

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA
METALÚRGICA, MATERIAIS E DE MINAS

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

“ANÁLISE DA REMOÇÃO DE INCLUSÕES DO AÇO DURANTE O
ESGOTAMENTO DA PANELA APÓS INJEÇÃO DE GAS INERTE
ATRAVÉS DE MODELAMENTO FÍSICO”

Autor: Pedro Henrique da Rocha Silva

Orientador: Prof. Roberto Parreiras Tavares

Junho de 2018

Pedro Henrique da Rocha Silva

ANÁLISE DA REMOÇÃO DE INCLUSÕES DO AÇO DURANTE O
ESGOTAMENTO DA PANELA APÓS INJEÇÃO DE GAS INERTE
ATRAVÉS DE MODELAMENTO FÍSICO

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas da Escola de Engenharia 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 Gerais

Escola de Engenharia

2018

| | |
|---------------|--|
| S586a | <p>Silva, Pedro Henrique da Rocha. Análise da remoção de inclusões do aço durante o esgotamento da panela após injeção de gás inerte através de modelamento físico [manuscrito] / Pedro Henrique da Rocha Silva.– 2018. xiii, 120 f., enc.: il.</p> <p>Orientador: Roberto Parreiras Tavares.</p> <p>Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia.</p> <p>Anexos: f. 117-120.</p> <p>Inclui bibliografia.</p> <p>1. Engenharia metalúrgica - Teses. 2. Metalurgia extrativa - Teses. 3. Aço - Inclusões - Teses. 4. Siderurgia - Teses. I. Tavares, Roberto Parreiras. II. Universidade Federal de Minas Gerais. Escola de Engenharia. III. Título.</p> |
| CDU: 669(043) | |

A todos aqueles que sempre me fortalecem:

Meu pai e irmãos: Flávio, João e Luís.

Agradecimentos

Agradeço ao PPGEM, pela oportunidade de fazer um trabalho com ajuda de profissionais tão dedicados.

Agradeço à CAPES e FAPEMIG pela ajuda financeira aos projetos feitos na UFMG.

Agradeço ao professor Roberto Parreiras Tavares pela brilhantíssima orientação, pelo grande aprendizado e por todas as contribuições feitas ao trabalho.

Agradeço ao Dr. Breno Totti Maia e à professora Aline Lima da Silva pelas contribuições feitas ao trabalho.

Agradeço a equipe do LaSiP por todo trabalho, em especial ao Paulo Pádua, Rafael Silva Alves, Geraldo Raimundo da Silva Pereira, Raquel de Souza Correa, Daniel Andrade de Jesus e Isabella Grama Camargo.

Agradeço a todos profissionais do PPGEM, DeMet e DeMin que sempre foram muito solícitos quando foi preciso.

Agradeço aos professores Alexandre Bracarense e Paulo Modenesi, pela ajuda com equipamentos e técnicas de filmagem para o projeto.

SUMÁRIO

| | |
|--|------|
| LISTA DE FIGURAS..... | vii |
| LISTA DE TABELAS..... | x |
| LISTA DE NOTAÇÕES..... | xi |
| RESUMO..... | xiii |
| ABSTRACT..... | xiv |
| 1. INTRODUÇÃO..... | 1 |
| 2. OBJETIVO GERAL..... | 3 |
| 2.1. Objetivos Específicos..... | 3 |
| 3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA..... | 4 |
| 3.1. Siderurgia..... | 4 |
| 3.1.1. Refino secundário (metalurgia de panela)..... | 5 |
| 3.1.1.1. Panela de aço..... | 6 |
| 3.1.1.2. Operações na panela..... | 7 |
| 3.2. Inclusões..... | 7 |
| 3.2.1. Desoxidação..... | 9 |
| 3.2.2. Inclusões endógenas e exógenas..... | 11 |
| 3.2.3. Efeitos das inclusões..... | 13 |
| 3.2.4. Mecanismos para coalescência de inclusões..... | 17 |
| 3.2.5. Mecanismos para remoção de inclusões..... | 19 |
| 3.3. Modelamento Físico..... | 28 |
| 3.3.1. Critérios de similaridade..... | 29 |
| 3.3.1.1. Similaridade geométrica..... | 29 |
| 3.3.1.2. Similaridade mecânica..... | 31 |
| 3.3.1.2.1. Similaridade estática..... | 31 |
| 3.3.1.2.2. Similaridade dinâmica..... | 31 |
| 3.3.1.2.3. Similaridade cinemática..... | 36 |
| 3.3.2 Escolha do modelo a frio..... | 37 |
| 3.3.3. Plugue poroso..... | 37 |
| 3.4. Trabalhos Semelhantes..... | 40 |
| 4. METODOLOGIA..... | 53 |
| 4.1. Modelo Físico da Panela..... | 53 |
| 4.2. Sonda APS..... | 53 |
| 4.2.1. Limites de Medição da Sonda APS..... | 57 |
| 4.2.2. Densidade de polpa para injeção..... | 58 |
| 4.3. Plugues Porosos Utilizados..... | 59 |
| 4.4. Partículas que Simulam as Inclusões..... | 60 |
| 4.5. Etapas da Realização dos Ensaios..... | 60 |
| 4.6. Variáveis analisadas..... | 64 |
| 4.6.1. Relação das variáveis..... | 65 |
| 4.6.2. Tratamentos das análises..... | 66 |
| 4.7. Medição do diâmetro das bolhas..... | 66 |
| 5. RESULTADOS E DISCUSSÃO..... | 69 |
| 5.1. Perfil de dispersão de pluma..... | 69 |
| 5.2. Diâmetro das Bolhas..... | 71 |
| 5.3. Testes de Contagem de Inclusões..... | 78 |
| 5.3.1. Codificação para os testes..... | 78 |
| 5.3.2. Tratamento dos dados dos testes..... | 79 |
| 5.3.3. Teste base..... | 82 |
| 5.3.4. Resultados gerais dos testes para os plugues..... | 87 |
| 5.4. Efeitos da Área do Plugue e Vazão de Gás..... | 88 |
| 5.5. Efeito da Reversão das Inclusões..... | 94 |
| 5.6. Efeito do Tempo de Injeção de Gás..... | 97 |

| | | |
|--------|---|-----|
| 5.7 | Efeito do Posicionamento do Plugue | 99 |
| 5.8. | Efeito da Granulometria das Partículas em Sua Remoção | 101 |
| 5.8.1. | Tratamento dos dados..... | 102 |
| 5.8.2. | Resultados dos testes | 104 |
| 5.9. | Análise do Diâmetro de Bolhas e Remoção de Inclusões..... | 108 |
| 6. | CONCLUSOES..... | 110 |
| 7. | RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS..... | 113 |
| 8. | REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 114 |
| | ANEXO A..... | 117 |

LISTA DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 3.1 – Fluxograma de uma aciaria (Usiminas, 2014) | 5 |
| Figura 3.2 – Desenho esquemático de uma panela de aciaria (Bragança, 2013)..... | 6 |
| Figura 3.3 – Cinética de desoxidação por silício (Mats Söder, 2001) | 10 |
| Figura 3.4 – Fontes geradoras de inclusões (Payandeh e Soltanieh, 2007)..... | 12 |
| Figura 3.5 – Diferentes tipos de inclusões e seu efeito após laminadas (Van Ende, 2010) | 14 |
| Figura 3.6 – Regiões mais susceptíveis ao “clogging” (Bagatini, 2014) | 15 |
| Figura 3.7 - Efeito do acúmulo das inclusões na válvula submersa. a) aço baixo carbono acalmado ao alumínio b) aço ultra baixo carbono acalmado ao alumínio c) seção da válvula de aço ultra baixo carbono (Yuan et al., 2008) | 16 |
| Figura 3.8 – Colisão devido ao cisalhamento laminar | 19 |
| Figura 3.9 – Esquema dos mecanismos de captura das inclusões (Wang, 1996)..... | 22 |
| Figura 3.10 – Fenômenos de remoção de inclusão por rastro de bolha (Yang et al., 2014) | 25 |
| Figura 3.11 – Efeitos das bolhas no coalescimento e remoção das inclusões (Lou e Zhu, 2014) | 26 |
| Figura 3.12 – Similaridade geométrica em uma panela de aciaria (Mazumdar, 2010) 30 | |
| Figura 3.13 – Escoamento de liga em um modelo (Mazumdar e Evans, 2010)..... | 36 |
| Figura 3.14 – Diferentes regimes de bolhas para diferentes vazões. A) 3L/min, b) 8L/min e c) 18L/min (Alexiadis, 2007) | 38 |
| Figura 3.15 – Padrões de bolha de acordo com a fração de vazios e N_e (Alexiadis, 2007) | 39 |
| Figura 3.16 – Curvas de RRI (Chakraborty, 2010) | 41 |
| Figura 3.17 – Diâmetro e massa de inclusões fixadas a cada bolha (Thomas et al., 2007) | 42 |
| Figura 3.18 – Massa de inclusões fixadas de acordo com o diâmetro da bolha e com a quantidade inicial de oxigênio (Thomas et al., 2007) | 43 |
| Figura 3.19 – Taxa de remoção de inclusões por diferentes mecanismos em a) plugue centralizado e b) dois plugues simétricos (Lou e Zhu, 2014)..... | 44 |
| Figura 3.20 – Remoção de inclusões por diversos mecanismos em configurações diferentes de injeção de gás (Lou e Zhu, 2014) | 45 |
| Figura 3.21 – Influência do ângulo entre as duas ventaneiras para remoção de inclusões (Lou e Zhu, 2014)..... | 46 |
| Figura 3.22 – Influência da vazão de gás na remoção de inclusões (Lou e Zhu, 2014) | 47 |
| Figura 3.23 – Distribuição de tamanho das inclusões com o passar do tempo (Kwon, Zang e Lee, 2008) | 48 |
| Figura 3.24 – Coalescimento das inclusões com o tempo após adição de alumínio (Kwon, Zang e Lee, 2008) | 49 |
| Figura 3.25 – Diâmetro e massa das inclusões com o tempo após adição de alumínio (Kwon, Zang e Lee, 2008) | 50 |
| Figura 3.26 – Influência da vazão na remoção das inclusões (Chang et al., 2016) | 51 |
| Figura 4.1 – Esquema do modelo de panela usado para os testes | 53 |
| Figura 4.2A – Desenho esquemático com dimensões da sonda APS | 54 |
| Figura 4.2B – Sonda APS | 54 |
| Figura 4.3 – Esquema de funcionamento da sonda APS (Chakraborty, 2010)..... | 56 |
| Figura 4.4 – Foto dos plugues utilizados na pesquisa..... | 59 |
| Figura 4.5 – Análise de distribuição granulométrica da amostra de boro-silicato utilizada para simulação de inclusões..... | 60 |
| Figura 4.6 – Fundo da panela com os aparatos para os testes | 61 |
| Figura 4.7 – Foto da sonda APS acoplada ao dreno da panela | 61 |
| Figura 4.8 – Tempo de homogeneização da panela | 63 |
| Figura 4.9 – Esquema do comportamento das inclusões durante a drenagem da panela..... | 64 |

| | |
|---|----|
| Figura 4.10 – Esquema do fundo da panela com posicionamento do plugue centralizado à esquerda e descentralizado à direita | 65 |
| Figura 4.11 - Medição de volume das bolhas na panela | 67 |
| Figura 4.12 – Foto tirada para medição do diâmetro das bolhas..... | 68 |
| Figura 5.1 – Evolução da pluma com o aumento da vazão para o plugue 1 ($15,00 \times 10^{-4} \text{m}^2$ de área superficial) | 69 |
| Figura 5.2 – Evolução da pluma com o aumento da vazão para o plugue 2 ($8,6 \cdot 10^{-4} \text{m}^2$ de área superficial) | 70 |
| Figura 5.3 – Evolução da pluma com o aumento de vazão para o plugue 3 ($3,6 \cdot 10^{-4} \text{m}^2$ de área superficial) | 70 |
| Figura 5.4 – Distribuição de tamanho das bolhas em função da vazão para o plugue 1, na altura de 50cm. | 72 |
| Figura 5.5 – Distribuição de tamanho das bolhas em função das vazões para o plugue 1, na altura de 30cm. | 73 |
| Figura 5.6 – Distribuição de tamanho das bolhas em função das vazões para o plugue 1, altura de 10cm. | 73 |
| Figura 5.7– Distribuição de tamanho das bolhas em função da vazão para o plugue 2 na altura de 50cm | 74 |
| Figura 5.8 – Distribuição de tamanho das bolhas em função da vazão para o plugue 3 na altura de 50cm | 74 |
| Figura 5.9 – Diâmetros das bolhas em mm em relação à vazão em NL/min para os plugues estudados na altura de 0,5m | 75 |
| Figura 5.10 – Variação dos diâmetros das bolhas com a vazão para as 3 alturas estudadas para o plugue 1..... | 76 |
| Figura 5.11 – Diâmetro das bolhas em relação à velocidade terminal das partículas.. | 77 |
| Figura 5.12 – Resultados para as duplicatas nos três tempos para o plugue 1 na vazão de 2NL/min. | 79 |
| Figura 5.13 – Média das duplicatas para o plugue 1, vazão de 2NL/min e nos três tempos estudados. | 80 |
| Figura 5.14 – Variação da vazão de sucção da APS com a drenagem da panela | 80 |
| Figura 5.15 – Contagem de inclusões para o plugue 1, vazão de 2NL/min nos três tempos estudados normalizado | 82 |
| Figura 5.16 – Variação da vazão de drenagem da panela em função do tempo | 84 |
| Figura 5.17 – Velocidade de descida da água na panela em função do tempo de drenagem | 85 |
| Figura 5.18 – Perfil de velocidades e de fração volumétrica de gás no plano de simetria do modelo físico da panela - (LaSiP – UFMG) | 86 |
| Figura 5.19 – Resultado normalizado para teste base de remoção de inclusões | 87 |
| Figura 5.20 – PRI em função da vazão de gás para todos os plugues, no tempo de 27 segundos e posição descentralizada. | 89 |
| Figura 5.21 – PRI em função do plugue para posição centralizada, 81 segundos e diversas vazões. | 89 |
| Figura 5.22 – PRI em função do plugue para posição centralizada nos 3 tempos estudados. | 90 |
| Figura 5.23 – PRI em função do plugue na posição descentralizada para todas as vazões estudadas no tempo de 81s..... | 91 |
| Figura 5.24 – PRI em função do plugue para os plugues na posição descentralizada nos tempos estudados..... | 91 |
| Figura 5.25 – PRI em função de Q/A para todos os plugues na posição descentralizada e tempo de borbulhamento de 27 segundos. | 93 |
| Figura 5.26 – PRI em função de Q/A para todos os plugues na posição descentralizada para 54 segundos de tratamento (à esquerda) e 81 segundos (à direita) | 93 |
| Figura 5.27 – PRI em função de Q/A para todos os plugues na posição centralizada para os tempos de 54 segundos (à esquerda) e 81 segundos (à direita) | 94 |

| | |
|--|-----|
| Figura 5.28 – Evolução da reversão de partículas durante o borbulhamento de gás para o plugue centralizado na vazão de 8NL/min. | 95 |
| Figura 5.29 – Borbulhamento de gás para o plugue 2 na vazão de 4NL/min após 30s e 60s de tratamento..... | 96 |
| Figura 5.30 – Variação da reversão de partículas com a vazão de gás para o plugue 2, com 30 segundos de tratamento..... | 97 |
| Figura 5.31 – PRI em função do tempo de injeção de gás para todos os plugues nas vazões de 1 e 2NI/min. | 98 |
| Figura 5.32 – PRI em função do tempo de injeção de gás para todos os plugues nas vazões de 8 e 10NI/min. | 98 |
| Figura 5.33 – Histograma das diferenças de PRI para as mesmas condições entre plugue centralizado e descentralizado | 100 |
| Figura 5.34 – Diferença de PRI para as mesmas condições entre plugue centralizado e descentralizado por plugue..... | 101 |
| Figura 5.35 – Variação da fração volumétrica de cada tamanho de inclusões durante a drenagem da panela para o teste base..... | 103 |
| Figura 5.36 – Faixa granulométrica das inclusões detectadas pela sonda APS para os testes base e sua média | 103 |
| Figura 5.37 – Porcentagem de remoção de inclusões para o plugue 1 descentralizado, na vazão de 1NI/min nas menores faixas granulométricas..... | 104 |
| Figura 5.38 – Porcentagem de remoção de inclusões para o plugue 1 descentralizado, na vazão de 8NI/min nas menores faixas granulométricas..... | 104 |
| Figura 5.39 – Porcentagem de remoção de inclusões para o plugue 1 descentralizado, na vazão de 1NI/min nas maiores faixas granulométricas..... | 106 |
| Figura 5.40 – Porcentagem de remoção de inclusões para o plugue 1 descentralizado, na vazão de 8NI/min nas maiores faixas granulométricas..... | 106 |
| Figura 5.41 – Porcentagem de remoção de inclusões em função do tamanho de bolhas para 27 segundos de injeção no plugue descentralizado (à esquerda) e centralizado (à direita) | 108 |
| Figura 5.42 - Porcentagem de remoção de inclusões em função do tamanho de bolhas para 81 segundos de injeção no plugue descentralizado (à esquerda) e centralizado (à direita) | 109 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|--|----|
| Tabela III.1 - Restrições para impurezas no aço por aplicação (Zhang, 2006)..... | 8 |
| Tabela III.2 – Restrições de impurezas no aço e tamanhos críticos de inclusões (Van Ende, 2010)..... | 9 |
| Tabela III.3 – Inclusões achadas em diferentes tipos de “clogging” (Zhang, 2006) | 17 |
| Tabela III.4 – Velocidade de ascensão no aço para diferentes inclusões (Hassal e Mills,1998) | 20 |
| Tabela III.5 – Exemplos de modelamentos físicos a frio e seus objetivos | 28 |
| Tabela III.6 – Propriedades da água e do aço (Elias, 2010)..... | 37 |
| Tabela III.7 – Regimes de bolhas em relação ao fator Q/A (Anagbo e Brimacombe, 1990) | 38 |
| Tabela IV.1 – Relação dos plugues construídos e suas áreas | 59 |
| Tabela IV.2 – Relação entre variáveis na indústria e no modelo..... | 65 |
| Tabela V.1 – Regimes de dispersão da pluma para todos os plugues em todas as vazões | 71 |
| Tabela V.2 – Comparação entre o trabalho atual e o trabalho de Anagbo e Brimacombe (1990) | 71 |
| Tabela V.3 – Variáveis usadas para construção do gráfico 5.11 | 77 |
| Tabela V.4 – Codificação para os testes realizados..... | 78 |
| Tabela V.5 - Velocidade de ascensão das partículas de boro-silicato na água de acordo com seu raio e tempo para chegar ao topo caso estejam no fundo da panela | 83 |
| Tabela V.6 – Velocidade das partículas em relação ao dreno da panela | 85 |
| Tabela V.7 – Médias das porcentagens de remoção de inclusão para os plugues nas posições centralizada e descentralizada..... | 88 |

LISTA DE NOTAÇÕES

a = diâmetro do eixo vertical da bolha (mm);
 A_p = Área do plugue (m^2);
 b = diâmetro do eixo horizontal da bolha (mm);
 d = Diâmetro da partícula (m);
 D_b = Diâmetro da bolha (mm);
 D_{equiv} = diâmetro equivalente da esfera de mesmo volume do elipsoide (mm);
 d_0 = Diâmetro de bolha (m);
 D = Diâmetro do orifício (m);
 D_b = Diâmetro de bolha (mm);
 D_{bol} = diâmetro da bolha de argônio (m);
 D_{mod} = Diâmetro do modelo;
 D_{prot} = Diâmetro do protótipo;
 Eu = Número de Euler;
 Fr = Número de Froude;
 F_I = Forças relativas à inércia;
 F_P = Forças relativas à pressão;
 F_V = Forças relativas à viscosidade;
 F_G = Forças relativas à gravidade;
 g = Aceleração da gravidade (m/s^2);
 g_x = Aceleração da gravidade na direção x (m/s^2);
 $H_{aço}$ = Altura do aço na panela (m);
 h_v = Espessura do vidro (m);
 i = Corrente elétrica (A);
 L = Dimensão característica (m);
 L_{mod} = Altura do modelo (m);
 L_{prot} = Altura do protótipo (m);
 M = massa de inclusões fixadas por cada bolha (kg);
 $N_p(t)$ = número de partículas contadas no tempo t;
 $NPN(t)$: número de partículas contadas no tempo t, após a normalização;
 $NTIB$ = Número total de inclusões no teste base;
 $NTIT$ = Número total de inclusões no teste aplicado;
 $Oppm$ = quantidade de oxigênio no aço (ppm);
 P = Pressão no ponto (Pa);
 P = Probabilidade geral de uma bolha capturar uma inclusão;
 Pa = Probabilidade de captura da inclusão pelos diversos mecanismos;
 Pc = Probabilidade de colisão da bolha com a inclusão;
 PRI = Porcentagem de remoção de inclusões (%);
 $PRI_{(cent.)}$ = Porcentagem de Remoção de Inclusões na posição centralizada (%);
 $PRI_{(descent.)}$ = Porcentagem de Remoção de Inclusões na posição descentralizada;
 Q = Vazão de gás (m^3/s);
 Q_{APS} = Vazão de sucção da APS (ml/s);
 Q_{mod} = Vazão de gás no modelo;
 Q_{pan} = Vazão de drenagem da panela (l/min);
 Q_{prot} = Vazão de gás no protótipo;
 r = Raio da partícula (m);
 $R_{inc,m}$ = Raio da inclusão no modelo;
 $R_{inc,p}$ = Raio da inclusão no protótipo;
 Re = Número de Reynolds;
 R = Resistência elétrica (Ω);
 ΔR = Incremento na resistência devido a uma partícula (Ω);
 t = Tempo (s);
 $T_{aço}$ = Temperatura do aço líquido na indústria (K);
 $T_{água}$ = Temperatura da água no modelo (K);
 T_{mod} = Tempo no modelo;

T_{prot} = Tempo no protótipo;
 U = velocidade do líquido (m/s);
 $U_{p,\text{mod}}$ = Velocidade do líquido no modelo;
 $U_{p,\text{prot}}$ = Velocidade do líquido no protótipo;
 V_{elip} = volume do elipsoide (mm^3);
 v_x = Velocidade na direção x (m/s);
 v = Velocidade (m/s);
 V_{ind} = Vazão na indústria;
 V_{DAP} = Velocidade de descida da água na panela (cm/min);
 Vol = Volume do orifício da APS (m^3);
 V = Tensão (v);
 X = distância percorrida pela bolha (m);
 ρ = Densidade do líquido (kg/m^3);
 ρ_e = Resistividade elétrica do fluido ($\Omega \cdot \text{m}$);
 ρ_{mp} = Densidade máxima de partículas aplicando o fator de segurança (m^{-3});
 ρ_p = Densidade máxima de partículas (m^{-3});
 ρ_1 = Densidade da substância de maior densidade (kg/m^3);
 ρ_2 = Densidade da substância de menor densidade (kg/m^3);
 ρ_{inc} = Densidade da inclusão;
 $\rho_{\text{aço}}$ = Densidade do aço;
 $\rho_{\text{água}}$ = Densidade da água;
 μ = Viscosidade do líquido (Pa.s);
 ν = Viscosidade cinemática (m^2/s);
 ε = Taxa de dissipação de energia cinética de turbulência (m^2/s^3);
 σ = Tensão superficial (N/m);
 λ = Fator de escala.

RESUMO

A siderurgia é um grande ramo industrial e base econômica de muitos países. A busca por aços de maior qualidade e feitos com menor custo se tornou uma necessidade e os aços com baixos níveis de inclusões, “clean steel”, se tornaram cada vez mais visados. O presente trabalho teve como objetivo investigar da produção de aços com menor quantidade de inclusões através do borbulhamento de gás por plugue poroso na panela de aciaria. Foi construído um modelo a frio em escala 1:5 de uma panela de aciaria e nele foram feitos testes analisando a influência da vazão e tempo de injeção de gás, posição e área superficial do plugue a fim de melhorar a remoção das inclusões. Além disso, foram avaliadas as distribuições granulométricas das inclusões e os tamanhos das bolhas geradas durante a injeção de gás. Foram propostos dois efeitos, o de remoção e o de reversão das inclusões. Ambos os efeitos agem em todas variáveis, em momentos diferentes, mostrando que existem pontos ótimos para cada variável. Em relação ao tamanho do plugue, quanto maior o plugue, melhor será o tratamento. Em relação à vazão, as intermediárias têm melhores resultados. O tempo de tratamento para vazões pequenas deve ser maior e para vazões maiores deve ser menor. O posicionamento do plugue não mostrou ter muita influência nos tratamentos. Inclusões maiores são removidas mais facilmente pela maioria das vazões, tempos e plugues. Inclusões menores são mais difíceis de remover, sendo os melhores tratamentos em vazões mais baixas e tempos altos. O tamanho das bolhas também tem grande influência nos tratamentos. Bolhas maiores são melhores em tratamento com menores tempos, já as bolhas menores são melhores em tempos maiores de tratamentos. Os valores ótimos para o tratamento de remoção de inclusões foram: vazão de gás de 0,19 a 0,58NI/min/ton e para o tempo de injeção de 180s.

ABSTRACT

The steelmaking industry has a significant importance in many countries economic basis. The development of high quality and less costly steels has become essential to the survival of this industry. Therefore, steels with extremely low amounts of inclusions, the so-called clean steels, are aimed. The present work had the objective of investigating the production of low inclusion grade steels through gas injection using a porous plug located at the bottom of the steelmaking ladle. This investigation was developed by means of physical modeling. A physical model of a steelmaking ladle, in scale of 1:5 was built. Experiments evaluating the effects of different variables, such as gas flow rate, gas injection time, position of the porous plugs and superficial area of the porous plugs were carried out. The size distributions of the inclusions remaining in the liquid steel and the bubble diameters were also determined. Two main effects were proposed, inclusion removal and reversion. Both effects are present in all variables, in distinct moments, revealing the existence of an optimum point for each of them. Regarding plug surface area, the larger the plug, the better the treatment. Regarding the gas flow rate, the intermediary brings better results. The treatment time should be larger to small flow rates and smaller to the larger flow rates for good results. The position of the porous plug does not seem to affect the treatments. Larger inclusions are easily removed to the upper layer of the liquid and for most of the plugs, flow rates and treatment times. Smaller inclusions are harder to remove and the better results are obtained with low gas flow rates and longer times. The bubble size has a great influence on the treatment. Larger bubbles lead to better results for lower treatment times and smaller bubbles enable better results for longer treatment times. The optimum values for inclusion removal treatment were 0.19 to 0.58NI/min/ton for the gas flow rate and 180s for the gas injection time.

1. INTRODUÇÃO

A indústria siderúrgica é de grande importância por sustentar a produção de aços para diversas aplicações. Outras indústrias, como a naval, automobilística e civil são grandes consumidoras de aço e têm papel fundamental no desenvolvimento de um país. Dada a importância da indústria siderúrgica e a alta flutuação no mercado, é extremamente importante a produção de aços com custo mais baixo, alta produtividade e elevada qualidade.

Nos últimos tempos têm havido grandes pressões na indústria siderúrgica para melhoria de qualidade conjuntamente com a redução de custo de seus produtos. Isso impacta diretamente na competitividade do negócio, que é imprescindível para sobrevivência no mercado globalizado. Por isso, a busca por novos métodos de fabricação de aços de maior qualidade é sempre incentivada e novas tecnologias têm sido implementadas para essa tarefa.

Durante a fabricação do aço na aciaria, são realizadas três etapas: refino primário, refino secundário e lingotamento. O refino primário é a transformação do ferro-gusa em aço. O refino secundário é onde são feitos os ajustes na composição química e na temperatura da liga. O lingotamento é onde é dada a forma ao aço e onde é feita sua solidificação.

O refino secundário envolve vários tipos de tratamentos do aço nos mais diversos reatores de acordo com sua especificação. Para tanto, panelas de aciaria são usadas para todos os tratamentos. Elas se acoplam às outras partes dos reatores (por exemplo, forno-panela e RH) e muitas reações acontecem dentro delas. Estes reatores são complexos e devem atender às diversas demandas de tratamentos e tipos de aços. Daí sua grande importância.

Um grande avanço na fabricação de aços de alta qualidade foi o desenvolvimento de ligas com baixos teores de inclusões, os chamados "Clean Steels". Esses aços têm sido cada vez mais buscados por terem melhor desempenho nos diversos aspectos estruturais e estéticos. Quando o aço tem poucas inclusões, é dito que ele tem alto grau de limpidez.

Além de serem aços de maior qualidade, os aços com menores níveis de inclusões apresentam menores problemas durante sua fabricação. O "clogging" é um problema

causado pelas inclusões e faz com que o fluxo de aço no distribuidor seja menor, diminuindo a produtividade do processo e fazendo com que as válvulas tenham menor tempo de vida.

Para alcançar esses níveis de limpidez do aço são buscadas novas técnicas para seu tratamento, que diminuam essa concentração de inclusões. As técnicas existentes são aplicadas na panela e no distribuidor. Na panela são aplicadas técnicas para modificação de composição química das inclusões e injeção de gás. No distribuidor são aplicadas técnicas de injeção de gás e de aumento do tempo de residência do aço, assim as inclusões terão tempo para subir até as camadas superiores.

Existem diversos trabalhos que focam em remoção de inclusões no distribuidor. As mais estudadas são as modificações das configurações internas do distribuidor e injeção de gás. Os trabalhos com foco na panela são em menor quantidade. Porém já foi identificado um grande poder de remoção de inclusões na panela e este fenômeno e suas variáveis devem ser melhores estudados.

Este trabalho tem foco na remoção de inclusões do aço na panela. A técnica a ser estudada é a injeção de gás inerte no fundo da panela por plugue poroso pouco antes do início de sua drenagem na instalação de lingotamento contínuo. Esse estudo foi feito através de modelamento físico da panela de aciaria em escala 1:5 de uma panela real de 180 toneladas.

O grande diferencial do presente estudo é o uso da sonda APS na simulação física na panela. Esta sonda detecta e conta as partículas que passam por ela e, além disso, também fornece a distribuição granulométrica. Este parâmetro é muito importante para se saber quais tamanhos de inclusões são mais removidos pelos tratamentos aplicados.

2. OBJETIVOS

No presente trabalho, foi estudado o grau de eficiência de remoção de inclusões na panela de aciaria através do borbulhamento de gás, pouco antes do início de sua drenagem na instalação de lingotamento contínuo.

2.1. Objetivos Específicos

Este estudo visa caracterizar o efeito de quatro variáveis sobre a remoção de inclusões na panela:

- Vazão de gás injetado;
- Tempo de injeção de gás;
- Posição do plugue;
- Área de injeção de gás do plugue poroso.

Além disso, foi estudada a relação da distribuição granulométrica das inclusões com sua remoção por borbulhamento de gás. Foram relacionados também os tamanhos das bolhas e as quatro variáveis anteriores na remoção de tamanhos diferentes de inclusões.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1. Siderurgia

Desde muito tempo são conhecidas as técnicas para fabricação do aço. Alguns materiais datam de 1200 AC, onde barras de ferro eram colocadas em braseiros e absorviam pequenas quantidades de carbono, tornando-se mais resistentes.

Atualmente, as tecnologias evoluíram muito, e as características química e física do aço são bem controladas. As empresas que fabricam aços, denominadas siderúrgicas, têm processos bem definidos para cada etapa de fabricação.

Em sua fase inicial, a carga metálica (minério de ferro granulado, pelotas e/ou sinter) em conjunto com o combustível/redutor (coque ou carvão vegetal) e fundentes (quartzo, dolomita, calcário e outros) são colocados no alto-forno e transformados em ferro-gusa e escória. O ferro-gusa é levado até a aciaria e a escória é vendida como coproduto.

O ferro-gusa pode ser dessulfurado, caso seu teor de enxofre esteja acima da faixa de especificação, e depois segue para o refino primário. Neste processo, são adicionadas sucata e fundentes ao ferro-gusa líquido. A transformação do ferro-gusa em aço é tradicionalmente feita no convertedor BOF, onde é realizada a injeção de oxigênio para reduzir a quantidade de carbono do ferro e transformá-lo em aço. Em usinas não integradas, normalmente usa-se sucata de aço em fornos elétricos a arco para produção dos aços.

Logo após o refino primário, o aço líquido é transferido para a panela, onde são feitos todos os outros tratamentos chamados de refino secundário. Neste refino, visa-se ajustar concentrações de elementos químicos no aço, ajustar sua temperatura para o lingotamento contínuo e melhorar sua limpidez. São utilizados diversos reatores para essas reações. Estes reatores são abordados brevemente na seção 3.1.1.

Após o refino secundário, é feito o lingotamento contínuo, responsável pela solidificação do aço. A panela transfere o aço para o distribuidor, que serve como reservatório de aço para distribuir o material entre os veios, que darão sua forma. Além disso, tratamentos para aumentar a limpidez do aço são feitos durante sua passagem pelo distribuidor. O aço deve estar numa temperatura bem ajustada para ser lingotado, já que deve formar uma película sólida durante sua passagem pelo

molde, que não pode ser muito fina (para não haver rompimento de pele, onde a película se rompe e o aço líquido é derramado) e nem muito grossa (para facilitar sua angulação durante o lingotamento).

A figura 3.1 mostra um fluxograma de uma aciaria de uma usina integrada.

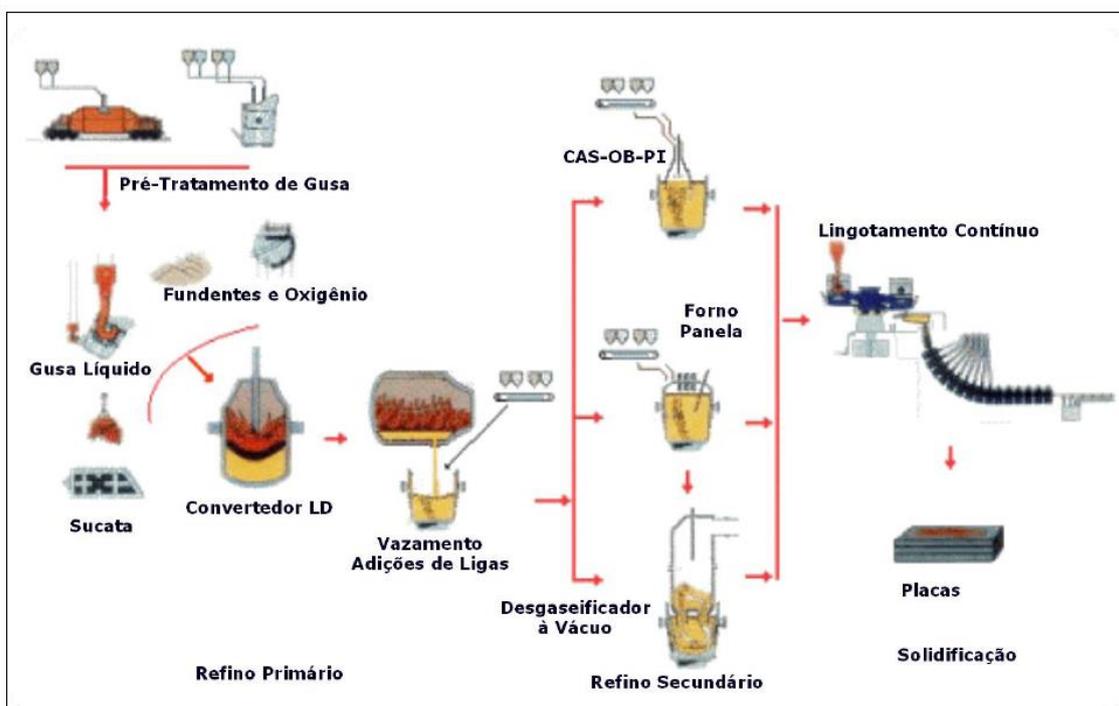


Figura 3.1 – Fluxograma de uma aciaria (Usiminas, 2014)

O presente trabalho tem ênfase na metalurgia secundária, por isso será feito um estudo maior neste tema.

3.1.1. Refino secundário (metalurgia de panela)

O tratamento do aço na panela começou na década de 1950 com os primeiros desgaseificadores a vácuo. Logo depois apareceram os processos RH e DH e em seguida o VAD, VOD e ASEA-SKF. Nos anos 70, foram desenvolvidas as injeções de materiais granulados, injeção de argônio e logo depois fios recheados foram introduzidos nos tratamentos, possibilitando um melhor controle de composição e morfologia das inclusões. (AISE Steel Foundation, 1998)

O desenvolvimento e as melhorias dos tratamentos de panela possibilitaram que os convertedores não tivessem que fazer outros refinamentos e ainda possibilitaram que

houvesse um maior controle no ajuste da composição química e limpidez dos aços (AISE Steel Foundation, 1998).

3.1.1.1. Painela de aço

A carcaça da painela é feita em aço. Por dentro, ela apresenta revestimento refratário. A figura 3.2 mostra um esquema de uma painela de aciaria.

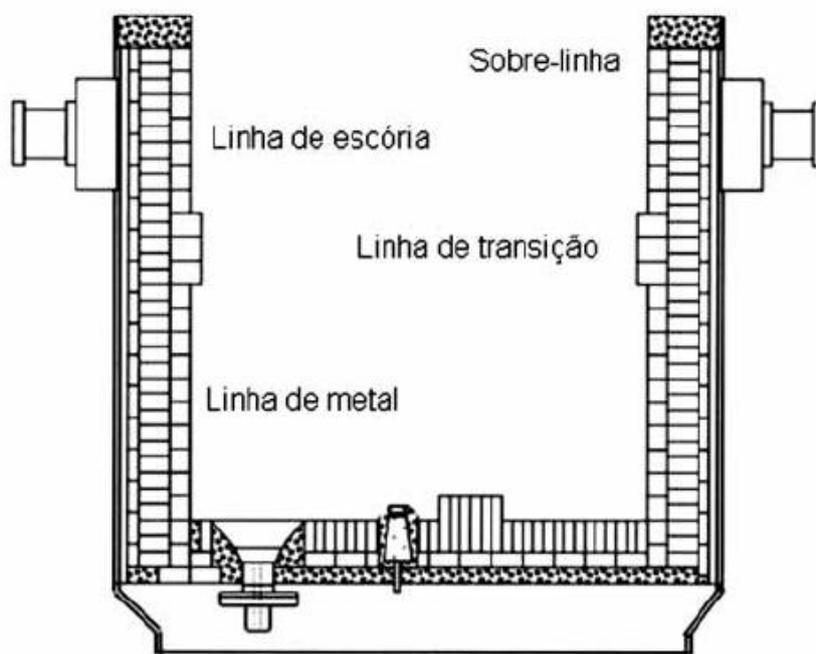


Figura 3.2 – Desenho esquemático de uma painela de aciaria (Bragança, 2013)

Sua carcaça metálica normalmente apresenta dois munhões para sua fixação e manejo pela ponte rolante. Em sua base, a painela apresenta uma válvula gaveta (para drenagem do aço líquido) e um plugue poroso (para injeção de gás inerte).

Seu revestimento refratário normalmente é composto por duas regiões, sendo a primeira da base até a altura de aço, e a segunda ficará na linha de escória. Na base da painela existe uma linha reforçada de refratário, na região onde o jato de aço proveniente do convertedor incide inicialmente sobre painela.

Esse revestimento refratário tem composição ajustada para o tipo de aço a ser produzido a fim de minimizar o desgaste químico do refratário.

3.1.1.2. Operações na panela

A panela se acopla a diversos reatores, como: forno panela, VD (*Vacuum Degasser*), RH (Ruhrstahl-Heraeus), VOD (*Vacuum Oxygen Degasser*), CAS-OB (*Composition Adjustment by Sealed Argon Bubbling – Oxygen Blowing*), entre outros.

Esses reatores podem ser separados em três grupos distintos. O primeiro é o grupo dos reatores que trabalham sob baixas pressões, caso do RH, VD, VOD e outros, onde a pressão dentro do reator diminui para favorecer algumas reações químicas. Outro grupo é dos reatores que fazem aquecimento por energia elétrica, via eletrodo, que é o caso do forno panela. Neste tipo de reator, a temperatura é muito bem controlada, podendo variar ao longo do tempo para favorecer certas reações e também melhor ajuste térmico para o lingotamento contínuo. O último grupo é dos reatores que realizam aquecimento químico, ou seja, não usam eletricidade para aumentar a temperatura, mas reações químicas entre elementos presentes no aço e outros elementos que podem ser adicionados, como é o caso do CAS-OB. Este grupo tem um ajuste térmico menos controlado e também gera mais inclusões no aço, porém tem menor custo de operação.

A panela é um reator muito versátil por se ajustar bem a diversas situações. Nela, são feitos os ajustes de composição por meio de adição de ligas, remoção de gases como oxigênio, nitrogênio e hidrogênio, desfosforação, descarburização, dessulfuração, remoção e modificação da morfologia das inclusões, homogeneização química e térmica, aquecimento e resfriamento.

Antes dos tratamentos, a panela é pré-aquecida. Depois dos tratamentos, ela deve ser inspecionada e limpa. Caso haja algum defeito em seus refratários, carcaça ou válvulas, que comprometa sua operação, este é reparado antes do seu próximo uso. Hoje, as tecnologias permitem um reparo a quente, o que permite uma maior produtividade e menor custo com aquecimento de panelas.

3.2. Inclusões

As inclusões são partículas estranhas à estrutura do aço. Podem ser de óxidos, nitretos, sulfetos ou de diversos outros compostos. As inclusões não metálicas são um grande problema para qualidade dos aços de alto desempenho. Elas geram problemas para o produto final e para o processo. Aços com muitas inclusões têm suas aplicações restringidas e a produtividade do processo de fabricação diminui muito.

