido, em particular, é uma prática importante na produção de aço primário. O

objetivo desta prática industrial é o melhor controle do comportamento fluidodinâmico do aço líquido e promover assim a remoção de inclusões não-metálicas.

Segundo FACO (2005), as inclusões são normalmente constituídas por sulfetos, silicatos e aluminatos, que são formados durante processo de fabricação do aço, e afetam a ductilidade, a tenacidade, a resistência à fadiga e a usinabilidade do metal. As inclusões que afetam essas propriedades são principalmente óxidos e sulfetos, cujos tamanhos podem variar de 0,2 μ m a 50 μ m.

3.2.1. Efeito dos modificadores de fluxos mecânicos no distribuidor

O uso de barreiras mecânicas pode alterar a fluidodinâmica do aço fazendo assim com que as inclusões não metálicas sejam incorporadas à escória. Outro fator importante é que as barreiras mecânicas aumentam o tempo de residência efetivo do aço, o que proporciona um maior tempo de flotação de inclusões em função da redução da fração de volume morto, volume esse de metal com baixa velocidade de escoamento e renovação. Inconvenientes do uso de barreiras podem ser o custo, a dificuldade de instalação, a quebra ou o desgaste gerando inclusões exógenas e a criação de vórtices quando o distribuidor apresenta baixo volume.

As características do escoamento do aço do distribuidor para o molde são sensíveis à altura e posição dos dispositivos de controle de fluxo no distribuidor. O posicionamento da barragem é um exemplo de fato, uma vez que ao posicioná-la estrategicamente mais próximo a saída do distribuidor, essa ação reduzirá a fração de volume morto natural desse reator.

Outro aspecto importante associado ao uso da barragem vem do fato de que ela causa a minimização dos efeitos nocivos causados pelo metal líquido nos instantes iniciais de operação. Isto é, se o obstáculo está localizado mais perto do veio, mais metal líquido é retido no distribuidor previamente ao início da alimentação de metal líquido no molde. Isso favorece o preenchimento mais rápido da saída do distribuidor, pela criação de uma coluna mínima de metal líquido, que reduzirá a chance de um potencial entupimento da válvula interna de distribuidor. Outro fato é que o volume retido de aço líquido entre as barragens também reduzirá a intensidade dos eventuais respingos (*splashes*) do jato no enchimento do distribuidor. Efeito esse também

observado no uso do inibidor de turbulência na partida de máquina e na troca de distribuidor.

Similarmente, a altura, a geometria e o posicionamento dos diques são fatores críticos para o controle de fluxo no distribuidor, haja vista que afetam as características do escoamento, pois a alteração da localização dos diques altera a fração do volume de fluxo pistonado. A instalação dos diques nas proximidades da área de impacto do jato metálico, durante o vazamento do metal líquido da panela para o distribuidor, minimiza o tamanho da região de turbulência, o que propicia, com sucesso, as adições de ligas ao metal (NASCIMENTO, 2008).

Historicamente, o aumento da eficiência da remoção das inclusões não-metálicas do aço líquido tem sido almejado pelo aumento da capacidade e pela forma do distribuidor e, em especial, pelo aumento da altura do metal líquido, não em virtude do aumento do tempo de residência, mas devido à redução da taxa de arraste de escória via formação de vórtice. As dimensões e a geometria do distribuidor afetam, não só o tempo de residência do metal líquido, mas também as condições de fluxo não-estacionário durante o período de enchimento e de drenagem do distribuidor.

Da mesma forma, a geometria, as dimensões e o formato dos distribuidores exercem efeitos sobre a eficiência de remoção de inclusões não-metálicas do aço líquido. Distribuidores com maiores dimensões permitem melhores graus de limpidez do aço líquido durante o regime transiente, uma vez que propiciam taxas de lingotamento constante durante a troca de panela sem o arraste de escória e sem a diminuição da velocidade de lingotamento (NASCIMENTO, 2008).

No entanto, distribuidores de maiores dimensões apresentam maiores perdas de rendimento e maiores custos de instalação, os quais podem ser minimizados pelo aumento da vida útil desses reatores, principalmente pelo desenvolvimento de pós fluxantes capazes de gerarem escórias de cobertura com grande habilidade de absorção de alumina e pela minimização do entupimento prematuro da válvula submersa pela alumina.

A utilização do inibidor de turbulência ameniza o estado de turbulência, favorecendo a flotação das inclusões e a captura delas pela escória de cobertura. Isso em virtude do

redirecionamento do fluxo na saída do jato da panela, aumentando a fração de fluxo pistonado e aumentando o tempo mínimo de residência, além de, conseqüentemente, diminuir as frações volumétricas de mistura e de zona morta. Esse comportamento melhora a habilidade e chances de flotação e separação de partículas inclusionárias (ARAÚJO JÚNIOR, 2008).

3.3. Influência das Inclusões nas Propriedades do Aço

Uma segunda fase de partículas não metálicas pode estar presente no metal líquido antes do lingotamento e gerar uma profunda influência sobre as propriedades finais do material. Essas incluem a taxa de deformação, anisotropia, fadiga, susceptibilidade a trinca por hidrogênio, entre muitos outros. Inclusões não metálicas incluem óxidos, silicatos, sulfetos, nitretos, carbonetos e os seus compósitos. Sob condições normais, sulfetos, carbonetos, nitretos se precipitam durante o resfriamento do aço líquido abaixo da temperatura de solidificação. Pequenas partículas de óxido de inclusões específicas, sulfetos, carbonetos e nitretos, têm sido utilizadas para controlar a microestrutura para melhorar as propriedades finais de metal, especialmente em ligas de aço e de alumínio. No entanto, as inclusões de tamanhos muito maiores podem ser formadas, tais como aglomerados, ou através de reoxidação do aço e/ou através de arraste de escória, enquanto o metal se encontra no estado líquido. Se elas não são removidas a partir do metal líquido, antes de solidificação, essas grandes inclusões podem causar defeitos nos produtos lingotados, que por sua vez dão origem a dificuldades de processamento e falhas, diminuição da produtividade, degradação das propriedades do produto, e redução da resistência mecânica, como exposto por SAHAI & EMI (2008).

O tamanho exato, forma, morfologia e densidade de inclusões no produto final lingotado é, portanto, de extrema importância. É amplamente utilizado e aceito que a presença de inclusões bem dispersas de tamanho médio de 30µm, ou menores, geralmente fornecem uma boa temperabilidade para o trabalho de metal. DIETER (1988) explica que essas pequenas inclusões impedem o movimento de deslocamentos no interior da maior parte do metal e conduzem um rápido aumento do limite de resistência a tração no material.

Existem casos em que a inclusão pode trazer um efeito positivo. O melhor exemplo disso, e talvez entre alguns poucos, seria aços carbono alto manganês com grandes inclusões de sulfeto de manganês, onde a redução local da resistência do aço é útil para facilitar a usinagem, e para estampados, favorece a esmaltação na fabricação de pratos. Além do tamanho das partículas, a sua forma também é um importante parâmetro determinante. Esse aspecto é evidente na diferença marcante nas propriedades entre um ferro fundido cinzento e uma série de ferros fundidos nodulares (dúctil), (LAKHTIN & WEINSTEIN, 2000).

Em seus estudos, ZHANG *et al.*, (2002) listaram as influências das impurezas mais comuns nas propriedades mecânicas do aço, conforme apresentado a seguir:

- Os elementos químicos enxofre e oxigênio são responsáveis pela formação de inclusões de sulfetos e óxidos respectivamente, e eles afetam:
 - Ductilidade, tenacidade ao impacto e anisotropia;
 - Plasticidade (alongamento, redução de área e dobramento);
 - Estampabilidade a frio;
 - Tenacidade a baixas temperaturas;
 - Resistência à fadiga.
- Os elementos químicos carbono e nitrogênio afetam a:
 - Temperabilidade (quando em solução sólida);
 - Dispersão e reforçada, ductilidade e tenacidade são reduzidas (para perlita ou cementita), e por fim;
 - Precipitação, refino de grão e tenacidade são reforçados;
 - Fragilização por precipitação intergranular, esses últimos induzidos por precipitados de nitretos e carbonetos.
- O fósforo, em solução sólida, afeta:
 - Endurecimento da liga intensificada pela formação de martensita e a fragilização a frio.

O tamanho das inclusões não-metálicas também é parâmetro importante, pois influencia as propriedades mecânicas do aço, tais como a resistência à fadiga, a usinabilidade e a resistência à corrosão (NASCIMENTO, 2008).

Como referência, na Tabela III.1 são apresentadas as restrições de tamanho de inclusões para diferentes tipos de aços com base em aplicações específicas.

Tabela III.1: Típico condicionamento de limpeza do aço para atender a várias aplicações de aço (ZHANG & THOMAS, 2003).

Tipo de produto	Fração máxima de impureza	Tamanho máximo de inclusão
Aço automotivo e para estampagem extra profunda.	[C] ≤ 30ppm; [N] ≤ 30ppm.	100μm
Aço para latas e estampagem.	[C] ≤ 30ppm; [N] ≤ 30ppm; [O] _{Total} ≤ 20ppm.	20μm
Tubo para petróleo.	[S] ≤ 30ppm; [N] ≤ 35ppm; [O] _{Total} ≤ 30ppm.	100μm
Aço para rolamento.	[O] _{Total} ≤ 10ppm.	15μm
Fio para pneus (<i>Tire cord</i>).	[H] ≤ 2ppm; [N] ≤ 40ppm; [O] _{Total} ≤ 15ppm.	10μm 20μm
Aço Chapas Grossas.	[H] ≤ 2ppm; [N] ≤ 30-40ppm; [O] _{Total} ≤ 20ppm.	Inclusões simples de 13μm e <i>Cluster</i> 200μm
Fio máquina.	[N] ≤ 60ppm; [O] _{Total} ≤ 30ppm.	20μm

As inclusões encontradas na matriz do aço líquido geralmente podem ser de origem endógena ou exógena.

As inclusões endógenas são geralmente precipitados, resultantes de reações químicas que podem ser induzidas através de adições químicas feitas ao aço durante as operações de refino ou, simplesmente, por mudanças de solubilidade durante o resfriamento na etapa de solidificação. Elas são compostas principalmente de óxidos, sulfetos, nitretos, aluminatos, silicatos e carbonetos. Os melhores exemplos de inclusões desse tipo seriam pequenas partículas (geralmente menor que 30μm) de óxidos metálicos, tais como Al_2O_3 ou $FeO \cdot SiO_2$, encontrados em aço desoxidado ao alumínio ou aço desoxidado ao silício, sem mencionar os produtos de oxidação formados pela reação de aço líquido com o oxigênio do ar atmosférico.

As inclusões exógenas ocorrem como resultado de incorporações ao aço de gotículas de escória, partículas erodidas de refratário ou de outros materiais que tiveram contato com o aço. O aspecto característico de uma inclusão exógena é a falta de previsão do seu tamanho e sua ocorrência aleatória.

A classificação das inclusões e suas respectivas origens apresentam-se resumidas na Figura 3.6.

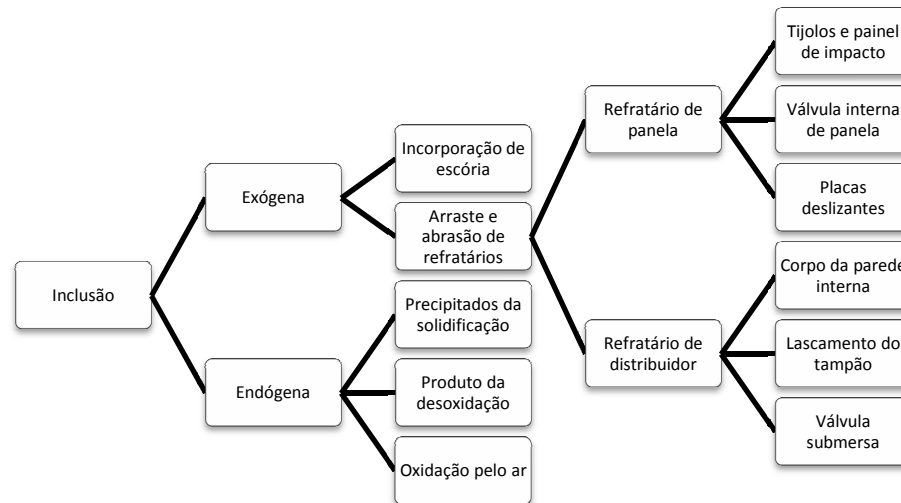


Figura 3.6: Origem das inclusões do aço (NASCIMENTO, 2008).

Quanto à composição química, as inclusões podem ser divididas em óxidos, sulfetos, nitretos, aluminatos, silicatos e carbonetos. O maior problema encontrado durante a produção de aço na máquina de lingotamento é a presença de alumina, responsável por formar as inclusões mais comumente encontradas nos aços.

A Figura 3.7 mostra a morfologia, a composição e as dimensões típicas de inclusões de alumina, formadas principalmente durante a etapa de desoxidação do aço líquido na panela. As Figuras 3.7b e 3.7c mostram inclusões dendríticas formadas durante a desoxidação do aço líquido que cresceram por colisões e aglomeração de *clusters*. A Figura 3.7d mostra inclusões globulares formadas durante o aprisionamento e o arraste de escória para o banho quando ocorre a transferência do aço líquido da panela para o distribuidor, por exemplo (ARAÚJO JÚNIOR, 2008).

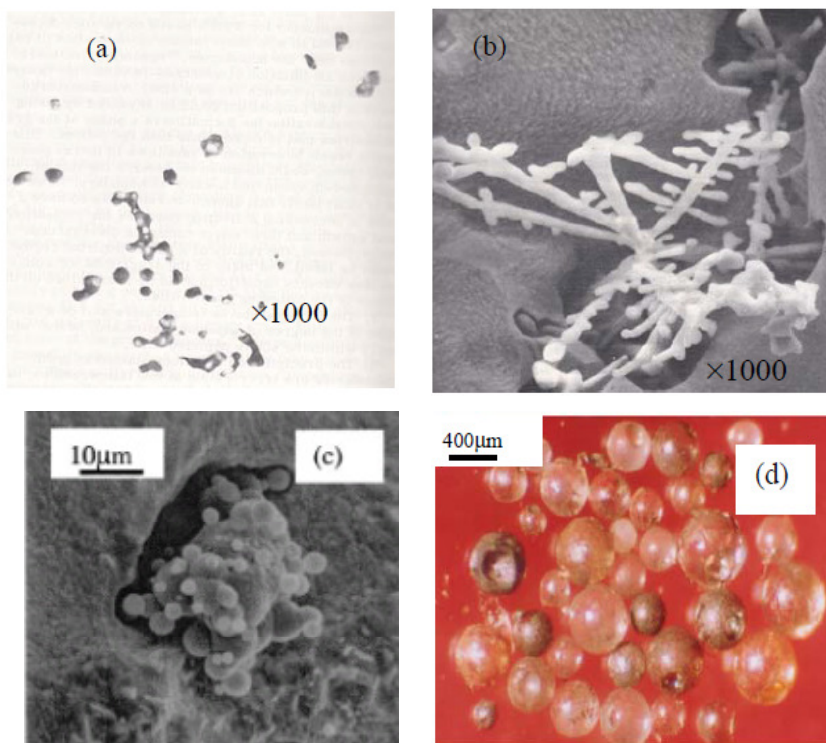


Figura 3.7: Morfologia, composição e tamanhos típicos de inclusões (ZHANG *et al.*, 2003).

Na Figura 3.8 é destacado o dano causado por inclusões de alumina na produção de chapas de aço. Esses defeitos são observados somente após a laminação do produto semiacabado.

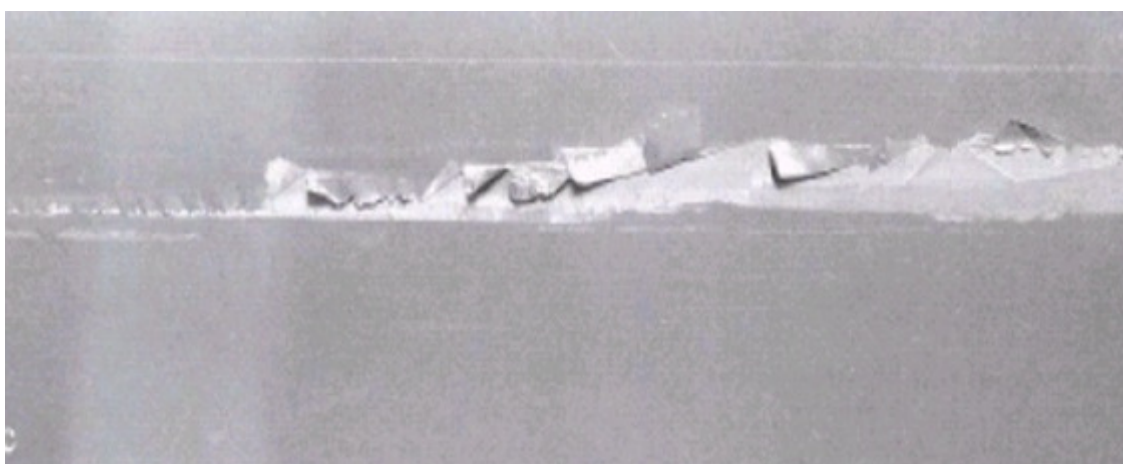


Figura 3.8: Indicação de defeito na superfície da chapa causada por alumina (NASCIMENTO, 2008).

3.4. Mecanismo de Separação de Inclusões por Flotação

O borbulhamento de gás inerte pelo fundo do distribuidor, através de plugue poroso, localizado entre a zona de jato da panela e o veio, tem como objetivo promover a homogeneização da temperatura e da composição do banho, além de ser uma opção que pode apresentar vantagens em relação à flotação de inclusões endógenas e exógenas.

A eficiência da remoção de inclusão por flotação simples, sem utilização de gás inerte, num distribuidor é geralmente limitada pelo tempo de residência de metal líquido à medida que escoia através do reator e pela velocidade de ascensão das partículas. A velocidade de ascensão de uma partícula é uma função do seu tamanho, por isso as partículas menores são mais difíceis de remover. As bolhas de gás inerte têm velocidade de ascensão mais elevadas do que as inclusões, como resultado de serem menos densas e, tipicamente, maiores que as inclusões. Assim, a adesão da partícula à bolha é um importante reforço da separação de inclusões em um distribuidor.

SAHAI *et al.* (1996) apresentou que o borbulhamento de gás inerte favorece a aglomeração de partículas finas e a geração de convecção forçada, que aumentam a oportunidade de flotação das inclusões não metálicas coalescidas para fora do metal líquido. Em outra oportunidade, WOLF (2003) mostrou o efeito do borbulhamento de argônio no distribuidor de lingotamento contínuo sobre o índice de inclusões do aço líquido, onde foi possível observar que a prática de borbulhamento de argônio decresce significativamente o número de inclusões no distribuidor, principalmente as macro inclusões.

Na Figura 3.9 é explicitada a zona do jato da panela, a zona de borbulhamento de argônio e a zona de saída do distribuidor, com base no relato de ROGLER *et al.* (2004). As bolhas ascendentes, integrantes da cortina gasosa, conduzem o fluxo principal de aço líquido para a direção da interface metal-escória.

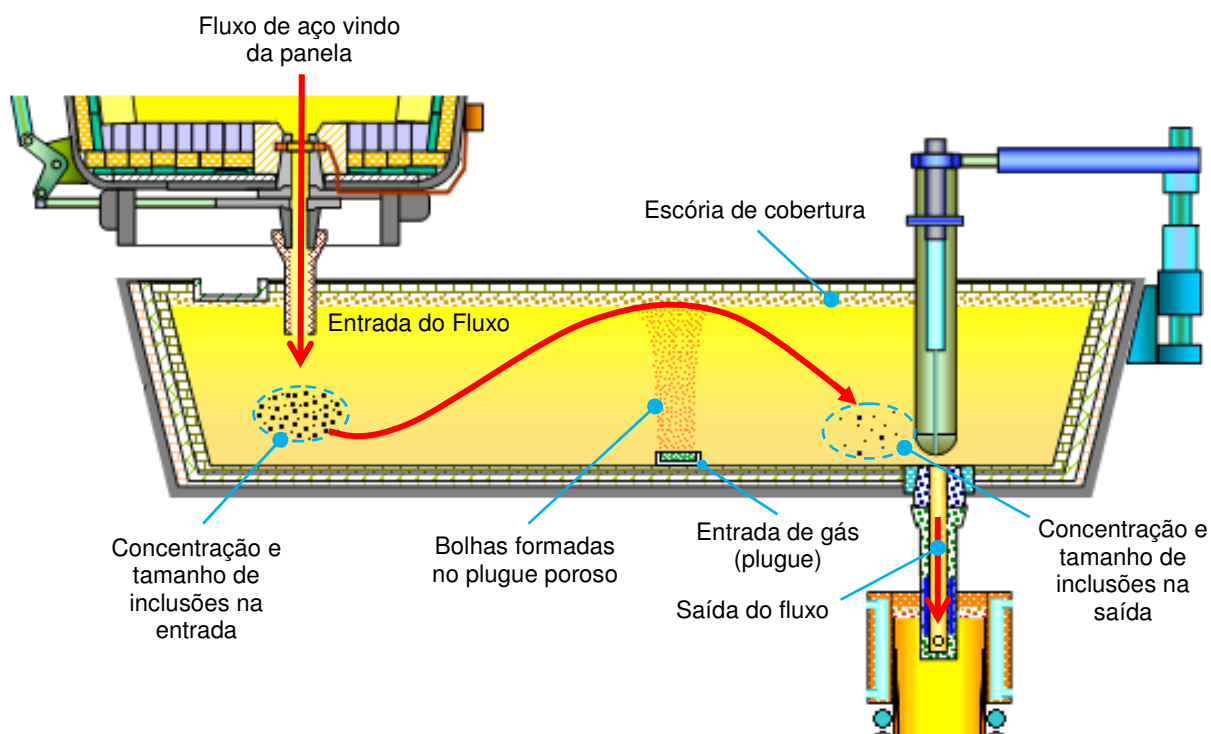


Figura 3.9: Representação esquemática do distribuidor simples, equipado apenas com difusor de argônio para a remoção de inclusões (ROGLER *et al.*, 2004).

O processo de remoção de inclusões não-metálicas do aço líquido pelas bolhas do gás inerte é influenciado por diversos fatores, tais como:

- distribuição de fluxos no metal líquido;
- distribuição de tamanhos e propriedades físicas das inclusões;
- distribuição de tamanhos das bolhas;
- tempo de residência das bolhas no reator;
- posição e geometria do plugue poroso (difusor);
- vazão do gás inerte;
- velocidade de lingotamento;
- altura de aço líquido.

Bem com as características do plugue poroso, a saber:

- tipo e forma;
- número, diâmetros interno e externo do orifício de borbulhamento de argônio;
- distância entre os orifícios do material poroso;
- molhabilidade do material poroso pelo aço líquido.

Segundo ROGLER (2004), o processo de arraste de uma inclusão por uma bolha de gás no interior do aço líquido procede da seguinte maneira: a inclusão se aproxima da bolha de gás, se a camada entre a partícula e a bolha se torna menor que a espessura

crítica durante o contato entre bolha e inclusão, esta se romperá fazendo a inclusão aderir-se à superfície da bolha. Na Figura 3.10 são mostradas as relações angulares entre uma bolha em ascensão em um meio líquido e as partículas que dela se aproximam. Dois ângulos importantes são ilustrados, o ângulo crítico de fixação (θ_A), que é definido como o ângulo a partir do qual não há adesão entre a bolha e a partícula, e o ângulo de colisão (θ_C), definido como o ângulo a partir do qual não ocorre colisão entre a bolha e a partícula. Por exemplo, como ilustrado, uma partícula que apresenta um ângulo de abordagem menor que θ_A irá colidir e aderir à bolha pois, por definição, ela apresenta um tempo de contacto suficiente para tornar-se aderida à bolha, enquanto uma partícula com um ângulo de abordagem menor que θ_C , porém maior que θ_A , irá colidir com a bolha, sem se aderir a ela pois o tempo de contato é insuficiente para torná-la aderida à bolha e finalmente, uma partícula com um ângulo de aproximação maior que θ_C não irá colidir com a bolha.

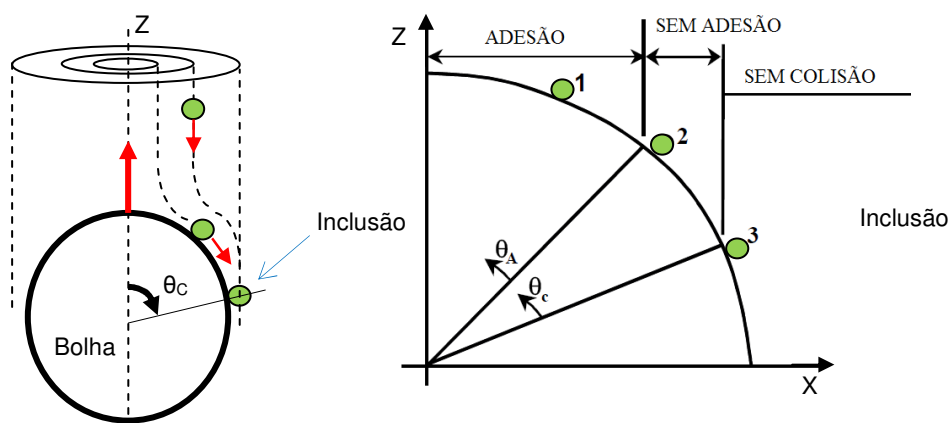


Figura 3.10: Esquema representando os ângulos críticos (ROGLER, 2004).

WOLF (2003) demonstrou em estudos através de modelo a frio que o grau de molhabilidade das partículas interfere substancialmente sobre sua tendência em ser aderida e arrastada pela bolha de gás. Partículas molháveis pelo aço líquido tendem, naturalmente, a permanecerem dispersas nele, enquanto as não molháveis podem ser capturadas pela bolha de gás e flotas até a superfície do banho. Inclusões sólidas, como alumina e sílica, não apresentam molhabilidade ao aço e, portanto, podem ser removidas pelo arraste de bolhas de gás.

ROGLER (2004) relata que a aceleração da flotação de partículas pelo borbulhamento de gás pode ser resultado de:

- a) Colisão entre partícula e bolha levando ao arraste do conjunto, bem como a alta velocidade do transporte da partícula aderida à bolha até a camada de escória;
- b) A geração de uma maior taxa de colisão entre partícula e partícula, induzida pela turbulência gerada pelas bolhas, promovendo a flotação de partículas aglomeradas.

O uso de modelagem matemática é base para análise e otimização do distribuidor, no que se refere particularmente à previsão e a descrição dos campos de velocidade e seus efeitos sobre o comportamento de separação de inclusões não-metálicas no distribuidor. Nesse sentido, ROGLER (2004) propôs um modelo matemático para previsão da remoção de inclusões do aço líquido no distribuidor, incentivada pela ação de uma cortina de bolhas de gás inerte, supondo semelhança de tamanho das bolhas na região de borbulhamento e desconsiderando os efeitos de interação entre elas. No que se refere às inclusões, essas foram consideradas de mesmas dimensões e uniformemente distribuídas no metal líquido. O mecanismo de remoção foi assumido como sendo constituído pela sua captura e pelo seu direcionamento para a camada de escória. Esse pesquisador demonstrou que menores tamanhos médios das bolhas e maiores tamanhos de inclusões aumentam as probabilidades de colisão e de captura. No entanto, bolhas muito pequenas são facilmente arrastadas pelo fluxo de aço, podendo ser transportadas para os veios e capturadas pela pele de aço no molde. Por isso, a otimização da distribuição de tamanhos das bolhas torna-se necessária.

Estudos realizados por WANG *et al.* (2005), através de modelo matemático, apresentaram os seguintes resultados:

- a) Fatores que afetam a eficiência de aderência de inclusões às bolhas: A eficiência de remoção de inclusões pela aderência às bolhas de gás inerte depende basicamente de duas condições: uma é a geração de bolhas finas, e outra é distribuição dessas bolhas de maneira uniforme no metal líquido. O tamanho de bolha está relacionado com a intensidade da agitação da fase líquida, uma alta agitação pode romper as bolhas, tornando-as pequenas. Assim, para uma determinada intensidade de agitação, há um tamanho de bolha máximo correspondente. Se uma bolha de gás excede um valor crítico, isto é, o tamanho máximo, ela se desintegra.

b) Fluxo de aço e concentração de inclusões no distribuidor: A Figura 3.11 mostra um perfil de velocidades do aço no distribuidor em estado estacionário. A Figura 3.12 mostra a distribuição de inclusão com raio de $20\mu\text{m}$ no distribuidor após 25 minutos de processo. Pode-se observar um gradiente de concentração de inclusões ao longo do distribuidor, o que indica que este apresenta também a função de remover as inclusões. A concentração de inclusão mais elevada está situada na região próxima ao tubo longo, e diminui à medida que o aço escoava para a saída do distribuidor.

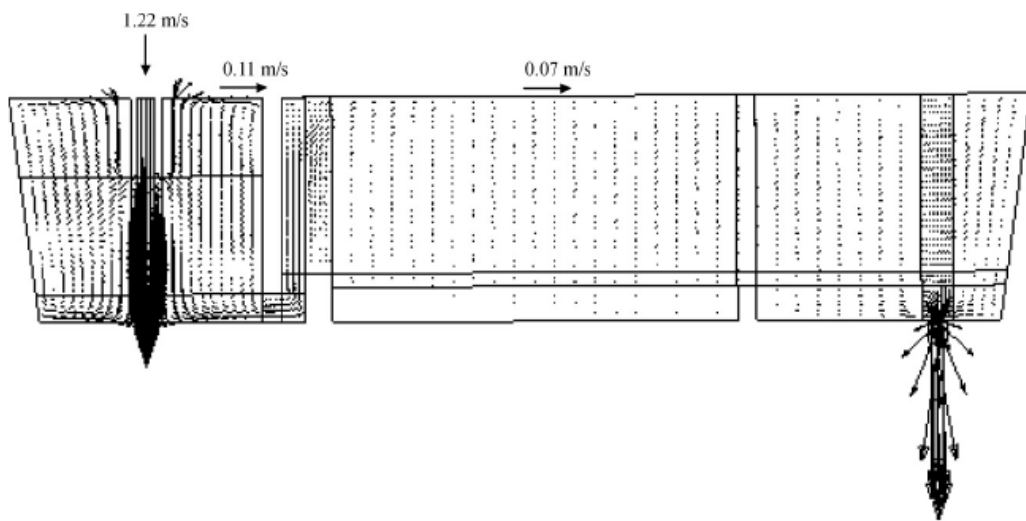


Figura 3.11: Perfil de velocidades do aço no distribuidor (WANG *et al.*, 2005).

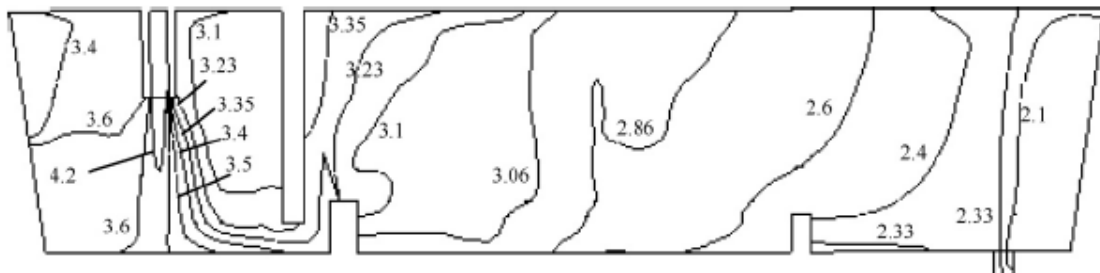


Figura 3.12: Distribuição da concentração de inclusões com raio de $20\mu\text{m}$ no distribuidor, após 25 minutos de operação [10^{10} n/m^3] (WANG *et al.*, 2005).

c) Efeito da injeção de gás na remoção de inclusões: Nem sempre o efeito de aderência das bolhas de gás às inclusões, responsável pela efetividade do processo de flotação e de remoção de inclusões sólidas no aço, é alvo de estudo. WANG *et al.* (2005) investigaram em seu modelo a importância da adesão das bolhas na remoção de inclusões, comparando casos onde a aderência foi considerada e casos onde foi desconsiderada. Os resultados são mostrados na Figura 3.13.

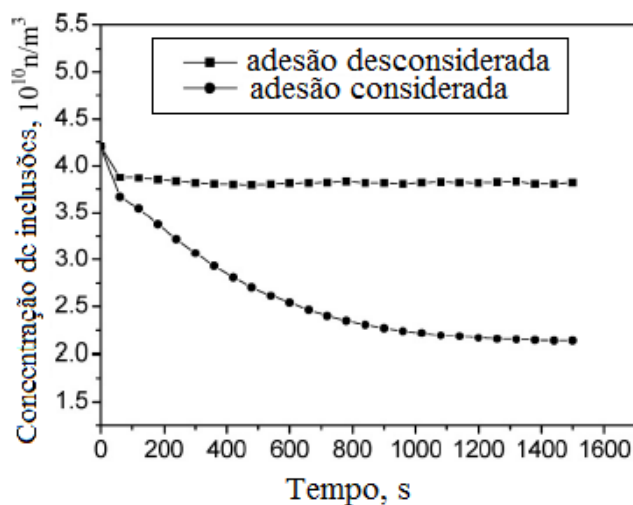


Figura 3.13: Contribuição da adesão entre bolha e partícula na remoção de inclusões (WANG *et al.*, 2005).

A remoção de inclusões sem levar em consideração a adesão entre a inclusão e a bolha é menor quando comparada à remoção levando em conta essa adesão. O resultado indica que o efeito de adesão das bolhas na remoção de inclusões não é desprezível.

d) Efeito do tamanho de bolha e inclusão: A fim de estudar o efeito do tamanho da bolha na remoção de inclusão, WANG *et al.* (2005) investigaram a efetividade do processo para diferentes tamanhos de bolhas. O resultado obtido é mostrado na Figura 3.14. Bolhas com o diâmetro pequeno têm maior eficiência na remoção de inclusões.

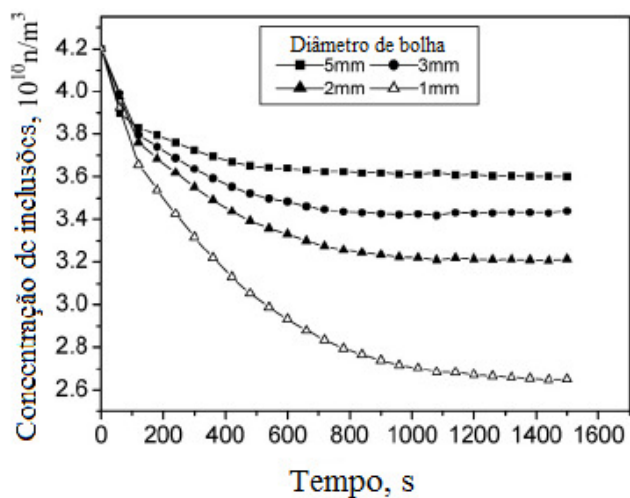


Figura 3.14: Efeito do tamanho de bolha sobre a remoção de inclusões (WANG *et al.*, 2005).

Pode-se observar que a eficiência de remoção é muito baixa quando o diâmetro de bolhas atinge 5 mm. Também pode ser visto na Figura 3.14 que a concentração de inclusões reduz gradualmente, porém a taxa de remoção diminui com o tempo, e a curva de concentração de inclusões tende a estabilizar após determinado período. A diferença entre a concentração de inclusões que entra no distribuidor e a que sai, definem a remoção de inclusões. A Figura 3.15 mostra a remoção de inclusões para diferentes tamanhos. As inclusões maiores são mais facilmente removidas pelo gás.

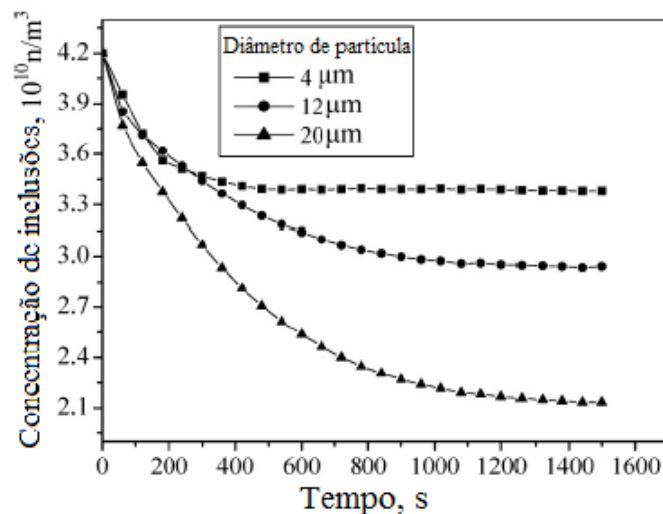


Figura 3.15: Efeito do tamanho de inclusão na eficiência de remoção (WANG *et al.*, 2005).

e) Efeito taxa de injeção de gás: A Figura 3.16 mostra o efeito da taxa de injeção de gás sobre a concentração de inclusões no distribuidor. Pode-se observar que o aumento da taxa é favorável para a remoção de inclusões por flotação. Por outro lado, o borbulhamento excessivo de gás pode resultar em alta agitação na superfície do distribuidor e uma possível reoxidação do aço, causar o arraste de escória para o interior do metal líquido e o resfriamento do metal resultando na formação de cascão. Esse fenômeno depende também do tipo de sistema de borbulhamento e da composição química da escória de cobertura.

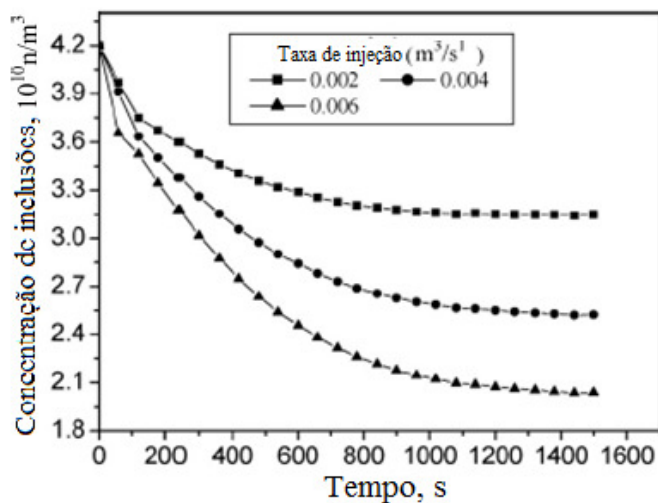


Figura 3.16: Efeito da taxa de injeção de gás inerte na remoção de inclusões (WANG *et al.*, 2005).

A Figura 3.17 ilustra o comportamento da interface metal/escória no momento em que a bolha a atravessa, evidenciando a deformação, a drenagem da escória na superfície da bolha, a ruptura da camada de escória e a formação de emulsão escória/metal.

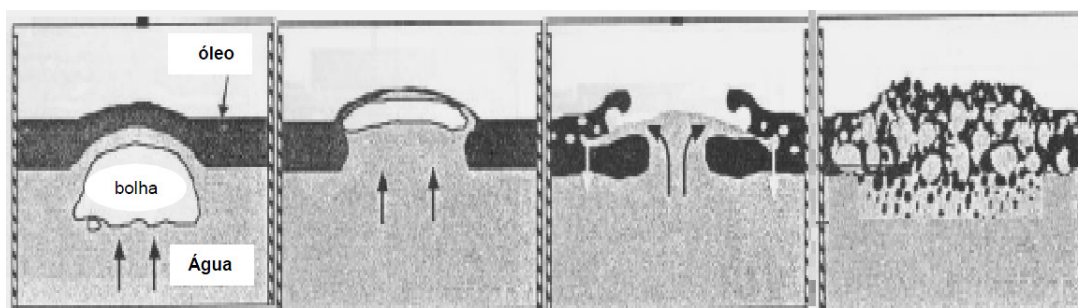


Figura 3.17: Representação esquemática da interação entre metal-escória com a injeção de gás (ZHANG *et al.*, 2006).

3.5. Modelamento Físico

Modelos em escala reduzida são amplamente utilizados para simular o escoamento do aço líquido nos reatores empregados nos processos de aciaria. Isso devido à similaridade dinâmica existente entre o aço líquido a 1.600°C e a água a 25°C. Além da facilidade no manuseio e baixo risco de acidente, normalmente esse fluido é utilizado nesses modelos para representar o aço líquido, dando então o nome de “modelo a frio”.

É possível simular o escoamento do aço líquido em um modelo a frio em escala reduzida pois a água possui similaridade na viscosidade cinemática, que é a razão entre a viscosidade dinâmica e a densidade do fluido. A Tabela III.2 apresenta os valores das propriedades físicas do aço a 1.600°C e da água a 25°C.

Tabela III.2: Propriedades físicas do aço e da água (MAZUMDAR *et al.*, 1999).

Grandeza	Unidade	Símbolo	Aço	Água
Temperatura	°C	T	1.600	25
Massa Específica	kg/m ³	ρ	7.036	997
Viscosidade Dinâmica	Pa's	μ	$6,4 \times 10^{-3}$	$8,85 \times 10^{-4}$
Viscosidade Cinemática	m ² /s	ν	$9,13 \times 10^{-7}$	$1,0 \times 10^{-6}$
Tensão Superficial	N/m	σ	1,6000	0,0728

Atendidos os critérios dimensionais e apresentada a similaridade dinâmica da água com o aço líquido, é importante a definição das vazões correspondentes e também de qual critério de similaridade utilizar. Nos modelos são utilizados os números adimensionais, que têm como principal função tornar comparável dois sistemas com fluidos e/ou dimensões diferentes. Para cada sistema existe um conjunto de números que melhor representa a similaridade deles. Esses números são obtidos através da técnica de análise dimensional, e alguns desses números, bem como sua definição, são apresentados na Tabela III.3.

Tabela III.3: Números adimensionais e suas definições (SZEKELY *et al.*, 1988).

Número	Símbolo	Definição	Aplicação
Reynolds	Re	$\frac{L\bar{v}\rho}{\mu}$	Escoamento de fluido
Reynolds turbulento	Re _t	$\frac{L\bar{v}\rho}{\mu_{eff}}$	Escoamento turbulento de fluido
Froude	Fr	$\frac{\bar{v}^2}{gL}$	Vazamento em jato, comportamento da superfície
Froude Modificado	Fr _m	$\frac{\rho_g \bar{v}^2}{(\rho_l - \rho_g)gL}$	Comportamento do sistema líquido e gás

De forma que L é o comprimento característico; \bar{v} é a velocidade média do fluido; μ_{eff} é a viscosidade efetiva do fluido e g é a aceleração da gravidade (9,81m/s²).

Os números adimensionais que sugerem condição satisfatória de similaridade entre o modelo e o protótipo do distribuidor de lingotamento contínuo são os números de Froude e Reynolds. Como a força motriz do lingotamento é a gravidade, o número de Froude torna-se um parâmetro fundamental, pois esse fornece a relação entre as forças de inércia e da gravidade. Logo, para o modelamento, deve-se manter a igualdade entre o número de Froude no modelo e no protótipo. Considerando-se ainda que no distribuidor de lingotamento contínuo exista turbulência, ou seja, existe interação entre as forças de viscosidade, inércia e gravidade, também se faz essencial a igualdade do número de Reynolds.

Em um estudo (BARBOSA, 2002), é apresentada uma discussão a respeito de qual critério de similaridade seria o mais adequado para o caso distribuidor. Foi concluído que a utilização do número de Froude propicia os resultados do modelo com melhor concordância com os do protótipo.

As relações das características do modelo (m) e do protótipo (p), utilizando o número de Froude, são apresentadas na Tabela III.4. Nessas relações a letra λ representa o fator de escala entre modelo e protótipo.

Tabela III.4: Relações adimensionais entre o modelo (m) e o protótipo (p) obtidas utilizando o número de Froude (NASCIMENTO, 2008).

Grandeza	Equação
Tempos	$\frac{t_m}{t_p} = \sqrt{\lambda}$
Velocidade	$\frac{v_m}{v_p} = \sqrt{\lambda}$
Dimensões	$\frac{L_m}{L_p} = \lambda$
Áreas	$\frac{A_m}{A_p} = \lambda^2$
Vazão volumétricas	$\frac{Q_m}{Q_p} = \lambda^{5/2}$
Volumes	$\frac{V_m}{V_p} = \lambda^3$

3.5.1. Modelamento do comportamento de inclusões

Para realizar a simulação do escoamento das inclusões no modelo físico é necessário adotar um critério de similaridade de forma que possa ser transposto ou até mesmo comparado o resultado do modelo com o do protótipo.

Para descrever o movimento das inclusões no distribuidor se faz necessário o balanço das forças envolvidas. A Figura 3.18 apresenta os diagramas de forças para as três situações possíveis de escoamento de uma partícula em um fluido.

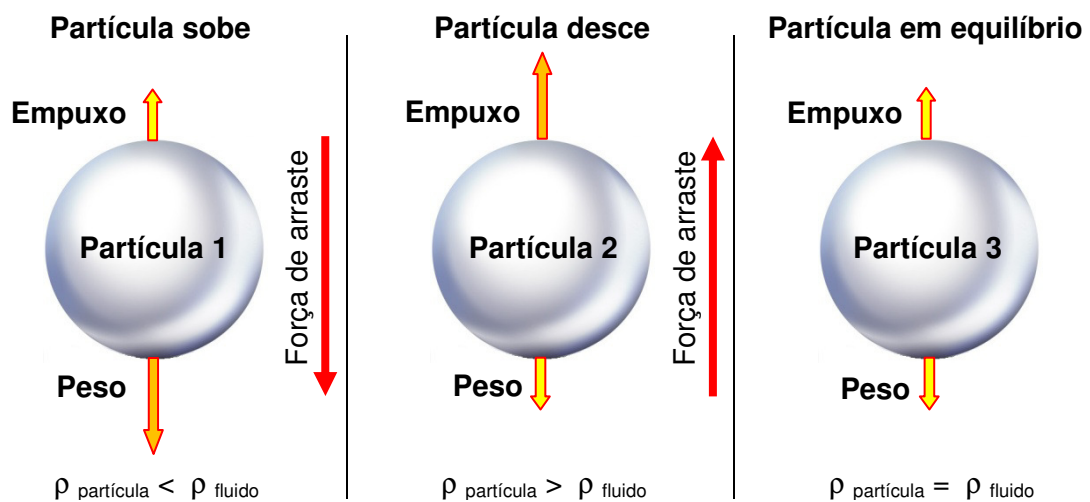


Figura 3.18: Diagramas de força para o escoamento de partículas (SESHADRI *et al.*, 2010).

Sendo a densidade das inclusões menor do que a densidade do aço, o balanço de forças pode ser apresentado conforme a equação (3.1).

$$\frac{\pi d^3}{6} \rho_f g = \frac{\pi d^3}{6} \rho_p g + \frac{\pi d^2}{4} \left(\frac{1}{2} \rho_f v_t^2 \right) f \quad (3.1)$$

Onde d é o diâmetro da partícula [m], ρ_p é a densidade da partícula [kg/m^3], ρ_f é a densidade do fluido [kg/m^3], g a aceleração da gravidade [m/s^2], v_t a velocidade terminal da partícula [m/s] e f o fator de arraste. O termo do lado esquerdo representa a força de empuxo, os termos do lado direito representam o peso da partícula e a força de arraste, respectivamente.

O valor do fator de arraste, f , depende do número de Reynolds do escoamento em torno da partícula, sendo assim na Tabela III.5 são apresentados os intervalos de validade, a relação do coeficiente de arraste com o número de Reynolds e a equação do balanço de forças explicitando a variável velocidade terminal.

Tabela III.5: Equações de velocidade terminal de partículas em meio fluido com seus respectivos domínios de validade (SESHADRI *et al.*, 2010).

Intervalo de validade	Relação entre fator de arraste e o número de Reynolds	Velocidade terminal (m/s)
$Re \leq 1$	$f = \frac{24}{Re}$	$v_t = \frac{d^2}{18\mu_f} g (\rho_f - \rho_p)$
$1 \leq Re \leq 500$	$f = \frac{18,5}{Re^{3/5}}$	$v_t = \left[\frac{8}{111} \frac{gd^{8/5}}{\mu_f^{3/5}} \frac{(\rho_f - \rho_p)}{\rho_f^{2/5}} \right]^{5/7}$
$Re > 500$	$f = 0,44$	$v_t = \left[\frac{8}{6} \frac{gd}{0,44} \frac{(\rho_f - \rho_p)}{\rho_f} \right]^{1/2}$

A eficiência de flotação das inclusões é influenciada pela distribuição de tamanho das partículas inclusionárias, e do volume de bolhas na região da pluma bifásica de gás-líquido, segundo NASCIMENTO (2008).

O número adimensional de Guthrie (Gu), definido pela equação (3.2), é útil na análise de flotação de inclusões (CHATTOPADHYAY, 2011):

$$Gu = \frac{\bar{t}}{t_{fn}} \quad (3.2)$$

Sendo:

\bar{t} : tempo de residência teórico, definido pela equação (3.21);

t_{fn} : tempo para flotação natural de partícula assumindo o percurso dela da base do distribuidor até a sua superfície livre.

O coeficiente de remoção de inclusões (r_m) é calculado assumindo comportamento pistonado e homogeneidade da concentração inclusional nas seções transversais do distribuidor (SILVA, 1998), determinado com:

$$r_m = 1 - \exp(-Gu) \quad (3.3)$$

Esse coeficiente de remoção possibilita desenvolver uma maneira crítica para avaliar o limite dimensional entre partículas: pequena, média e grande para um distribuidor específico.

No processo industrial, as inclusões são menos densas do que o aço líquido, por isso são naturalmente propensas a flotar através do metal líquido. Para a faixa de tamanhos das inclusões pode-se assumir que elas trafegam pelo aço líquido segundo a velocidade terminal ditada pela lei de Stokes. Por isso, pode-se inferir que:

$$v = \frac{2r^2 g (\rho - \rho_p)}{9\mu} \quad (3.4)$$

Onde v é velocidade de ascensão da partícula, μ é viscosidade dinâmica do meio, r é o raio da partícula, g é a gravidade, ρ é a densidade do meio e ρ_p é densidade da partícula. Portanto, a velocidade de ascensão no modelo é dada pela equação (3.5):

$$v_{p,m}^m = \frac{2r_{p,(m)}^2 g (\rho_L^m - \rho_p^m)}{9\mu_L^m} \quad (3.5)$$

Enquanto a velocidade de ascensão da partícula no protótipo é dada pela equação (3.6)

$$v_{p,p}^p = \frac{2r_{p,(p)}^2 g (\rho_L^p - \rho_p^p)}{9\mu_L^p} \quad (3.6)$$

Como definido anteriormente na Tabela III.4 e, de acordo com o critério de similaridade de Froude,

$$\frac{v_L^m}{v_L^p} = \sqrt{\lambda} \quad (3.7)$$

Para que haja similaridade entre o comportamento da inclusão, no modelo e na máquina industrial, ou seja, semelhança de trajetórias das partículas, é necessário que a equação (3.7) seja atendida:

$$\left(\frac{v_L}{v_p}\right)_m = \left(\frac{v_L}{v_p}\right)_p \quad (3.8)$$

Resultado nas equações (3.9) e (3.10):

$$\frac{v_{p,m}^m}{v_p^p} = \sqrt{\lambda} \quad (3.9)$$

$$\frac{v_{p,m}^m}{v_p^p} = \frac{r_{p,(m)}^2 (\Delta\rho)_m \mu_L^p}{r_{p,(p)}^2 (\Delta\rho)_p \mu_L^m} = \sqrt{\lambda} \quad (3.10)$$

A viscosidade cinemática é definida na equação (3.11):

$$v = \frac{\mu_L}{\rho_L} \quad (3.11)$$

Logo:

$$\frac{r_{p(m)}}{r_{p(p)}} = \lambda^{1/4} \left[\frac{\left(1 - \frac{\rho_p}{\rho_L}\right)_p v_L^m}{\left(1 - \frac{\rho_p}{\rho_L}\right)_m v_L^p} \right]^{1/2} \quad (3.12)$$

A equação (3.13) parte do pressuposto que os valores de viscosidade cinemática do líquido no modelo e no protótipo possam ser considerados praticamente iguais:

$$\frac{v_L^m}{v_L^p} \approx 1 \quad (3.13)$$

Com base nesse entendimento, encontra-se a equação (3.14):

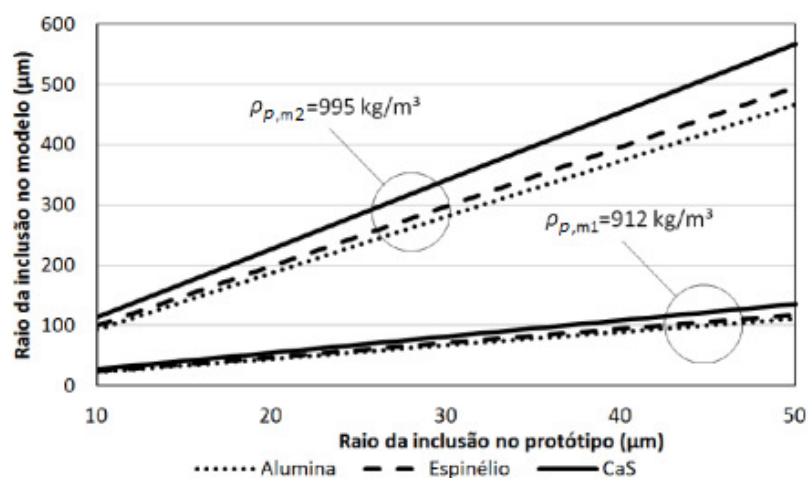
$$\frac{r_{p(m)}}{r_{p(p)}} = \lambda^{1/4} \left[\frac{\left(1 - \frac{\rho_p}{\rho_L}\right)_p}{\left(1 - \frac{\rho_p}{\rho_L}\right)_m} \right]^{1/2} \quad (3.14)$$

A equação (3.14) estabelece a relação entre o raio da inclusão no modelo ($r_{p(m)}$) e o raio da inclusão no protótipo industrial ($r_{p(p)}$). Essa relação 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 ($\rho_{p(p)}$) e a massa específica do aço ($\rho_{L(p)}$) com a massa específica do material empregado para simular a inclusão no modelo ($\rho_{p(m)}$) e a massa específica da água ($\rho_{L(m)}$), de forma que as trajetórias das inclusões sejam semelhantes para ambos os reatores: modelo e protótipo industrial.