Para empresas que buscam alta produtividade e um produto de alta qualidade, a redução no número de inclusões durante o processamento é essencial.

Os chamados “clean steels” (aços limpos) são os aços que têm menor quantidade de inclusões. Van Ende (2010); Hassal e Mills (1998) e Zhang (2006) mostram que a limpidez vai depender principalmente da aplicação do aço, já que aplicações específicas requerem propriedades diferentes e assim eles preferem definir a limpidez do aço como sendo em termos da quantidade de inclusões com tamanho crítico para dada aplicação. Sendo assim, a limpidez do aço é dada em teores máximos de impurezas e de tamanhos de inclusões.

A tabela III.1 mostra as restrições de impurezas e tamanhos de inclusões por aplicação do aço, segundo Zhang (2010).

Tabela III.1 - Restrições para impurezas no aço por aplicação (Zhang, 2006)

| Aplicação | Quantidade máxima de impurezas (% em massa) | Tamanho máximo de inclusão (µm) |
|--|---|--|
| Liga de aço para vaso de pressão | [P] < 0,007 | |
| Barras de aço ligado | [H] < 0,0002; [N] < 0,002; [O] < 0,001 | |
| Chapa de aço automotivo | [C] < 0,003; [N] < 0,003; [O] < 0,002 | 100 |
| Aço para latas | [C] < 0,003; [N] < 0,003; [O] < 0,002 | 20 |
| Rolamentos | [O] < 0,001; [Ti] < 0,0015 | 15 |
| Tubo de aço resistente à solda elétrica | [N] < 0,002 | 150 |
| Placa de aço | [H] < 0,0002; [N] < 0,003; [O] < 0,002 | 200 |
| Tubo para gases ácidos | [P] < 0,005; [S] < 0,001; [C] < 0,003; [N] < 0,004; [O] < 0,004 | |
| Aços IF | [C] < 0,001; [N] < 0,005 | |
| Tubos Hidráulicos | [S] < 0,001; [N] < 0,035; [O] < 0,003 | 100 |
| Chapa de aço magnética de grão não orientado | [N] < 0,003 | |
| Aço para aplicações em alto mar | [P] < 0,008 | |
| Placa para soldagem, aços para trilhos | [H] < 0,00015 | |
| Cordoalha para pneu | [H] < 0,0002; [N] < 0,004; [O] < 0,0015 | 10 - 20 |
| Fio máquina | [O] < 0,001 | |
| Fio de aço | [N] < 0,006; [O] < 0,003 | 20 |

Van Ende (2010) apresenta outra tabela, III.2, com os tamanhos críticos para inclusões e impurezas para os aços, de acordo com sua aplicação.

Tabela III.2 – Restrições de impurezas no aço e tamanhos críticos de inclusões (Van Ende, 2010)

| Aplicação | Teor máximo de impurezas (% em massa) | Tamanhos críticos de inclusões (μm) |
|-------------------------|--|--|
| Chapa de aço automotivo | [C] < 0,003; [N] < 0,003 | 100 |
| Aço para lata | [C] < 0,003; [N] < 0,003; [O] < 0,002 | 20 |
| Rolamentos | [O] < 0,001 | 15 |
| Cordoalha para pneu | [H] < 0,0002; [N] < 0,004; [O] < 0,0015 | 10 – 20 |
| Fio de aço | [N] < 0,006; [O] < 0,003 | 20 |
| Tubo para gases ácidos | [P] < 0,005; [O] < 0,001 | Dependente da geometria |

Pode-se observar que os teores máximos de impurezas e tamanhos críticos para inclusões para os dois casos são bem parecidos. Existem diversas outras tabelas semelhantes na literatura.

3.2.1. Desoxidação

A desoxidação dos aços é o processo no qual se reduz o teor do oxigênio dissolvido no banho metálico. O oxigênio dissolvido no banho formará diversos óxidos quando a temperatura do aço diminuir durante sua solidificação. Isso acontece porque a solubilidade do oxigênio no líquido é muito maior do que no sólido. Além disso, podem ser originados poros no aço devido aos gases durante a solidificação. Tanto os óxidos formados, quanto os poros em sua estrutura, são extremamente prejudiciais às propriedades ao aço. Isso faz com que seja extremamente necessária a desoxidação do aço.

Na metalurgia moderna, a desoxidação é uma atividade muito comum. Existem diversos desoxidantes, porém os mais utilizados são silício, manganês e alumínio. O último é utilizado para uma desoxidação mais intensa, chegando a teores muito baixos de oxigênio dissolvido.

O problema da desoxidação é que ela é a fonte geradora de grande parte das inclusões. Ao reagir o oxigênio com o desoxidante, formam-se óxidos, que também

devem ser retirados do banho metálico. Algumas reações para desoxidantes estão mostradas a seguir:



Dessa forma são geradas várias inclusões durante a desoxidação do aço. A figura 3.3 mostra um experimento feito por Feng e citado por Söder (2001), que mostra como funciona a cinética da desoxidação por silício.

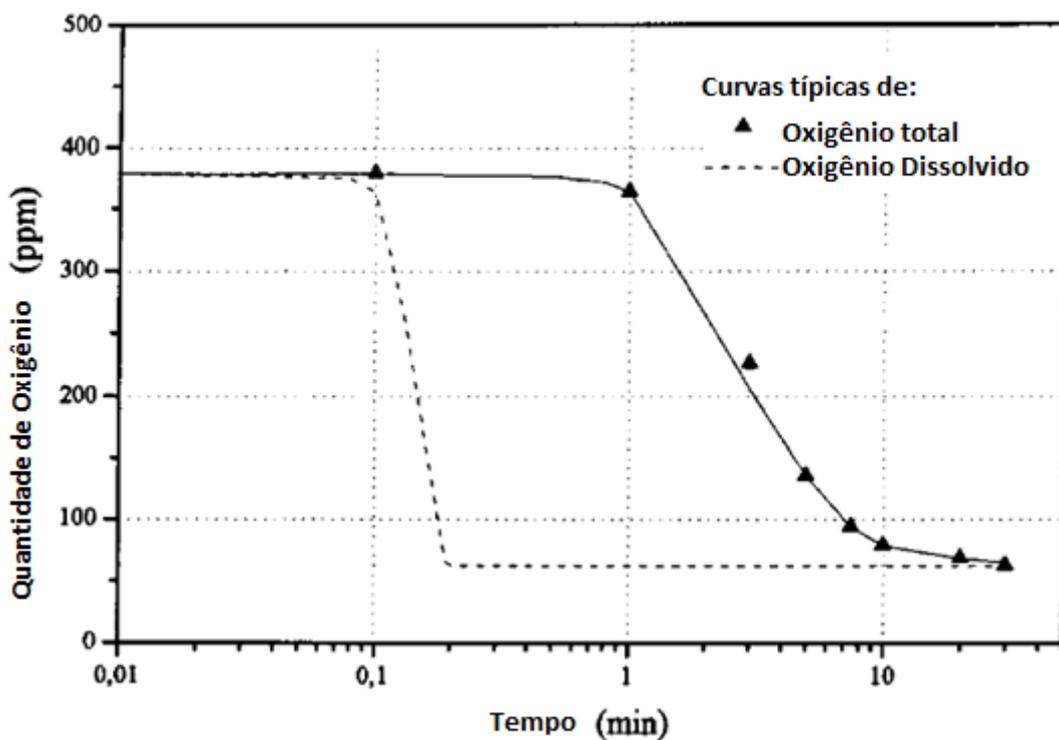


Figura 3.3 – Cinética de desoxidação por silício (Mats Söder, 2001)

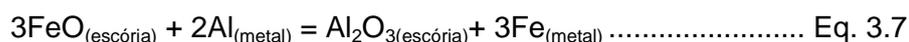
No experimento, o silício foi adicionado no tempo zero. A figura 3.3 mostra que apesar do oxigênio dissolvido diminuir rapidamente, o oxigênio total não diminui da mesma forma. Isso acontece porque o oxigênio dissolvido se transforma em óxidos (inclusões) rapidamente, porém esses óxidos ficam no banho metálico e só são removidos com algum tratamento.

No experimento, foi utilizado borbulhamento de argônio e depois de algum tempo os óxidos formados começaram a ser removidos. Isso acontece porque a ascensão das inclusões é muito lenta quando elas têm tamanhos muito pequenos, sendo assim, elas devem crescer até certo tamanho para serem removidas mais facilmente, o que demanda certo tempo. (Söder, 2001)

Uma inclusão muito comum e causadora de grandes problemas é a alumina. Ela está presente em maiores quantidades que as outras inclusões porque normalmente os aços são desoxidados com alumínio. As inclusões de alumina formam *clusters* duros que geram diversos problemas estruturais e estéticos ao aço. Além disso, a alumina provoca o “clogging” nas válvulas submersas e válvulas tampões. Ambos os efeitos serão abordados mais a frente.

A alumina é um óxido muito estável e que também pode ser gerada pela reação do alumínio com outros óxidos menos estáveis presentes na escória. Ela também pode ser gerada durante a dessulfuração pelas reações com a escória. (Söder, 2001)

As reações para a formação da alumina pela oxidação de outros elementos são listadas abaixo:



3.2.2. Inclusões endógenas e exógenas

Normalmente as inclusões são classificadas de acordo com sua fonte geradora. Elas podem ser endógenas ou exógenas. A figura 3.4 mostra as possíveis fontes geradoras de inclusões na panela.

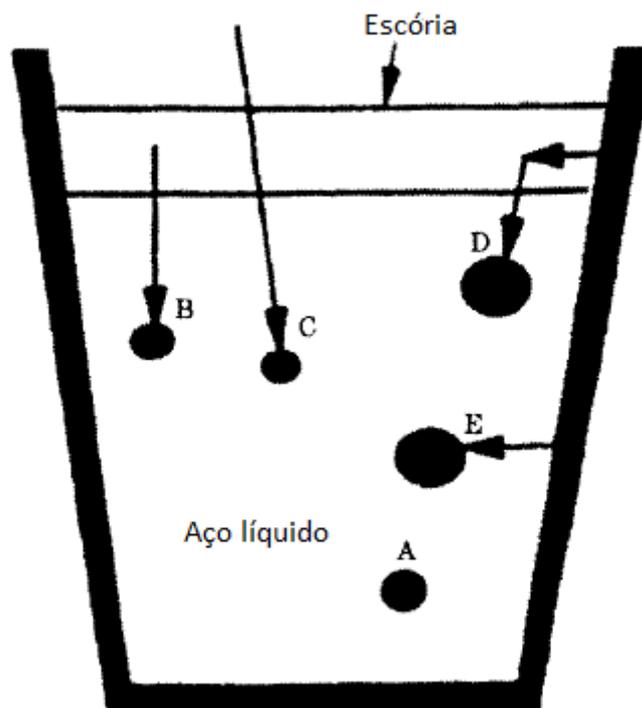


Figura 3.4 – Fontes geradoras de inclusões (Payandeh e Soltanieh, 2007)

Inclusões endógenas são formadas durante a desoxidação e dessulfuração (inclusão A na figura 3.4), resfriamento e solidificação do metal. As inclusões formadas durante a desoxidação são chamadas de inclusões primárias e as inclusões formadas durante o resfriamento e solidificação são chamadas de secundárias. As duas se referem às inclusões formadas pela reação entre o oxigênio dissolvido e um desoxidante, como Al, Si ou Ti. Assim, sua fonte geradora é interna ao aço. (Payandeh e Soltanieh, 2007; Van Ende, 2010)

As inclusões exógenas são formadas durante as interações do metal/escória com o meio. Elas são resultado de interações químicas e mecânicas (não intencionais) do aço. Em geral, elas são danosas às propriedades do aço, pois seu tamanho é muito maior e seu formato mais irregular. Elas são, em sua maioria, resultado de reoxidação do aço (inclusão C na figura 3.4), erosão ou reação do metal/escória com o refratário (inclusões D e E na figura 3.4) e entranhamento de escória (inclusão B na figura 3.4).

O entranhamento de escória é resultado da mistura turbulenta de escória e metal ou sua emulsificação, deixando gotículas de escória em suspensão no metal. Inclusões causadas por erosão de refratário são resultado de altas velocidades do aço junto ao refratário e altos tempos de residência, gerando macro inclusões. As inclusões causadas por reoxidação são resultado de reações químicas do aço com o meio.

Inclusões endógenas secundárias são menores que as primárias porque têm crescimento limitado por não ter tempo suficiente para se agregarem. Para reduzir esse tipo de inclusão, deve-se diminuir a quantidade de oxigênio dissolvido para menos que 0,0001% (Payandeh e Soltanieh, 2007).

Embora inclusões exógenas possam ocorrer por diversos fatores, é bem aceito que a maioria delas surja de reações com fontes externas de oxigênio. Ou seja, quando existe algum jato aberto de aço líquido ou refratários de sílica-aluminatos de baixa qualidade.

3.2.3. Efeitos das inclusões

Em geral, inclusões têm ação negativa sobre as propriedades dos aços. Isso ocorre devido aos coeficientes de plasticidade e expansão térmica que diferem de sua matriz, o que resulta em diferentes reações a tensões térmicas e mecânicas.

As inclusões têm efeito sobre a dureza dos aços. Essa qualidade é afetada por algumas de suas características, principalmente pela fração de volume, tamanho e resistência à nucleação de vazios. A fratura dúctil acontece devido ao crescimento e coalescimento dos vazios nucleados nas partículas de segunda fase. No aço, as partículas de primeira fase são as inclusões e as partículas de segunda fase, consideradas por terem uma microestrutura fina, são carbeto, nitreto e carbonitreto. Caso essas partículas nucleiem vazios, elas terão influência direta na fratura (Garrison Jr e Wojcieszynski, 2007). A formação de vazios força a matriz dúctil a deformar mais que o normal, criando maiores tensões perto das inclusões e possivelmente separação. (Van Ende, 2010)

Inclusões macias, como sulfetos de manganês (MnS) são piores para resistência a fratura e resistência ao impacto. Isso acontece devido às inclusões se deformarem junto com a matriz. (Van Ende, 2010)

Inclusões duras, como aluminatos (Al_2O_3) e silicatos (SiO_2), são muito abrasivas e podem resultar num maior desgaste das ferramentas de moldagem e corte.

A maioria das inclusões de óxidos aumenta a tensão na matriz devido ao seu baixo coeficiente de expansão térmico quando comparado com o aço, diminuindo assim, a resistência à fadiga. Inclusões como Al_2O_3 , em geral, são ruins para as propriedades mecânicas dos aços. Elas reduzem a ductilidade, a usinabilidade, a resistência à

fadiga e aumentam o risco de corrosão do produto durante sua aplicação. (Van Ende, 2010)

Inclusões alongadas são potencialmente mais perigosas, já que tem um comportamento anisotrópico. Além disso, elas diminuem a capacidade do aço de tomar forma, gerando trincas prematuras. (Van Ende, 2010)

Uma das principais características afetada pelas inclusões é a qualidade superficial dos aços. Elas podem prejudicar muito a estética da peça, diminuir a capacidade de polimento, a resistência à corrosão e a aderência de recobrimentos.

Embora os efeitos maléficos das inclusões sejam mais ressaltados, elas também podem trazer alguns benefícios. As inclusões podem promover refinamento dos grãos durante a solidificação. Inclusões de sulfeto podem melhorar bastante a usinabilidade, agindo como lubrificante. (Van Ende, 2010)

A figura 3.5 mostra várias inclusões antes e depois de serem laminadas.

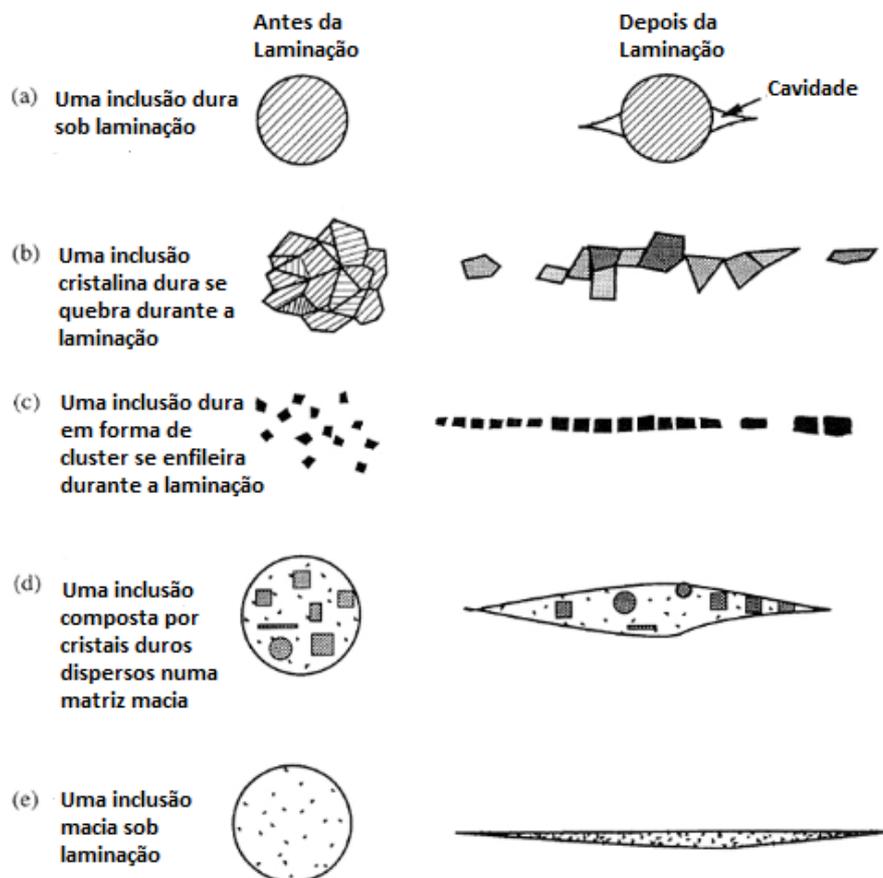


Figura 3.5 – Diferentes tipos de inclusões e seu efeito após laminadas (Van Ende, 2010)

A figura 3.5 mostra inclusões duras esferoidais (a), inclusões duras cristalinas (b), inclusões duras em forma de *clusters* (c), inclusões compostas de cristais duros em uma matriz macia (d) e inclusões macias (e). Inclusões de sílica seriam da forma “a” (esferoidais duras), cristais de aluminatos de cálcio seriam da forma “b” (cristais duros), a alumina seria da forma “c” (“clusters” duros), sulfetos de manganês seriam da forma “d” e “e” (inclusões macias).

Além disso, as inclusões são conhecidas por causarem “clogging”, que é o acúmulo de alumina nas válvulas submersas e nas válvulas tampões durante o lingotamento contínuo (Van Ende, 2010). Esse acúmulo reduz drasticamente a produtividade do processo, diminuindo a vazão de aço para o molde e sendo necessárias mais trocas de válvulas durante a operação, o que eleva o custo de produção. O “clogging” é mais comum em aços acalmados ao alumínio. A figura 3.6 mostra as regiões mais susceptíveis a este problema.

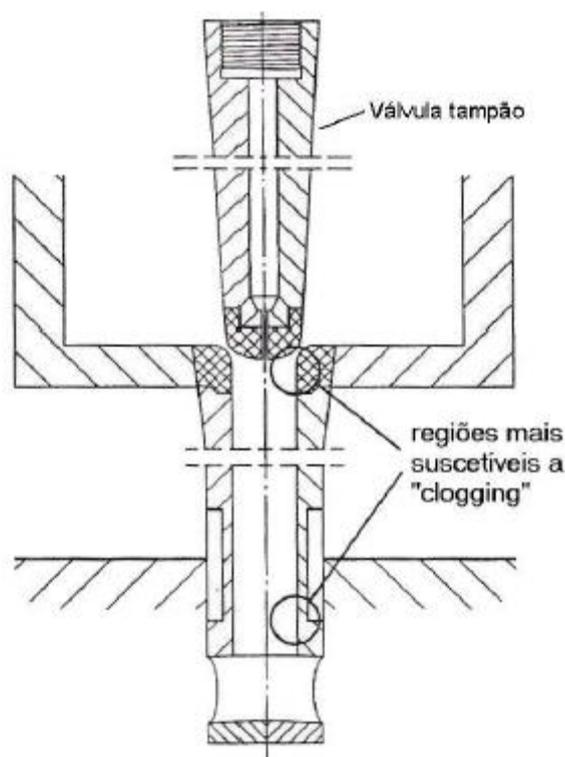


Figura 3.6 – Regiões mais susceptíveis ao “clogging” (Bagatini, 2014)

Uma prática operacional comum é o batimento do tampão, que é a ação de bater a válvula tampão do distribuidor contra ele próprio para reduzir esse acúmulo de alumina. Isso faz com que a vazão de aço aumente e conseqüentemente aumente a produtividade, mas, com isso, várias partículas de alumina são arrastadas para o aço

no molde, gerando uma região com maior concentração de inclusões e de menor qualidade. Normalmente essas regiões são descartadas ou vendidas como produto de menor valor.

Todos esses problemas provocados pelo “clogging” geram defeitos no produto, principalmente defeitos superficiais causados quando inclusões que estão enclausuradas por camadas solidificadas de aço se soltam das válvulas e se deslocam, ficando aderidas nas camadas logo abaixo da superfície da placa ou barra. A figura 3.7 mostra o efeito do “clogging” na válvula.

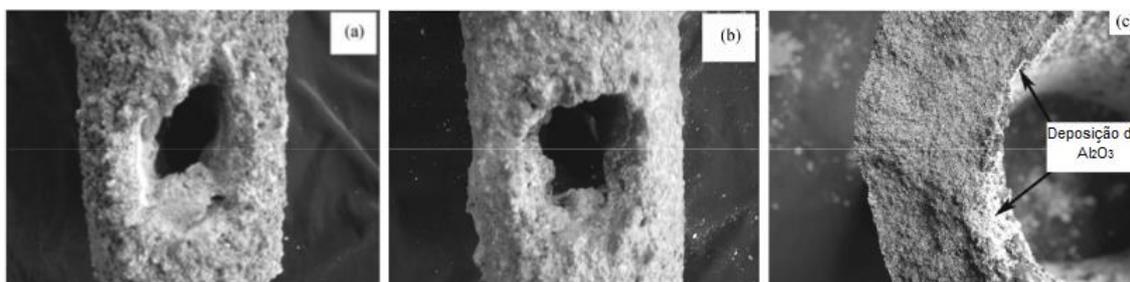


Figura 3.7 - Efeito do acúmulo das inclusões na válvula submersa. a) aço baixo carbono acalmado ao alumínio b) aço ultra baixo carbono acalmado ao alumínio c) seção da válvula de aço ultra baixo carbono (Yuan et al., 2008)

De acordo com Yuan et al. (2008), a deposição de alumina varia bastante com a quantidade de argônio injetada na válvula. Quanto maior essa quantidade, menor será a quantidade de inclusões depositadas. Quando a abertura da válvula gaveta (presente na válvula submersa) é maior, é necessária uma menor injeção de argônio para manter a pressão positiva dentro da válvula, aumentando assim a deposição de alumina. Os autores ainda citam que a vazão ótima de argônio para atenuar este problema muda de acordo com a abertura da válvula gaveta. Outro fato é que a intensidade de deposição de alumina é linear com a quantidade em massa de alumina no banho metálico.

Apesar de ocorrer mais comumente com aços desoxidados com alumínio, o “clogging”, pode estar associado a outros tipos de materiais, conforme mostrado na tabela III.3, proposta por Zhang (2006) e feita a partir de diferentes referências para os tipos de inclusões encontradas no “clogging” para vários tipos de aços. Isso indica que vários tipos de inclusões podem ser a causa desse acúmulo dependendo do tipo de aço.

Tabela III.3 – Inclusões achadas em diferentes tipos de “clogging” (Zhang, 2006)

| Inclusões | Comentários |
|---|--|
| Al_2O_3 | Sempre encontradas em aços acalmados ao alumínio. Podem ser causadas por aglomeração de inclusões, reações entre aço e a válvula e também por sucção de ar pela válvula. |
| $\text{FeO-Al}_2\text{O}_3$ | A formação de hercinita geralmente acontece depois da solidificação do aço. O ferro solidificado reage com a alumina. Essa não é uma fase estável em aços desoxidados com alumínio a não ser em um estado transitório. |
| $\text{MgO-Al}_2\text{O}_3$ (espinélio) | Quando quantidades de magnésio solúveis são adicionadas ao aço acontece a formação de uma fase de aluminato de magnésio. |
| TiN | Um produto da precipitação durante o lingotamento fora da condição de equilíbrio. Principalmente para aços inoxidáveis com tratamentos de Ti. |
| TiN e $\text{MgO-Al}_2\text{O}_3$ (espinélio) | Observadas em aços inoxidáveis da série 400. |
| CaO-TiO_2 | Achadas em aços inoxidáveis com tratamento de cálcio. |
| $\text{CaO-Al}_2\text{O}_3$ (sólido ou semissólido) | Acontece quando uma quantidade de cálcio insuficiente é colocada ou quando há reoxidação do aço. |
| $\text{CaO-Al}_2\text{O}_3\text{-CaS}$ (sólido) | Achadas principalmente em aços com alto teor de enxofre desoxidados com alumínio quando CaS precipita dos aluminatos de cálcio líquidos. |
| $\text{CaO-Al}_2\text{O}_3\text{-MgO. Al}_2\text{O}_3$ (sólido) | Achadas principalmente em aços tratados com cálcio quando os níveis de magnésio solúvel são muito altos. |
| Aço solidificado | Resultado de transferência de calor excessiva pela válvula. |

3.2.4. Mecanismos para coalescência de inclusões

Neste item será apresentado um resumo das teorias para nucleação e coalescência das inclusões.

Depois que o desoxidante é adicionado ao banho metálico, ele funde e dissolve. Então, uma rápida reação com o oxigênio acontece na qual são geradas as inclusões. O raio crítico (raio mínimo em que as inclusões são consideradas estáveis) para SiO_2 e Al_2O_3 foi estimado entre 6 e 32 Å. (Söder, 2001)

Depois da nucleação inicial, diferentes mecanismos de crescimento se iniciam. Este serão propostos a seguir.

3.2.4.1. Coalescência Difusional (“Ostwald Ripening”)

É o crescimento de partículas maiores através da difusão de partículas menores. A força-motriz desse processo é a diminuição da energia superficial total da amostra. As partículas nucleadas com raio maior do que um raio crítico irão crescer e as partículas nucleadas com um raio menor do que o raio crítico irão diminuir, diminuindo a energia de superfície. Segundo Söder (2001), este é um processo muito lento quando comparado com os outros.

3.2.4.2. Crescimento devido à colisão

Já é bem entendido que as inclusões crescem durante a desoxidação e que quanto maiores elas forem, mais facilmente serão removidas devido a sua flutuabilidade. Quando duas inclusões colidem, elas tendem a se agrupar. Isso ocorre em grande quantidade e, segundo Söder (2001), este é o principal motivo para o coalescimento das inclusões. Os tipos de colisões que geram coalescimento estão citados abaixo:

- Colisão devido à turbulência

O regime turbulento é caracterizado por mudanças nas velocidades instantâneas do fluxo. Quando as velocidades do fluxo são diferentes, as partículas também adquirem velocidades diferentes e podem colidir umas com as outras. (Söder, 2001)

- Colisão devido à diferença de flutuabilidade (Colisão de Stokes)

Sabe-se que as inclusões têm um fluxo ascendente no aço devido à sua diferença de densidade. Sabe-se também que quanto maior for o diâmetro da inclusão, maior será sua velocidade de ascensão no líquido. Portanto, partículas de tamanhos diferentes, têm velocidades diferentes e sendo assim, elas podem colidir durante sua subida até a escória. Partículas maiores tendem a capturar as menores. (Söder, 2001)

- Colisão devido ao cisalhamento laminar

Linhas de fluxo são geradas nos reatores durante seu tratamento. Na panela, por exemplo, durante o borbulhamento de argônio, surgem linhas de fluxo que arrastam as partículas numa determinada trajetória. Essas linhas de fluxo podem ter velocidades

diferentes. Quando duas partículas estão em linhas próximas com diferentes velocidades, elas podem colidir (Söder, 2001). Esta colisão está exemplificada pela figura 3.8.

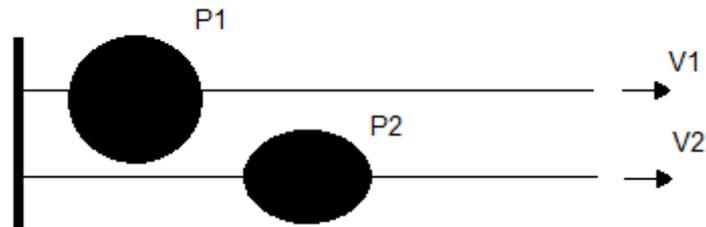


Figura 3.8 – Colisão devido ao cisalhamento laminar

Na figura 3.8, as linhas de fluxo estão representadas por linhas horizontais, sendo V1 e V2 suas respectivas velocidades, e as partículas são representadas por P1 e P2 e seguem a trajetória da linha que estão em cima. Supondo-se $V1 > V2$, a partícula P1 será mais rápida que P2 e então elas colidirão.

- Colisão devido ao movimento Browniano

As inclusões muito pequenas se movimentam aleatoriamente nos fluidos. Isso faz com que elas possam colidir umas com as outras, ou mesmo com inclusões maiores. (Söder, 2001)

3.2.5. Mecanismos para remoção de inclusões

A remoção das inclusões é de extremo interesse para toda siderurgia. Como já foi dito anteriormente, elas causam problemas para a fabricação do aço e também para características mecânicas e estéticas do produto final, diminuindo muito seu valor no mercado.

Naturalmente, as inclusões são menos densas que o aço. Sendo assim, elas tendem a subir para as camadas mais superiores do aço e assim ser aderidas pela escória. Porém essa ascensão das inclusões depende de seu diâmetro e de sua densidade. A lei de Stokes (válida para inclusões bem pequenas: $Re < 1$) fornece a velocidade de subida de partículas esféricas e é dada por:

$$v = \frac{2}{9} \frac{gr^2(\rho_1 - \rho_2)}{\mu} \dots\dots\dots \text{Eq. 3.8}$$

Sendo:

v = velocidade relativa entre a partícula e o aço (m/s);

g = aceleração da gravidade (m/s²);

r = raio da partícula (m);

ρ_1 = maior densidade - aço (kg/m³);

ρ_2 = menor densidade - inclusão (kg/m³);

μ = viscosidade do aço (Pa.s)

Partículas muito pequenas têm uma velocidade de subida muito pequena e por isso demorariam um maior tempo para subirem até a camada de escória. A tabela III.4, fornecida por Hassal e Mills (1998), mostra a velocidade de ascensão para inclusões de diferentes densidades e tamanhos no aço, considerando o aço com densidade de 7000 kg.m⁻³ e viscosidade de 0,1 P (10⁻² Pa.s).

Tabela III.4 – Velocidade de ascensão no aço para diferentes inclusões (Hassal e Mills,1998)

| Raio da Partícula | | Densidade da inclusão (kg.m ⁻³) | Velocidade de ascensão (cm.s ⁻¹) |
|-------------------|-------|---|--|
| (μ m) | (cm) | | |
| 20 | 0,002 | 2300 | 0,041 |
| 50 | 0,005 | 2300 | 0,26 |
| 80 | 0,008 | 2300 | 0,66 |
| 100 | 0,01 | 2300 | 1,02 |
| 200 | 0,02 | 2300 | 4,1 |
| 300 | 0,03 | 2300 | 9,22 |
| 20 | 0,002 | 3000 | 0,035 |
| 50 | 0,005 | 3000 | 0,22 |
| 80 | 0,008 | 3000 | 0,56 |
| 100 | 0,01 | 3000 | 0,87 |
| 200 | 0,02 | 3000 | 3,49 |
| 300 | 0,03 | 3000 | 7,85 |
| 20 | 0,002 | 4000 | 0,026 |
| 50 | 0,005 | 4000 | 0,16 |
| 80 | 0,008 | 4000 | 0,42 |
| 100 | 0,01 | 4000 | 0,65 |
| 200 | 0,02 | 4000 | 2,62 |
| 300 | 0,03 | 4000 | 5,89 |
| 20 | 0,002 | 5000 | 0,017 |
| 50 | 0,005 | 5000 | 0,11 |
| 80 | 0,008 | 5000 | 0,28 |
| 100 | 0,01 | 5000 | 0,44 |
| 200 | 0,02 | 5000 | 1,74 |
| 300 | 0,03 | 5000 | 3,92 |
| 20 | 0,002 | 6000 | 0,009 |
| 50 | 0,005 | 6000 | 0,055 |
| 80 | 0,008 | 6000 | 0,14 |
| 100 | 0,01 | 6000 | 0,22 |
| 200 | 0,02 | 6000 | 0,87 |

| | | | | | | |
|-----|--|------|--|------|--|------|
| 300 | | 0,03 | | 6000 | | 1,96 |
|-----|--|------|--|------|--|------|

Sendo assim, deve haver métodos que melhorem essa subida das inclusões e sua consequente remoção.

Um dos métodos mais utilizados para a remoção de inclusões é o borbulhamento de argônio na panela, tanto por plugue poroso, quanto por lança.

As bolhas geradas no borbulhamento têm densidade muito menor que a do aço e assim têm fluxo ascendente em direção à escória. Quando as bolhas entram em contato com uma inclusão presente no banho metálico, existe uma chance desta ficar aderida à bolha e ser carregada para a escória. Outro fenômeno é a inclusão ser pega pelo “rastros” da bolha (“bubble wake”). Ambos os efeitos serão vistos mais detalhadamente à frente.

Além de serem removidas pelo borbulhamento, as inclusões são removidas de outras formas também, como pela escória, pelo refratário, por reações que resultam em mudança de suas propriedades físico-químicas e também por filtros. Estes métodos de remoção também serão brevemente discutidos à frente.

- Remoção por flotação

A remoção de inclusões por borbulhamento de gás inerte é um dos métodos mais comuns para remoção de inclusões. As panelas de aciaria são equipadas com plugue poroso ou com uma lança, ambos de material refratário, por onde se injeta o gás. Tanto o plugue quanto a lança são posicionados no fundo da panela e o gás injetado sobe em direção à escória.

As bolhas geradas na injeção de gás podem capturar as inclusões e assim, as inclusões sobem junto à bolha para as camadas superiores do aço.

Vários autores fornecem modelos de remoção de inclusões por flotação de bolhas (Wang, 1996; Söder, 2001; Hassal e Mills, 1998). Todos citam alguns fenômenos que acontecem antes da captura da inclusão. Primeiro, a bolha é transportada pela panela até a inclusão. Um pequeno filme de metal líquido as separa. Logo após, a inclusão desliza sobre a bolha, drenando este filme líquido até sua completa exaustão.

Wang (1996) cita que existem tempos de colisão (t_c), tempo de drenagem deste filme de líquido (t_f) e de escorregamento da partícula pela bolha (t_s). Para acontecer a absorção da partícula pela bolha é necessário que o filme seja drenado. Portanto, se o tempo de colisão entre partícula e bolha for maior que o tempo para a drenagem do filme líquido, acontecerá a sua captura (Mecanismo A) e, portanto, sua flotação. Caso o tempo de colisão seja menor que o tempo de drenagem do filme, a partícula pode rebater e/ou então deslizar sobre a bolha. Caso a partícula deslize, se esse tempo de deslizamento da partícula na bolha for maior que o tempo de drenagem do filme líquido, acontecerá sua absorção (Mecanismo B), caso esse tempo seja inferior, então a partícula desagregará da bolha. A figura 3.9 mostra um esquema dos mecanismos de captura da partícula pela bolha.

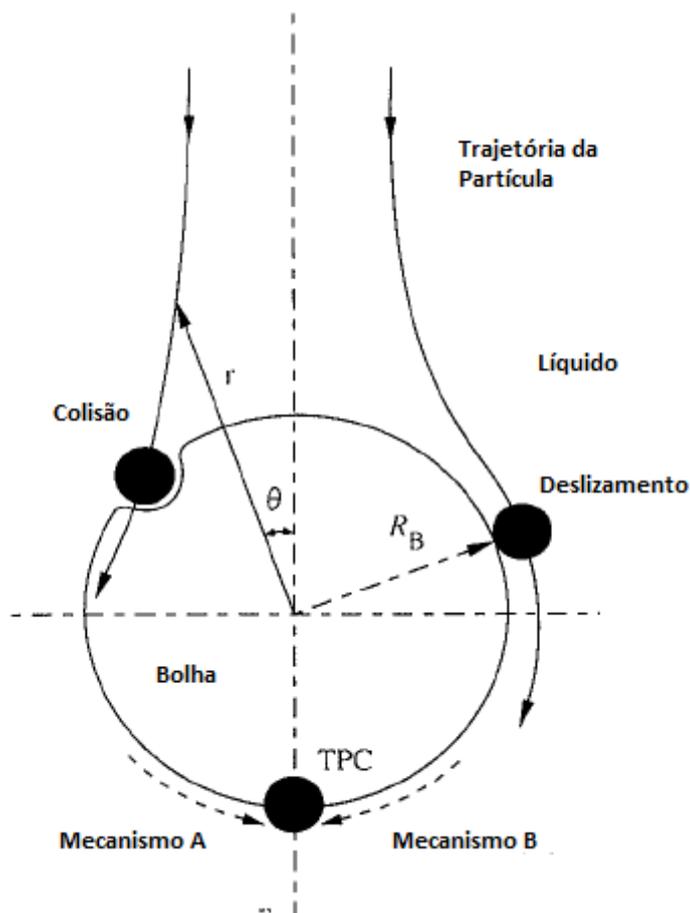


Figura 3.9 – Esquema dos mecanismos de captura das inclusões (Wang, 1996)

Para que estes fenômenos citados anteriormente possam acontecer, é necessário que a bolha entre em contato com a partícula. Para tanto, existe um modelo matemático que avalia a probabilidade de uma bolha encontrar com uma partícula e ser capturada. A equação 3.9 apresenta de forma sucinta este modelo. (Wang, 1996; Söder, 2001)

$$P = P_c.P_a \dots \dots \dots \text{eq. 3.9}$$

Onde:

P = probabilidade geral de uma bolha capturar uma inclusão

P_c = probabilidade de colisão da bolha com a inclusão

P_a = probabilidade de captura da inclusão pelos diversos mecanismos.

Söder (2001) mostra diversos modelos matemáticos para remoção de inclusões por flotação de bolhas. Cita também modelos mais novos que consideram a bolha tendo o formato de calota esférica (“spherical cap”). Isso acontece porque quando as bolhas crescem, elas ficam muito instáveis, o que faz com que elas tenham esse formato de calota esférica. Isso já foi observado em diversos modelos aquosos para painéis agitados a gás.

Todos os modelos apresentados mostram equações para as variáveis da equação 3.9, P_c e P_a, que são as probabilidades de colisão e de adesão da inclusão à bolha. Estudos mostram que quanto maior for o diâmetro da bolha, menor será a probabilidade de colisão com uma inclusão. Também mostram que inclusões maiores têm maior probabilidade de colisão do que inclusões menores. Para inclusões menores, a probabilidade de adesão será independente do tamanho da bolha. Já para inclusões maiores, essa probabilidade varia um pouco com o diâmetro da bolha, sendo maior para bolhas menores. (Wang, 1996)

- Remoção por rastro das bolhas (“bubble wake flow”)

As bolhas geradas na panela têm um fluxo ascendente até o topo. Isso faz com que haja transferência de quantidade de movimento do gás para o aço líquido, gerando assim um fluxo ascendente de aço líquido na panela. Esse “rastro” deixado pelas bolhas faz com que as inclusões também adquiram um incremento em sua velocidade. Mesmo as inclusões não sendo flotadas pelas bolhas, elas poderão subir. (Yang et al., 2014)

Neste mecanismo existem três outros fenômenos que podem acontecer. O primeiro seria a inclusão estar dentro da zona limite do rastro da bolha. Estando dentro do limite, sua velocidade terá um incremento, aleatoriamente para cima ou para as laterais podendo aumentar ou diminuir sua velocidade de subida. Este mecanismo está esquematizado na figura 3.10a. Segundo Yang et al. (2014), a zona limite do

rastro é dado por $H_a = 7D_b$ e $D_a = 2 D_b$. Sendo que H_a é a distância vertical da inclusão até a bolha, D_a é a distância vertical e D_b é o diâmetro da bolha.

O mesmo autor mostra o segundo fenômeno que é quando a inclusão passa pela zona de subida do rastro da bolha. Assim elas terão sua componente de velocidade vertical aumentada, podendo subir junto à bolha. A zona de subida é caracterizada por $H_r = 5,5D_b$ e $D_r = 1,5D_b$. Sendo H_r a distância vertical entre a bolha e a inclusão e D_r a distância horizontal entre elas. Esse mecanismo também está esquematizado na figura 3.10b.

O terceiro fenômeno seria a permanência ou saída da inclusão da zona de subida. As partículas têm componentes de velocidade verticais e horizontais e ao entrar na zona de subida são modificadas pelo fluxo gerado pela bolha. Caso ao entrar nesta zona, a componente de velocidade horizontal da partícula seja diferente de zero, ela sairá aos poucos da zona de subida do rastro da bolha, deixando-a depois de algum tempo. Caso a componente de velocidade da partícula na vertical seja negativa (em direção ao fundo do reator) após entrar na zona de subida, ela também sairá da zona aos poucos. Quando as partículas saem da zona de subida, elas passam pela zona limite do rastro da bolha novamente tendo sua componente de velocidade incrementada. Caso não aconteça nenhum desses casos anteriores, a inclusão continuará na zona de subida até a escória. Este fenômeno também está representado na figura 3.10c.