A equação (3.14) 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 ($\rho_{\text{água}} = 997\text{kg/m}^3$, Tabela III.2) para simular aço ($\rho_{\text{aço}} = 7036\text{kg/m}^3$, Tabela III.2), pode-se variar a massa específica do material empregado para simular inclusões da planta até a faixa granulométrica que se deseja simular. BIELEFELDT (2005) e KIESSLING *et al.* (1997) exemplificam os valores das massas específicas para diferentes inclusões encontradas nos aços ($\rho_{\text{alumina}} = 3960\text{kg/m}^3$, $\rho_{\text{espínélio}} = 3580\text{kg/m}^3$ e $\rho_{\text{CaS}} = 2500\text{kg/m}^3$) e atribuindo diferentes massas específicas de materiais que podem simular as inclusões no modelo ($\rho_{p(m1)} = 912\text{kg/m}^3$ e $\rho_{p(m2)} = 995\text{kg/m}^3$) obtêm-se o gráfico apresentado na Figura 3.19, onde a $\rho_{p(m1)}$ pode representar a massa específica do polipropileno (QIANG *et al.*,

2010) e a $\rho_{p(m2)}$ 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 995kg/m^3 na Figura 3.19 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 industrial. Em condições próximas a essas pode-se simular microinclusões com maiores diâmetros de partículas que simulam as inclusões.



Observação: ($\rho_{\text{alumina}} = 3960\text{kg/m}^3$, $\rho_{\text{espinélio}} = 3580\text{kg/m}^3$ e $\rho_{\text{CaS}} = 2500\text{kg/m}^3$)

Figura 3.19: Relação entre modelo e protótipo industrial para o tamanho de diferentes inclusões (alumina, espinélio e sulfeto de cálcio, CaS) e diferentes massas específicas de partículas de simulação de inclusões.

SAHAI e EMI (1996) 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 (3.15). Assim é possível manter, segundo o fator de escala, a mesma proporção de colisões de inclusões no interior do modelo.

$$n_{mi} = \lambda^{-1,5} n_{pi} \quad (3.15)$$

sendo:

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

n_{pi} : Número de inclusões presentes no protótipo 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 (3.13) 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.

Uma das considerações feitas foi simular a existência de uma camada de escória responsável pela captura das inclusões. Poucos autores têm utilizado essa abordagem no ensaio de remoção de inclusões em função da escolha do material de simulação para a escória e a conseqüente dificuldade em manter as mesmas razões de massa específica e de interações interfaciais e superficiais envolvidas no sistema escória/aço/inclusão. ROGLER *et al.* (2004, 2005) utilizaram querosene para simular a escória, enquanto ZHANG *et al.* (2011) 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 (3.16);

$$\left(\frac{\rho_{esc,m}}{\rho_{\acute{a}gua}}\right)_m = \left(\frac{\rho_{esc,p}}{\rho_{a\grave{c}o}}\right)_p \quad (3.16)$$

sendo:

$\rho_{esc,m}$: Massa específica da escória no modelo (kg/m³);

$\rho_{\acute{a}gua}$: Massa específica da água (kg/m³);

$\rho_{esc,p}$: Massa específica da escória no protótipo (kg/m³);

$\rho_{a\grave{c}o}$: Massa específica do aço (kg/m³).

- 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 no modelo ($\gamma_{esc,m/inc,m}$) conforme mostrado na equação (3.17).

$$\gamma_{esc,p/inc,p} = \gamma_{esc,m/inc,m} \quad (3.17)$$

- 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 (3.18).

$$\gamma_{esc,p/aço} = \gamma_{esc,m/água} \quad (3.18)$$

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 industrial.

3.5.2. Transposição da vazão de injeção de gás do modelo para a escala Industrial

Considerando o critério de similaridade baseado na igualdade do número de Froude, é possível transpor a vazão de gás utilizada no modelo físico para a escala industrial seguindo as equações propostas por MAZUMDAR e EVANS (2009).

$$Q_{mod} = Q_{ind} \cdot \lambda^{2,5} \quad (3.19)$$

$$Q_{ind} \left(\frac{m^3}{s} \right) = Q_{ind} \left(\frac{Nm^3}{s} \right) \cdot \frac{1873}{273} \cdot \frac{1}{\left(1 + \frac{\rho_{aço} \cdot g \cdot H_{ind}}{2 \cdot 101330} \right)}$$

$$Q_{mod} \left(\frac{m^3}{s} \right) = Q_{mod} \left(\frac{Nm^3}{s} \right) \cdot \frac{298}{273} \cdot \frac{1}{\left(1 + \frac{\rho_{água} \cdot g \cdot H_{mod}}{2 \cdot 101330} \right)} \quad (3.20)$$

Na equação (3.20) Q_{ind} representa a vazão de gás no distribuidor industrial, Q_{mod} a vazão de gás no modelo físico, g é a aceleração da gravidade, H_{mod} a altura da coluna de água no modelo físico (0,2765 m), H_{ind} a altura da coluna de aço no distribuidor industrial (0,8295 m), $\rho_{aço}$ é a densidade do aço líquido (7036 kg/m³, Tabela III.2), $\rho_{água}$ é a densidade da água (997 kg/m³, Tabela III.2), e λ é o fator de escala geométrica (1/3).

3.5.3. Determinação da curva DTR

Para maximizar a oportunidade de flotação de inclusões em um distribuidor faz-se necessário inserir em seu interior modificadores de fluxo que ajustarão a curva de distribuição de tempos de residência – DTR (COSTA, 2003). A partir destas curvas, são determinados os seus respectivos volumes característicos, entre eles o volume pistonado, de mistura e morto, e evitadas situações indesejáveis com o curto-circuito. Em geral, esses modificadores são estruturas sólidas que atuam como obstáculos e moldam as linhas de fluxo no interior do distribuidor. Além desses modificadores de fluxo sólidos, barragens gasosas (NASCIMENTO, 2008) podem desempenhar papel semelhante e favorecer de forma mais intensa a remoção de inclusões.

Para determinar a curva DTR é necessário a injeção de um pulso de um traçador iônico na entrada do distribuidor para modificar a condutividade elétrica da água. Com o auxílio de condutímetro instalados na saída de cada veio, é monitorada e registrada a variação de condutividade elétrica da água ao longo de um intervalo de tempo até que o valor da condutividade retorne ao patamar original, instantes antes da injeção do traçador iônico. Com base nesse registro, é possível construir a curva DTR que será explicada a seguir.

Para a construção de uma curva DTR, é necessário se conhecer alguns parâmetros como tempo de residência teórico, dado pela equação (3.21):

$$\bar{t} = \frac{V_{distribuidor}}{Q_T} \quad (3.21)$$

sendo:

\bar{t} é o tempo de residência teórico;

$V_{distribuidor}$ é o volume do distribuidor;

Q_T é a vazão total, ou seja, a soma das vazões de todos os veios ou vazão de entrada.

Com esse parâmetro, pode-se calcular o tempo adimensional para cada elemento de volume que sai do reator, dado pela equação (3.22):

$$\theta_n = \frac{t_i}{\bar{t}} \quad (3.22)$$

θ_n é o tempo adimensional;

t_i é o tempo referente a cada aquisição i de dado pelo sensor na saída do distribuidor.

De forma similar, é calculada a concentração média supondo diluição de todo o traçador no volume do distribuidor através da equação (3.23):

$$C_{m\acute{e}dia} = \frac{N_{ensaio}}{V_{distribuidor}} \quad (3.23)$$

sendo:

$C_{m\acute{e}dia}$ é a concentração média;

N_{ensaio} é o número de mols de traçador usado no ensaio.

Com esse parâmetro pode-se calcular, através da equação (3.24), a concentração adimensional para cada instante de tempo:

$$Cn = \frac{C_i}{C_{m\acute{e}dia}} \quad (3.24)$$

sendo:

Cn é a concentração adimensional;

C_i é a concentração medida para cada tempo de aquisição dos dados.

Para se construir a curva DTR, é feito um gráfico de Cn versus θ_n . Uma propriedade interessante é que a área abaixo da curva deve ser unitária, conforme equação (3.25):

$$A_{DTR} = \int_{\theta=0}^{\theta=\infty} Cn_i d\theta = 1 \quad (3.25)$$

sendo:

A_{DTR} é a área de baixo da curva;

Cn_i é a concentração adimensional para um instante θ .

Uma forma de se aproximar numericamente a integral da curva DTR consiste em fazer pequenos retângulos de altura Cn_i e largura $\Delta\theta$, calcular as suas áreas e somá-las ao longo do tempo. Desta forma tem-se à equação (3.26):

$$A_{DTR} \cong \sum_{\theta=0}^{\theta=\infty} Cn_i \Delta\theta \quad (3.26)$$

SAHAI e EMI (1996) definem alguns parâmetros para a análise das curvas DTR, como apresentado a seguir.

Tempo de residência médio: indica o tempo médio, até duas vezes o tempo de residência teórico, que os elementos de volume ficaram no interior do reator. Pode ser calculado através da seguinte equação (3.27):

$$\bar{\theta} = \frac{\sum_{\theta=0}^2 C n_i \theta_i}{\sum_{\theta=0}^2 C n_i} \quad (3.27)$$

sendo:

$\bar{\theta}$ é o tempo adimensional médio do reator.

Fração de volume pistonado: este parâmetro é obtido diretamente da curva DTR e refere-se ao tempo, após a injeção do traçador, durante o qual os sensores ficam sem estímulo da variação da concentração no meio, conforme indicado na Figura 3.19.

Fração de volume morto: antes de calcular a fração de volume morto, é necessário calcular a integral da curva DTR até duas vezes o tempo de residência teórico. Para tal, utiliza-se a equação (3.28):

$$Q_a = \sum_{n=0}^{n=2} C n_i \Delta\theta \quad (3.28)$$

sendo:

Q_a é a integral da curva DTR até duas vezes o tempo de residência teórico.

Com esse último resultado, pode-se calcular a fração de volume morto através da equação (3.29):

$$f_{morto} = 1 - \frac{Q_a}{A_{DTR}} \bar{\theta} \quad (3.29)$$

sendo:

f_{morto} é a fração de volume morto.

De posse dos valores das frações de volume pistonado e morto, calcula-se o valor da fração de volume de mistura através da equação (3.30):

$$f_{mistura} = 1 - f_{pistonado} - f_{morto} \quad (3.30)$$

A Figura 3.20 mostra graficamente os parâmetros definidos anteriormente.

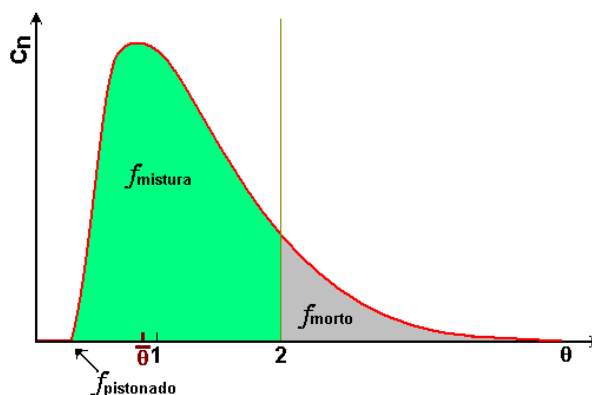


Figura 3.20: Parâmetros de uma curva DTR.

3.6. Diferentes Métodos Utilizados no Ensaio de Remoção de Inclusões Sólidas

O intuito deste item é mostrar os métodos empregados por diferentes pesquisadores na simulação de remoção de inclusões em distribuidores. Para isso, a Tabela III.6 apresenta um resumo dos principais artigos encontrados na literatura. Esta tabela será discutida a seguir.

Em geral, os modelos físicos em escala reduzida têm respeitado preferencialmente a similaridade de Froude. Critério esse de similaridade que facilita o cálculo dos ajustes de escala como, por exemplo, para o tamanho de inclusões simuladas e a correção na concentração de inclusões.

Tabela III.6: Principais características dos modelos físicos de distribuidores e modelos de ensaio utilizados por diversos autores (Machado, 2014).

Autor(es)/Ano	Característica do modelo físico					Método de quantificação	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	Critério de similaridade					
Joo, S.; Guthrie, R. I. L. (1993)	5190x1100x680 mm	1 veio	1:1	Retangular	Froude e Reynolds	ZSE	Contínuo	3 \bar{t}	5·10 ⁵ partículas/min*	Não informado
Hojo, M., <i>et al.</i> (1996)	7t (capacidade)	1 veio	1:2	Retangular	Froude	Turbidez	Pulso	\bar{t}	Não informado	Não informado
Cho, J.; Lee, H. (2001)	1000x300x450 mm	1 veio	1:1	Retangular	Froude e Reynolds	Peneira	Contínuo	$t_i + \bar{t}$	20g/min e variável	Não informado
Kim, H. (2003)	70t (capacidade)	4 veios	1:1	Delta	Froude e Reynolds	ZSE	Contínuo	2 \bar{t}	Não informado	1-5·10 ⁸ partículas/m ³
Rogler, J. P., <i>et al.</i> (2005)	1393x190x380 mm	1 veio	1:3	Retangular	Froude	Peneira	Pulso	3 \bar{t}	6g	49ppm
Zhang, Q. Y., <i>et al.</i> (2006)	Não informado	1 veio	1:2	Não informado	Não informado	Peneira	Semicontínuo (100s de injeção)	10min	17,5 e 12,5g	Não informado
Jin-gang, L., <i>et al.</i> (2007)	780x400x400 mm	1 veio	1:2,5	Retangular	Froude	Peneira	Pulso	10min	500 partículas	4·10 ⁵ partículas/m ³
Qiang, Y., <i>et al.</i> (2009)	2250x244x400 mm	2 veios	1:3	Retangular	Froude	Peneira	Pulso	12min	2g	Não informado
Qiang, Y., <i>et al.</i> (2010)	1665x480x420 mm	1 veio	1:2,5	Retangular	Froude	Peneira	Pulso	12min	2 e 40g	Não informado
Chattopadhyay, K., <i>et al.</i> (2011)	4380x256x400 mm	4 veios	1:1	Delta	Froude e Reynolds	Não informado	Não utilizado	t_{trans}	Não houve injeção	Não informado
Zhang, M. J., <i>et al.</i> (2011)	2374x256x400 mm	2 veios	1:3	Retangular	Froude	Peneira	Pulso	3 \bar{t}	200g	Não informado
Seshadri, V., <i>et al.</i> (2012)	60t (capacidade)	2 veios	1:3	Retangular	Froude	Peneira	Pulso	Não informado	Não informado	Não informado

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

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

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

ZSE = Zona de Sensibilidade Elétrica;

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

É possível observar na Tabela III.6 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 III.6, de distribuição de tempos de residência e modelagem matemática apresentado por ZHANG *et al.* (2000) 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 III.6). 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 *et al.* (2006) ainda apresentaram um método de injeção semicontínuo 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 transiente (TANAKA *et al.* 1993) e ensaios durante esse período poderiam fornecer informações úteis à produção de aço limpos.

Segundo a Tabela III.6, 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 147,5g/min.

Entre os modelos físicos empregados nos estudos estão dois métodos predominantes de quantificação de inclusões não flotantes: um mais simples via peneira, referenciado por CHO e LEE (2001), e outro via sensor de quantificação de partículas, que utiliza o método ESZ (*Electric Sensing Zone*), citado por JOO *et al.* (1993). Também é possível empregar o método de turbidez para realizar o ensaio apresentado por HOJO *et al.* (1996), que não será explorado nessa revisão. Detalhes dos dois primeiros métodos apresentados serão mostrados a seguir.

3.7. 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 *et al.* (2009). 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 (3.31). Essa equação também foi apresentada por QIANG *et al.* (2009), ROGLER *et al.* (2005), ZHANG *et al.* (2006), JIN-GANG *et al.* (2007) entre outros autores.

$$\eta_r (\%) = \left[1 - \left(\frac{m_c}{m_i} \right) \right] \cdot 100\% \quad (3.31)$$

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 “percentual 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 possibilita quantificar a remoção de inclusões para diferentes tamanhos e como se comportam para diferentes escoamentos. Contudo esse método de peneira não será abordado nesse trabalho, ficando o próximo método responsável pela medição dos tamanhos e faixas granulométricas das partículas.

3.8. Método de Quantificação de Inclusões Via Sonda

Liquid Metal Cleanliness Analyzers, ou LiMCA, abreviadamente, é uma classe de detectores de inclusão para metais líquidos, que se baseia na Zona de Sensibilidade Elétrica (ZSE), também referida na literatura como *Electric Sensing Zone*, ou simplesmente pelas iniciais ESZ. É um sistema para aquisição de dados tendo por base técnicas de processamento de sinais elétricos associados. Tem o potencial de proporcionar uma medida quantitativa instantânea de inclusões não metálicas em um banho metálico. E é nesse fato que reside a enorme importância do dispositivo nas

modernas indústrias metalúrgicas envolvidas no refino e lingotamento de metais líquidos. Com o desenvolvimento rápido da engenharia de materiais, há sempre restrições mais severas para a qualidade e limpeza de metais que estão sendo produzidos. Projetos modernos para investigar a produção de aço ultra limpo é uma ansiedade e exige um "analisador de limpidez do metal" eficiente e confiável.

J. C. Maxwell teve a primeira concepção da LiMCA, baseada no princípio ZSE, e o primeiro a explorá-la para sistemas aquosos foi Wallace Coulter, antes de 1953. Sua extensão direta para a indústria metalúrgica foi proposta e explorada por Guthrie e Doure no final de 1979 com o primeiro instrumento de trabalho projetado para detectar inclusões em operações de processamento de alumínio líquido. Em outras atividades de pesquisa na Universidade McGill, foi estendida para a detecção de inclusões no aço e cobre, e também de recursos em uma ferramenta de pesquisa para experimentos de modelagem de água, para monitorar continuamente, inclusões em modelos de água de operações de processamento de metalúrgicos. Para esses, os contadores Coulter *off-line* utilizados nas indústrias médicas não eram adequados.

Antes de 1980, o desenvolvimento científico de contadores Coulter de partículas foi realizada por um grande número de pesquisadores independentes e diferentes empresas, trabalhando em vários aspectos do dispositivo aquoso, como o design da sonda, processamento de sinais e aquisição de dados, entre outros. A literatura publicada nesse momento era dispersa e separada, e somente uma revisão de trabalho científico publicado não seria suficiente para retratar o desenvolvimento do equipamento LiMCA. No entanto, uma vez que seus princípios iniciais eram em sua maioria desenvolvidos por inventores contemporâneos tentando comercializar e vender seus aparelhos, uma tendência bastante consistente no desenvolvimento da técnica LiMCA pode ser obtida a partir das várias patentes registradas desde 1983, quando a primeira patente foi emitida nos Estados Unidos. De 1980 a 2000 viu-se um notável desenvolvimento de LiMCA com as diversas variantes que foram projetadas para uma variedade de sistemas de metal, como alumínio, magnésio, cobre, ferro e aço, etc. Como resultado, modelos de produção comerciais já estão sendo comercializados pela ABB e Alcan (LiMCA CM[®] para Alumínio) e Heraeus Electro-Nite (ESZpas para o aço). Atividades recentes em seu contínuo desenvolvimento na Universidade McGill visam melhorar equipamentos LiMCA como um análogo aquosa para experimentos de modelagem física, e para resolver e eliminar alguns problemas

associados com o uso de água como fluido de trabalho. O equipamento mais atual adaptado para o uso em água recebeu o nome de *Aqueous Particle Sensor III* (APS III).

3.8.1. Princípio de funcionamento da LiMCA e APS

CHAKRABORTY (2010) apresentou a fundamentação do princípio de funcionamento da Zona de Sensibilidade Elétrica, comum à LiMCA e APS, que é a essência da forma de detecção desses dispositivos. Ela se baseia na existência de uma diferença na condutividade elétrica da partícula (inclusão não-metálica) e o fluido de trabalho (metal líquido). Assim, o próprio detector é uma maneira de medir as resistências do meio fluido. Da mesma forma, Contadores Coulter são projetados para uso biológico, como por exemplo na contagem de bactérias na água ou de células no sangue. Nesta seção, portanto, o meio vai ser apenas tratado como "fluido de trabalho".

A Figura 3.21 mostra o princípio de funcionamento do dispositivo. O fluido, que contém uma suspensão de partículas de inclusão, passa através de um orifício estreito de tamanho conhecido. Dois eletrodos são utilizados para aplicar uma corrente elétrica constante (I) através do orifício. Quando o orifício não contém partículas, a resistência (R) entre os eletrodos é devido apenas ao fluido condutor. Isto produz uma diferença de potencial $V = (RI)$ através dos eletrodos, que é registrada como a saída de linha de referência para a ausência de partículas. Agora, considere uma única partícula que entra no orifício, ou na Zona de Sensibilidade Elétrica (ZSE), deslocando, assim, o seu próprio volume de fluido. Uma vez que o fluido condutor no orifício é agora substituída por uma partícula de isolamento, a resistência através do orifício altera para $(R+\Delta R)$ e a diferença de potencial através dos eletrodos salta para $V=(R+\Delta R)I$. Este salto de tensão, quando a partícula passa através do orifício, é gravado e a sua magnitude é a indicação do tamanho da partícula (GUTHRIE & LI, 2000, 2001).

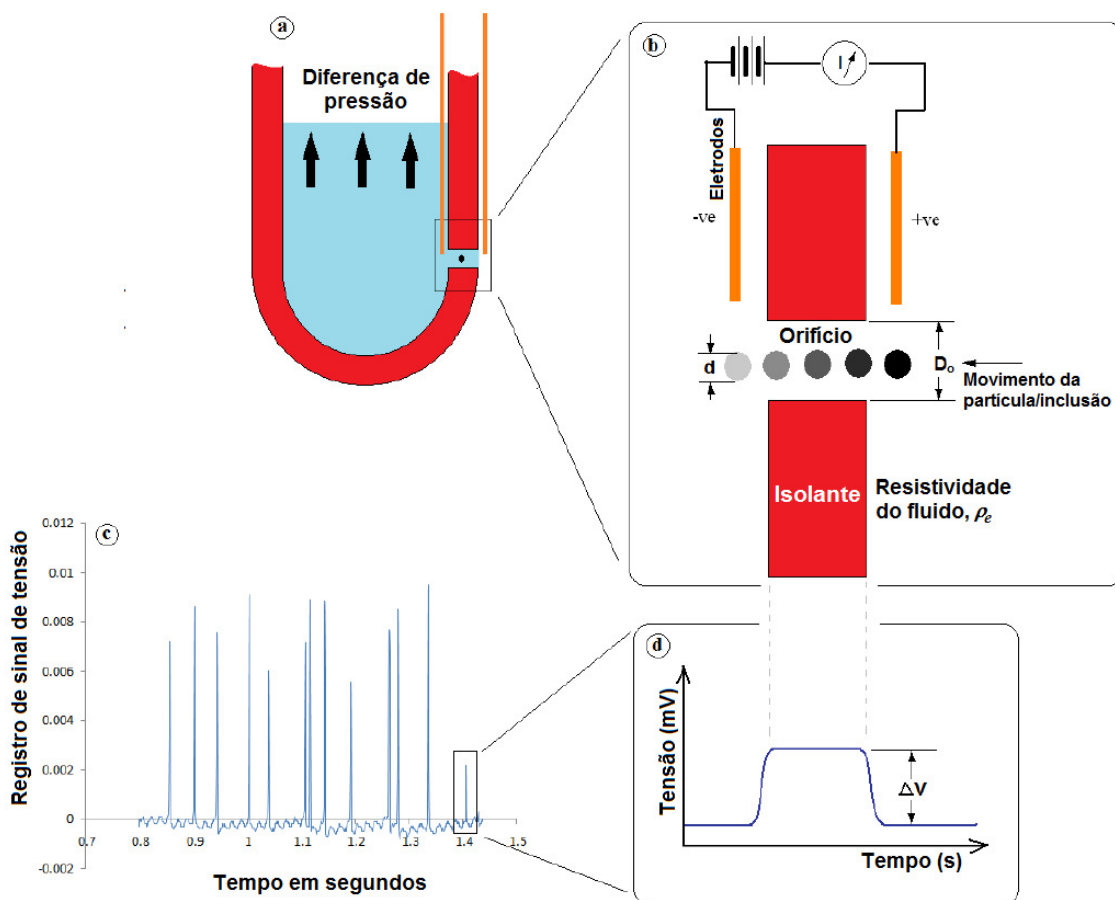


Figura 3.21: Princípio da Zona de Sensibilidade Elétrica (ZSE), CHAKRABORTY (2010).

3.8.2. Equação adotada na LiMCA

Intuitivamente, durante as medições reais de partículas discretas dentro de uma Zona de Sensibilidade Elétrica (ZSE), o número de picos detectados é igual ao número de partículas amostrado, e a altura dos picos está relacionada com os tamanhos de partículas pela equação (3.32), apresentada por MAXWELL (1954).

$$\Delta V = \frac{4\rho_e I d^3}{\pi D_o^4} \quad (3.32)$$

Sendo ΔV é a diferença de tensão quando a partícula passa através do orifício

ρ_e é a resistividade elétrica do fluido de trabalho;

I é a corrente constante flui através do orifício;

d é o diâmetro da partícula;

D_o é o diâmetro do orifício.

A equação (3.32) foi obtida a partir de derivações aproximadas das equações de Maxwell, partindo do pressuposto que as partículas então dispersas em um meio em que não seja alterada de forma alguma o campo elétrico no interior do orifício, exceto nas posições próximas a superfície da partícula. Na derivação da equação (3.32) também foi assumido que as partículas são isolantes perfeitos. Neste momento será desenvolvida uma equação geral para relacionar a diferença de tensão elétrica e o tamanho de partículas.

Tem-se que:

$$R + \Delta R = \rho_{eff} \int \frac{dx}{A(x)} \quad (3.33)$$

De forma que:

R é a resistência elétrica;

ΔR é a variação de resistência elétrica;

ρ_{eff} é a resistividade elétrica efetiva dentro do orifício;

$A(x)$ representa a área da seção transversal do orifício;

Sendo ρ_s a resistividade elétrica da partícula,

f a fração do volume da partícula no orifício, e

L_o o comprimento geométrico do orifício, tem-se:

$$\rho_{eff} = \left[\frac{2\rho_s + \rho_e + f(\rho_s + \rho_s)}{2\rho_s + \rho_e - f(\rho_s + \rho_s)} \right] \rho_e \quad (3.34)$$

$$f = \frac{\text{volume da partícula}}{\text{volume da zona de sensibilidade elétrica}}$$

$$f = \frac{\pi/6 \cdot d^3}{\pi/4 \cdot D_o^2 \cdot L_o}$$

$$f = \frac{2 d^3}{3 D_o^2 L_o} \quad (3.35)$$

Assim, com esta informação, pode-se medir a mudança na resistência quando a partícula passa através do orifício por

$$\Delta R = \frac{4\rho_{eff}L_o}{\pi D_o^2} - \frac{4\rho_e L_o}{\pi D_o^2} = \frac{4L_o}{\pi D_o^2} (\rho_{eff} - \rho_e) \quad (3.36)$$

Agora, com este conjunto de equações gerais, pode-se derivar a equação original de Maxwell (3.32) para partículas perfeitamente isolantes. Assim, a partir da equação (3.34) obtém-se

$$\rho_{eff} = \lim_{\rho_s \rightarrow \infty} \left[\frac{2\rho_s + \rho_e + f(\rho_s + \rho_s)}{2\rho_s + \rho_e - f(\rho_s + \rho_s)} \right] \rho_e$$

$$\rho_{eff} = \frac{1}{2} \left(\frac{2+f}{1-f} \right) \rho_e \quad (3.37)$$

Expandindo a equação (3.37) usando a série de potência, obtêm-se:

$$\rho_{eff} = \rho_e \left(1 + \frac{3}{2}f + \frac{3}{2}f^2 + \dots \right) \quad (3.38)$$

O termo $3/2 f$ na equação (3.38) surge como um resultado da distorção do campo elétrico em torno da esfera. Desde que $f \ll 1$, pode-se reter os dois primeiros termos e ignorar os demais termos de ordem mais elevados. Assim, tem-se a mudança na resistência para uma partícula condutora que passa através do orifício.

$$\Delta R = \frac{4\rho_e d^3}{\pi D_o^4} \quad (3.39)$$

3.8.3. Circuito eletrônico, técnica de excitação e amplificação de sinal

A técnica da LIMCA e APS foi concebida para excitar devidamente o tubo detector. A solução ideal seria aplicar uma fonte de alimentação com corrente contínua constante entre os eletrodos. Isso garantiria que a diferença de potencial através dos eletrodos fosse diretamente proporcional à resistência do outro lado da sonda, e independente das características do circuito do dispositivo.

A Figura 3.22 descreve o mais simples de todos os mecanismos que permite a excitação elétrica em tubos detectores baseados na ZSE. Ela usa uma bateria normal, ligada através de uma resistência variável em função da corrente (resistência *Ballast*, R_B) e a sonda de detecção em série (NAKAJIMA, 1986; TANAKA, 1986).

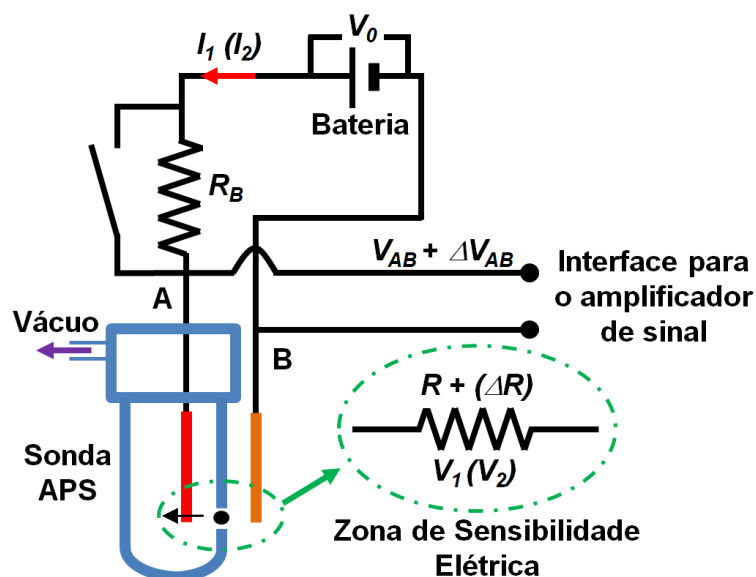


Figura 3.22: Circuito elétrico para corrente de excitação (CHAKRABORTY, 2010).

Agora, a partir da disposição mostrada na Figura 3.22, quando somente o líquido, sem qualquer partícula, passa através do orifício calibrado do sensor, a tensão registrada na sonda LiMCA é

$$I_1 = \frac{V_0}{R + R_B} \quad \text{e} \quad V_1 = I_1 R \quad (3.40)$$

Quando uma partícula passa através do orifício, o aumento da resistência da sonda por uma quantidade ΔR . Assim, a nova diferença atual e potencial entre os eletrodos se tornar

$$V_2 = I_2(R + \Delta R) \quad \text{e} \quad I_2 = \frac{V_0}{R + \Delta R + R_B} \quad (3.41)$$

Portanto:

$$\Delta V = V_2 - V_1 \quad (3.42)$$

$$\Delta V = \left(\frac{R + \Delta R}{R + \Delta R + R_B} - \frac{R}{R + R_B} \right) V_0 \quad (3.43)$$

$$\Delta V = \frac{R_B \Delta R}{(R + R_B)(R + \Delta R + R_B)} V_0 \quad (3.44)$$

Para a maioria das configurações que trabalham no ambiente do metal líquido, o valor de R_1 pode ser escolhido para ser substancialmente maior do que R . Isto é fácil como metais, sendo bons condutores de eletricidade, o valor de R é muito pequena, e mesmo com uma resistência R_B de uma ordem de grandeza mais elevada ligados em série, se o valor I_1 não diminui tanto como para reduzir a sensibilidade do detector.

$$\lim_{R \gg R_1} \frac{R_B \Delta R}{(R + R_B)(R + \Delta R + R_B)} V_0 \quad (3.45)$$

$$\Delta V = \frac{\Delta R}{R_B} V_0 \quad (3.46)$$

Durante a criação do circuito, os valores de R_1 e V_0 são mantidos constantes e assim temos a relação de trabalho

$$\Delta V \propto V_0 \quad \text{ou} \quad \Delta V = k V_0 \quad (3.47)$$

Assim, a partir da equação (3.47) é evidente que quanto maior for a tensão usado para a excitação, maior seria o sinal de saída, e, portanto, maior a sensibilidade. No entanto, isso não se recorre, haja visto que como a tensão mais alta poderia proporcionalmente tem que lidar com a demanda corrente mais alta do circuito. Em vez disso, uma tensão de excitação de cerca de 12 volts pode ser usada para a maioria dos sistemas.

Devido ao pequeno valor de ΔV obtido para a baixa tensão de excitação, um arranjo amplificador externo é usado para amplificar, entre 0 e 5 volts, toda a faixa de ΔV de microvolt dos sinais gerados pelas inclusões. Sendo α_m o ganho linear do amplificador utilizado, de modo a partir da equação (3.32), o pico de saída de tensão do amplificador é

$$\Delta V_{\text{Amplificado}} = \alpha_m \frac{4\rho_e I d^3}{\pi D_o^4} \quad (3.48)$$

Neste ponto, será apresentado um exemplo específico de um detector de operar sob um meio específico e conjunto particular de condições, sendo ele a água líquida, de modo a determinar a ordem de grandeza de α_m . O valor exato de α escolhido foi baseado em uma ordem de magnitude da análise da equação (3.32). Apenas como curiosidade, a água possui $\alpha_{\text{água}} \sim 2$, ou uma amplificação ajustada na faixa de cerca de 100 (10^2), e o alumínio possui $\alpha_{\text{alumínio}} \sim 5$ por exemplo.

A Figura 3.23 apresenta a sequência de sinais gerado na LiMCA.

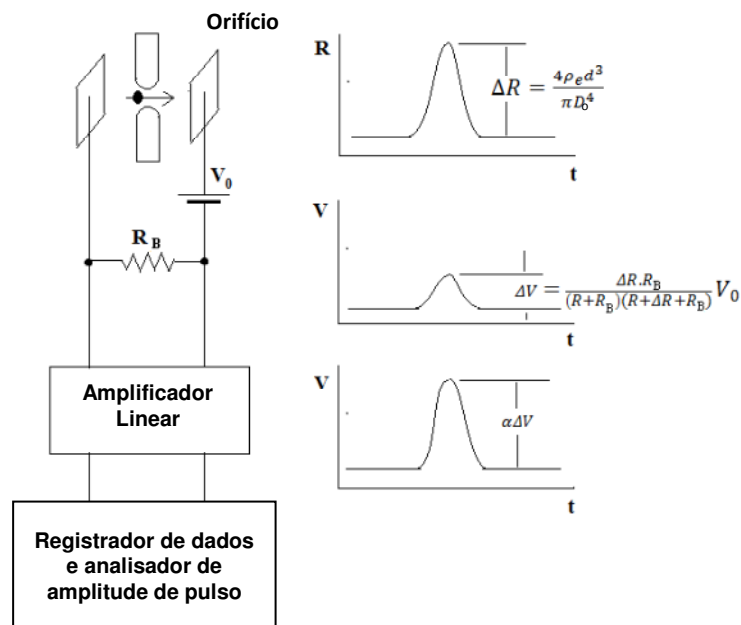


Figura 3.23: Sequência de sinais gerados no aparelho LiMCA (CHAKRABORTY, 2010).

Na prática, amplificadores que operam nessa faixa de amplificação não são difíceis de serem construídos usando um número relativamente pequeno de componentes. No entanto, a elevada resistência do caminho elétrico através da água faz com que o sinal fique propenso a captar ruído excessivo, sendo essencial dessa forma implementar

técnicas de supressão de ruído adequadas para sensores de partículas aquosas (APS).

Duas outras características que o amplificador LiMCA deve possuir são: um bom recurso de redução de ruído, e uma excelente resposta em alta frequência. Isso é essencial pois os picos no sinal são fenômenos aleatoriamente transientes, que dura quase sempre menos de um milésimo de segundo, de modo que a característica de alta frequência do amplificador torna-se ainda mais essencial. Novos avanços relacionados ao sinal e as relações de ruído foram conseguidos através da aplicação de filtros adequadamente escolhidos do tipo rejeita-faixa e passa-baixas.

3.8.4. Técnicas de processamento de sinal e aquisição de dados

Os dados originais, sem qualquer tratamento, obtidos do sinal de saída da sonda LiMCA/APS, e após amplificação sucessiva, que consiste fundamentalmente de uma série de impulsos de tensão transiente correspondentes a cada partícula a ser contada. Uma vez que a partícula geralmente demora menos de um milissegundo para passar através do orifício, esses impulsos de tensão para aquisições são sinais muito estreitos, e propor uma aquisição e analisar esses primeiros sinais foi um problema antigo dos contadores Coulter, uma vez que o alto desempenho da eletrônica de estado sólido não estavam disponíveis.

Com o advento de circuitos integrados na microeletrônica, após a década de 1980, esta tecnologia foi eventualmente aplicada à aquisição e processamento de dados da LiMCA. Durante 1994, DRAGANOVICI (1994) e SHI (1994) fizeram avanços significativos para o instrumento através da incorporação de um processador de sinal digital, e programar uma aplicação de computador de uso amigável permitiu a um usuário, inexperiente na LiMCA, ser capaz de operar o dispositivo rapidamente.

Enquanto o sinal de LiMCA forneceu informações sobre cada partícula, e em teoria, um analisador de dados pode fazer uma lista do tamanho de cada partícula detectada, que conduziria a uma grande quantidade de informação, que pode não ser muito conveniente para fins industriais ou de pesquisa. Assim, os algoritmos de processamento de sinal desenvolvido classificam todas as partículas que foram detectadas num número de grupo apropriadamente escolhido, segundo LARSEN

(2005). Os contadores foram utilizados para armazenar o número de partículas em grupos por faixa de tamanhos, e os valores resultantes de cada grupo foram apresentados como um histograma. Esse tipo de dados foi muito mais conveniente para a análise por parte do usuário. A Figura 3.24 mostra esse processo.

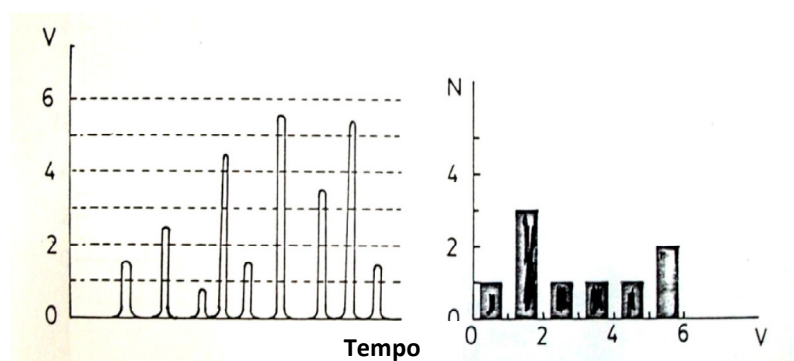


Figura 3.24: Analisador de amplitude de pulso (LARSEN, 2005).

O trabalho de CARROZA (1999) propôs que, enquanto a amplitude do pulso era um indicador do tamanho da partícula detectada, outras informações sobre a natureza exata da partícula, como a sua forma, a relação de aspecto, etc., podem ser obtidas através de estudo com precisão da forma exata dos picos, e não apenas de sua amplitude. A Figura 3.25 mostra os outros parâmetros de pico que foram estudados com o processador de sinal digital (PSD).

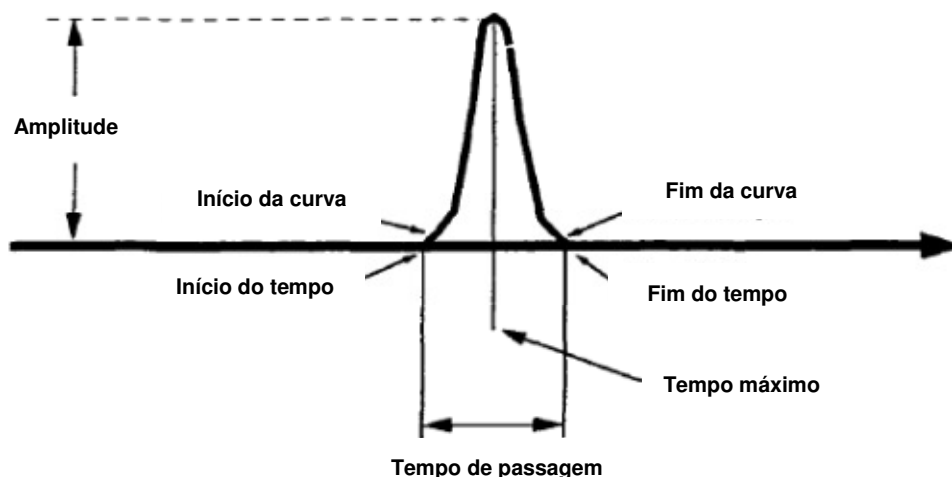


Figura 3.25: Parâmetros de pico complementares estudados com o processador de sinal digital (CARROZA, 1999).

Entre as motivações para o estudo deles, uma foi a possibilidade de usar a LiMCA para diferenciar uma microbolha de ar de uma partícula sólida. As experiências foram feitas com uma LiMCA aquosa (APS) usando um número de partículas como segunda fase, tais como sílica, látex e microbolhas de ar. Estudos experimentais mostraram que de fato houveram diferenças marcantes nos tempos de passagem e inclinações de entrada dos pulsos de acordo com a densidade de partículas. CARROZA (1999) também fez uma análise do espectro de Fourier dos sinais. Enquanto sua dissertação mostrou claramente a aplicabilidade da LiMCA na classificação, não somente no tamanho, mas também na natureza da partícula, entretanto ele não propôs princípios ou algoritmo pelo qual isto poderia ser alcançado.

Uma década depois, WANG *et al.*, (2008), com o auxílio de modelagem matemática, mostraria exatamente o que governa a forma dos impulsos da LiMCA. Isso era especialmente verdadeiro para as bolhas de ar, tendo em vista que elas tendem a deformarem-se ao passarem através do orifício. As microbolhas se tornariam alongadas e tem um tempo de residência maior na Zona de Sensibilidade Elétrica em relação a uma partícula sólida deformável de mesmo volume, tornando assim o pico mais largo e menos intenso (menor altura).

3.8.5. Relato sobre o desenvolvimento da APS, *Aqueous Particle Sensor*

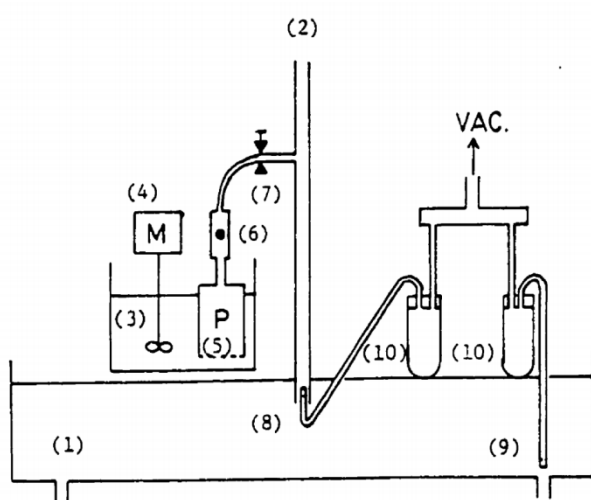
A tese de doutorado de TANAKA (1986) relatou um sistema de ZSE análogo para modelos de água usado para investigar o comportamento de inclusão em modelos de água. A tese de investigação de DOUTRE (1986) divulgou maiores detalhes sobre os princípios e os parâmetros de trabalho por trás da técnica ZSE para a água. O fato de que ele trabalhou com um ambiente menos corrosivo do que o aço líquido, ou seja, na água, um melhor entendimento foi obtido sobre a importância do desempenho do amplificador, remoção de ruído, e um algoritmo de aquisição de dados adequado.

A forma que os dados foram analisados pela APS (*Aqueous Particle Sensor*) na água e pela LiMCA no alumínio líquido foram muito semelhantes, envolvendo regras de agrupamento de faixas granulométricas adequadamente escolhidas. Os vários tamanhos que caem dentro da faixa de medição do dispositivo foram classificados em um número conveniente de grupos, e o número de partículas que caem em cada grupo foi contado (feita a estratificação dos dados). Uma amplitude de pulso analisada

iria determinar a amplitude de cada pico e usar uma relação predeterminada, para converter as leituras de tensão em tamanhos de partículas.

Neste ponto, deve ficar claro que, uma vez na água, não há dificuldade adicional em operar em altas temperaturas de alumínio fundido, existem outras dificuldades associadas com água decorrentes de sua baixa condutividade elétrica. O problema foi resolvido com sucesso através de técnicas apropriadas de blindagem. Os cabos coaxiais foram utilizados e do próprio tubo detector foi totalmente coberto com uma trança de aço inoxidável, com apenas a região do orifício ficou por cobrir. Uma descoberta acidental importante que saiu desses experimentos foi o efeito benéfico do aterramento do distribuidor para ajudar a reduzir drasticamente o nível de ruído no sinal.

Para além do desenvolvimento de um detector e contador de partículas apropriada, TANAKA (1986) também desenvolveu um arranjo de distribuidor, em que o desempenho de inclusões poderia ser continuamente monitorizado com precisão. Uniu duas sondas APS para um modelo de água reduzida funil, uma na entrada da válvula longa e o outro na entrada da válvula submersas. Este arranjo foi utilizado com sucesso para obter os parâmetros de desempenho no distribuidor, tais como proporções residuais de inclusões, desempenho de modificadores de fluxo, e assim por diante. A Figura 3.26 apresenta o esquema do arranjo usado como mostrado na tese de 1986.



Legenda:

- 1: Distribuidor;
- 2: Entrada da válvula;
- 3: Reservatório de 8 litros;
- 4: Agitador;
- 5: Bomba;
- 6: Medidor de vazão;
- 7: Válvula de controle de fluxo;
- 8: Amostrador 1;
- 9: Amostrador 2;
- 10: Coletor de água.

Figura 3.26: Configuração do modelo experimental de água a frio usado por TANAKA (1986).

Enquanto alumínio líquido contém inerentes inclusões não metálicas, houve um problema com água, uma vez que não contém nenhum simulador para inclusões. Este problema foi resolvido com a adição de inclusões mais leves que a água, no caso partículas de sílica ocas de faixa de tamanho de 0 a 200 μm (TANAKA, 1986). A sílica seria molhada, e ao mesmo tempo, o fato de sua densidade ser menor do que a da água significa que elas tendem a flutuar, assim, aproximadamente, modelando o comportamento das inclusões no aço. O esquema da Figura 3.26 mostra a disposição do agitador no reservatório que contém a suspensão de partículas, a manutenção de uma mistura homogênea principalmente para ser adicionado à válvula longa. A faixa de medição eficaz para o dispositivo utilizado por Tanaka era cerca de 20 a 300 μm . Os tubos detectores eram feitos de tubos de ensaio de borossilicato com orifícios perfurados no lado usando uma broca de micrômetros com ponta de diamante.

3.8.6. Projeto de nova sonda sensor APS

O McGill *Metals Processing Centre* (MMPC) na McGill *University*, em Montreal, tem criado uma série de dispositivos a fim de estudar o comportamento de inclusões em modelos a água. Em seu trabalho RAY (2006) apresentou o primeiro dispositivo chamado *Aqueous Particle Sensor (APS) II* apresentava algumas limitações. Entre elas destacava-se a APS II não fazia leitura on-line e que a quantidade de ruído no sinal aumentava lentamente com o tempo durante o ensaio. Contudo esse dispositivo

serviu de base para o desenvolvimento da APS III, que não só tem desempenho superior, mas também possibilita aos pesquisadores realizarem modificações para que ela se ajuste as condições de uso. As partículas usadas para simular inclusões são de borossilicato. A Figura 3.27 apresenta uma fotografia, tirada em um Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV), das partículas padrões de diâmetro 140 μm usadas para calibração do sensor.

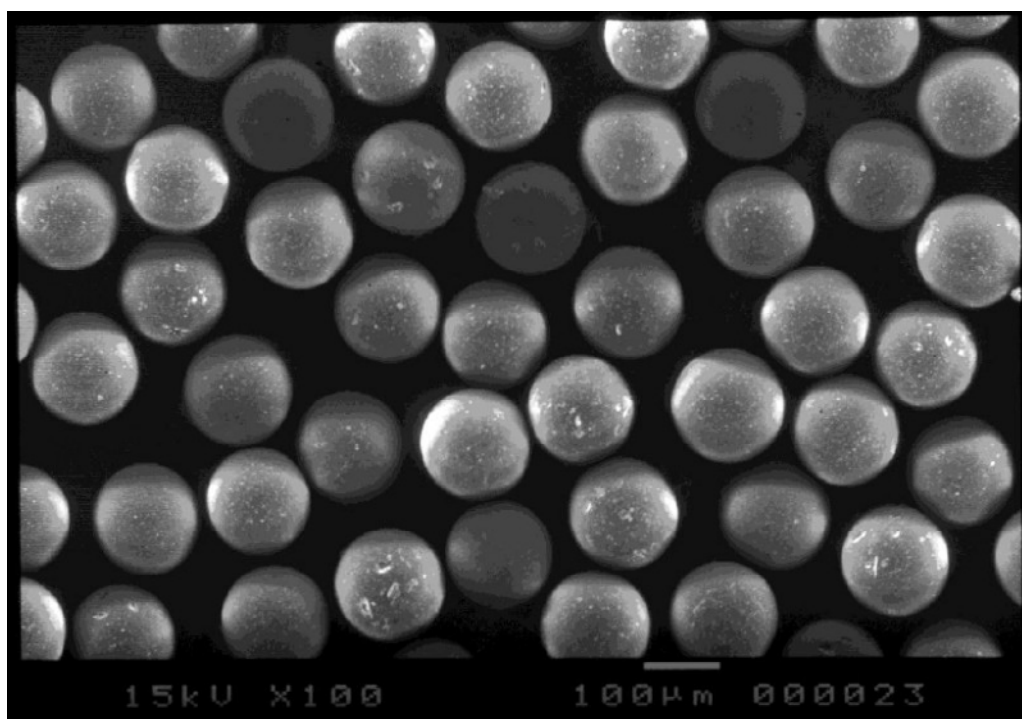


Figura 3.27: Partículas padrões de diâmetro 140 μm (FREIRE, 2011).

CHAKRABORTY (2010) estudou a eficiência da flotação de inclusões no distribuidor. Foram comparadas a eficiência na flotação de quatro modificadores de fluxo. O estudo utilizou das relações denominadas de *Residual Ratio of Inclusions* (RRI) e *Steady-state Inclusion Entrainment Rate* (SIER) para compará-las. A primeira quantificou a quantidade de partículas de cada faixa granulométrica que passa pelo veio do distribuidor em relação à adicionada. A segunda é a quantidade total de partículas que passam pelo veio com o tempo, determinada pela inclinação da região linear da curva da APS III. A Figura 3.28 ilustra o resultado de medição da APS III para dois posicionamentos distintos do sensor no distribuidor, um para veios mais internos (mais próximo a válvula longa) e outro para veios mais externos.