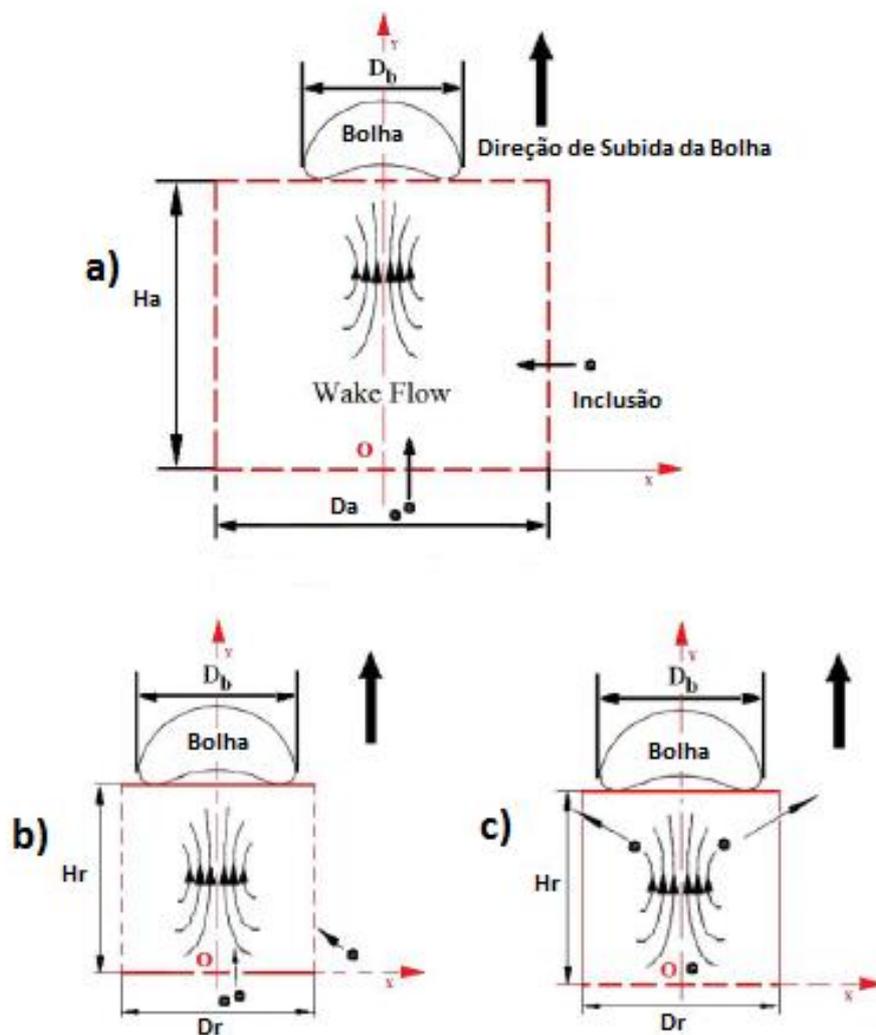


Figura 3.10 – Fenômenos de remoção de inclusão por rastro de bolha (Yang et al., 2014)

Yang et al. (2014) ainda mostra os efeitos dos diâmetros das bolhas e das inclusões no processo de remoção. Ele mostra que quanto maior o diâmetro da bolha, maior será a remoção de inclusões por este mecanismo, pois a zona limite e a zona de subida do rastro da bolha são aumentadas, capturando assim um maior número de partículas. Já para as inclusões, quanto menores elas forem, melhor será a remoção por este mecanismo. Segundo o mesmo autor, quanto menores forem as partículas, mais facilmente elas serão controladas pelo rastro, permanecendo dentro dele e ascendendo por mais tempo.

A figura 3.11 mostra um resumo esquematizado dos métodos de coalescência e remoção de inclusão por injeção de gás através das bolhas.

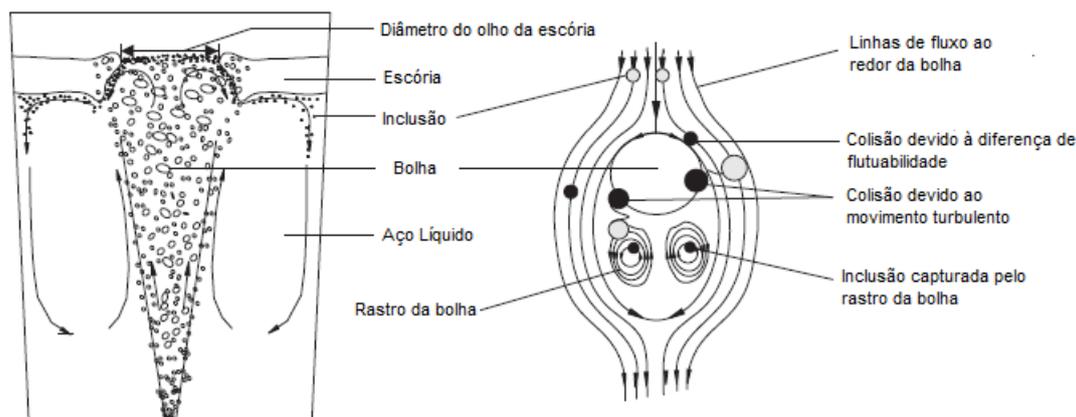


Figura 3.11 – Efeitos das bolhas no coalescimento e remoção das inclusões (Lou e Zhu, 2014)

- Remoção para a escória

Muitos esforços têm sido direcionados em estudos para remoção de inclusões do aço na metalurgia secundária. Um dos métodos de remoção de inclusões é quando elas são removidas para a escória. Segundo Park et al. (2006), esse método pode ser dividido em três partes: 1 – transporte da inclusão do banho metálico até a interface metal-escória, 2 – absorção da inclusão para a escória (separação da inclusão para a interface) e 3 – dissolução da inclusão na escória. As etapas 1 e 2 são influenciadas pelo escoamento do aço, enquanto a etapa 3 é influenciada pelas propriedades físico-químicas da escória.

- Remoção para o revestimento refratário

Como mostrado anteriormente, as inclusões têm a tendência de se acumular em válvulas e refratários. Para aços inoxidáveis, o TiN (nitreto de titânio) é um grande problema para o “clogging”, já para aços acalmados ao alumínio, a alumina é o maior vilão.

Sendo assim, acredita-se que um fenômeno parecido aconteça com o revestimento refratário. Acredita-se que as inclusões também tenham tendência de se acumular nas paredes dos refratários. (Söder, 2001)

- Mudança das características físico-químicas (morfologia) das inclusões

Um método muito utilizado é a utilização do cálcio para modificar a inclusão de alumina para cálcio-aluminatos de menor ponto de fusão e maior deformabilidade. As adições de ligas de cálcio são usadas para controlar a composição química, a

distribuição e a morfologia das inclusões remanescentes no aço. Essas adições melhoram propriedades como tenacidade e ductilidade. (Marcon, 2007)

O cálcio é difícil de ser utilizado, pois é muito reativo, tem baixo ponto de ebulição e tem baixa solubilidade no aço, sendo assim, uma forma amplamente utilizada é a adição de fios recheados. Isso previne que ele vaporize antes de entrar em contato com o aço e tenha maior rendimento. Outra forma é a utilização de ligas de cálcio que também aumentam a temperatura “liquidus” e de ebulição da liga, aumentando assim seu rendimento.

- Remoção por filtragem

Essa é uma técnica onde se usa um filtro cerâmico posicionado dentro do banho metálico para filtragem de inclusões não metálicas sólidas e líquidas.

Para as inclusões sólidas, existem dois fenômenos envolvidos. O primeiro seria o transporte das partículas pelo fluxo de aço até o filtro, controlado apenas pela mecânica dos fluidos do sistema. O segundo seria a adesão das partículas ao filtro, controlado pela mecânica dos fluidos e pelas propriedades interfaciais. (Hassal e Mills, 1998)

Quando o fluxo metálico traz a inclusão à vizinhança do filtro, é necessário que a partícula atravesse uma fina camada de metal que está aderida ao filtro antes de fazer contato com sua superfície. A energia para atravessar a camada de metal e chegar até o filtro pode resultar das forças interfaciais da partícula ou então da diminuição da energia interfacial devido à adesão da inclusão ao filtro. (Hassal e Mills, 1998)

Alguns cálculos sugerem que o filme metálico se extinguiria quando condições de não molhabilidade prevalecessem em relação à inclusão e ao filtro, tornando assim possível o estabelecimento de forças atrativas de pequeno alcance, possibilitando assim a adesão dos dois. (Hassal e Mills, 1998)

Para as inclusões líquidas, a sua adesão ao refratário também é muito importante. Quanto menor o ângulo de contato, melhor será sua adesão. Estudos também mostram que a eficiência de filtragem diminui com o aumento da velocidade do fluido e com o aumento da viscosidade do banho. (Hassal e Mills, 1998)

Para as inclusões líquidas existe um volume máximo de inclusões capturadas no filtro. Após atingir esse volume crítico, um número maior de inclusões líquidas, incluindo grandes glóbulos, será liberado do filtro. Apesar disso, esse mecanismo de aprisionamento de inclusões líquidas no filtro é muito complexo e ainda necessita de mais estudos (Hassal e Mills, 1998).

3.3. Modelamento Físico

O modelamento físico é a uma técnica de estudo de processos. Nesta abordagem, é construída uma réplica do equipamento industrial em laboratório. Esta réplica pode ser feita em escala menor que a real ou na mesma escala. Este modelamento pode ser feito a frio, utilizando materiais diferentes dos materiais utilizados na indústria, ou a quente, com os mesmos materiais ou materiais similares. Porém, as características desses materiais devem ser equivalentes em termos dos aspectos que serão investigados.

O modelamento físico é muito bem aceito em pesquisas siderúrgicas, dando uma ideia muito boa sobre escoamento dentro dos reatores, tempos para tratamentos, posições de peças, posições para adição de ligas, angulações, etc..

Na tabela III.5 são apresentados alguns trabalhos feitos por modelagem física de processos no Laboratório de Simulação de Processos, LaSiP, da UFMG.

Tabela III.5 – Exemplos de modelamentos físicos a frio e seus objetivos

| Processo | Reator | Objetivo |
|-----------------------|---------------|--|
| Metalurgia Primária | EOF | Configuração das lanças de injeção para otimização do sopro |
| Metalurgia Primária | LD | Avaliação da projeção de escória |
| Metalurgia Primária | LD | Desenvolvimento do bico de lança para injeção de oxigênio |
| Metalurgia Secundária | Panela/RH | Avaliação da taxa de descarburização no RH |
| Metalurgia Secundária | Panela/RH | Avaliação do tempo de mistura |
| Metalurgia Secundária | Panela | Avaliação da melhor configuração de plugues porosos para mistura em panela |
| Metalurgia Secundária | Panela | Avaliação de parâmetros de injeção para remoção de inclusões |
| Dessulfuração | Panela/KR | Taxa de remoção de |

| | | |
|-----------------------|--------------------|---|
| | | enxofre do ferro-gusa |
| Lingotamento Contínuo | Distribuidor/molde | Avaliação do tamanho da placa de mistura formada entre dois aços |
| Lingotamento Contínuo | Distribuidor | Avaliação do escoamento do aço com modificadores de fluxo |
| Lingotamento Contínuo | Distribuidor | Avaliação de parâmetros de injeção de gás para remoção de inclusões |

Além desses exemplos, existem muitos outros. Modelamentos a quente também podem ser utilizados, como por exemplo, para se descobrir a taxa de resfriamento de um aço no lingotamento contínuo com uso de spray d'água.

A construção e operação dos modelos físicos devem seguir certos critérios para que sejam assegurados que seus resultados possam ser transplantedos para o equipamento industrial. Para isso, devem ser respeitados critérios de similaridade. Estes critérios são apresentados e discutidos a seguir.

3.3.1. Critérios de similaridade

Como citado anteriormente, os critérios de similaridade servem para direcionar os pesquisadores no momento em que vão modelar um processo. Eles estabelecem as diretrizes para que um modelo seja uma réplica do reator industrial, sendo em escala reduzida ou não.

3.3.1.1. Similaridade geométrica

A similaridade geométrica é baseada nas formas. Dois corpos são ditos geometricamente similares quando para cada ponto em um deles, existe um ponto equivalente no outro. Essa correspondência ponto-a-ponto faz com que exista apenas uma única dimensão linear característica representando o tamanho do modelo e seu protótipo (modelo industrial).

Na simulação física de panelas agitadas a gás, essa dimensão característica é D_{mod} , que representa o diâmetro do modelo da panela. Da mesma forma, pode-se ter a dimensão característica de outros reatores.

Os modelos em escala reduzida, ou seja, menor que seu protótipo, devem seguir uma proporção dada por λ . Sendo que:

$$\frac{D_{\text{mod}}}{D_{\text{prot}}} = \frac{L_{\text{mod}}}{L_{\text{prot}}} = \lambda \dots\dots\dots \text{Eq. 3.10}$$

Onde:

D_{mod} = diâmetro do modelo

D_{prot} = diâmetro do protótipo

L_{mod} = altura do modelo

L_{prot} = altura do protótipo

λ = Fator de escala

Sempre que houver o subscrito “prot”, significará que a variável é relativa ao protótipo. Quando houver o subscrito “mod”, a variável será relativa ao modelo.

Essa equação mostra que todas as dimensões do reator simulado devem ser proporcionais ao fator λ , de forma que todos os pontos em um sistema tenham um equivalente no outro. (Mazumdar, 2010)

A figura 3.12 ilustra um reator industrial e seu modelo similarmente geométrico.

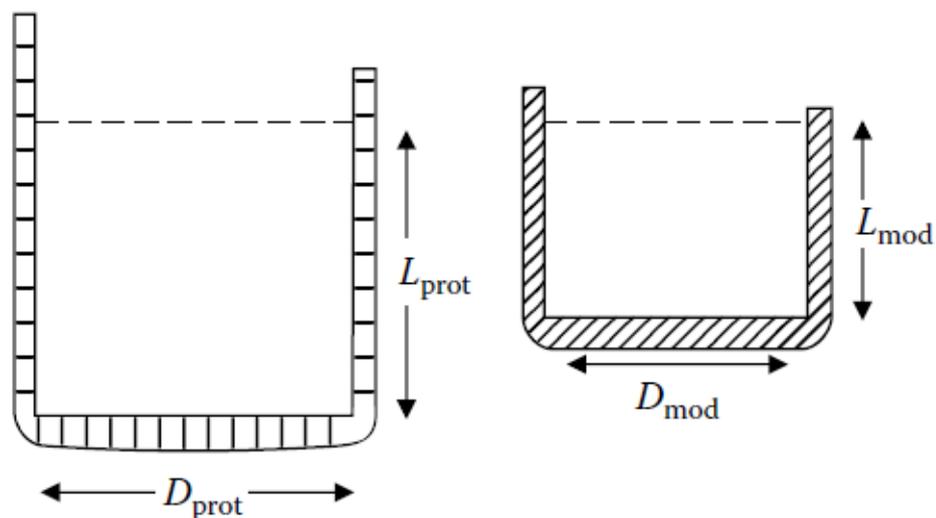


Figura 3.12 – Similaridade geométrica em uma panela de aciaria (Mazumdar, 2010)

3.3.1.2. Similaridade mecânica

A similaridade mecânica tem relação com a similaridade das forças, *momentum* e velocidades. Ela se subdivide em outras três similaridades: estática, dinâmica e cinemática. (Mazumdar e Evans, 2010)

3.3.1.2.1. Similaridade estática

Sistemas geometricamente similares também são estaticamente similares quando, sob tensão constante, suas deformações relativas são tais que eles permaneçam geometricamente similares. (Maia, 2013)

Porém, para modelamento de fenômenos como reações químicas, interação entre escória, gás e banho metálico esta similaridade não é importante. O estudo das forças responsáveis pela movimentação dos fluidos se torna muito mais importante. Estas forças serão responsáveis pela similaridade dinâmica. (Mazumdar e Evans, 2010)

3.3.1.2.2. Similaridade dinâmica

Esta similaridade está preocupada em garantir a equivalência entre as forças que retardam ou aceleram o movimento dos fluidos. Ela garante que as forças correspondentes, agindo em tempos correspondentes e em posições correspondentes, serão equivalentes. Essa correspondência significa que a razão entre as forças dos dois sistemas é uma constante. (Mazumdar e Evans, 2010)

O grande problema é saber quais forças serão importantes no estudo. No caso de panelas agitadas a gás, em tubulações ou em outros reatores isotérmicos, a equação de conservação da quantidade de movimento (Eq. 3.11) é importante para estabelecer esta similaridade. A partir dessa equação é possível identificar as forças importantes para a similaridade dinâmica

$$\frac{d}{dt}(\rho v_x v_x) = -\frac{dP}{dx} + \frac{d}{dx}\left(\mu \frac{dv_x}{dx}\right) + \rho g_x \dots\dots\dots \text{Eq. 3.11}$$

Onde:

ρ = densidade do líquido (kg/m³)

v_x = velocidade na direção x (m/s)

P = pressão no ponto (Pa)

μ = viscosidade do líquido (Pa.s)

g_x = aceleração da gravidade na direção x (m/s²)

Na equação 3.11 estão representadas forças referentes à inércia, pressão, viscosidade e gravidade. Estas forças devem, então, serem consideradas para a similaridade dinâmica.

Como dito anteriormente, para a similaridade dinâmica é necessária uma proporcionalidade entre as forças do modelo e do protótipo, sendo esta uma constante da forma da equação 3.12.

$$\frac{F_{I,mod}}{F_{I,prot}} = \frac{F_{P,mod}}{F_{P,prot}} = \frac{F_{V,mod}}{F_{V,prot}} = \frac{F_{G,mod}}{F_{G,prot}} = C \dots\dots\dots \text{Eq. 3.12}$$

Onde:

F_I = Forças relativas à inércia

F_P = Forças relativas à pressão

F_V = Forças relativas à viscosidade

F_G = Forças relativas à gravidade

A partir da equação 3.12, tem-se as equações 3.13, 3.14 e 3.15:

$$\left(\frac{F_I}{F_V}\right)_{mod} = \left(\frac{F_I}{F_V}\right)_{prot} \dots\dots\dots \text{Eq. 3.13}$$

$$\left(\frac{F_I}{F_G}\right)_{mod} = \left(\frac{F_I}{F_G}\right)_{prot} \dots\dots\dots \text{Eq. 3.14}$$

$$\left(\frac{F_I}{F_P}\right)_{mod} = \left(\frac{F_I}{F_P}\right)_{prot} \dots\dots\dots \text{Eq. 3.15}$$

Isso faz com que vários números adimensionais sejam importantes para o sistema estudado. Em geral, para modelamento físico, vários outros números adimensionais se tornam importantes, dependendo do fenômeno a ser estudado. Para o presente caso, os números representados pelas equações 3.13, 3.14 e 3.15 são os números de Reynolds, de Froude e de Euler. (Mazumdar e Evans, 2010)

O número de Reynolds (Re), comumente usado para determinação do regime de escoamento (laminar ou turbulento) de um fluido, pode ser interpretado como a razão entre as forças de inércia e viscosas. (Mazumdar e Evans, 2010)

O número de Froude (Fr) pode ser interpretado como a razão entre as forças de inércia e gravitacional. Ele também pode ser usado para caracterizar o regime de escoamento (lento, crítico ou rápido). (Carvalho e Aleixo, 2013)

O número de Euler (Eu) é a razão das forças devido à pressão e à inércia.

Estes são os três números adimensionais a serem considerados, porém pode-se expressar:

$$\frac{1}{Eu} = f(Re, Fr) \dots\dots\dots \text{Eq. 3.16}$$

Tornando assim a similaridade baseada nos critérios de “ Re ” e “ Fr ” as únicas a serem consideradas para este tipo de sistema. (Mazumdar e Evans, 2010)

Infelizmente, em sistemas em escala reduzida, não é possível satisfazer estes dois critérios. O Anexo A faz essa demonstração. Então, deve ser escolhido um dos critérios para o modelamento físico, Reynolds (Eq. 3.17) ou Froude (Eq. 3.18), representados a seguir:

$$Re = \frac{F_I}{F_V} = \frac{U \cdot L}{\nu} \dots\dots\dots \text{Eq. 3.17}$$

$$Fr = \frac{F_I}{F_G} = \frac{U^2}{gL} \dots\dots\dots \text{Eq. 3.18}$$

Onde:

U = velocidade do líquido (m/s)

ν = viscosidade cinemática (m²/s)

g = aceleração da gravidade (m/s²)

L = dimensão característica (m)

Sabendo que a viscosidade cinemática do aço a 1600°C é muito pequena, o número de Reynolds torna-se muito grande, fazendo assim com que as forças viscosas sejam relativamente pequenas se comparadas com as forças de inércia. Já para o número de Froude, que é de 100 a 1000 vezes menor do que “Re”, as forças gravitacionais passam a ser muito mais relevantes, em relação às forças da inércia, do que as forças viscosas. Assim, o número de Froude passa a ser o critério mais importante para similaridade física entre sistemas isotérmicos em que as forças a serem consideradas são as viscosas, gravitacionais, de inércia e de pressão. (Mazumdar e Evans, 2010)

Adotando então o número de Froude como critério de similaridade, tem-se as seguintes relações (demonstradas no Anexo A):

$$U_{p,mod} = U_{p,prot} \cdot \lambda^{0,5} \dots\dots\dots \text{Eq. 3.19}$$

$$Q_{mod} = Q_{prot} \cdot \lambda^{2,5} \dots\dots\dots \text{Eq. 3.20}$$

$$t_{mod} = t_{prot} \cdot \lambda^{0,5} \dots\dots\dots \text{Eq. 3.21}$$

Onde:

$U_{p,mod}$ = Velocidade do líquido no modelo

$U_{p,prot}$ = Velocidade do líquido no protótipo

Q_{mod} = Vazão de gás no modelo

Q_{prot} = Vazão de gás no protótipo

T_{mod} = Tempo no modelo

T_{prot} = Tempo no protótipo

Também é possível determinar o diâmetro das partículas usadas para simular as inclusões no aço nas simulações físicas. Sahai e Emi (1996) conseguiram derivar uma equação para o tamanho de inclusões em reatores com critério de similaridade baseado no número de Froude (também desenvolvido no Anexo A), que é mostrado a seguir:

$$R_{inc,m} = R_{inc,p} \cdot \lambda^{0,25} \left[\frac{1 - \frac{\rho_{inc,prot}}{\rho_{aço}}}{1 - \frac{\rho_{inc,mod}}{\rho_{água}}} \right]^{0,5} \dots\dots\dots \text{Eq. 3.22}$$

Onde:

$R_{inc,m}$ = Raio da inclusão no modelo

$R_{inc,p}$ = Raio da inclusão no protótipo

ρ_{inc} = Densidade da inclusão

$\rho_{aço}$ = Densidade do aço

$\rho_{água}$ = Densidade da água

Outra conversão necessária é a conversão de vazão, normalmente medida em Nm³/h nas empresas para m³/h e também a conversão da vazão do modelo para as condições normais de temperatura e pressão, dadas pelas equações 3.23 e 3.24. Essas conversões darão a vazão real de gás nas condições industriais para ser convertida posteriormente para vazão do modelo pela equação 3.20. Além disso, essas equações levam em consideração a expansão térmica sofrida pelas bolhas de gás e também a sua contração devido à pressão exercida pela coluna de aço. (Também desenvolvido no Anexo A)

$$V_{ind} \left(\frac{m^3}{h} \right) = V_{ind} \left(\frac{Nm^3}{h} \right) \cdot \frac{T_{aço}}{273} \cdot \frac{101330}{(101330 + \rho_{aço} \cdot g \cdot \frac{H_{aço,panela}}{2})} \dots\dots\dots \text{Eq. 3.23}$$

$$V_{mod} \left(\frac{m^3}{h} \right) = V_{mod} \left(\frac{Nm^3}{h} \right) \cdot \frac{T_{água}}{273} \cdot \frac{101330}{(101330 + \rho_{água} \cdot g \cdot \frac{H_{água,panela}}{2})} \dots\dots\dots \text{Eq. 3.24}$$

Onde:

V_{ind} = Vazão de gás na indústria

V_{mod} = Vazão de gás no modelo

$T_{aço}$ = Temperatura do aço líquido na indústria (K)

$T_{água}$ = Temperatura da água no modelo (K)

$H_{aço}$ = Altura do aço na panela industrial (m)

$H_{água}$ = Altura água no modelo (m)

$\rho_{aço}$ = Densidade do aço (kg/m^3)

$\rho_{água}$ = Densidade da água (kg/m^3)

g = Aceleração da gravidade (m/s^2)

3.3.1.2.3. Similaridade cinemática

A similaridade cinemática é atingida quando em sistemas em movimento, partículas de um protótipo terão rotas semelhantes às partículas do modelo em tempos proporcionais. Quando dois sistemas são cinematicamente e geometricamente similares, pode-se dizer que também são dinamicamente similares. (Mazumdar e Evans, 2010)

Para simulação física de panelas agitadas a gás, os modelos são relativamente simples de serem construídos, o que faz com que a similaridade geométrica também seja simples de se conseguir. De acordo com os princípios da similaridade dinâmica dos fluidos, pode-se dizer que as partículas terão caminhos equivalentes nos dois sistemas, tornando assim, satisfeita a condição da similaridade cinemática. A figura 3.13 mostra um exemplo de similaridade cinemática para adição de ligas em panelas.

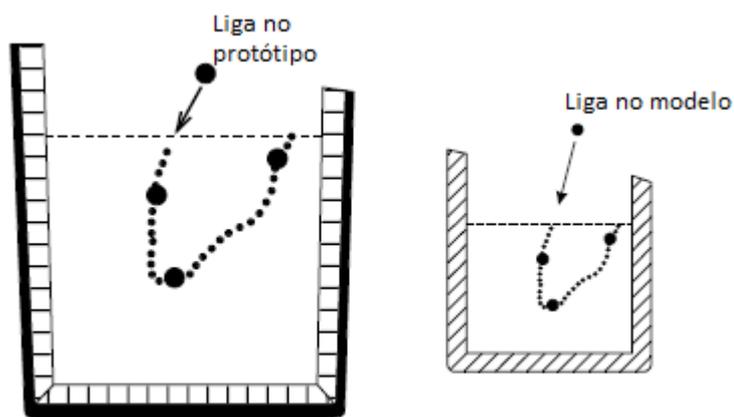


Figura 3.13 – escoamento de liga em um modelo (Mazumdar e Evans, 2010)

3.3.2 Escolha do modelo a frio

Os modelos a frio apresentam diversas vantagens. Porém, devem ser observadas particularidades dos sistemas para que seja escolhido o modelo mais apropriado.

A escala do modelo deve ser apropriada: nem tão pequeno, pela turbulência do processo, nem tão grande, pelos custos de construção e operação.

O fluido a ser utilizado deve ser bem escolhido também, bem como os parâmetros operacionais em escala reduzida (se for o caso). Modelos usando água têm a vantagem de a água ter praticamente a mesma viscosidade cinemática a 20°C que o aço a 1600°C, como mostrado na tabela III.6.

Tabela III.6 – Propriedades da água e do aço (Elias, 2010)

| Propriedade | Unidade | Água (20°C) | Aço (1600°C) |
|-------------------------------|-------------------|------------------------|----------------------|
| Viscosidade Dinâmica | kg/m.s | $0,855 \times 10^{-3}$ | $6,4 \times 10^{-3}$ |
| Massa específica | kg/m ³ | $0,988 \times 10^3$ | $7,08 \times 10^3$ |
| Viscosidade Cinemática | m ² /s | $0,86 \times 10^{-6}$ | $0,9 \times 10^{-6}$ |

Sendo assim, mesmo em modelos de escala reduzida, a água terá o escoamento similar ao aço, tornando o efeito da redução de escala menor.

Nos modelos usando água como fluido, os parâmetros operacionais são determinados pela similaridade dinâmica e em modelos isotérmicos o escoamento é ditado praticamente pelo número de Froude. Entretanto, o número de Froude não depende de propriedades termofísicas e por isso qualquer fluido pode ser usado para a simulação do aço. Porém, os modelos com água têm algumas vantagens, como baixo custo, abundância de matéria-prima, líquido não corrosivo, neutro e transparente, para fácil visualização do escoamento. Tornando assim a água o líquido mais recomendável para escoamentos isotérmicos.

3.3.3. Plugue poroso

A importância dos plugues porosos nos tratamentos do aço é indiscutível. Através do plugue é injetado o gás que vai promover agitação do banho metálico, o que é extremamente importante tanto para homogeneização térmica e química, quanto para remoção de inclusões não-metálicas. Alguns estudos sugerem que o plugue seja mais

eficiente que ventaneiras e do que injeção por lança nos tratamentos da panela (Anagbo e Brimacombe, 1990)

3.3.3.1. Formação de bolhas

Já é de amplo conhecimento que quanto menores forem as bolhas e menos intensa a sua coalescência, melhor será o tratamento do aço. Anagbo e Brimacombe (1990) explicam que existem três regimes bolhas. Um deles é onde as bolhas são pequenas e permanecem pequenas até chegarem ao topo. O segundo seria um regime transiente de coalescência das bolhas, onde as bolhas são geradas pequenas, mas coalescem durante a subida. O último seria o regime onde são formados grandes bolsões de gás que sobem até o topo do banho. Esses regimes seguem uma relação com a vazão de gás por área do plugue poroso. Esses autores ainda sugerem valores em seu trabalho como mostra a tabela III.7:

Tabela III.7 – Regimes de bolhas em relação ao fator Q/A (Anagbo e Brimacombe, 1990)

| Regime | Valor ($\text{cm}^3/\text{s.cm}^2$) |
|--------------------------|---------------------------------------|
| Bolhas pequenas | < 14 |
| Fase de coalescência | $14 < x < 40$ |
| Bolhas grandes (bolsões) | >40 |

Alexiadis (2007) também mostra a existência dos três regimes citados por Anagbo e Brimacombe (1990) em seu trabalho experimental. Porém, para ele, estes regimes estão relacionados apenas com a vazão de gás. A figura 3.14 mostra esses três regimes para diferentes vazões.

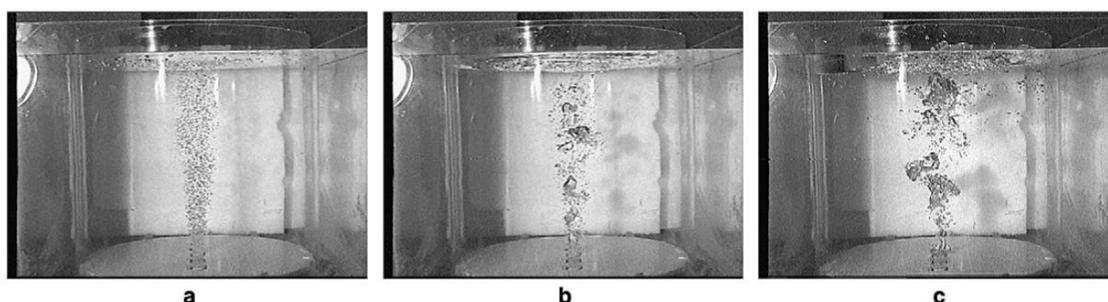


Figura 3.14 – Diferentes regimes de bolhas para diferentes vazões. A) 3L/min, b) 8L/min e c) 18L/min (Alexiadis, 2007)

Alexiadis (2007) também cita que existem diferentes metodologias para o cálculo de coalescência e quebra das bolhas, sendo dependente principalmente da fração de gás e de um número adimensional N_g (função do tamanho de bolhas, dissipação de energia, densidade e tensão superficial), que pode ser considerado como o número de

Weber turbulento. Sendo assim, ele propõe a figura 3.15, que mostra essa dependência.

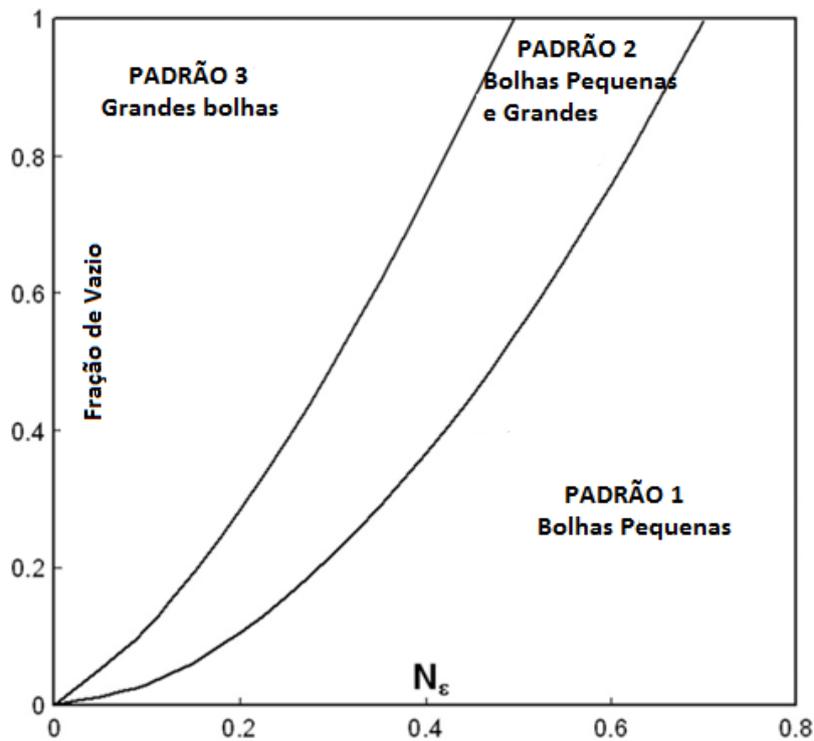


Figura 3.15 – Padrões de bolha de acordo com a fração de vazios e N_ϵ (Alexiadis, 2007)

Essas linhas de transição do gráfico foram obtidas correlacionando valores críticos de fração de vazios (α) e N_ϵ . Dessa forma, ele consegue definir bem esses limites. A equação para N_ϵ é expressa por:

$$N_\epsilon = \frac{d_0^{5/3} \epsilon^{2/3} \rho}{\sigma} \dots\dots\dots \text{Eq. 3.25}$$

Os valores de α_{crit} que correlacionam com N_ϵ entre as regiões 2 e 3 da figura 3.15 são dados pela equação:

$$\alpha_{crit} = 1,9N_\epsilon^{1,8} \dots\dots\dots \text{Eq. 3.26}$$

Os valores de α_{crit} que correlacionam com N_ϵ entre as regiões 1 e 2 da figura 3.15 são dados pela equação:

$$\alpha_{crit} = 2,57N_\epsilon^{1,36} \dots\dots\dots \text{Eq. 3.27}$$

Onde:

d_0 = diâmetro de bolha (m);

ε = taxa de dissipação de energia (m^2/s^3);

ρ = densidade do líquido (kg/m^3);

σ = tensão superficial (N/m)

3.4. Trabalhos Semelhantes

Existem diversos trabalhos anteriores feitos para avaliação da remoção de inclusões em tratamentos metalúrgicos. São diversos modelamentos físicos e computacionais de reatores siderúrgicos feitos com o intuito de avaliar diversos aspectos da remoção de inclusões. A maioria destes trabalhos foi desenvolvida para o distribuidor e grande parte por modelamento computacional.

Chakraborty (2010) em conjunto com a equipe da universidade McGill aprimoraram a sonda APS e a transformaram em sua atual versão, a APS III. Em seu trabalho, Chakraborty (2010) fez um modelamento físico de um distribuidor em formato delta, com quatro veios. Ele posicionou a APS em dois veios não simétricos e injetou partículas esféricas de boro silicato para simulação de inclusões.

A simulação física foi feita com o distribuidor em estado estacionário. Dessa forma, a quantidade de água que entra é a mesma que sai. Uma técnica interessante utilizada no distribuidor é a quantificação das inclusões que saem e o termo utilizado para isso é RRI (*Residual Ratio of Inclusion*). Essa técnica avalia a quantidade de inclusões que estão entrando no distribuidor e a quantidade de inclusões que estão saindo, sendo assim, definida por:

$$RRI = \frac{\text{Quantidade de inclusões que saíram pelo veio}}{\text{Quantidade de inclusões que foram adicionadas pela válvula}} \cdot 100 \dots \text{Eq. 3.28}$$

Quanto maior for o valor de RRI, menor será o número de inclusões removidas e pior o desempenho do distribuidor em relação à remoção de inclusões.

Sendo assim, a APS foi posicionada no fundo do distribuidor, nos dois veios, sendo um mais ao centro (referido aqui como veio de dentro) e outro mais afastado do centro (referido aqui como veio de fora).

Foram feitos experimentos com modificadores de fluxo e sem modificadores de fluxo e foi apresentada uma curva de RRI para diversos tamanhos de inclusões, mostrada na figura 3.16.

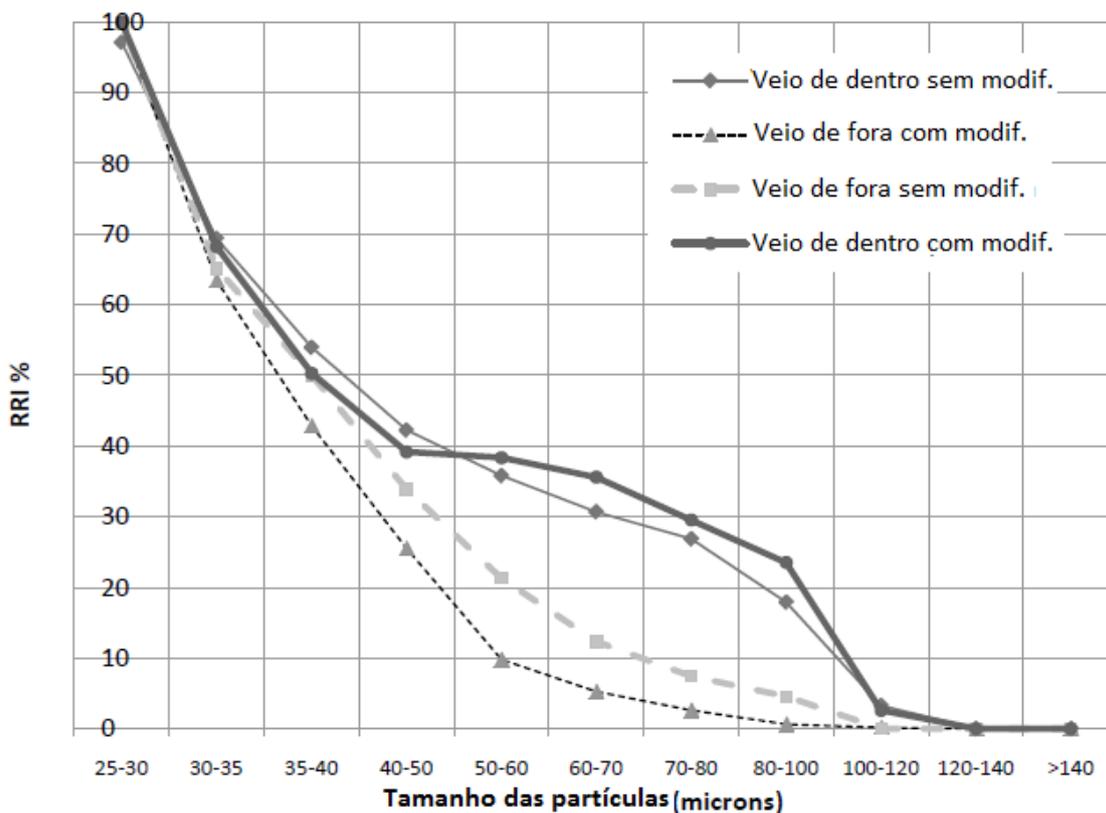


Figura 3.16 – Curvas de RRI (Chakraborty, 2010)

O autor (Chakraborty, 2010) mostra que para as inclusões muito pequenas a taxa de remoção é muito pequena para os dois veios, mesmo com os modificadores de fluxo utilizados.

Esse trabalho mostrou que com os modificadores de fluxo utilizados, a remoção de inclusões diminuiu para o veio de dentro, já para o veio de fora, houve um pequeno aumento na remoção de inclusões.

Já Thomas et al. (1997) fizeram um modelamento matemático da injeção de gás na válvula submersa com o objetivo de mostrar a importância da injeção de gás para a remoção de inclusões e para se evitar o “clogging” das válvulas. Os autores simularam a injeção acima da válvula gaveta, e utilizaram um modelo de fixação de inclusões às bolhas. No modelo, uma inclusão de raio “r” se fixará à bolha somente se a linha de fluxo na qual ela está, estiver a uma “r” ou menor da bolha. Os resultados de Thomas et al. (1997) são mostrados nas figuras 3.17 e 3.18.

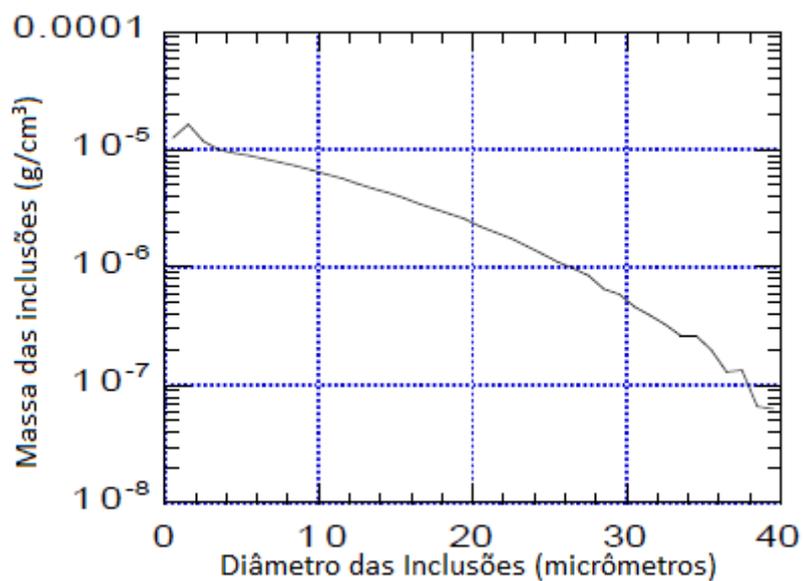


Figura 3.17 – Diâmetro e massa de inclusões fixadas a cada bolha (Thomas et al., 2007)

Este gráfico mostra a massa de inclusões que fica fixada a cada bolha e o diâmetro dessas inclusões.

A figura 3.18 mostra o gráfico com a massa de inclusões agregadas a uma bolha que viaja um metro dentro do aço para diferentes tamanhos de bolhas e diferentes quantidades iniciais de oxigênio.

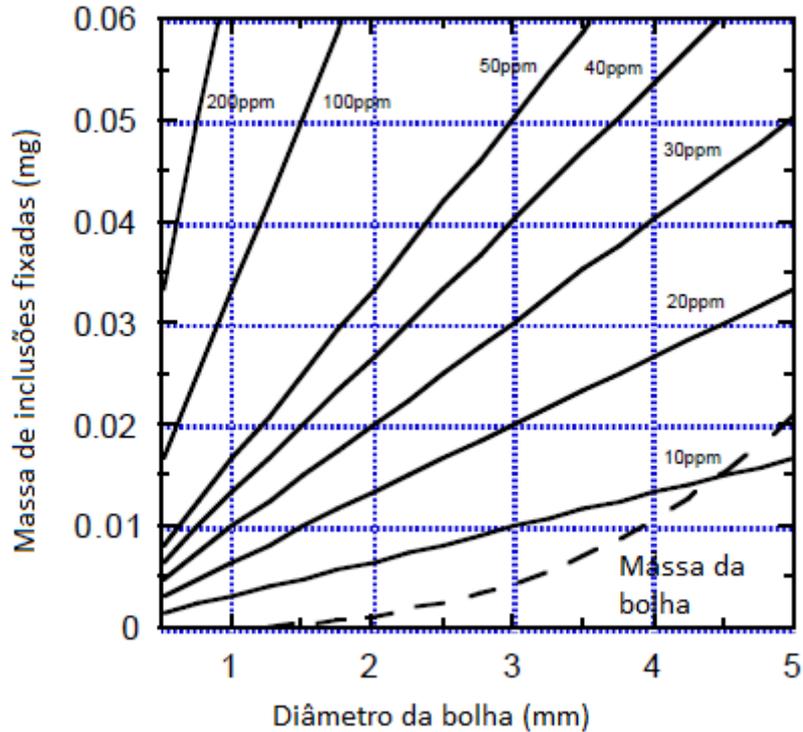


Figura 3.18 – Massa de inclusões fixadas de acordo com o diâmetro da bolha e com a quantidade inicial de oxigênio (Thomas et al., 2007)

Neste gráfico pode-se observar que quanto maior a quantidade inicial de oxigênio, mais inclusões uma bolha capturará.

Os autores mostram que a massa de inclusões fixadas em cada bolha pode ser dada por:

$$M = 3,3 \cdot 10^{-7} D_{bol} O_{ppm} X \dots\dots\dots \text{Eq. 3.29}$$

Onde: M = massa de inclusões fixadas por cada bolha (kg);

D_{bol} = diâmetro da bolha de argônio (m);

O_{ppm} = quantidade de oxigênio no aço (ppm);

X = distância percorrida pela bolha(m).

Outro trabalho feito por Lou W. e Zhu M. (2014), modelando a panela, também utilizou simulações computacionais utilizando CFD para otimizar a remoção de inclusões e o tempo de mistura em panelas agitadas a gás. Ele incorporou cinco modelos de remoção de inclusão, sendo eles: ascensão natural de inclusões perto da camada de

escória/metalo, colisão da inclusão e bolha por diferença de densidade, colisões turbulentas aleatórias entre inclusão e bolha, colisão cisalhante entre inclusão e bolha e inclusões capturadas pelo fluxo ascendente da bolha. Foram testadas três configurações diferentes para injeção de gás no fundo da panela, sendo a primeira uma ventaneira centralizada, a segunda, uma ventaneira descentralizada a 0,5R e a terceira, duas ventaneiras simetricamente posicionados a 0,5R (R = raio da panela).

Os resultados apresentados por Lou e Zhu (2014) mostram que os principais mecanismos para remoção de inclusões nos estágios primários do tratamento por gás são a captura por rastro de bolha e por colisões devido à diferença de densidade. Com o passar do tempo e com o aumento do tamanho das inclusões, a colisão turbulenta aleatória passa a ser o mecanismo predominante. O gráfico da figura 3.19, a e b, mostra os resultados para a injeção de gás centralizado e a injeção com dois plugues.

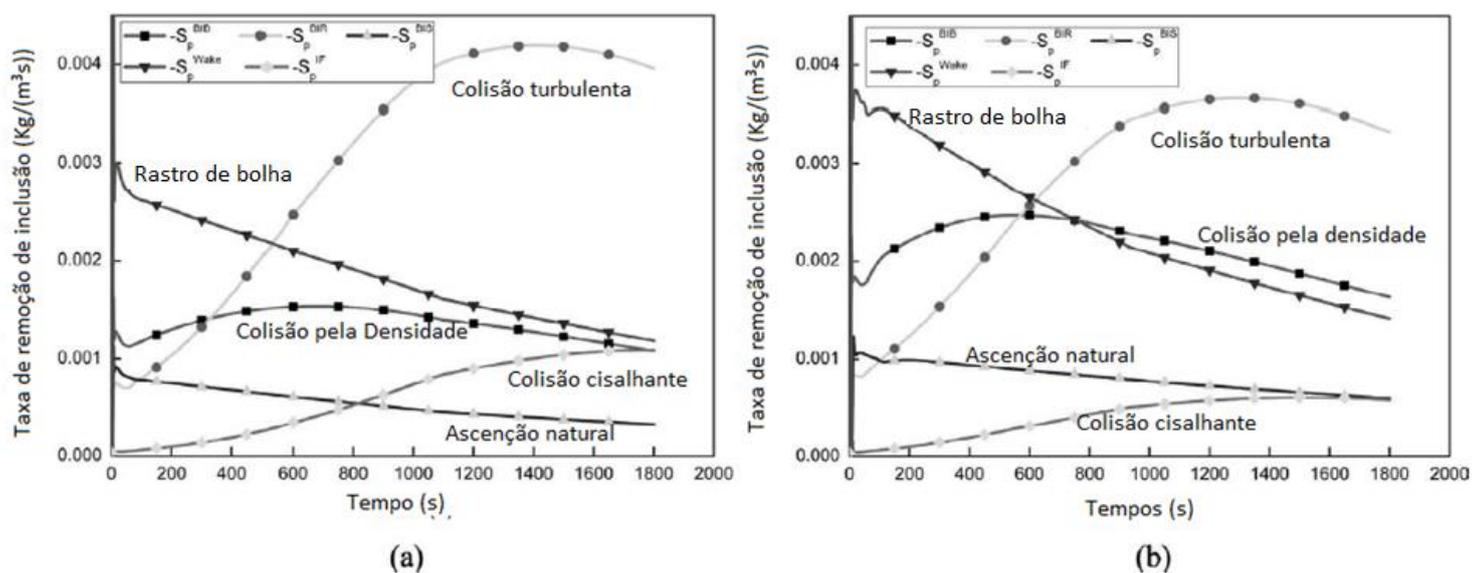


Figura 3.19 – Taxa de remoção de inclusões por diferentes mecanismos em a) plugue centralizado e b) dois plugues simétricos (Lou e Zhu. 2014)

Os autores também apresentam outro gráfico onde comparam as três configurações e seus mecanismos após 30 minutos de injeção de gás a 200NL/min. Esse gráfico é mostrado na figura 3.20.

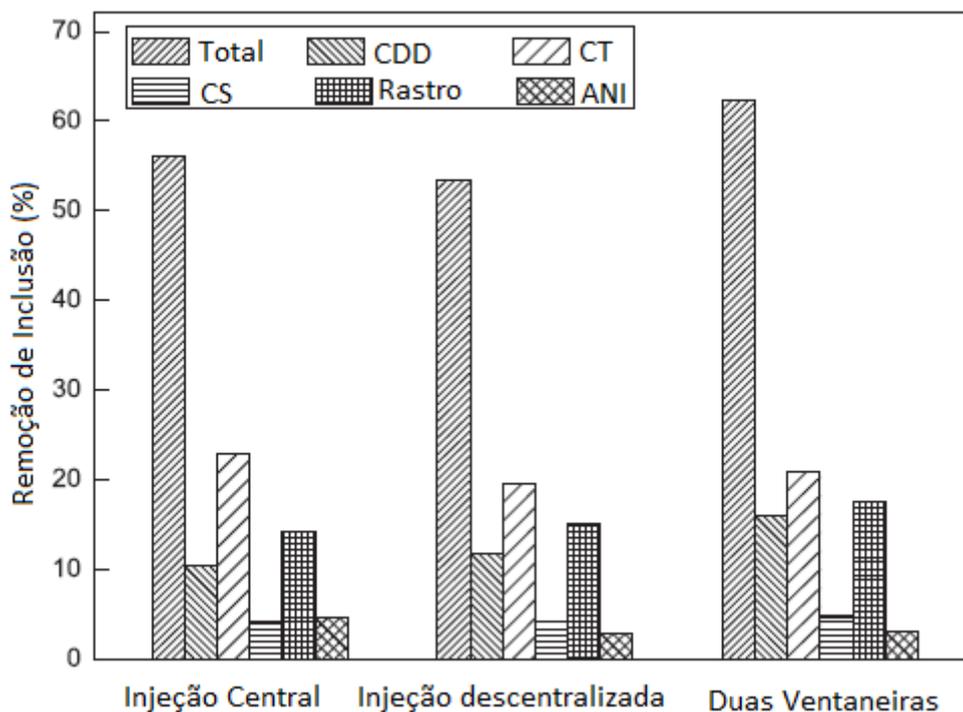


Figura 3.20 – Remoção de inclusões por diversos mecanismos em configurações diferentes de injeção de gás (Lou e Zhu, 2014)

Neste gráfico, a primeira coluna é a remoção total, a segunda coluna é a remoção por colisão por diferença de densidade (CDD), a terceira é por colisão turbulenta (CT), a quarta é por colisão cisalhante (CS), a quinta é por rastro de bolha (Rastro) e a sexta é por ascensão natural das inclusões (ANI) perto da camada metal/escória.

Pode-se observar que a maior remoção se dá na panela com duas ventaneiras e que a injeção centralizada, segundo Lou e Zhu (2014), é melhor do que a descentralizada para essa remoção. Além disso, pode-se observar que os mecanismos que mais removem inclusões são a colisão turbulenta e o rastro de bolhas.

Outra análise feita pelos autores foi a influência do ângulo entre as duas ventaneiras na remoção de inclusões. Foram estudados os ângulos de 45°, 90°, 135° e 180°. Este ângulo é definido fixando-se uma das ventaneiras no raio e variando o ângulo entre elas. Assim eles obtiveram o gráfico da figura 3.21. Esse gráfico foi obtido com 30 minutos de tratamento e 200NL/min de vazão de gás.

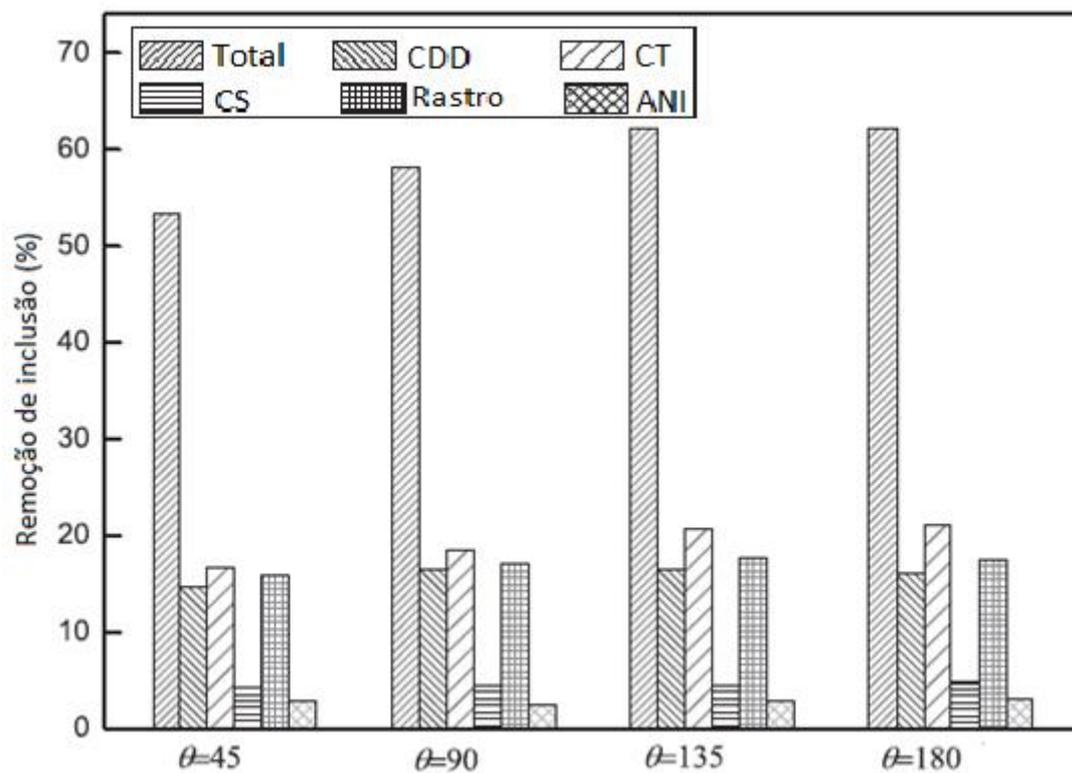


Figura 3.21 – Influencia do ângulo entre as duas ventaneiras para remoção de inclusões (Lou e Zhu, 2014)

Neste gráfico, pode-se observar que a maior remoção de inclusões se dá para os plugues com angulação de 180° entre eles.

Lou e Zhu (2014) também investigaram a influência da vazão de gás na remoção das inclusões e obtiveram o gráfico da figura 3.22.

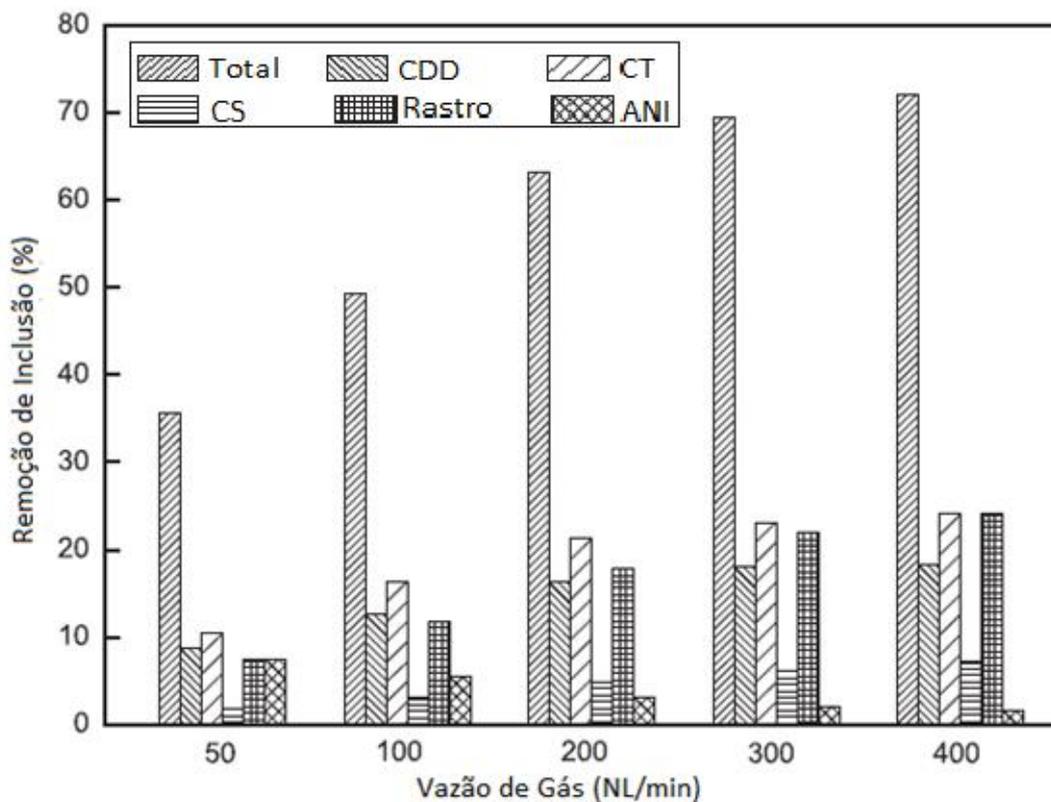


Figura 3.22 – Influência da vazão de gás na remoção de inclusões (Lou e Zhu, 2014)

Para os autores, quanto maior for a vazão de gás, maior será a remoção de inclusões em 30 minutos de tratamento. No entanto, segundo os mesmos, ao se passar de 300NL/min esse aumento é muito pequeno.

Em outro trabalho, Nascimento (2008) modelou fisicamente um distribuidor e injetou partículas para simular inclusões. A sua metodologia consistia em injetar partículas pela válvula longa através de uma bomba peristáltica e captá-las nos dois veios do distribuidor através de uma malha de peneira. O autor fez comparações entre o tamanho da peça porosa, tipo de peça porosa, posição da peça dentro do distribuidor e vazão de gás.

O resultado obtido quanto ao material estudado é que o material poroso básico é melhor em relação ao material silico-aluminoso. Segundo o autor, a maior homogeneidade de poros no material básico pode ser responsável por isso, já que assim, provoca a formação de pluma e bolhas mais uniformes.

Quanto à posição do plugue dentro do distribuidor, ele mostra que quanto mais próximo da válvula longa, maior será a eficiência de remoção de inclusões. Segundo o próprio autor, isso pode acontecer devido a um fluxo ascendente já existente na região, sendo otimizado pelo fluxo de bolhas, também ascendente.

Em relação ao tamanho do plugue poroso, quanto maior este for, maior será a eficiência de remoção de inclusões.

Foi constatado também que há pouca influência da vazão de gás na remoção de partículas do sistema.

Outro fato observado é que a eficiência é maior para inclusões maiores. Nascimento (2008) estudou duas faixas granulométricas, de 50 a 100 μm e de 100 a 200 μm . A maior eficiência de remoção foi das partículas maiores.

Kwon, Zang e Lee (2008) desenvolveram um trabalho de modelamento de panela de aciaria baseado em CFD, onde simularam a nucleação, crescimento e remoção de inclusões por diversos mecanismos durante a desoxidação utilizando alumínio. O modelo simulado é de uma panela de 250 toneladas de aço, com 300ppm de oxigênio no aço, com uma variação vertical de temperatura de 40°C. A injeção é feita por ventaneira centralizada no fundo da panela. O gráfico da figura 3.23 mostra a densidade de inclusões com o tempo e por tamanho.

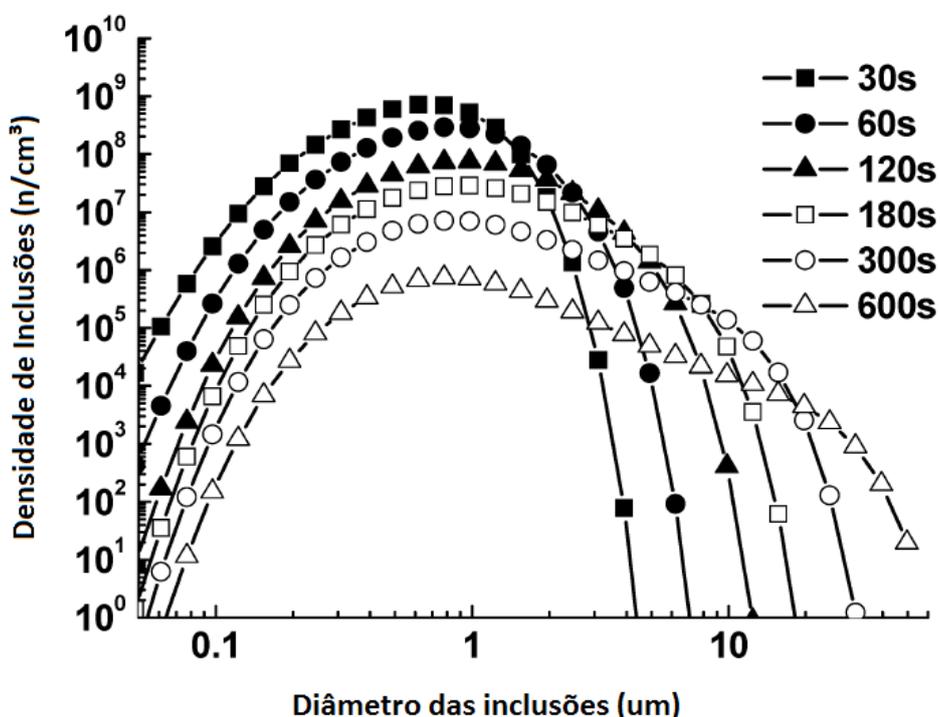


Figura 3.23 – Distribuição de tamanho das inclusões com o passar do tempo (Kwon, Zang e Lee, 2008)

Esse gráfico mostra que as inclusões crescem e que a densidade de inclusões diminui com o passar do tempo. Isso acontece devido às colisões entre elas, provocando seu coalescimento e devido à fixação das inclusões às bolhas, removendo-as.

O gráfico da figura 3.24 mostra a distribuição de tamanho das inclusões com o tempo.

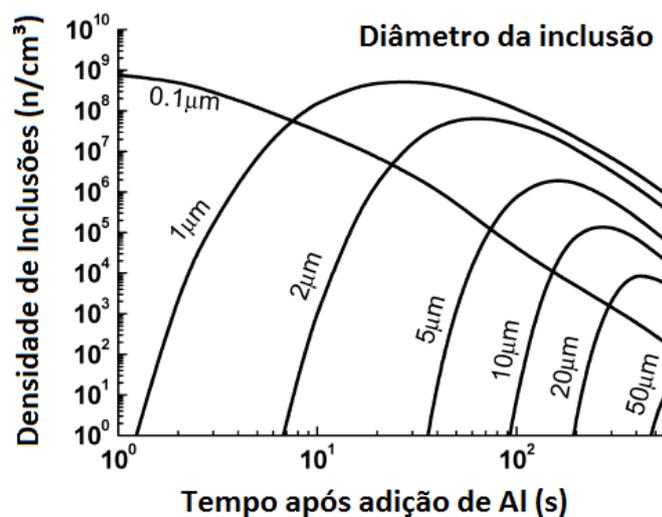


Figura 3.24 – Coalescimento das inclusões com o tempo após adição de alumínio (Kwon, Zang e Lee, 2008)

Esse gráfico também mostra a coalescência das inclusões e sua remoção após a adição de alumínio ao banho metálico.

Um gráfico mais simplificado da remoção de inclusões pelo crescimento é mostrado na figura 3.25.

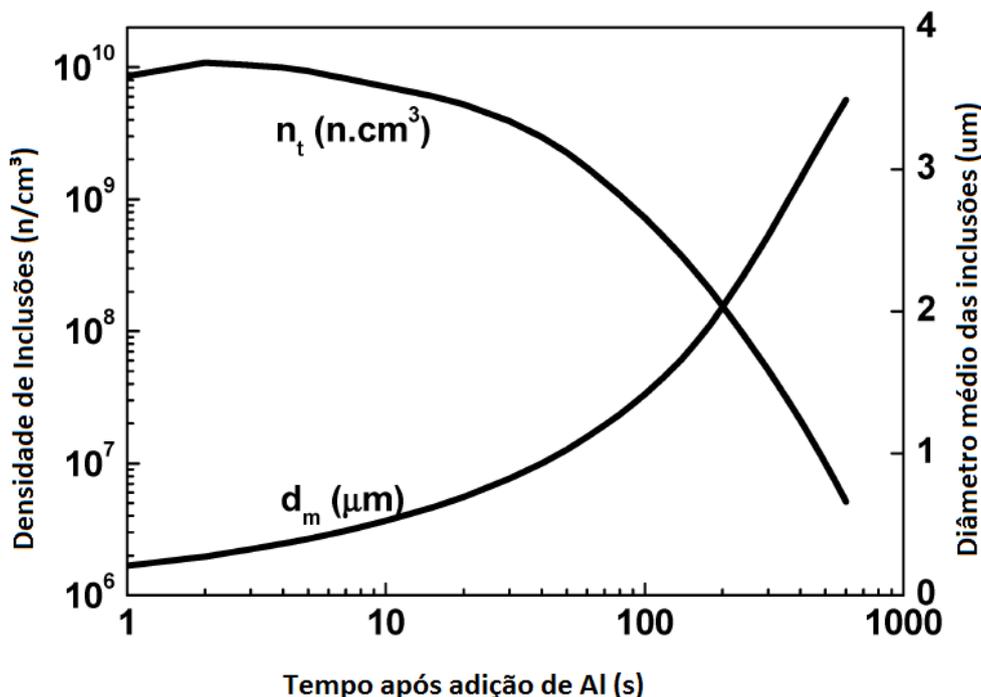


Figura 3.25 – Diâmetro e massa das inclusões com o tempo após adição de alumínio (Kwon, Zang e Lee, 2008)

A figura 3.25 mostra que o número de inclusões diminui bastante enquanto elas crescem. Quando apresentado junto com a figura 3.24, nota-se que as inclusões maiores surgem depois de certo tempo após injeção de alumínio, pois elas são formadas pelo coalescimento de inclusões menores, que se juntam para formar uma inclusão maior.

Chang et al. (2016) fizeram experimentos em um modelo aquoso em escala real de um distribuidor utilizando a sonda APS, mesma sonda utilizada no presente trabalho. Em seu trabalho, os autores desenvolveram um dispositivo que injeta ar através de orifícios na válvula longa que produzem micro bolhas. A sonda APS conta as partículas que saem pelos veios e são comparados os resultados entre diversas configurações do distribuidor.

Eles compararam a posição de injeção, mais perto ou afastada da válvula gaveta, o número de portas para injeção e a vazão de gás.

Nos ensaios realizados, foi visto que a melhor posição para injeção de gás, onde ocorria a maior remoção de inclusões, seria o mais perto da válvula gaveta. Sendo este onde ocorre maior dissipação de energia turbulenta, tornando assim, maior a probabilidade de colisão entre bolha e inclusão e removendo-as com mais frequência.

Quanto ao número de portas, ou seja, número de orifícios para injeção de gás, para uma mesma vazão total, quanto maior o número de orifícios, melhor será a remoção de inclusões. Isso acontece, porque quanto maior o número de orifícios, menor será a vazão em cada orifício e assim, menor será o tamanho da bolha. Dessa forma, existirá uma maior área de contato total, aumentando assim, a probabilidade de encontro entre uma inclusão e uma bolha.

Quanto à vazão de gás, a eficiência de remoção de inclusões passa por um pico. Ou seja, começa menor, aumenta e depois diminui novamente. Isso ocorre porque a eficiência de remoção de inclusões parece ser um balanço entre dois fatores: o número de bolhas e a área superficial total. Sendo assim, com baixa vazão, o número de bolhas é muito pequeno, o que diminui a probabilidade de encontro entre inclusão e bolha. Ao aumentar a vazão, o número de bolhas também aumenta, aumentando assim a probabilidade de encontro entre inclusão e bolha e aumentando a eficiência de remoção. Ao aumentar mais ainda a vazão, o tamanho das bolhas aumenta, diminuindo a área superficial total das bolhas, o que faz com que a probabilidade de remoção diminua.

O gráfico da figura 3.26 ilustra o que foi relatado anteriormente.

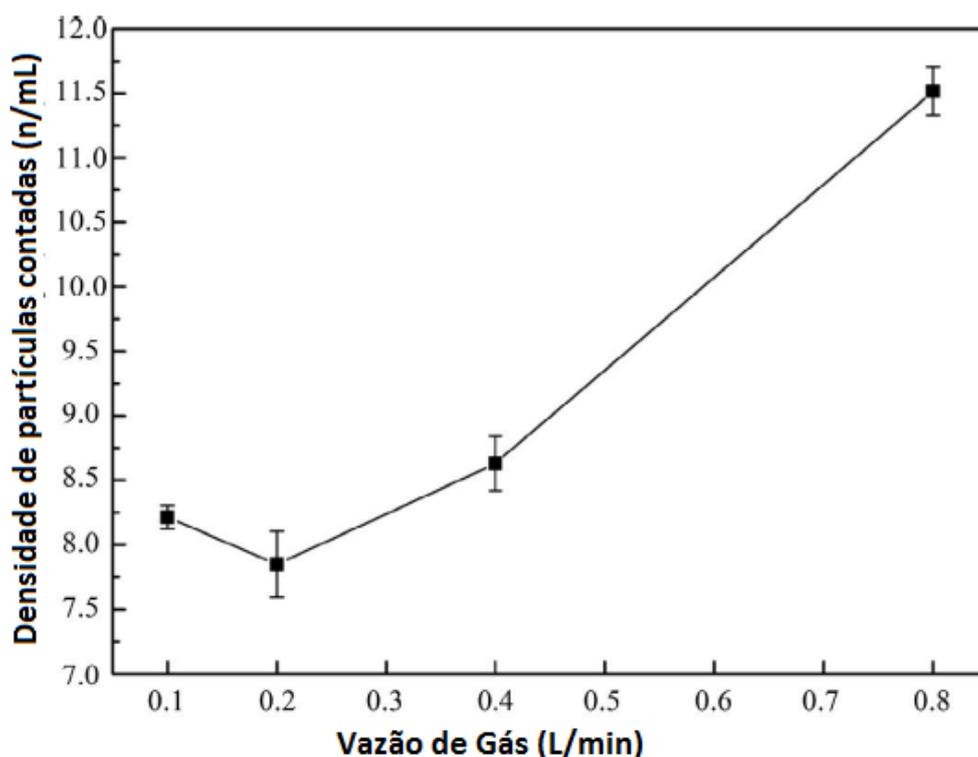


Figura 3.26 – Influência da vazão na remoção das inclusões (Chang et al., 2016)

A densidade de partículas contadas é a quantidade de partículas contadas pela sonda APS por unidade de volume da amostra. Quanto maior o número de partículas contadas, maior é a quantidade de partículas passando pelo veio, ou seja, pior é o tratamento. As vazões testadas pelos autores foram de 0,1; 0,2; 0,4 e 0,8 L/min.

4. METODOLOGIA

4.1. Modelo Físico da Panela

O modelo físico da panela consiste em um aparato feito em acrílico, em escala 1:5 de uma panela real de aciaria de 180t. O modelo mede 72,5cm de altura, o diâmetro inferior é 64,5cm e superior é 72,5cm. Os testes foram feitos com a água numa altura de 60,0cm, que é o correspondente à altura real de aço na panela de aciaria. O volume de água na panela é de 227 litros. Uma vista esquemática da panela é mostrada na figura 4.1.

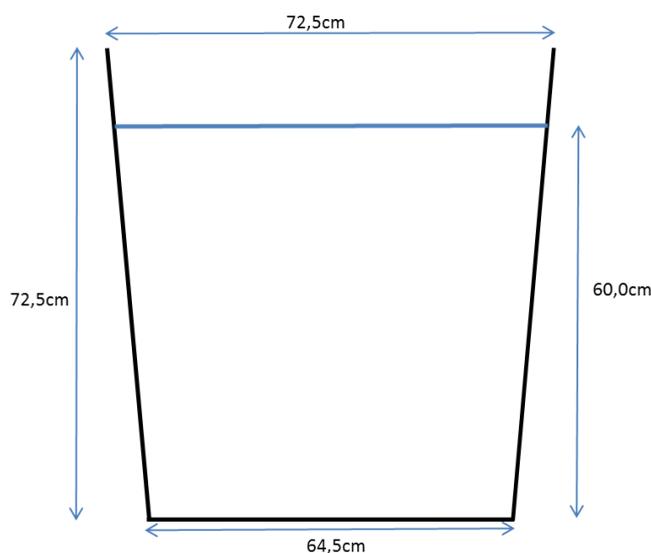


Figura 4.1 – Esquema do modelo de panela usado para os testes

Como já foi dito anteriormente, o trabalho visa encontrar melhores condições para remoção de inclusões na panela de aciaria a partir do borbulhamento de argônio mudando algumas variáveis. Desta forma, os testes foram feitos para simular as condições reais de uma aciaria.

4.2. Sonda APS

A sonda APS, “Aqueous Particle Sensor”, é baseada nas tecnologias desenvolvidas para a sonda LiMCA, “Liquid Metal Cleanliness Analyzer”, que tem o objetivo de medir a quantidade de inclusões no metal líquido. Ela faz essa medição baseada no princípio de ESZ, “Electric Sensing Zone”, que mede a diferença de condutividade elétrica entre as inclusões e o aço. (Chakraborty, 2010)

A figura 4.2A mostra o desenho esquemático da sonda com suas dimensões.

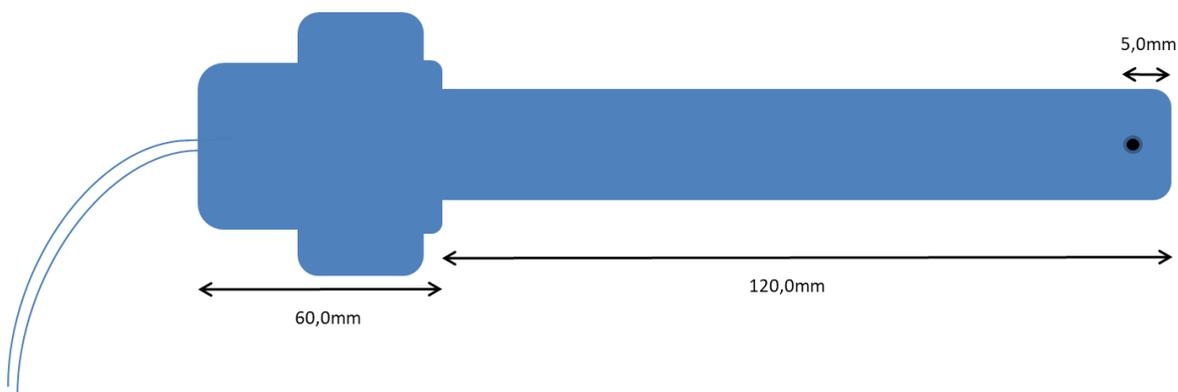


Figura 4.2A – Desenho esquemático com dimensões da sonda APS

Essa sonda consiste em um tubo de vidro com um orifício em sua ponta por onde passam as partículas. A sonda tem 180mm de tamanho, a distância entre a ponta da sonda e o orifício é de 5mm. Esse orifício mede 500 μ m e suga o líquido continuamente enquanto os testes são feitos. Existem dois eletrodos na sonda, um na parte interna do tubo e outra na parte externa. Esses eletrodos medem continuamente a diferença de potencial do líquido. Ainda existem outros dois canais na sonda, um por onde passam os fios que levam a informação até um amplificador de sinal e o outro é a saída de líquidos. Da mesma forma que a sonda suga as partículas através do orifício e ejeta pelo canal, também existe a possibilidade de fazer o trabalho contrário, ou seja, puxar o líquido através do canal e ejetar através do orifício. (Chakraborty, 2010)

A figura 4.2B mostra a foto da sonda APS, utilizada para os testes em laboratório.



Figura 4.2B – Sonda APS

O funcionamento da sonda é relativamente simples. Durante todo o tempo uma corrente “i” é passada através dos eletrodos e assim ela mede continuamente a diferença de potencial entre eles. Tendo em vista que a resistividade do meio é

sempre a mesma, essa tensão será constante (Chakraborty, 2010). A tensão é dada pela fórmula:

$$V = R \cdot i \dots\dots\dots \text{Eq. 4.1}$$

Quando as partículas passam pelo eletrodo, elas mudam a resistividade do meio, já que possuem uma resistividade diferente (ΔR) da resistividade inicial (R). Sendo assim, a sonda passará a medir uma tensão diferente:

$$V = (R + \Delta R) \cdot i \dots\dots\dots \text{Eq. 4.2}$$

Onde:

V = Tensão (v)

R = Resistência (Ω)

ΔR = Incremento na resistência devido a uma partícula (Ω)

i = Corrente (A)

Assim, a tensão terá um aumento e então o software identificará esse aumento como sendo uma partícula que passou através do orifício. Cada pico na tensão será identificado como uma partícula isolada. O software que captura os dados gerados pela sonda retornará a contagem acumulada de partículas que foram sugadas. Além disso, o software foi calibrado para que a partir do tamanho do pico medido, seja atribuído um tamanho diferente para a partícula. Desta forma, ele também retornará a distribuição de tamanhos das partículas contadas. A figura 4.3 mostra o princípio de funcionamento da sonda APS. (Chakraborty, 2010)

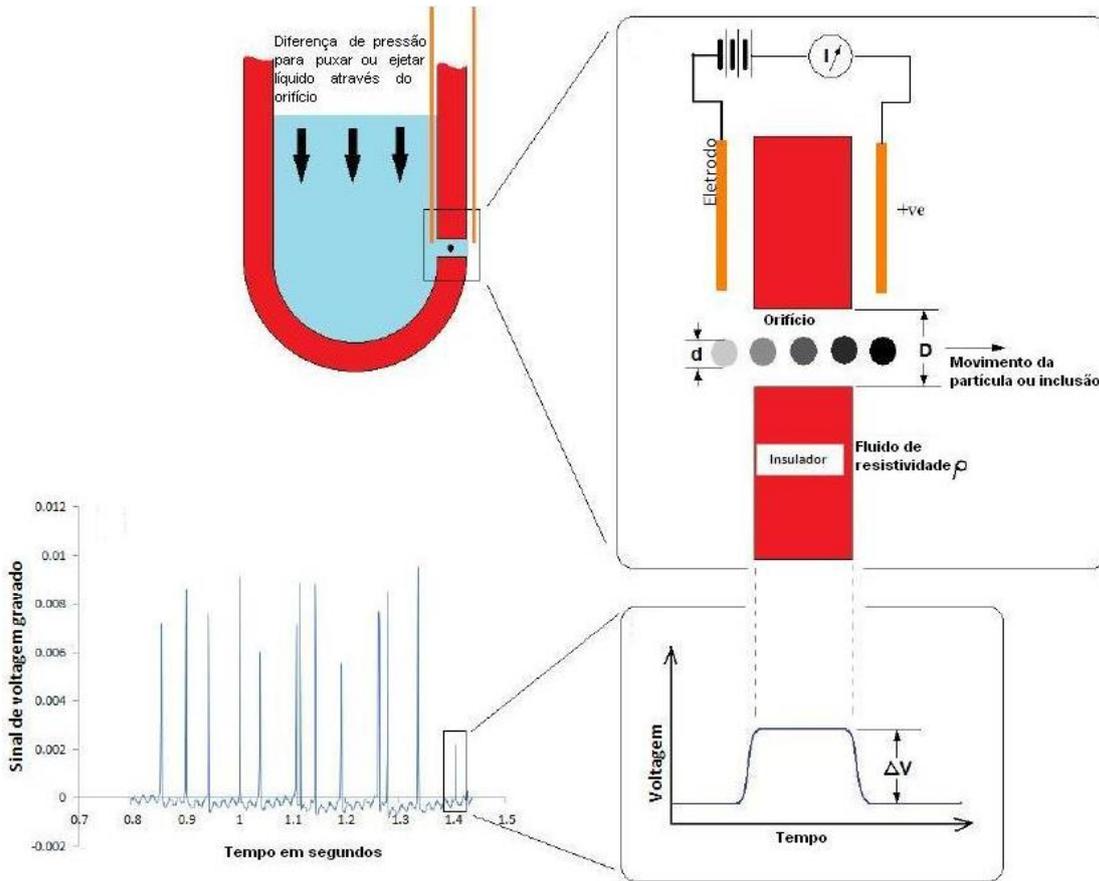


Figura 4.3 – Esquema de funcionamento da sonda APS (Chakraborty, 2010)

A equação que correlaciona a variação na tensão com o tamanho da partícula foi derivada das aproximações de Maxwell, que parte do princípio que as partículas estão tão dispersas no fluido, que elas não influenciam o campo elétrico no orifício, a não ser quando elas estão entrando nele (Chakraborty, 2010). A equação é a seguinte:

$$\Delta V = \frac{4\rho_e I d^3}{\pi D^4} \quad \text{ou} \quad \Delta V = k d^3 \dots\dots\dots \text{Eq. 4.3}$$

Sendo que:

$$k = \frac{4\rho_e I}{\pi D^4} \dots\dots\dots \text{Eq. 4.4}$$

Onde,

ρ_e = resistividade elétrica do fluido ($\Omega.m$);

I = corrente aplicada (A);

d = diâmetro da partícula (m);

D = diâmetro do orifício (m).