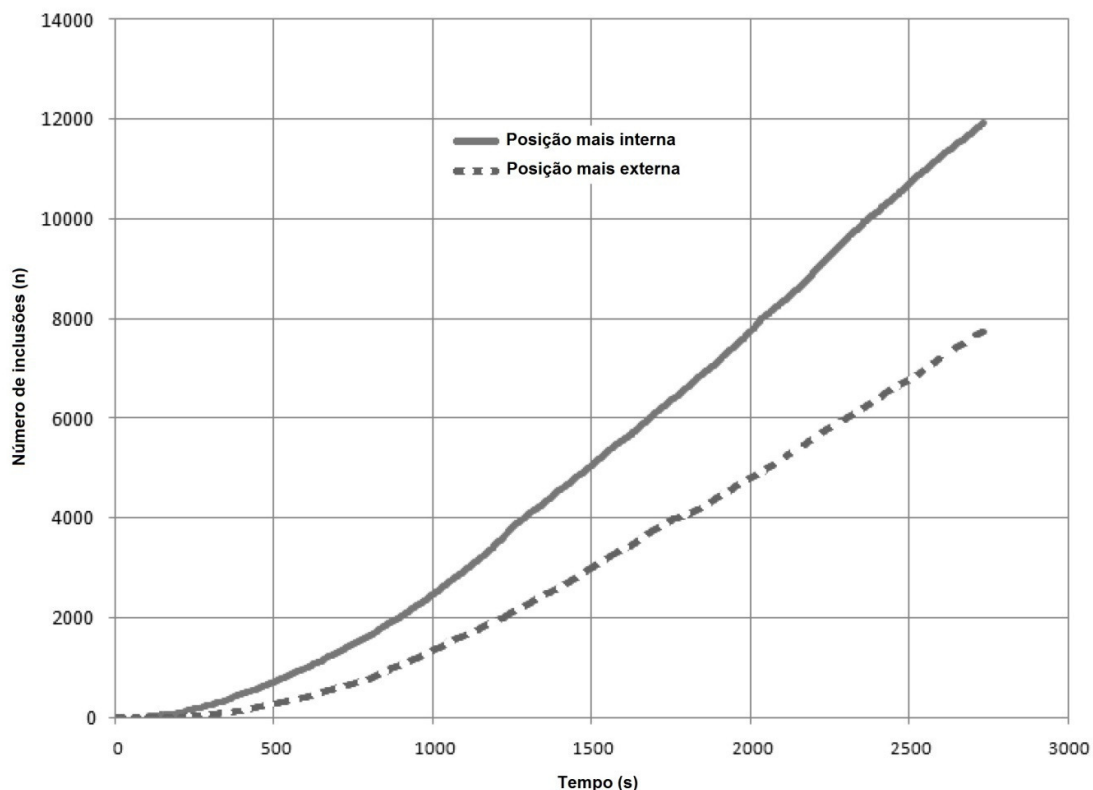


Figura 3.28: Representação gráfica da medição da APS III (CHAKRABORTY, 2010).

Com base nesse recurso tecnológico, o sensor APS III se torna uma ferramenta de diagnose para avaliação da frequência e tamanho das inclusões para a avaliação *on-line* de inclusões em modelos a frio. Para isso, uma bomba peristáltica injeta a uma taxa constante e conhecida de partículas para a entrada do sistema. Com a APS III ajustada para os ruídos elétricos naturais do ambiente onde irá operar, o valor lido na saída de cada sistema apresenta, de forma segura, a contagem de inclusões que chegam na entrada do veio. Com base nessa informação é possível inferir a eficiência global de remoção de partículas. Essa ferramenta tem grande potencial para ser usada nesse estudo por apresentar estabilidade de leitura e nível de ruído natural controlado.

3.8.7. Limite de detecção da APS III

Um fator de limitação para o desempenho da APS é a densidade máxima de partículas no fluido que se pode medir. O princípio da zona de sensibilidade elétrica assume que deve haver uma única partícula do volume da zona de sensibilidade elétrica em

qualquer instante de tempo, ou então dois picos gerado por partículas que passam através do orifício de uma só vez, daria origem a resultados errôneos. A concentração superior limite de partículas pode ser obtida, assumindo uma densidade de partícula uniforme, com uma partícula por volume do orifício.

Volume de Orifício = $\pi r_o^2 h_o = 3,14 \cdot (250 \cdot 10^{-6})^2 \cdot 1,2 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3 = 2,35 \cdot 10^{-10} \text{ m}^3$.
Portanto, a densidade de partículas limite será igual a $(2,35 \cdot 10^{-10})^{-1} \text{ partículas/m}^3 = 4,24 \cdot 10^9 \text{ partículas/m}^3$. Considerando um fator de segurança de 10, a densidade máxima de partícula útil pode ser relatada como: $4,24 \cdot 10^8 \text{ partícula por m}^3$, ou mais convenientemente como $424 \text{ partículas/cm}^3$ (cerca de 400 partículas por centímetro cúbico).

4. METODOLOGIA

No presente trabalho foi estudado um reator metalúrgico utilizado na rota de fabricação do aço, o distribuidor de lingotamento contínuo, que possui importantes funções na produção de aços de elevada qualidade. Esse equipamento possui finalidades específicas e distintas no processo de solidificação do aço. NEVES (2012) relata que no distribuidor de lingotamento contínuo, deseja-se pouca turbulência para promover a flotação de inclusões e evitar o arraste de escória.

Esse reator foi escolhido devido às dúvidas e controvérsias em relação a eficiência de remoção de inclusões pela injeção de gás, onde não existe um consenso no mundo sobre tal técnica. No distribuidor de lingotamento contínuo, a vazão de gás é baixa e a injeção é feita no fundo do equipamento, com um baixo gradiente de pressão. Esse gradiente de pressão é relativo à coluna de líquido que também é considerada baixa no distribuidor, principalmente se comparado aos gradientes de pressão em outros reatores siderúrgicos.

Este tópico descreve os materiais necessários e a metodologia de execução dos experimentos para as simulações com o modelo físico, em escada de 1:3, de um distribuidor de lingotamento contínuo, com o intuito de:

- Avaliar a eficiência de remoção de inclusões para configurações específicas do modelo físico do distribuidor, sem e com injeção de gás em diferentes combinações de vazão de gás e posições de injeção, usando a sonda APS III;
- Determinar curvas DTR do modelo físico sem e com injeção de gás;
- Caracterizar aspectos visuais da cortina de gás e o escoamento dos fluidos pelo método de colorimetria;
- Entre as configurações estudadas, determinar a mais adequada em relação à eficiência de remoção de inclusões.

A seguir é discutida a metodologia adotada no presente trabalho.

4.1. Modelo Físico

O modelo físico do distribuidor utilizado encontra-se instalado no Laboratório de Simulação de Processos do Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais da UFMG. A descrição do sistema, mostrado na Figura 4.1, e os procedimentos experimentais adotados são apresentados a seguir.

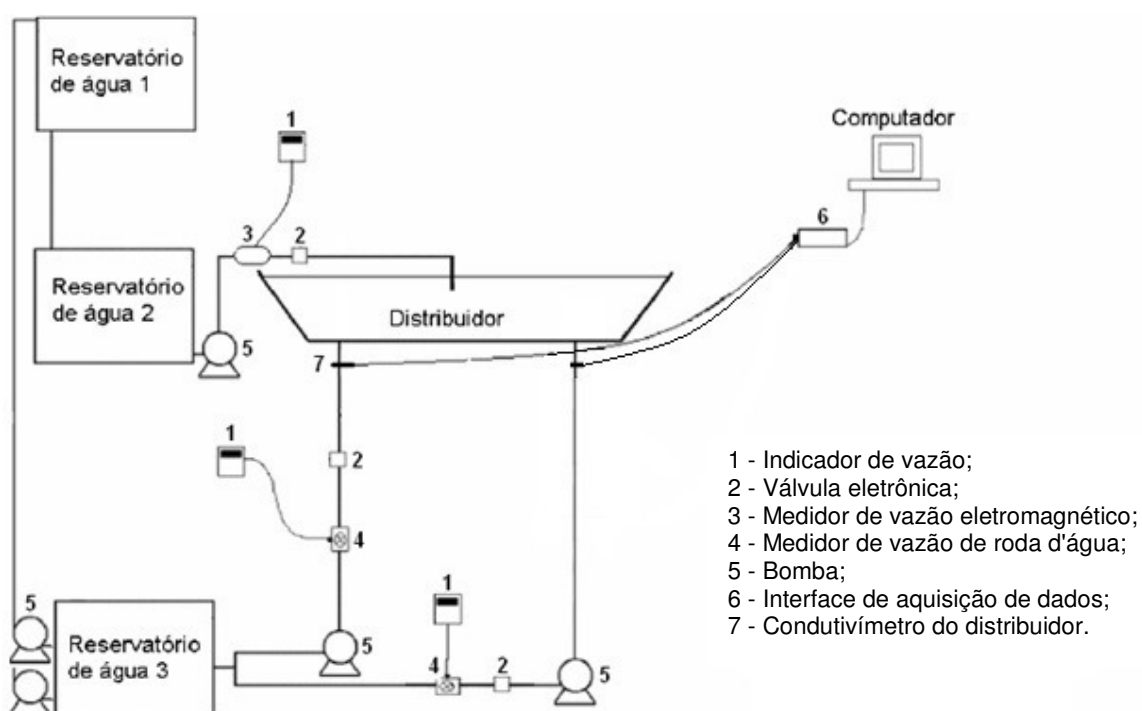


Figura 4.1: Vista esquemática do modelo físico com indicação dos medidores de vazão e condutivímetros (TAVARES, 2008).

O modelo físico foi construído em acrílico (polimetil-metacrilato ou PMMA), em escala 1:3 em relação ao sistema de lingotamento contínuo instalado na Aciaria 2 da Usiminas em Ipatinga. Nessa aciaria é realizado o lingotamento de placas em uma máquina de 2 veios.

O modelo físico do distribuidor é constituído por dois vasos: um interno, com a geometria do distribuidor propriamente dito, e um externo, utilizado para equalizar a pressão hidrostática do vaso interno e evitar distorções visuais. A Figura 4.2 ilustra a geometria retangular e as dimensões do distribuidor que foi usado de base para esse estudo, e a Figura 4.3 mostra uma vista do distribuidor em acrílico.

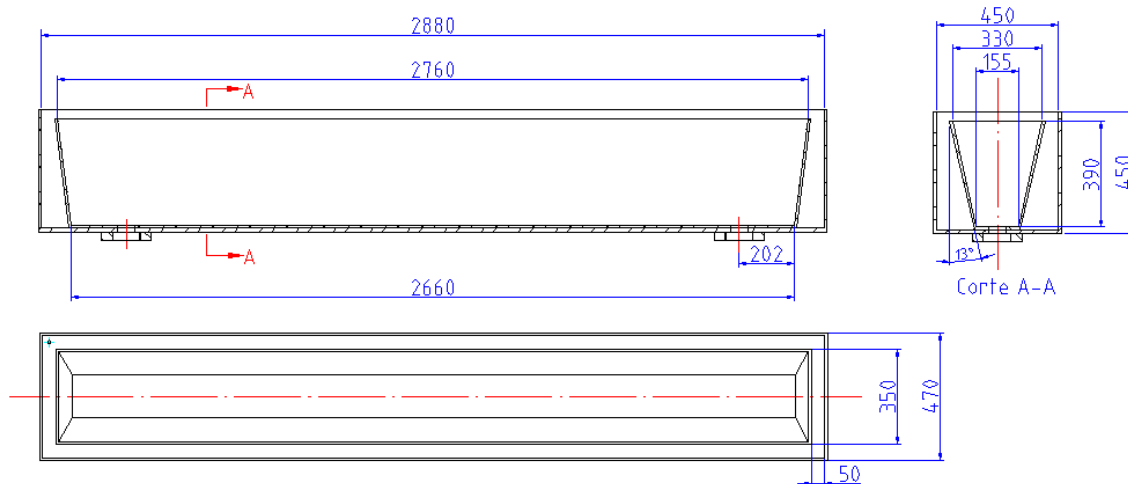


Figura 4.2: Desenho técnico do modelo físico do distribuidor (em mm).



Figura 4.3: Modelo físico do distribuidor de lingotamento contínuo.

4.1.2. Plugue com elemento poroso

A cortina gasosa foi gerada na base do modelo físico por um plugue, com elemento poroso nas dimensões (20x150x20)mm feito de escória granulada de alto-forno. Esse elemento poroso foi encapsulado em uma sede de acrílico e ar atmosférico comprimido foi usado como gás de injeção nos ensaios. A Figura 4.4 apresenta um dos plugues porosos usados no modelo físico.

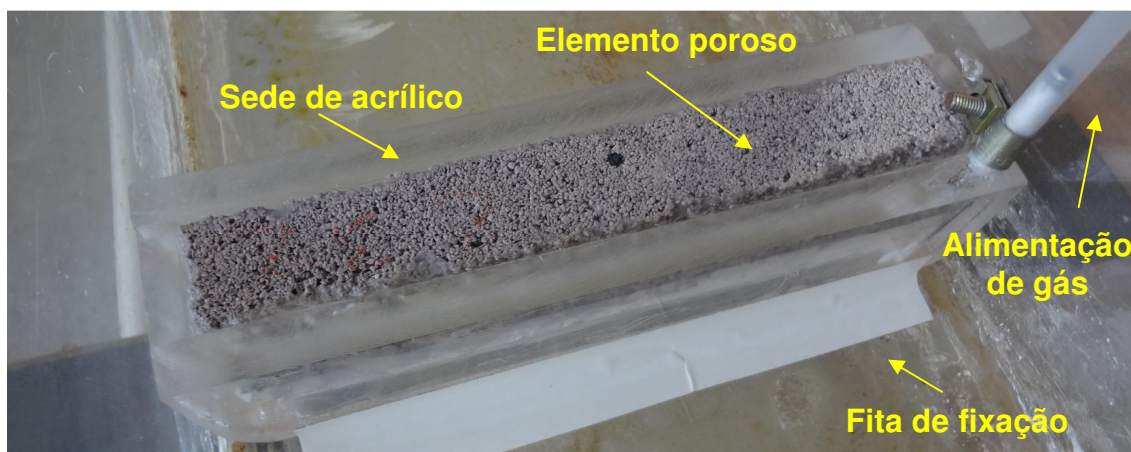


Figura 4.4: Plugue com elemento poroso de dimensões (20x150x20)mm.

A característica física do elemento poroso é de fundamental importância para ensaios representativos, repetitivos e reprodutivos. Em geral, elemento poroso que apresenta granulometria irregular e/ou "marcas de laminação" é contraindicado para esse estudo por não apresentar uma cortina regular e uniforme ao longo da sua extensão.

A vazão de ar atmosférico comprimido foi medida por um rotâmetro e a pressão monitorada por um manômetro U, ambos analógicos. Uma válvula agulha permitiu o ajuste da vazão objetivada de trabalho de cada experimento. A Figura 4.5 apresenta a montagem desses instrumentos.

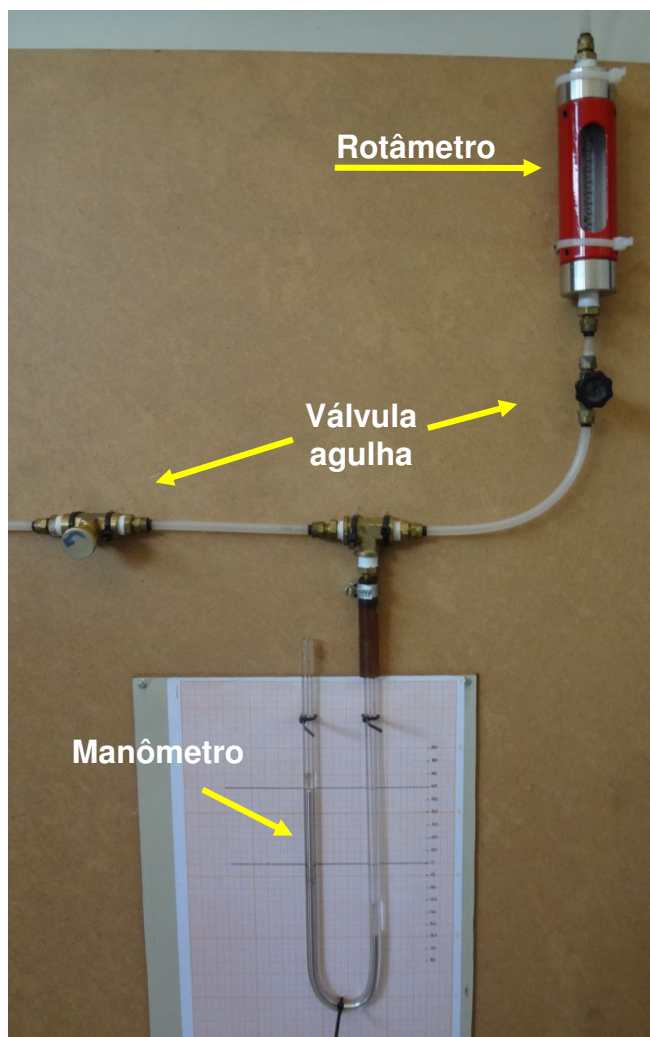


Figura 4.5: Rotâmetro analógico, manômetro em U e válvulas agulhas.

4.1.3. Sistema de controle e automação do modelo físico

A operação do modelo físico é automatizada e integrada por um sistema de cartões de entrada e saída monitorados e controlados pelo programa *SoftPLC*, que emula o funcionamento de um CLP (Controlador Lógico Programável). O *software* em questão é o ISaGRAF™ da SIXNET, e o *hardware* de cartões de entrada e saída é da SIXNET. Os sistemas de controle e supervisão controlam as seguintes variáveis:

- vazão de alimentação do distribuidor;
- níveis de líquido no distribuidor.

Na Figura 4.6 é apresentada a tela do sistema de controle, utilizada durante a operação do sistema.

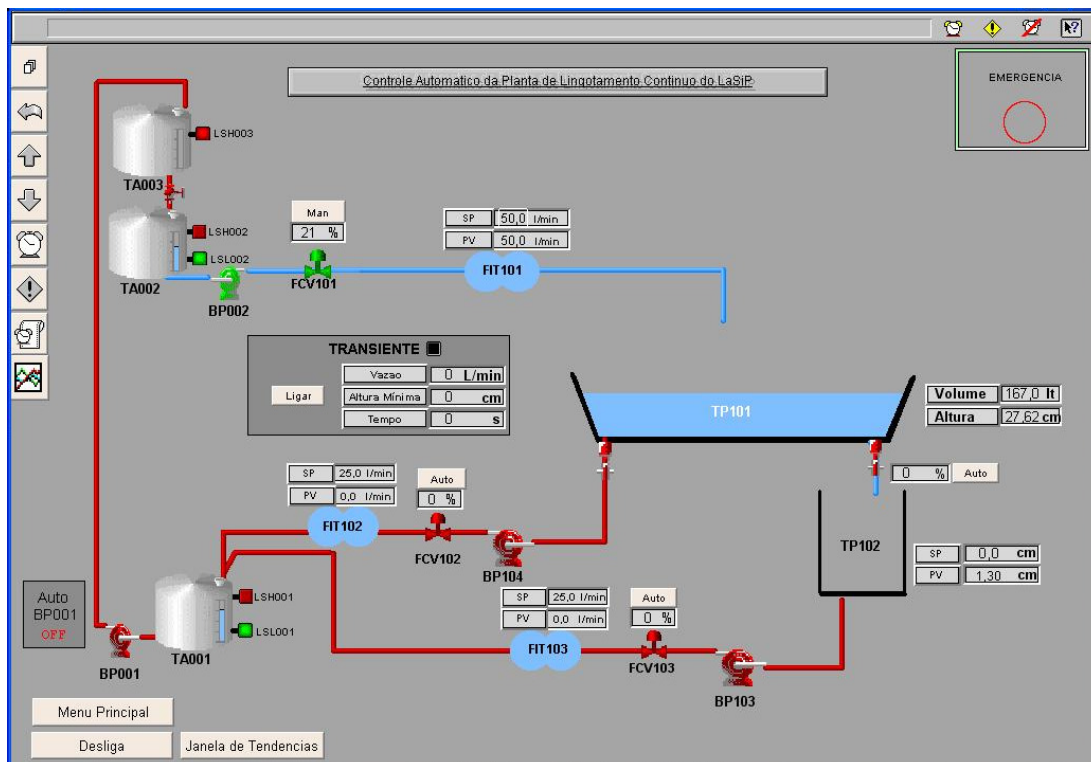


Figura 4.6: Tela do sistema de controle utilizado durante a operação do sistema.

A tela do sistema de controle permite ao usuário, estando o sistema no modo “manual”, atuar diretamente na controladora de vazão da linha de entrada. Em modo automático, a abertura da válvula controladora se auto ajusta para atender ao *set point* estabelecido pelo operador, caso a vazão não esteja nos patamares dos valores estabelecidos. Também é possível visualizar o volume, em litros, contido no distribuidor, bem como a respectiva altura associada a esse volume, em centímetros, da coluna de água no seu interior.

Pelo supervísório é possível navegar em 3 telas, uma tela do sistema de controle (Figura 4.6), uma de alarme e outra de tendência histórica, que permite trabalhar no sistema de forma flexível e segura.

Além das informações visuais do estado de funcionamento de cada equipamento, o sistema supervísório emite alarme visual sempre que uma determinada condição de alarme é atingida, como nível máximo ou mínimo em um dos reservatórios de água.

Um botão de emergência computadorizado também faz parte desse sinóptico com o objetivo prover mais uma forma de parar o sistema, além do botão de emergência físico localizado na caixa de bornes, o qual desliga a fonte de energia do sistema.

Por esse sistema, os dados exibidos na tela de tendência histórica podem ser exportados para arquivos do formato texto (*.txt ou *.csv) ou planilhas eletrônicas (*.xls), salvando a(s) variável(eis) desejada(s) com a data e hora da aquisição de cada valor.

Por fim, a arquitetura de *hardware* e *software* visa a robustez e flexibilidade do sistema de controle. Ela é constituída por um computador, onde é executado o aplicativo do supervisor CITECT™ e de controle ISaGRAF™, compartilhando entre si da mesma base de dados, gerenciada pelo programa *Sixnet I/O ToolKit*. Esse faz a comunicação com os quatro cartões remotos *Ethertrack* via interface padrão *Ethernet*. Os quatro cartões estão conectados ao computador por meio de um *switch* de 8 portas, conforme apresentado na Figura 4.7.

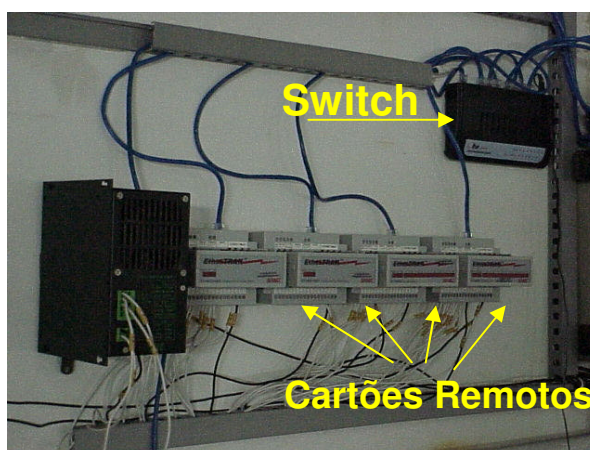


Figura 4.7: Cartões remotos *Ethertrack* e *switch*.

4.2. Procedimento Experimental para a Aquisição das Curvas DTR

A técnica de injeção de um traçador iônico, pelo método *pulse input*, possibilita a determinação da curva DTR e suas frações de volume pistonado, mistura e morto, bem como inferir a existência ou não de curto-circuito para sistemas sem ou de baixo desempenho dos modificadores de fluxo.

Para a construção de uma curva DTR é necessária à aquisição de dados de condutividade elétrica na saída dos veios pelo uso de sensores. A Figura 4.8 apresenta esquematicamente a posição de montagem desses sensores na saída de cada veio. Esses sensores por sua vez enviam dados para um microcomputador, onde

são armazenados, para posterior tratamento conforme metodologia apresentada por SAHAI e EMI (1996).

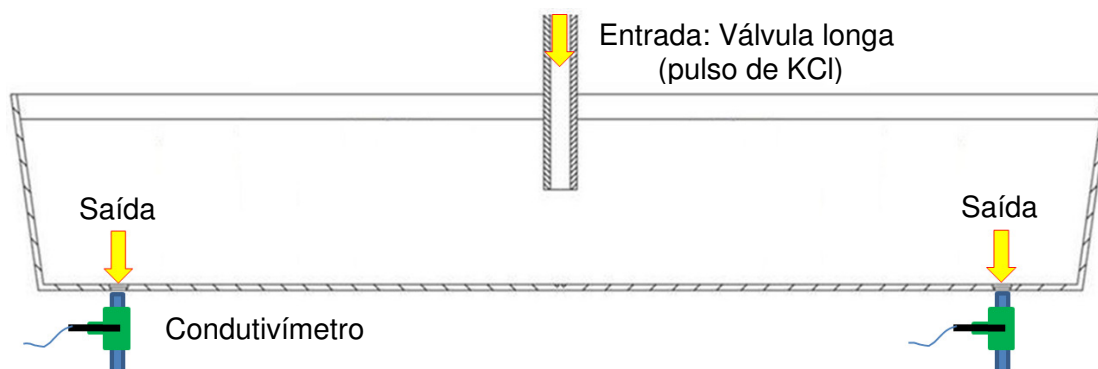


Figura 4.8: Posicionamento dos sensores de condutividade em cada veio.

Para a construção da curva DTR, o modelo físico do distribuidor foi operado nas seguintes condições:

- Regime estacionário de escoamento (volume de trabalho do reator constante durante ensaio);
- Volume de trabalho de 167 litros ou o equivalente a 4.509 litros para protótipo, o que corresponde a 31,7 toneladas de aço líquido no distribuidor;
- Altura de trabalho de 276mm ou 819mm para protótipo;
- Vazão de entrada de 50 l/min ou 779 l/min para protótipo, correspondente a uma vazão mássica de aço de 5,48t/min da panela para o distribuidor;
- Vazão de saída de cada veio de 25 l/min ou 389 l/min para protótipo, correspondente a uma vazão mássica de aço de 2,74t/min do distribuidor para o veio.

As equivalências foram feitas a partir das propriedades físicas da Tabela III.3 e das relações adimensionais da Tabela III.4.

Os testes foram feitos para diferentes configurações internas sem e com injeção de gás. As condições empregadas foram:

- a) Sem modificadores de fluxo convencionais e sem injeção de gás, DT-SMF;
- b) Sem modificadores de fluxo convencionais e com injeção de gás por plugue poroso, de (20 x 150)mm, em três posições distintas e simétricas, sendo elas a 28cm, 56cm e 84cm da válvula longa (entrada do modelo). As vazões de trabalho de gás foram de 1, 2, 3 e 4NI/min, para cada posicionamento;

c) Com modificadores de fluxo do tipo diques e barragens e sem injeção de gás, DT-DB;

d) Com modificadores de fluxo do tipo diques e barragens e com injeção de gás por plugue poroso de 1, 2, 3, 4 e 8NI/min a 56cm de afastamento da válvula longa. A transposição dessas vazões para o ambiente industrial resultou nas vazões de 3,14; 6,23; 9,41; 12,54 e 25,08NI/min respectivamente.

Os ensaios dos itens a) e b) foram feitos em seis repetições e os demais com quatro repetições.

A Figura 4.9 detalha esquematicamente os afastamentos simétricos dos plugues em relação a válvula longa.

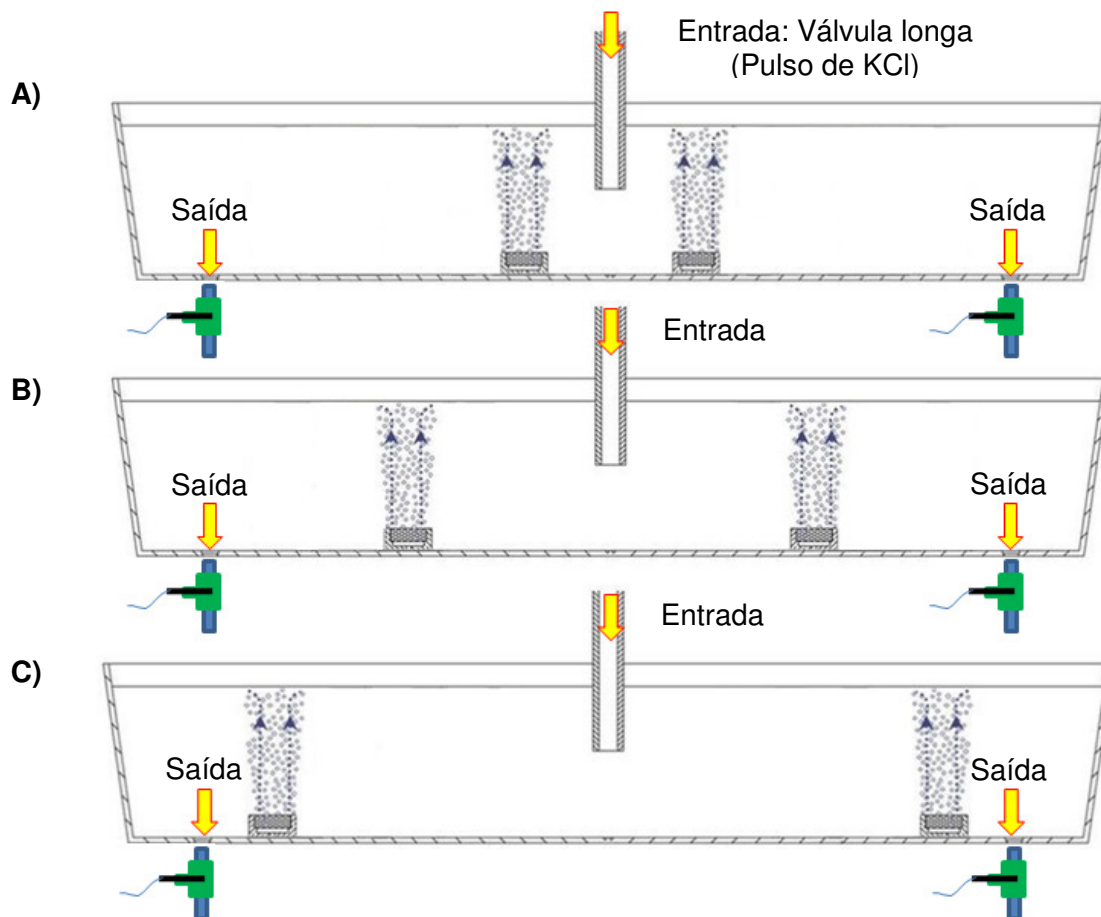


Figura 4.9: Posicionamento simétrico dos plugues no distribuidor para A: 28cm, B: 56cm e C: 84cm, todos em relação a válvula longa.

A solução de traçador foi preparada por meio da dissolução de 5g de cloreto de potássio (KCl) em 100ml de água, obtendo-se uma concentração de 50g/l. Para isso foi usada uma balança analítica com precisão de 0,001g e um balão volumétrico de 100ml.

Durante a realização do ensaio, a solução de traçador foi colocada em um reservatório acima da válvula longa (entrada do distribuidor). Antes de efetuar a injeção, é importante certificar que o distribuidor está operando em regime estacionário, ou seja, com a altura fixa de 276mm de água. O sistema de automação foi fundamental para garantir o atendimento dessa premissa.

No instante da injeção do pulso de traçador, inicia-se a aquisição dos dados de condutividade elétrica nas saídas (veios) do modelo físico utilizando os sensores dos condutivímetros Homis, modelo 1002-PH. O ensaio é encerrado quando se constata que a condutividade elétrica retornou ao mesmo patamar anterior ao pulso de traçador e que ela não mais varia com o tempo. Como regra geral, o ensaio tem duração 4 tempos de residência teórico do modelo, em torno de 14 minutos. Nesse intervalo de tempo são geradas as curvas de condutividade, que são registradas em computadores pelo programa de aquisição de dados Lutron, para o posterior tratamento dos dados e obtenção das curvas DTR.

A configuração para a disposição das barragens e diques dos experimentos c) e d) está apresentada na Figura 4.10.

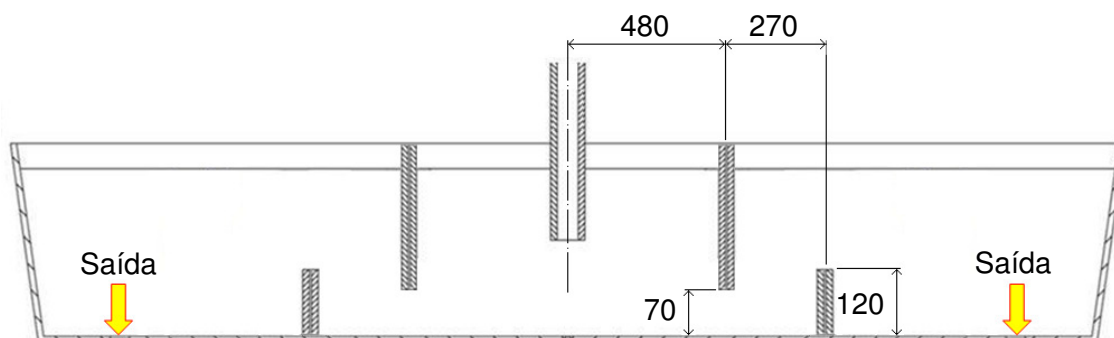


Figura 4.10: Desenho do posicionamento dos diques e barragens (em mm).

4.3. Sistema da APS III

A avaliação da eficiência de remoção das inclusões foi feita pela aplicação da sonda APS III – *Aqueous Particle Sensor*, que faz a contagem *on-line* de inclusões durante o ensaio (CHAKRABORTY, 2010). Essa sonda é mostrada na Figura 4.11. A avaliação da eficiência de remoção foi feita para várias configurações diferentes da cortina gasosa e de modificadores de fluxo.

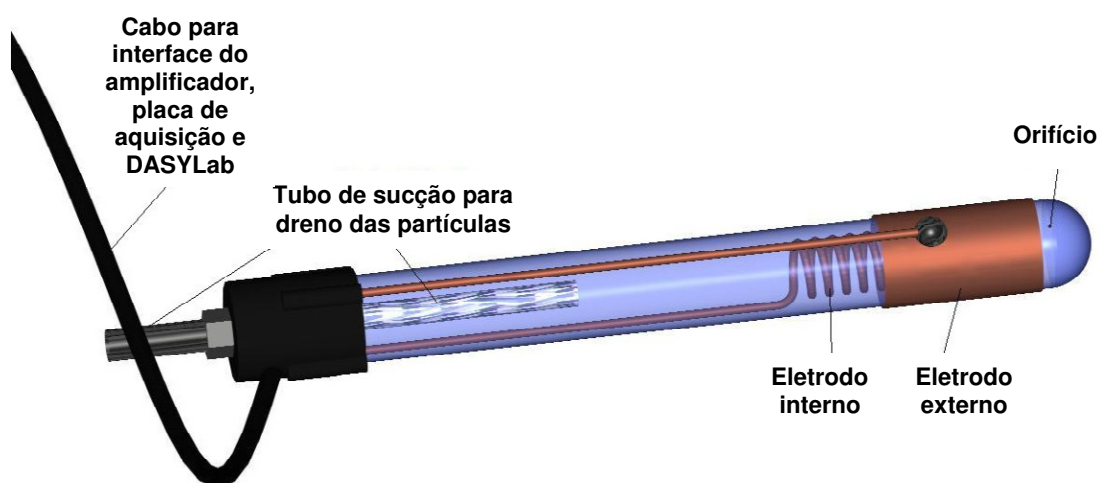


Figura 4.11: APS III - *Aqueous Particle Sensor III* (CHAKRABORTY, 2010).

Para o funcionamento da APS III, ela deve estar montada em aparato experimental onde o seu cabo de interface é ligado a um amplificador. O amplificador por sua vez faz interface com uma placa de aquisição de dados que é alimentada por um *no-break*, para controle de ruído da rede elétrica. Por último, essa placa de aquisição se liga a um computador com programa de registro de dados.

Para aquisição dos dados de diferença de tensão foi criada uma interface no programa DASyLab, como apresentado na Figura 4.12.

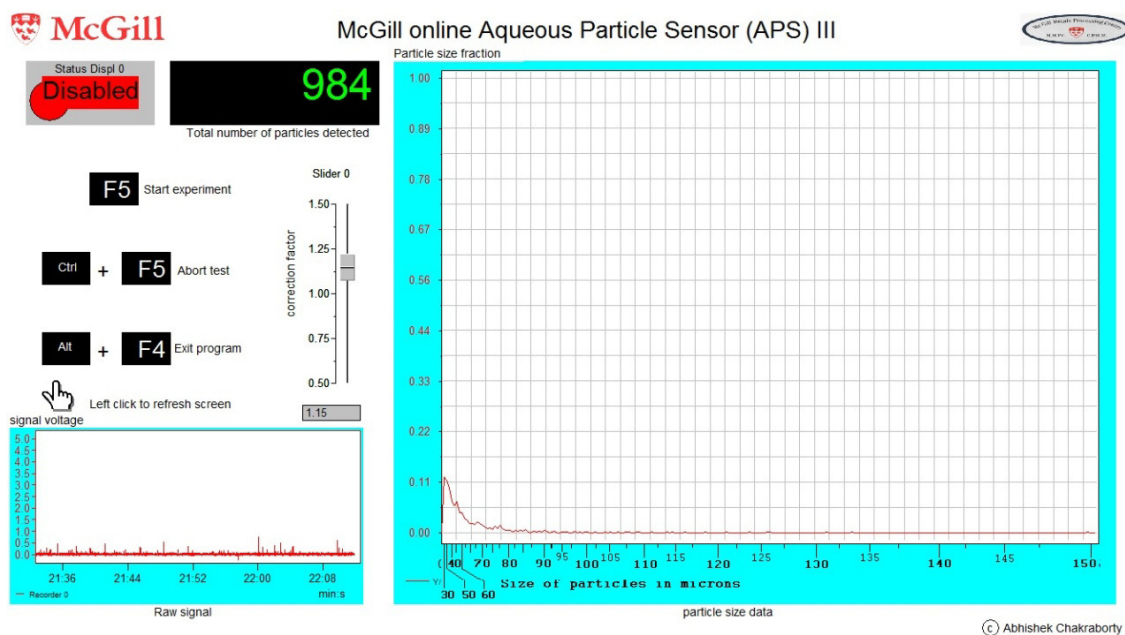


Figura 4.12: Interface do programa DASYLab para aquisição de dados da APS III.

Nessa Figura 4.12 pode-se observar:

- O número de inclusões contadas no mostrador *total number of particles detected*;
- O sinal de leitura de tensões, em *Raw Signal*;
- A distribuição granulométrica por faixas de frequência em micrômetros, em *Particle size fraction*.

Em particular, para essa interface da distribuição granulométrica por faixa de frequência também é possível ajustar a calibração do sistema através da inserção de um fator de correção, que varia de 0,50 a 1,50, conforme apresentado na barra *correction factor*. Para esse estudo o fator de correção aplicado foi de 1,15.

Para esse estudo, a sonda APS III foi fixada próxima à saída do distribuidor, com o orifício de entrada de inclusões voltado para cima e centralizado com o veio, favorecendo a captação delas, conforme apresentado na Figura 4.13.

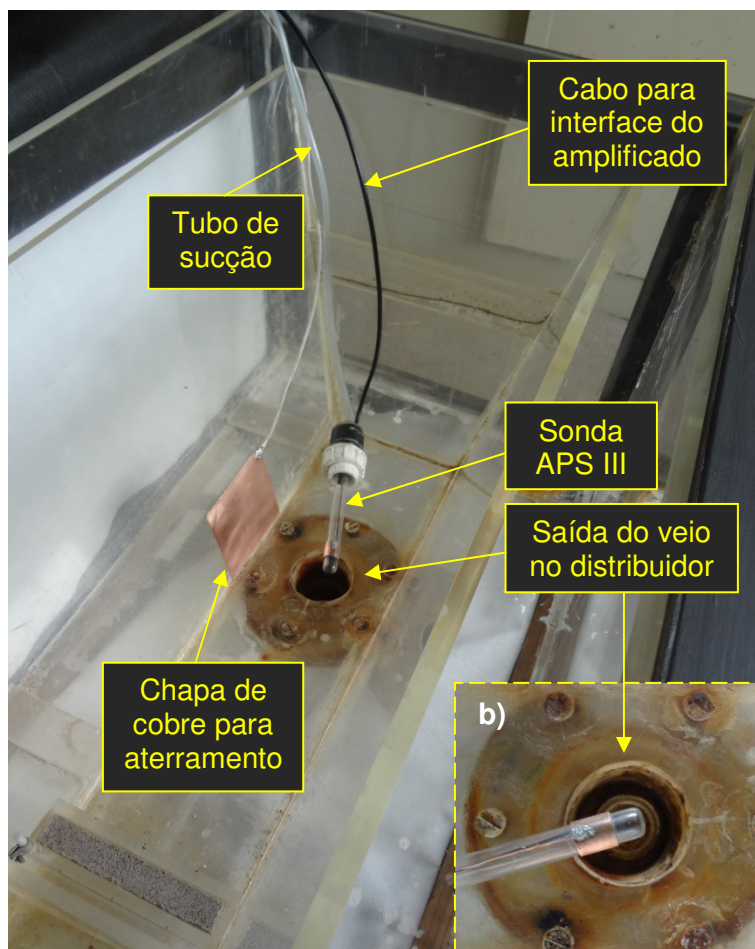


Figura 4.13: Fixação da sonda APS III no saída do distribuidor (a), com detalhe na centralização de seu orifício com a entrada do veio (b).

Esse posicionamento da APS III favorece uma maior repetitividade dos experimentos, bem como a padronização da vazão de trabalho da sonda pelo efeito sifão e a representatividade da eficiência global de remoção de partículas.

4.3.1. Procedimento experimental para as configurações estudadas com a APS III

Através de ensaios usando a APS III foi avaliada a eficiência global da remoção de inclusões no distribuidor para condições análogas às empregadas na determinação das curvas DTR.

Os testes foram feitos em triplicata para diferentes configurações sem e com injeção de gás. As condições empregadas foram:

- a) Teste de bancada da APS III, *off-line*, para referência da densidade e distribuição de tamanho de partículas no fluxo de entrada do distribuidor;
- b) Sem modificadores de fluxo convencionais (barragens, diques e inibidor) e sem injeção de gás (DT-SMF);
- c) Com diques e barragens (conforme Figura 4.10) e sem inibidor de turbulência e sem injeção de gás (DT-DB);
- d) Com diques, barragens (conforme Figura 4.10), inibidor de turbulência quadrado e sem abas de (155 x 158 x 80)mm, e sem injeção de gás (DT-DBI);
- e) Com inibidor de turbulência, localizado na posição central do distribuidor e abaixo da válvula longa, e sem diques e barragens e sem injeção de gás (DT-I);
- f) Sem modificadores de fluxo convencionais e com injeção de gás por elemento poroso de (20 x 150)mm, em três posições distintas e simétricas, sendo elas a 28cm, 56cm e 84cm da saída da válvula longa. As vazões de trabalho de gás foram 1, 2, 3 e 4NI/min, para cada posicionamento;
- g) Com modificadores de fluxo do tipo diques e barragens (conforme Figura 4.8) combinando posições e vazões de injeção de gás no distribuidor de forma análoga ao item f);
- h) Para a configuração h), testes extras de sobre vazão com 8NI/min para as posições: 28cm, 56cm e 84cm da saída da válvula longa;
- i) Para a configuração com diques e barragens (conforme Figura 4.10), apenas para a posição 56cm, com uso de barreiras laterais sólidas (moldura) para as vazões de injeção de gás no distribuidor 1, 2, 3 e 4NI/min. O uso de barreiras laterais para redirecionar o escoamento lateral para a cortina também foi alvo de estudo de MORALES (2003) e NASCIMENTO (2008). A Figura 4.14 apresenta essa proposta.

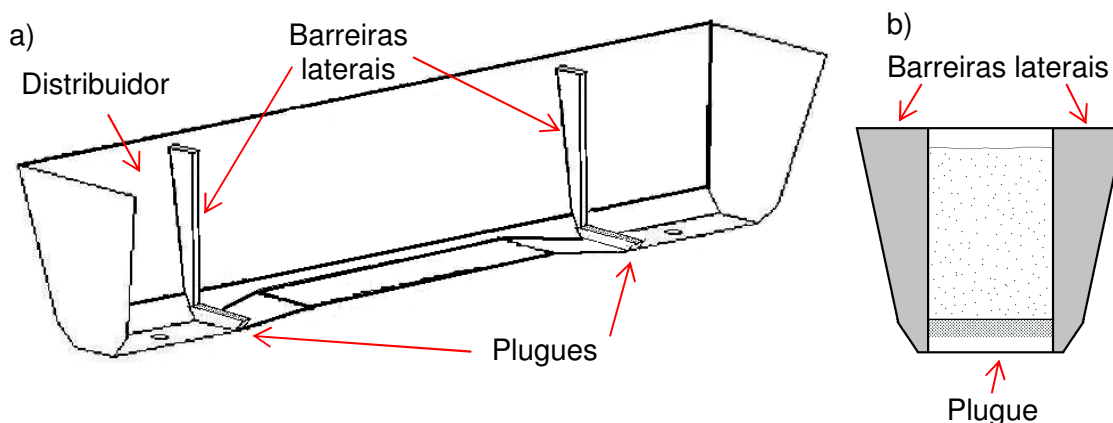


Figura 4.14: Barreiras laterais (a) no distribuidor, e detalhe da contenção (b) na cortina de gás pelas barragens laterais (NASCIMENTO, 2008).

j) Para uma configuração do distribuidor com diques e barragens (conforme Figura 4.10) e vazão de gás injetada que tenha apresentado eficiência de remoção de inclusões significativa (em relação à mesma configuração sem injeção de gás) e variabilidade controlada, avaliar o efeito da obstrução parcial da área de trabalho do plugue sobre a eficiência de remoção de inclusões original, para as condições:

- Obstrução parcial simétrica: 20%, 40% e 60%;
- Obstrução parcial assimétrica: 25% e 50%.

A Figura 4.15 ilustra essas condições de plugue.

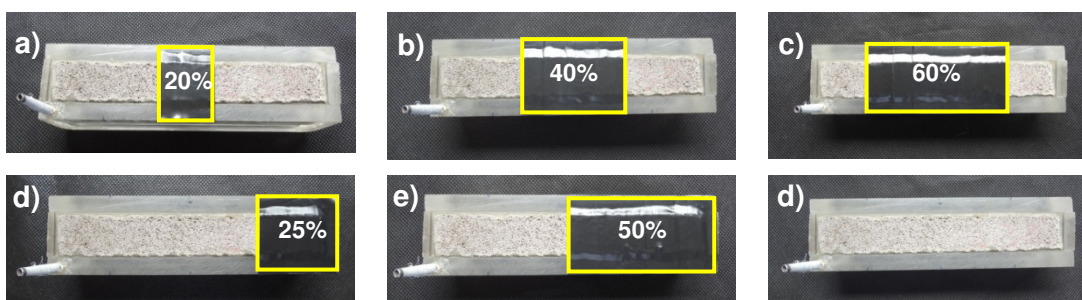


Figura 4.15: Plugues com obstrução parcial de (a) 20% simétrico, (b) 40% simétrico, (c) 60% simétrico, (d) 25% simétrico, (e) 50% simétrico e (d) sem obstrução.

As partículas usadas para simular inclusões são de vidro fundido de borossilicato, conforme norma ASTM C169. São basicamente micro esferas sem poros e ocas.

Possuem coloração branca, dureza n° 6 na escala de Mohs. Essas partículas foram adquiridas da *Potters Indurtries LLC*, com as seguintes especificações físicas:

- Densidade: $(0,34 \pm 0,05)\text{g/cm}^3$;
- Densidade a granel: $0,22\text{g/cm}^3$ (pelo método do picnômetro pela passagem de gás, ASTM D2840);
- Pressão máxima de trabalho: 20,684MPa;
- Distribuição granulométrica passante: 20 μm (10%); 38 μm (50%); 60 μm (90%) e 68 μm (97%), que simulam a ação de partículas inclusionárias na escala industrial de 28, 54, 85 e 96 μm respectivamente. No Apêndice A.1 é apresentado o laudo da verificação dessa especificação (Figuras A1 e A2).

Mesmo sendo apresentada a distribuição granulométrica média de especificação das partículas usadas na polpa padronizada, essa não foi a base de referência para as análises de remoção de partículas, exceto para o tamanho médio de partícula no cálculo de eficiência de remoção. A distribuição granulométrica média das partículas de referência na entrada do distribuidor baseou-se em testes de bancada com a APS III, testes *off-line*, com uso de béquer de 3 litros, homogeneização da polpa por agitador eletromagnético e densidade de polpa de 1,358mg/l, com base teórica na expectativa da densidade na saída da válvula longa. Esse método *off-line* é justificado a seguir, conforme argumentado por CHAKRABORTY (2010).

A faixa granulométrica retida registrada pelo *software* DASyLab pela APS III no modelo a frio, e sua correspondência direta com o protótipo industrial, está apresentada na Tabela IV.1. A correspondência entre as faixas foi obtida pelo cálculo da transposição apresentada no item 3.5.1, que originalmente foi alvo de argumentação de SAHAL e EMI (1996) e também explorada por NASCIMENTO (2008).

Tabela IV.1: Transposição da distribuição granulométrica das inclusões entre modelo a frio e protótipo industrial.

		Distribuição granulométrica (μm)										
Faixa do modelo	25,0	30,1	35,1	40,1	50,1	60,1	70,1	80,1	100,1	120,1		
	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	>140,0
	30,0	35,0	40,0	50,0	60,0	70,0	80,0	100,0	120,0	140,0		
Faixa do protótipo	35,3	42,5	49,5	56,6	70,7	84,8	98,9	113,0	141,3	169,5		
	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	>197,8
	42,4	49,4	56,5	70,6	84,7	98,8	112,9	141,2	169,4	197,7		

Enquanto a sonda APS III conectada à saída do veio mede o número e distribuição de tamanho das inclusões a saírem, o número de inclusões sendo adicionadas não poderia ser obtido diretamente. A prática comum implicaria colocar uma sonda APS III na válvula longa; no entanto, isso levanta um conjunto de problemas:

- As elevadas velocidades de fluxo de fluido dentro da válvula longa prejudicaria as frágeis sondas APS III;
- O diâmetro interno do tubo de válvula longa deve estar na faixa de 4 a 5cm, colocar um tubo de 1,2cm, dentro do furo que mudaria o desempenho hidrodinâmico da válvula longa;
- Alta turbulência na entrada da válvula longa resultaria no arraste de pequenas bolhas de gás que induziriam ruído adicional e sinais errôneos na APS III;
- A alta concentração de partículas dentro da válvula longa significaria que o detector operaria muito próximo ao limite de consistência do instrumento.

Para a preparação da polpa injetada no distribuidor é necessária a mistura de 3g de partículas em 3 litros de água, gerando uma polpa com concentração de 1g/l. Como a natureza das partículas é hidrofóbica, o uso de um dispersante é necessário. O dispersante usado foi o Triton[®] X-100 ($C_{14}H_{22}O(C_2H_4O)_n$) que é basicamente um agente tensoativo não iônico que tem uma cadeia de óxido de polietileno hidrófilo que altera a característica de superfície das partículas, de hidrofóbica para hidrofílica, favorecendo a sua dispersão e homogeneidade na polpa. Para cada 1 litro de água foram usadas 5 gotas de Triton[®] X-100, manipuladas por um contador padronizado de gotas.

Para a manutenção da homogeneidade da polpa, foi feito o uso de um agitador mecânico através de uma hélice ligada a um motor elétrico com uma sistema de rotação ajustável. A agitação controlada aconteceu durante todo período de injeção e foi garantida uma agitação suficiente para homogeneidade da polpa e evitar qualquer processo de aeração, principalmente por formação de vórtex por rotação excessiva. À medida que o volume do recipiente era reduzido, eram feitos ajustes manuais reduzindo a rotação para garantir a estabilidade.

Para injetar controladamente a polpa de partículas de densidade de 1g/l, fez-se uso de uma bomba peristáltica *Masterflex L/S Economy*, com sistema *Easy-Load 3*. A bomba em questão apresenta 10 faixas contínuas de regulação da velocidade, variando de

20 a 600rpm com variação máxima de $\pm 5\%$ na velocidade ajustada. Para os ensaios com injeção de partículas, essa bomba peristáltica operou com a velocidade 1, o que se traduziu em uma vazão de injeção de 68ml/min. A injeção aconteceu no trecho reto do cano de alimentação de água, a aproximadamente 1,60m do cano que faz o papel da válvula longa, garantindo assim a não segregação de partículas no fluxo em virtude do regime de escoamento turbulento, número de Re na ordem de 41.647 no duto que alimenta o modelo. Na extremidade da válvula longa é feito uso de tubo de 5mm de diâmetro para atuar como retificadores de fluxo, tornando assim o fluxo mais homogêneo na saída da válvula longa.

4.3.2. Eficiência de remoção de inclusões com a APS III

As microesferas de vidro de borossilicato, de tamanho controlado, foram utilizadas para simular as inclusões. As partículas de vidro de borossilicato de distribuição de tamanho conhecido foram bombeadas continuamente para a válvula longa em uma suspensão de concentração conhecida a uma vazão fixa. Ao mesmo tempo, a sonda APS III foi ativada e a distribuição da quantidade e tamanho das inclusões que alcançaram o veio foi medida em função do tempo.

A quantidade de inclusões não flotadas foi quantificada com um termo chamado de Razão Residual de inclusões (RRI). O RRI é definido para dois veios a partir da equação (4.1):

$$RRI = \frac{2 \cdot N_{sv}}{N_{ti}} \cdot 100\% \quad (4.1)$$

sendo:

N_{sv} é o número de inclusões que saem através do veio em 22 minutos de teste;

N_{ti} é o número total de inclusões adicionadas através da válvula longa.

Deve se notar no cálculo do RRI que o coeficiente 2 ocorre porque há duas saídas no distribuidor. Quanto maior for o valor de RRI, menor é o número de inclusões removidas, e pior é o desempenho do distribuidor como um removedor de inclusão.

Para o balanço de partículas, a polpa foi feita com um peso conhecido de microesferas de vidro de borossilicato com um volume conhecido de água. Testes com a APS III deram a distribuição e densidade total de partículas por volume. Essa foi usada para

calcular o número de partículas por grama de pó seco (N_{ps}), conforme definição da equação (4.2):

$$N_{ps} = \frac{N_{pp}}{Q_{pa}} \quad (4.2)$$

sendo:

N_{pp} é o número de partículas detectadas por ml de polpa;

Q_{pa} é a quantidade de partículas em gramas adicionadas por ml de água.

Seja $f(s)$ = fração de tamanho de partícula em função de 's', para o intervalo de tamanho de partícula.

- Se a concentração de partículas na suspensão é igual a x g/ml;
- A vazão de injeção da polpa de partícula é igual a 68ml/min;
- A vazão na válvula longa é igual a 50 l/min;
- A partir de cálculos, sabe-se que 1g de partículas contém $5,95 \cdot 10^6$ partículas.

Assim, pelos dados anteriores, o número de partículas de dimensão 's' que entra na válvula longa é dado por:

$$x \cdot 5,95 \cdot 10^6 \cdot 68 \cdot f(s) = A(s) \quad (4.3)$$

Na saída, a sonda APS III foi ligada com taxa de aspiração conhecida (volume de gotejamento), que foi utilizada para medir o número total de partículas detectadas em função do tempo, bem como a sua fração de tamanhos. Durante o teste, a amostra da APS III é uma pequena fração de água do fluxo principal que sai pelo gotejamento, e a vazão do fluxo principal é muito mais elevada do que a vazão de amostragem através do detector, desta forma é possível relacionar:

$$\frac{Tx_{inc\ detec}}{N_{T,inc\ veio}} = \frac{Q_{detec}}{Q_{T,VL}} \quad (4.4)$$

sendo:

$Tx_{inc\ detec}$ é a taxa de inclusões contadas no detector;

$N_{T,inc\ veio}$ é o número total de inclusões que saem em um veio por unidade de tempo;

Q_{detec} é a vazão através do detector;

$Q_{T,VL}$ é a vazão total na válvula longa.

A vazão através de cada veio é igual a 25 l/min e a vazão de aspiração através da sonda APS III é igual a y ml/min. Seja N_d igual ao número de partículas detectadas por

uma sonda por minuto em regime estacionário. Assim o número total de partículas (N_{TP}) que sair no veio pode ser dado pela equação (4.5):

$$N_{TP} = \frac{N_d \cdot 25 \cdot 1000}{y} \quad (4.5)$$

Assim sendo, o número de partículas de tamanho 's' que sai de um veio do distribuidor (partindo da premissa que não há flotação natural) será:

$$N_d \cdot \frac{25}{y} \cdot 1000 \cdot f(s) = B(s) \quad (4.6)$$

Desta forma,

$$RRI = 2 \cdot B(s)/A(s) \quad (4.5)$$

Com o intuito de favorecer a compreensão, foi feita a análise dimensional do balaço de partículas para a obtenção da equação (4.5) que pode ser verificada no apêndice A.5. Por fim, a eficiência de remoção de partículas pode ser encontrada pela equação (4.7)

$$\eta_r = (1 - RRI) \cdot 100\% \quad (4.7)$$

A eficiência de remoção (η_r) apresentada aqui representa a quantidade, em porcentagem, de partículas que foram retiradas do aço e passaram a pertencer à escória do distribuidor.

4.4. Caracterização do Escoamento no Modelo Físico

Este estudo visa registrar aspectos visuais do escoamento do modelo físico por imagens, sem ou com uso de corante para colaborar na análise das variáveis respostas.

4.4.1. Análise das cortinas de gás

Para um plugue em perfeita condição de uso, foi analisado o desempenho das cortinas de gás para as vazões de 1, 2, 3, 4 e 8NI/min, em três vistas distintas, sendo elas:

- plugue (área do elemento poroso responsável pela liberação de bolhas);
- plano vertical da seção transversal ao escoamento;
- superfície de afloramento do gás.

Para um plugue com presença de trincas, foi avaliada a distorção criada por essas trincas no desempenho das cortinas de gás para as vazões de 1 e 4NI/min, para as mesmas vistas de registro anteriores.

4.4.2. Análise por colorimetria

A colorimetria buscou elucidar pontos de atenção pela correlação do escoamento macroscópico do modelo físico e das variáveis respostas (eficiência de remoção de inclusões e volumes característicos de escoamento) através de imagens indexadas no tempo que retratam o escoamento pelo avanço da frente de corante injetado mediante a técnica do *pulse input*. O corante injetado funciona como um traçador líquido colorido que possibilita descrever a trajetória do escoamento desde a entrada até a saída do modelo físico.

O corante empregado foi o permanganato de potássio (KMnO_4) que apresenta coloração violeta intensa, baixa difusividade em água e não altera apreciavelmente as propriedades físicas da água. Possui função química de sal inorgânico, formando íons de potássio (K^+) e permanganato (MnO_4^-) quando dissolvidos em solução aquosa. Para manter uma padronização entre os pulsos de corante, objetivou-se 4,5g de permanganato de potássio diluído em 100ml de água.

Para a injeção, o corante foi colocado em um reservatório acima da válvula longa, onde uma válvula do sistema fez a injeção dele com tempo de abertura controlado. Antes de efetuar a injeção, é sempre válido certificar-se que o distribuidor está operando com a altura da coluna de água fixa em 276mm, regime estacionário.

O instante da injeção do corante é referido sempre como $t=0\text{s}$, e todos os outros eventos posteriores são referidos no tempo em função desse tempo inicial.

As imagens capturadas são uma composição de duas vistas: a de frente e a superior. Em particular, a vista superior foi obtida a partir do rebatimento da imagem da superfície livre do distribuidor pelo uso de espelho posicionado a 45° em relação a essa mesma superfície.

Todas as configurações avaliadas foram ajustadas para apresentarem simetrias de fluxo no escoamento. Partindo dessa constatação física, somente metade da imagem do distribuidor foi alvo de registro. Para análise do avanço do corante, referências de posição foram feitas com variação de 10 em 10cm, sendo a entrada da válvula longa a posição inicial.

Buscou-se relacionar as seguintes imagens:

- a) Para o distribuidor sem e com modificadores de fluxo, e sem injeção de gás; avaliar as configurações: DT-SMF; DT-DB; DT-DBI e DT-I, todas para o instante 9s;
- b) Para o distribuidor sem diques e barragens, com vazão de plugue de 2NI/min e posicionado a 56cm da válvula longa, no instante 9s;
- c) Para o distribuidor com diques e barragens, com vazão de plugue de 3NI/min e posicionado a 56cm da válvula longa, no instante 9s.

4.5. Tratamento Estatístico de Dados

Para a análise comparativa dos dados de eficiência de remoção obtidos pela APS III e dos volumes característicos foi aplicado o método do teste de hipótese. Esse método de inferência estatística usa a teoria de probabilidades, para avaliar determinados parâmetros que são desconhecidos em uma população, (por exemplo, média ou variância).

Os testes de hipótese são constituídos de alternativas que são testadas. Uma população tem uma amostra retirada e através da aplicação de teoria de probabilidades é possível tirar conclusões em relação à população, como distinguir entre diferentes populações das quais a amostra pode ser originada, determinar limites estatísticos para todos os valores que a população pode assumir, checar a confiabilidade de um estudo e no auxílio de qualquer tomada de decisão em que seja necessário um rigor estatístico para comprovação da escolha.

Conceitos fundamentais para um teste de hipótese são:

- Hipótese nula (H_0): é a afirmação sobre o valor de um parâmetro populacional (ou sobre a normalidade);
- Hipótese alternativa (H_1): é a afirmação que dever ser verdadeira se a hipótese nula for falsa;
- Erro do tipo I: é a probabilidade de rejeitar a hipótese nula quando ela é efetivamente verdadeira (α);
- Erro do tipo II: é a probabilidade de não rejeitar a hipótese nula quando ela é efetivamente falsa (β).

TRIOLA (1999) define esses conceitos e detalha a sua aplicação no método do teste de hipótese.

Os dados das variáveis respostas, para cada caso específico de uma combinação de posição de plugue e vazão de gás, foram apresentados individualmente na forma de um intervalo de 95% de confiança ($\alpha = 5\%$), que retrata um intervalo de valores que tem 95% de probabilidade de conter o verdadeiro valor do parâmetro da população estudada. Desta forma, ao se comparar dois intervalos de confiança distintos para a média, caso eles apresentem regiões em comum, não existe evidência de que as médias são diferentes, caso contrário, existe evidência estatística de que as médias não são iguais. Essa técnica é retratada por TRIOLA (1999) como teste de afirmações com intervalos de confiança.

Por fim, também foi aplicado o método de Projeto de Experimentos (DOE - *Design of Experiments*) para avaliar o comportamento da variável resposta eficiência de remoção de partículas pela alteração controlada dos fatores posição de plugue e vazão de gás. Pela combinação desses fatores buscou-se uma disposição dos dados para criar uma matriz com um arranjo fatorial completo (*full factorial*) para as configurações internas do distribuidor DT-SMF e DT-DB. Para cada uma dessas configurações, foi criado um gráfico da curva de nível da superfície de resposta para a eficiência de remoção de partículas. A técnica da análise de variância (ANOVA) também foi explorada para identificar quais fatores, e suas combinações, são significativamente diferentes com base no teste de hipótese. Avaliação dos efeitos principais e das interações foram alvo de discussão neste estudo. Para uma compreensão maior sobre essas ferramentas, sugere-se a leitura de MONTGOMERY (2009).

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nos resultados e discussão serão apresentadas e discutidas a análise qualitativa da formação da cortina de gás, a quantificação de remoção de inclusões, os volumes característicos da distribuição de tempos de residência, o comportamento da distribuição granulométrica e a indicação da configuração com a melhor eficiência de remoção de inclusões.

5.1. Análise da Cortina de Gás

Aspectos quantitativos da formação da cortina de gás são pontos de interesse nesse estudo, pois a sua forma, tamanho, frequência de formação de bolhas e a sua homogeneidade na superfície do plugue influenciam na eficiência de remoção de inclusões. Idealmente deseja-se uma cortina uniforme na base do plugue, com bolhas pequenas e com a elevada frequência de formação, mas que não crie agitação excessiva na superfície do banho.

5.1.1. Caracterização qualitativa das cortinas de gás para as vazões de plugue de 1, 2, 3, 4 e 8NI/min

Nas Figuras 5.1 a 5.3 são apresentados os aspectos gerais das cortinas gasosas. Cada conjunto de imagens apresenta três vistas: superfície do distribuidor, plano vertical e região do plugue.

Na imagem superior é mostrado o afloramento das bolhas de gás na superfície livre do distribuidor, juntamente com a agitação causada por esse fenômeno. Na imagem da seção vertical é apresentada a cortina de gás propriamente dita. Nessa imagem observa-se a extensão do percurso do gás de sua base até a superfície livre juntamente com a forma sinuosa do caminho percorrido pelas bolhas. A trajetória das bolhas não foi alterada nas diferentes vazões estudadas. À medida que a vazão de gás aumenta, a quantidade de bolhas também aumenta, tornando a cortina mais regular e reduzindo os seus pontos cegos (sem presença de bolhas), como consequência, o volume de líquido ascendente local deslocado por ela também aumenta, causando uma maior perturbação no fluxo e na superfície livre. E por último, na imagem da região do plugue é apresentada a sua superfície porosa, onde as

bolhas formadas são liberadas. Por essa imagem foi possível associar a origem do nível de regularidade da cortina, vista na imagem do plano vertical em cada figura.

Na Figura 5.1 é apresentado o aspecto visual das cortinas de gás formadas para as vazões de 1NI/min e 2NI/min.

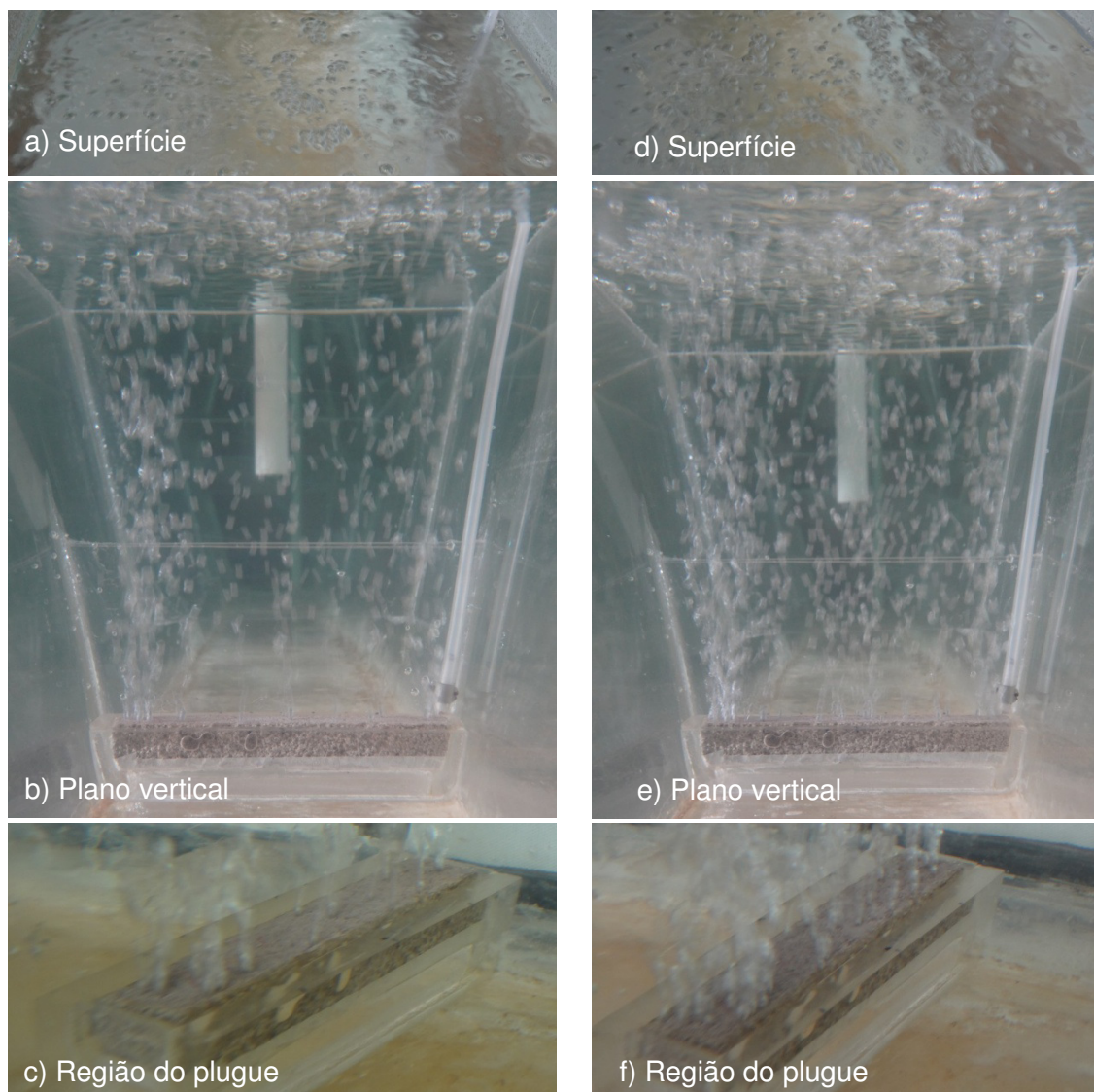


Figura 5.1: Aspecto visual das cortinas de gás para as vazões de 1NI/min (a esquerda) e 2NI/min (a direita).

A Figura 5.1, imagem a), refere-se a vazão de 1NI/min, que apresentou baixo nível de afloramento de bolhas e perturbação na superfície. A cortina da imagem b), apresentou regiões sem saída de gás (pontos cegos) em virtude da baixa frequência de liberação de bolhas pelo plugue, confirmada pelo uso de área da imagem c). Já a

cortina formada pela vazão de 2NI/min, relativa as imagens d), e) e f), apresentou uma formação mais regular com uma maior área de incidência de bolhas pelo plugue, reduzindo assim as regiões cegas da cortina. Mesmo a vazão sendo dobrada, o nível de agitação na superfície foi baixo.

Na Figura 5.2 é apresentado o aspecto visual das cortinas de gás formadas pelas vazões de 3NI/min e 4NI/min.

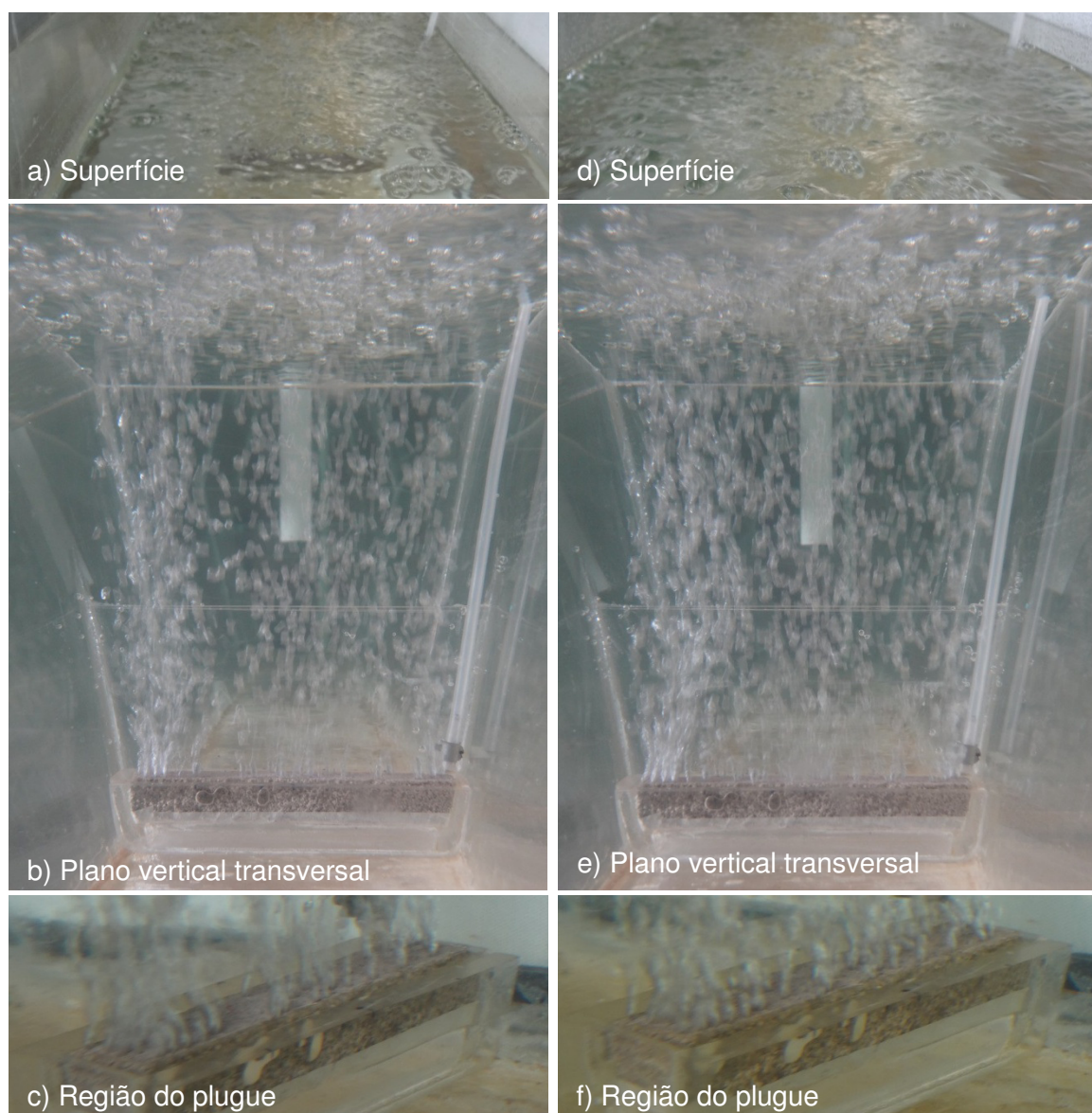


Figura 5.2: Aspecto visual das cortinas de gás para as vazões de 3NI/min (a esquerda) e 4NI/min (a direita).

A Figura 5.2, composição de imagens à esquerda, referente à vazão de 3NI/min, apresentou nível intermediário de afloramento de bolhas e perturbação da superfície. A imagem b) detalha a cortina onde houve uma redução significativa de pontos cegos em virtude da alta frequência de liberação de bolhas pelo plugue, vista na imagem c). A cortina formada pela vazão de 4NI/min, relativa as imagens d), e) e f) à direita, apresentou-se mais expressiva na formação de bolhas pelo plugue, praticamente eliminando as regiões cegas da cortina e gerando um nível de agitação mais intenso na superfície. Esse nível de agitação pode criar uma abertura na camada de escória e expor o aço líquido ao ar atmosférico, oxidando-o e formando inclusões.

Na sequência, na Figura 5.3 é apresentado o aspecto visual da cortina de gás formada para a vazão de 8NI/min.

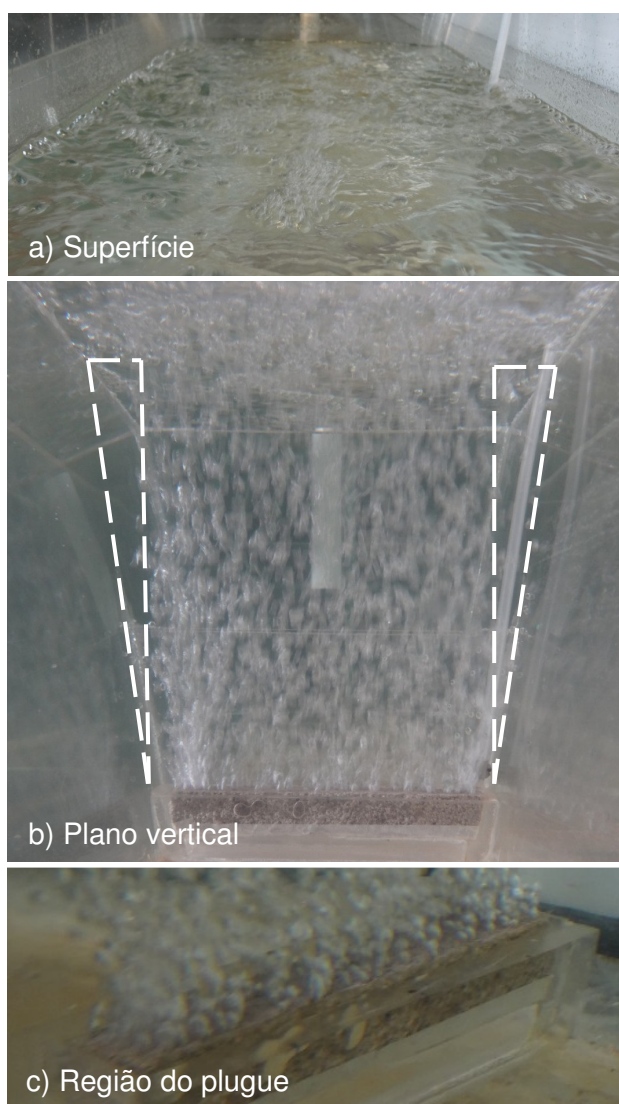


Figura 5.3: Aspecto visual da cortina de gás para a vazão de 8NI/min.

Para finalizar, a cortina referente à vazão de 8Nl/min, relativa as imagens a), b) e c) da Figura 5.3, apresentou uma formação densa pela intensa geração das bolhas pelo plugue. Aparentemente não existem regiões cegas na cortina e o nível de agitação na superfície, pelo afloramento das bolhas, é excessivamente alto. Esse nível de agitação criará uma abertura na escória, que permitirá a reoxidação local do aço líquido, induzindo a formação de inclusões e perda de temperatura por radiação e, para condições extremas, até a entrada de escória no aço líquido (WANG *et al.*, 2005). O único ponto cego das cortinas, indiferente da vazão, está representado na Figura 5.3 b) pelas linhas tracejadas (cerca de 10% de área por lado) e foi alvo de investigação do seu efeito na remoção de inclusões, conforme apresentado na metodologia.

5.1.2. Cortinas com deficiência de forma em função de baixa qualidade do plugue poroso

Uma característica física que pode comprometer o desempenho geral do plugue é a presença de trincas, também conhecidas como "marcas de laminação" no elemento poroso, que geram caminhos preferenciais para a saída do gás inerte, impedido que a cortina de gás se forme regularmente ao longo de toda a extensão do elemento poroso. Um exemplo dessas trincas é mostrado na Figura 5.4.

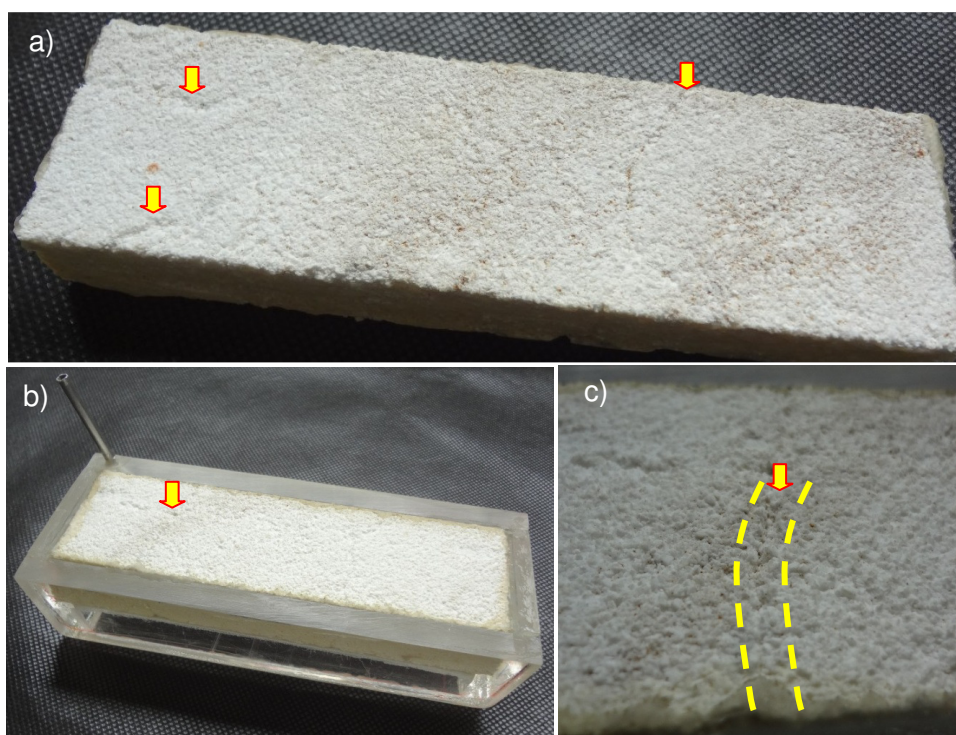


Figura 5.4: Plugue com trincas (ou "marcas de laminação").

Pela Figura 5.4 a) é possível observar trincas não paralelas ao longo da superfície do elemento poroso, com destaque para as principais falhas sinalizadas pelas setas. Na Figura 5.4 b) é mostrado o plugue que será empregado para simular o efeito das trincas no desempenho geral da cortina nas próximas sequências de figuras. Nela também é apresentada a posição de falha mais relevante, pela seta, em termos de caminho preferencial do escoamento gasoso. Na Figura 5.4 c) é ampliada a região da falha da Figura 5.4 b) no intuito de evidenciar a forma e intensidade da trinca.

O plugue da Figura 5.4 b) e as suas respectivas cortinas de gás simuladas, para as vazões de 1 e 4NI/min, são mostradas nas Figuras 5.5, e elas têm caráter puramente ilustrativo. Assim sendo, elas não foram alvo de avaliação da eficiência de remoção de inclusão e dos volumes característicos neste estudo.

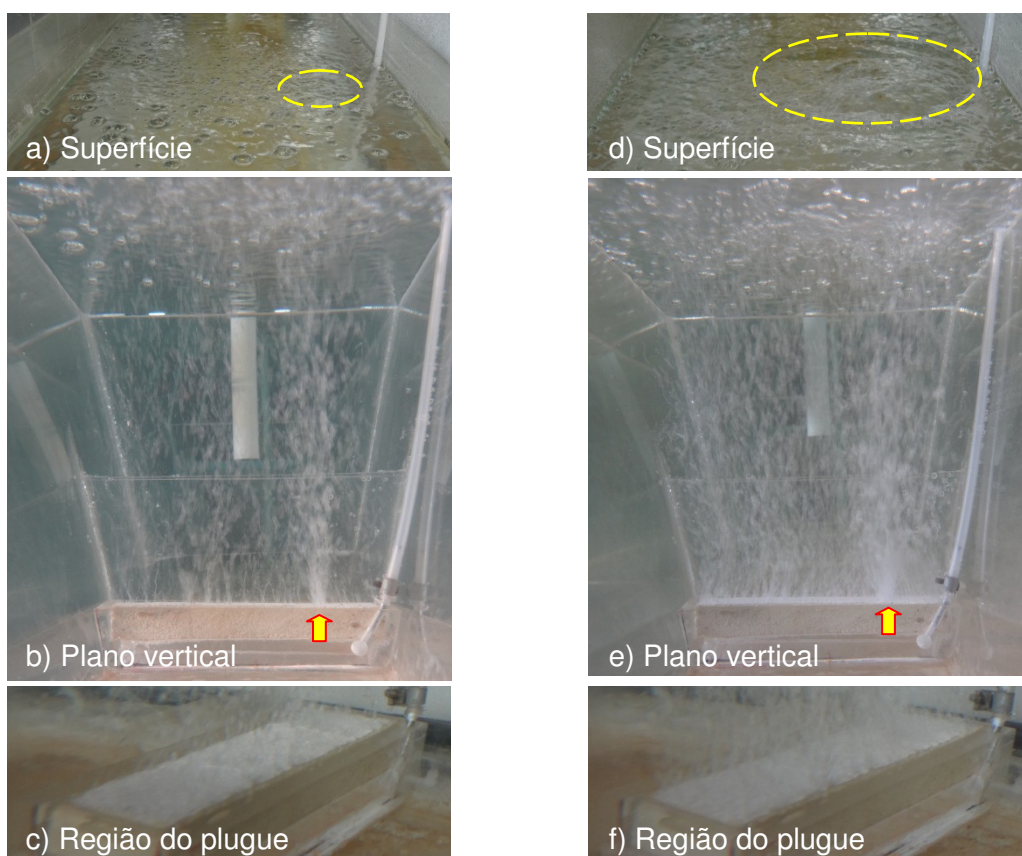


Figura 5.5: Aspecto visual das cortinas de gás para as vazões de 1NI/min (a esquerda) e 4NI/min (a direita).

O comportamento das cortinas da Figura 5.5 segue a mesma tendência observada na Figura 5.1, exceto pela maior liberação de gás na região da trinca apresentada na

Figura 5.4 b). Como uma maior porção de gás sai preferencialmente na região da trinca, essa região cria um maior volume convectivo local ascendente, desequilibrando o escoamento do líquido. Desta forma, as bolhas, ao aflorarem na superfície do banho, criam um aspecto de vazão local acima da expectativa da vazão de controle ajustada, quando uniformemente distribuída ao longo da extensão do plugue, potencializando uma abertura na escória e os problemas para a qualidade do aço citados anteriormente. Esse plugue também apresenta uma característica interessante em relação ao plugue padrão aplicado na Figura 5.1, pela heterogeneidade dos tamanhos de bolhas liberadas. Esse fatos abrem precedente para investigar o efeito da heterogeneidade da vazão e do tamanho de bolhas ao longo da extensão do plugue na eficiência de remoção de partículas, mas não será alvo desse estudo.

Na Figura 5.5 e), o aumento da vazão de gás para 4NI/min no plugue com trinca evidencia, com maior intensidade, a perturbação local criada pelo afloramento das bolhas. Isso difere do comportamento do plugue das Figuras 5.1 e 5.2, onde à medida que a vazão de operação aumentava, induzia à uniformização da cortina e uma perturbação aceitável na superfície do banho. Dessa forma, para um plugue com trincas, à medida em que a vazão aumenta, o efeito da vazão anômala localizada na trinca se torna mais evidente, conforme apresentado pelas setas indicativas.

Para a eficiência de remoção, foram analisadas as configurações de plugue com defeitos controlados, de forma que os eventos de desvio de desempenho aqui apresentados não afetaram consideravelmente a formação e a eficiência da cortina de gás. Em geral, as cortinas estudadas são relativas as Figuras: 5.1; 5.2 e 5.3, para as configurações propostas na metodologia. É válido salientar que as cortinas desse estudo não foram uniformemente perfeitas ao longo da extensão do plugue, mas não apresentaram as características discutidas do plugue com presença de trincas. A condição menos favorável da regularidade da cortina foi para o primeiro nível de vazão (1NI/min), onde a formação de bolhas na superfície do plugue tinha caráter instável e aleatório. Os demais níveis de vazão mostram-se com um grau de regularidade aceitável.

Em linhas gerais, deseja-se um plugue que apresente regularidade de formação e de tamanho médio de bolhas ao longo de sua superfície para se obter controle da magnitude da perturbação criada no afloramento do gás na interface metal/escória.

5.2. Ensaio com Injeção de Partículas

Os resultados discutidos nessa seção têm por base ensaios de injeção controlada de partículas para avaliação da eficiência de remoção de partículas pela APS III. Esses ensaios foram realizados em triplicata para cada nível de vazão e posição de plugue.

5.2.1. Ensaio sem injeção de gás

Neste item serão apresentados resultados dos ensaios com injeção de partículas e sem injeção de gás. Ao longo do texto e dos gráficos, serão usadas siglas para referenciar a configuração do sistema estudado. A nomenclatura empregada faz referência a:

- *Off-line*: Teste feito em béquer para avaliação da entrada de partículas na válvula longa;
- DT-SMF: Distribuidor sem modificadores de fluxo;
- DT-DB: Distribuidor com diques e barragens;
- DT-I: Distribuidor com inibidor de turbulência;
- DT-DBI: Distribuidor com diques, barragens e inibidor de turbulência.

Os ensaios foram feitos com três repetições, para cada configuração (Tabela A.6 do apêndice A.7). Na Tabela V.1 são apresentados os valores da eficiência de remoção para cada grupo de testes, cada um com sua respectiva média, desvio padrão (DP) e coeficiente de variação (CV). Esse último é a razão entre o desvio padrão e a média.

Tabela V.1: Eficiência de remoção de partículas para configurações sem injeção de gás.

Tratamento (n)	Nome	Média (%)	DP (%)	CV (%)
1	Off-line	1,9	4,9	251,4
2	DT-SMF	28,5	4,4	15,5
3	DT-DB	57,1	3,0	5,3
4	DT-I	64,4	0,7	1,0
5	DT-DBI	58,8	4,0	6,8

O coeficiente de variabilidade do teste off-line mostrou-se acima da previsão de 20% em função da média tender a um resultado próximo de zero. Entretanto o desvio padrão desse tratamento encontra-se com variabilidade próximo dos demais.

A partir dos dados da Tabela V.1 foi construída a Figura 5.6 para comparar a eficiência de remoção de inclusões entre os ensaios pela média de cada grupo de ensaios sem injeção de gás e de seu respectivo intervalo de 95% de confiança.

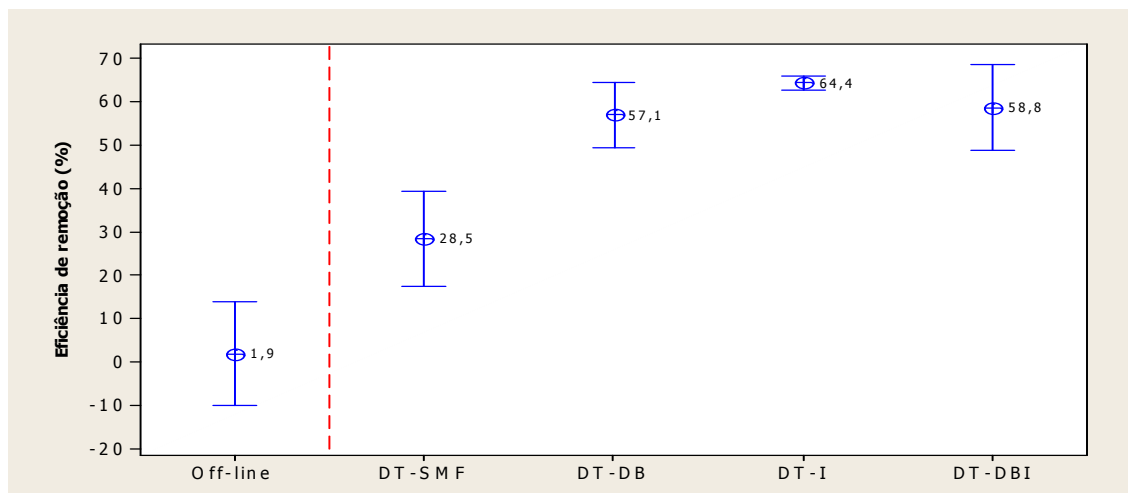


Figura 5.6: Comparação da eficiência de remoção de partículas entre as configurações básicas do distribuidor sem injeção de gás.

Na Figura 5.6 é mostrada que a eficiência de remoção de partículas para as configurações internas com modificadores de fluxo (DT-DB, DT-I e DT-DBI) são diferentes, assumindo 5% de significância, em relação ao distribuidor sem modificadores de fluxo (DT-SMF), comprovando o efeito favorável dos modificadores de fluxo sobre a qualidade do aço. Outro fato é que a combinação de modificadores de fluxo não necessariamente eleva a eficiência de remoção a outro patamar, por seus efeitos não se mostrarem aditivos. O sistema *off-line* é a referência para a entrada de partículas no distribuidor. Para as próximas análises, cada sistema de injeção de gás será comparado com sua respectiva configuração interna sem injeção de gás, apresentada nesse item.

A fim de elucidar o comportamento geral do escoamento, buscou-se a colorimetria (injeção de um traçador para gerar contraste) como ferramenta suporte. Desta forma são apresentadas uma sequência de quatro imagens do escoamento no modelo em cada uma das Figuras 5.7; 5.8; 5.9 e 5.10, sendo que cada sequência é relativa a uma configuração interna específica do distribuidor. Cada imagem tem indicação no canto superior esquerdo de sua respectiva configuração interna e do tempo transcorrido em relação ao tempo $t=0s$ da injeção do corante. Para o instante em análise, são mostradas as vistas de frente e superior (espelho) do distribuidor.

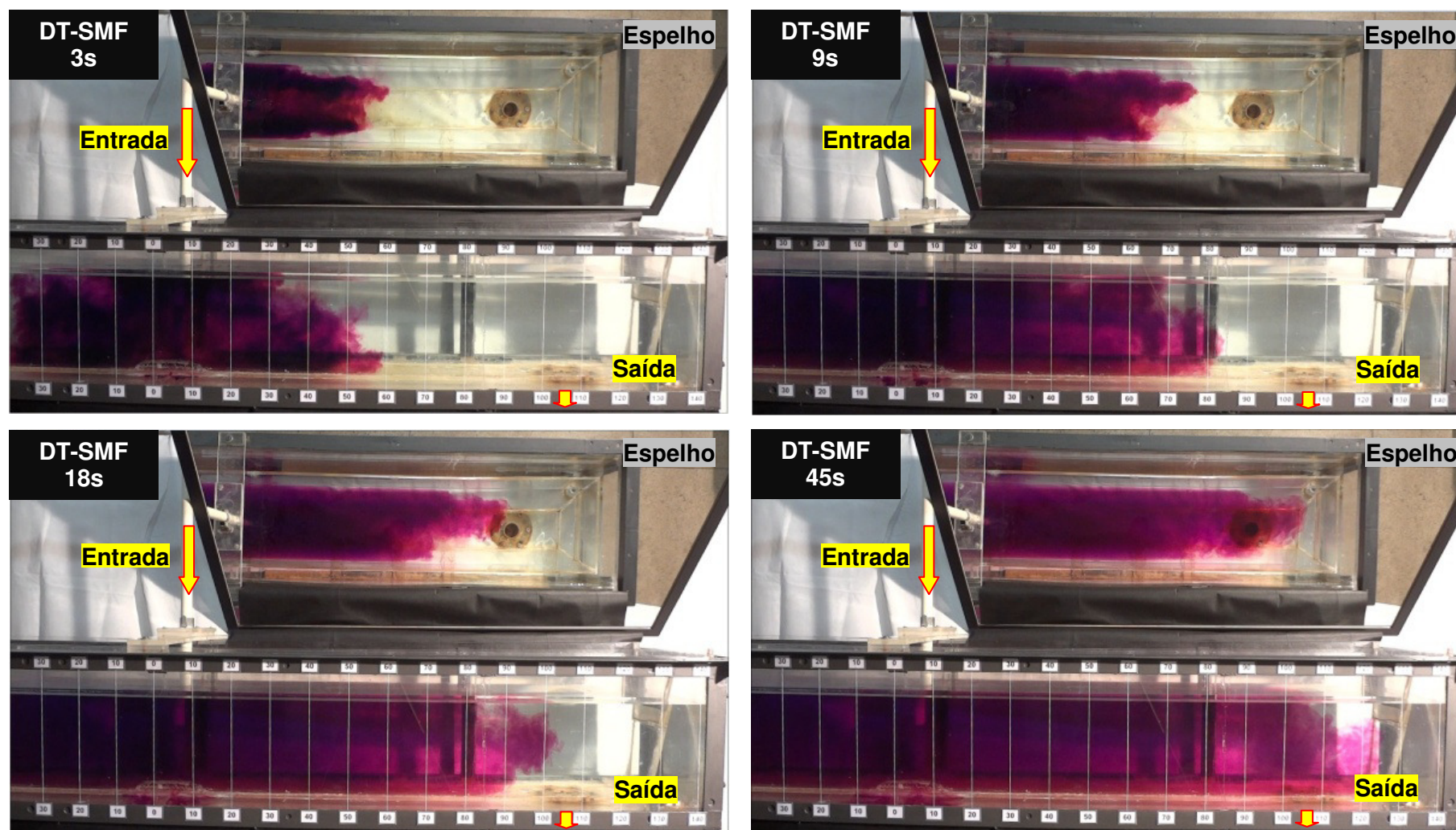


Figura 5.7: Imagens da injeção de corante no distribuidor sem modificadores de fluxo e sem injeção de gás, para os instantes 3, 9, 18 e 45s.

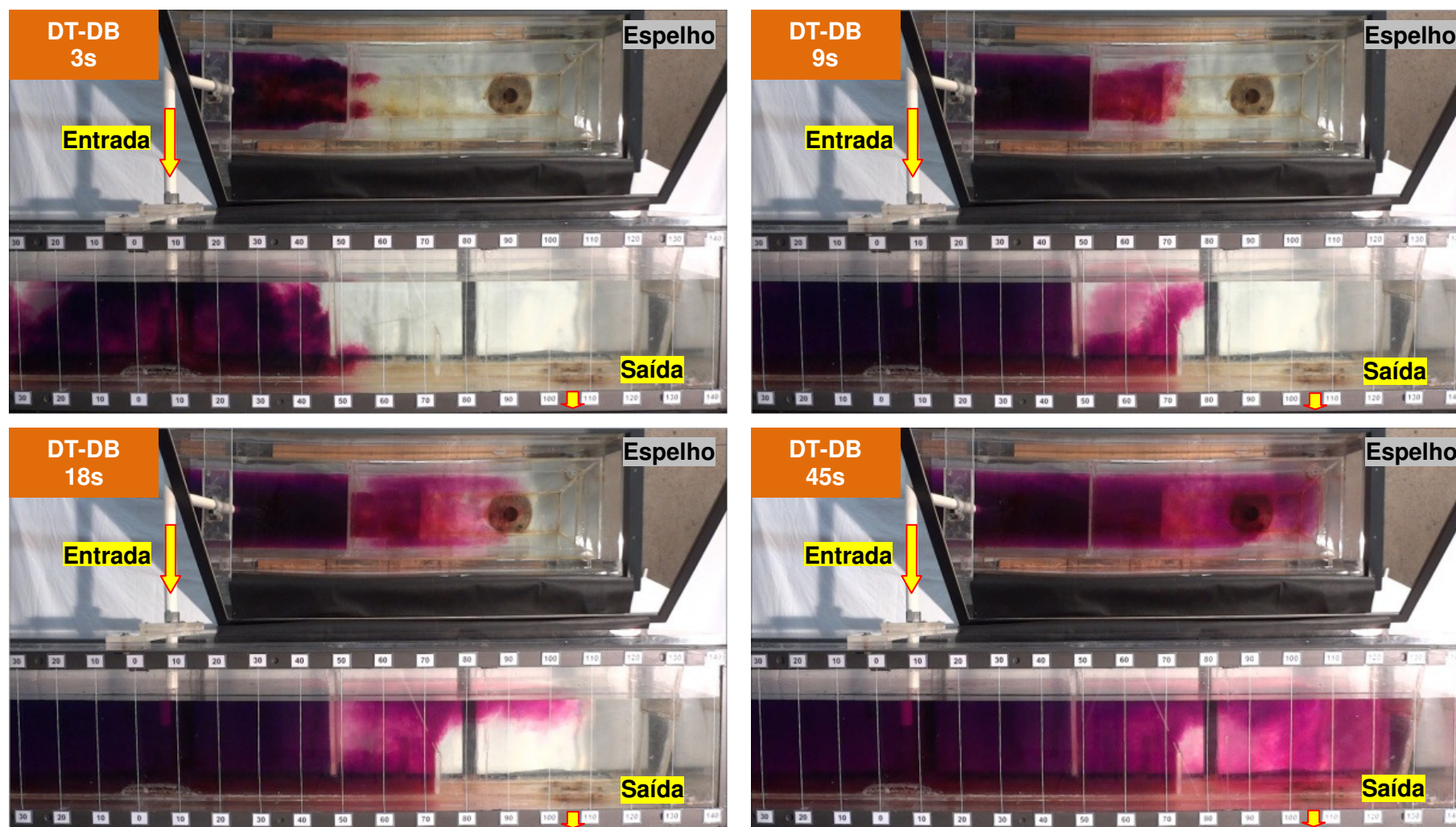


Figura 5.8: Imagens da injeção de corante no distribuidor com diques e barragens e sem injeção de gás, para os instantes 3, 9, 18 e 45s.

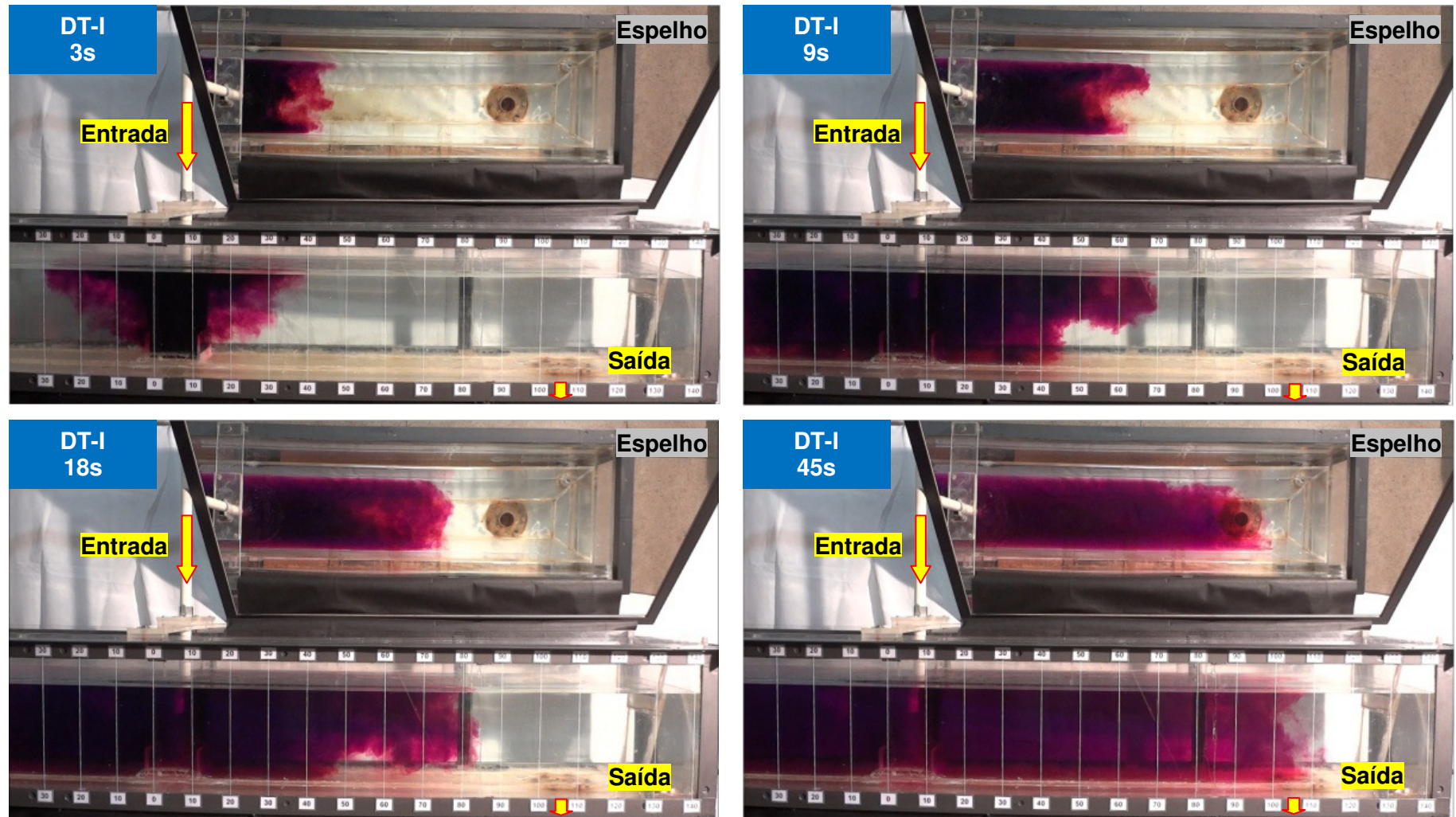


Figura 5.9: Imagens da injeção de corante no distribuidor com inibidor de turbulência e sem injeção de gás, para os instantes 3, 9, 18 e 45s.

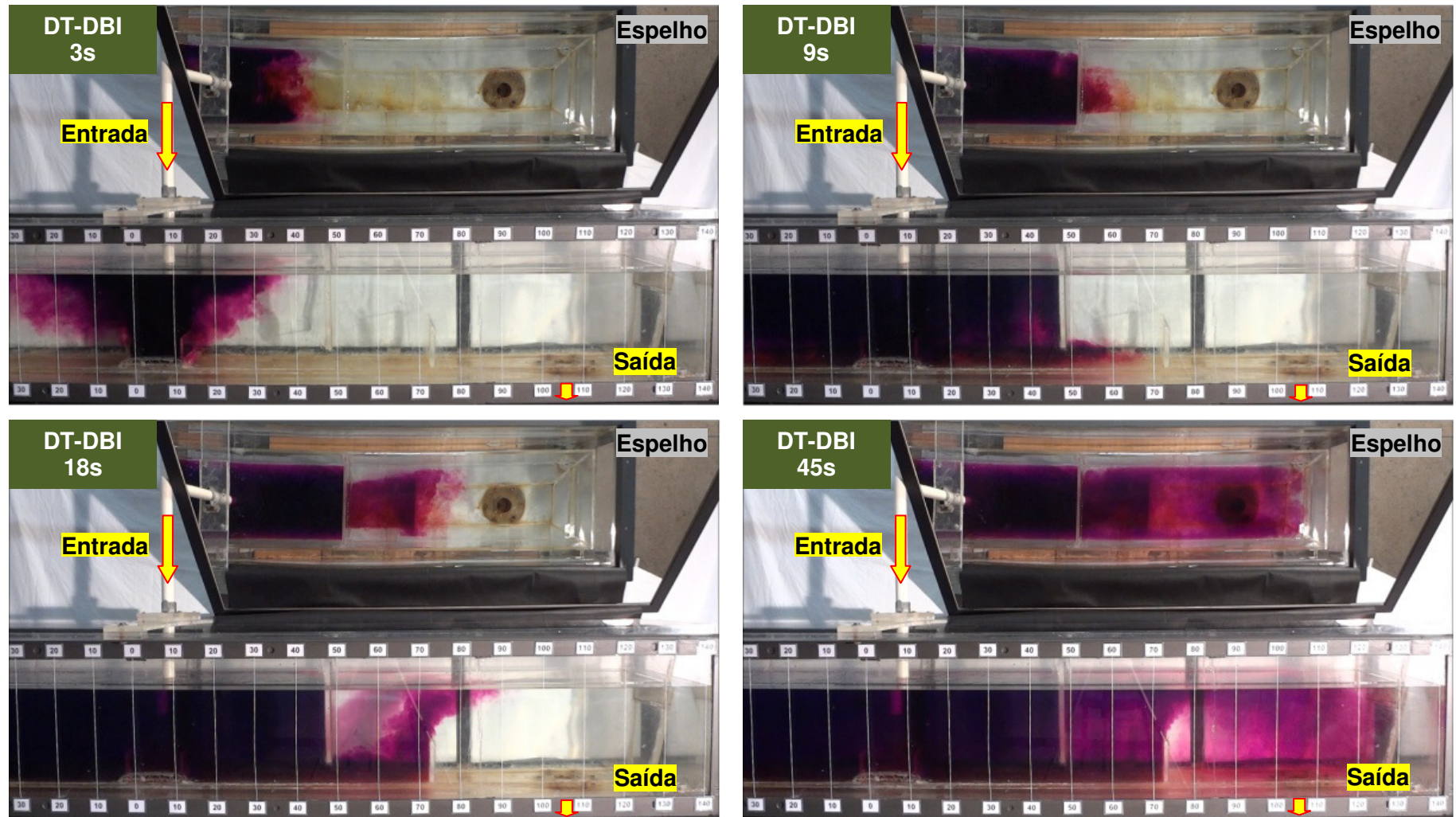


Figura 5.10: Imagens da injeção de corante no distribuidor com diques, barragens e inibidor de turbulência, e sem injeção de gás, para os instantes 3, 9, 18 e 45s.