Um problema na medição é que os picos individuais na tensão são muito pequenos para serem precisamente medidos pelo sistema de aquisição de dados. Portanto, precisam ser amplificados linearmente por um fator antes de chegarem ao sistema de aquisição de dados. Além disso, também é feita uma calibração usando partículas de quatro tamanhos diferentes e observando-se a tensão dada pelo equipamento. Assim, é possível ajustar uma curva de correção para a tensão medida e o tamanho das partículas contadas. (Chakraborty, 2010)

4.2.1. Limites de Medição da Sonda APS

Embora a sonda consiga contar as partículas através da identificação dos picos de tensão e consiga medir os tamanhos de acordo com o tamanho do pico, foram observadas interferências nessas medições. Essas interferências são relativas a equipamentos que emitem campos eletromagnéticos em determinadas frequências. Esses campos interferem na leitura contínua de tensão na forma de um ruído, inabilitando a sonda de fazer contagens mais precisas ou aumentando, erroneamente, a contagem das partículas. (Chakraborty, 2010)

Os ruídos são baixas tensões geradas por esses equipamentos e detectadas pela sonda. Como a sonda foi inicialmente desenvolvida para operar nos laboratórios da universidade McGill, no Canadá, os limites foram definidos de acordo com os ruídos gerados no local. (Chakraborty, 2010)

A faixa mais baixa de ruídos foi por volta de 0,15 volts, que corresponde aos tamanhos de 15 a 20 micrômetros. O limite superior foi dado pelo sistema de aquisição de dados, que se satura com uma tensão acima de 5,0V, que corresponde aos tamanhos de partículas maiores que 170 micrômetros.

Dessa forma, os limites foram estabelecidos com uma tensão de 0,15 até 5,0V, que corresponde a uma faixa de tamanhos de 20 a 170 micrômetros.

Um outro fator limitante é o princípio de funcionamento da “Electric Sensing Zone” (ESZ), que assume que apenas uma partícula passará pelo orifício por vez. Sendo assim, existirá uma concentração máxima de partículas no líquido a fim de que não passem mais que uma partícula por vez, confundindo o sistema e gerando informações erradas. (Chakraborty, 2010)

Sabendo-se a espessura do vidro e o diâmetro do orifício, é possível calcular a máxima concentração de partículas, que será dada por uma partícula pelo volume do orifício. A espessura do vidro é de 1,2mm e o diâmetro do orifício é de 500 micrômetros. Sendo assim, o volume será dado por:

$$Vol = \frac{\pi D^2}{4} \cdot h_v; \quad Vol = \frac{\pi \cdot 500 \cdot 10^{-6}}{4} \cdot 1,2 \cdot 10^{-3} = 2,35 \cdot 10^{-10} m^3 \dots\dots\dots \text{Eq. 4.5}$$

Onde:

Vol = volume do orifício da APS (m³)

D = diâmetro do furo (m)

h_v = espessura do vidro (m)

Portanto, existindo 1 partícula a cada 2,35.10⁻¹⁰m³, tem-se uma densidade máxima de partículas (ρ_p) igual a:

$$\rho_p = \frac{1}{2,35 \cdot 10^{-10}} = 4,24 \cdot 10^9 \text{ partículas} \cdot m^{-3}; \dots\dots\dots \text{Eq. 4.6}$$

Onde:

ρ_p = densidade máxima de partículas (1/m³)

Utilizando um fator de segurança igual a 10, tem-se que a densidade máxima de partícula (ρ_{mp}) será:

$$\rho_{mp} = \frac{\rho_p}{F_s} = \frac{4,24 \cdot 10^9}{10} = 4,24 \cdot 10^8 \text{ partículas} \cdot m^{-3} \dots\dots\dots \text{Eq. 4.7}$$

Onde:

ρ_{mp} = densidade máxima de partículas aplicando o fator de segurança (1/m³)

4.2.2. Densidade de polpa para injeção

A densidade de polpa se refere à densidade de partículas a serem injetadas na panela para que se obtenha uma densidade de partículas que possam ser contadas pela sonda APS.

Considerando as equações calculadas no subitem anterior, a densidade máxima de partículas deve ser de 4,24x10⁸ partículas/m³.

As partículas de boro-silicato injetadas têm densidade de 340 kg/m^3 . São partículas esféricas, com raio médio de $1,91 \cdot 10^{-5} \text{ m}$ e o modelo da panela tem 227 litros de água.

A partir destes valores, pode-se definir o volume de uma esfera de boro-silicato e sua massa. Assim, é possível determinar a máxima massa de partículas por metro cúbico.

Como a massa de partículas injetada e a massa de partículas dentro da panela devem ser as mesmas, a concentração de partículas multiplicada pelo volume da panela deve ser igual à concentração de partículas injetadas multiplicada pelo volume injetado, que é de 20mL. Com isso, acha-se a concentração da solução para injeção.

A solução para injeção teve concentração de 48 g/L.

4.3. Plugues Porosos Utilizados

Foram construídos três plugues porosos com material de um tijolo poroso utilizado em uma usina siderúrgica. Os três têm áreas superficiais diferentes. Eles foram construídos com resina acrílica e tubo em PVC e uma conexão rápida “prestolock”. A tabela IV.1 mostra a relação de áreas de cada plugue.

Tabela IV.1 – Relação dos plugues construídos e suas áreas

| | Plugue 1 | Plugue 2 | Plugue 3 |
|-----------------------------|----------------------|---------------------|---------------------|
| Área (m²) | $15,0 \cdot 10^{-4}$ | $8,6 \cdot 10^{-4}$ | $3,6 \cdot 10^{-4}$ |

A figura 4.4 mostra todos os plugues um ao lado do outro, começando pelo plugue 1 (de maior área superficial) até o plugue 3 (de menor área superficial).

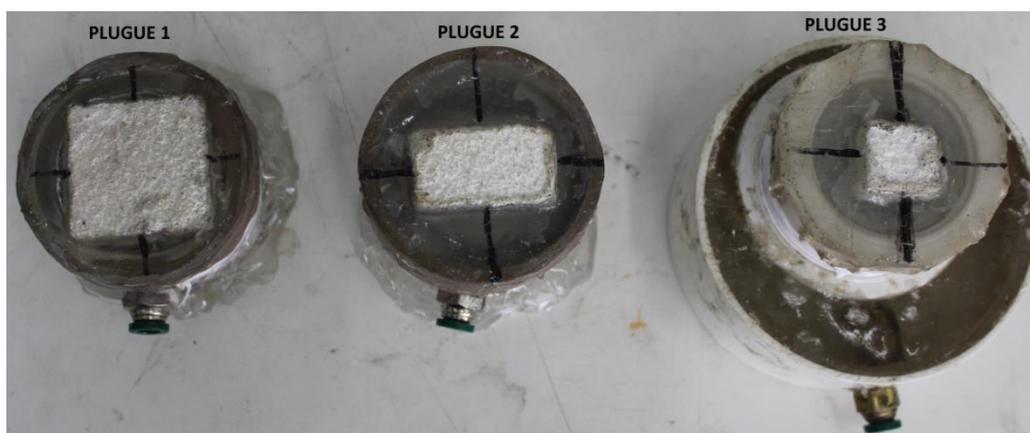


Figura 4.4 – Foto dos plugues utilizados na pesquisa

4.4. Partículas que Simulam as Inclusões

Para simular as inclusões foram empregadas partículas esféricas de boro-silicato. Estas partículas têm uma distribuição de tamanho conforme mostra a análise de distribuição granulométrica feita no laboratório CILAS do Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais da UFMG, apresentada na figura 4.5. Essa análise mostrou que 10% da amostra tem diâmetro de até 14,20 μm , mostra também que 90% têm diâmetro de até 64,51 μm e que o diâmetro médio da amostra é de 38,28 μm .

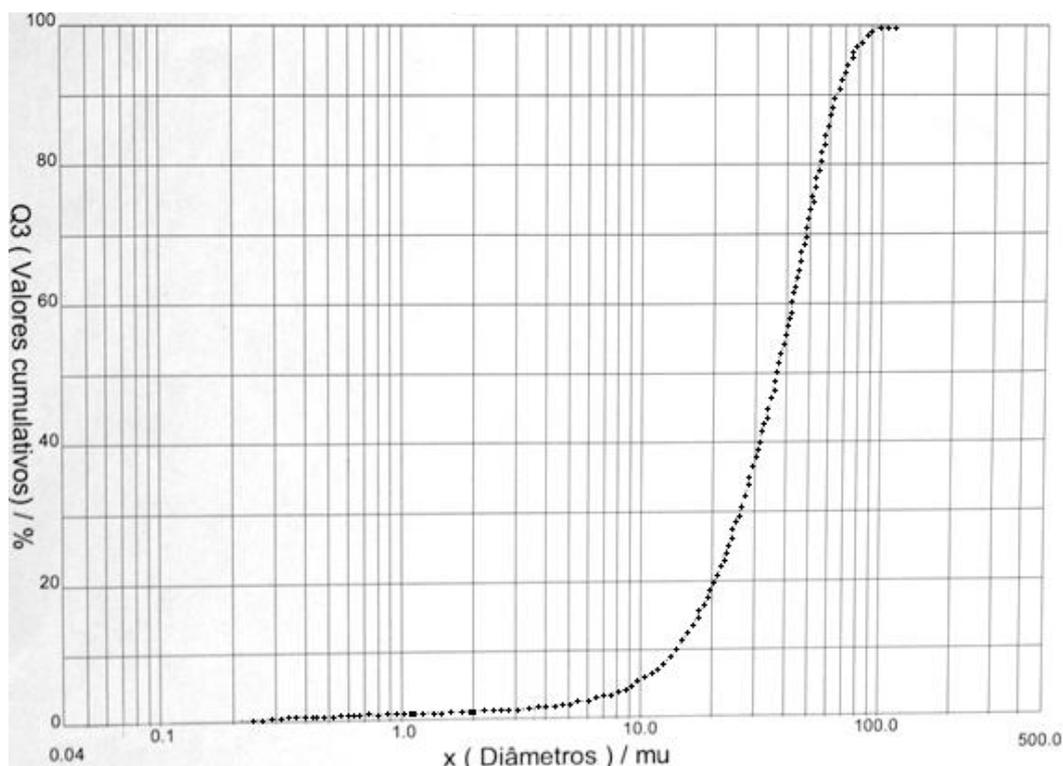


Figura 4.5 – Análise de distribuição granulométrica da amostra de boro-silicato utilizada para simulação de inclusões

4.5. Etapas da Realização dos Ensaios

As etapas desenvolvidas para realização dos ensaios são descritas a seguir. As figuras 4.6 e 4.7 mostram todo o aparato montado dentro e fora da panela.

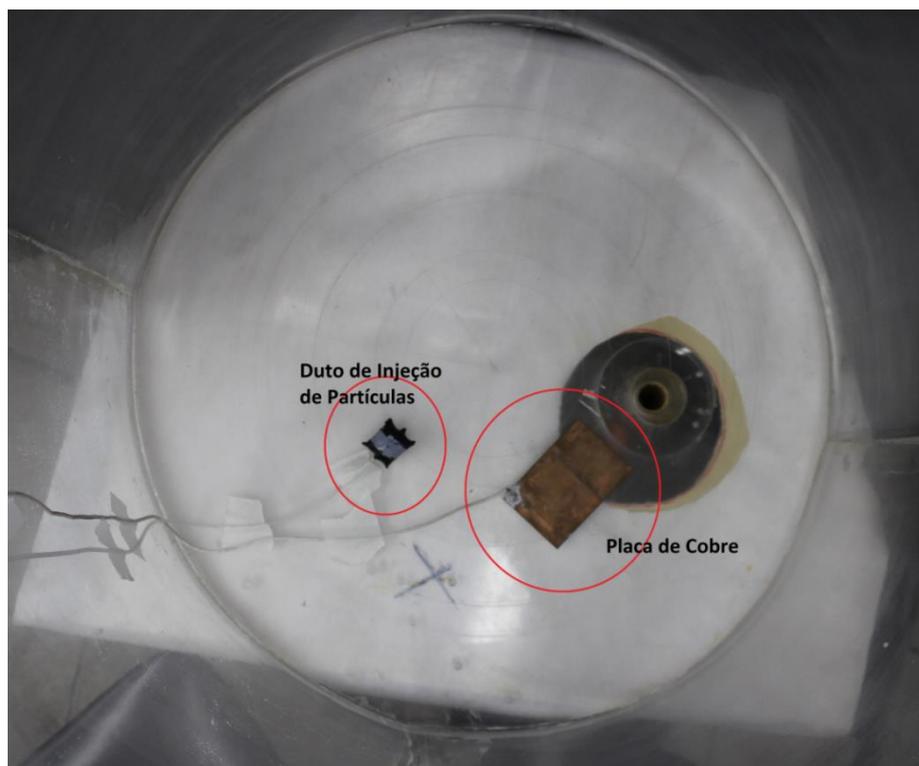


Figura 4.6 – Fundo da panela com os aparatos para os testes

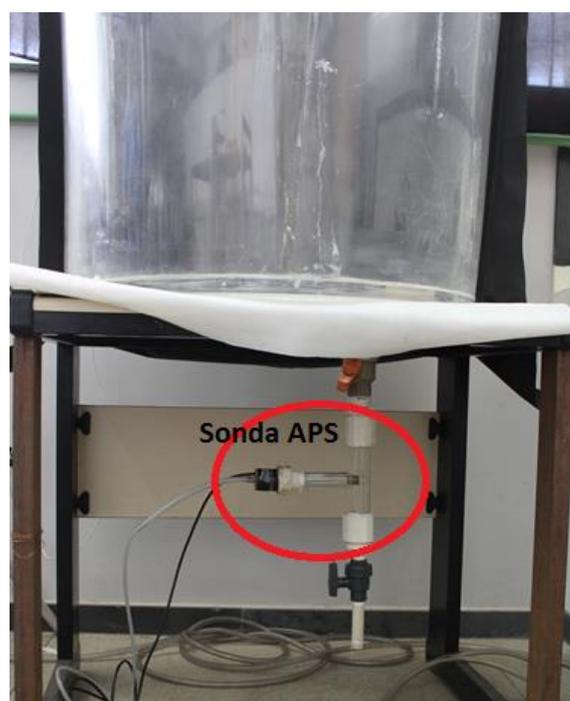


Figura 4.7 – Foto da sonda APS acoplada ao dreno da panela

Inicialmente, todo o aparato da sonda APS foi instalado na panela antes de seu enchimento. Uma placa de cobre foi colocada no fundo da panela, perto de seu dreno, posição mais adequada para escoamento de tensão residual na panela. A sonda APS

foi posicionada abaixo da saída do dreno na panela, conforme mostra figura 4.7. O tubo para injeção foi posicionado de forma que quando as partículas fossem injetadas, elas fossem para o fundo da panela e ficassem centralizadas, conforme visto na figura 4.6.

O plugue poroso também foi colocado no fundo da panela nas diversas posições que foram estudadas. Estas posições foram alteradas de acordo com o teste a ser feito.

A panela foi cheia com água até a altura de 0,60 m, que corresponde à altura de aço na panela em uma aciaria real convertida para a altura do modelo. Logo após o enchimento, foi feita a remoção de bolhas de dentro da sonda através de sucção e injeção de ar. Depois da remoção das bolhas, foi iniciada a sucção de líquido pela sonda e esta sucção foi acertada para uma vazão constante, que foi a mesma em todos os testes.

Após o enchimento da panela, a polpa para injeção foi preparada, como descrito anteriormente. Essa polpa foi injetada na panela com auxílio de uma seringa e de um tubo plástico fino que foi até o fundo da panela.

Depois de feita a injeção das partículas, o homogeneizador foi acoplado à panela. Ele é composto por um motor acoplado a quatro pás que giram no sentido horário (que faz as partículas irem para o fundo da panela e circularem por ela). Assim, em apenas alguns segundos, o banho estava homogeneizado. Testes feitos na panela através de injeção de corante e análise de imagem para tempo de homogeneização mostraram que em apenas 15 segundos a homogeneização ocorre, conforme visto na figura 4.8.

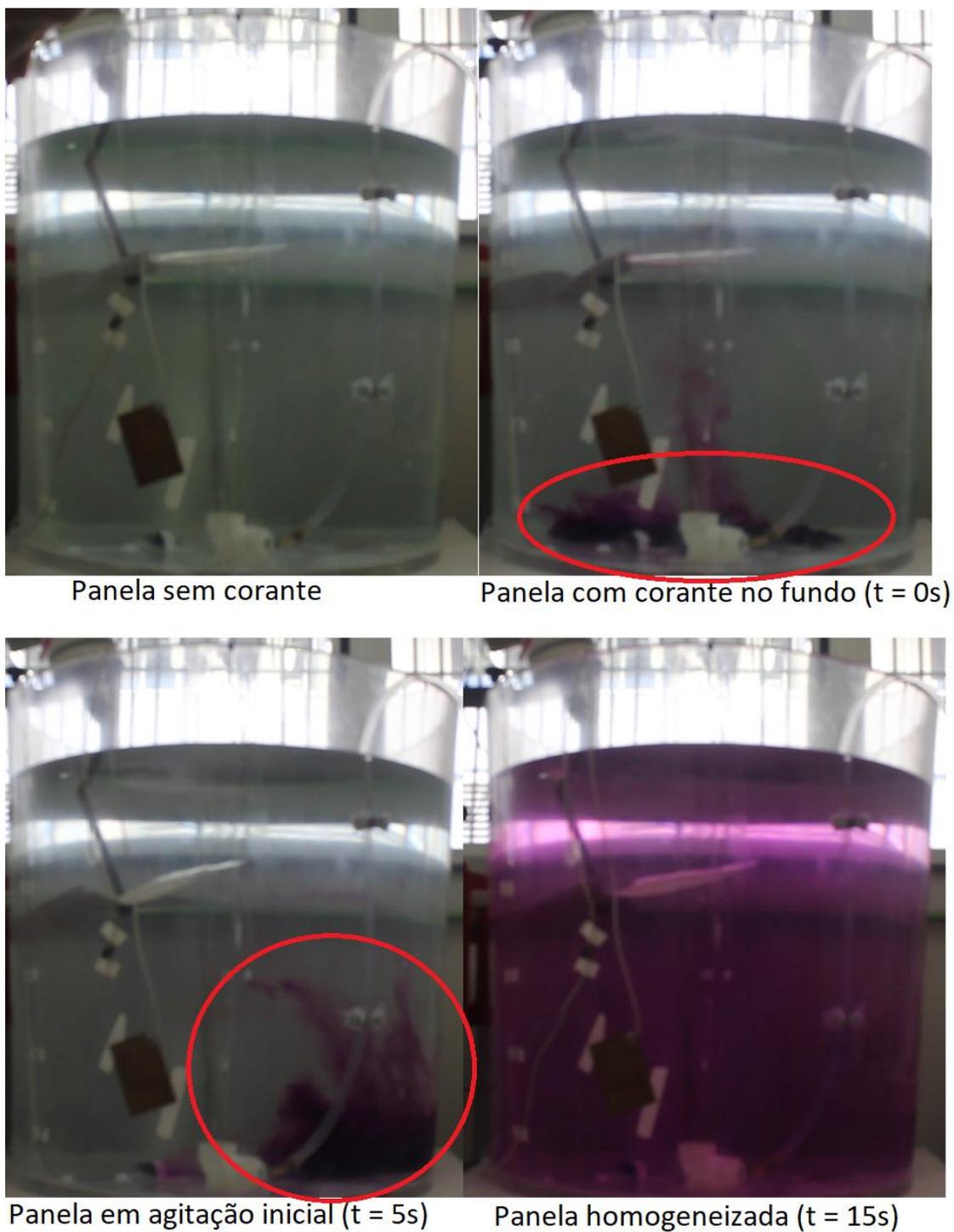


Figura 4.8 – Tempo de homogeneização da panela

Quando as partículas de boro-silicato estavam homogeneizadas dentro da panela, o homogeneizador era retirado e, então, era iniciado o tratamento de borbulhamento. Foram alteradas as vazões e os tempos de injeção, conforme mostrado no subitem 4.6.

Depois de terminado o borbulhamento de gás, o software da sonda (DASYlab) foi inicializado e era iniciada a contagem das partículas conjuntamente com a abertura do

dreno da panela. Assim, foram contadas as partículas até a quase completa drenagem da panela. A figura 4.9 mostra esquematicamente o que acontece com as inclusões durante a drenagem da panela com o passar do tempo.

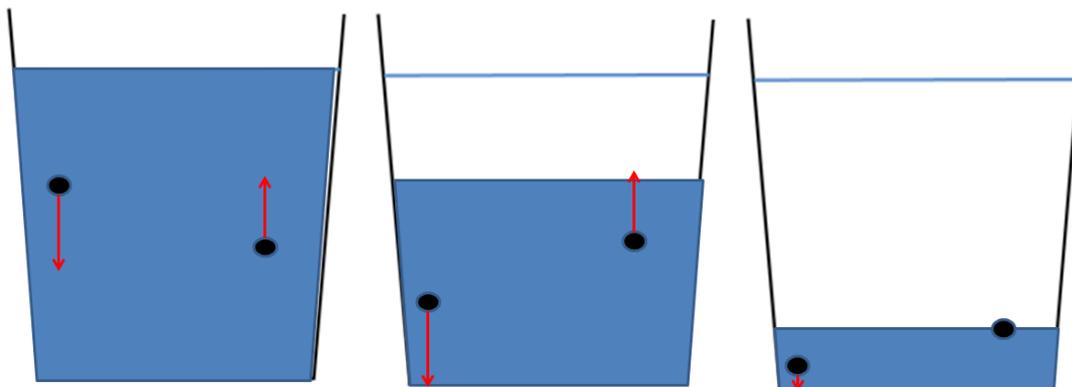


Figura 4.9 – Esquema do comportamento das inclusões durante a drenagem da panela

As inclusões maiores tendem a apresentar velocidades de subida mais elevadas. As inclusões menores são de remoção mais difícil, pois têm velocidades de subida mais baixas. . Isso será melhor discutido nos itens posteriores.

Após todos os dados serem coletados e transferidos para um arquivo, eles foram exportados para o software Microsoft Office Excel, onde foram tratados e analisados. Todas as conclusões foram tiradas baseadas nestas análises.

4.6. Variáveis analisadas

Os valores das variáveis testadas foram os seguintes:

- Vazões de gás injetado: 1, 2, 4, 6, 8 e 10 NL/min;
- Tempos de injeção de gás: 27, 54 e 81s;
- Posições do plugue: centralizado e descentralizado. A posição descentralizada está especificada na figura 4.10.

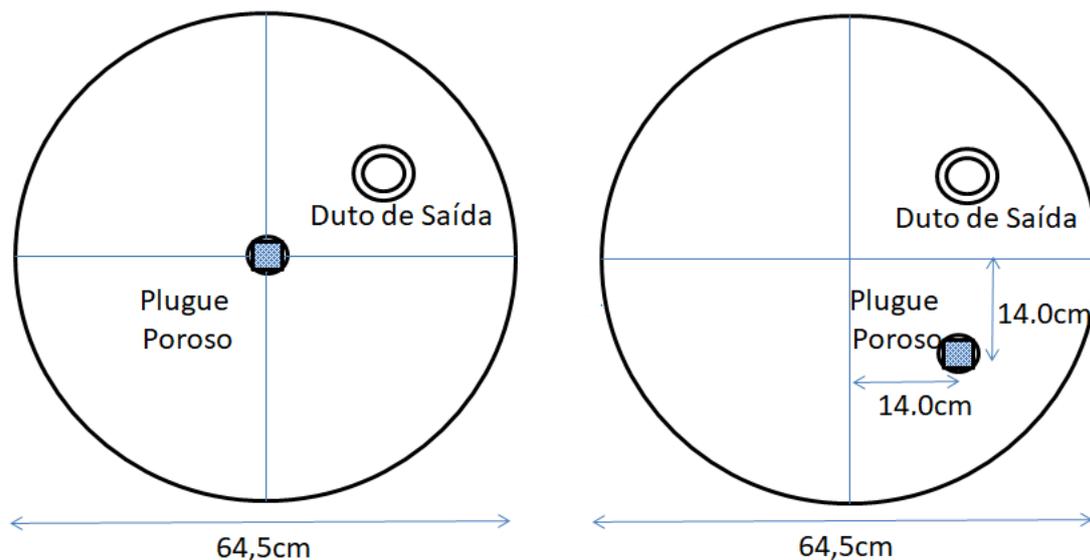


Figura 4.10 – Esquema do fundo da panela com posicionamento do plugue centralizado à esquerda e descentralizado à direita

- Áreas de injeção de gás dos plugues porosos: 15 cm² (plugue 1), 8,6 cm² (plugue 2) e 3,6 cm² (plugue 3).

4.6.1. Relação das variáveis

As variáveis testadas têm relação com as variáveis na usina de acordo com a tabela IV.2. Essa relação vem dos critérios de similaridade, desenvolvidos no subitem 3.3.

Tabela IV.2 – Relação entre variáveis na indústria e no modelo

| | Modelo | Indústria |
|--|--------|-----------|
| Vazão (Modelo: NL/min) (Indústria: Nm ³ /h) | 1 | 1.05 |
| | 2 | 2.09 |
| | 4 | 4.18 |
| | 6 | 6.27 |
| | 8 | 8.37 |
| | 10 | 10.46 |
| Tempo de injeção de gás(s) | 27 | 60 |
| | 54 | 120 |
| | 81 | 180 |
| Diâmetro da Inclusão (µm) | 15 | 25.8 |
| | 200 | 343.6 |

As vazões de gás utilizadas no trabalho correspondem a vazões usuais de injeção de gás para remoção de inclusões em indústrias. Foram testadas também vazões mais elevadas para verificar o seu efeito.

Os tempos estudados neste trabalho são tempos usuais da indústria para tratamentos de remoção de inclusões.

4.6.2. Tratamentos das análises

A sonda APS é sensível a quaisquer alterações que aconteçam no meio ambiente, seja algum equipamento elétrico ligado no laboratório ou aterramento mal feito nos equipamentos. Por isso, todos os cuidados foram tomados para os testes serem estáveis. Mesmo assim, alguns testes apresentaram algumas variações durante a contagem e foi observado que contagens maiores que 8 partículas por vez eram devido a alguma alteração nas condições ambientes e, portanto, foram tratadas como ruídos.

O vórtice na panela é formado devido a velocidades angulares residuais do fluido. Quando este é formado, ocorre sucção de ar para dentro do tubo da sonda APS, gerando ruído. Portanto, foram analisados todos os testes feitos e o tratamento dos dados foi realizado excluindo os dados após a formação do vórtice. O menor tempo para formação de vórtice foi de 11 minutos. Assim, foram definidos os tempos para os testes.

4.7. Medição do diâmetro das bolhas

Sabe-se que a eficiência de remoção de inclusões por flotação de bolhas depende de dos tamanhos e formas das bolhas no banho. Por isso, foram medidos os tamanhos de diversas bolhas em condições diferentes a fim de verificar se houve uma relação entre estas características e a remoção de inclusões naquela condição.

Foram feitas fotos das bolhas geradas pelos plugues porosos posicionados no fundo da panela do modelo. As fotos foram feitas pela câmera CANON EOS 60D e tiradas nas mesmas vazões e plugues citados no subitem 4.6. Além das vazões e plugues, foram tiradas fotos em 3 alturas diferentes: 10, 30 e 50cm de altura, contando a partir do plugue.

Para cada condição, foram tiradas 3 fotos e contadas pelo menos 30 bolhas aleatoriamente em cada foto. Sendo assim, tem-se pelo menos 90 bolhas contadas por cada condição.

As bolhas dentro da panela têm formato elipsoide, portanto, para estimativa de seu diâmetro, foi utilizado o diâmetro equivalente a uma esfera de mesmo volume do elipsoide.

Utilizando o software ImageJ foi comparado o diâmetro medido da bolha com uma dimensão conhecida, no caso, uma haste colocada dentro da panela. O software compara o número de pixels da bolha e da dimensão conhecida para medir o tamanho real da bolha.

Foi utilizado também o software ImageJ para medição dos dois eixos das bolhas. A partir da medição dos dois eixos, foi considerado que o terceiro eixo seria igual ao segundo, conforme visto na figura 4.11.

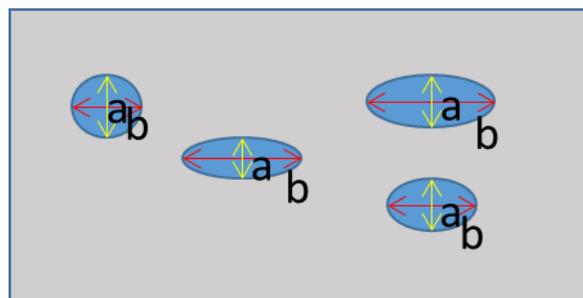


Figura 4.11 - Medição de volume das bolhas na panela

O eixo b, “horizontal”, foi considerado igual ao eixo que não está mostrado na imagem. Uma aproximação válida, já que os campos de pressões nos dois eixos são parecidos. Dessa forma, tem-se que o volume deste elipsoide é dado pela equação 4.8

$$V_{elip} = \frac{4}{24} \pi ab^2 \dots\dots\dots \text{Eq. 4.8}$$

Onde:

V_{elip} = volume do elipsoide (mm³);

a = diâmetro do eixo vertical da bolha (mm);

b = diâmetro do eixo horizontal da bolha (mm).

Considerando uma esfera de mesmo volume, o diâmetro da esfera de mesmo volume do elipsoide é dado pela equação 4.9.

$$D_{equiv} = \sqrt[3]{ab^2} \dots\dots\dots Eq. 4.9$$

Onde:

D_{equiv} = diâmetro equivalente da esfera de mesmo volume do elipsoide (mm).

A imagem 4.12 mostra um exemplo de uma foto tirada para fazer a contagem e medição dos diâmetros das bolhas.



Figura 4.12 – Foto tirada para medição do diâmetro das bolhas

A foto da figura 4.12 foi tirada com 8NI/min de vazão no plugue 1. A marcação preta na haste metálica indica a altura de 50cm do fundo da panela.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo serão apresentados e discutidos os resultados para todos os testes feitos: perfil de dispersão de pluma, diâmetro de bolhas, contagem de inclusões com a APS, efeitos da vazão e tempo de injeção de gás, efeitos para variação da área e da posição do plugue, variação na granulometria das inclusões e efeito da variação do tamanho de bolha na remoção de inclusões. Serão apresentados dados relativos aos testes e discussão sobre o tema, propondo explicações para os resultados obtidos.

5.1. Perfil de dispersão de pluma

O perfil de dispersão da pluma pode ser traduzido como a forma com a qual as bolhas se comportam quando saem do plugue. Ao fazer os testes para análise do tamanho de bolhas, notou-se que o comportamento da pluma de bolhas é bem diferente para os três plugues. Este comportamento pode influenciar muito em todos os eventos que acontecem dentro da panela, inclusive na remoção de inclusões. As imagens 5.1, 5.2 e 5.3 mostram como a pluma evoluiu com o aumento de vazão para os 3 plugues estudados.

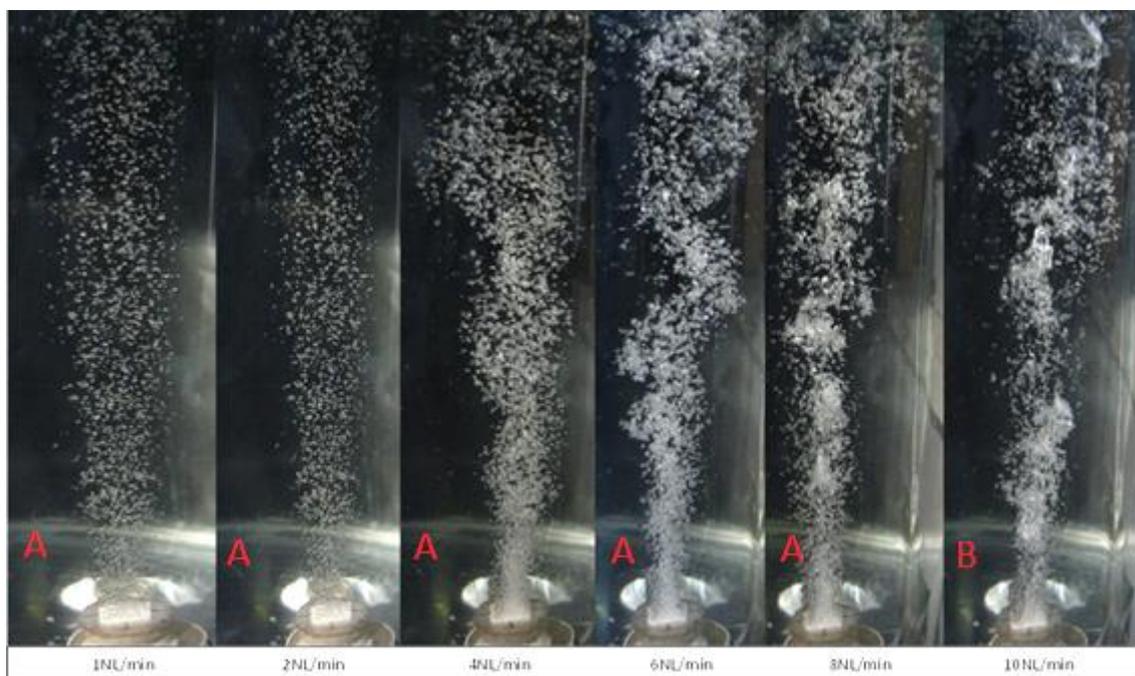


Figura 5.1 – Evolução da pluma com o aumento da vazão para o plugue 1 ($15,00 \times 10^{-4} \text{m}^2$ de área superficial)

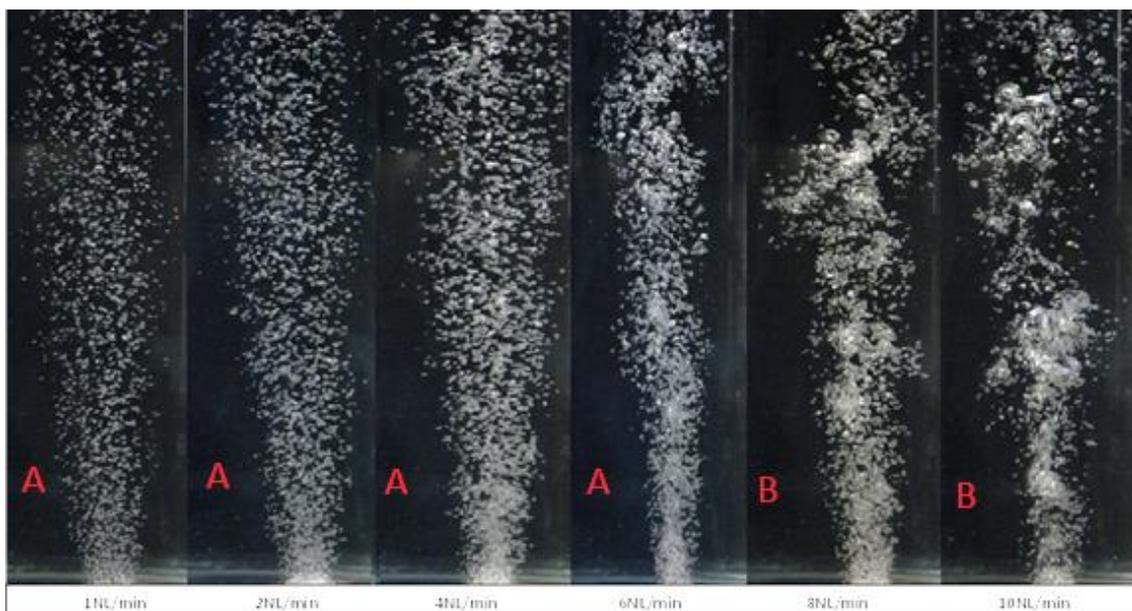


Figura 5.2 – Evolução da pluma com o aumento da vazão para o plugue 2 ($8,6 \cdot 10^{-4} \text{m}^2$ de área superficial)

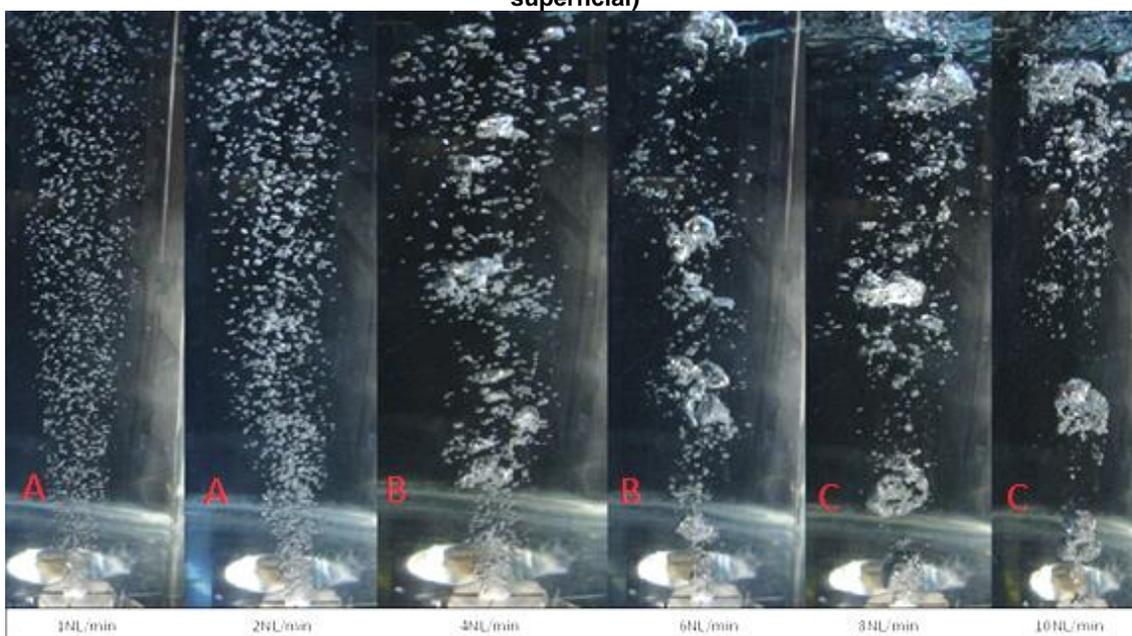


Figura 5.3 – Evolução da pluma com o aumento de vazão para o plugue 3 ($3,6 \cdot 10^{-4} \text{m}^2$ de área superficial)

Como mostrado anteriormente, o plugue 3 é o que tem menor área superficial e o plugue 1 é o de maior área superficial. Com isso, pode-se observar que quanto maior a vazão, existe uma tendência de crescimento das bolhas e diminuição em sua quantidade. Esse efeito é muito mais nítido para o plugue 3, onde a área superficial é menor que a dos outros.

Em linhas gerais, esse efeito é mostrado no plugue 1 nas vazões finais. Já no plugue 2, a partir da vazão de 6NL/min, as bolhas começam a coalescer. No plugue 3, esse

coalescimento acontece a partir da vazão de 2NL/min e se torna totalmente desenvolvido nas vazões de 8NL/min e 10NL/min.

Assim como mostrado na figura 3.14, nos testes foram observados 3 regimes de bolhas: bolhas pequenas (regime A), início do coalescimento (regime B) e coalescimento desenvolvido (bolhas grandes) (regime C). Após análise de diversas fotos, os regimes feitos por observações para todos os plugues e vazões são mostrados na tabela V.1 e também nas figuras 5.1 a 5.3.

Tabela V.1 – Regimes de dispersão da pluma para todos os plugues em todas as vazões

| Vazão (NL/min) | Plugue 1 | | | Plugue 2 | | | Plugue 3 | | |
|----------------|----------|---|---|----------|---|---|----------|---|---|
| | Fotos | | | Fotos | | | Fotos | | |
| | 1 | 2 | 3 | 1 | 2 | 3 | 1 | 2 | 3 |
| 1 | A | A | A | A | A | A | A | A | A |
| 2 | A | A | A | A | A | A | A | A | A |
| 4 | A | A | A | A | A | A | B | B | B |
| 6 | A | A | A | A | A | A | B | B | B |
| 8 | A | A | A | B | B | B | C | C | C |
| 10 | B | B | B | B | B | B | C | C | C |

As letras em vermelho mostram início da formação do regime posterior.

Foi feita uma comparação entre o presente trabalho e o trabalho de Anagbo e Brimacombe (1990) para as transições entre os regimes. Os resultados são apresentados na tabela V.2.

Tabela V.2 – Comparação entre o trabalho atual e o trabalho de Anagbo e Brimacombe (1990)

| | Regime de transição ($\text{cm}^3/\text{s.cm}^2$) | |
|--------------------------|--|-----------|
| | A/B | B/C |
| Presente Trabalho | 9,3 a 11,6 | 28 a 37,3 |
| Anagbo/Brimacombe | 8 a 14 | 25 a 67 |

Os resultados são semelhantes e os regimes de transição estão dentro das regiões encontradas pelos autores citados, porém em faixas mais estreitas.

5.2. Diâmetro das Bolhas

Após o tratamento das imagens, os dados de diâmetros das bolhas foram analisados utilizando um software estatístico.

As análises dos tamanhos de bolha foram feitas em gráfico tipo *boxplot* para se observar a variação dos seus tamanhos, bem como as bolhas que estão com diâmetro muito fora da média. As bolhas que estão muito fora da média são mostradas como *outliers* nos gráficos que seguem. Os *outliers* são interpretados como bolhas formadas por coalescência quando acima do limite superior e por quebra quando estão abaixo do limite inferior.

A coalescência das bolhas é um fenômeno que ocorre quando duas ou mais bolhas se encontram e se juntam, formando assim uma bolha maior de volume igual à soma dos volumes das bolhas que a formaram. A quebra da bolha acontece quando as forças atuantes na bolha a tornam instável, quebrando-a em bolhas menores e mais estáveis. Quando o plugue tem área superficial pequena e vazões de gás maiores, a bolha gerada na superfície do plugue é maior e instável, quebrando quando chega em alturas maiores.

Os resultados para o plugue 1, nas alturas de 50, 30 e 10cm, são mostrados nos gráficos das figuras 5.4, 5.5 e 5.6.