A Figura 5.7, referente a configuração interna do distribuidor sem modificadores de fluxo (DT-SMF), mostrou que o pulso de corante ao entrar no distribuidor se espalhou simetricamente na base do distribuidor em direção à superfície livre. Não existindo barreiras físicas, a frente de avanço de corante se direciona para a saída preferencialmente pelo fundo do distribuidor. Ao alcançar a saída, uma porção de fluido nas extremidades se mostra com baixa velocidade de renovação, fato esse que não colabora para flotação de inclusões por reduzir o volume efetivo do distribuidor.

A Figura 5.8, referente ao distribuidor com diques e barragens (DT-DB), evidenciou que o pulso de corante ao entrar no distribuidor se espalha simetricamente na base do distribuidor em direção à superfície livre. A frente do corante, ao encontrar o dique, é direcionada para a abertura inferior na base do distribuidor, onde é novamente direcionada para a superfície livre do distribuidor pela barragem. Nesse momento o fluxo ascendente apresenta duas componentes, sendo uma de menor intensidade em direção ao dique, e a outra em direção à saída do distribuidor. A componente que avança em direção à saída, elimina a região de renovação lenta da posição mais afastada do distribuidor, observada na Figura 5.7 para o tempo de 45s, mas cria uma região de recirculação entre a saída e a barragem.

A Figura 5.9, referente ao distribuidor com inibidor de turbulência (DT-I), mostra que o pulso de corante, nos instantes iniciais, foi totalmente redirecionado para cima, em direção à superfície livre do banho, sem apresentar espalhamento significativo devido à contenção do fluxo gerada pelo inibidor de turbulência. Essa frente de corante espalhou simetricamente de cima para baixo, avançando de forma coesa pela superfície livre do distribuidor até chegar à sua saída. Nesse momento, a porção de fluido mais externa apresentou baixa velocidade de renovação, de forma similar a configuração sem modificadores de fluxo (DT-SMF). Inicialmente esperava-se um maior ganho na remoção de inclusões, em relação aos outros modificadores de fluxo, por direcionar as partículas para a superfície do banho e favorecer a agregação delas, fato esse que não foi constatado. Contudo a variabilidade da eficiência de remoção de inclusões para o uso exclusivo do inibidor de turbulência foi menor, o que torna o seu resultado mais robusto em relação aos outros modificadores.

Por fim, a Figura 5.10, referente a configuração interna do distribuidor com diques, barragens e inibidor de turbulência (DT-DBI), mostrou que o escoamento foi uma

combinação parcial dos efeitos observados anteriormente em seus casos isolados, onde o pulso de corante, nos instantes iniciais, foi totalmente redirecionado para cima, em direção à superfície livre do banho e expandiu de cima para baixo até ocupar toda região entre os diques, eliminando assim a uma pequena região de baixa velocidade próximo ao dique. A frente de corante avançou de cima para baixo, até encontrar a saída na base do dique, onde a barragem direcionou o escoamento para a superfície livre do distribuidor. As próximas observações são semelhantes às discutidas na Figura 5.8.

Com base em todas essas observações, entende-se que o avanço do pulso de corante preferencialmente pela base do distribuidor na configuração DT-SMF foi o fator que menos favoreceu a flotação das inclusões, pelo seu resultado da eficiência de remoção de partículas na Figura 5.6.

Apesar das configurações DT-I e DT-DBI terem sido alvo de discussão sobre a eficiência de remoção de inclusões neste item, estas configurações internas do distribuidor não serão alvo de avaliação do efeito da injeção de gás sobre a eficiência de remoção de inclusões.

5.2.2. Ensaios para o distribuidor sem modificadores de fluxo e com injeção de gás

Neste item, avaliou-se a eficiência de remoção inclusões para o distribuidor sem modificadores de fluxo sólidos, também referenciado como DT-SMF. Os ensaios foram feitos com três repetições, para três níveis de posição de plugue: 28, 56 e 84cm de afastamento da válvula longa, e para quatro níveis de vazão de gás: 1, 2, 3 e 4NI/min.

A Tabela V.2 apresenta os valores da eficiência de remoção para cada grupo de ensaios, cada um com a sua respectiva média, desvio padrão (DP) e coeficiente de variação (CV). Esses dados estão foram desenvolvidos a partir dos dados das Tabelas: A.7, A.8 e A.9 do Apêndice A.8.

Tabela V.2: Eficiência de remoção de partículas para as configurações do distribuidor sem diques e barragens, e com injeção de gás de 1, 2, 3 e 4NI/min para as posições a 28, 56 e 84cm da válvula longa.

Tratamento (n)	Posição (cm)	Vazão (NI/min)	Média (%)	DP (%)	CV (%)
1	-	0	28,5	4,4	15,5
2	28	1	50,6	9,3	18,4
3	28	2	44,2	7,1	16,0
4	28	3	50,1	5,7	11,3
5	28	4	64,8	4,8	7,4
6	56	1	71,7	4,3	5,9
7	56	2	72,9	5,5	7,5
8	56	3	74,1	7,8	10,5
9	56	4	80,1	4,9	6,1
10	84	1	40,4	5,1	12,5
11	84	2	64,2	9,2	14,4
12	84	3	74,8	5,4	7,2
13	84	4	66,0	8,0	12,2

Dessa Tabela V.2 criou-se a Figura 5.11 que compara a eficiência de remoção de inclusões entre os ensaios e a referência DT-SMF, a partir da média de cada grupo de ensaios com injeção de gás e de seu respectivo intervalo de 95% de confiança.

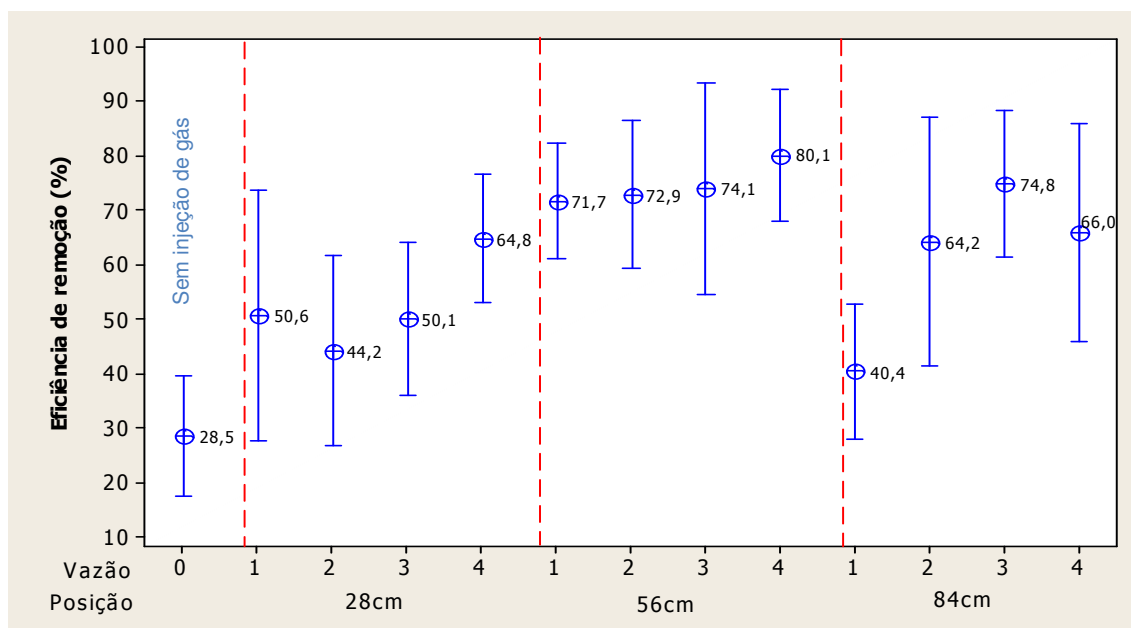


Figura 5.11: Comparação da eficiência de remoção de partículas do distribuidor sem diques e barragens, sem e com injeção de gás variando a posição do plugue.

A Figura 5.11 apresentou evidência estatística, com nível de significância de 5%, de que a vazão de gás injetada afetou a eficiência de remoção de inclusões do distribuidor sem diques e barragens, para as configurações:

- plugue a 28cm da válvula longa para a vazão de 4NI/min;
- plugue a 56cm da válvula longa para as vazões de 1, 2, 3 e 4NI/min;
- plugue a 84cm da válvula longa para as vazões de 2, 3 e 4NI/min.

A eficiência de remoção de inclusões para a posição de plugue 28cm e vazões de 1, 2 e 3NI/min apresentou dispersão de resultado. No sistema foi observado uma cortina pouco estável devido à perturbação do escoamento próximo ao jato da válvula longa. A posição de plugue que mais se destacou foi a intermediária, onde todas as vazões de gás injetadas mostram efeitos relevantes. Também se observa para essa posição, pela tendência linear da média amostral, que existe espaço para investigação do aumento da vazão de gás, contudo a energia de agitação da superfície deve ser avaliada, uma vez que existe a possibilidade de reversão de inclusões ao aço. Outro aspecto é que todos esses resultados não são diferentes entre si pela análise de seus respectivos intervalos de 95% de confiança. A posição de plugue a 84cm sugere, pela tendência das médias, a existência de um máximo de eficiência para a vazão 3NI/min.

A Figura 5.12 mostra o efeito no escoamento da injeção de gás no distribuidor sem diques e barragens, pelo método de colorimetria. A referência dessa configuração interna sem injeção de gás foi apresentada na Figura 5.7 de índice DT-SMF.

Do instante $t=0s$ até o momento do encontro do corante com o plugue, a frente de avanço comportou-se de forma similar à sua referência sem injeção de gás DT-SMF da Figura 5.7. A principal característica foi o escoamento preferencialmente da base do distribuidor para a superfície. A vazão do plugue cria um volume de deslocamento de fluido em direção à superfície do banho que conduz o corante para ela. Esse volume deslocado é dividido em duas partes: uma que volta no sentido da válvula longa, gerando uma recirculação, e outra que será conduzida para a saída do distribuidor pela superfície. Um fato relevante verificado na Figura 5.12 foi a inversão da frente de avanço do corante da base do distribuidor (antes do plugue) para a superfície dele (após o plugue), e a magnitude desse fenômeno aumenta à medida que a vazão de gás injetado aumenta.

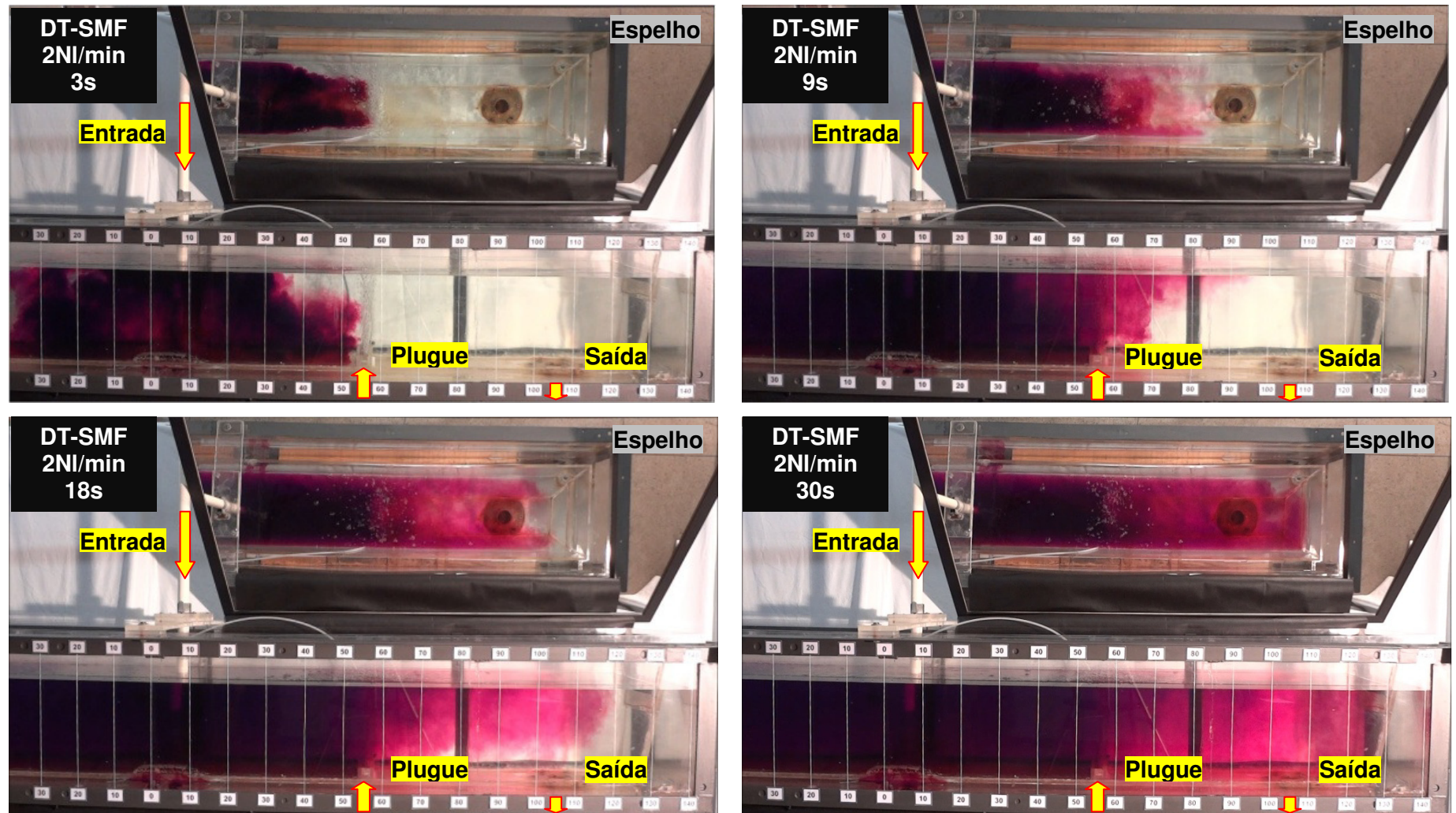


Figura 5.12: Imagens da injeção de corante no distribuidor sem diques e barragens, com vazão de plugue de 2NI/min a 56cm de afastamento da válvula longa para os instantes 3, 9, 18 e 30s.

Fisicamente, pelos aspectos observados na colorimetria dos ensaios com injeção de gás, são esperados pelo menos três mecanismos para a remoção de inclusões, cada uma com sua respectiva intensidade. O primeiro, o aumento da energia da movimentação do fluido pela turbulência local, promovida pelo deslocamento de gás, favorece a colisão e agregação de partículas. Com isso, ocorre o aumento do tamanho médio, a força de empuxo e a sua velocidade de remoção terminal. Um segundo mecanismo faz referência à colisão e adesão entre partícula e bolha, que a carrega para a superfície livre do distribuidor. Por fim, o último mecanismo que também facilita a flotação de partículas menores é o fenômeno de seu reposicionamento. Uma vez que partículas localizadas na parte inferior da coluna de fluido no distribuidor, possuem pequena probabilidade natural de flotação, em função da baixa de velocidade de ascensão. Então, pelo araste gerado pelo fluido, essas partículas são reposicionadas mais próximas à superfície, o que aumenta consideravelmente a chance delas aflorarem ou estarem em uma região próxima à superfície e favorecer o fenômeno de agregação.

Para modelar o comportamento geral da eficiência de remoção de inclusões do sistema em estudo, criou-se a Figura 5.13, com base nos resultados de eficiência de remoção da Tabela V.2, que apresenta um gráfico de superfície de resposta com linhas de isoeficiências de remoção, pelo processo de interpolação das eficiências obtidas dentro dos intervalos avaliados dos fatores vazão de gás e posição de plugue.

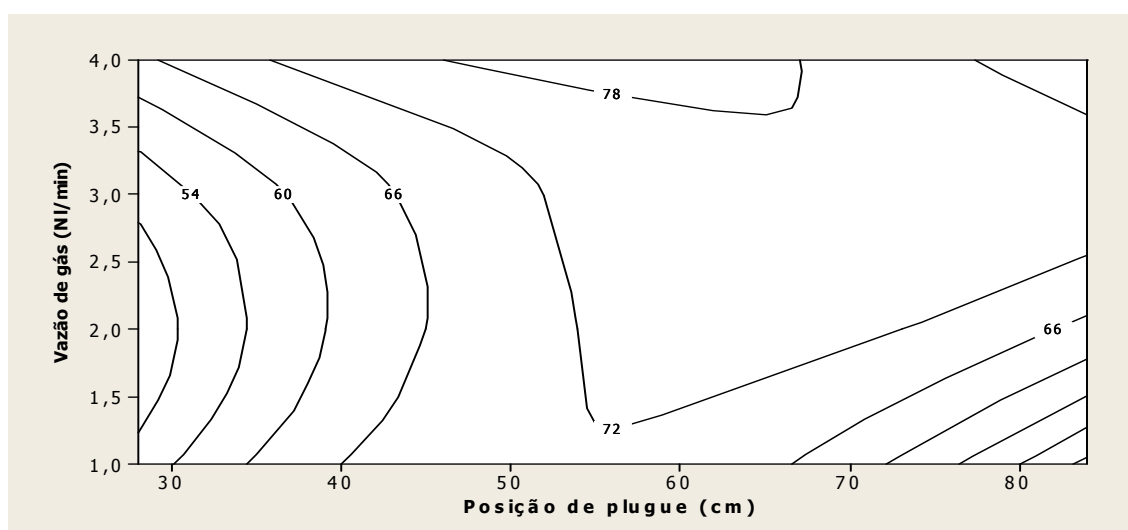


Figura 5.13: Curvas de nível da superfície de resposta para a eficiência de remoção de partículas para distribuidor sem diques e barragens, e com injeção de gás de 1, 2, 3 e 4NI/min para as posições a 28, 56 e 84cm da válvula longa.

A Figura 5.13 sugere a existência de uma região central onde a eficiência supera 72% de remoção, iniciando a aproximadamente 57cm da válvula longa e para uma vazão de 1,3NI/min. Contudo, a maior eficiência de remoção encontra-se na ordem de 78% a aproximadamente 64cm da válvula longa para uma vazão de 3,8NI/min. Esta vazão poderá gerar um nível de agitação na superfície de banho e tem potencial para reverter inclusões não metálicas que não foram absorvidas pela escória, ou até mesmo incorporar a escória ao banho por arraste hidrodinâmico.

Para um refinamento da análise, foi empregada a técnica da análise de variância (ANOVA) para a eficiência de remoção de partículas, tendo como base as informações da Tabela V.1. A Figura 5.14, referente à ANOVA, foi obtida do software Minitab16.

Modelo linear geral para a Eficiência de remoção de partículas vs. Vazão de gás e Posição de plugue, para distribuidor sem modificadores de fluxo.

Fator	Tipo	Nível	Valores
Vazão de gás (NI/min)	fixado	4	1; 2; 3; 4
Posição de plugue (cm)	fixado	3	28; 56; 84

Análise de variância para a eficiência de remoção de partículas, usando ajuste SS para os testes

Fonte	GL	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Vazão de gás	3	1326,44	1326,44	442,15	10,03	0,000
Posição de plugue	2	3007,67	3007,67	1503,83	34,13	0,000
Vazão * Posição	6	1436,29	1436,29	239,38	5,43	0,001
Erro	24	1057,56	1057,56	44,06		
Total	35	6827,95				

S = 6,63813 $R^2 = 84,51\%$ $R^2(\text{adj}) = 77,41\%$

Figura 5.14: Análise de variância para a eficiência de remoção de partículas para as configurações do distribuidor sem diques e barragens, e com injeção de gás de 1, 2, 3 e 4NI/min para as posições a 28, 56 e 84cm da válvula longa.

Pela análise da ANOVA, apresentada na Figura 5.14, conclui-se que todos os fatores, e sua combinação, têm efeito significativo sobre a variável resposta, eficiência de remoção, haja vista que, para um nível de significância de 5%, todos os p-valores se apresentaram menores que esse valor de referência e, portanto, estão na região de rejeição da hipótese nula de que os efeitos não são significativos. Com relação à relevância desses efeitos, quanto menor o p-valor, maior ela será, e portanto, pode-se ordenar essas significâncias da mais relevante para a menos, na seguinte ordem:

posição, vazão e o produto delas. Com auxílio da Figura 5.15 dos efeitos principais, essa discussão será retomada. Na última linha da ANOVA pode-se ver o desvio padrão amostral (S), o coeficiente de determinação R^2 e o coeficiente de determinação ajustado R^2 (adj). O coeficiente de determinação R^2 indica que 84,51% do resultado aqui observado da eficiência de remoção pode ser explicado pelos fatores estudados. A fração complementar de R^2 faz referência aos ruídos do sistema, ou seja, variáveis não controladas, mas também é importante salientar que a própria turbulência do escoamento introduz alguma variabilidade no sistema, de forma que o R^2 nunca será 1, mesmo com todas as variáveis externas (temperatura, condutividade da água, etc.) controladas. E por fim, o coeficiente de determinação ajustado corrige o coeficiente de determinação original levando em consideração ao tamanho da amostra.

Na Figura 5.15 é apresentada a análise dos efeitos principais na eficiência de remoção de partículas para as configurações do distribuidor sem diques e barragens, e com injeção de gás de 1, 2, 3 e 4NI/min para as posições de plugue a 28, 56 e 84cm da válvula longa.

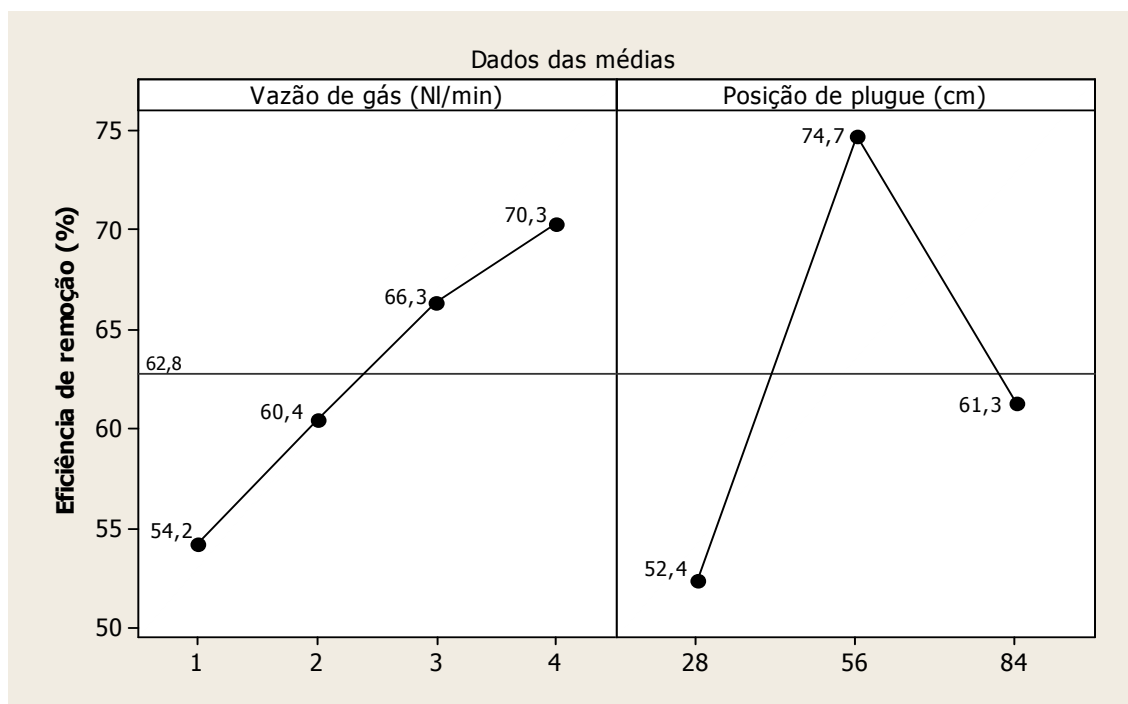


Figura 5.15: Análise dos efeitos principais na eficiência de remoção de partículas para as configurações do distribuidor sem diques e barragens, e com injeção de gás de 1, 2, 3 e 4NI/min para as posições a 28, 56 e 84cm da válvula longa.

Na Figura 5.15 são apresentados os dois fatores desse sistema em estudo: vazão e posição. Com relação à vazão, observa-se que a eficiência de remoção aumenta com a elevação da vazão de forma aproximadamente linear. Com relação à posição do plugue, observa-se que existe um comportamento não linear, o que sugere a existência de uma distância ótima para a posição de plugue. Essa afirmação torna-se mais notável uma vez que a ANOVA da Figura 5.14 apresentou o maior valor de F (relação entre sinal e ruído) para o fator posição. Pela análise das intensidades, o fator posição do plugue foi o que mais afetou positivamente a eficiência de remoção de partículas, e em particular, o posicionamento do plugue a 56cm da válvula longa foi o mais relevante e tem maior poder de explicação estatística. Outro aspecto relevante é a maior faixa (*range*) de variação de eficiência vista entre as posições 28 e 56cm (que também se traduz nos maiores afastamentos médios da média global), que conduz a inclinação mais acentuada do fator posição.

Na Figura 5.16 é apresentado o comportamento geral das interações entre as vazões e as posições de plugue na eficiência de remoção de inclusões.

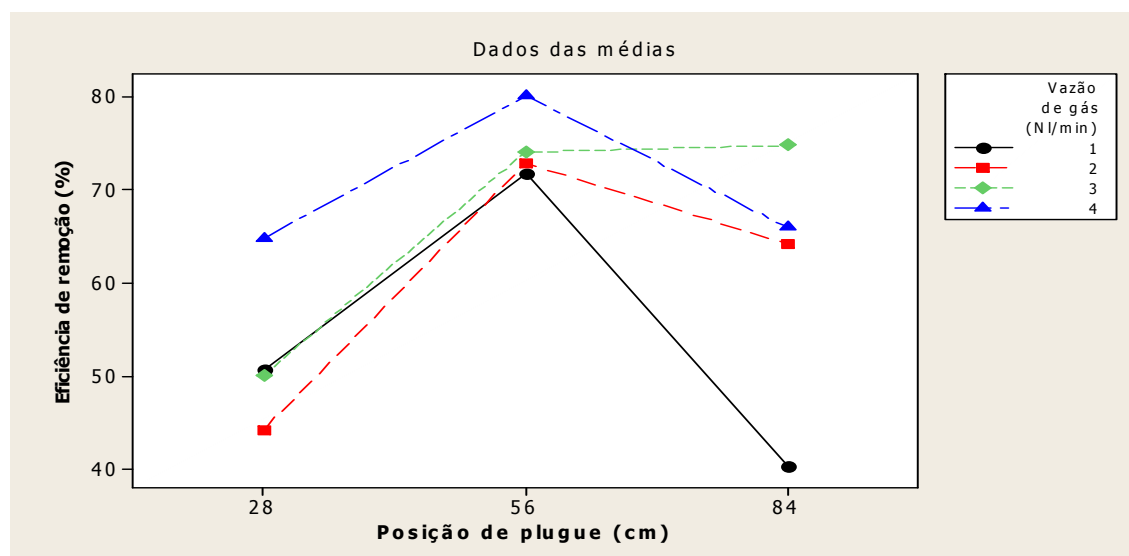


Figura 5.16: Análise das Interações entre as vazões de 1, 2, 3 e 4NI/min e as posições de plugue a 28, 56 e 84cm da válvula longa na eficiência de remoção de partículas para o distribuidor sem diques e barragens.

Na Figura 5.16 é mostrado que as interações mais relevantes para a eficiência de remoção de partículas, para a configuração em análise, estão relacionadas a posição de plugue 56cm, para todas as vazões, mas em particular, a vazão de 4NI/min tem o

maior destaque. Outra interação que também merece atenção é a da posição 84cm com vazão 3NI/min, que se mostrou na mesma ordem de grandeza das interações da posição 56cm.

5.2.2.1. Volumes característicos

A literatura relata que a análise dos volumes característicos é uma ferramenta para avaliar a remoção de inclusões, tendo em vista que um aumento no volume pistonado favorece a flotação das inclusões à escória e a redução do volume morto aumenta o tempo de residência efetivo do aço, com isso busca-se maximizar o volume pistonado e minimizar o volume morto.

Os resultados discutidos neste item baseiam-se nos volumes característicos de escoamento das curvas de distribuição de tempos de residência (apresentadas no apêndice A.2, referentes às Figuras: A.3, A.4, A.5, A.6 e A.7) de cada configuração abordada. Os ensaios foram feitos com seis repetições para cada nível de vazão e posição (o resultado de cada ensaio está exibido no apêndice A.3, referentes às Tabelas: A.1, A.2 e A.3). Na Tabela V.3 são apresentados os valores médios dos volumes característicos de cada grupo de testes e o respectivo desvio padrão.

Tabela V.3: Volumes característicos para o distribuidor sem modificadores de fluxo, sem e com injeção de gás de 1, 2, 3 e 4NI/min, para as posições de plugue a 28, 56 e 84cm da válvula longa.

Tratamento (n)	Posição (cm)	Vazão (NI/min)	Volumes (%)			Desvio Padrão (%)		
			Pistonado	Morto	Mistura	Pistonado	Morto	Mistura
1	-	0	22,4	16,7	60,9	2,8	1,1	2,5
2	28	1	18,5	16,4	65,1	2,3	1,8	2,1
3	28	2	15,8	18,8	65,4	2,4	1,0	2,4
4	28	3	14,2	20,9	64,9	1,0	1,2	1,9
5	28	4	15,8	21,6	62,6	2,7	0,8	2,4
6	56	1	19,7	17,8	62,6	0,5	1,3	1,7
7	56	2	13,8	19,5	66,6	0,8	1,2	1,6
8	56	3	14,2	20,1	65,7	1,0	1,5	1,5
9	56	4	12,8	21,2	66,0	0,5	1,5	1,8
10	84	1	18,4	22,2	59,5	1,0	1,4	0,7
11	84	2	14,8	26,4	58,8	2,5	1,3	3,5
12	84	3	16,4	24,2	59,4	2,0	3,3	2,9
13	84	4	14,4	23,1	62,5	2,2	1,9	3,8

A partir dos volumes característicos da Tabela V.3 foram feitas as Figuras 5.17; 5.18 e 5.19. Cada figura compara o comportamento de seu respectivo volume característico mediante ao efeito da variação da vazão de gás e da posição do plugue, com base na média de cada tratamento de ensaios e de seu respectivo intervalo de 95% de confiança. A Figura 5.17 apresenta o comportamento do volume pistonado.

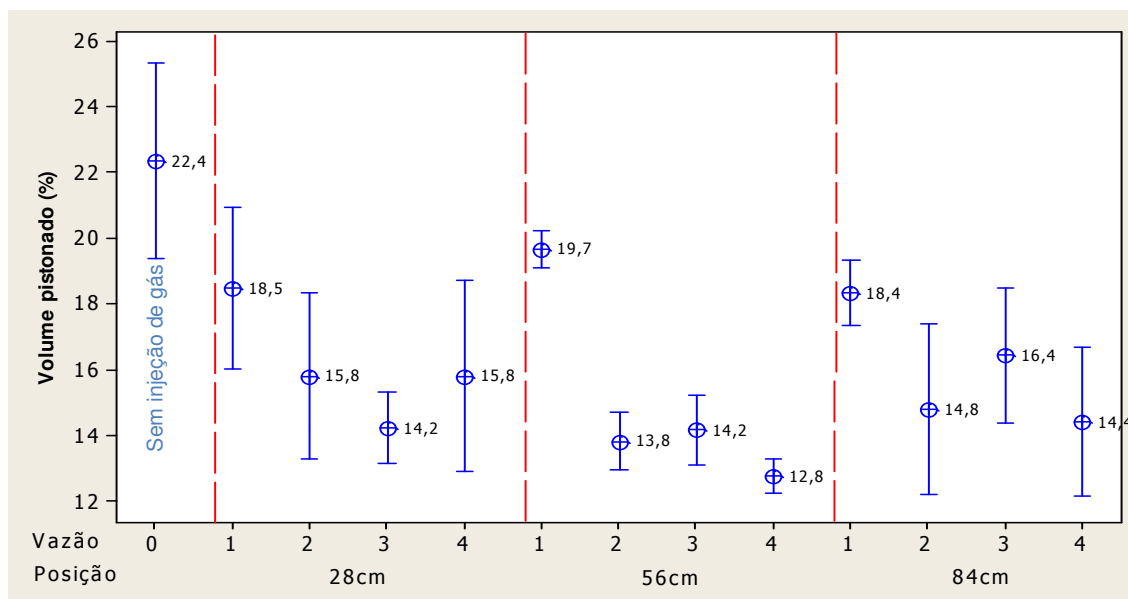


Figura 5.17: Médias e intervalos com 95% de confiança para os volumes pistonados do distribuidor sem modificadores de fluxo, sem e com injeção de gás de 1, 2, 3 e 4NI/min para as posições de plugue 28, 56 e 84cm.

Pela Figura 5.17 conclui-se que à medida que a vazão de gás aumenta no distribuidor, indiferente da posição de plugue, o volume pistonado diminui em relação o sistema sem injeção de gás. Entretanto, com base nos intervalos de confiança, e assumindo 5% de significância, não se tem subsídio para afirmar que o volume pistonado para a vazão de 1NI/min, indiferente da posição de plugue, é diferente do volume pistonado da configuração referência sem injeção de gás. As demais configurações com injeção de gás são significativamente diferentes em relação a configuração sem injeção de gás.

Quando se observam os volumes pistonados de cada posição, para as vazões de 2, 3 e 4NI/min, não é possível afirmar que eles são diferentes entre si, com nível de significância de 5%.

A Figura 5.18 apresenta o comportamento do volume morto.

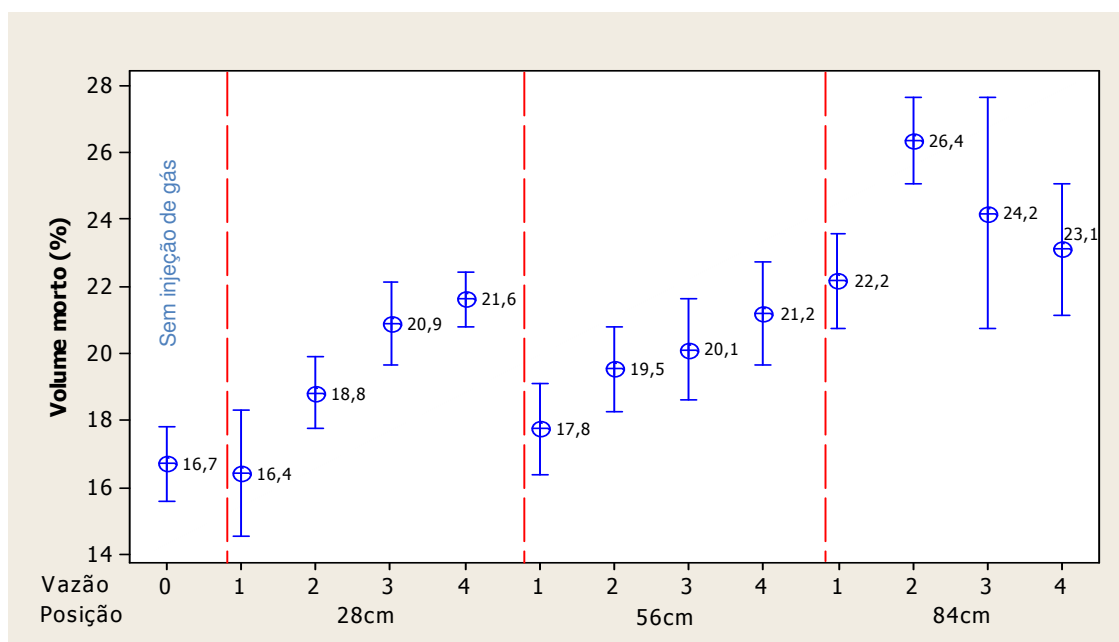


Figura 5.18: Médias e intervalos com 95% de confiança para os volumes mortos do distribuidor sem modificadores de fluxo, sem e com injeção de gás de 1, 2, 3 e 4NI/min para as posições de plugue 28, 56 e 84cm.

Pela Figura 5.18 conclui-se que com o aumento da vazão de gás no distribuidor, indiferente da posição de plugue, o volume morto tende a aumentar. Em particular, a posição 84cm que apresentou uma tendência não linear, onde as vazões intermediárias sugerem a existência de um máximo de volume morto entre as vazões 1 a 4NI/min. Em relação ao sistema sem injeção de gás, com base nos intervalos de confiança, e assumindo 5% de significância, não se pode afirmar que os volumes mortos para as vazões 1 e 2NI/min para a posição 28cm, e 1NI/min para posição 56cm são diferentes.

Dentro do mesmo grupo, para a posição 28cm e vazões 3 e 4NI/min, não se pode afirmar que suas médias do volume morto são significativamente diferentes. Para a posição 56cm, as vazões 2, 3 e 4NI/min, as médias também não são diferentes significativamente. Para a posição 84cm, somente a vazão 2NI/min é significativamente diferente em relação as vazões 1 e 4NI/min. A vazão de 3NI/min apresentou uma variabilidade acima da tendência média (heterocedasticidade), portanto não se pode afirmar que ela é diferente das demais médias de seu subgrupo.

Na Figura 5.18 é apresentado o comportamento do volume mistura.

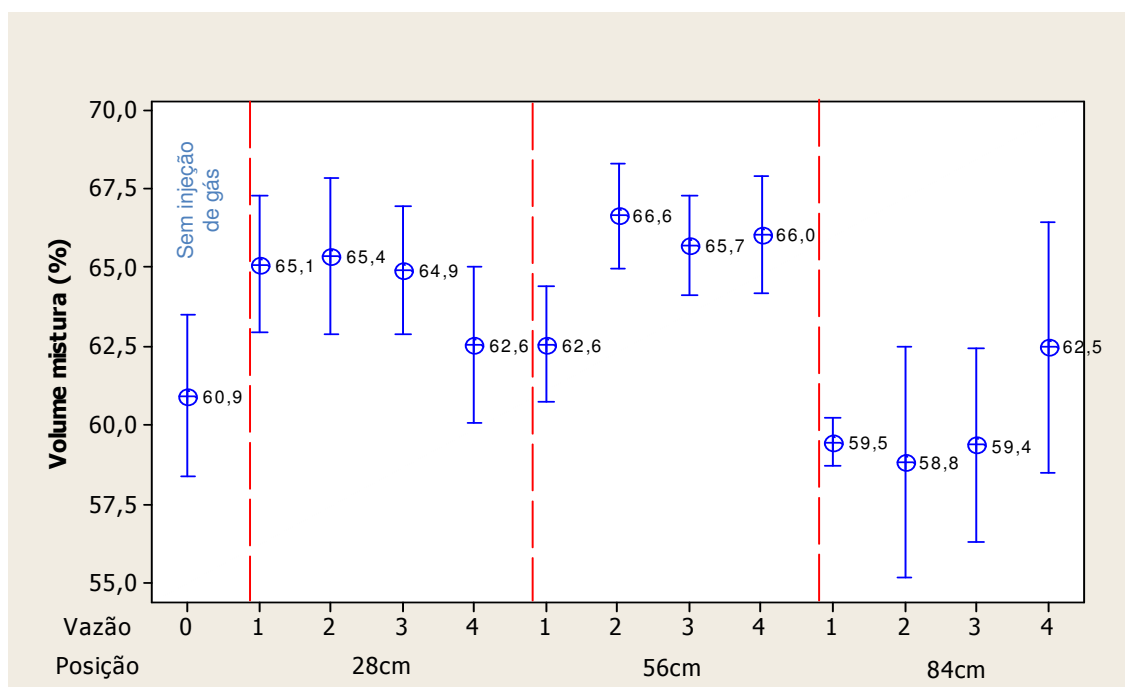


Figura 5.19: Médias e intervalos com 95% de confiança para os volumes de mistura do distribuidor sem modificadores de fluxo, sem e com injeção de gás de 1, 2, 3 e 4NI/min para as posições de plugue 28, 56 e 84cm.

Por esta Figura 5.19 conclui-se que a elevação da vazão aumentou o volume de mistura para a configuração do distribuidor com plugue montado a 56cm de afastamento da válvula longa, onde o volume de mistura para as vazões de 2, 3 e 4NI/min mostram-se significativamente diferentes, com 5% de significância, em relação a configuração de referência sem injeção de gás (DT-SMF). Para a posição de plugue a 28cm e a 84cm, nenhuma vazão mostrou-se diferente para o mesmo nível de significância. Contudo, as médias dos volumes mortos da posição 28cm se mostraram com tendência de redução com a elevação da vazão, e as médias para a posição 84cm apresentaram aumento com a elevação da vazão.

5.2.2.2. Razão entre volume pistonado e volume morto

A razão entre o volume pistonado (V_p) e o volume morto (V_m) é um índice para o estudo da remoção de inclusões a partir do ensaio de distribuição de tempos de residência (MACHADO, 2014). Como o volume pistonado 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) deseja-se que o primeiro aumente o máximo possível e o último diminua. Logo, quanto maior for a razão V_p/V_m , melhor seriam as condições de flotação de inclusões.

A Tabela V.4 apresenta um sumário da razão entre o volume pistonado (V_p) e o volume morto (V_m) dos dados experimentais. Os dados originais que deram origem a à presente Tabela V.4 estão disponíveis no apêndice A3, Tabela A.4.

Tabela V.4: Razão entre o volume pistonado (V_p) e o volume morto (V_m) dos dados experimentais para distribuidor sem modificadores de fluxo, com e sem injeção de gás e variando a posição de plugue.

Tratamento (n)	Posição (cm)	Vazão (NI/min)	Média (%)	DP (%)	CV (%)
1	-	0	1,35	0,21	15
2	28	1	1,14	0,22	20
3	28	2	0,84	0,15	18
4	28	3	0,68	0,04	7
5	28	4	0,73	0,15	20
6	56	1	1,11	0,07	6
7	56	2	0,71	0,05	7
8	56	3	0,71	0,08	11
9	56	4	0,61	0,04	6
10	84	1	0,83	0,09	11
11	84	2	0,56	0,07	13
12	84	3	0,69	0,15	22
13	84	4	0,62	0,06	10

A Figura 5.20 foi criada a partir dos dados da razão entre volume pistonado e volume morto (V_p/V_m), registrados na Tabela V.4. Ela compara o efeito das vazões de gás e a posição do plugue pela análise das médias de cada grupo de ensaios e de seus respectivos intervalos de 95% de confiança.

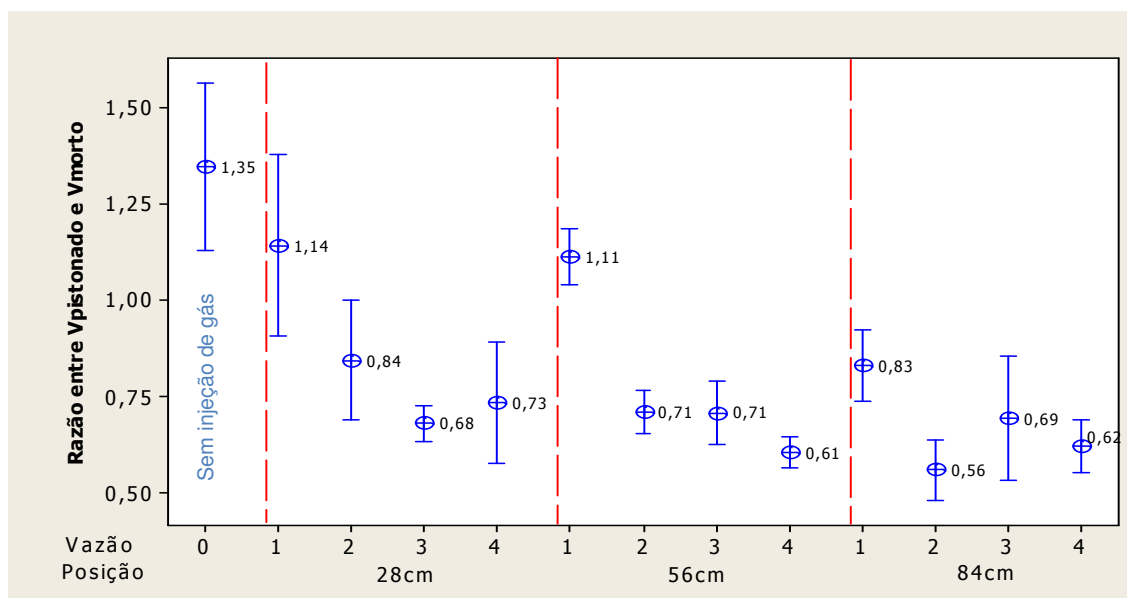


Figura 5.20: Médias e intervalos com 95% de confiança para a razão V_p/V_m , para distribuidor sem modificadores de fluxo, sem e com injeção de gás de 1, 2, 3 e 4NI/min e para as posições de plugue 28, 56 e 84cm.

Em linhas gerais, observa-se pela Figura 5.20 que à medida que a vazão de gás aumenta, a razão entre volume pistonado e volume morto (V_p/V_m) tende a diminuir, para o distribuidor sem modificadores de fluxo sólidos. Com explanado inicialmente, essa constatação não é favorável à flotação de inclusões, contudo essa proposição será reavaliada com o resultado de eficiência de inclusões da sonda APS III.

Apenas para a vazão de 1NI/min, nas posições de plugue 28 e 56cm, não é possível afirmar que as médias desses resultados são diferentes, assumindo um nível de significância de 5%, em relação a configuração sem injeção de gás. Para as demais vazões e posições, existem evidências estatísticas que as médias não são iguais, ou seja, o aumento da vazão de gás realmente reduziu a razão entre volume pistonado e volume morto.

Para o fechamento da análise de inclusões do distribuidor sem diques e barragens, a Figura 5.21 foi desenvolvida para relacionar a eficiência de remoção com a razão entre volume pistonado e volume morto (V_p/V_m). Para isso, os resultados das médias da Tabelas V.4 foram relacionadas, uma a uma, com suas respectivas médias da Tabela V.2.

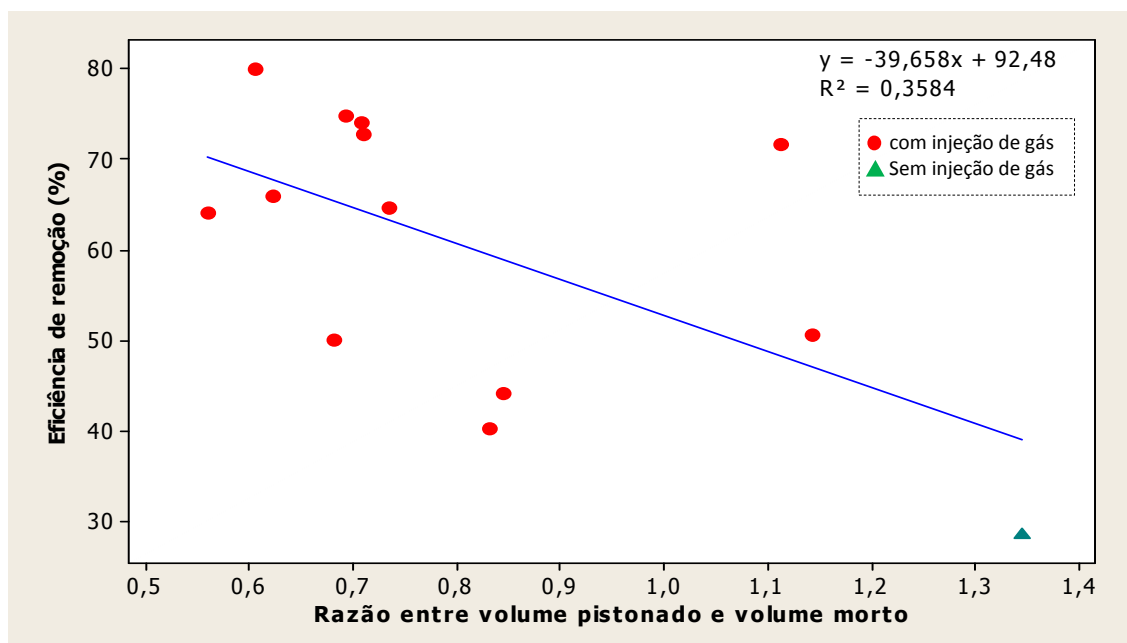


Figura 5.21: Correlação entre a eficiência de remoção de partículas e a razão entre volume pistonado e volume morto (V_p/V_m) para as vazões de 0, 1, 2, 3 e 4NI/min e posição de plugue a 28, 56 e 84cm da válvula longa do distribuidor sem diques e barragens.

Esperava-se observar um coeficiente de inclinação positivo para a reta estabelecida entre as duas variáveis, conforme exposto por MACHADO (2014), entretanto é exibido na Figura 5.21 que a relação observada entre as variáveis segue o comportamento inverso. Assim, para a configuração estudada, apenas a análise pura dos volumes característicos desse distribuidor não é adequada para indicar a melhor configuração interna objetivando a máxima eficiência de remoção de inclusões. PEREIRA (2004), em sua tese de doutorado, também fez essa mesma constatação, onde afirmou que associar um maior índice de flotação de inclusões a uma maior fração de volume em escoamento pistonado com uma menor fração de volume morto não é sempre válida. Outro aspecto sobre a análise das curvas características é o fato dessa metodologia não levar em consideração a remoção de inclusões pelo efeito das bolhas da cortina de gás.

5.2.3. Ensaio para o distribuidor com diques e barragens e com injeção de gás

Neste item avaliou-se a eficiência de remoção inclusões para o distribuidor com modificadores de fluxo do tipo diques e barragens, sem a presença do inibidor de turbulência, também referenciada como DT-DB quando sem injeção de gás. Os ensaios foram feitos com três repetições, para três níveis de posição de plugue: 28, 56 e 84cm de afastamento da válvula longa, e para cinco níveis de vazões: 1, 2, 3, 4 e 8NI/min.

Na Tabela V.5 são apresentados os valores da eficiência de remoção para cada grupo de ensaios, cada um com a sua respectiva média, desvio padrão (DP) e coeficiente de variação (CV). Os dados desta tabela V.5 foram desenvolvidos a partir dos dados das Tabelas: A.10, A.11, A.12, A.13 e A.14 do Apêndice A.9.

Tabela V.5: Eficiência de remoção de partículas para as configurações do distribuidor com diques e barragens, sem e com vazão de gás de 1, 2, 3 e 4NI/min para as posições a 28, 56 e 84cm da válvula longa.

Tratamento (n)	Posição (cm)	Vazão (NI/min)	Média (%)	DP (%)	CV (%)
1	-	-	57,1	3,0	5,3
2	28	1	57,1	7,5	13,1
3	28	2	64,1	6,1	9,6
4	28	3	68,3	6,0	8,8
5	28	4	80,5	3,3	4,2
6	28	8	68,8	4,3	6,2
7	56	1	58,5	1,9	3,3
8	56	2	73,5	3,8	5,2
9	56	3	73,7	1,7	2,3
10	56	4	61,3	2,9	4,7
11	56	8	60,8	4,8	7,8
12	84	1	60,9	7,3	12,0
13	84	2	67,7	4,1	6,1
14	84	3	68,3	4,6	6,8
15	84	4	68,3	2,4	3,5
16	84	8	60,6	3,9	6,5

Para comparar a eficiência de remoção de inclusões entre os ensaios e a referência DT-DB, apresentados na Tabela V.5, gerou-se a Figura 5.22 a partir da média de cada

grupo de ensaios com injeção de gás e de seu respectivo intervalo de 95% de confiança.

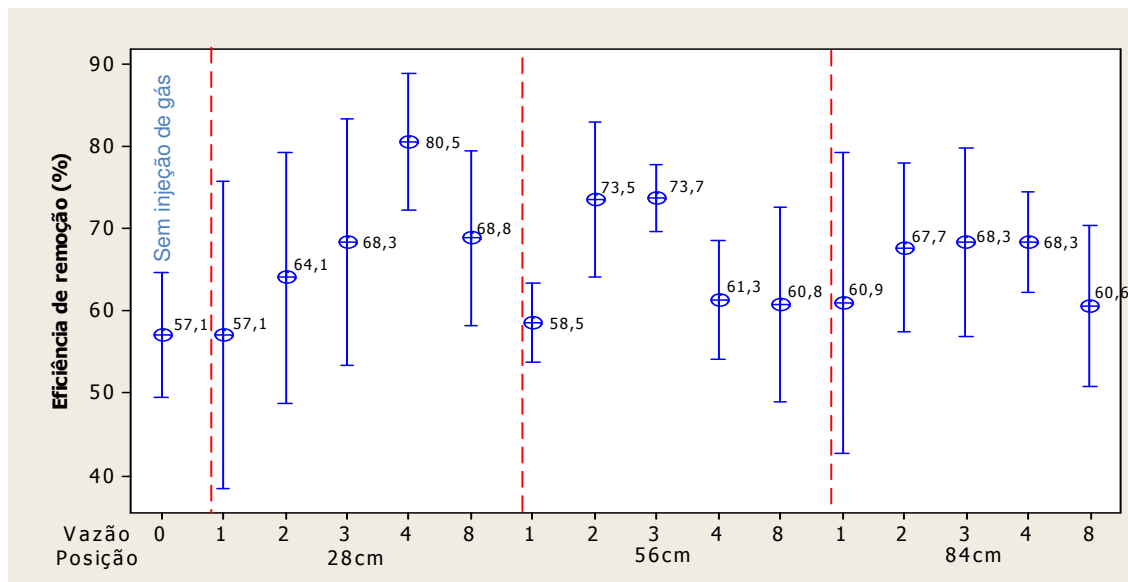


Figura 5.22: Comparação da eficiência de remoção de partículas do distribuidor com diques e barragens, sem e com injeção de gás variando a posição do plugue.

Como apresentado na Figura 5.6, a eficiência remoção natural do sistema com diques e barragens (DT-DB) é praticamente o dobro para o mesmo distribuidor sem modificares de fluxo, mas mesmo assim, pela Figura 5.22 foi evidenciado estatisticamente que a injeção de gás melhorou a eficiência de remoção de inclusões para o distribuidor com diques e barragens, com nível de significância de 5%, para as configurações:

- plugue a 28cm da válvula longa para a vazão de 4NI/min;
- plugue a 56cm da válvula longa para a vazão de 3NI/min.

Entretanto, o comportamento das médias para cada combinação de posição de plugue e vazão de gás sinaliza a tendência geral da eficiência de remoção de inclusões do distribuidor. Para a posição de plugue a 28cm, observa-se uma elevação gradual da eficiência de remoção com o aumento da vazão de gás até 4NI/min, sugerindo que ainda existe espaço para investigação do limite superior da eficiência de remoção. A configuração intermediária sugere a existência de um máximo entre as vazões de 2 e 3NI/min, e por fim, a posição mais afastada, a 84cm, sinaliza uma tendência de variação pouco representativa na eficiência de remoção com o aumento da vazão.

Em particular, a vazão de 8Nl/min, para qualquer posição de plugue, não apresentou melhoria de desempenho médio na eficiência de remoção de inclusões, mostrando uma tendência geral de queda de desempenho na eficiência de remoção em relação às vazões maiores. Fato esse que confirma a existência de uma vazão ótima para a eficiência de remoção de inclusões. Dois aspectos podem estar contribuindo para a redução da eficiência com aumento excessivo de vazão, o primeiro é uma possível reversão das partículas da superfície para o banho e, o segundo, o fato da existência de um excesso de energia no fluxo que não está permitindo a liberação das inclusões para a superfície do banho, ou até mesmo, a combinação desses fatores. Assim, um controle apurado do sistema de injeção de gás é requerido para a manutenção da eficiência do plugue e da qualidade do aço.

Na Figura 5.23 é mostrado o efeito no escoamento da injeção de gás no distribuidor com diques e barragens, pelo método de colorimetria. A referência dessa configuração interna sem injeção de gás foi apresentada na Figura 5.8 de índice DT-DB.

Do momento da injeção de corante ($t=0s$) até o instante do encontro dele com o plugue, a frente de avanço comportou-se de forma similar à configuração de referência DT-DB da Figura 5.8. A frente de corante ao encontrar o plugue, ao invés de se manter coesa em direção à superfície livre do distribuidor, como constatado na Figura 5.8 ($t=9s$), sofreu espalhamento entre o dique e a barragem. O avanço do corante mostrou-se mais intenso nas regiões próximas às paredes do distribuidor e de cima para baixo. Diferentemente da Figura 5.8, que mostrou a formação de uma região com recirculação entre a saída e a barragem, a injeção de gás inibiu esse fenômeno, sem favorecer o aparecimento de zonas mortas.

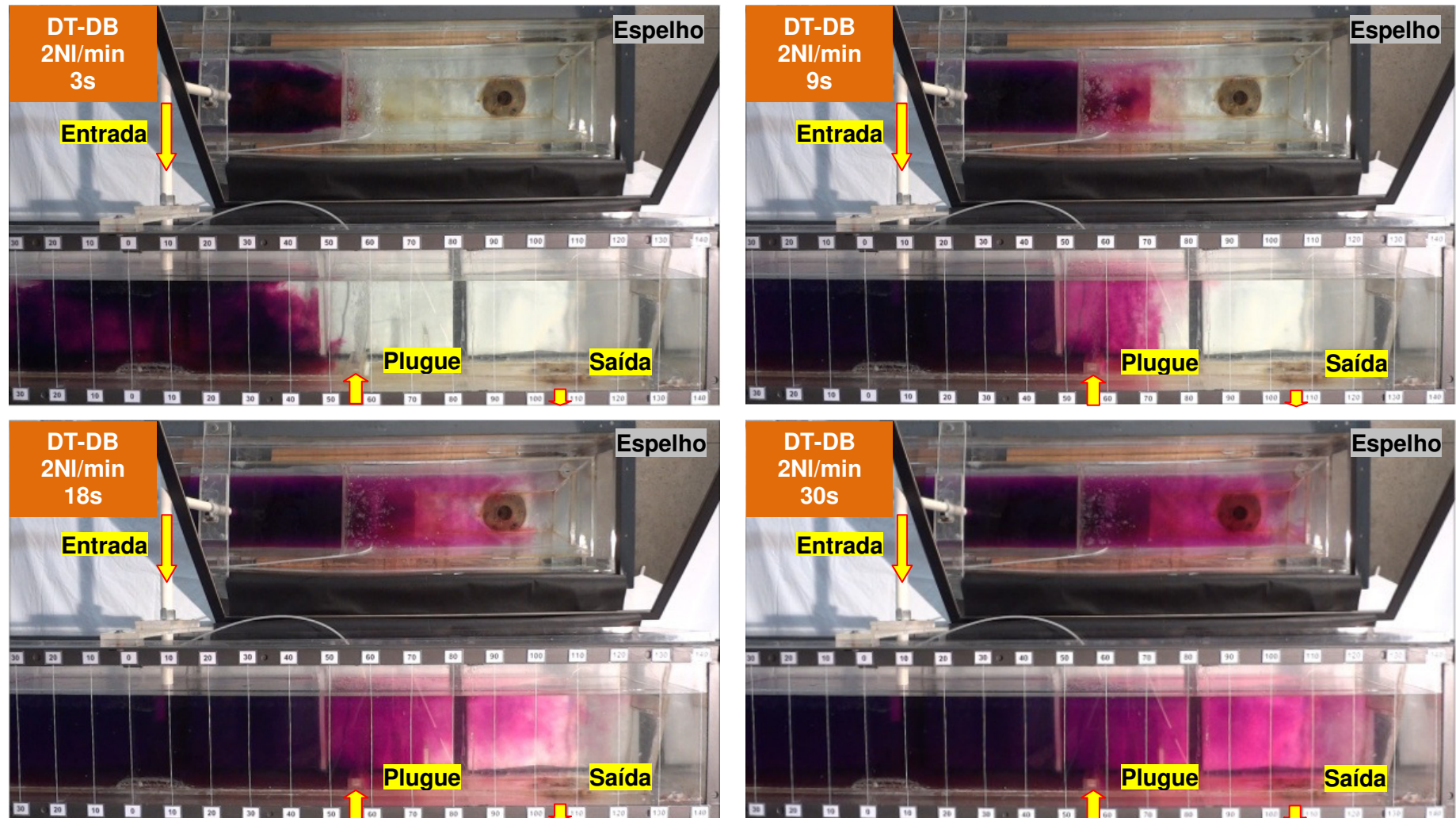


Figura 5.23: Imagem da injeção de corante no distribuidor com diques e barragens, com vazão de plugue de 3NI/min a 56cm de afastamento da válvula longa para os instantes 3, 9, 18 e 30s.

Para verificar o comportamento geral da eficiência de remoção de inclusões do distribuidor com diques e barragens, gerou-se a Figura 5.24, com base nos resultados de eficiência de remoção da Tabela V.10, que apresenta um gráfico de superfície de resposta com linhas de isoeficiências de remoção, pelo processo de interpolação das eficiências obtidas dentro dos intervalos avaliados dos fatores vazão e posição.

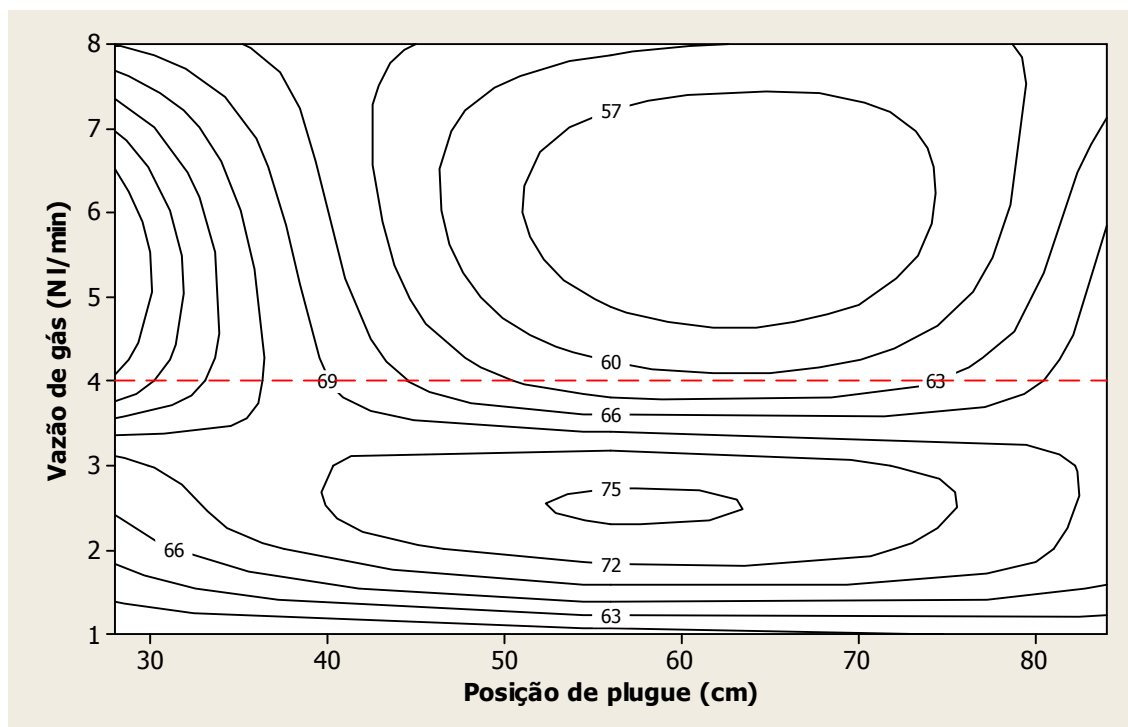


Figura 5.24: Curvas de nível da superfície de resposta para a eficiência de remoção de partículas para distribuidor sem diques e barragens, e com injeção de gás de 1, 2, 3, 4 e 8NI/min para as posições a 28, 56 e 84cm de plugue da válvula longa.

Constata-se pela Figura 5.24 a existência de uma região central onde a eficiência superou 75% de remoção de inclusões, entre as posições de plugue de 52 a 63cm da válvula longa e numa janela de vazão de 2,2 a 2,8NI/min. Pelo aspecto abordado na caracterização qualitativa do fluxo da cortina, a energia e o volume de gás gasto pelo sistema são baixos, o que concorre para a não reversão de inclusões para o banho pelo afloramento do gás na interface metal/escória. Condições essas diferentes para o sistema sem dique e barragens, referente a Figura 5.13, que apresentou uma previsão de rendimento na ordem de 78%, mas para uma vazão de pelo menos 3,6NI/min que apresentou um nível de agitação na superfície livre do distribuidor indesejável pela possibilidade de reoxidação do aço e/ou reversão de inclusões para o banho metálico.

A expansão do domínio pela vazão para 8NI/min induziu o aparecimento de uma segunda região com eficiência similar à anteriormente observada, mas com menor magnitude de eficiência de remoção. Desta forma, trabalhar com vazões da ordem de 2,2 a 2,8NI/min e posição de plugue entre 52 a 63cm é mais efetivo para a remoção de inclusões e manutenção da estabilidade das inclusões na superfície livre do distribuidor.

Para uma avaliação mais detalhada, foi empregada a técnica da análise de variância (ANOVA) para a eficiência de remoção de partículas do sistema em estudo, tendo por base as informações das Tabelas V.5. A Figura 5.25, referente a ANOVA, foi obtida do software Minitab16.

Modelo linear geral para a Eficiência de remoção de partículas vs. Vazão de gás e Posição de plugue, para distribuidor com diques e barragens.

Fator	Tipo	Nível	Valores
Vazão de gás (NI/min)	fixado	5	1; 2; 3; 4; 8
Posição de plugue (cm)	fixado	3	28; 56; 84

Análise de variância para a eficiência de remoção de partículas, usando ajuste SS para os testes

Fonte	GL	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Vazão de gás	4	0,087006	0,087006	0,021751	10,06	0,000
Posição de plugue	2	0,005885	0,005885	0,002942	1,36	0,272
Vazão*Posição	8	0,085294	0,085294	0,010662	4,93	0,001
Erro	30	0,064863	0,064863	0,002162		
Total	44	0,243048				

S = 0,0464984 $R^2 = 73,31\%$ $R^2(\text{adj}) = 60,86\%$

Figura 5.25: Análise de variância para a eficiência de remoção de partículas para as configurações do distribuidor com diques e barragens, e com injeção de gás de 1, 2, 3, 4 e 8NI/min para as posições a 28, 56 e 84cm da válvula longa.

Pela análise da ANOVA exposta na Figura 5.25 conclui-se que o fator vazão, e sua interação com a posição, têm efeito significativo sobre a variável resposta eficiência de remoção, uma vez que os p-valores se apresentaram menores que o nível de significância de 5%, e estão na região de rejeição da hipótese nula de que os efeitos não são significativos. Mesmo o fator posição não tendo efeito significativo na eficiência de remoção, uma vez que sua interação com a vazão é significativa, ele é ainda de alguma forma importante e não pode ser desconsiderado. Na última linha da

ANOVA pode-se verificar o coeficiente de determinação R^2 , que expressa que 73,31% do resultado da eficiência de remoção aqui observado é explicado pelos fatores estudados.

Na Figura 5.26 é apresentada a análise dos efeitos principais para a eficiência de remoção de partículas para o distribuidor com diques e barragens, e com injeção de gás de 1, 2, 3, 4 e 8NI/min, para as posições de plugue a 28, 56 e 84cm de afastamento da válvula longa.

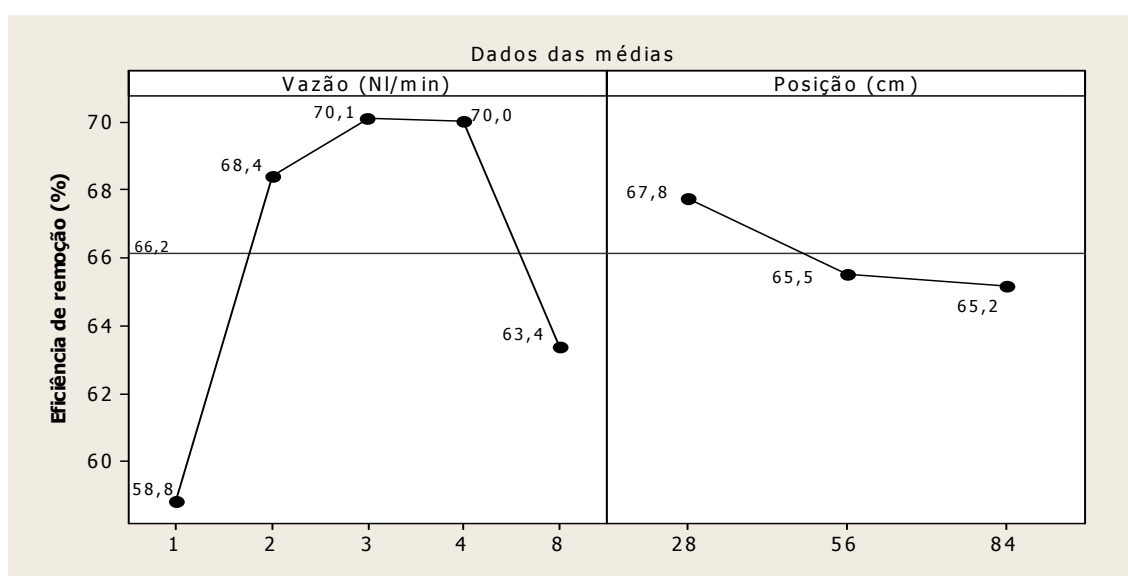


Figura 5.26: Análise dos efeitos principais na eficiência de remoção de partículas para as configurações do distribuidor com diques e barragens, e com injeção de gás de 1, 2, 3, 4 e 8NI/min para as posições a 28, 56 e 84cm da válvula longa.

Na Figura 5.26 são exibidos os efeitos principais dos dois fatores desse sistema em estudo: vazão de gás e posição de plugue. Com relação à vazão, observa-se que a eficiência de remoção teve uma queda com a entrada da vazão 8NI/min, abandonando o seu comportamento de crescimento entre as vazões de 1 a 3NI/min, e de estabilidade entre 3 a 4NI/min. Com relação à posição de plugue, observa-se que ela não influenciou na variável resposta eficiência, como previsto pela análise da ANOVA apresentada na Figura 5.25.

Na Figura 5.27 é evidenciado o comportamento geral das interações entre as vazões e as posições de plugue na eficiência de remoção de inclusões.

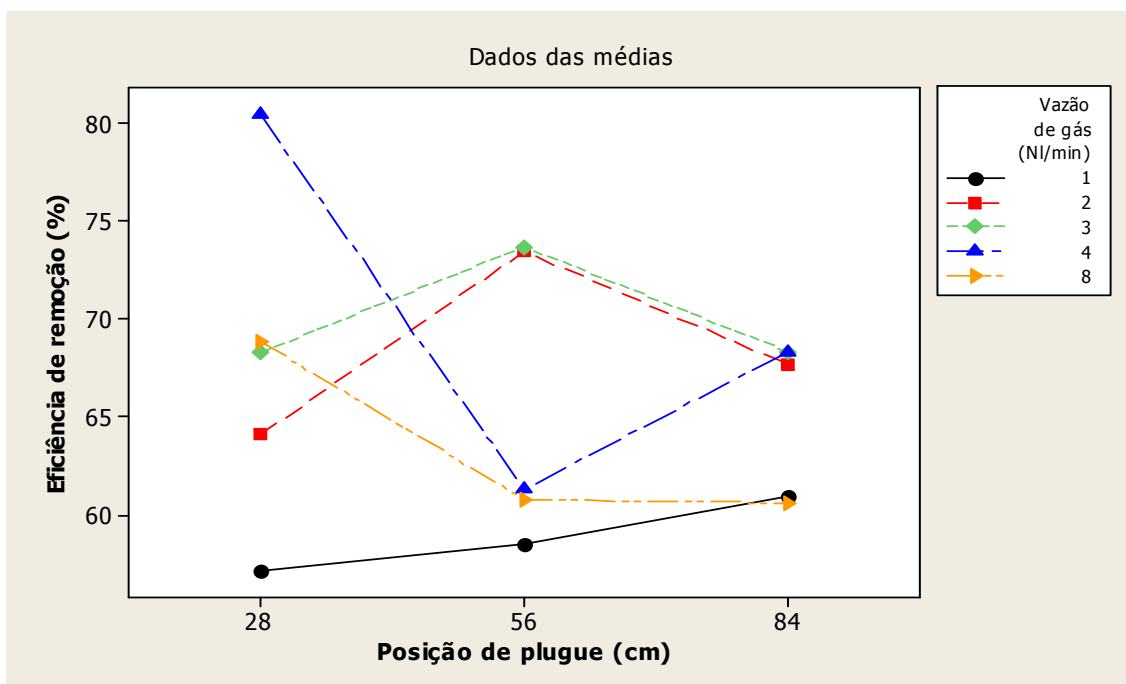


Figura 5.27: Análise das interações entre as vazões de 1, 2, 3, 4 e 8NI/min e as posições de plugue a 28, 56 e 84cm da válvula longa na eficiência de remoção de partículas para o distribuidor com diques e barragens.

Na Figura 5.27 é mostrado que as interações entre posição de plugue e vazão de gás mais relevantes para a eficiência de remoção de partículas foram:

- plugue a 28cm da válvula longa para a vazão de 4NI/min;
- plugue a 56cm da válvula longa para as vazões de 2 e 3NI/min;
- plugue a 84cm da válvula longa para as vazões de 2, 3 e 4NI/min.

As interações com maior destaque foram as para posição de plugue 28 e 56cm, fato esse esperado pela análise da Figura 5.22. As interações relativas à vazão de 1NI/min, indiferente da posição de plugue, mostram-se pouco relevantes para a eficiência de remoção de partículas.

Quanto às interações da posição de plugue pela vazão 8NI/min na Figura 5.27, somente a interação para a posição 28cm apresentou um valor mais representativo. As outras duas interações se mostraram de baixa intensidade e próximas às interações para 1NI/min.

5.2.3.1. Volumes característicos

As curvas de distribuição de tempos de residência foram determinadas apenas para uma condição de referência do distribuidor com diques e barragens, sem e com injeção de gás na posição de plugue 56cm, com quatro repetições. Elas podem ser vistas no Apêndice A.4, Figura A.12. Na Tabela V.6 são mostrados os resultados referentes aos volumes característicos dessa configuração, desenvolvidos a partir da Tabela A.5 do Apêndice A.4.

Tabela V.6: Volumes característicos para distribuidor com dique e barragem, sem e com injeção de gás e plugue na posição 56cm.

Tratamento (n)	Posição (cm)	Vazão (NI/min)	Volumes (%)			Desvio Padrão (%)		
			Pistonado	Morto	Mistura	Pistonado	Morto	Mistura
1	-	0	17,0	13,6	69,4	1,4	2,3	2,4
2	56	1	17,0	11,6	71,5	1,4	3,4	4,5
3	56	2	12,7	13,9	73,5	0,9	0,6	1,4
4	56	3	14,7	13,7	71,6	0,5	3,7	3,8
5	56	4	15,7	12,0	72,3	2,6	3,5	1,4
6	56	8	14,2	12,9	72,9	1,7	2,5	2,4

Partindo dos volumes característicos da Tabela V.6, criou-se as Figuras 5.28; 5.29 e 5.30 que comparam o comportamento de seu respectivo volume característico ao efeito da evolução da vazão de gás, com base na média de cada tratamento e de seu respectivo intervalo de 95% de confiança. A Figura 5.28 apresenta o comportamento do volume pistonado.

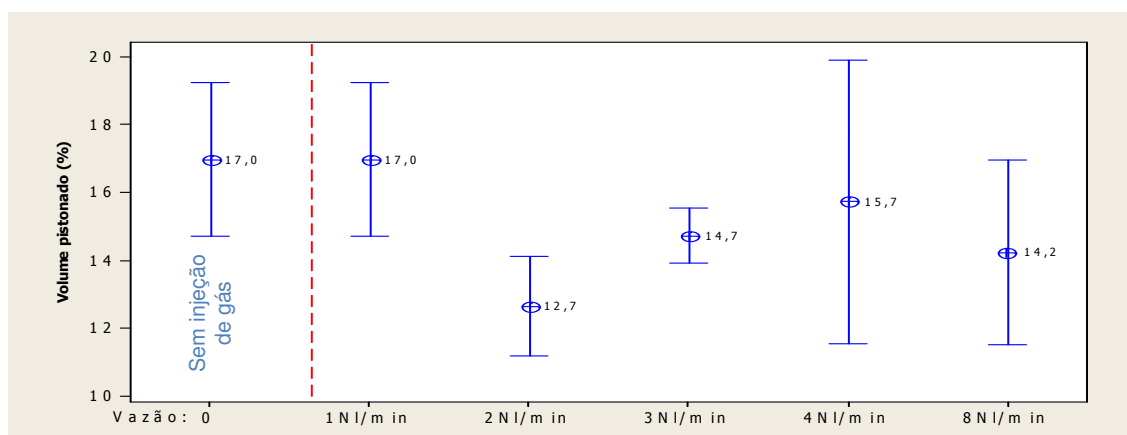


Figura 5.28: Médias e intervalos com 95% de confiança para volumes pistonados, para distribuidor com diques e barragens, sem e com injeção de gás de 1, 2, 3, 4 e 8NI/min para plugue na posição 56cm.

Por essa Figura 5.28 não foi observado aumento no volume pistonado em função da injeção de gás no distribuidor. Somente a vazão 2NI/min apresentou volume pistonado diferente, com 5% de significância, em relação ao distribuidor sem injeção de gás, mas mesmo assim, no sentido de redução na fração do volume pistonado. As frações de volumes pistonados, para as demais vazões, não se mostraram significativamente diferentes, mas com tendência a redução das médias em relação ao distribuidor sem injeção de gás.

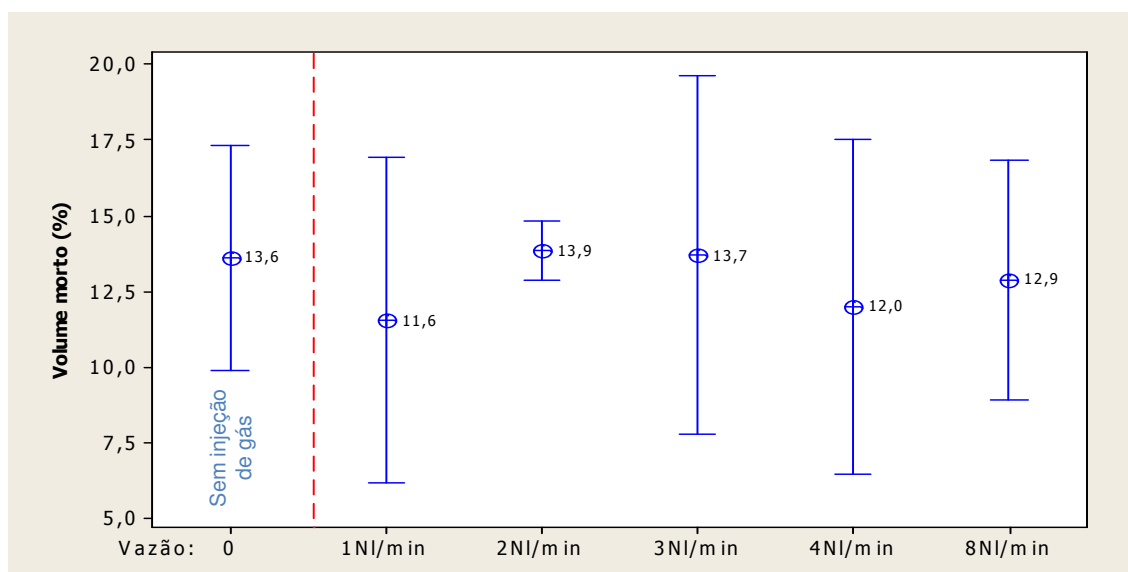


Figura 5.29: Médias e intervalos com 95% de confiança para os volumes mortos, para distribuidor com diques e barragens, sem e com injeção de gás de 1, 2, 3, 4 e 8NI/min para plugue na posição 56cm.

Da Figura 5.29 conclui-se que a injeção de gás não alterou o volume morto do distribuidor, com 5% de significância, indiferente da vazão de gás, em relação a configuração de referência sem injeção de gás.

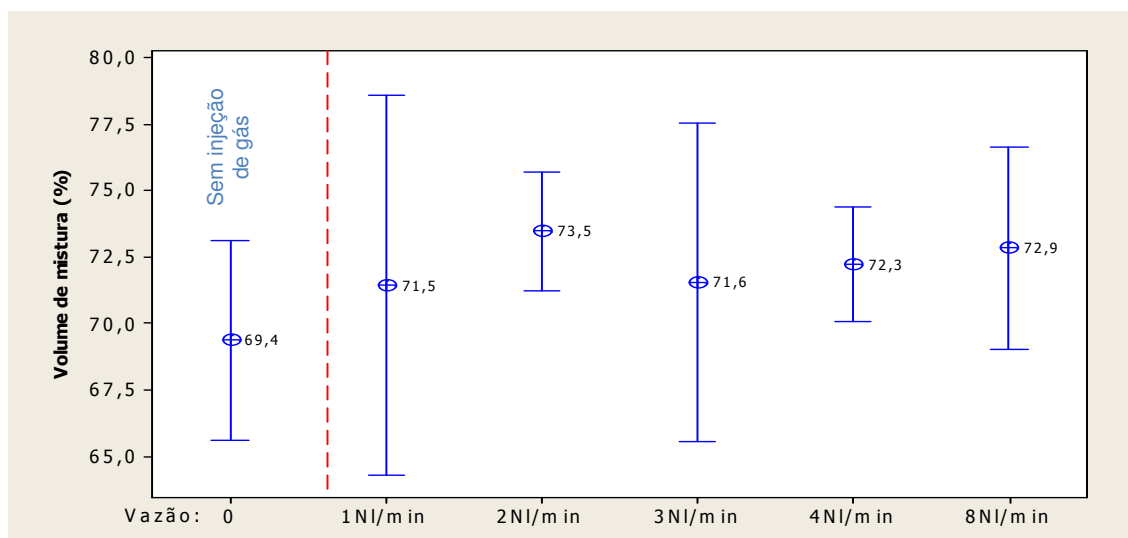


Figura 5.30: Médias e intervalos com 95% de confiança para volumes de mistura, para distribuidor com diques e barragens, sem e com injeção de gás de 1, 2, 3, 4 e 8NI/min para plugue na posição 56cm.

Na Figura 5.30 é indicado que as frações de volumes de mistura para as configurações com injeção de gás não são diferentes, com 5% de significância, em relação a configuração de referência sem injeção de gás.

5.2.3.2. Razão entre volume pistonado e volume morto

Como mencionado no item 5.2.2.2, a razão entre volume pistonado e volume morto (V_p/V_m) é uma indicação para flotação de inclusões, e ela também será explorada neste item. Na Tabela V.7 são sumarizados os dados da razão entre o volume pistonado (V_p) e volume morto (V_m) para a presente configuração em avaliação.

Tabela V.7: Razão entre o volume pistonado (V_p) e o volume morto (V_m) para distribuidor com dique e barragem, com e sem injeção de gás e plugue na posição 56cm.

Tratamento (n)	Posição (cm)	Vazão (NI/min)	Média (%)	DP (%)	CV (%)
1	-	0	1,3	0,3	22
2	56	1	1,5	0,3	19
3	56	2	0,9	0,0	5
4	56	3	1,1	0,4	31
5	56	4	1,4	0,5	36
6	56	8	1,1	0,3	26

A Figura 5.31 foi criada tendo como referência a Tabela V.7, onde é apresentado o efeito da vazão de gás, para a posição de plugue 56cm, nas médias da razão entre volume pistonado e volume morto (V_p/V_m), para cada grupo de ensaios e de seus respectivos intervalos de 95% de confiança.

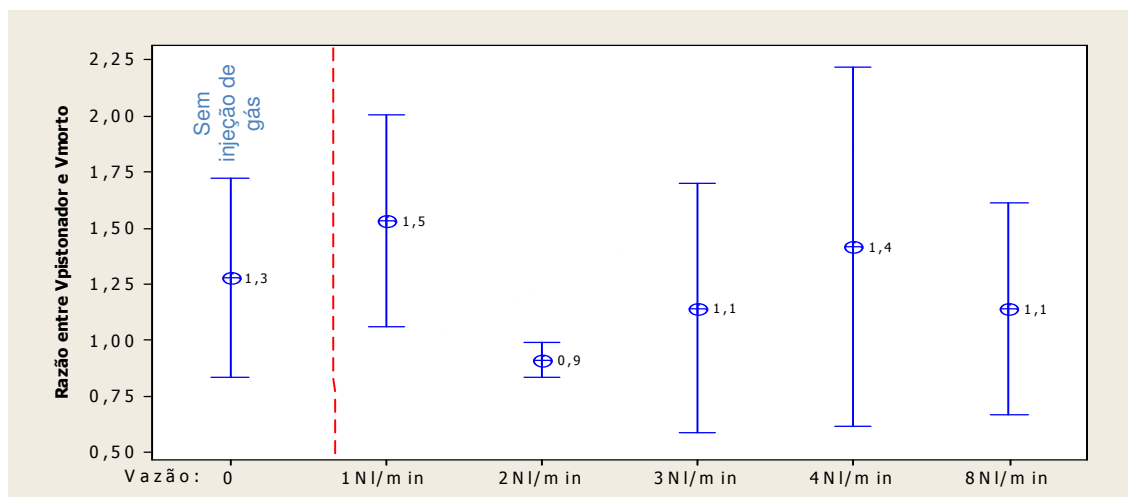


Figura 5.31: Médias e intervalos com 95% de confiança para a razão entre volume pistonado e volume morto (V_p/V_m), para distribuidor com diques e barragens, sem e com injeção de gás de 1, 2, 3, 4 e 8 NI/min para plugue na posição 56cm.

Da Figura 5.31 é possível inferir que as médias para a razão entre volume pistonado e volume morto (V_p/V_m), para as configurações com injeção de gás não são diferentes, com 5% de significância, em relação a configuração de referência sem injeção de gás. Assim sendo, não é possível afirmar que a injeção de gás alterou esta relação. A seguir será confrontada essa razão e o respectivo resultado de flotação de inclusões da APS III, da Tabela V.5, tratamentos de 7 a 11. Dessa relação de dados, foi construída a Figura 5.32.

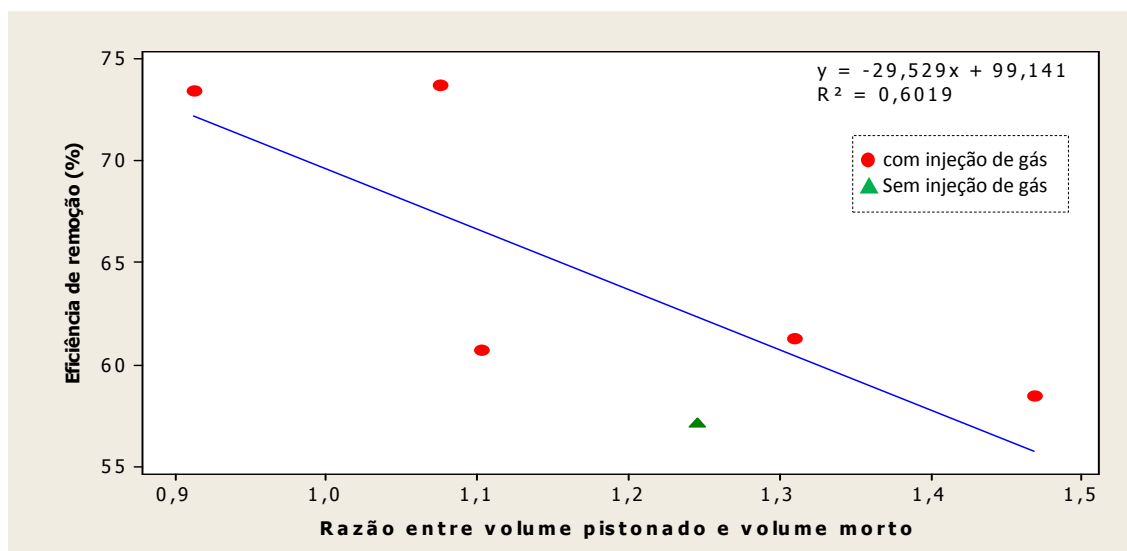


Figura 5.32: Correlação entre a eficiência de remoção de partículas e a razão entre volume pistonado e volume morto (V_p/V_m) para as vazões de 0, 1, 2, 3, 4 e 8NI/min e posição de plugue a 56cm da válvula longa do distribuidor com diques e barragens.

Na Figura 5.32 é exposto o mesmo comportamento visto na Figura 5.21, reforçando a constatação de que apenas a análise pura dos volumes característicos desse reator não é suficiente para indicar a melhor configuração interna objetivando a máxima eficiência de remoção de inclusões.

5.2.4. Efeito do uso de barreiras laterais no distribuidor sobre a eficiência de remoção de inclusões por injeção de gás

Com base na argumentação feita sobre a Figura 5.3, existe uma região cega na cortina de gás onde não há presença de bolhas. Durante a injeção de corante, verificou-se que uma porção do pulso de corante avançava preferencialmente, e de forma mais adiantada, por essa região, como constatado na Figura 5.23.

Tendo em vista esses fatos, com o uso de barreiras laterais sólidas (moldura) objetivou-se garantir que o fluxo de fluido, originalmente lateral à parede do modelo físico, fosse desviado e redirecionado à cortina, eliminando o ponto cego da cortina. Desta forma, buscou-se avaliar se a eficiência da remoção de partículas seria aumentada ao ser garantida tal configuração interna do distribuidor.

Na Tabela V.8 são mostrados os valores da eficiência de remoção para cada grupo de ensaios, cada um com a sua respectiva média, desvio padrão (DP) e coeficiente de variação (CV). Os dados sem uso de moldura (status: não) são originais da Tabela V.5, referentes aos tratamentos de número de 7 a 10.

Tabela V.8: Eficiência de remoção de partículas para o distribuidor com diques e barragens, e injeção de gás de 1, 2, 3 e 4NI/min, para a posição a 56cm da válvula longa, sem e com moldura.

Tratamento (n)	Uso de moldura	Vazão (NI/min)	Média (%)	DP (%)	CV (%)
1	Não	1	58,5	1,9	3,3
2	Não	2	73,5	3,8	5,2
3	Não	3	73,7	1,7	2,3
4	Não	4	61,3	2,9	4,7
5	SIM	1	59,0	2,7	4,6
6	SIM	2	73,2	1,4	1,8
7	SIM	3	71,7	1,4	1,9
8	SIM	4	64,4	2,7	4,2

A Figura 5.33 foi desenvolvida a partir da Tabela V.8 para comparar a eficiência de remoção de inclusões entre os ensaios sem e com uso de moldura, a partir da média de cada grupo de ensaios com injeção de gás e de seu respectivo intervalo de 95% de confiança.

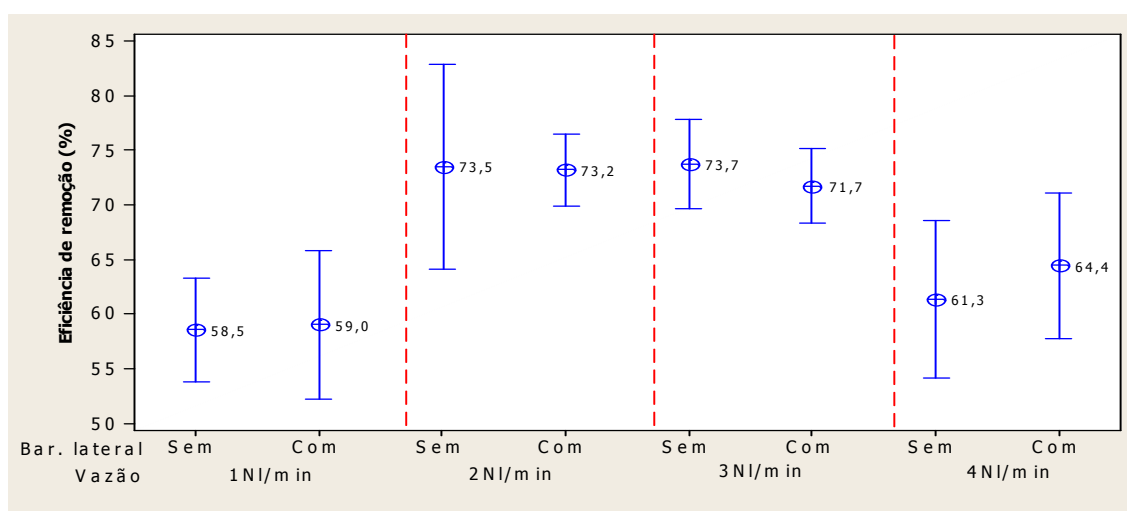


Figura 5.33: Comparação da eficiência de remoção de inclusões entre os ensaios sem e com uso de moldura, para o distribuidor com diques e barragens, vazões de 1, 2, 3 e 4NI/min e posição de plugue a 56cm da válvula longa.

Com base nos resultados da comparação de eficiência de remoção de inclusões na Figura 5.33, não é possível afirmar que as médias de cada grupo de vazão são diferentes entre a configuração sem e com barreiras laterais, assumindo um nível de significância de 5%. Desta forma, trabalhar a lateral interna do distribuidor industrial na região de montagem do plugue para eliminar o ponto cego da cortina de gás próximo à parede se torna dispensável para a configuração do distribuidor estudada. Entende-se que as baixas velocidades de escoamento próximas à parede, e o baixo volume deslocado entre a parede e a cortina não são suficientes para reduzir significativamente o efeito de remoção de inclusões imposto pela cortina. Contudo MORALES *et al.* (2003) observou ganho pela aplicação dessa técnica, tendo em vista a inibição da contração lateral da cortina de gás imposta pelas barreiras laterais em seu modelo e a ocupação da cortina em toda a seção reta, o que aumentou a eficiência de remoção de inclusões.

5.2.5. Efeito da obstrução parcial simétrica e assimétrica no plugue sobre a eficiência de remoção no distribuidor com diques e barragens

Após ajustada a posição de plugue e a vazão de gás para a maior eficiência de remoção de inclusões do distribuidor, em particular para a vazão de gás, não é necessariamente garantido que a eficiência de remoção deste reator responderá dentro do previsto em função de uma possível e indesejável falha de fabricação do plugue, ou desvio de desempenho em funcionamento. Exemplo disso é a possibilidade do aparecimento de uma fenda entre o elemento poroso e a sua estrutura de encapsulamento, e/ou a presença de trincas no elemento poroso, como discutido no item 5.1.2, e/ou até mesmo, funcionamento parcial gerando uma cortina com zonas sem ação de gás (pontos cegos). Essas características especiais para o plugue têm potencial para comprometer o desempenho dele, gerando incerteza sobre a efetividade da injeção de gás sobre a eficiência de remoção de inclusões. Desta forma, é pertinente avaliar o desempenho da cortina de gás indiretamente pela agitação da superfície da escória durante a vida do distribuidor, corrida a corrida, e correlacionar com resultado de qualidade do produto. Uma técnica de campo empregada para avaliar a integridade do plugue poroso é aumentar pontualmente a vazão de gás, imediatamente após a troca de panela, e verificar a forma e extensão da perturbação gerada na superfície do banho.

Esse item busca avaliar essa possibilidade de desvio para sinalizar a importância da manutenção da repetitividade da qualidade da cortina do plugue, ao longo da série de lingotamento durante toda a vida do distribuidor, para que o resultado de qualidade em produto seja estável e o investimento nesta tecnologia justificado.

Na Tabela V.9 são apresentados os valores da eficiência de remoção para cada grupo de ensaios, cada um com a sua respectiva média, desvio padrão (DP) e coeficiente de variação (CV). A configuração avaliada teve o plugue posicionado a 28cm da válvula longa e operou com vazão de 4NI/min. Os dados dos tratamentos de números 1 e 2, dessa Tabela V.9, são valores originados dos tratamentos de números 1 e 5, respectivamente, da Tabela V.5, e serão as referências de eficiência para o modelo sem injeção de gás e com cortina de gás bem formada. Com relação à nomenclatura, tem-se:

- DT-DB: Sem injeção de gás, referência sem uso de cortina de gás;
- REF.: Plugue com cortina bem formada, referência de desempenho aceitável;
- Sim. 20%: Plugue com obstrução parcial de 20%, região central e simétrica;
- Sim. 40%: Plugue com obstrução parcial de 40%, região central e simétrica;
- Sim. 60%: Plugue com obstrução parcial de 60%, região central e simétrica;
- Assim. 25%: Plugue com obstrução parcial lateral de 25%, assimétrica em relação a parede do distribuidor;
- Assim. 50%: Plugue com obstrução parcial lateral de 50%, assimétrica em relação a parede do distribuidor.

Tabela V.9: Eficiência de remoção de partículas para o distribuidor com diques e barragens, injeção de gás de 4NI/min para a posição a 28cm da válvula longa.

Tratamento (n)	Nome	Média (%)	DP (%)	CV (%)
1	DT-DB	57,1	3,0	5,3
2	REF.	80,5	3,3	4,2
3	Sim. 20%	72,7	2,8	3,8
4	Sim. 40%	70,2	2,6	3,7
5	Sim. 60%	63,8	1,1	1,6
6	Assim. 25%	67,1	4,0	6,0
7	Assim. 50%	60,3	9,0	15,0

A Figura 5.34 foi desenvolvida, a partir da Tabela V.9, para comparar a eficiência de remoção de inclusões entre os ensaios com obstrução parcial de plugue, a partir da média de cada grupo de ensaios com injeção de gás e de seu respectivo intervalo de 95% de confiança.

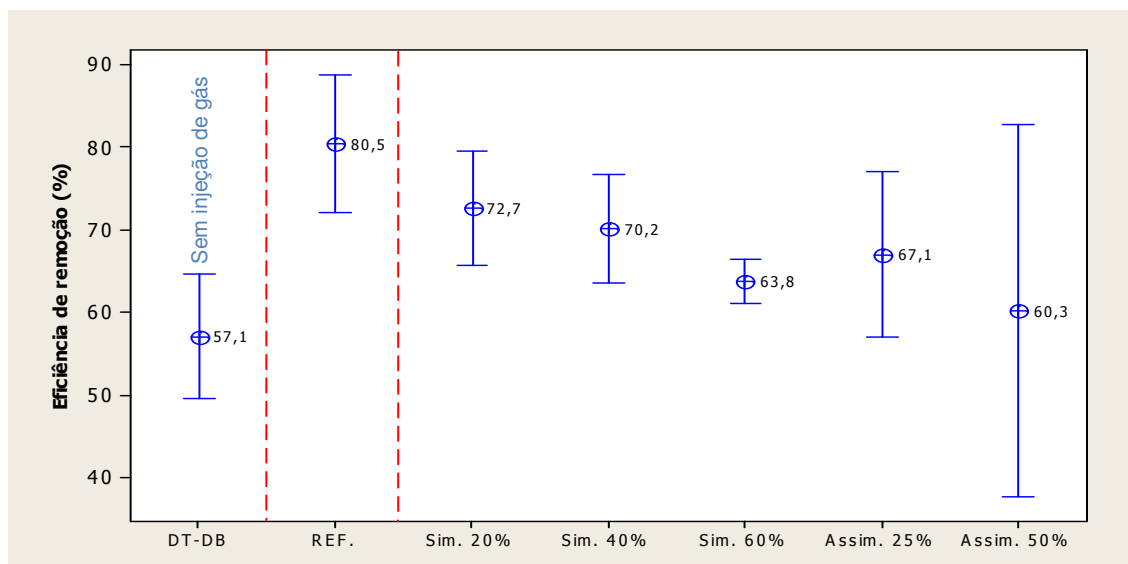


Figura 5.34: Avaliação da eficiência de remoção de inclusões para plugue com obstrução simétrica de 20%, 40% e 60%, e assimétrica de 25% e 50%, para o distribuidor com diques e barragens, vazão de 4NI/min e posição de plugue a 28cm da válvula longa.

Da Figura 5.34, conclui-se que a configuração de plugue com obstrução parcial de 20%, central e simétrica foi a única que apresentou desempenho mínimo aceitável em relação a configuração sem injeção de gás DT-DB com significância de 5%, e que somente a configuração de plugue com obstrução parcial de 60%, central e simétrica mostrou-se diferente da configuração com injeção de gás referência (REF.), também com significância de 5%. Com uma leitura geral da Figura 5.34, é pertinente inferir que, para o defeito controlado inserido em cada plugue, e indiferente da forma da obstrução do plugue, à medida que a área do defeito aumenta, a média da eficiência de remoção reduz. Também é possível verificar pela tendência das médias e do aumento da variabilidade da eficiência de remoção, que o efeito causado pela obstrução assimétrica de plugue é mais prejudicial para a eficiência de remoção, devido à redução da robustez do processo. Nessa condição em particular, é possível até se ter um desempenho na eficiência de remoção de inclusões inferior em relação ao sistema de injeção de gás.

5.3. Avaliação do Efeito da Injeção de Gás na Granulometria das Partículas

Neste item são apresentados os resultados das distribuições granulométricas das partículas detectadas na saída do distribuidor e que vão para o molde.

5.3.1. Granulometria das partículas dos ensaios com distribuidor sem modificadores de fluxo.

Na Tabela V.10 são exibidos os resultados médios, dos ensaios em triplicata, da distribuição granulométrica de partículas para as configurações de testes: *off-line*, distribuidor sem modificadores de fluxo (DT-SMF) sem e com injeção de gás.

Tabela V.10: Distribuição granulométrica média do retido simples para o ensaio *off-line* e do distribuidor sem diques e barragens, sem e com injeção de gás de 1, 2, 3 e 4NI/min, posições de plugue a 28, 56 e 84cm da válvula longa.

Trat.	Configuração		Retido médio por faixa, em μm , da distribuição granulométrica (%)										
	Posição (cm)	Vazão (NI/min)	25,0 a 30,0	30,1 a 35,0	35,1 a 40,0	40,1 a 50,0	50,1 a 60,0	60,1 a 70,0	70,1 a 80,0	80,1 a 100,0	100,1 a 120,0	120,1 a 140,0	>140,0
1	Off-line	Zero	16,6	30,2	17,6	7,6	5,3	6,3	4,3	5,6	1,7	1,7	3,0
2	DT-SMF	Zero	24,7	40,9	15,2	8,1	4,0	4,0	1,5	1,0	0,5	0,0	0,0
3*	28	1	21,9	38,1	15,9	7,9	4,6	5,0	2,6	3,0	0,7	0,0	0,3
4*	28	2	18,3	36,9	16,3	9,3	5,6	6,0	2,7	2,7	1,0	1,0	0,3
5*	28	3	27,5	38,9	13,1	6,0	4,4	5,0	2,0	2,0	0,7	0,3	0,0
6	28	4	23,6	36,5	16,3	8,3	4,0	5,0	2,0	2,7	1,3	0,0	0,3
7	56	1	27,5	41,4	12,9	7,6	3,0	3,3	1,3	1,7	0,3	0,7	0,3
8	56	2	21,8	41,6	15,8	7,6	4,6	4,0	1,7	1,7	0,7	0,3	0,3
9	56	3	24,6	36,5	16,3	7,6	6,0	4,0	2,0	2,0	1,0	0,0	0,0
10	56	4	24,2	40,3	16,1	7,0	4,4	3,7	1,3	1,0	1,0	0,7	0,3
11*	84	1	22,2	42,1	16,2	7,7	4,0	3,7	2,0	1,7	0,3	0,0	0,0
12	84	2	21,5	40,9	16,8	8,1	4,0	4,0	2,3	1,3	0,7	0,3	0,0
13	84	3	21,5	41,9	15,8	6,4	3,7	3,4	1,7	2,7	1,3	1,3	0,3
14	84	4	20,0	42,0	15,7	8,3	3,7	4,3	2,3	2,0	0,7	0,7	0,3

Com base nos dados da Tabela V.10 criou-se a Figura 5.35, onde é apresentado graficamente o comportamento da distribuição granulométrica por faixas de material retido. Optou-se por representar apenas as distribuições que se mostram significativamente diferentes em termos de eficiência de remoção, em comparação com a respectiva configuração interna de distribuidor, mas sem injeção de gás DT-SMF, apresentada no item 5.2.2. Os ensaios desconsiderados estão destacados na Tabela V.10 com um asterisco no número do tratamento.

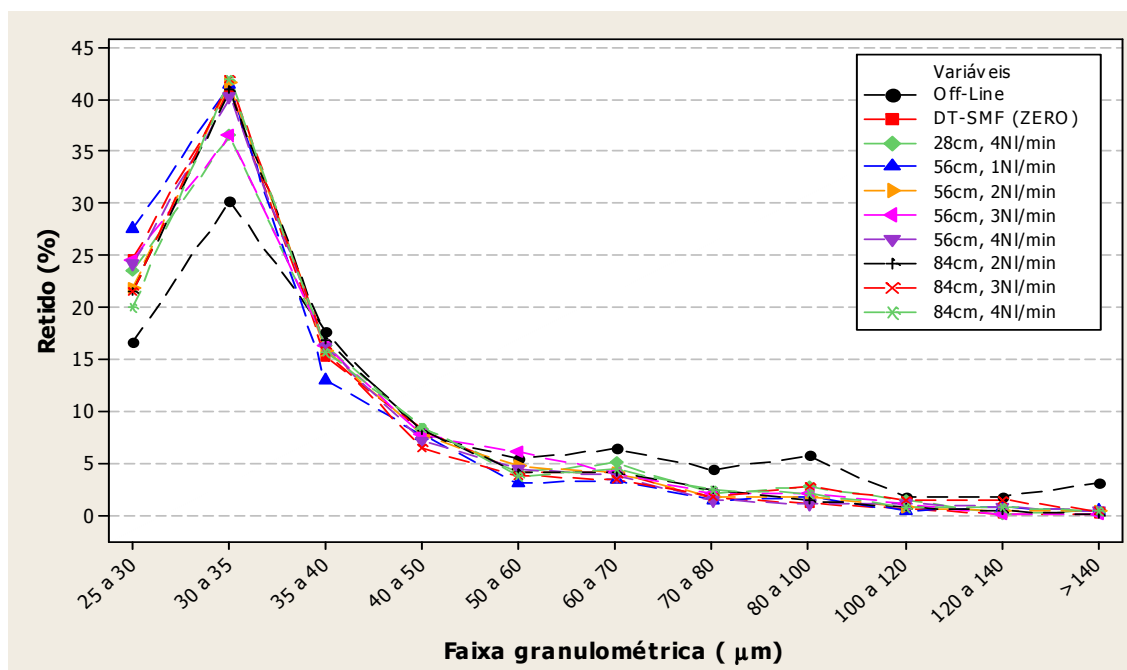


Figura 5.35: Comportamento da distribuição granulométrica para o ensaio *off-line* e do distribuidor sem diques e barragens, sem e com injeção de gás de 1, 2, 3 e 4NI/min para as posições a 28, 56 e 84cm da válvula longa.