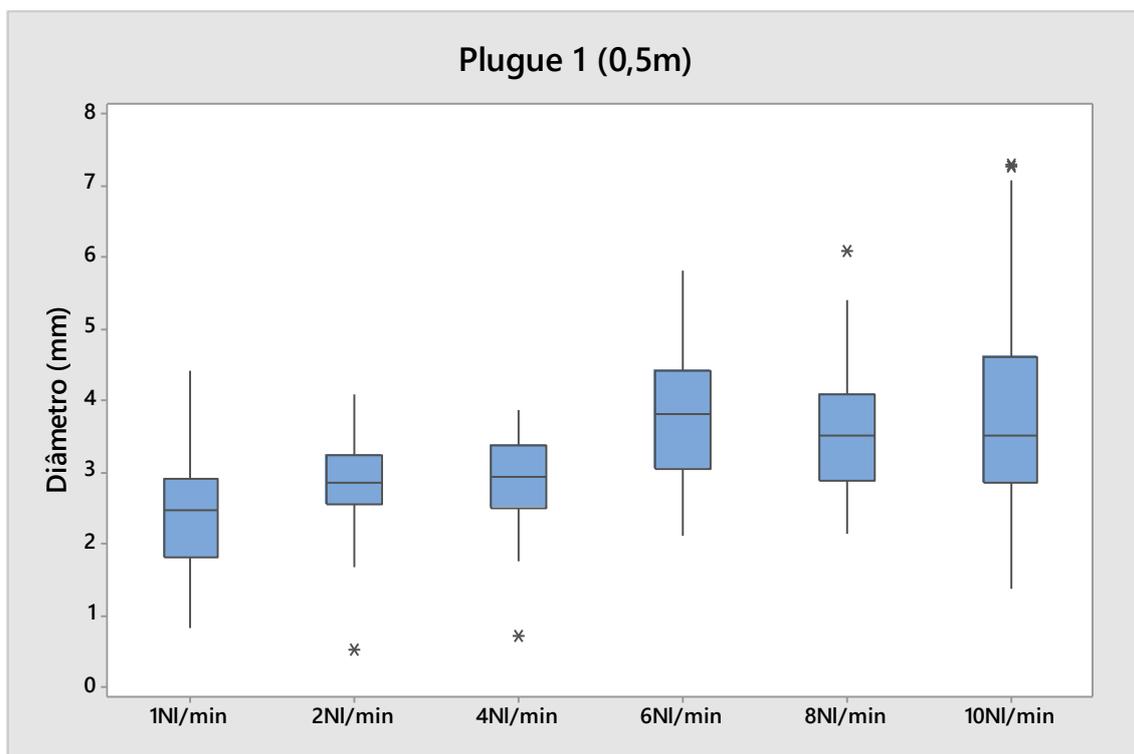


Figura 5.4 – Distribuição de tamanho das bolhas em função da vazão para o plugue 1, na altura de 50cm.

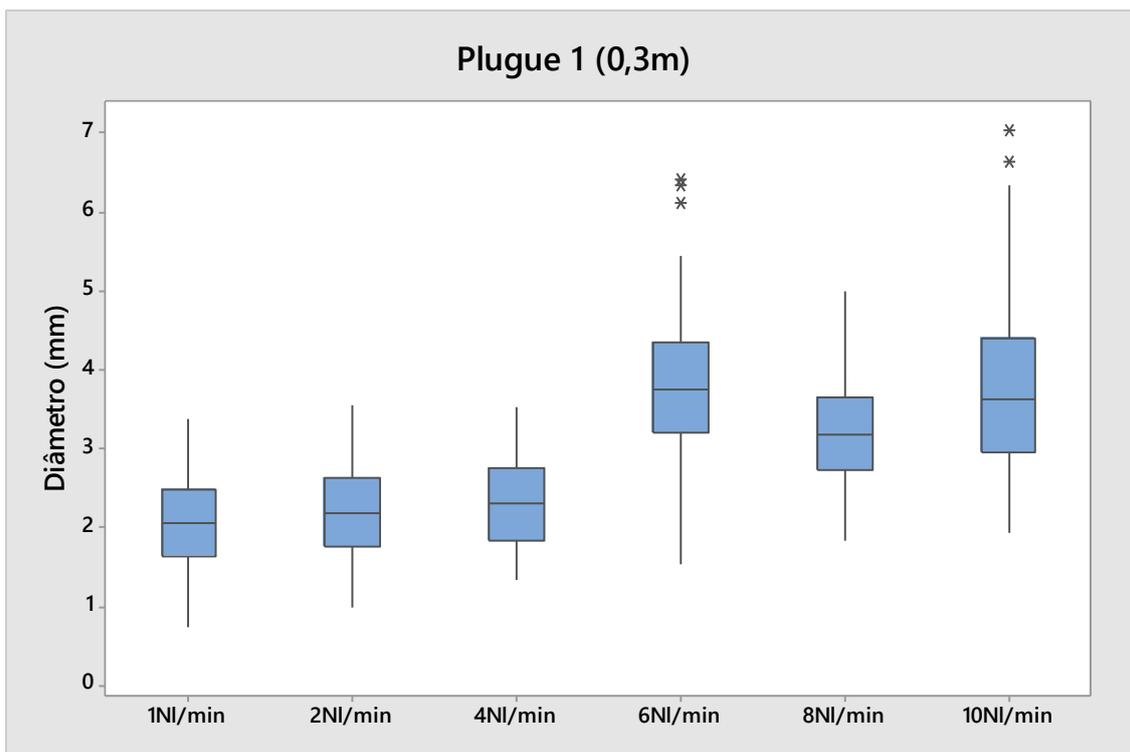


Figura 5.5 – Distribuição de tamanho das bolhas em função das vazões para o plugue 1, na altura de 30cm.

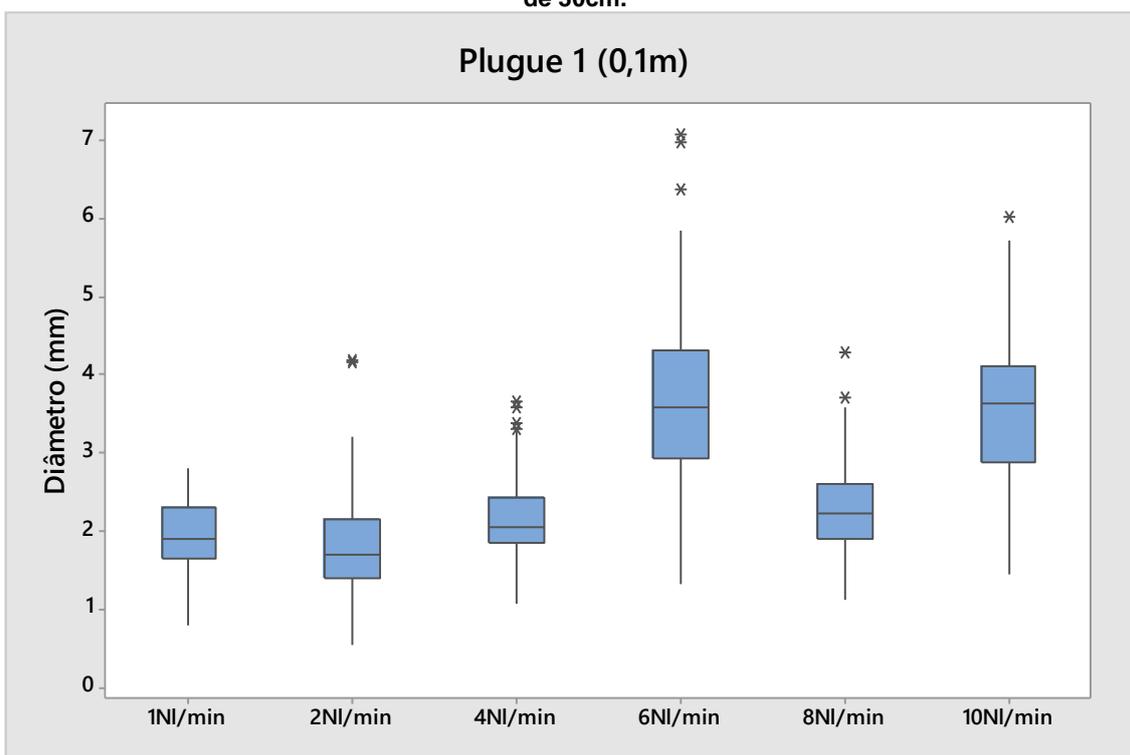


Figura 5.6 – Distribuição de tamanho das bolhas em função das vazões para o plugue 1, altura de 10cm.

Da mesma forma que foi feita para o plugue 1, nas 3 alturas diferentes, também foram tiradas fotos para os plugues 2 e 3. São apresentadas aqui apenas as análises para os plugues 2 e 3 na altura de 50cm, mostradas nos gráficos das figuras 5.7 e 5.8

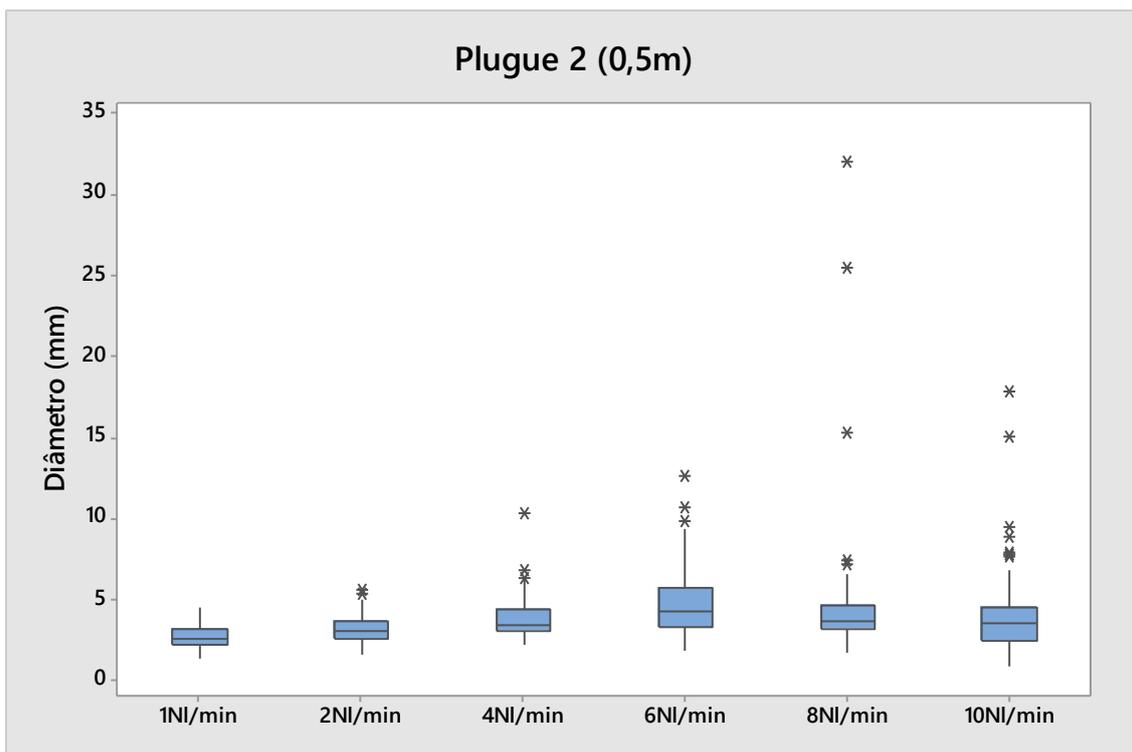


Figura 5.7– Distribuição de tamanho das bolhas em função da vazão para o plugue 2 na altura de 50cm

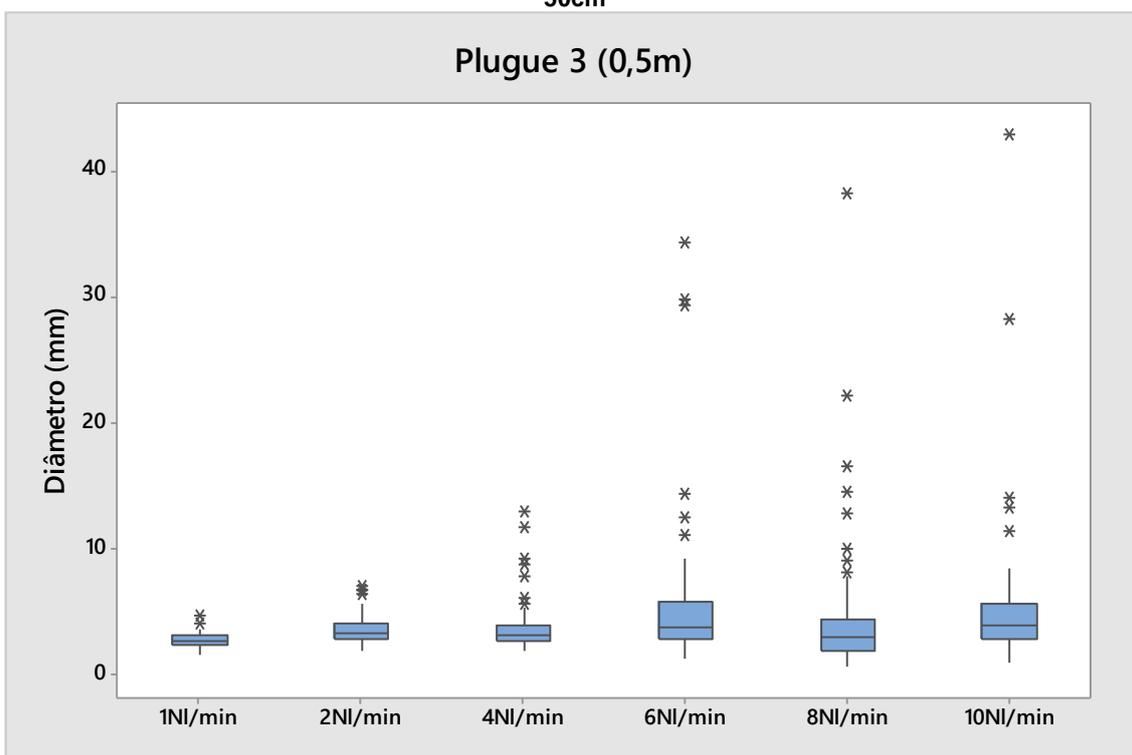


Figura 5.8 – Distribuição de tamanho das bolhas em função da vazão para o plugue 3 na altura de 50cm

Os resultados mostram que, em linhas gerais, quanto maior a vazão de gás, maiores serão os diâmetros das bolhas. Para uma mesma vazão, o plugue com menor área superficial (plugue 3) tem um maior diâmetro de bolhas. Outro resultado interessante é

que o número de *outliers* aumenta significativamente para os plugues menores (plugues 2 e 3). Isso mostra que a coalescência é muito maior nestes plugues. Além dos diâmetros médios das bolhas serem maiores, a quantidade de bolhas formadas por coalescência também é muito maior. O gráfico da figura 5.9 mostra os resultados conjuntos dos três plugues.

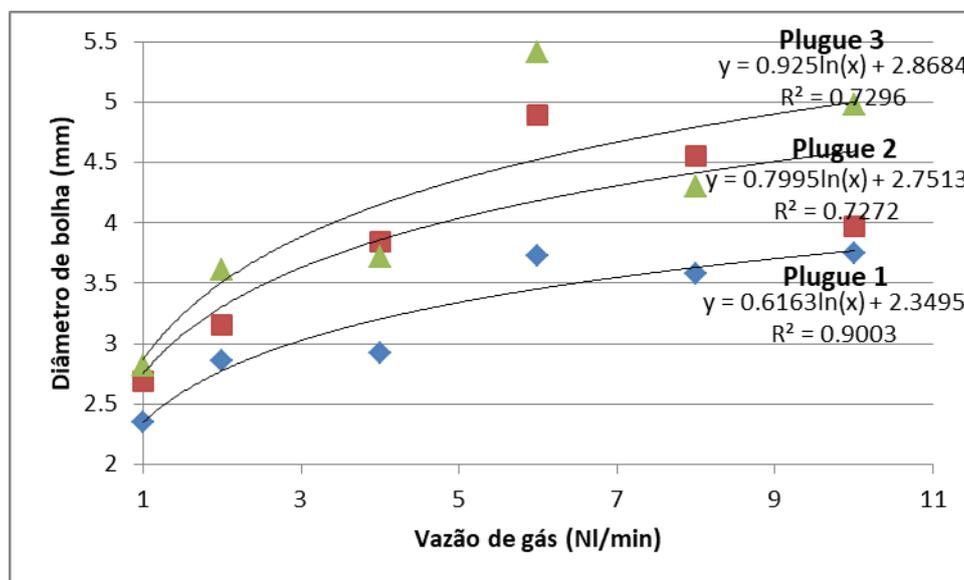


Figura 5.9 – Diâmetros das bolhas em mm em relação à vazão em NL/min para os plugues estudados na altura de 0,5m

Para a construção desse gráfico foi utilizada a média dos diâmetros das bolhas na altura de 0,5m. Da mesma forma feita para esta altura, foram feitos gráficos para as demais alturas, que apresentaram comportamentos semelhantes. Em relação à altura das bolhas na panela, foi feito o gráfico da figura 5.10, que mostra a variação do diâmetro em relação à vazão para as 3 alturas estudadas para o plugue 1.

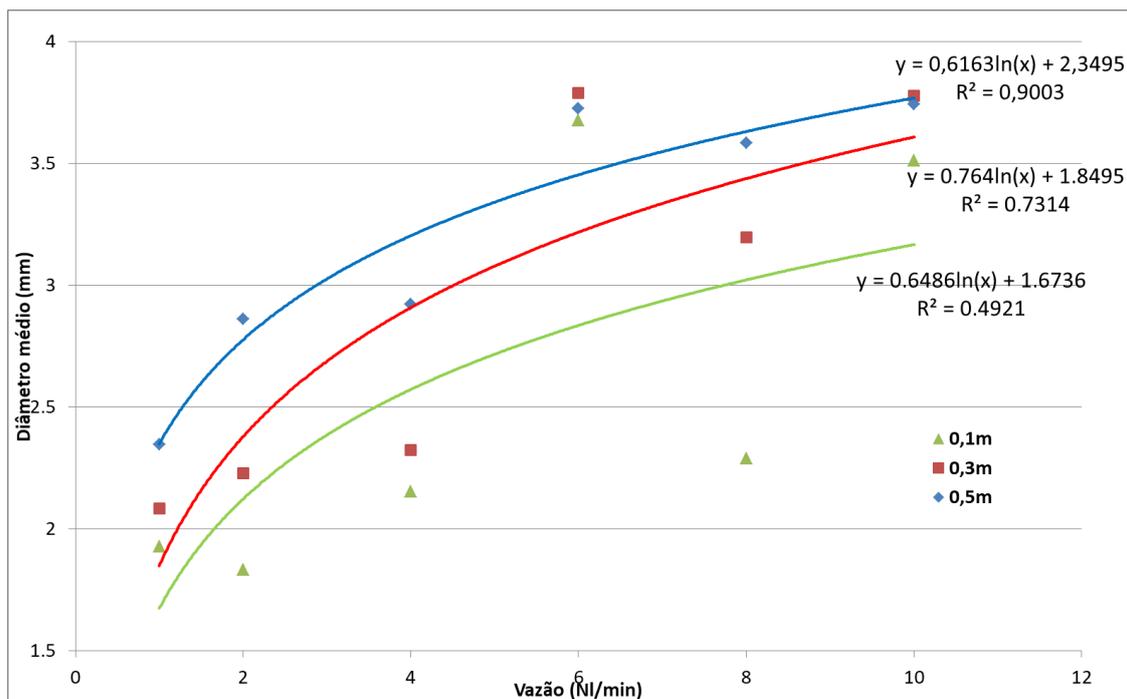


Figura 5.10 – Variação dos diâmetros das bolhas com a vazão para as 3 alturas estudadas para o plugue 1

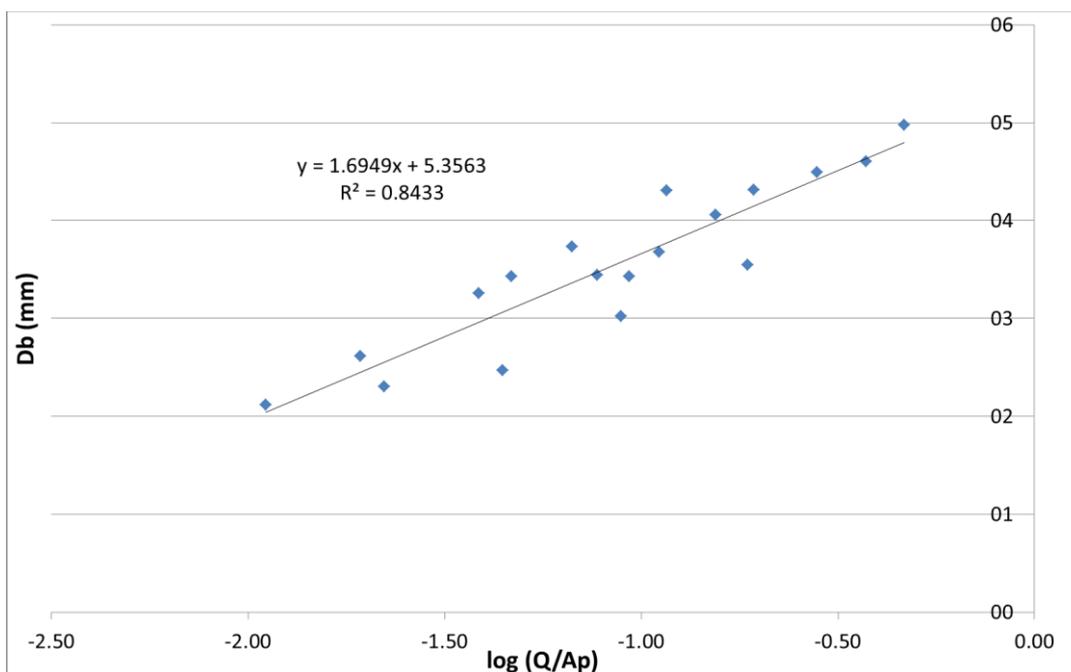
Os resultados mostram que para uma mesma vazão, quanto mais alto a bolha estiver no interior da panela, maior ela será. Esses resultados também se repetem para os 3 plugues.

Nota-se que a equação logarítmica define relativamente bem o comportamento das bolhas. Das equações testadas, este tipo é o que apresentou melhor ajuste.

Outro parâmetro importante é a velocidade média do gás na saída do plugue, que é a razão entre a vazão de gás e a área superficial do plugue. Utilizando as médias dos valores encontrados para os diâmetros das bolhas em cada vazão a partir dos dados da tabela V.3, foi gerado o gráfico 5.11.

Tabela V.3 – Variáveis usadas para construção do gráfico 5.11

| Área do Plugue (m ²) | Vazao (Nm ³ /s) | Vazao (Nm ³ /s) | Q/Ap (m/s) | Log (Q/Ap) | Db (mm) |
|----------------------------------|----------------------------|----------------------------|------------|------------|---------|
| 1.50E-03 | 1 | 1.67E-05 | 1.11E-02 | -1.95 | 2.1 |
| 1.50E-03 | 2 | 3.33E-05 | 2.22E-02 | -1.65 | 2.3 |
| 1.50E-03 | 4 | 6.67E-05 | 4.44E-02 | -1.35 | 2.5 |
| 1.50E-03 | 6 | 1.00E-04 | 6.67E-02 | -1.18 | 3.7 |
| 1.50E-03 | 8 | 1.33E-04 | 8.89E-02 | -1.05 | 3.0 |
| 1.50E-03 | 10 | 1.67E-04 | 1.11E-01 | -0.95 | 3.7 |
| 8.63E-04 | 1 | 1.67E-05 | 1.93E-02 | -1.71 | 2.6 |
| 8.63E-04 | 2 | 3.33E-05 | 3.86E-02 | -1.41 | 3.3 |
| 8.63E-04 | 4 | 6.67E-05 | 7.72E-02 | -1.11 | 3.4 |
| 8.63E-04 | 6 | 1.00E-04 | 1.16E-01 | -0.94 | 4.3 |
| 8.63E-04 | 8 | 1.33E-04 | 1.54E-01 | -0.81 | 4.1 |
| 8.63E-04 | 10 | 1.67E-04 | 1.93E-01 | -0.71 | 4.3 |
| 3.57E-04 | 1 | 1.67E-05 | 4.67E-02 | -1.33 | 2.8 |
| 3.57E-04 | 2 | 3.33E-05 | 9.34E-02 | -1.03 | 3.4 |
| 3.57E-04 | 4 | 6.67E-05 | 1.87E-01 | -0.73 | 3.5 |
| 3.57E-04 | 6 | 1.00E-04 | 2.80E-01 | -0.55 | 4.5 |
| 3.57E-04 | 8 | 1.33E-04 | 3.73E-01 | -0.43 | 4.6 |
| 3.57E-04 | 10 | 1.67E-04 | 4.67E-01 | -0.33 | 5.0 |

**Figura 5.11 – Diâmetro das bolhas em relação à velocidade terminal das partículas**

Os dados experimentais dos tamanhos das bolhas se ajustam muito bem à equação 5.1. Isso mostra que esta velocidade tem um papel muito importante na definição do tamanho das bolhas.

$$Db = 1,6949 \log\left(\frac{Q}{Ap}\right) + 5,3563 \dots\dots\dots \text{Eq. 5.1}$$

Onde:

D_b = Diâmetro da bolha (mm)

Q = Vazão de gás (m^3/s)

A_p = Área do plugue (m^2)

5.3. Testes de Contagem de Inclusões

Foram feitos os testes para remoção de inclusões para todas as vazões, tempos, plugues e posições. Os resultados dos testes foram comparados ao de um teste base, sem injeção de gás, para estimar a porcentagem de remoção de inclusões. Todos os testes foram feitos em duplicatas.

As partículas foram contadas pela sonda APS no momento em que passavam pela válvula longa da panela. Quanto mais partículas forem contadas nos testes, mais partículas terão passado da panela para o distribuidor. Dessa forma, quanto maior for o número de partículas, pior terá sido o tratamento para remoção de inclusões.

5.3.1. Codificação para os testes

Para identificar de forma mais simples os testes, análises e gráficos que foram feitos, foram estabelecidos códigos para designar os testes. Os códigos dos testes estarão sempre acompanhando os gráficos e imagens para mostrar qual o teste da análise. A tabela V.4 mostra os códigos e testes referentes a cada condição.

Tabela V.4 – Codificação para os testes realizados

| Variável | Condição | Código |
|-------------------------|----------|--------|
| Plugue | Plugue 1 | 1 |
| | Plugue 2 | 2 |
| | Plugue 3 | 3 |
| Vazão de gás | 1NI/min | 1 |
| | 2NI/min | 2 |
| | 4NI/min | 4 |
| | 6NI/min | 6 |
| | 8NI/min | 8 |
| | 10NI/min | 10 |
| Tempo de injeção de gás | 27s | a |
| | 54s | b |
| | 81s | c |
| Duplicata | 1 | 1 |
| | 2 | 2 |

Sendo assim, o código será na sequência: Plugue, Vazão, Tempo e Duplicata. Por exemplo, “12a1” é o código do teste do plugue 1, na vazão de 2NI/min no tempo de 27s e na primeira duplicata. O teste “310c2” é o teste do plugue 3, na vazão de 10NI/min, tempo de 81s e segunda duplicata. Os testes que não tiverem o último número após a letra se referem às médias das duplicatas.

5.3.2. Tratamento dos dados dos testes

Inicialmente, são apresentados os resultados para o plugue 1, vazão de 1NI/min. Como os testes foram feitos em duplicatas, o gráfico da figura 5.12 apresenta os resultados para as duas duplicatas nos três tempos estudados.

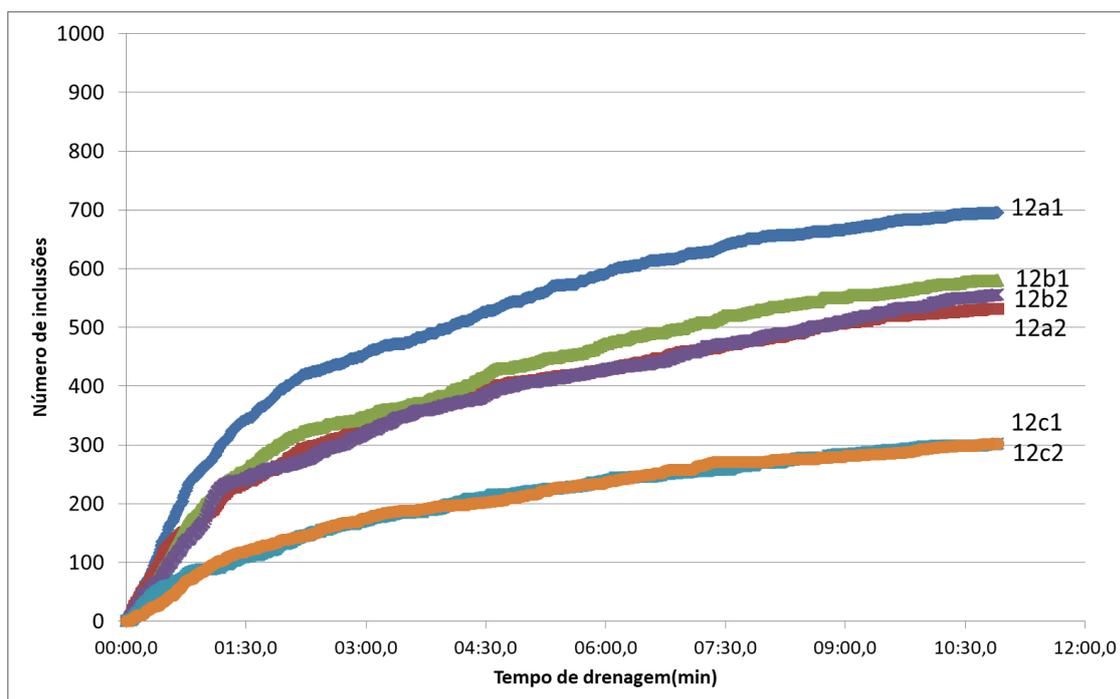


Figura 5.12 – Resultados para as duplicatas nos três tempos para o plugue 1 na vazão de 2NI/min.

Como a sonda APS é muito sensível, os resultados variam de teste para teste. Com isso, os resultados serão apresentados usando-se a média das duplicatas, como mostra o gráfico da figura 5.13.

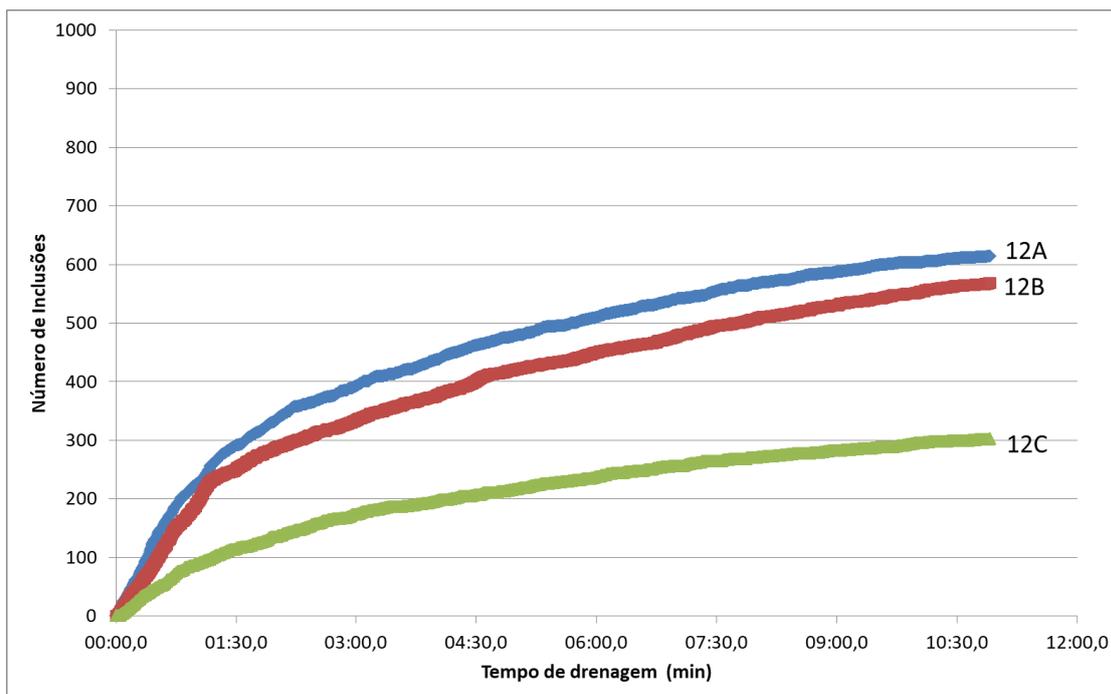


Figura 5.13 – Média das duplicatas para o plugue 1, vazão de 2NI/min e nos três tempos estudados.

Na indústria, a panela de aciaria deve esvaziar com vazão constante. A válvula gaveta atua abrindo para garantir que a vazão de aço para o distribuidor seja sempre a mesma. Nos testes em laboratório, a curva é normalizada para contagem de inclusões de acordo com a vazão de saída da panela de aciaria. Dessa forma, foram feitos testes para a determinação da vazão de saída da APS durante a drenagem da panela. O gráfico da figura a 5.14 mostra a variação da vazão de sucção da APS com o tempo.

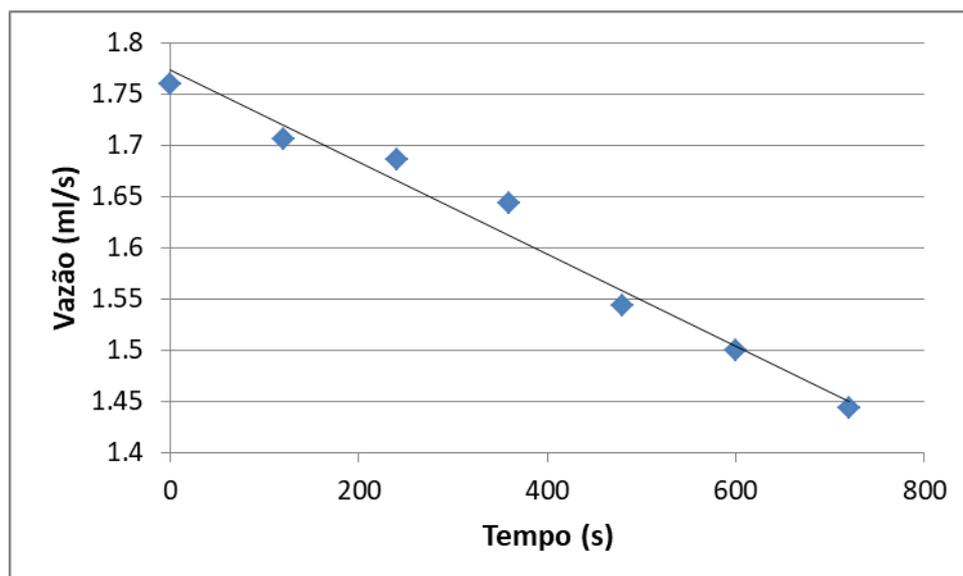


Figura 5.14 – Variação da vazão de sucção da APS com a drenagem da panela

A partir deste gráfico obteve-se a equação 5.2 para normalização dos resultados.

$$Q_{APS} = -0,0004t + 1,7733 \dots \dots \dots \text{Eq. 5.2}$$

Onde:

Q_{APS} = Vazão de sucção da APS (ml/s);

t = Tempo (s).

A normalização foi feita considerando que a vazão da APS sempre será constante em 1,7733ml/s.

Utilizando a equação 5.2 como base, foi desenvolvida a equação 5.3 para obtenção do número de partículas em um determinado tempo e assim normalização das curvas.

$$NPN(t) = \frac{Np(t)}{\frac{1,7733 - 0,0004.t}{1,7733}} \dots \dots \dots \text{Eq. 5.3}$$

Onde:

NPN(t): número de partículas contadas no tempo t, após a normalização;

Np(t) = número de partículas contadas no tempo t;

t = tempo (s).

Por exemplo, no tempo de 600 segundos, a vazão da APS cai de 1,7733 ml/s para 1,53mL/s. Sendo assim, uma partícula contada aos 600 segundos tem valor absoluto maior do que uma partícula contada após 1 segundo. Uma partícula teria valor de 1,16 partículas aos 600 segundos pela redução de vazão. Caso a vazão da APS fosse reduzida pela metade num determinado tempo, uma partícula contada teria valor de duas, para compensar a vazão. Nota-se que a sucção da APS vai diminuindo com o passar do tempo, e assim o número corrigido de inclusões tende a subir para compensar essa diminuição na vazão.

Usando esta equação para normalização da equação, têm-se gráficos como o da figura 5.15.

Nota-se que a diferença entre o gráfico normalizado e não normalizado é pequena. Isso acontece devido ao maior peso da normalização ser atribuída ao final do esgotamento da panela, onde as quantidades de partículas detectadas pela APS são menores.

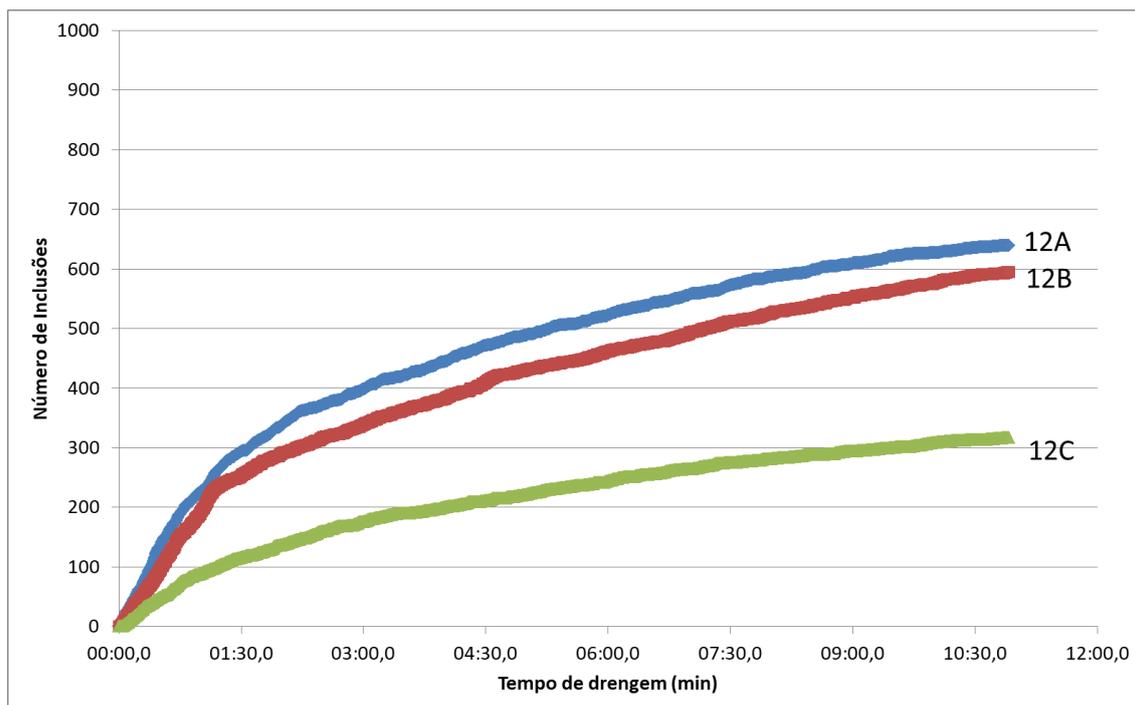


Figura 5.15 – Contagem de inclusões para o plugue 1, vazão de 2NI/min nos três tempos estudados normalizado

Todos os resultados serão apresentados de forma normalizada. O resultado no final do teste (10 minutos e 55 segundos) mostra a quantidade final de inclusões que foram contadas e que serão comparadas para obtenção da porcentagem de remoção de inclusões.

5.3.3. Teste base

O teste base foi feito sem injeção de gás na panela. Sua função é servir de comparação para os outros testes. A ideia das comparações é mostrar quantas inclusões são removidas em relação a uma situação sem injeção de gás.

Para uma panela sem injeção de gás, a ascensão das inclusões ocorre na velocidade natural delas devido à diferença de densidade em relação à água. A tabela V.5 mostra a velocidade de ascensão das partículas de boro silicato na água calculada a partir da equação de Stokes (Eq. 3.8).

Tabela V.5 - Velocidade de ascensão das partículas de boro-silicato na água de acordo com seu raio e tempo para chegar ao topo caso estejam no fundo da panela

| Amostra | Raio (μm) | Velocidade (m/s) | Velocidade de subida da partícula (cm/min) | Tempo para atingir o topo da panela em meio estagnante (min) |
|---------|------------------------|------------------|--|--|
| 1 | 4,60 | 3,56E-05 | 0,2 | 281,1 |
| 2 | 10,00 | 1,68E-04 | 1,0 | 59,5 |
| 3 | 20,00 | 6,72E-04 | 4,0 | 14,9 |
| 4 | 25,00 | 1,05E-03 | 6,3 | 9,5 |
| 5 | 32,00 | 1,72E-03 | 10,3 | 5,8 |
| 6 | 50,00 | 4,20E-03 | 25,2 | 2,4 |
| 7 | 60,00 | 6,05E-03 | 36,3 | 1,7 |

Pode-se observar que partículas menores levam um tempo maior para chegarem até o topo da panela caso estejam no fundo da panela. Dessa forma, elas são de difícil remoção. Esse efeito é mostrado na figura 4.9. O borbulhamento de gás deve ajudar na remoção destas partículas.