Pela presente Figura 5.35 observa-se que a granulometria de entrada no sistema (*off-line*) possui frações mais representativas para as faixas de 50 a 100µm, em relação as demais configurações, mesmo para a configuração sem injeção de gás DT-SMF.

A distribuição granulométrica do ensaio sem injeção de gás DT-SMF se confunde com as distribuições com injeção de gás, independente da vazão e da posição de plugue. Esse resultado mostra que a distribuição granulométrica dos sistemas sem e com injeção de gás se assemelham, alterando somente o volume de partículas removidas entre os sistemas. Fisicamente, o próprio distribuidor induz a flotação natural das partículas com tamanho maior que 60µm.

Tabela V.11: Distribuição granulométrica do retido acumulado para o ensaio *off-line* e do distribuidor sem diques e barragens, sem e com injeção de gás de 1, 2, 3 e 4NI/min, posições de plugue a 28, 56 e 84cm da válvula longa.

Trat.	Configuração		Retido acumulado, em μm , da distribuição granulométrica (%)										
	Posição (cm)	Vazão (NI/min)	≤ 30	≤ 35	≤ 40	≤ 50	≤ 60	≤ 70	≤ 80	≤ 100	≤ 120	≤ 140	>140
1	Off-line	Zero	16,6	46,8	64,5	72,1	77,4	83,7	88,0	93,7	95,3	97,0	100,0
2	DT-SMF	Zero	24,7	65,7	80,8	88,9	92,9	97,0	98,5	99,5	100,0	100,0	100,0
3	28	1*	21,9	59,9	75,8	83,8	88,4	93,4	96,0	99,0	99,7	99,7	100,0
4	28	2*	18,3	55,1	71,4	80,7	86,4	92,4	95,0	97,7	98,7	99,7	100,0
5	28	3*	27,5	66,4	79,5	85,6	89,9	95,0	97,0	99,0	99,7	100,0	100,0
6	28	4	23,6	60,1	76,4	84,7	88,7	93,7	95,7	98,3	99,7	99,7	100,0
7	56	1	27,5	68,9	81,8	89,4	92,4	95,7	97,0	98,7	99,0	99,7	100,0
8	56	2	21,8	63,4	79,2	86,8	91,4	95,4	97,0	98,7	99,3	99,7	100,0
9	56	3	24,6	61,1	77,4	85,0	91,0	95,0	97,0	99,0	100,0	100,0	100,0
10	56	4	24,2	64,4	80,5	87,6	91,9	95,6	97,0	98,0	99,0	99,7	100,0
11	84	1*	22,2	64,3	80,4	88,2	92,2	95,9	97,9	99,6	100,0	100,0	100,0
12	84	2	21,5	62,4	79,2	87,2	91,3	95,3	97,7	99,0	99,7	100,0	100,0
13	84	3	21,5	63,4	79,2	85,6	89,3	92,6	94,3	97,0	98,3	99,7	100,0
14	84	4	20,0	62,0	77,7	86,0	89,7	94,0	96,3	98,3	99,0	99,7	100,0

A Figura 5.36 foi desenvolvida a partir dos dados das distribuições granulométricas do percentual retido acumulado da Tabela V.11, seguindo a mesma metodologia de inclusão de dados da Figura 5.35.

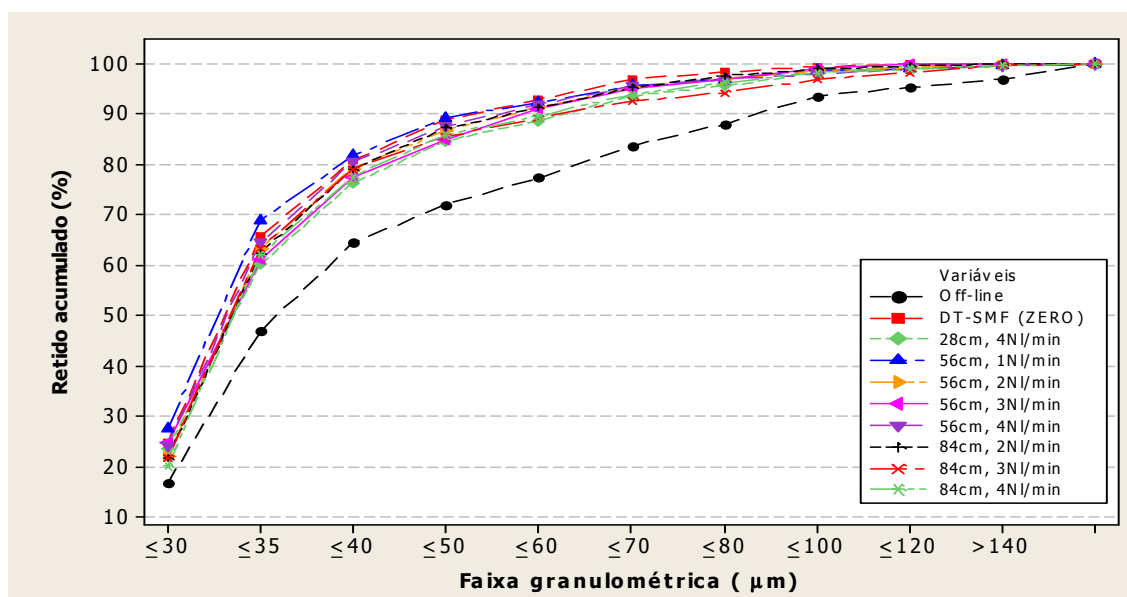


Figura 5.36: Comportamento da distribuição granulométrica do retido acumulado para o ensaio *off-line* e do distribuidor sem diques e barragens, sem e com injeção de gás de 1, 2, 3 e 4NI/min, para as posições de plugue a 28, 56 e 84cm da válvula longa.

Mesmo para a Figura 5.36 não é possível discernir uma configuração mais relevante para a granulometria, ficando todas muito próximas à sua configuração de referência sem injeção de gás, mas efetivamente diferente em relação a entrada de partículas no sistema. Por se tratar de configurações com injeção de gás que mostraram efetivamente desempenho na remoção de partículas, esperava-se que o corte do tamanho final da partícula acontecesse para um tamanho de partícula menor, o que não foi constatado. Apenas a magnitude da remoção de partículas mostrou-se sensível ao método aplicado.

Essa mesma análise para a distribuição granulométrica não foi replicada para o distribuidor com barragens e diques, sem e com injeção de gás por apresentarem o mesmo comportamento geral observado nesse tópico. Contudo, vale a pena investigar se a distribuição efetivamente mudaria a região de corte se existisse uma escória, simulada por óleo de parafina por exemplo, para fixar as inclusões.

5.3.2. Velocidade terminal e tempo para flotação natural de partículas

Neste item é feita uma análise sobre a velocidade terminal e o tempo natural para flotação das partículas com dimensões baseadas nos limites das faixas granulométricas do modelo físico, Tabela V.10, e de suas relações com as velocidades no distribuidor industrial. Na Tabela V.12 são apresentados esses valores e os números adimensionais de Guthrie (G_u) e o coeficiente de remoção de inclusões (r_m).

Tabela V.12: Velocidades terminais e tempos para flotação natural para a faixa granulométrica de partículas da APS III.

Modelo físico					Protótipo industrial		
Tamanho (μm)	V_t mod. (m/s)	t mod. (s)	G_u	r_m	Tamanho (μm)	V_t prot. (m/s)	t prot. (s)
25,0	2,53E-04	1092,3	0,183	0,168	35,3	4,38E-04	1891,8
30,0	3,64E-04	758,5	0,264	0,232	42,4	6,31E-04	1313,8
35,0	4,96E-04	557,3	0,360	0,302	49,4	8,58E-04	965,2
40,0	6,47E-04	426,7	0,470	0,375	56,5	1,12E-03	739,0
50,0	1,01E-03	273,1	0,734	0,520	70,6	1,75E-03	473,0
60,0	1,46E-03	189,6	1,057	0,652	84,7	2,52E-03	328,4
70,0	1,98E-03	139,3	1,438	0,763	98,8	3,43E-03	241,3
80,0	2,59E-03	106,7	1,879	0,847	112,9	4,48E-03	184,8
100,0	4,05E-03	68,3	2,936	0,947	141,2	7,01E-03	118,2
120,0	5,83E-03	47,4	4,227	0,985	169,4	1,01E-02	82,1
140,0	7,93E-03	34,8	5,754	0,997	197,7	1,37E-02	60,3

Na Figura 5.37 é exibido o comportamento da velocidade terminal e do tempo para flotação natural das partículas em função do tamanho das partículas usadas no modelo físico.

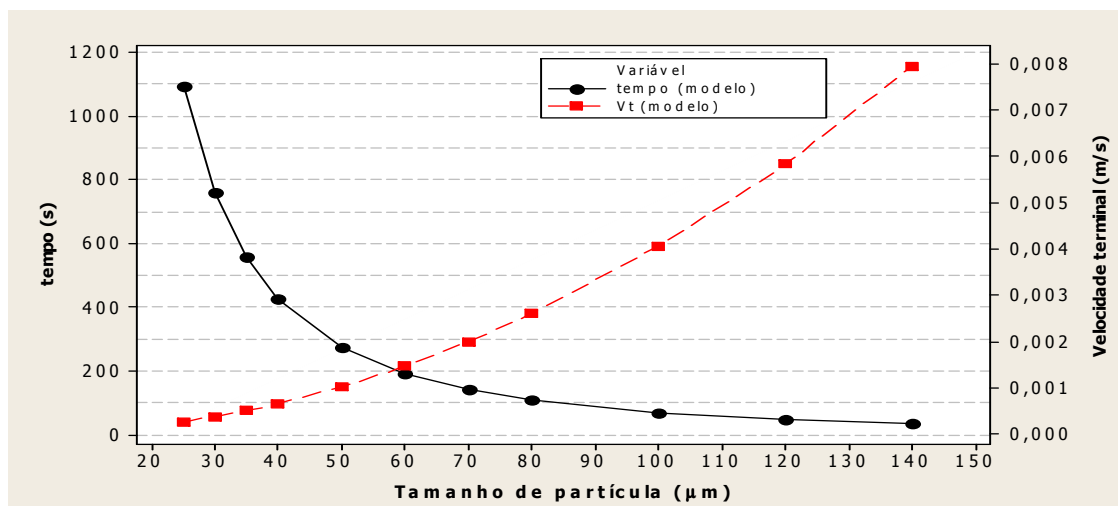


Figura 5.37: Comportamento da velocidade terminal e do tempo natural para flotação de partículas de dimensões de 20 a 140μm no modelo físico.

Na Figura 5.37 é mostrado que partículas pequenas necessitam de muito tempo para serem removidas naturalmente do fluido como, por exemplo, partículas de 25μm de diâmetro que gastam mais de 4 tempos de residência teóricos. Por outro lado, partículas maiores, como as de 80μm, ou maiores, gastam menos de 1 tempo de residência teórico ($\bar{t} = 200,4s$) para flotar.

Relacionando os valores do retido por faixa granulométrica apresentados na Figura 5.35, é possível inferir que partículas menores estão em maior proporção do que as partículas maiores, isso em função de sua baixa velocidade terminal, o que não favorece o processo de flotação. Partículas maiores podem existir, contudo, em menor proporção, uma vez que a energia de fluxo turbulenta, relacionada ao volume de mistura, pode reposicionar aleatoriamente uma partícula grande próxima à superfície para a parte inferior do distribuidor, e ela por sua vez ser enviada ao molde. Outra possibilidade é o fenômeno de agregação ocorrer próximo a saída do molde e essa nova partícula ser também capturada e enviada ao molde.

Na Figura 5.38 é apresentado o comportamento do coeficiente de remoção de inclusões (r_m) avaliado para o modelo físico em análise.

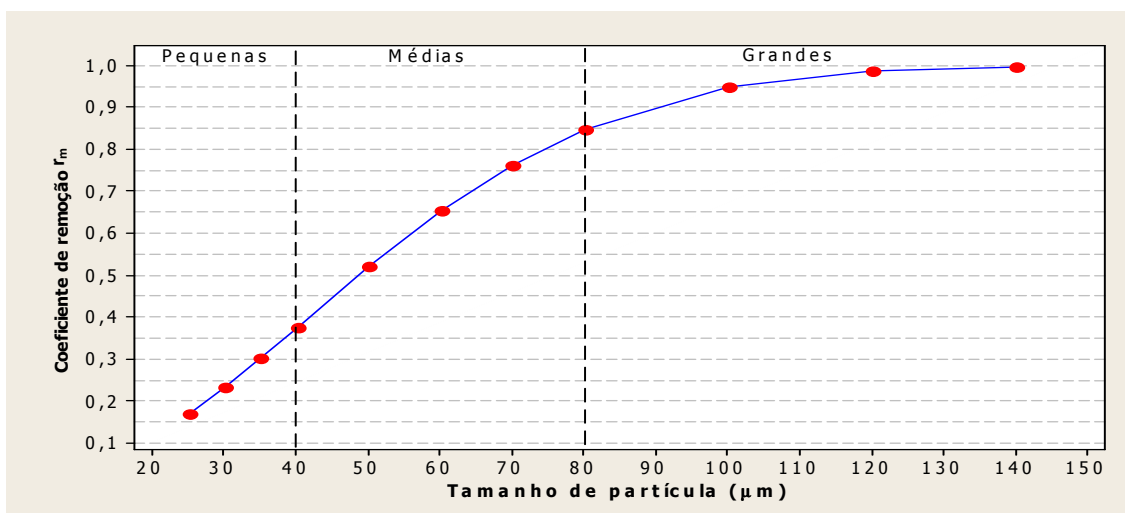


Figura 5.38: Coeficiente de remoção de inclusões (r_m) para flotação natural das partículas de dimensões entre 20 a 140 μ m no modelo físico.

Da Figura 5.38 observa-se três regiões distintas, região linear para partículas menores, região intermediária para partículas médias e um região com o coeficiente tendendo assintoticamente à unidade para partículas grandes. Os limites dessas regiões foram definidos arbitrariamente com base no seguinte critério: partículas pequenas foram aquelas que gastam mais de dois tempos de residência teóricos para flotação; partículas médias foram aquelas que necessitam de um a dois tempos de residência teóricos para flotação, e por último, as partículas que necessitaram de menos de um tempo de residência teórico foram classificadas com maiores. Contudo reforça-se que esse entendimento está fundamentado na maior ou menor facilidade de flotação natural de inclusões, mas para uma análise crítica final, o critério mais adequado para avaliar se a dimensão de uma partícula é relevante, será o quanto ela afeta a propriedade mecânica do produto.

5.4. Determinação da Configuração mais Eficiente para Remoção de Inclusões

Por todos os itens abordados neste estudo, indica-se a configuração do distribuidor com diques e barragens, com plugue posicionado a 56cm de afastamento da válvula longa e operando com uma vazão entre 2 a 3NI/min, para o melhor de rendimento de remoção de inclusões. Essas condições podem ser verificadas na Figura 5.24 e têm destaque por apresentarem o menor nível de perturbação na interface metal/escória, pelo afloramento do gás na superfície do banho, conduzindo a uma eficiência de remoção de partículas de 75% ou superior.

6. CONCLUSÃO

Pelo presente trabalho é possível concluir que:

- O uso de modificadores de fluxo do tipo diques e barragens conferiu um ganho de 100%, com base nas médias, na eficiência de remoção de inclusões em relação ao distribuidor sem esses recursos;
- O uso de injeção de gás no fundo do distribuidor também apresentou ganho significativo na eficiência de remoção de inclusões em relação ao distribuidor sem injeção de gás. O distribuidor sem modificadores de fluxo aumentou a sua eficiência de remoção de 152,5%, e o distribuidor com diques e barragens a elevou em 31,4%, todos em relação à média de sua respectiva configuração sem injeção de gás;
- A melhor combinação entre perturbação no afloramento do gás aceitável e a maior eficiência de remoção de inclusões (75pp) foi para a configuração do distribuidor com diques e barragens, com plugue posicionado a 56cm de afastamento da válvula longa e operando com uma vazão entre 2 a 3NI/min;
- A análise pura dos volumes característicos do distribuidor não é adequada para indicar a melhor configuração interna objetivando a máxima eficiência de remoção de inclusões;
- O uso de barragens laterais, para redirecionar o fluxo para a cortina gasosa, não favoreceu a eficiência de remoção de inclusões;
- Qualitativamente, observa-se que um incremento de vazão aumenta a frequência de formação de bolhas no plugue, e por consequência, reduz os pontos cegos na cortina de gás, mas aumenta o nível de agitação do banho em detrimento da maior frequência de afloramento de gás na interface metal/escória;

- O plugue deve apresentar regularidade na formação e tamanho médio das bolhas ao longo de sua superfície, para controlar a intensidade da perturbação gerada no afloramento dessas bolhas na interface metal/escória;
- Para o distribuidor sem ou com diques e barragens, a injeção de gás inverte o campo de velocidades do escoamento original, onde antes do plugue sua maior velocidade é na base do distribuidor e após ele, passa para a superfície livre;
- Defeitos na estrutura do plugue mudam a configuração da cortina e seu desempenho na eficiência de remoção de inclusões, mesmo para a posição e vazão ótimas do sistema.

7. RECOMENDAÇÃO DE TRABALHOS FUTUROS

Para dar continuidade aos estudos desenvolvidos neste trabalho, sugere-se:

- Avaliar o efeito do tamanho de bolha na eficiência de remoção de inclusões pelo desenvolvimento de plugues com um nível de porosidade controlada pela aplicação de material com faixa granulométrica estreita, isso para controle do tamanho médio de bolha;
- Avaliar o efeito da injeção de gás no distribuidor com inibidor de turbulência para as configurações de plugue aqui estudadas;
- Avaliar o efeito da camada de escória (simulada por óleo de parafina, por exemplo) na eficiência de remoção de inclusões das configurações desse estudo;
- Investigar os efeitos: vazão de borbulhamento, posição de plugue e dimensão do elemento poroso, sobre a eficiência de remoção para várias velocidades de lingotamento em regime de volume constante do distribuidor;
- Desenvolver o modelamento matemático para a captura e remoção de inclusões não metálicas na região do borbulhamento, detalhando o estudo por vazão de gás, tamanho de bolhas e dimensão de plugue;
- Adaptar o presente modelo físico para operar em condições não isotérmicas. O presente modelamento operou em condições isotérmicas e os fenômenos convectivos podem afetar o escoamento e a eficiência de remoção de inclusões;
- Aprofundar a investigação, e propor mecanismo físico, de como as variáveis eficiência de remoção de inclusões e a razão entre volume pistonado e volume morto estão relacionadas ao efeito da injeção de gás no distribuidor.

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ARAÚJO JÚNIOR, E. S. **Parâmetros que afetam a limpidez do aço em um distribuidor de lingotamento contínuo**. Ouro Preto: Escola de Engenharia da UFOP, 2008. 56p. (Trabalho de conclusão de curso, Graduação em Engenharia Metalúrgica).

BARBOSA, F. A. **Modelamento matemático e físico do escoamento do aço líquido em diferentes projetos de distribuidor do lingotamento contínuo da Usiminas**. Belo Horizonte: Escola de Engenharia da UFMG, Julho de 2002. (Dissertação, Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Minas).

BIELEFELDT, W. V. **Estudo do tratamento de inclusões com cálcio na fabricação do aço SAE 8620**. Porto Alegre: Escola de Engenharia da UFRGS, 2005. 111p. (Dissertação, Mestrado em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais).

CAROZZA, C. **Montreal water modeling of particle discrimination using LiMCA technology**. McGill University, 1999. (Thesis, Master in Mining and Metallurgical Engineering).

CHAKRABORTY, A. **Development of an on-line aqueous particle sensor to study the performance of inclusions in a 12 tonne, delta shaped full scale water model tundish**. Montreal: McGill University, maio 2010. (Dissertação, Mestrado em Engenharia Metalúrgica).

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, 2011. 759-68p.

CHATTOPADHYAY, K. **Modelling of transport phenomena for improved steel quality in a delta shaped four strand tundish**. Montreal: McGill University, 2011. 165-73p. (Thesis, PhD in Mining and Materials Engineering).

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, 2001. 151-7p.

COSTA, A. M. C. **Modelamento matemático da zona de mistura no lingotamento contínuo**. Belo Horizonte: Escola de Engenharia da UFMG, 2003. 4-52p. (Dissertação, Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Minas).

DIETER, G. E. **Mechanical metallurgy**. SI metric edition. New York: McGraw-Hill, 1988. 212p. ISBN: 0-07-084187-X.

DRAGANOVICI, T. **A user-friendly software interface for the Liquid Metal Cleanliness Analyzer (LiMCA)**. Montreal: McGill University, 1994. (Thesis, Master in Mining and Metallurgical Engineering).

FACO, R. J. **Levantamento das inclusões dos principais grupos de aços produzidos em Aciaria do tipo LD**. São Paulo: Escola Politécnica da USP, 2005. 22p. (Dissertação, Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Materiais).

FREIRE, F. S. **Avaliação do efeito das variáveis operacionais e de projeto sobre a taxa de circulação e a limpidez do aço no do degaseificador RH - estudo através de modelamento físico**. Belo Horizonte: Escola de Engenharia da UFMG, 2011. 21p. (Relatório de Estágio).

GUTHRIE, R. I. L.; LI, M. **In situ detection of inclusions in liquid metals: Part I. Mathematical modeling of the behavior of particles traversing the electric sensing zone**. Met. & Mat. Trans., Vol. 32B, Dec 2001. 1067p.

GUTHRIE, R. I. L.; LI, M. **In situ detection of inclusions in liquid metals: Part II. Metallurgical applications of LiMCA systems**. Met. & Mat. Trans., Vol. 32B, Dec 2001. 1081p.

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, 1996. 128-31p.

JIN-GANG, L.; HUI-CHENG, Y.; LIU, L.; XIN-HUA, W. **Water modeling of optimizing tundish flow field**. Journal of Iron and Steel Research, v. 14, 2007. 13-9p.

JOO, S.; GUTHRIE, R. I. L. **Inclusion behavior and heat-transfer phenomena in steelmaking tundish operations** Part I. aqueous. Metallurgical Transactions, v. 24, 1993. 755-65p.

KIESSLING, R.; LANGE, N. **Non-metallic inclusions in steel - Vol. I-IV**. 2nd ed. Londres: The Institute of Materials, 1997. ISBN: 090435718X.

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.

LAKHTIN, Y.; WEINSTEIN, N. **Engineering physical metallurgy**. University Press of the Pacific, 2000, ISBN: 0898750857.

LARSEN, U. D. **Particle characterization apparatus**. US Patent, 6959618 B1.

LI, M.; GUTHRIE, R. I. L. **Numerical studies of the motion of particles in current-carrying liquid metals flowing in a circular pipe**. Met. & Mat. Trans., Vol. 31B, Apr 2000. 357p.

MACHADO, F. D. **Modelagem física de remoção de inclusões em distribuidor de lingotamento contínuo de tarugos**. Porto Alegre: Escola de Engenharia da UFRGS, 2014. 21-36p. (Dissertação, Mestrado em Engenharia de Minas, Metalúrgica e Materiais).

MAXWELL, J. C. **A treatise on electricity and magnetism**, 3rd ed. Clarendon, Oxford, UK, vol. 1, 1954. 429p.

MAZUMDAR, D.; EVANS, J. W. **Modeling of steelmaking process**. CRC Press, 2009.

MAZUMDAR, D.; GUTHRIE, I. L. R. **The physical and mathematical modeling of continuous casting tundish systems**. ISIJ International, v. 39, n. 6, 1999. 524-47p.

METSOC. **Continuous caster schematic**. Disponível em: <<http://www.metsoc.org/VirtualTour/processes/images/Continuous+Caster+Schematic.jpg>> Virtual tour: Continuous casting, 2000. Acesso em: 01/10/2014.

MONTGOMERY, D. C.; RUNGER, G. C. **Estatística aplicada e probabilidade para engenheiros**. 4. ed. Rio de Janeiro: LTC - Livros Técnicos e Científicos Editora Ltda., Cap. 14, 2009. 330-75p. ISBN: 978-85-216-1664-1.

MORALES, R. D.; BANDERAS, A. R.; DEMEDICES, L. G.; CRUZ, M. D. **Mathematical simulation and modeling of steel flow with gas bubbling in trough type tundishes**. ISIJ International, Vol. 43, No. 5, 2003. 653-62p.

NAKAJIMA, H. **On the detection and behavior of second phase particles in steel melts**. Montreal: McGill University, 1986. (Thesis, PhD in Mining and Metallurgical Engineering).

NASCIMENTO, R. P. **Remoção de inclusões não-metálicas do aço líquido através do borbulhamento de argônio pelo fundo do distribuidor de lingotamento contínuo da ArcelorMittal Tubarão**. Ouro Preto: Escola de Engenharia da UFOP, 2008. 17; 55-69p. (Dissertação, Mestrado em Engenharia de Materiais).

NEVES, L. **Modelamento matemático do escoamento multifásico no degaseificador RH e no distribuidor de lingotamento contínuo**. Belo Horizonte: Escola de Engenharia da UFMG, Junho, 2012. 96-101;131p. (Tese, Doutorado em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas).

PEREIRA, R. O. S. **Modelamento matemático do escoamento turbulento, da transferência de calor e da solidificação no distribuidor e na máquina de lingotamento contínuo**. Belo Horizonte: Escola de Engenharia da UFMG, 2004. 220p. (Tese, Doutorado em Engenharia Metalúrgica e de Minas).

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, 2010. 06-10p.

QIANG, Y.; ZONG-SHU, Z.; QIN-FU, H.; ZHOU, C. **Water modeling of swirling flow tundish for steel continuous casting.** Journal of Iron and Steel Research International, v. 16, 2009. 17-22p.

RAY, S. K. **Studies to predict steel quality to predict steel quality in a 4 strand delta shaped tundish.** Montreal: McGill University, 2006. (Thesis, Master in Mining and Metallurgical Engineering).

ROGLER, J. P. **Modeling of inclusion removal in a tundish by gas bubbling.** Toronto, Ontário, Canadá: Ryerson University, 2004. 57; 65p. (Dissertação, Mestrado em Engenharia Química).

ROGLER, J. P.; HEASLIP, L. J.; MEHRVAR, M. **Inclusion removal in a tundish by gas bubbling.** Canadian Metallurgical Quarterly, v. 43, 2004. 407-16p.

ROGLER, J. P.; HEASLIP, L. J.; MEHRVAR, M. **Physical modelling of inclusion removal in a tundish by gas bubbling.** Canadian Metallurgical Quarterly, v. 44, 2005. 357-68p.

SAHAI, Y.; EMI, T. **Criteria for water modeling of melt flow and inclusion removal in continuous casting tundishes.** ISIJ International, vol. 36, No. 9, 1996. 1166-1173p.

SAHAI, Y.; EMI, T. **Melt flow characterization in continuous casting tundishes.** ISIJ International, vol. 36, Nº 6, 1996, 667-672p.

SAHAI, Y.; EMI, T. **Tundish technology for clean steel production.** 1.ed. New Jersey: World Scientific, 2008. 17p. ISBN: 13-978-981-270-621-8.

SCHADE, J. H.; O'MALLEY, R. J.; KEMENY, F. L.; SAHAI, Y.; ZACHARIAS, D. J. **Tundish operations.** In: CRAMB, A. W. **The making, shaping and treating of steel:**

casting volume. The AISE Steel Foundation, Pittsburgh, Warrendale, PA, Ch. 13, 2003. 6p.

SESHADRI, V., TAVARES, R. P., SILVA, C. A., SILVA, I. A. **Fenômenos de Transporte: fundamentos e aplicações nas Engenharias Metalúrgica e de Materiais.** 1ª Ed. São Paulo: ABM, Cap. 7, 2010. 208p. ISBN:978-85-7737-035-1.

SESHADRI, V., TAVARES, R. P.; SILVA, C. A.; SILVA, I. A. **A physical modelling study of inclusion removal in tundish using inert gas curtain.** Tecnologia em Metalurgia, Materiais e Mineração, v. 9, 2012. 22-9p.

SHI, X. **Upgrading Liquid Metal Cleanliness Analyzer (LiMCA) with digital signal processing (DSP) technology.** Montreal: McGill University, 1994. (Thesis, Master in Mining and Metallurgical Engineering).

SILVA, C. A., *et al.* **Modelamento físico do fluxo de aço no distribuidor do lingotamento contínuo da Companhia Siderúrgica de Tubarão.** In: XXIX Seminário sobre Fusão, Refino e Solidificação dos Metais, ABM, São Paulo, 1998. 225-73p.

SILVA, C. A. **Transient melt flow in continuous casting tundishes.** Colorado: Colorado School of Mines, USA, 1992. 193p. (Tese, Doutorado em Engenharia Metalúrgica e de Materiais).

SINGH, S.; KORIA, S. C. **Physical modelling of steel flow in continuous casting tundish.** Ironmaking and Steelmaking, v. 20, n. 3, 1993. 221-230p.

SINHA, A. K.; SAHAI, Y. **Mathematical modeling of inclusion continuous casting tundishes transport and removal.** ISIJ International, Vol. 33, nº 5, 1993. 556-566p.

SZEKELY, J.; ILEGBUSI, O. J. **The physical and mathematical modeling of tundish operations.** New York: Editora Springer-Verlag, 1988.

TANAKA, H.; NISHIHARA, R.; KITAGAWA, I.; TSUJINO, R. **Quantitative analysis of contamination of molten steel in tundish.** The Iron and Steel Institute of Japan International, v. 33, 1993. 1238-43p.

TANAKA, S. **Modeling inclusion behavior and slag entrainment in liquid steel processing vessels**. Montreal: McGill University, 1986. (Thesis, PhD in Mining and Metallurgical Engineering).

TAVARES, R. P. **Relatório científico do projeto de pesquisa: Modelamento matemático e físico da zona de mistura no lingotamento contínuo**. CNPq/Processo: 302.238/2004- 2. Mar. 2008.

TRIOLA, M. F. **Introdução à estatística**. 7. ed. Rio de Janeiro: LTC - Livros Técnicos e Científicos Editora S. A., Cap. 6 e 7,1999. 144-48; 171-84p. ISBN: 85-216-1154-4.

VESUVIUS. **Report of micro-clean TAD (Tundish Argon Diffusers)**. Junho de 2005.

WANG, L. T.; ZHANG, Q. Y.; PENG, H.; LI, Z. B. **Mathematical model for removal of inclusion in molten steel by injecting gas at ladle shroud**. ISIJ International, v. 45, n. 3, 2005. 331-37p.

WANG. X.; GUTHRIE, R. I. L.; LI, M. **In-situ detection of inclusions in liquid steel**. Comsol Conference, Boston, 2008.

WOLF, M. M. **Slab caster configuration and operation - A review**. In: Continuous Casting Volume Ten, 2003. 22p.

ZHANG, L.; TANIGUSHI, S.; CAI, K. **Fluid flow and inclusion removal in continuous casting tundish**. Metallurgical and Materials Transactions, v. 31, 2000. 253-66p.

ZHANG, L.; THOMAS, B. G. **Inclusions in continuous casting of steel**. XXIV National Steelmaking Symposium, Morelia, Mich, Mexico, 26-28, Nov. 2003. 138-83p.

ZHANG, L.; THOMAS, B. G. **State of the art in the control of inclusions during steel Ingot casting**. Metallurgical and Materials Transactions, Vol. 37B, 2006. 733-61p.

ZHANG, L.; THOMAS, B. G., WANG, X.; CAI, K. **Evaluation and control of steel cleanliness.** Review 85th Steelmaking Conference Proceedings, ISS-AIME, Warrendale, PA, 2002. 431-52p.

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, 2011. 37-44p.

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, 2006. 1177-82p.

APÊNDICE

A.1. Análise granulométrica a laser das partículas de vidro fundido de borossilicato.



DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA

CILAS 1064 Líquido

Faixa : 0.04 mu - 500.00 mu / 100 Classes

Ref da amostra : hm090220142
 Type produit : BOROSILICATO
 Client : ALEXANDRE
 Comentários : Amostra Sólida
 Líquido : Water (eau)
 Agente dispersante : Nenhum
 Operador : Ilda
 Empresa :
 Localização :
 Data : 17/02/2014 Hora : 09:40:25
 Índice med. : 648

Ultrasom : 80 s (+durante)
 Concentração : 144
 Diâmetro a 10% : 14.20 mu
 Diâmetro a 50% : 36.75 mu
 Diâmetro a 90% : 64.51 mu
 Diâmetro médio : 38.28 mu
 Fraunhofer
 Densidade/Fator : -----
 Superfície específica : -----
 Diluição automática : Não / Não
 Medida./Limp. : 60/60/2
 SOP : Incremento

Porcentagem do usuário

%	100.0
Q3	112.00

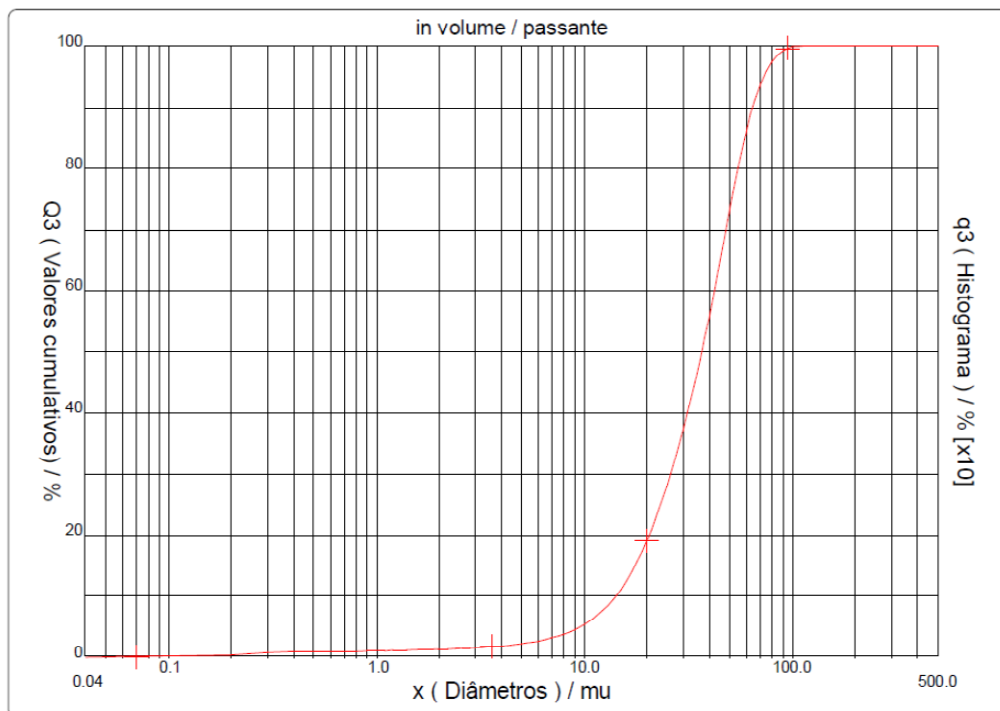


Figura A.1: Laudo da verificação da distribuição granulométrica acumulada das partículas da norma ASTM C169 aplicadas nos testes.



DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA

CILAS 1064 Líquido

Faixa : 0.04 mu - 500.00 mu / 100 Classes

Ref da amostra	: hm090220142	Ultrasom	: 80	s (+durante)
Type produit	: BOROSILICATO	Concentração	: 144	
Client	: ALEXANDRE	Diâmetro a 10%	: 14.20	mu
Comentários	: Amostra Sólida	Diâmetro a 50%	: 36.75	mu
Líquido	: Water (eau)	Diâmetro a 90%	: 64.51	mu
Agente dispersante	: Nenhum	Diâmetro médio	: 38.28	mu
Operador	: Ilda	Fraunhofer		
Empresa	:	Densidade/Fator	-----	
Localização	:	Superfície específica	-----	
Data : 17/02/2014	Hora : 09:40:25	Diluição automática	: Não / Não	
Índice med.	: 648	Medida./Limp.	: 60/60/2	
		SOP : Incremento		

Valores cumulados característicos

in volume / passante

x	0.04	0.07	0.10	0.20	0.30	0.40	0.50	0.60	0.70	0.80
Q3	0.05	0.15	0.19	0.44	0.81	1.00	1.00	1.00	1.00	1.01
q3	0.01	0.01	0.01	0.02	0.06	0.04	0.00	0.00	0.00	0.00
x	0.90	1.00	1.10	1.20	1.30	1.40	1.60	1.80	2.00	2.20
Q3	1.04	1.07	1.09	1.12	1.14	1.17	1.22	1.27	1.33	1.39
q3	0.02	0.02	0.01	0.02	0.02	0.03	0.02	0.03	0.04	0.04
x	2.40	2.60	2.80	3.00	3.20	3.40	3.60	3.80	4.00	4.30
Q3	1.44	1.50	1.55	1.60	1.65	1.70	1.75	1.80	1.86	1.95
q3	0.04	0.05	0.04	0.05	0.05	0.05	0.06	0.06	0.08	0.08
x	4.60	5.00	5.30	5.60	6.00	6.50	7.00	7.50	8.00	8.50
Q3	2.06	2.21	2.33	2.46	2.65	2.91	3.18	3.48	3.80	4.15
q3	0.11	0.12	0.13	0.15	0.18	0.21	0.23	0.28	0.32	0.37
x	9.00	10.00	11.00	12.00	13.00	14.00	15.00	16.00	17.00	18.00
Q3	4.53	5.36	6.29	7.33	8.47	9.72	11.06	12.50	14.03	15.63
q3	0.43	0.51	0.63	0.77	0.92	1.09	1.25	1.44	1.63	1.80
x	19.00	20.00	21.00	22.00	23.00	25.00	28.00	30.00	32.00	34.00
Q3	17.30	19.01	20.77	22.55	24.37	28.03	33.62	37.37	41.13	44.87
q3	1.99	2.15	2.33	2.47	2.64	2.83	3.18	3.50	3.76	3.98
x	36.00	38.00	40.00	43.00	45.00	50.00	53.00	56.00	60.00	63.00
Q3	48.59	52.27	55.90	61.26	64.76	73.18	77.69	81.68	86.10	88.83
q3	4.20	4.39	4.56	4.78	4.96	5.15	4.99	4.67	4.13	3.61
x	66.00	71.00	75.00	80.00	85.00	90.00	95.00	100.00	112.00	125.00
Q3	91.13	94.11	95.85	97.43	98.51	99.21	99.61	99.83	100.00	100.00
q3	3.19	2.63	2.05	1.58	1.15	0.79	0.48	0.28	0.10	0.00
x	130.0	140.0	150.0	160.0	170.0	180.0	190.0	200.0	212.0	224.0
Q3	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
q3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
x	240.0	250.0	280.0	300.0	315.0	355.0	400.0	425.0	450.0	500.0
Q3	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
q3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

x : diâmetro / mu Q3 : valor cumulativo / % q3 : Histograma / %

Figura A.2: Valores acumulados característicos do tamanho de partícula.

A.2. Curvas DTR para distribuidor sem modificadores de fluxo.

Os volumes característicos para distribuidor sem modificadores de fluxo foram determinados a partir de curvas DTR para cada configuração. As Figuras A.3, A.4, A.5, A.6 e A.7 contêm a média das curvas DTR obtidas através dos testes realizados com seis repetições, em cada posição de plugue e para as diferentes vazões de gás.

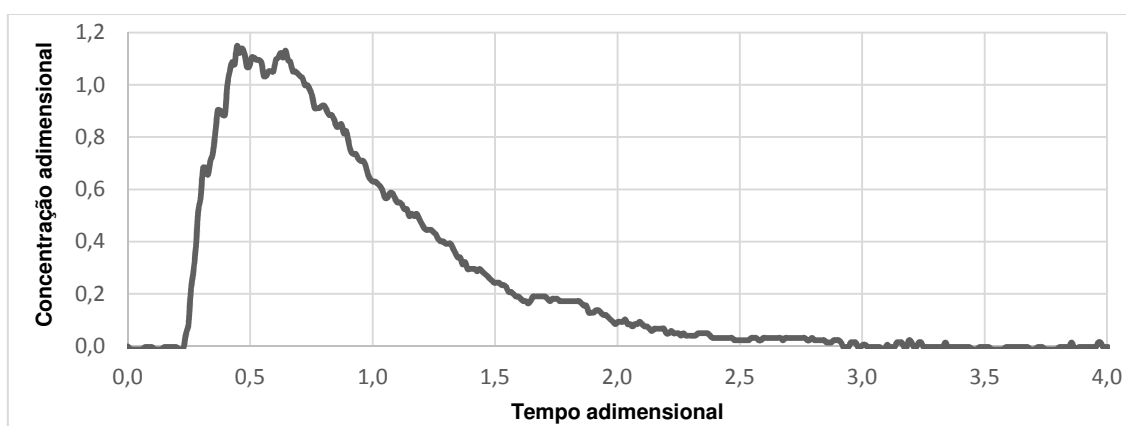


Figura A.3: Curva DTR para o distribuidor sem modificadores de fluxo e sem injeção de gás.

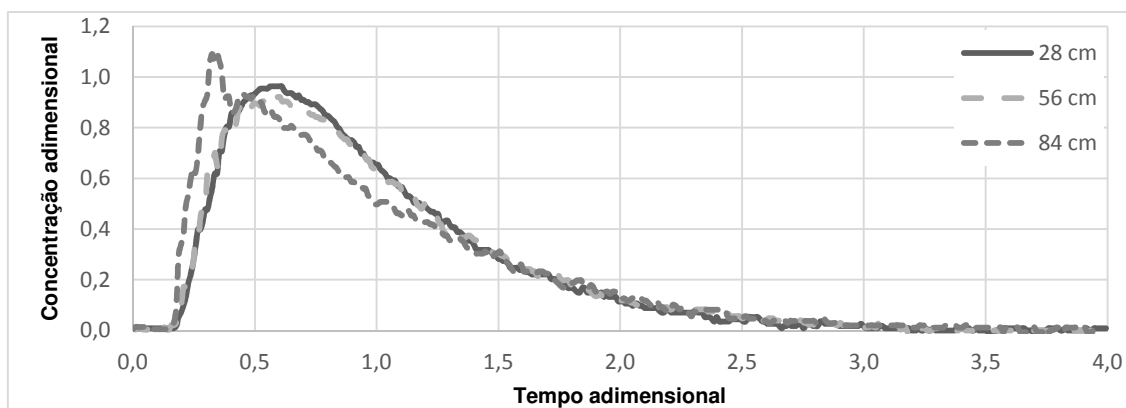


Figura A.4: Curvas DTR para distribuidor sem modificadores de fluxo e com cortina de gás com vazão de 1 Nl/min para as posições de plugue 28, 56 e 84 cm.

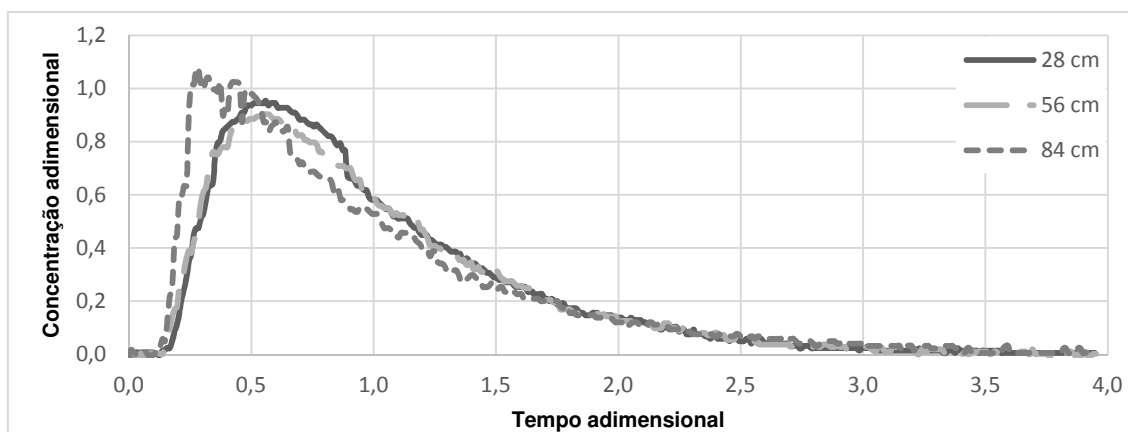


Figura A.5: Curvas DTR para distribuidor sem modificadores de fluxo e com cortina de gás com vazão de 2NI/min para as posições de plugue 28, 56 e 84cm.

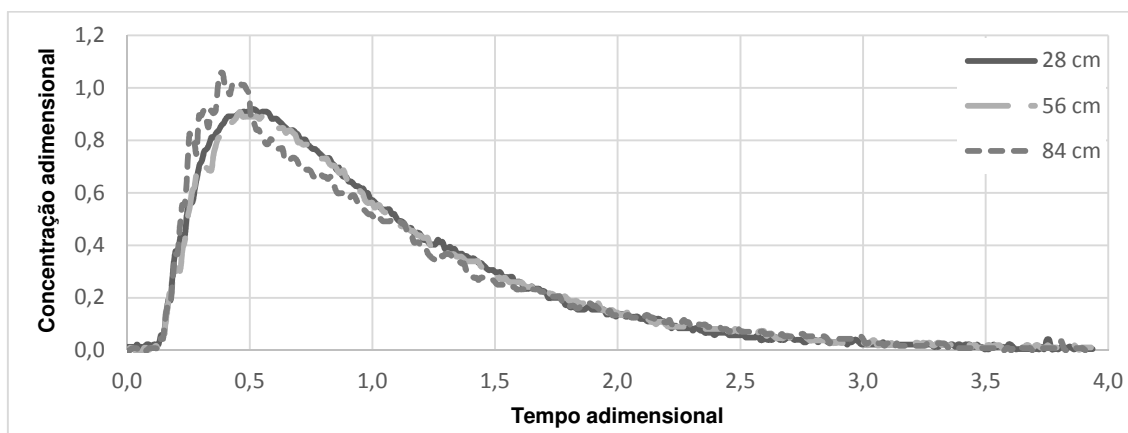


Figura A.6: Curvas DTR para distribuidor sem modificadores de fluxo e com cortina de gás com vazão de 3NI/min para as posições de plugue 28, 56 e 84cm.

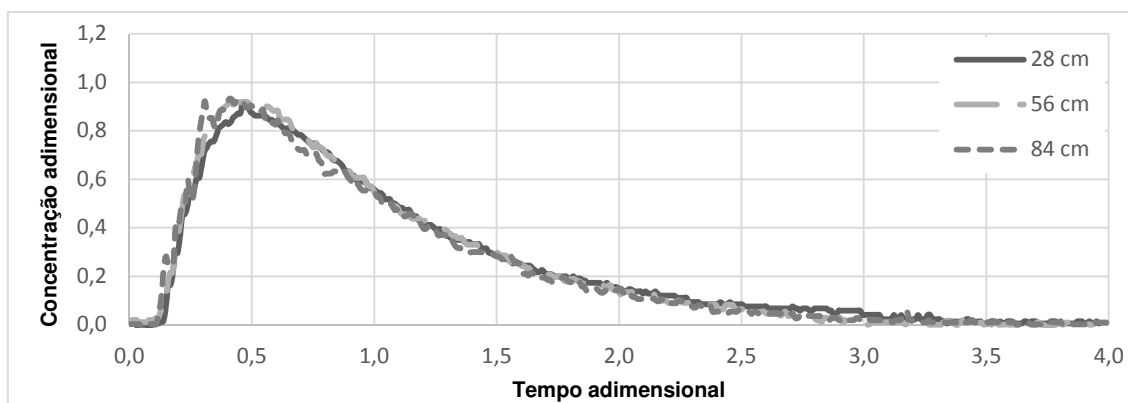


Figura A.7: Curvas DTR para distribuidor sem modificadores de fluxo e com cortina de gás com vazão de 4NI/min para as posições de plugue 28, 56 e 84cm.

A.3. Curvas de nível da superfície de resposta dos volumes característicos do distribuidor sem modificadores de fluxo.

As Tabelas A.1, A.2 e A.3 apresentam os volumes característicos (pistonado, morto e mistura) das curvas DTR do distribuidor sem modificadores de fluxo, para injeção de gás de 1 a 4NI/min, e posições de plugue 28, 56 e 84cm.

Tabela A.1: Valores de volumes pistonados para distribuidor sem modificadores de fluxo, sem e com injeção de gás e variando a posição de plugue.

Tratamento (n)	Posição (cm)	Vazão (NI/min)	Repetições (%)						Média (%)
			I	II	III	IV	V	VI	
1	-	0	22,45	23,04	24,56	24,46	22,80	16,84	22,36
2	28	1	20,27	18,76	17,97	20,57	19,14	14,15	18,48
3	28	2	17,71	14,33	13,11	15,58	14,52	19,61	15,81
4	28	3	12,75	15,70	15,08	13,87	14,05	13,87	14,22
5	28	4	12,84	14,54	18,82	13,92	15,17	19,62	15,82
6	56	1	19,08	19,55	20,38	19,86	19,09	20,13	19,68
7	56	2	12,50	14,48	13,30	14,45	14,54	13,73	13,83
8	56	3	13,02	15,82	14,83	14,09	13,45	13,88	14,18
9	56	4	12,47	13,78	12,79	12,72	12,49	12,46	12,79
10	84	1	17,02	17,52	18,43	19,69	18,63	18,81	18,35
11	84	2	11,56	13,15	15,25	18,75	14,26	15,89	14,81
12	84	3	15,70	20,39	16,16	15,42	15,48	15,48	16,44
13	84	4	11,57	13,71	13,72	13,54	17,30	16,71	14,43

A Figura A.8 exibe as curvas de nível da superfície de resposta criadas da Tabela A.1.

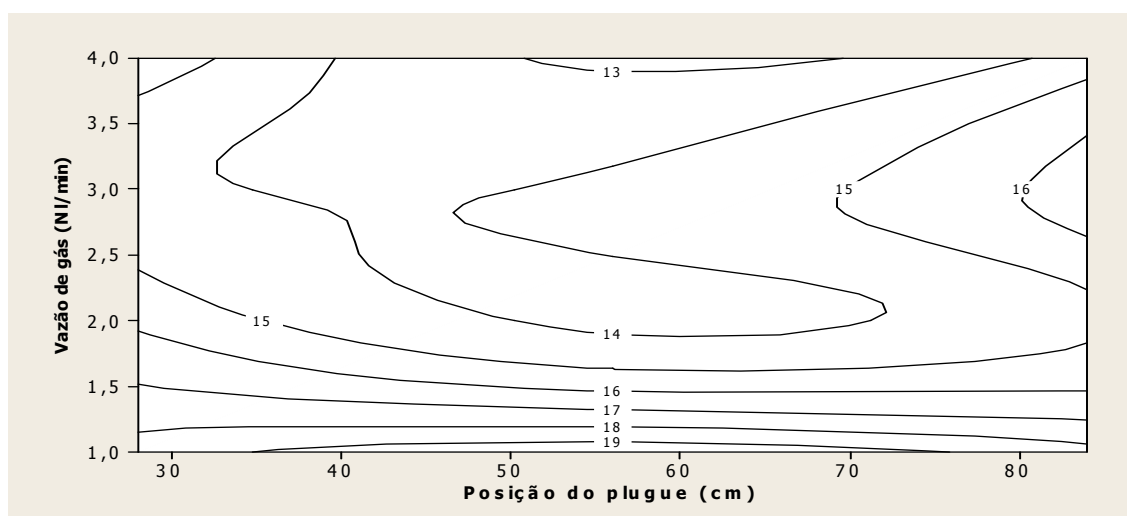


Figura A.8: Curvas de nível da superfície de resposta dos volumes pistonados para distribuidor sem modificadores de fluxo, com injeção de gás de 1 a 4NI/min, e variando a posição de plugue entre 28 a 84cm.

Tabela A.2: Valores de volumes mortos para distribuidor sem modificadores de fluxo, com e sem injeção de gás e variando a posição de plugue.

Tratamento (n)	Posição (cm)	Vazão (NI/min)	Repetições (%)						Média (%)
			I	II	III	IV	V	VI	
1	-	0	16,39	16,92	15,68	18,21	15,49	17,57	16,71
2	28	1	16,94	14,36	15,56	14,78	18,24	18,69	16,43
3	28	2	19,36	20,56	18,84	18,24	17,87	18,01	18,81
4	28	3	20,00	21,20	22,20	21,48	21,50	19,01	20,90
5	28	4	21,75	22,61	21,35	21,26	22,32	20,46	21,63
6	56	1	15,50	18,96	19,09	17,77	17,35	17,84	17,75
7	56	2	17,82	19,19	20,41	19,55	18,94	21,30	19,54
8	56	3	21,28	20,28	19,23	20,55	21,70	17,73	20,13
9	56	4	19,06	22,76	21,01	20,10	22,79	21,42	21,19
10	84	1	23,79	23,79	22,37	21,34	20,98	20,86	22,19
11	84	2	25,77	24,76	25,57	28,00	26,73	27,38	26,37
12	84	3	23,67	21,25	23,55	26,83	20,67	29,27	24,21
13	84	4	22,95	22,51	20,84	21,88	26,07	24,47	23,12

A Figura A.9 apresenta a curva de nível da superfície de resposta baseadas na Tabela A.2.