Enquanto as partículas estão subindo para o topo da panela, o líquido dentro dela está sendo drenado, ou seja, a velocidade final de subida das partículas será um balanço entre sua velocidade natural de ascensão e a velocidade de descida do líquido. Foram feitos testes para conhecimento da velocidade de descida do líquido na panela. Foram coletados volumes de 10 litros de água por baixo da panela a cada 2 minutos durante sua drenagem. Foi anotado o tempo para enchimento dos 10 litros e assim obteve-se a vazão de drenagem a cada 2 minutos. Como existe variação na altura da coluna de água durante a drenagem, a vazão não foi constante e nem apresentou variação linear. A partir desses dados coletados foi ajustada uma curva para a queda da vazão com o tempo, mostrada na figura 5.16.

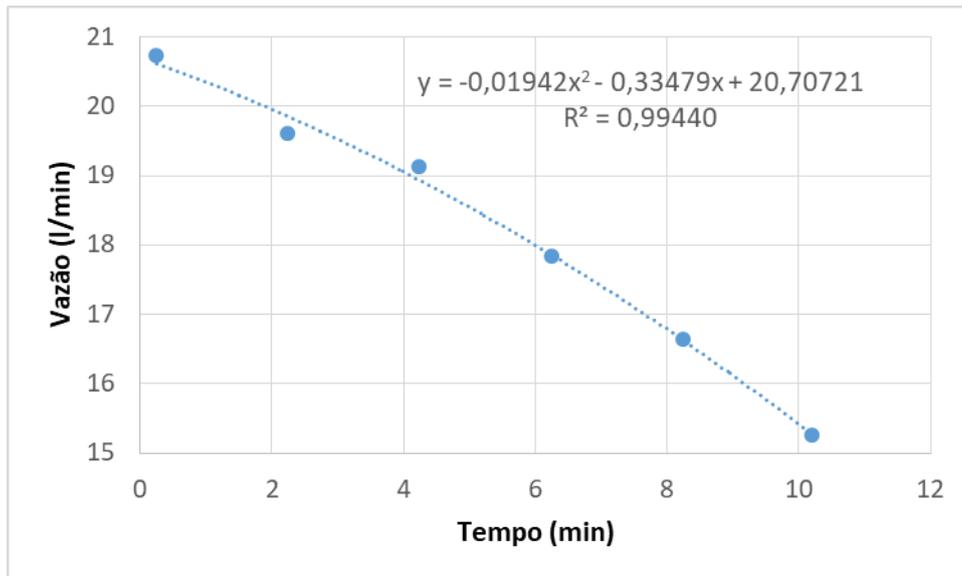


Figura 5.16 – Variação da vazão de drenagem da panela em função do tempo

A variação da vazão de drenagem da panela com o tempo é dada pela equação 5.4.

$$Q_{pan} = -0,01942t^2 - 0,33479t + 20,70721 \dots\dots\dots \text{Eq. 5.4}$$

Onde:

Q_{pan} = Vazão de drenagem da panela (l/min);

t = tempo de drenagem da panela (min).

A partir da variação da vazão e área da superfície de água na panela, pode-se calcular a velocidade de descida da água durante a drenagem da panela. A figura 5.17 mostra essa variação.

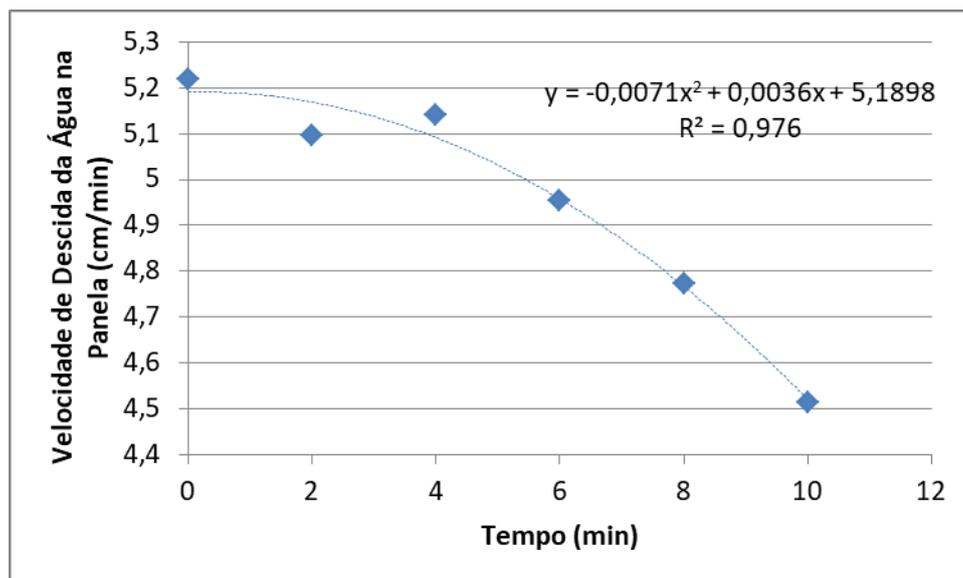


Figura 5.17 – Velocidade de descida da água na panela em função do tempo de drenagem

A velocidade não varia linearmente como pode-se perceber pela equação ajustada no gráfico da imagem PUP. A velocidade em função do tempo de drenagem é dada pela equação 5.5.

$$V_{DAP} = -0,0071t^2 + 0,0036t + 5,1898 \dots\dots\dots \text{Eq. 5.5}$$

Onde:

V_{DAP} = Velocidade de descida da água na panela (cm/min);

t = tempo de drenagem da panela (min).

A partir desses dados, e utilizando-se da maior velocidade de descida da água para balanço das velocidades, pode-se construir a tabela V.6 com as velocidades de ascensão das inclusões em relação a dreno da panela.

Tabela V.6 – Velocidade das partículas em relação ao dreno da panela

| Amostra | Raio (μm) | Velocidade (m/s) | Velocidade de subida da partícula (cm/min) | Velocidade Máxima de Descida da Água (cm/min) | Velocidade Em relação ao Dreno da Panela (cm/min) | Status Inclusão |
|---------|------------------------|------------------|--|---|---|-----------------|
| 1 | 4,6 | 3,56E-05 | 0,2 | 5,2 | -5,0 | Desce |
| 2 | 10,0 | 1,68E-04 | 1,0 | 5,2 | -4,2 | Desce |
| 3 | 20,0 | 6,72E-04 | 4,0 | 5,2 | -1,1 | Desce |
| 4 | 25,0 | 1,05E-03 | 6,3 | 5,2 | 1,1 | Sobe |
| 5 | 32,0 | 1,72E-03 | 10,3 | 5,2 | 5,1 | Sobe |
| 6 | 50,0 | 4,20E-03 | 25,2 | 5,2 | 20,0 | Sobe |
| 7 | 60,0 | 6,05E-03 | 36,3 | 5,2 | 31,1 | Sobe |

Observa-se que em meio estagnante, as inclusões menores tem tendência de ir em direção ao dreno, ou seja, descem em direção a ele. Já inclusões maiores, têm maior velocidade de subida e tendem a subir na panela enquanto ela é drenada. O raio

crítico para subida das partículas de boro-silicato na água é de $22,66\mu\text{m}$. A partir deste raio a inclusão tende a subir na panela.

A localização das inclusões dentro da panela também é muito importante. Se elas estiverem mais acima na panela, mesmo tendo velocidade em relação ao dreno menor que zero, pode ser que ela chegue à superfície da água na panela antes de sair pelo dreno. Principalmente para aquelas que estão próximas do raio crítico da inclusão e tem velocidade de ascensão maior.

O borbulhamento de gás faz com que as velocidades das inclusões sejam aumentadas para as partículas que estão na zona da pluma e reduzidas para aquelas que estão mais afastadas. A imagem 5.18, foi obtida através de simulação fluidodinâmica com objetivo do estudo das interações do borbulhamento de gás e com o aço na panela e mostra as velocidades induzidas na água pela pluma de gás.

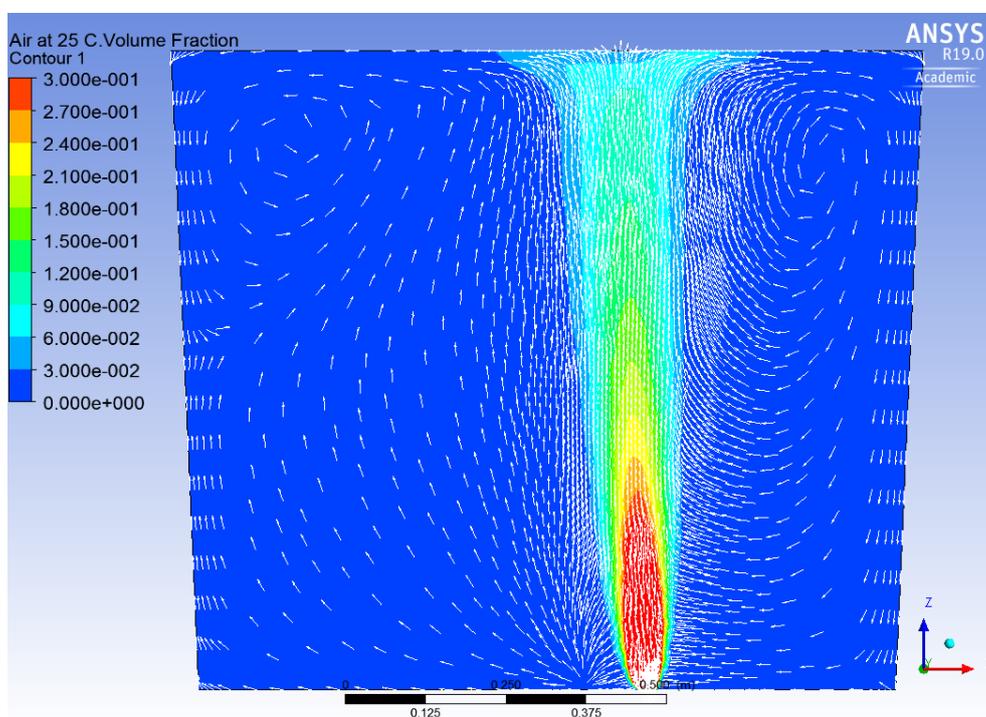


Figura 5.18 – Perfil de velocidades e de fração volumétrica de gás no plano de simetria do modelo físico da panela - (LaSiP – UFMG)

Nesta figura pode-se observar as direções de fluxo induzidos dentro da panela. Se a inclusão estiver numa posição em que as setas na figura são direcionadas para cima, terá um aumento em sua velocidade de ascensão. Caso esteja numa posição em que a seta esteja posicionada para baixo, sua velocidade de subida na panela será diminuída. Além disso, se a inclusão estiver posicionada em maiores valores de fração volumétrica de ar, mostrada pela coloração da figura, sua velocidade terá um acréscimo maior.

Sendo assim, nos testes feitos, as inclusões contadas foram aquelas que saíram da panela e passaram pela sonda, ou seja, apresentaram velocidade relativa menor que zero. O gráfico da figura 5.19 mostra o resultado normalizado para o teste base de remoção de inclusões. O teste base foi feito em triplicata, e para a média de seu resultado, já normalizada, foram contadas 903 inclusões nos 10 minutos e 55 segundos de teste.

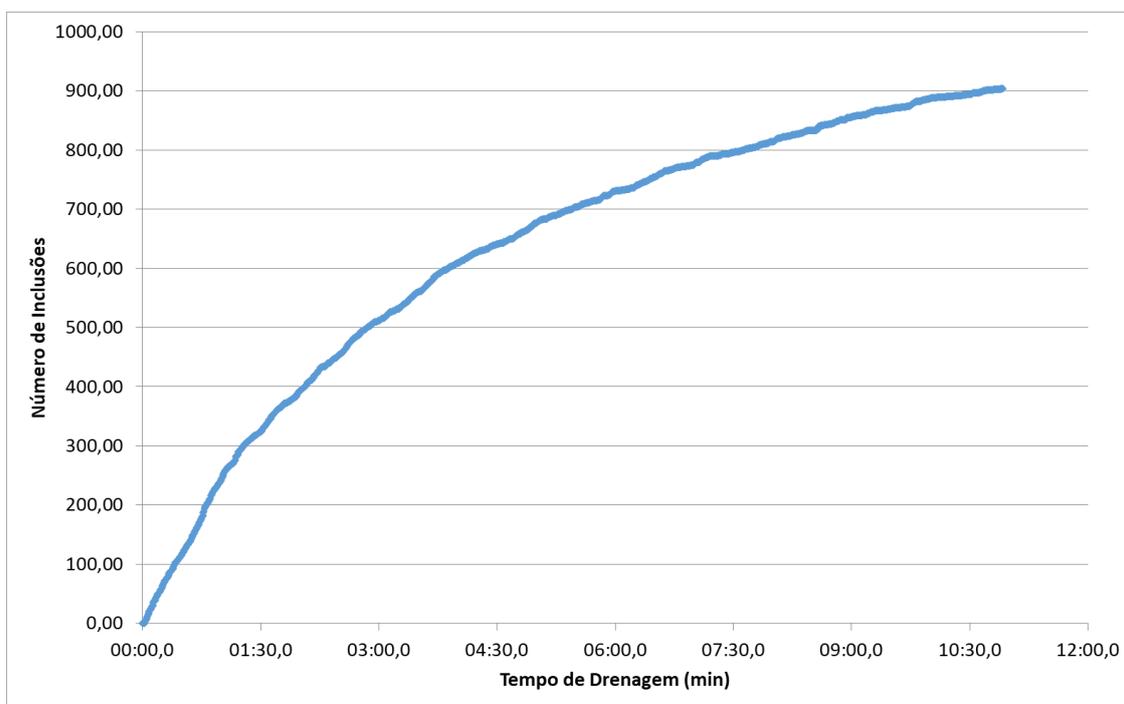


Figura 5.19 – Resultado normalizado para teste base de remoção de inclusões

A porcentagem de remoção de inclusões de todos os outros testes foi calculada em relação às 903 inclusões contadas no teste base.

5.3.4. Resultados gerais dos testes para os plugues

As comparações entre os resultados foram realizadas estimando a porcentagem de inclusões removidas por teste. Essa porcentagem foi calculada de acordo com a equação 5.6.

$$PRI = 100 - \left(\frac{NTIT}{NTIB} \right) \cdot 100 \dots\dots\dots \text{Eq. 5.6}$$

Onde:

PRI = Porcentagem de remoção de inclusões (%);

NTIT = Número total de inclusões no teste aplicado;

NTIB = Número total de inclusões no teste base.

A PRI foi calculada para todos os testes em todas as condições de vazão, tempo, plugue e posição do plugue. A partir da PRI, todos os testes foram comparados. Quanto maior a PRI, melhor terá sido a remoção de inclusões do teste.

As médias da remoção de inclusões dos plugues para as posições centralizada e descentralizada são mostradas na tabela V.7.

Tabela V.7 – Médias das porcentagens de remoção de inclusão para os plugues nas posições centralizada e descentralizada

| Posição Descentralizada | | | Posição Centralizada | | |
|-------------------------|----------|----------|----------------------|----------|----------|
| Plugue 1 | Plugue 2 | Plugue 3 | Plugue 1 | Plugue 2 | Plugue 3 |
| 46,90 | 39,15 | 28,77 | 44,26 | 44,54 | 29,05 |

Apesar do plugue 1 ter obtido maior média geral para remoção de inclusões, o plugue 2 obteve maior média para posição centralizada. O plugue 3, independente da sua posição, obteve médias baixas, mostrando-se dentre os 3 plugues estudados, ter menor eficiência de remoção. Na indústria, o plugue é descentralizado.

5.4. Efeitos da Área do Plugue e Vazão de Gás

Como citado no item 5.1, quanto menor a área do plugue, menor é a quantidade de bolhas geradas e maiores os diâmetros das bolhas formadas por este.

Foi analisada a PRI para os plugues em função apenas da vazão de gás. Considerando os tempos diferentes e plugues diferentes. Como esperado, a vazão em si, não tem boa correlação com a PRI, conforme mostrado na figura 5.20 para tratamentos de borbulhamento de 27 segundos e posição descentralizada.

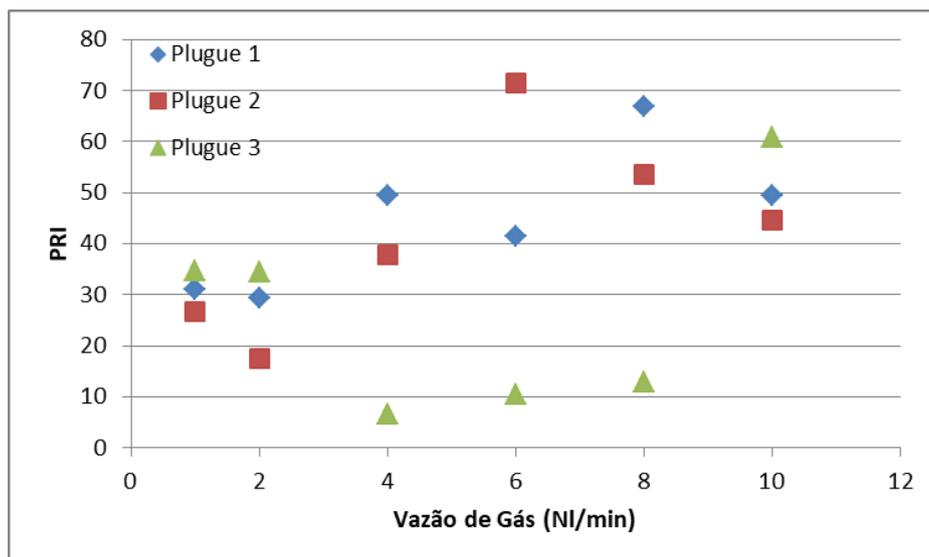


Figura 5.20 – PRI em função da vazão de gás para todos os plugues, no tempo de 27 segundos e posição descentralizada.

Pode-se observar que existe uma tendência de aumento da PRI com o aumento da vazão para o plugue 1 e para o plugue 2. Porém, o plugue 3 não mostra uma tendência. Essa mesma situação ocorre para outros tempos de tratamentos e também na posição centralizada.

A comparação entre as áreas superficiais é traduzida pela comparação dos resultados entre os plugues, visto que cada um tem uma área superficial diferente. Mantendo constantes todas as outras variáveis, tem-se a figura 5.21 para os resultados de PRI para cada plugue na posição centralizada para cada vazão.

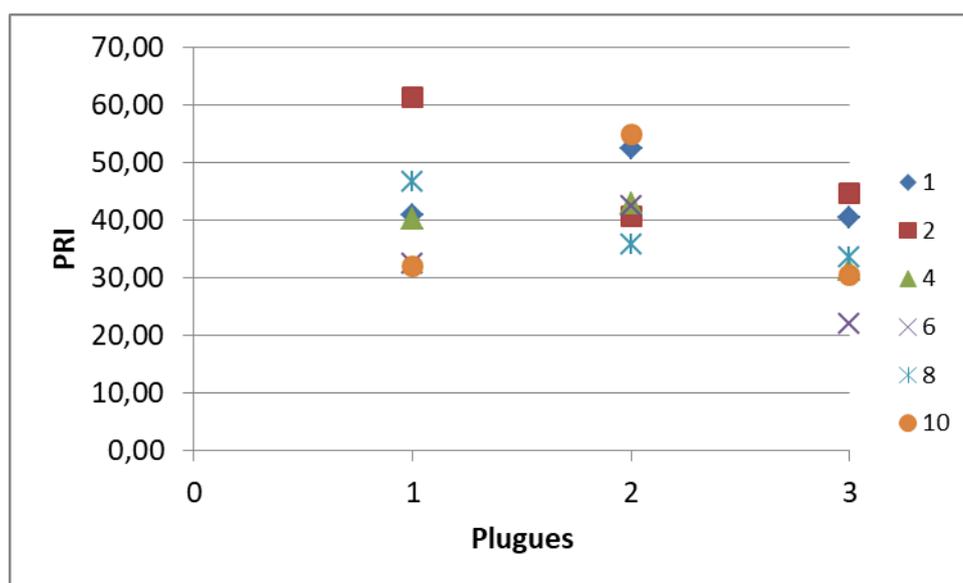


Figura 5.21 – PRI em função do plugue para posição centralizada, 81 segundos e diversas vazões.

Nesta figura, a legenda mostra a vazão em NL/min. Para os outros tempos estudados, a PRI é análoga. Com a diminuição da área superficial, ou seja, do plugue 1 (maior área) para o plugue 3 (menor área) há uma tendência de diminuição da PRI.

Utilizando-se dos resultados médios de PRI de todas as vazões, e agora comparando-se os tempos para cada plugue, tem-se o seguinte gráfico da figura 5.22.

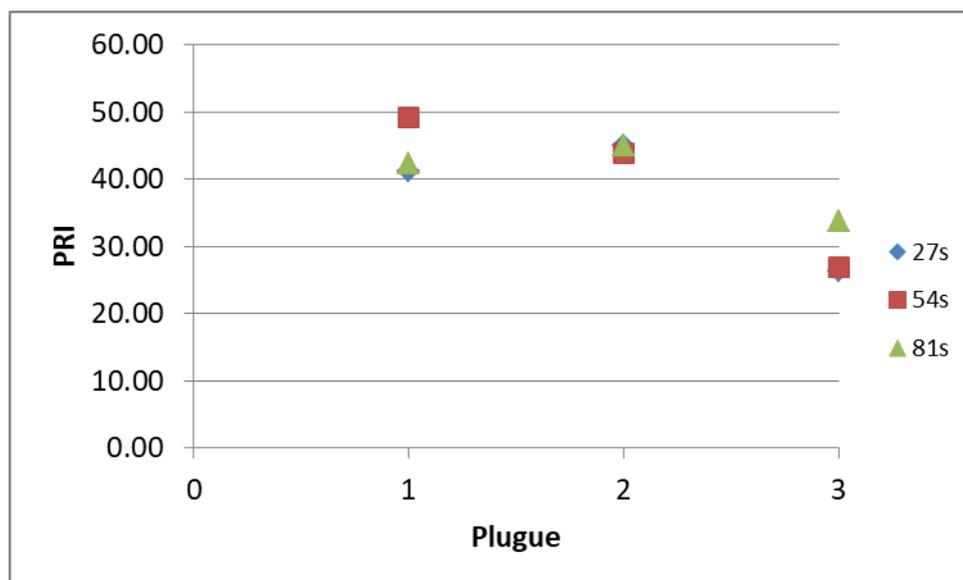


Figura 5.22 – PRI em função do plugue para posição centralizada nos 3 tempos estudados.

Nota-se que em todos os tempos estudados para os 3 plugues, ainda há uma diminuição da PRI com a diminuição da área superficial do plugue.

Para o plugue na posição descentralizada, foi feito o gráfico da figura 5.23, que mostra a PRI para cada vazão no tempo de 54s para os 3 plugues.

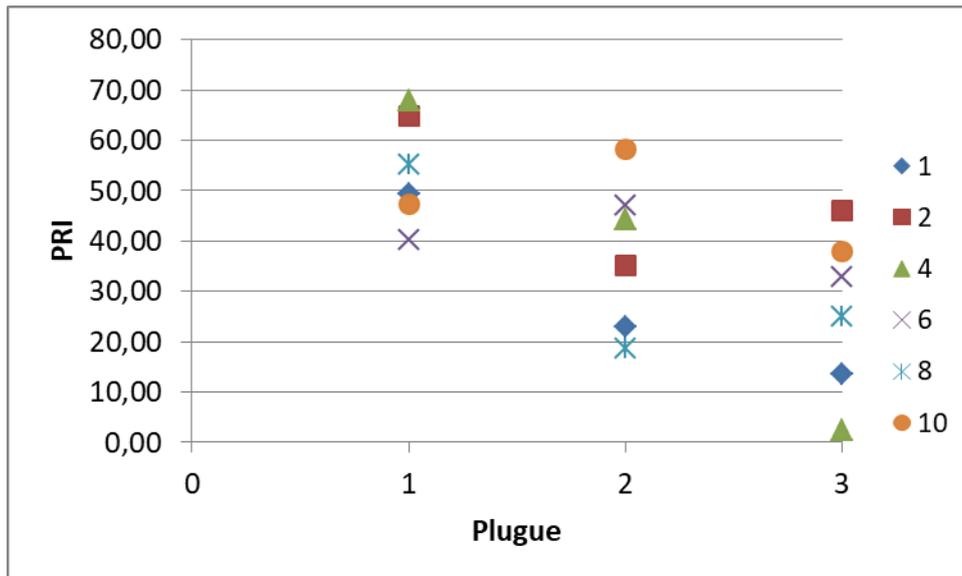


Figura 5.23 – PRI em função do plugue na posição descentralizada para todas as vazões estudadas no tempo de 81s

Nesta figura, a legenda mostra a vazão em NL/min. Nota-se que acontece o mesmo fenômeno da posição centralizada. Ou seja, quanto menor a área superficial do plugue, menor será a PRI. O gráfico da figura 5.24 foi construído utilizando-se das porcentagens de remoção médias das vazões para cada tempo e cada plugue.

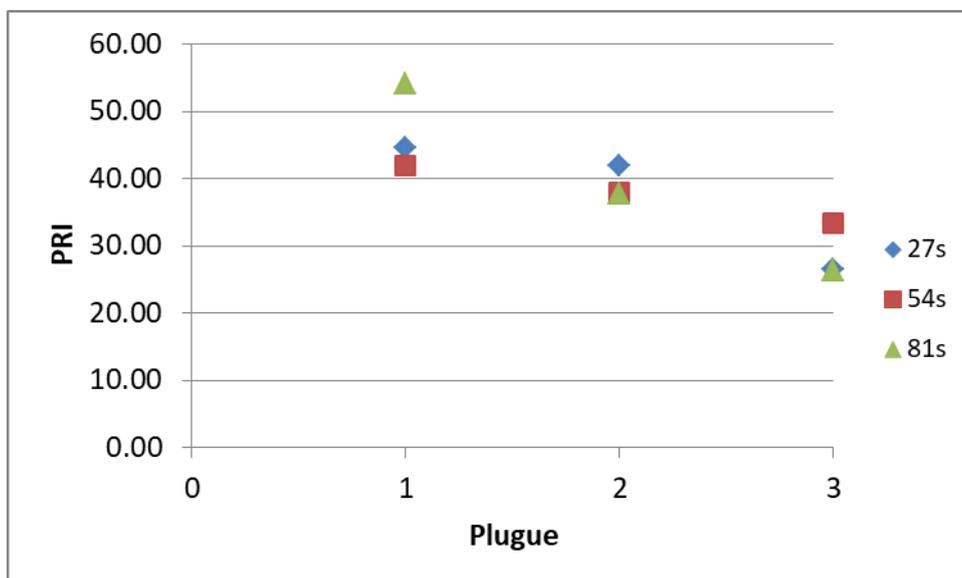


Figura 5.24 – PRI em função do plugue para os plugues na posição descentralizada nos tempos estudados.

Em geral, quanto menor a área superficial do plugue, maior será o tamanho da bolha gerada e maior será a sua velocidade no meio. As inclusões no raio da pluma terão sua velocidade com um acréscimo maior quando capturadas pelo fluxo (para subir ou descer no fluido). Porém, menos inclusões serão realmente flotadas, pois as bolhas grandes são piores na remoção de inclusões. A bolha maior tem o tempo de

residência dentro da panela muito menor que a bolha menor. Isso faz com que a probabilidade de encontrar uma partícula seja menor para bolhas maiores. Bolhas menores têm maior probabilidade de colisão com inclusões e somado ao grande número de bolhas, os plugues de maior área se tornam melhores para remoção de inclusões, como observado por Wang (1996) em seu trabalho.

Na indústria, a diminuição da área superficial do plugue pode ser entendida como entupimento do plugue. Com o passar do tempo e com o aumento do número de corridas na panela, o plugue obstrui. Isso faz com que parte de seus poros ou “slits” sejam fechados. Assim, tem-se o efeito de um plugue com maior área superficial quando novo e um plugue de menor área superficial com o aumento do número de corridas no plugue. Para remoção de inclusões, é ideal que a área superficial do plugue seja constante ao longo de sua vida. Normalmente, a obstrução do plugue é percebida quando se tem um aumento da pressão de trabalho para se chegar às mesmas vazões do início da vida do plugue. Isso prejudica muito os tratamentos de remoção de inclusões. Pois os resultados mostram que para mesma vazão, plugues com área superficial menores tem menor rendimento ao se tratar de remoção de inclusões.

A vazão de gás não mostra uma boa correlação direta com a PRI e embora a área superficial do plugue mostre uma tendência de diminuição da PRI com a diminuição da área, essas duas variáveis juntas mostram um papel fundamental para entendimento da PRI.

Sendo assim, foi analisada a PRI em função de Q/A, que obteve uma boa relação com resultados experimentais, conforme mostrado para a figura 5.25 para todos os plugues no tempo de borbulhamento de 27 segundos e posição descentralizada.

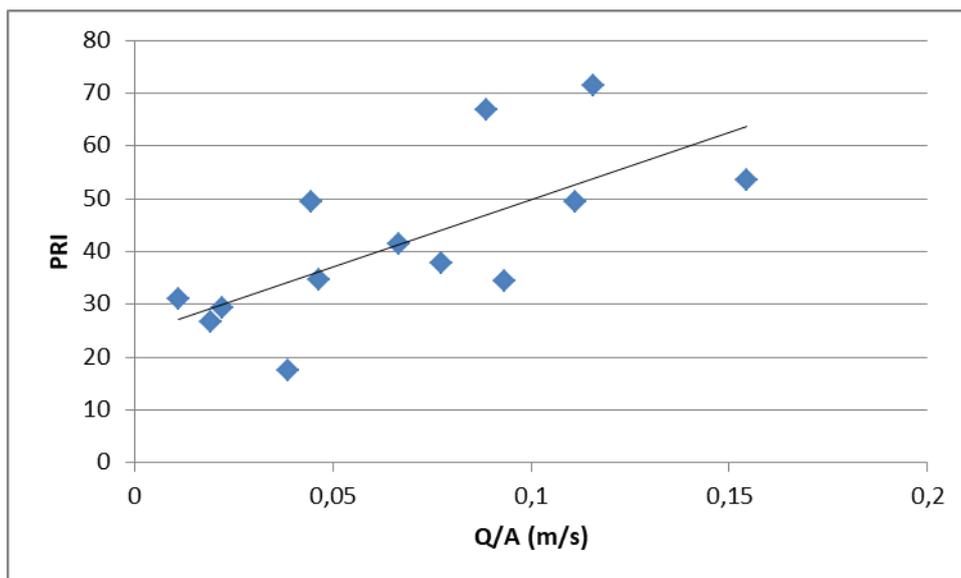


Figura 5.25 – PRI em função de Q/A para todos os plugues na posição descentralizada e tempo de borbulhamento de 27 segundos.

Como mostrado na equação 5.1, quanto maior Q/A, maior o tamanho de bolha. Sendo assim, essa equação funciona bem para valores de Q/A menores que 0,16m/s (ou seja, tamanhos de bolhas menores). Para este tempo de tratamento, valores maiores não obtiveram boa correlação.

Esse mesmo efeito é observado para borbulhamento em 54 segundos com plugue descentralizado, conforme mostrado na figura 5.26 (à esquerda).

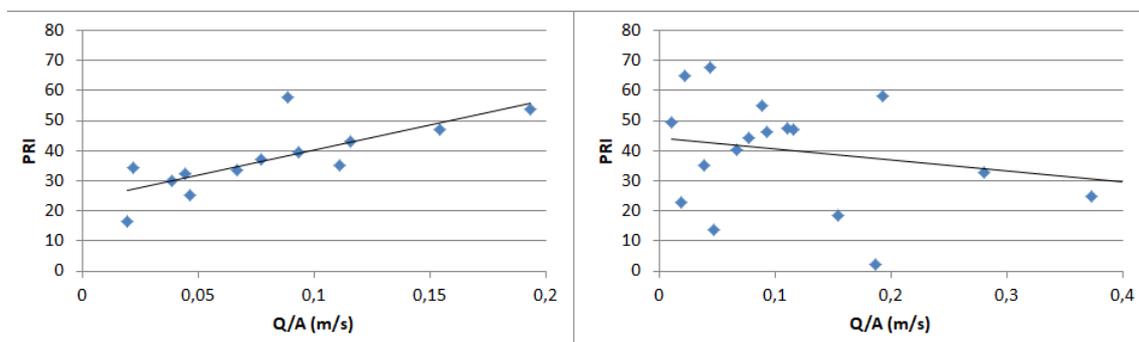


Figura 5.26 – PRI em função de Q/A para todos os plugues na posição descentralizada para 54 segundos de tratamento (à esquerda) e 81 segundos (à direita)

Na figura 5.26 (à direita), para o tempo de 81 segundos de tratamento, a correlação já não é tão boa, e tem tendência inversa, quanto maior Q/A, menor será a PRI

Para o plugue na posição centralizada, o fenômeno de aumento da PRI com a diminuição de Q/A é mais nítido para os tempos maiores, como é mostrado pela figura 5.27.

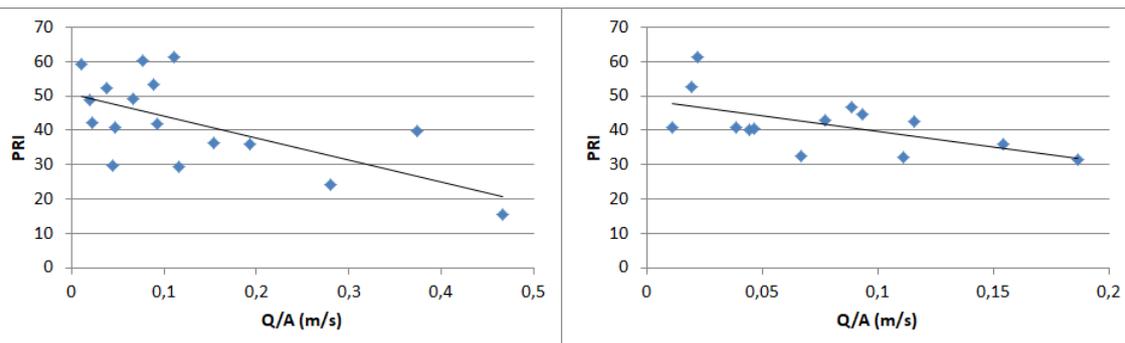


Figura 5.27 – PRI em função de Q/A para todos os plugues na posição centralizada para os tempos de 54 segundos (à esquerda) e 81 segundos (à direita)

Para os tempos maiores, a PRI é maior para valores menores de Q/A (ou seja, menores bolhas). Em maiores tempos de tratamentos, a maior parte das inclusões já foi removida para as partes superiores da panela. A maior turbulência gerada pelas bolhas maiores, em conjunto com a maior densidade das inclusões na parte superior da panela faz com que a PRI seja menor em tempos maiores.

Neste caso, é mostrado o efeito da reversão de partículas. Esse efeito mostra que quando a densidade de partículas nas camadas superiores da panela é muito alta, o fluxo de gás pode carregar consigo inclusões de volta para o banho metálico.

Numa panela real de aciaria, a escória faria a fixação das inclusões. Porém em uma escória saturada em inclusões, elas ficariam na parte superior da panela, sendo carregadas de volta para o banho em caso de tempos longos de tratamentos. A reversão é a volta de inclusões já removidas para o banho metálico.

Um valor maior de Q/A está intimamente ligado a um maior tamanho de bolha. Bolhas grandes têm maior velocidade de subida e menor tempo de residência no banho metálico. Essa velocidade de subida maior faz com que os gradientes de velocidade no banho metálico também sejam maiores, tanto para subir quanto para descer. Em geral, removem inclusões mais rapidamente, mas também revertem inclusões mais rapidamente.

5.5 Efeito da Reversão das Inclusões

Foram desenvolvidos experimentos no modelo aquoso com uma camada de partículas na superfície da água na panela para simular a camada de escória com o objetivo de entender melhor o fenômeno de reversão das inclusões para o banho de acordo com a vazão de gás e plugue.

Foi colocada a mesma quantidade de partículas para todos os testes, simulando uma camada de 2,5cm de escória na panela. As partículas são de poliestireno e têm densidade menor que a da água.

A injeção de gás faz com que essas partículas recirculem na panela, mostrando o fenômeno da reversão. A primeira figura 5.28 mostra a evolução dessa recirculação com o tempo.

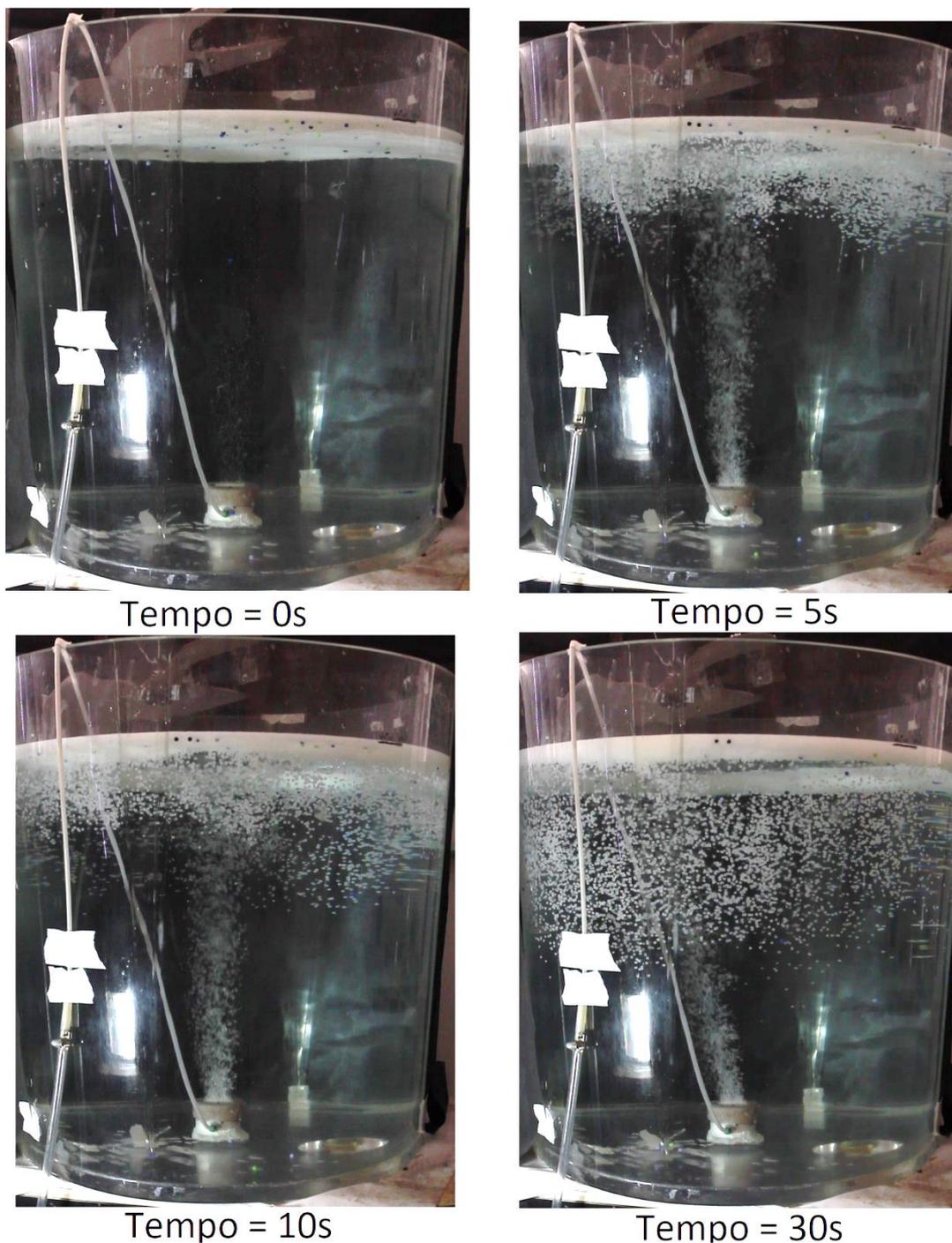


Figura 5.28 – Evolução da reversão de partículas durante o borbulhamento de gás para o plugue centralizado na vazão de 8NL/min.

Os resultados mostram que o borbulhamento de gás inicialmente abre o olho na escória, arrastando muitas partículas de volta ao banho. Com o passar do tempo, há um aumento no arraste dessas partículas de volta ao banho. No momento que a pluma na panela está estabilizada e o olho de escória na panela está formado, essa recirculação de partículas diminui, pois o gás já passa direto da camada de líquido para a atmosfera, sem entrar em contato com a camada de escória. Isso faz com que inicialmente o efeito da reversão seja maior, e após um tempo esse feito tenha tendência de diminuir. A figura 5.29 mostra a reversão no momento de estabilização do olho na escória e após certo tempo de tratamento.