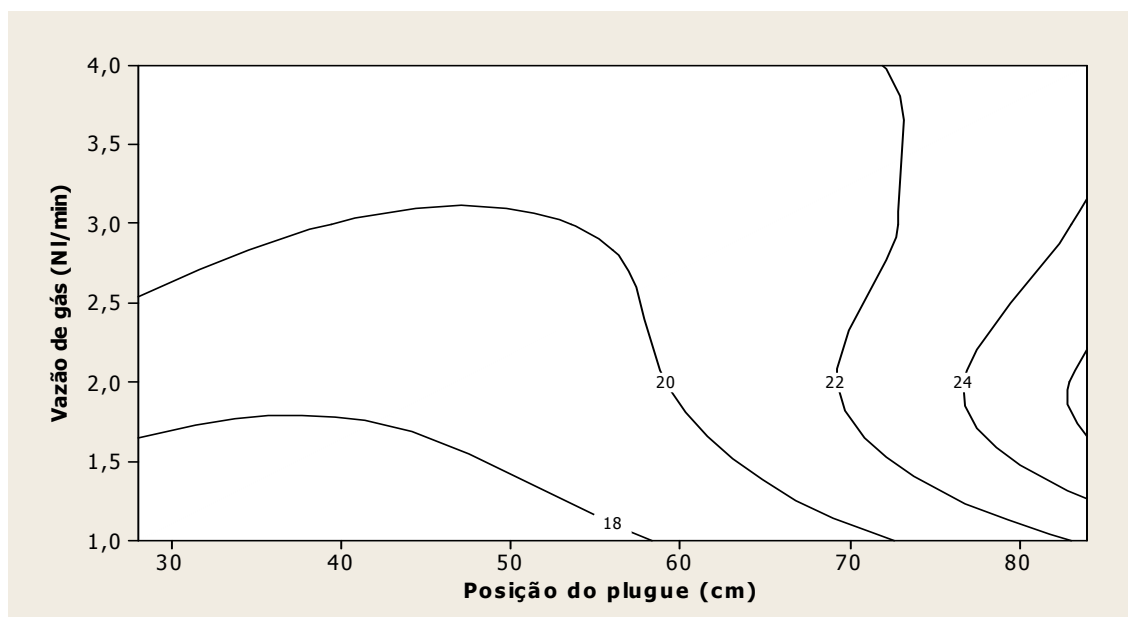


Figura A.9: Curvas de nível da superfície de resposta dos volumes mortos para distribuidor sem modificadores de fluxo, com injeção de gás de 1 a 4NI/min, e variando a posição de plugue entre 28 a 84cm.

Tabela A.3: Valores de volumes de mistura para distribuidor sem modificadores de fluxo, sem e com injeção de gás e variando a posição de plugue.

Tratamento (n)	Posição (cm)	Vazão (NI/min)	Repetições (%)						Média (%)
			I	II	III	IV	V	VI	
1	-	0	59,33	60,03	59,76	59,15	61,71	65,59	60,93
2	28	1	62,80	66,88	66,47	64,65	62,62	67,17	65,10
3	28	2	62,93	65,10	68,05	66,18	67,62	62,38	65,38
4	28	3	67,25	63,10	62,72	64,64	64,46	67,12	64,88
5	28	4	65,41	62,85	59,83	64,82	62,52	59,91	62,56
6	56	1	65,42	61,48	60,52	62,37	63,57	62,03	62,57
7	56	2	69,68	66,32	66,29	66,00	66,52	64,97	66,63
8	56	3	65,69	63,90	65,94	65,35	64,85	68,39	65,69
9	56	4	68,48	63,46	66,21	67,19	64,72	66,12	66,03
10	84	1	59,18	58,69	59,20	58,97	60,40	60,33	59,46
11	84	2	62,67	62,08	59,18	53,25	59,02	56,72	58,82
12	84	3	60,63	58,36	60,30	57,74	63,85	55,25	59,36
13	84	4	65,48	63,78	65,44	64,58	56,63	58,82	62,46

A Figura A.10 mostra as curvas de nível da superfície de resposta originadas da Tabela A.3.

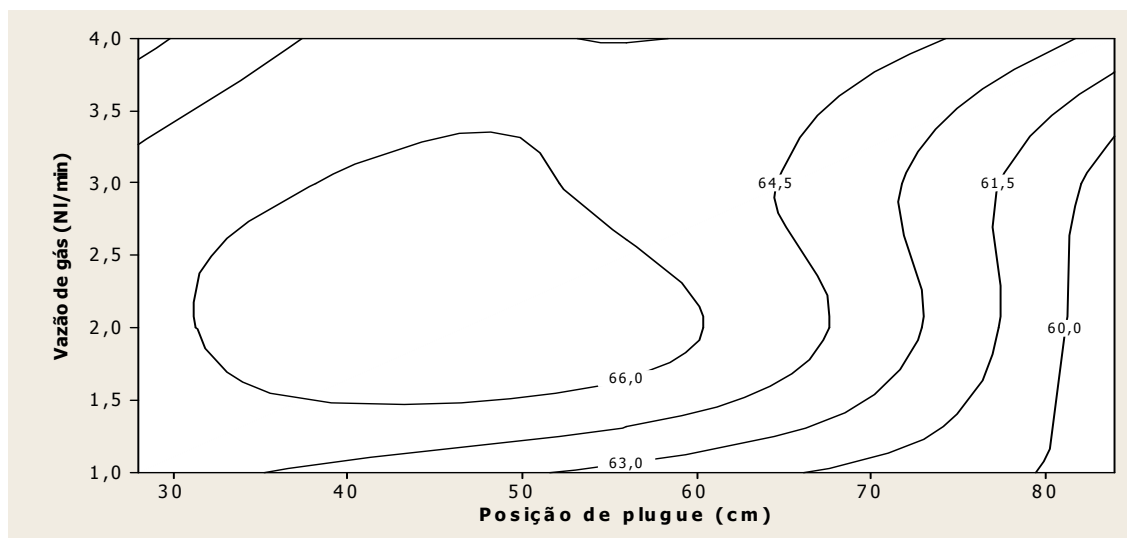


Figura A.10: Curvas de nível da superfície de resposta dos volumes de mistura para distribuidor sem modificadores de fluxo, com injeção de gás de 1 a 4NI/min, e variando a posição de plugue entre 28 a 84cm.

Por fim, a Tabela A.4 apresenta a razão entre o volume pistonado (V_p) da Tabela A.1 e o volume morto (V_m) da Tabela A.2.

Tabela A.4: Razão entre o volume pistonado (V_p) e o volume morto (V_m) dos dados experimentais para distribuidor sem modificadores de fluxo, sem e com injeção de gás e variando a posição de plugue.

Tratamento (n)	Posição (cm)	Vazão (NI/min)	Repetições (%)						Média (%)
			I	II	III	IV	V	VI	
1	-	0	1,37	1,36	1,57	1,34	1,47	0,96	1,35
2	28	1	1,20	1,31	1,15	1,39	1,05	0,76	1,14
3	28	2	0,91	0,70	0,70	0,85	0,81	1,09	0,84
4	28	3	0,64	0,74	0,68	0,65	0,65	0,73	0,68
5	28	4	0,59	0,64	0,88	0,65	0,68	0,96	0,73
6	56	1	1,23	1,03	1,07	1,12	1,10	1,13	1,11
7	56	2	0,70	0,75	0,65	0,74	0,77	0,64	0,71
8	56	3	0,61	0,78	0,77	0,69	0,62	0,78	0,71
9	56	4	0,65	0,61	0,61	0,63	0,55	0,58	0,61
10	84	1	0,72	0,74	0,82	0,92	0,89	0,90	0,83
11	84	2	0,45	0,53	0,60	0,67	0,53	0,58	0,56
12	84	3	0,66	0,96	0,69	0,57	0,75	0,53	0,69
13	84	4	0,50	0,61	0,66	0,62	0,66	0,68	0,62

A Figura A.11 exibe as curvas de nível da superfície de resposta baseadas na Tabela A.4.

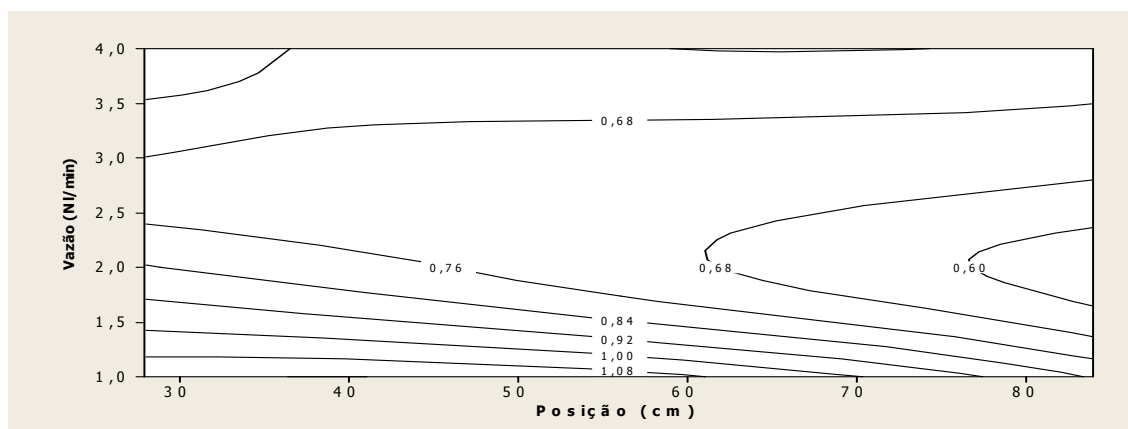


Figura A.11: Curvas de nível da superfície de resposta da razão entre o volume pistonado (V_p) e o volume morto (V_m), para distribuidor sem modificadores de fluxo, com injeção de gás de 1 a 4NI/min, e variando a posição de plugue entre 28 a 84cm.

A.4. Curvas DTR para distribuidor com diques e barragens

Os volumes característicos para o distribuidor com diques e barragens, plugue posicionado a 56cm da válvula longa e vazões de gás de 1, 2, 3, 4 e 8NI/min foram determinados das curvas DTR da Figura A.12, onde cada curva DTR apresentada é a média de quatro repetições de sua respectiva combinação posição e vazão de plugue.

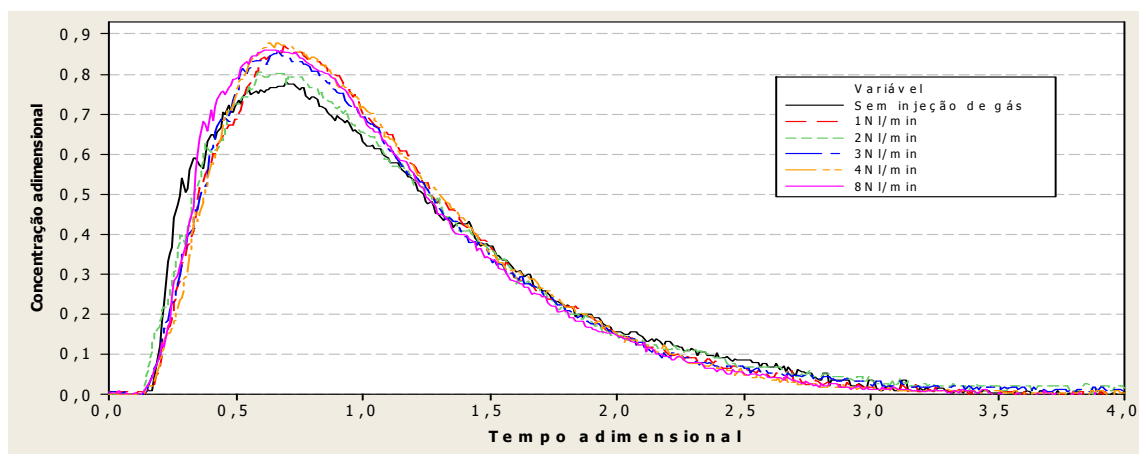


Figura A.12: Curvas DTR para distribuidor com cortina de gás com vazão de 1, 2, 3, 4 e 8 Nl/min, com plugue posicionado a 56cm da válvula longa.

A Tabela A.5 exibe os volumes característicos das curvas DTR da Figura A.12.

Tabela A.5: Volumes característicos e razão entre o volume pistonado (V_p) e o volume morto (V_m) dos dados experimentais para distribuidor com diques e barragens, sem e com injeção de gás para a posição de plugue 56 cm.

Conf.	Tratamento (n)	Posição (cm)	Vazão (Nl/min)	Repetições (%)				Média (%)
				I	II	III	IV	
Volume pistonado (V_p)	1	-	0	15,98	15,98	16,98	18,98	16,98
	2	56	1	16,98	14,98	17,98	17,98	16,98
	3	56	2	11,99	12,65	13,97	11,99	12,65
	4	56	3	14,98	14,99	13,98	14,98	14,73
	5	56	4	15,98	16,98	11,99	17,98	15,73
	6	56	8	11,98	15,98	14,98	13,98	14,23
Volume morto (V_m)	1	-	0	16,03	14,30	10,46	13,74	13,63
	2	56	1	9,81	8,82	11,20	16,42	11,56
	3	56	2	13,03	13,87	14,44	14,14	13,87
	4	56	3	9,12	14,14	13,36	18,18	13,70
	5	56	4	11,08	9,20	17,07	10,73	12,02
	6	56	8	14,81	11,13	15,28	10,43	12,91
Volume mistura	1	-	0	67,99	69,72	72,56	67,28	69,39
	2	56	1	73,21	76,20	70,82	65,60	71,46
	3	56	2	74,98	73,48	71,59	73,87	73,48
	4	56	3	75,90	70,87	72,66	66,84	71,57
	5	56	4	72,94	73,82	70,94	71,29	72,25
	6	56	8	73,21	72,89	69,74	75,59	72,86
Razão entre (V_p/V_m)	1	-	0	1,00	1,12	1,62	1,38	1,28
	2	56	1	1,73	1,70	1,61	1,10	1,53
	3	56	2	0,92	0,91	0,97	0,85	0,91
	4	56	3	1,64	1,06	1,05	0,82	1,14
	5	56	4	1,44	1,85	0,70	1,68	1,42
	6	56	8	0,81	1,44	0,98	1,34	1,14

A.5. Análise dimensional da razão residual de inclusões (RRI)

1) Balanço de partículas no sistema off-line (béquer):

- $T_{\text{off-line}} [=] \text{ p/s}$;
- $V_{\text{off-line}} [=] \text{ l}$;
- $m_p [=] \text{ mg}$;
- $Q_{\text{APS (off-line)}} [=] \text{ ml/min}$.

Em 1 grama de partículas, tem-se:

$$N_{\text{off-line}} [=] \frac{60 \cdot \frac{\text{p}}{\text{s}}}{\frac{1 \text{ mg}}{1000 \text{ l}} \cdot \frac{1 \text{ ml}}{1000 \text{ min}}} [=] \frac{\text{p}}{\text{g}} \quad (\text{A.1})$$

2) Balanço de partículas na entrada do distribuidor (Válvula longa):

- $\rho_{\text{polpa}} [=] \text{ g/l}$;
- $Q_{\text{bomba peristáltica}} [=] \text{ ml/min}$;
- $N_{\text{off-line}} [=] \text{ p/g}$.

$$N_{\text{Ent}} [=] \frac{\text{g}}{\text{l}} \cdot \frac{\text{p}}{\text{g}} \cdot \frac{1}{1000} \cdot \frac{\text{ml}}{\text{min}} [=] \frac{\text{p}}{\text{min}} \quad (\text{A.2})$$

3) Balanço de partículas na saída (veio):

- $Q_{\text{veio}} [=] \text{ l/min}$;
- $Q_{\text{APS}} [=] \text{ ml/min}$;
- $T_{\text{APS}} [=] \text{ p/s}$.

$$N_{\text{Saída}} [=] \frac{60 \cdot \frac{\text{p}}{\text{s}} \cdot 1000 \cdot \frac{\text{l}}{\text{min}}}{\frac{\text{ml}}{\text{min}}} [=] \frac{\text{p}}{\text{min}} \quad (\text{A.3})$$

4) Fechamento do balanço RRI:

$$RRI [=] \frac{2 \cdot \frac{\text{p}}{\text{min}}}{\frac{\text{p}}{\text{min}}} \cdot 100\% [=] \% \quad (\text{A.4})$$

A.6. Superfícies de respostas dos testes de eficiência de remoção

As Figuras A.13 e A.14 foram obtidas pelo software Minitab16.

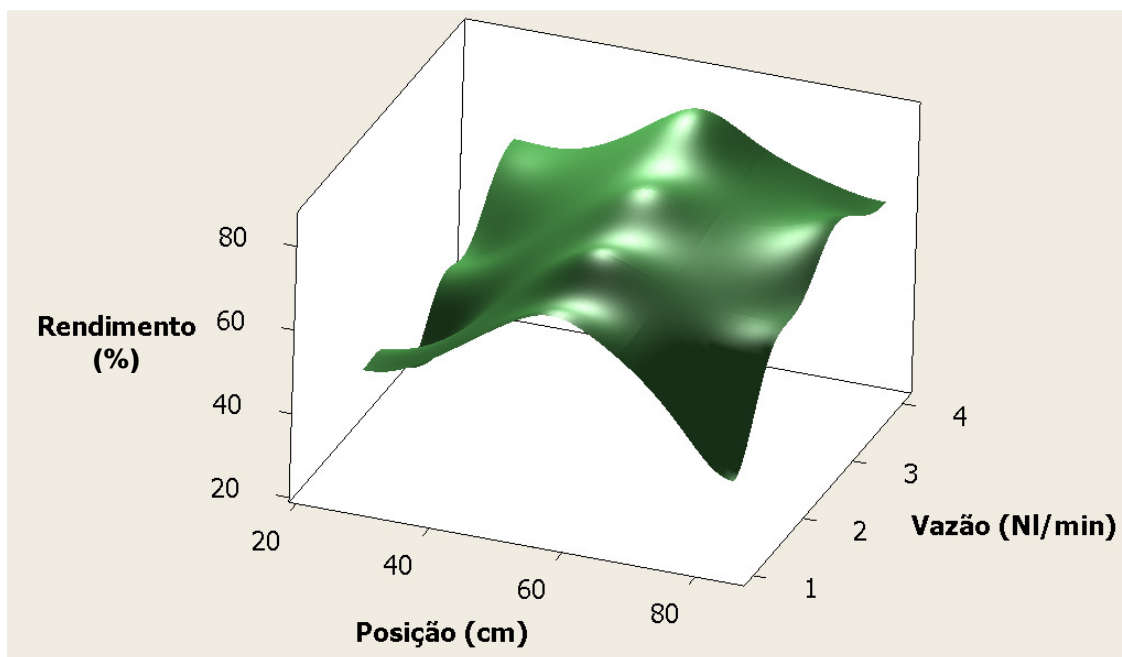


Figura A.13: Superfície de resposta para a eficiência de remoção de partículas para distribuidor sem diques e barragens, e com injeção de gás de 1, 2, 3 e 4NI/min para as posições a 28, 56 e 84cm da válvula longa.

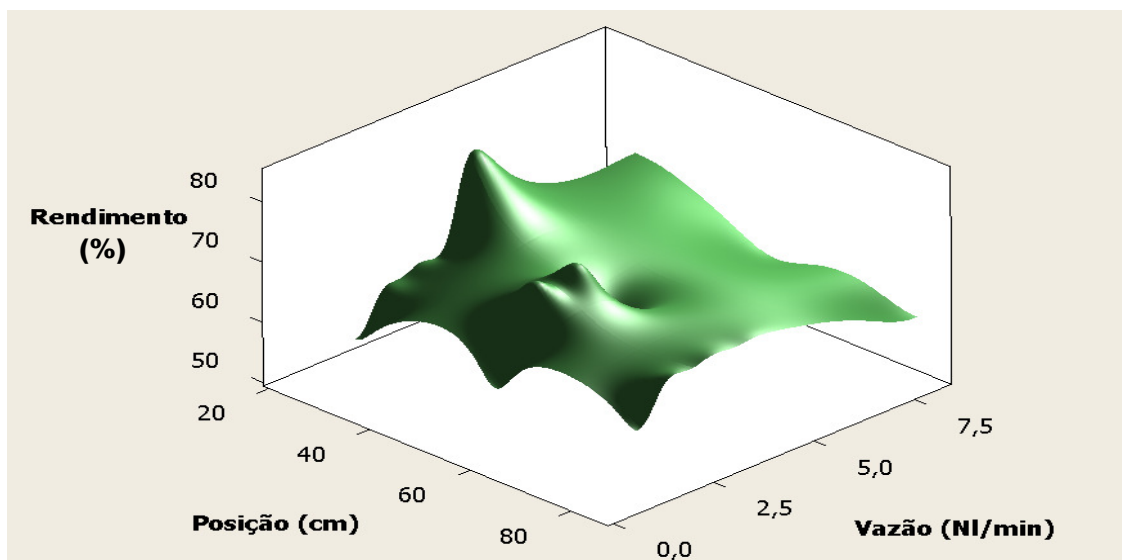


Figura A.14: Superfície de resposta para a eficiência de remoção de partículas para distribuidor com diques e barragens, e com injeção de gás de 1, 2, 3,4 e 8NI/min para as posições a 28, 56 e 84cm da válvula longa.

A.7. Resultados de distribuição granulométrica e eficiência de partícula para distribuidor sem e com modificadores de fluxo, e sem injeção de gás.

Tabela A.6: Distribuição granulométrica e eficiência de partícula da APS III para distribuidor sem e com modificadores de fluxo, e sem injeção de gás.

Conf.	Teste	Distribuição Granulométrica (μm)											Taxa* (p/s)	R ²	η_r^{**} Global (%)	N ^o Part.
		25,0 a 30,0	30,1 a 35,0	35,1 a 40,0	40,1 a 50,0	50,1 a 60,0	60,1 a 70,0	70,1 a 80,0	80,1 a 100,0	100,1 a 120,0	120,1 a 140,0	>140				
Off-line	A	0,15	0,32	0,16	0,09	0,06	0,06	0,06	0,05	0,02	0,01	0,03	1,395	0,990	-3,50	1841
	B	0,22	0,34	0,13	0,06	0,05	0,05	0,04	0,05	0,02	0,02	0,02	1,270	0,991	5,84	1676
	C	0,13	0,25	0,24	0,08	0,05	0,08	0,03	0,07	0,01	0,02	0,04	1,302	0,992	3,45	1719
	Média	0,17	0,30	0,18	0,08	0,05	0,06	0,04	0,06	0,02	0,02	0,03	1,322	0,991	1,93	1745
DT-SMF	A	0,25	0,40	0,15	0,08	0,04	0,04	0,01	0,01	0,00	0,00	0,00	1,024	0,997	24,10	1352
	B	0,24	0,41	0,15	0,08	0,04	0,04	0,02	0,01	0,01	0,00	0,00	0,905	0,995	32,92	1195
	C	0,25	0,41	0,15	0,08	0,04	0,04	0,02	0,01	0,01	0,00	0,00	0,965	0,996	28,51	1273
	Média	0,25	0,41	0,15	0,08	0,04	0,04	0,02	0,01	0,01	0,00	0,00	0,965	0,996	28,51	1273
DT-DB	A	0,21	0,40	0,15	0,07	0,04	0,05	0,02	0,03	0,01	0,01	0,01	0,602	0,976	55,37	795
	B	0,20	0,45	0,17	0,07	0,03	0,03	0,01	0,02	0,00	0,01	0,00	0,602	0,993	55,37	795
	C	0,23	0,42	0,15	0,08	0,04	0,04	0,02	0,02	0,00	0,00	0,00	0,531	0,972	60,63	701
	Média	0,21	0,42	0,16	0,07	0,04	0,04	0,02	0,02	0,00	0,01	0,00	0,578	0,980	57,12	763
DT-I	A	0,26	0,42	0,13	0,07	0,04	0,04	0,01	0,02	0,00	0,01	0,00	0,488	0,988	63,84	644
	B	0,26	0,40	0,13	0,07	0,04	0,04	0,02	0,02	0,01	0,01	0,00	0,482	0,992	64,28	636
	C	0,23	0,45	0,16	0,06	0,04	0,03	0,01	0,01	0,01	0,00	0,01	0,471	0,971	65,12	621
	Média	0,25	0,42	0,14	0,07	0,04	0,04	0,01	0,02	0,01	0,01	0,00	0,480	0,984	64,41	634
DT-DBI	A	0,22	0,43	0,16	0,07	0,04	0,03	0,01	0,01	0,00	0,01	0,00	0,494	0,958	63,37	652
	B	0,23	0,40	0,17	0,08	0,03	0,04	0,01	0,02	0,01	0,01	0,00	0,589	0,981	56,33	777
	C	0,21	0,41	0,16	0,08	0,04	0,05	0,02	0,01	0,00	0,00	0,00	0,586	0,965	56,55	774
	Média	0,22	0,41	0,16	0,08	0,04	0,04	0,01	0,01	0,00	0,01	0,00	0,556	0,968	58,75	734

(*) Steady-state Inclusion Entrainment Rate (SIER); (**) $\eta_r = 100\% - \text{RRI}$; Residual Ratio of Inclusions; (CHAKRABORTY, 2010).

A.8. Resultados dos ensaios de eficiência de partícula para distribuidor sem modificadores de fluxo (DT-SMF) com injeção de gás.

Tabela A.7: Distribuição granulométrica e eficiência de partícula da APS III para distribuidor sem modificadores de fluxo, e com injeção de gás a 28cm da válvula longa.

Vazão (NI/min)	Teste Posição 28cm	Distribuição Granulométrica (μm)											Taxa* (p/s)	R ²	η_r^{**} Global (%)	Nº Part.
		25,0 a 30,0	30,1 a 35,0	35,1 a 40,0	40,1 a 50,0	50,1 a 60,0	60,1 a 70,0	70,1 a 80,0	80,1 a 100,0	100,1 a 120,0	120,1 a 140,0	>140				
1	A	0,21	0,36	0,15	0,09	0,05	0,06	0,04	0,04	0,01	0,00	0,00	0,588	0,995	56,39	778
	B	0,24	0,44	0,16	0,06	0,04	0,03	0,01	0,02	0,00	0,00	0,01	0,599	0,989	55,59	792
	C	0,21	0,35	0,17	0,09	0,05	0,06	0,03	0,03	0,01	0,00	0,00	0,811	0,960	39,88	1073
	Média	0,22	0,38	0,16	0,08	0,05	0,05	0,03	0,03	0,01	0,00	0,00	0,666	0,981	50,62	881
2	A	0,18	0,36	0,18	0,09	0,05	0,06	0,03	0,03	0,01	0,01	0,01	0,696	0,993	48,43	918
	B	0,19	0,39	0,15	0,09	0,06	0,06	0,02	0,02	0,01	0,01	0,00	0,863	0,990	36,05	1139
	C	0,18	0,36	0,16	0,10	0,06	0,06	0,03	0,03	0,01	0,01	0,00	0,699	0,982	48,21	922
	Média	0,18	0,37	0,16	0,09	0,06	0,06	0,03	0,03	0,01	0,01	0,00	0,752	0,988	44,23	993
3	A	0,28	0,39	0,13	0,05	0,04	0,04	0,02	0,02	0,01	0,00	0,00	0,752	0,987	44,28	992
	B	0,29	0,35	0,14	0,08	0,04	0,05	0,02	0,02	0,01	0,01	0,00	0,599	0,946	55,63	791
	C	0,25	0,42	0,12	0,05	0,05	0,06	0,02	0,02	0,00	0,00	0,00	0,670	0,959	50,33	886
	Média	0,27	0,39	0,13	0,06	0,04	0,05	0,02	0,02	0,01	0,00	0,00	0,673	0,964	50,08	890
4	A	0,22	0,37	0,16	0,10	0,04	0,04	0,01	0,04	0,01	0,00	0,00	0,426	0,969	68,42	562
	B	0,25	0,39	0,17	0,07	0,03	0,05	0,02	0,02	0,01	0,00	0,00	0,548	0,995	59,37	723
	C	0,24	0,34	0,16	0,08	0,05	0,06	0,03	0,02	0,02	0,00	0,01	0,451	0,989	66,56	595
	Média	0,24	0,37	0,16	0,08	0,04	0,05	0,02	0,03	0,01	0,00	0,00	0,475	0,984	64,78	627

(*) Steady-state Inclusion Entrainment Rate (SIER); (**) $\eta_r = 100\% - \text{RRI}$; Residual Ratio of Inclusions; (CHAKRABORTY, 2010).

Tabela A.8: Distribuição granulométrica e eficiência de partícula da APS III para distribuidor sem modificadores de fluxo, e com injeção de gás a 56cm da válvula longa.

Vazão (NI/min)	Teste Posição 56cm	Distribuição Granulométrica (μm)											Taxa* (p/s)	R ²	η_r^{**} Global (%)	Nº Part.
		25,0 a 30,0	30,1 a 35,0	35,1 a 40,0	40,1 a 50,0	50,1 a 60,0	60,1 a 70,0	70,1 a 80,0	80,1 a 100,0	100,1 a 120,0	120,1 a 140,0	>140				
1	A	0,25	0,43	0,13	0,07	0,02	0,04	0,02	0,03	0,01	0,01	0,01	0,335	0,958	75,17	442
	B	0,27	0,41	0,13	0,09	0,03	0,04	0,01	0,01	0,00	0,01	0,00	0,446	0,976	66,94	589
	C	0,31	0,41	0,13	0,07	0,04	0,02	0,01	0,01	0,00	0,00	0,00	0,365	0,997	72,95	482
	Média	0,28	0,42	0,13	0,08	0,03	0,03	0,01	0,02	0,00	0,01	0,00	0,382	0,977	71,69	504
2	A	0,21	0,41	0,16	0,08	0,06	0,04	0,02	0,02	0,01	0,01	0,01	0,312	0,991	76,87	412
	B	0,23	0,42	0,16	0,06	0,04	0,04	0,02	0,01	0,01	0,00	0,00	0,336	0,989	75,10	444
	C	0,22	0,43	0,16	0,09	0,04	0,04	0,01	0,02	0,00	0,00	0,00	0,450	0,967	66,65	595
	Média	0,22	0,42	0,16	0,08	0,05	0,04	0,02	0,02	0,01	0,00	0,00	0,366	0,982	72,87	484
3	A	0,23	0,37	0,17	0,07	0,07	0,04	0,03	0,02	0,01	0,00	0,00	0,443	0,979	67,16	585
	B	0,26	0,33	0,18	0,09	0,06	0,03	0,02	0,02	0,01	0,00	0,00	0,236	0,996	82,51	312
	C	0,25	0,40	0,14	0,07	0,05	0,05	0,01	0,02	0,01	0,00	0,00	0,371	0,996	72,50	492
	Média	0,25	0,37	0,16	0,08	0,06	0,04	0,02	0,02	0,01	0,00	0,00	0,350	0,990	74,06	463
4	A	0,23	0,36	0,18	0,10	0,06	0,04	0,01	0,01	0,01	0,00	0,00	0,335	0,985	75,17	442
	B	0,27	0,39	0,13	0,05	0,04	0,03	0,02	0,02	0,01	0,02	0,01	0,268	0,993	80,14	354
	C	0,22	0,45	0,17	0,06	0,03	0,04	0,01	0,00	0,01	0,00	0,00	0,204	0,990	84,88	270
	Média	0,24	0,40	0,16	0,07	0,04	0,04	0,01	0,01	0,01	0,01	0,00	0,269	0,989	80,06	355

(*) Steady-state Inclusion Entrainment Rate (SIER); (**) $\eta_r = 100\% - \text{RRI}$; Residual Ratio of Inclusions; (CHAKRABORTY, 2010).

Tabela A.9: Distribuição granulométrica e eficiência de partícula da APS III para distribuidor sem modificadores de fluxo, e com injeção de gás a 84cm da válvula longa.

Vazão (NI/min)	Teste Posição 84cm	Distribuição Granulométrica (μm)											Taxa* (p/s)	R ²	η_r^{**} Global (%)	Nº Part.
		25,0 a 30,0	30,1 a 35,0	35,1 a 40,0	40,1 a 50,0	50,1 a 60,0	60,1 a 70,0	70,1 a 80,0	80,1 a 100,0	100,1 a 120,0	120,1 a 140,0	>140				
1	A	0,22	0,40	0,16	0,07	0,05	0,04	0,02	0,02	0,00	0,00	0,00	0,881	0,998	34,68	1163
	B	0,23	0,43	0,15	0,08	0,04	0,03	0,02	0,01	0,00	0,00	0,00	0,751	0,986	44,34	991
	C	0,21	0,42	0,17	0,08	0,03	0,04	0,02	0,02	0,01	0,00	0,00	0,782	0,997	42,04	1032
	Média	0,22	0,42	0,16	0,08	0,04	0,04	0,02	0,02	0,00	0,00	0,00	0,805	0,994	40,35	1062
2	A	0,20	0,40	0,17	0,08	0,05	0,05	0,02	0,02	0,00	0,01	0,00	0,646	0,994	53,82	853
	B	0,23	0,38	0,18	0,10	0,03	0,03	0,02	0,01	0,01	0,00	0,00	0,441	0,997	67,31	582
	C	0,21	0,44	0,15	0,06	0,04	0,04	0,03	0,01	0,01	0,00	0,00	0,385	0,997	71,46	508
	Média	0,21	0,41	0,17	0,08	0,04	0,04	0,02	0,01	0,01	0,00	0,00	0,491	0,996	64,20	648
3	A	0,19	0,42	0,13	0,06	0,04	0,04	0,02	0,04	0,02	0,03	0,01	0,256	0,997	81,03	338
	B	0,26	0,38	0,17	0,06	0,03	0,03	0,02	0,02	0,01	0,01	0,00	0,384	0,991	71,54	507
	C	0,19	0,45	0,17	0,07	0,04	0,03	0,01	0,02	0,01	0,00	0,00	0,381	0,984	71,76	503
	Média	0,21	0,42	0,16	0,06	0,04	0,03	0,02	0,03	0,01	0,01	0,00	0,340	0,991	74,78	449
4	A	0,21	0,44	0,15	0,07	0,04	0,05	0,02	0,02	0,00	0,00	0,00	0,582	0,994	56,86	768
	B	0,17	0,42	0,18	0,09	0,04	0,04	0,02	0,02	0,01	0,01	0,00	0,377	0,975	72,06	498
	C	0,22	0,40	0,14	0,09	0,03	0,04	0,03	0,02	0,01	0,01	0,01	0,418	0,993	69,02	552
	Média	0,20	0,42	0,16	0,08	0,04	0,04	0,02	0,02	0,01	0,01	0,00	0,459	0,987	65,98	606

(*) Steady-state Inclusion Entrainment Rate (SIER); (**) $\eta_r = 100\% - \text{RRI}$; Residual Ratio of Inclusions; (CHAKRABORTY, 2010).

A.9. Resultados dos ensaios de eficiência de partícula para distribuidor com diques e barragens (DT-DB) com injeção de gás.

Tabela A.10: Distribuição granulométrica e eficiência de partícula da APS III para distribuidor com diques e barragens, e com injeção de gás a 28cm da válvula longa.

Vazão (NI/min)	Teste Posição 28cm	Distribuição Granulométrica (μm)											Taxa* (p/s)	R ²	η_r^{**} Global (%)	Nº Part.
		25,0 a 30,0	30,1 a 35,0	35,1 a 40,0	40,1 a 50,0	50,1 a 60,0	60,1 a 70,0	70,1 a 80,0	80,1 a 100,0	100,1 a 120,0	120,1 a 140,0	>140				
1	A	0,19	0,33	0,16	0,05	0,04	0,07	0,03	0,05	0,04	0,03	0,01	0,462	0,991	65,78	609
	B	0,24	0,41	0,16	0,07	0,05	0,03	0,02	0,01	0,01	0,00	0,00	0,642	0,988	52,40	847
	C	0,22	0,42	0,14	0,08	0,05	0,03	0,01	0,03	0,01	0,00	0,00	0,631	0,984	53,24	833
	Média	0,22	0,39	0,15	0,07	0,05	0,04	0,02	0,03	0,02	0,01	0,00	0,578	0,988	57,14	763
2	A	0,24	0,40	0,18	0,08	0,04	0,03	0,02	0,01	0,00	0,01	0,00	0,450	0,881	66,64	594
	B	0,25	0,40	0,16	0,06	0,03	0,05	0,02	0,03	0,01	0,00	0,00	0,425	0,882	68,49	561
	C	0,26	0,40	0,17	0,06	0,04	0,03	0,01	0,01	0,01	0,00	0,00	0,579	0,970	57,08	764
	Média	0,25	0,40	0,17	0,07	0,04	0,04	0,02	0,02	0,01	0,00	0,00	0,485	0,911	64,07	640
3	A	0,23	0,44	0,14	0,08	0,04	0,02	0,02	0,01	0,01	0,00	0,00	0,343	0,989	74,57	453
	B	0,24	0,41	0,16	0,06	0,03	0,05	0,02	0,02	0,01	0,00	0,00	0,505	0,993	62,56	667
	C	0,26	0,44	0,15	0,06	0,02	0,03	0,01	0,02	0,01	0,01	0,00	0,435	0,972	67,73	575
	Média	0,24	0,43	0,15	0,07	0,03	0,03	0,02	0,02	0,01	0,00	0,00	0,428	0,985	68,29	565
4	A	0,21	0,43	0,18	0,06	0,04	0,02	0,03	0,01	0,01	0,01	0,00	0,261	0,979	80,65	345
	B	0,20	0,42	0,15	0,07	0,04	0,04	0,02	0,03	0,00	0,01	0,01	0,220	0,995	83,69	290
	C	0,23	0,42	0,16	0,07	0,04	0,03	0,01	0,02	0,00	0,01	0,00	0,310	0,985	77,02	409
	Média	0,21	0,42	0,16	0,07	0,04	0,03	0,02	0,02	0,00	0,01	0,00	0,264	0,986	80,45	348
8	A	0,23	0,41	0,14	0,08	0,04	0,03	0,01	0,02	0,01	0,01	0,00	0,360	0,923	73,31	476
	B	0,23	0,40	0,16	0,07	0,04	0,05	0,02	0,01	0,00	0,00	0,00	0,474	0,987	64,86	627
	C	0,21	0,43	0,11	0,06	0,03	0,05	0,01	0,04	0,03	0,02	0,00	0,427	0,980	68,34	565
	Média	0,22	0,41	0,14	0,07	0,04	0,04	0,01	0,02	0,01	0,01	0,00	0,420	0,963	68,84	556

(*) Steady-state Inclusion Entrainment Rate (SIER); (**) $\eta_r = 100\% - \text{RRI}$; Residual Ratio of Inclusions; (CHAKRABORTY, 2010).

Tabela A.11: Distribuição granulométrica e eficiência de partícula da APS III para distribuidor com diques e barragens, e com injeção de gás a 56cm da válvula longa.

Vazão (NI/min)	Teste Posição 56cm	Distribuição Granulométrica (μm)											Taxa* (p/s)	R ²	η_r^{**} Global (%)	Nº Part.
		25,0 a 30,0	30,1 a 35,0	35,1 a 40,0	40,1 a 50,0	50,1 a 60,0	60,1 a 70,0	70,1 a 80,0	80,1 a 100,0	100,1 a 120,0	120,1 a 140,0	>140				
1	A	0,29	0,41	0,12	0,08	0,04	0,02	0,02	0,01	0,00	0,00	0,00	0,585	0,992	56,63	772
	B	0,21	0,44	0,14	0,08	0,05	0,03	0,02	0,02	0,00	0,00	0,01	0,533	0,977	60,48	704
	C	0,27	0,39	0,15	0,05	0,04	0,04	0,01	0,01	0,01	0,01	0,00	0,562	0,988	58,33	742
	Média	0,26	0,41	0,14	0,07	0,04	0,03	0,02	0,01	0,00	0,00	0,00	0,560	0,986	58,48	739
2	A	0,22	0,39	0,17	0,07	0,06	0,05	0,01	0,02	0,01	0,00	0,00	0,299	0,938	77,83	395
	B	0,26	0,42	0,15	0,07	0,04	0,03	0,02	0,02	0,01	0,00	0,00	0,392	0,982	70,94	517
	C	0,24	0,40	0,17	0,07	0,04	0,05	0,02	0,01	0,00	0,00	0,00	0,383	0,972	71,60	506
	Média	0,24	0,40	0,16	0,07	0,05	0,04	0,02	0,02	0,01	0,00	0,00	0,358	0,964	73,46	473
3	A	0,28	0,37	0,16	0,07	0,04	0,04	0,02	0,02	0,00	0,00	0,00	0,370	0,979	72,57	488
	B	0,18	0,40	0,17	0,07	0,04	0,03	0,02	0,04	0,02	0,02	0,01	0,365	0,995	72,94	482
	C	0,22	0,41	0,15	0,07	0,05	0,05	0,02	0,02	0,01	0,00	0,00	0,329	0,985	75,61	434
	Média	0,23	0,39	0,16	0,07	0,04	0,04	0,02	0,03	0,01	0,01	0,00	0,355	0,986	73,71	468
4	A	0,26	0,34	0,13	0,07	0,05	0,06	0,03	0,04	0,01	0,01	0,00	0,509	0,995	62,26	672
	B	0,25	0,38	0,18	0,07	0,03	0,02	0,02	0,03	0,01	0,00	0,00	0,566	0,994	58,04	747
	C	0,32	0,36	0,15	0,06	0,03	0,03	0,02	0,02	0,01	0,00	0,00	0,491	0,958	63,60	648
	Média	0,28	0,36	0,15	0,07	0,04	0,04	0,02	0,03	0,01	0,00	0,00	0,522	0,982	61,30	689
8	A	0,25	0,36	0,16	0,08	0,05	0,04	0,03	0,02	0,00	0,00	0,00	0,516	0,984	61,74	681
	B	0,26	0,39	0,14	0,05	0,05	0,05	0,02	0,03	0,01	0,00	0,00	0,473	0,991	64,93	624
	C	0,21	0,36	0,18	0,08	0,05	0,05	0,02	0,03	0,01	0,01	0,00	0,599	0,990	55,59	791
	Média	0,24	0,37	0,16	0,07	0,05	0,05	0,02	0,03	0,01	0,00	0,00	0,529	0,988	60,75	699

(*) Steady-state Inclusion Entrainment Rate (SIER); (**) $\eta_r = 100\% - \text{RRI}$; Residual Ratio of Inclusions; (CHAKRABORTY, 2010).

Tabela A.12: Distribuição granulométrica e eficiência de partícula da APS III para distribuidor com diques e barragens, e com injeção de gás a 84cm da válvula longa.

Vazão (NI/min)	Teste Posição 84cm	Distribuição Granulométrica (μm)											Taxa* (p/s)	R ²	η_r^{**} Global (%)	Nº Part.
		25,0 a 30,0	30,1 a 35,0	35,1 a 40,0	40,1 a 50,0	50,1 a 60,0	60,1 a 70,0	70,1 a 80,0	80,1 a 100,0	100,1 a 120,0	120,1 a 140,0	>140				
1	A	0,22	0,41	0,16	0,07	0,05	0,05	0,02	0,02	0,01	0,00	0,00	0,505	0,939	62,56	667
	B	0,20	0,36	0,18	0,09	0,07	0,03	0,02	0,02	0,01	0,01	0,01	0,441	0,964	67,30	582
	C	0,21	0,38	0,17	0,07	0,03	0,05	0,02	0,03	0,02	0,01	0,00	0,635	0,968	52,92	838
	Média	0,21	0,38	0,17	0,08	0,05	0,04	0,02	0,02	0,01	0,01	0,00	0,527	0,957	60,93	696
2	A	0,20	0,40	0,14	0,09	0,06	0,05	0,02	0,01	0,01	0,00	0,00	0,494	0,979	63,37	652
	B	0,23	0,40	0,14	0,08	0,05	0,04	0,02	0,02	0,01	0,00	0,00	0,383	0,914	71,60	506
	C	0,21	0,40	0,17	0,07	0,07	0,04	0,01	0,02	0,00	0,00	0,00	0,431	0,960	68,04	569
	Média	0,21	0,40	0,15	0,08	0,06	0,04	0,02	0,02	0,01	0,00	0,00	0,436	0,951	67,67	576
3	A	0,22	0,41	0,16	0,08	0,04	0,04	0,02	0,01	0,01	0,01	0,00	0,471	0,986	65,08	622
	B	0,25	0,39	0,16	0,08	0,04	0,03	0,02	0,02	0,01	0,00	0,00	0,356	0,983	73,61	470
	C	0,22	0,34	0,15	0,07	0,04	0,06	0,03	0,06	0,02	0,01	0,00	0,455	0,991	66,26	601
	Média	0,23	0,38	0,16	0,08	0,04	0,04	0,02	0,03	0,01	0,01	0,00	0,427	0,987	68,32	564
4	A	0,20	0,35	0,17	0,10	0,05	0,04	0,02	0,04	0,02	0,00	0,00	0,439	0,971	67,45	579
	B	0,23	0,42	0,17	0,09	0,02	0,05	0,01	0,01	0,00	0,01	0,00	0,390	0,953	71,08	515
	C	0,20	0,40	0,16	0,09	0,06	0,05	0,02	0,02	0,01	0,00	0,00	0,452	0,982	66,49	597
	Média	0,21	0,39	0,17	0,09	0,04	0,05	0,02	0,02	0,01	0,00	0,00	0,427	0,969	68,34	564
8	A	0,20	0,41	0,16	0,07	0,04	0,05	0,03	0,02	0,01	0,01	0,01	0,580	0,994	64,04	766
	B	0,24	0,36	0,14	0,08	0,05	0,05	0,02	0,03	0,01	0,01	0,00	0,589	0,992	56,33	777
	C	0,21	0,38	0,16	0,08	0,06	0,05	0,02	0,02	0,01	0,01	0,00	0,521	0,988	61,37	688
	Média	0,22	0,38	0,15	0,08	0,05	0,05	0,02	0,02	0,01	0,01	0,00	0,563	0,991	60,58	744

(*) Steady-state Inclusion Entrainment Rate (SIER); (**) $\eta_r = 100\% - \text{RRI}$; Residual Ratio of Inclusions; (CHAKRABORTY, 2010).

Tabela A.13: Distribuição granulométrica e eficiência de partícula da APS III para distribuidor com diques, barragens, barreiras laterais e com injeção de gás a 56cm da válvula longa.

Vazão (NI/min)	Teste Posição 56cm	Distribuição Granulométrica (μm)											Taxa* (p/s)	R ²	η_r^{**} Global (%)	Nº Part.	
		25,0 a 30,0	30,1 a 35,0	35,1 a 40,0	40,1 a 50,0	50,1 a 60,0	60,1 a 70,0	70,1 a 80,0	80,1 a 100,0	100,1 a 120,0	120,1 a 140,0	>140					
1	A	0,20	0,36	0,15	0,08	0,04	0,06	0,03	0,04	0,02	0,01	0,01	0,01	0,571	0,995	57,66	754
	B	0,22	0,38	0,16	0,08	0,04	0,05	0,03	0,02	0,01	0,01	0,00	0,00	0,578	0,993	57,12	763
	C	0,25	0,37	0,17	0,07	0,03	0,05	0,03	0,03	0,01	0,00	0,00	0,00	0,511	0,995	62,09	675
	Média	0,22	0,37	0,16	0,08	0,04	0,05	0,03	0,03	0,01	0,01	0,00	0,00	0,554	0,994	58,96	731
2	A	0,27	0,36	0,15	0,06	0,04	0,05	0,02	0,03	0,01	0,00	0,00	0,00	0,380	0,946	71,82	502
	B	0,23	0,38	0,16	0,07	0,04	0,04	0,02	0,03	0,00	0,01	0,00	0,00	0,344	0,969	74,51	454
	C	0,20	0,42	0,15	0,06	0,04	0,04	0,02	0,03	0,02	0,01	0,01	0,01	0,362	0,994	73,19	477
	Média	0,23	0,39	0,15	0,06	0,04	0,04	0,02	0,03	0,01	0,01	0,00	0,00	0,362	0,970	73,17	478
3	A	0,18	0,41	0,18	0,08	0,05	0,03	0,02	0,03	0,01	0,01	0,00	0,00	0,396	0,970	70,62	523
	B	0,20	0,36	0,16	0,09	0,05	0,06	0,02	0,03	0,02	0,02	0,01	0,01	0,361	0,981	73,25	476
	C	0,21	0,39	0,18	0,07	0,04	0,05	0,02	0,02	0,01	0,00	0,00	0,00	0,388	0,970	71,25	512
	Média	0,20	0,39	0,17	0,08	0,05	0,05	0,02	0,03	0,01	0,01	0,00	0,00	0,382	0,974	71,71	504
4	A	0,21	0,45	0,15	0,08	0,03	0,04	0,01	0,02	0,01	0,00	0,00	0,00	0,471	0,966	65,06	622
	B	0,21	0,39	0,18	0,08	0,02	0,05	0,02	0,02	0,00	0,01	0,00	0,00	0,520	0,958	61,42	687
	C	0,31	0,40	0,15	0,05	0,03	0,03	0,01	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,450	0,994	66,64	594
	Média	0,24	0,41	0,16	0,07	0,03	0,04	0,01	0,02	0,00	0,00	0,00	0,00	0,481	0,973	64,37	634

(*) Steady-state Inclusion Entrainment Rate (SIER); (**) $\eta_r = 100\% - \text{RRI}$; Residual Ratio of Inclusions; (CHAKRABORTY, 2010).

Tabela A.14: Distribuição granulométrica e eficiência de partícula da APS III para distribuidor com diques e barragens, e com injeção de gás a 56cm da válvula longa em um plugue com obstrução parcial.

Conf.	Teste Posição 28cm	Distribuição Granulométrica (μm)											Taxa* (p/s)	R ²	η_r^{**} Global (%)	Nº Part.	
		25,0 a 30,0	30,1 a 35,0	35,1 a 40,0	40,1 a 50,0	50,1 a 60,0	60,1 a 70,0	70,1 a 80,0	80,1 a 100,0	100,1 a 120,0	120,1 a 140,0	>140					
Sim. 20%	A	0,23	0,35	0,19	0,09	0,04	0,05	0,02	0,02	0,01	0,00	0,00	0,00	0,356	0,971	73,61	470
	B	0,22	0,42	0,13	0,06	0,05	0,04	0,02	0,03	0,02	0,01	0,01	0,00	0,339	0,934	74,87	447
	C	0,23	0,41	0,17	0,07	0,02	0,03	0,01	0,03	0,01	0,01	0,01	0,00	0,411	0,942	69,56	542
	Média	0,23	0,39	0,16	0,07	0,04	0,04	0,02	0,03	0,01	0,01	0,01	0,00	0,368	0,949	72,68	486
Sim. 40%	A	0,27	0,38	0,16	0,09	0,04	0,03	0,01	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,397	0,975	70,59	524
	B	0,25	0,41	0,18	0,06	0,03	0,04	0,01	0,02	0,01	0,00	0,00	0,00	0,370	0,996	72,58	488
	C	0,27	0,42	0,15	0,05	0,03	0,04	0,02	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,440	0,988	67,40	580
	Média	0,26	0,40	0,16	0,07	0,03	0,04	0,01	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,402	0,986	70,19	531
Sim. 60%	A	0,23	0,39	0,12	0,08	0,05	0,05	0,02	0,03	0,02	0,00	0,01	0,01	0,485	0,977	64,04	640
	B	0,27	0,37	0,15	0,08	0,04	0,04	0,01	0,01	0,01	0,00	0,00	0,00	0,476	0,923	64,75	628
	C	0,27	0,39	0,14	0,07	0,04	0,03	0,02	0,02	0,01	0,00	0,00	0,00	0,503	0,971	62,68	664
	Média	0,26	0,38	0,14	0,08	0,04	0,04	0,02	0,02	0,01	0,00	0,00	0,00	0,488	0,957	63,82	644
Assim. 25%	A	0,20	0,35	0,14	0,08	0,04	0,04	0,04	0,05	0,02	0,03	0,00	0,00	0,394	0,985	70,76	521
	B	0,24	0,35	0,15	0,08	0,06	0,05	0,02	0,03	0,00	0,00	0,01	0,01	0,436	0,991	67,68	575
	C	0,27	0,41	0,15	0,06	0,03	0,04	0,01	0,01	0,00	0,01	0,00	0,00	0,502	0,996	62,78	663
	Média	0,24	0,37	0,15	0,07	0,04	0,04	0,02	0,03	0,01	0,01	0,00	0,00	0,444	0,991	67,07	586
Assim. 50%	A	0,22	0,45	0,14	0,07	0,04	0,03	0,03	0,01	0,01	0,00	0,00	0,00	0,672	0,975	50,20	887
	B	0,19	0,39	0,18	0,07	0,04	0,07	0,02	0,02	0,01	0,01	0,00	0,00	0,436	0,986	67,70	575
	C	0,29	0,39	0,12	0,08	0,04	0,04	0,03	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,501	0,985	62,85	661
	Média	0,23	0,41	0,15	0,07	0,04	0,05	0,03	0,01	0,01	0,01	0,00	0,00	0,536	0,982	60,25	708

(*) Steady-state Inclusion Entrainment Rate (SIER); (**) $\eta_r = 100\% - \text{RRI}$; Residual Ratio of Inclusions; (CHAKRABORTY, 2010).