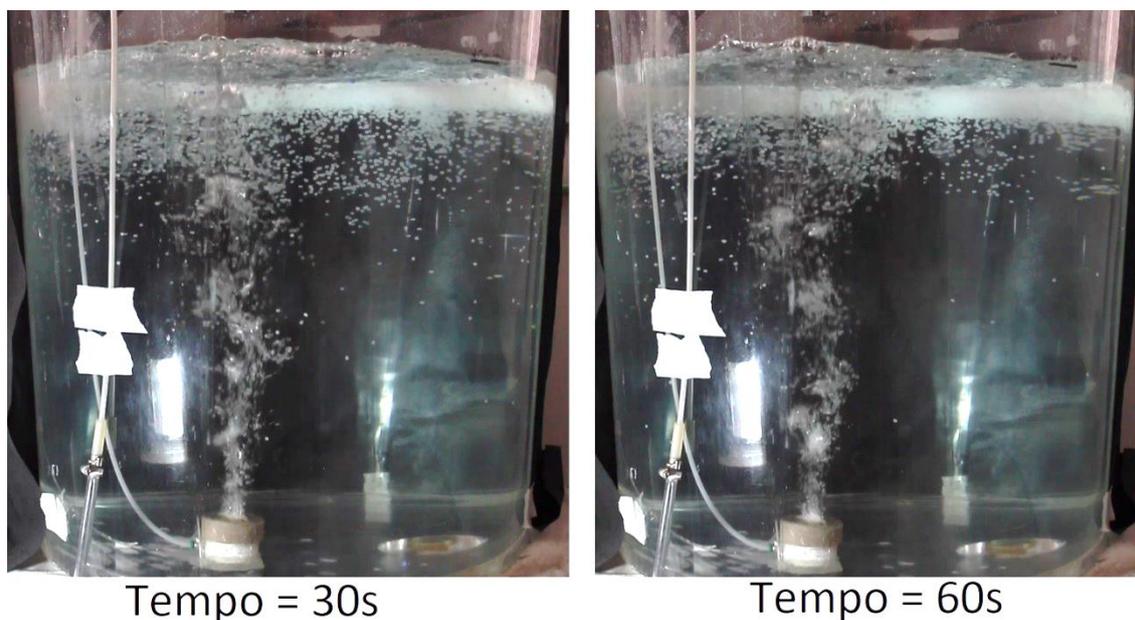


Figura 5.29 – Borbulhamento de gás para o plugue 2 na vazão de 4NL/min após 30s e 60s de tratamento

Nota-se na figura 5.29, no tempo de 30 segundos, a reversão é maior que no tempo de 60 segundos. Foi observado que após a estabilização do olho, a reversão torna-se menor.

A figura 5.30 mostra a diferença da reversão com a vazão de gás.

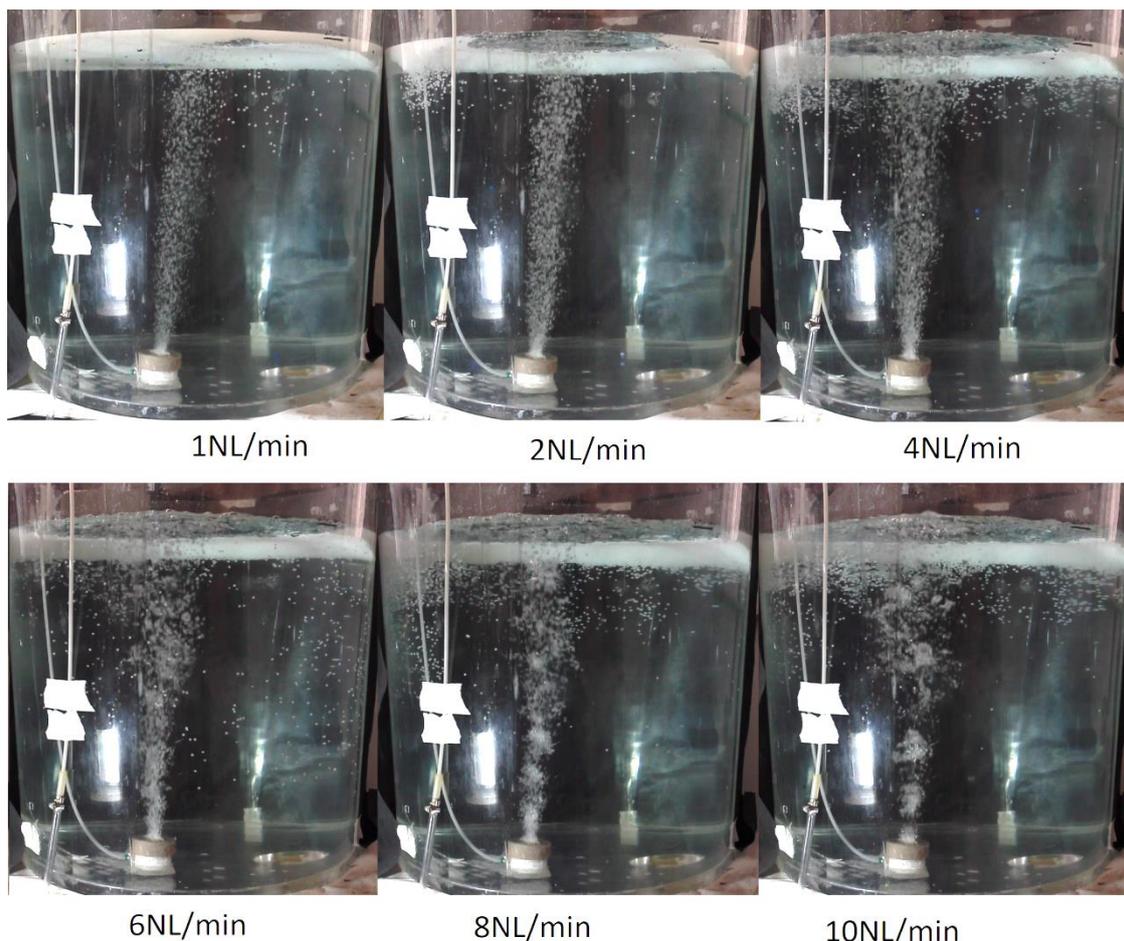


Figura 5.30 – Variação da reversão de partículas com a vazão de gás para o plugue 2, com 30 segundos de tratamento.

Em geral, é possível perceber que quanto maior a vazão, maior será a reversão de partículas das camadas superiores para as camadas inferiores.

Todos os resultados são análogos para os outros plugues e posições.

5.6 Efeito do Tempo de Injeção de Gás

O tempo de injeção de gás afeta a PRI de modos diferentes, dependendo do plugue e da vazão empregados. Quando a vazão é menor, ao aumentar o tempo de injeção de gás, maior será a PRI, conforme mostra a figura 5.31 para as vazões de 1 e 2NL/min em todos os plugues. Na legenda das figuras 5.31 e 5.32, o primeiro número corresponde ao número do plugue e o segundo à vazão de gás em NL/min.

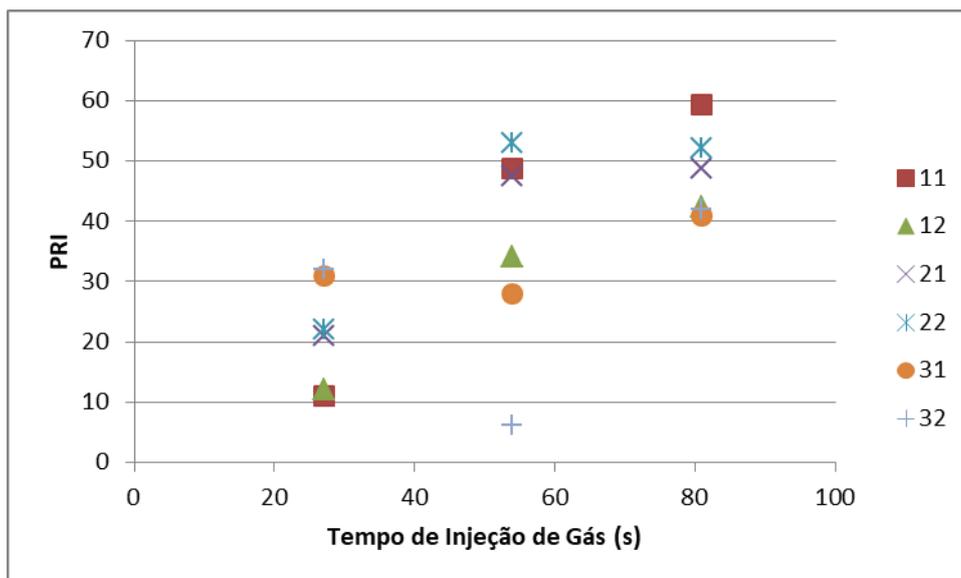


Figura 5.31 – PRI em função do tempo de injeção de gás para todos os plugues nas vazões de 1 e 2 NI/min.

A figura 5.31 mostra que para todos os plugues, com vazões menores, existe essa tendência do aumento da PRI com o aumento do tempo de injeção de gás.

Já para vazões maiores, o comportamento é diferente, com o aumento do tempo de injeção de gás a PRI tende a se estabilizar ou diminuir, conforme mostrado na figura 5.32.

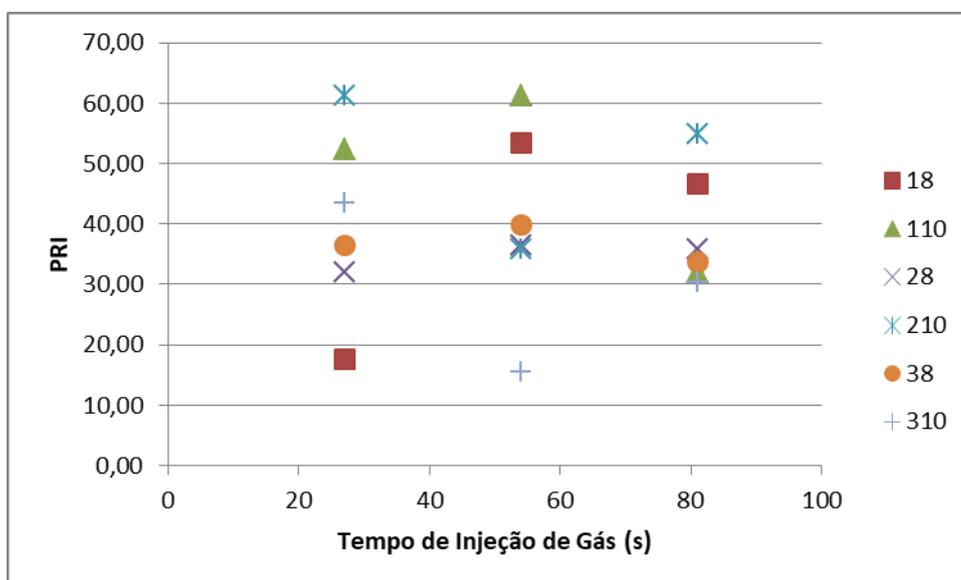


Figura 5.32 – PRI em função do tempo de injeção de gás para todos os plugues nas vazões de 8 e 10 NI/min.

Esse efeito acontece devido à reversão de inclusões, como citado anteriormente. Em vazões menores, têm-se bolhas menores e com menores velocidades, gerando menos turbulência e fazendo um tratamento de remoção mais brando. Com o aumento da

vazão e conseqüente aumento do tamanho de bolha, as velocidades e turbulência provocada pelas bolhas aumentam, prejudicando ou estabilizando, os tratamentos de maior tempo.

No início do tratamento, existem muitas inclusões homogeneizadas no banho. Sendo assim, a remoção de inclusões inicial é alta. Com o passar do tempo, essa concentração de inclusões no banho diminui, aumentando a reversão. Com velocidades de bolhas maiores, essa reversão se torna maior. Por isso em vazões maiores, e tempos maiores, os tratamentos tendem a ser piores.

5.7 Efeito do Posicionamento do Plugue

Foram comparados testes nas mesmas condições, porém com posicionamento do plugue diferentes. Os resultados para PRI com plugue centralizado foi diminuído do resultado do plugue descentralizado para todas as condições estudadas, conforme mostrado pela equação 5.7 para o tratamento feito com plugue 1, na vazão de 1NI/min e tempo de 27 segundos, e feito um histograma num software estatístico dessas diferenças entre todos os testes, mostrado na figura 5.33.

$$PRI_{(cent.)} - PRI_{(descent.)} = \text{Diferença de PRI para posicionamento.....Eq. 5.7}$$

Onde:

$PRI_{(cent.)}$ = Porcentagem de Remoção de Inclusões na posição centralizada;

$PRI_{(descent.)}$ = Porcentagem de Remoção de Inclusões na posição descentralizada.

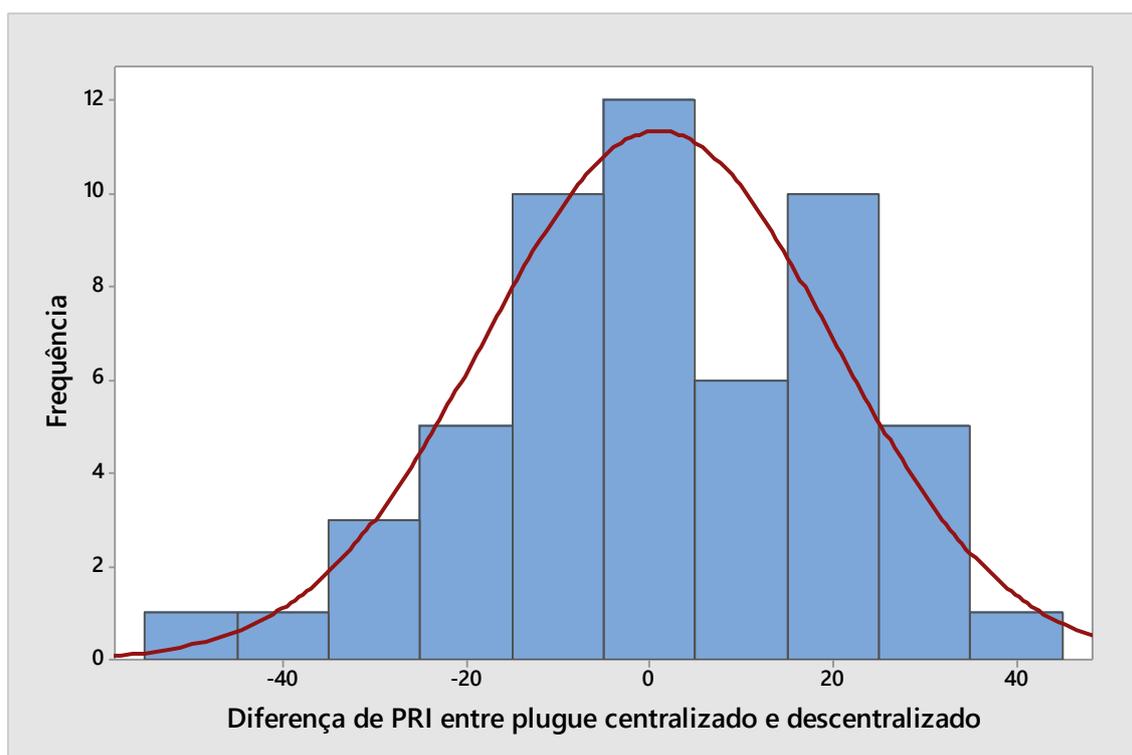


Figura 5.33 – Histograma das diferenças de PRI para as mesmas condições entre plugue centralizado e descentralizado

O resultado médio deste histograma é 1,001, o que mostra que não há diferença significativa entre posição centralizada e descentralizada. O desvio-padrão é de 19, mostrando que existem muitos resultados distantes desta média.

Foi feita então essa mesma comparação da diferença entre os resultados para mesmas condições do plugue centralizado e descentralizado, mas dessa vez para cada plugue separadamente e foi obtido o histograma da figura 5.34.

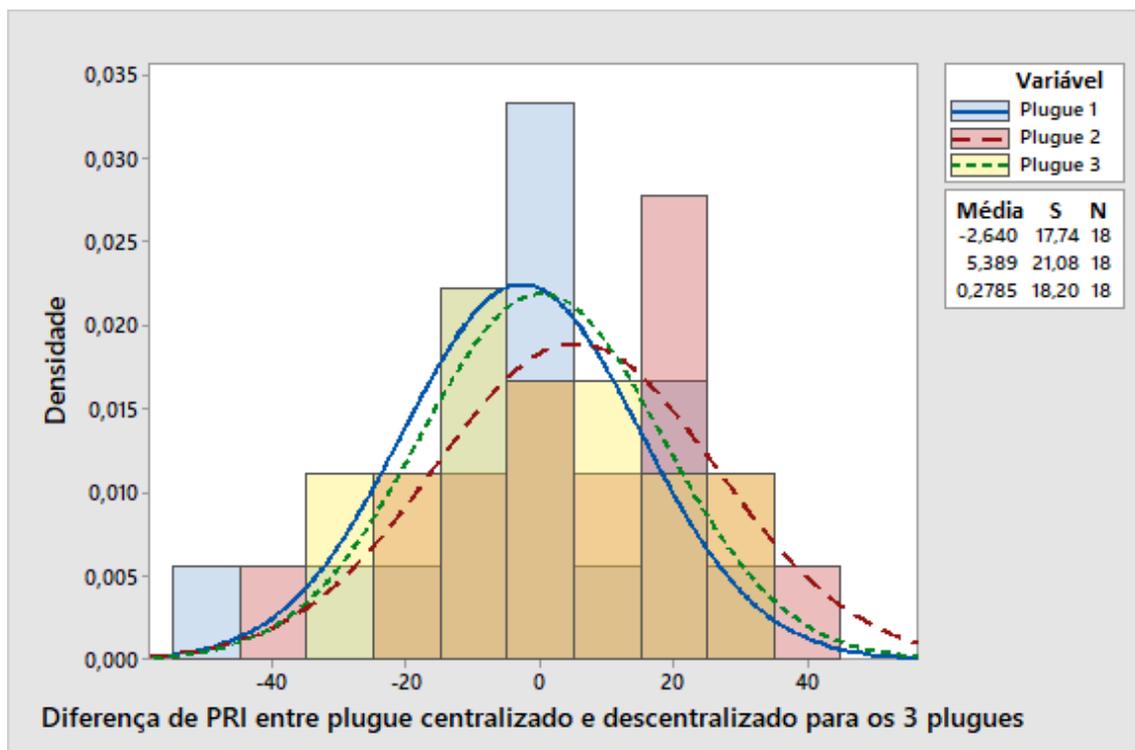


Figura 5.34 – Diferença de PRI para as mesmas condições entre plugue centralizado e descentralizado por plugue

Analisando a figura, pode-se observar que para o plugue 1, os tratamentos na posição descentralizada são ligeiramente melhores que na posição centralizada. Para o plugue 2, a posição centralizada já é melhor e para o plugue 3 não há muita diferença entre as posições do plugue.

Como mostrado pela figura 5.18, o fluxo mais próximo da parede tem tendência de descer em relação ao dreno da panela. Nessa figura pode-se observar em sua parte direita há um fluxo ainda maior de descida do que na parte esquerda. Isso acontece porque o plugue está mais próximo da parede da panela.

Com um posicionamento de plugue mais centralizado, essa zona com fluxo para baixo mostrada na parte direita da figura 5.18 é diminuída, diminuindo assim a descida de inclusões nessa parte. Porém, é aumentada na parte esquerda. O que deve equilibrar o efeito de remoção e reversão de inclusões. Por isso os resultados entre plugue centralizado e descentralizado são muito parecidos.

5.8. Efeito da Granulometria das Partículas em Sua Remoção

As partículas usadas nos testes têm distribuição granulométrica bastante diversificada. Desde inclusões muito pequenas, por volta de 20 μ m, até inclusões muito grandes de 160 μ m. Sabe-se que o efeito da injeção de gás é diferente para granulometrias

diferentes. A interação das bolhas com as inclusões varia de acordo com o tamanho da bolha e com o tamanho da inclusão. A velocidade de ascensão das partículas varia de acordo com seu tamanho. O comportamento no fluxo gerado pelo borbulhamento também varia com o tamanho das bolhas e das inclusões.

Inclusões muito pequenas têm mais facilidade em seguir o fluxo gerado pelo borbulhamento na panela, ou seja, elas tendem a seguir o rastro, ou fluxo, da bolha. Inclusões maiores são mais facilmente capturadas pelas bolhas do que inclusões menores, além disso, têm velocidade de ascensão maior.

De modo geral, inclusões menores são mais difíceis de remover, por serem mais difíceis de serem capturadas pelas bolhas e por terem menores velocidades de subida na panela.

Além dos testes para quantificação do número de inclusões removidas em cada teste, a sonda APS também fornece a distribuição granulométrica das partículas contadas. A partir destes dados fornecidos pela sonda, é possível identificar a quantidade removida de cada faixa granulométrica das partículas capturadas pela sonda.

5.8.1. Tratamento dos dados

O software da sonda APS fornece dados de porcentagens acumuladas para cada faixa granulométrica ao longo do tempo de captura de partículas. A partir dos dados fornecidos, pode-se comparar a remoção de inclusões em cada faixa granulométrica de partículas.

A partir dos dados de distribuição granulométrica do teste base, foram feitas as comparações com os demais testes. O gráfico da figura 5.35 mostra a variação da fração granulométrica de cada faixa de tamanho durante a drenagem da panela para um dos testes feitos.

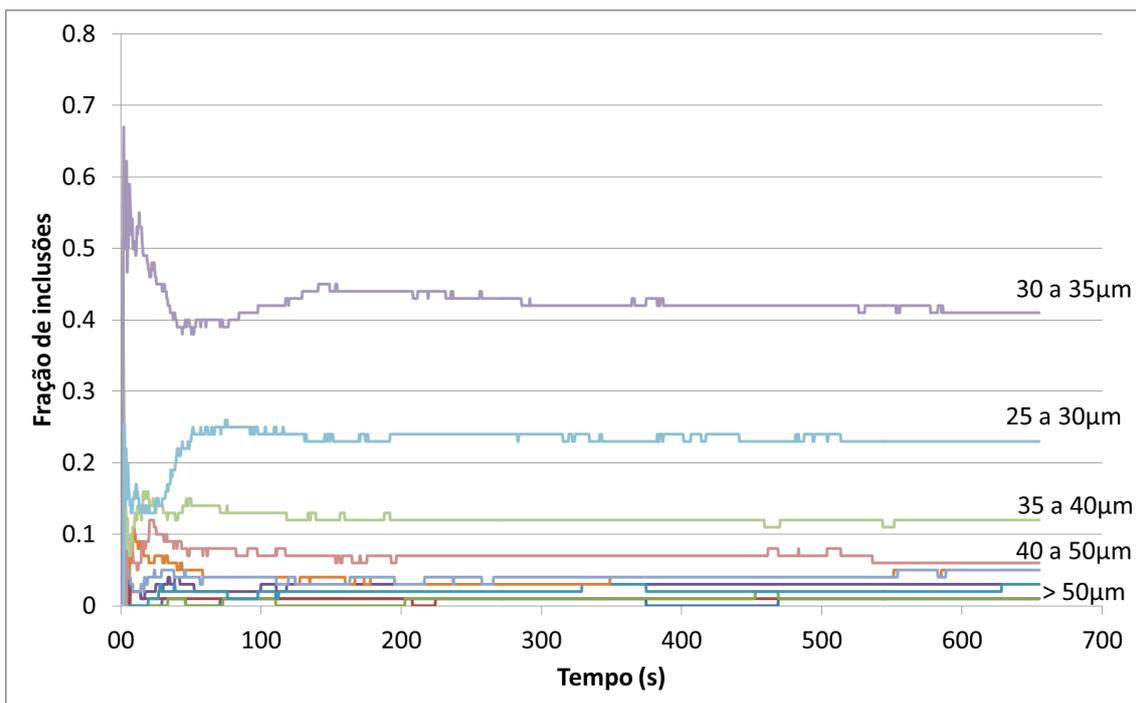


Figura 5.35 – Variação da fração volumétrica de cada tamanho de inclusões durante a drenagem da panela para o teste base

Nota-se que a maioria das partículas contadas é de menor tamanho. Por volta de 80% das partículas é menor que 50µm. Isso já é esperado, porque elas são mais difíceis de remover, pois têm velocidade de ascensão menor e ficam mais dispersas nas partes inferiores da panela.

O gráfico da figura 5.36 mostra a distribuição granulométrica acumulada final dos testes base e sua média, que será considerada para o estudo.

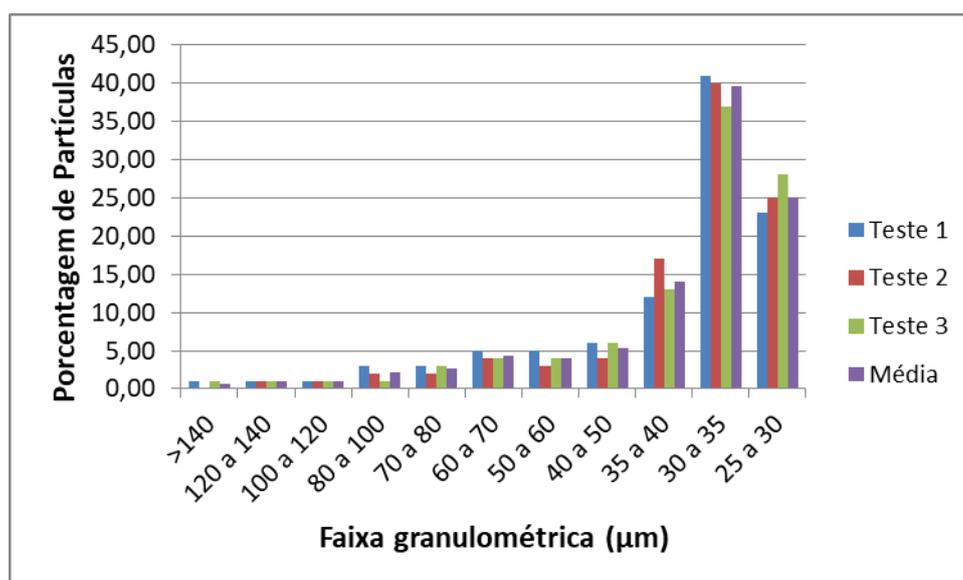


Figura 5.36 – Faixa granulométrica das inclusões detectadas pela sonda APS para os testes base e sua média

Podem-se observar no eixo das abscissas as faixas granulométricas estudadas. Estas faixas são pré-definidas pelo software da sonda APS e baseadas na extensão da medição da sonda, citada no subitem 4.2.1. Para os estudos foram usadas essas faixas para comparações.

5.8.2. Resultados dos testes

Os gráficos das figuras 5.37 e 5.38 mostram a porcentagem de remoção de inclusões (PRI) para as inclusões menores: 25 a 30 μ m, 30 a 35 μ m e 35 a 40 μ m, nas vazões de 1NL/min (5.37) e 8NL/min (5.38).

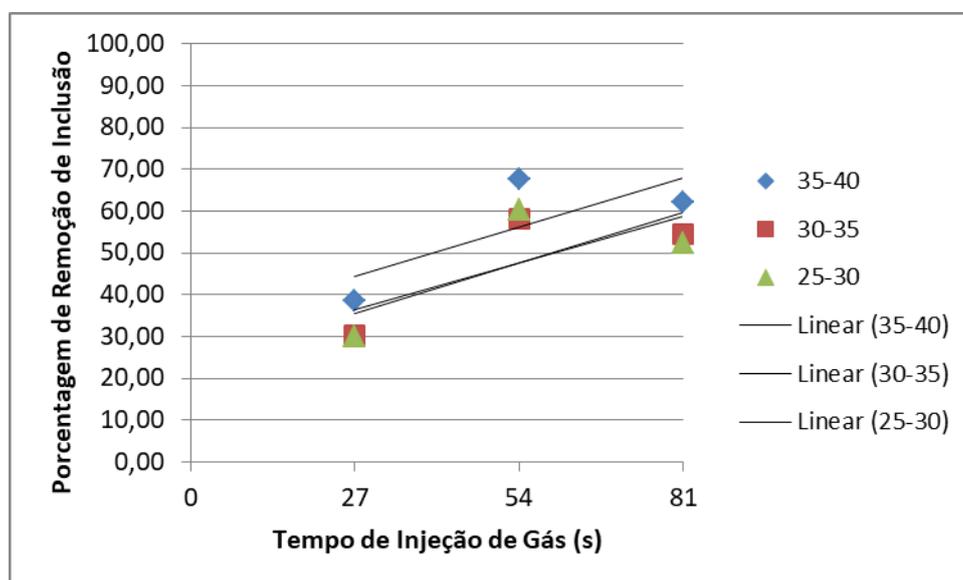


Figura 5.37 – Porcentagem de remoção de inclusões para o plugue 1 descentralizado, na vazão de 1NL/min nas menores faixas granulométricas

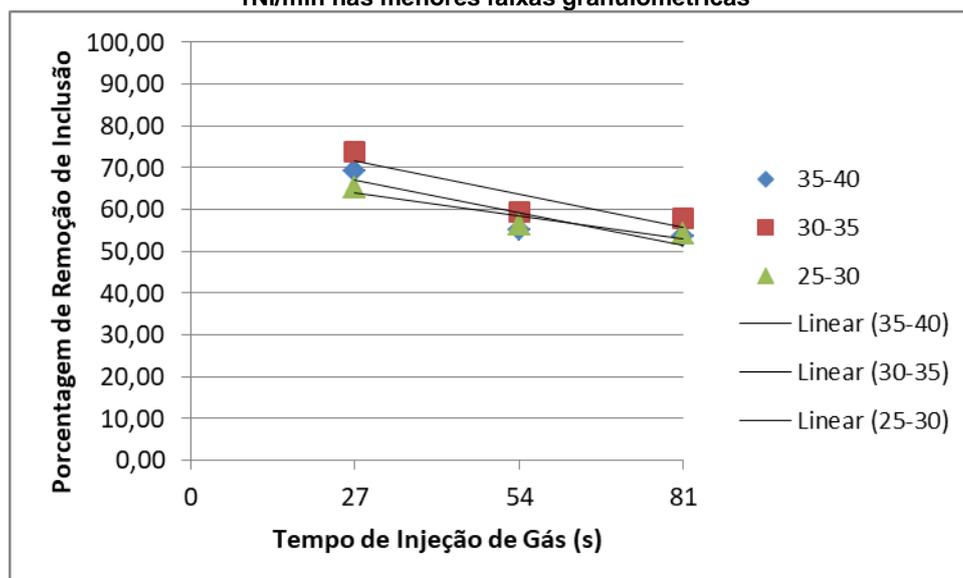


Figura 5.38 – Porcentagem de remoção de inclusões para o plugue 1 descentralizado, na vazão de 8NL/min nas menores faixas granulométricas.

Para a menor vazão de injeção de gás, quanto maior o tempo de injeção, maior será a remoção de inclusões menores. À medida que a vazão vai aumentando, essa relação inverte e quanto maior o tempo, menor a porcentagem de remoção das inclusões menores.

Como ilustrado pela tabela III.4, as inclusões menores têm velocidades de ascensão no líquido muito menores do que as inclusões maiores. A injeção de gás ajuda na remoção dessas inclusões pelo acréscimo em sua velocidade. Nos tratamentos em baixas vazões, as bolhas geradas são menores, e não geram muita turbulência. Assim, levam as inclusões para cima por diversos mecanismos, mostrados no subitem 3.2.5. Sendo assim, quanto maior o tempo de tratamento, mais inclusões serão levadas para camadas superiores, sendo removidas.

Nos testes feitos, não existe uma camada de escória para fixação das inclusões, portanto simula-se o pior cenário, em que a escória está saturada em inclusões e não as fixa mais. Dessa forma, em vazões maiores, onde as bolhas geradas são maiores e também se tem maior turbulência no banho, a remoção pelas bolhas é maior em tempos menores, pois a turbulência na parte superior da panela pode gerar a reversão dessas inclusões ao banho.

No início do tratamento, onde há maior concentração de inclusões no banho, a remoção é alta, já em tempos maiores, quando a concentração de inclusões no banho é maior na parte superior, torna-se mais fácil a reversão dessas inclusões para o banho. Inclusões menores são mais facilmente levadas pelo fluxo gerado dentro da panela. No caso de vazões maiores de gás, em que são geradas bolhas maiores, com maiores velocidades de subida, os gradientes de velocidade no banho são maiores e essas partículas tendem a ter maior velocidade de subida quando estão ascendendo ao topo da panela e também maiores velocidades de descida quando estão retornando ao banho (devido ao acréscimo de velocidade pelo fluxo das bolhas). Tornando assim, em tempos maiores, mais fácil reversão das inclusões nas partes superiores, onde estão em maior concentração.

Em relação à porcentagem de remoção de inclusões, as vazões menores em maiores tempos tendem a alcançar melhores resultados, sendo a maior PRI alcançada pela vazão de 4Nl/min no tempo de 81s.

Foram feitas as mesmas análises para os outros plugues, na posição centralizada e descentralizada. Os resultados são bastante análogos.

Os gráficos das figuras 5.39 e 5.40 mostram as porcentagens de remoção para o plugue 1, na posição descentralizada, para as maiores faixas granulométricas de inclusões.

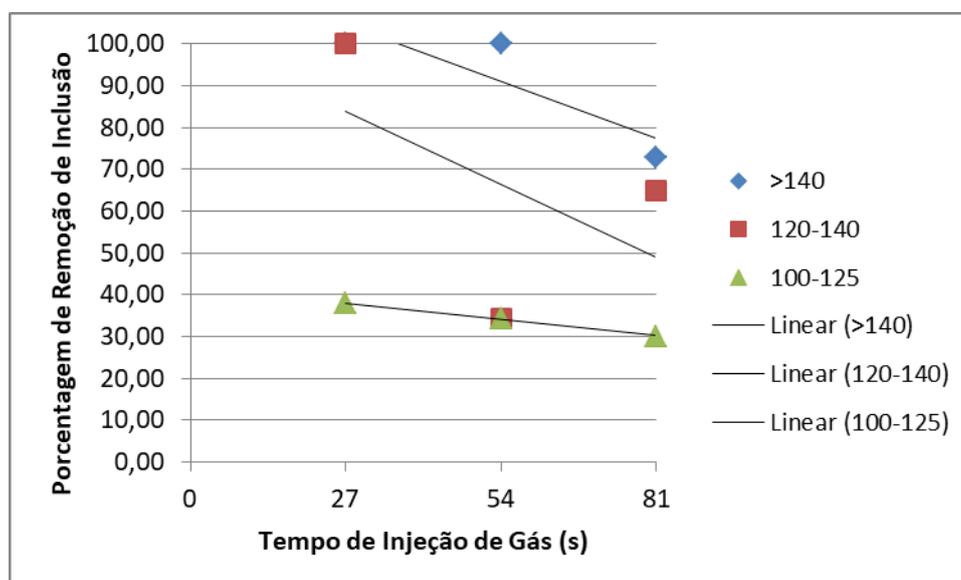


Figura 5.39 – Porcentagem de remoção de inclusões para o plugue 1 descentralizado, na vazão de 1NI/min nas maiores faixas granulométricas.

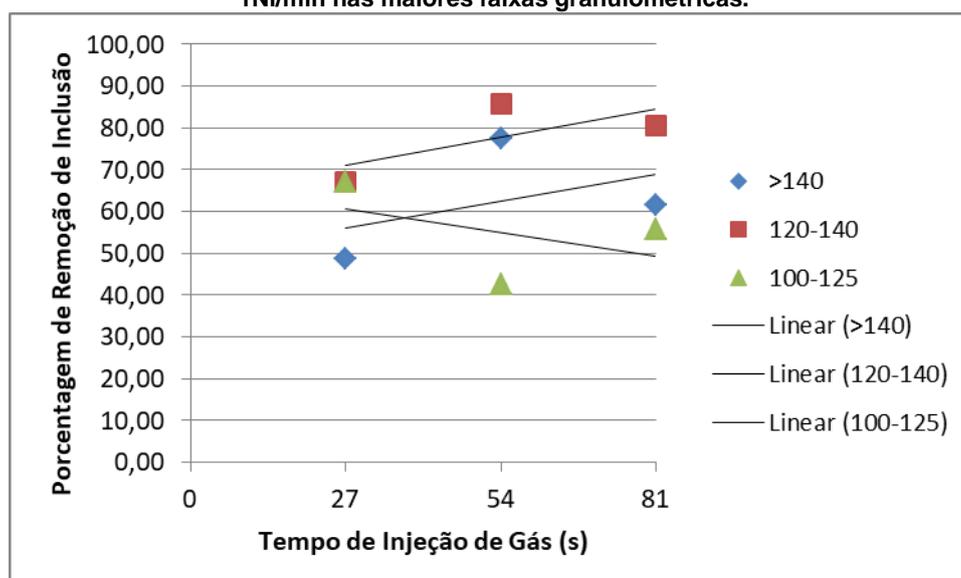


Figura 5.40 – Porcentagem de remoção de inclusões para o plugue 1 descentralizado, na vazão de 8NI/min nas maiores faixas granulométricas.

Para as inclusões de maiores tamanhos, maiores que $140\mu\text{m}$, 120 a $140\mu\text{m}$ e 100 a $125\mu\text{m}$, os resultados apresentam comportamento oposto ao verificado para inclusões menores. Em menores vazões, quanto menor o tempo, maior será a porcentagem de remoção de inclusões. Para vazões maiores, a tendência é invertida, quanto maior o tempo, maior é a porcentagem de remoção de inclusões.

Inclusões maiores tem maior facilidade para subirem no banho, como mostrado pela tabela III.4. Normalmente, estas não costumam ser um grande problema durante a

fabricação do aço, pois o tempo de residência do aço nos equipamentos normalmente é maior que o tempo para ascensão dessas inclusões.

A porcentagem de remoção de inclusões para as de maior tamanho é maior do que a porcentagem de remoção para inclusões menores. Como citado por Wang (1996) no subitem 3.2.5, inclusões maiores tem maior probabilidade de adesão em bolhas menores. Resultado também demonstrado neste trabalho. Apesar de diminuir com o tempo, a PRI para vazões menores é maior do que a PRI para vazões maiores. Quanto menor a vazão, menor será o tamanho de bolha, mostrando que bolhas menores, removem mais inclusões.

Provavelmente, pela facilidade da ascensão das inclusões maiores, em pequenos tempos de injeção de gás, chega-se a altos valores de PRI, e sendo assim, com o passar do tempo e com a probabilidade de reversão de inclusões para o banho aumentar pelo aumento da concentração de inclusões na parte superior da panela a PRI diminui. Em vazões menores, os resultados mostram que acontece exatamente isso.

Já em vazões maiores, os resultados mostram um comportamento diferente, quanto maior o tempo, maior será a PRI. Como mostrada na sessão 5.5, com o passar do tempo, a reversão de partículas se torna menor, já que o olho de escória na panela já está aberto. Sendo assim, pela facilidade de remoção das partículas maiores, em tempos menores, elas são facilmente removidas, porém nestes tempos menores, a reversão é maior, o que piora os tratamentos. Já em tempos maiores, essa reversão diminui, o que faz com que as inclusões maiores não revertam com tanta facilidade para o banho, tornando assim, os tratamentos com tempos maiores melhores para essas inclusões.

Wang et al (1996) citam que a probabilidade de colisão da bolha com inclusão aumenta com o aumento do tamanho da inclusão. Neste trabalho isso fica evidente, já que a maioria das inclusões maiores foi removida nos tratamentos, tendo assim, um melhor resultado quando comparado a inclusões menores.

Nota-se que, em geral, vazões intermediárias alcançam melhores remoções de inclusões, sendo que as maiores porcentagens de inclusões foram alcançadas para a vazão de 2NI/min no tempo de 27s.

Em comparação com inclusões menores, as maiores têm maiores velocidades de ascensão e com pouco tempo de tratamento já são removidas para as camadas superiores. As inclusões menores precisam de mais tempo de borbulhamento para serem removidas. Neste caso, quanto maior o tempo, mais as inclusões subirão na panela para serem removidas, pois têm velocidade muito pequena e o acréscimo em sua velocidade devido ao fluxo de gás ajuda a aumentar essa velocidade. Já em vazões maiores, as inclusões menores, que são mais facilmente influenciadas pelo fluxo, tendem a reverter mais e em tempos maiores o tratamento fica pior.

5.9. Análise do Diâmetro de Bolhas e Remoção de Inclusões

Em diversas referências, o diâmetro de bolha é citado como um fator muito importante na remoção das inclusões. Sendo assim, foram feitas comparações entre diâmetro de bolhas e a porcentagem de remoção de inclusões dos testes.

O diâmetro das bolhas não varia com o tempo de injeção de bolhas. Dessa forma, os testes foram separados por tempo injeção e feitas análises separadas por plugue. As figuras 5.41 e 5.42 mostram a porcentagem de remoção de inclusões em função do tamanho de bolhas para tempo de injeção de 27s e 81s para plugues na posição centralizada e na posição descentralizada.

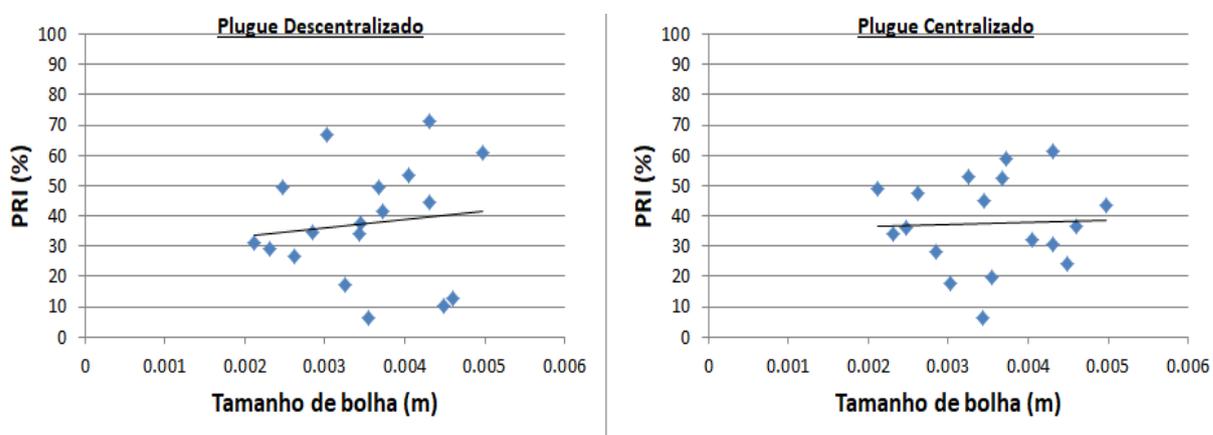


Figura 5.41 – Porcentagem de remoção de inclusões em função do tamanho de bolhas para 27 segundos de injeção no plugue descentralizado (à esquerda) e centralizado (à direita)

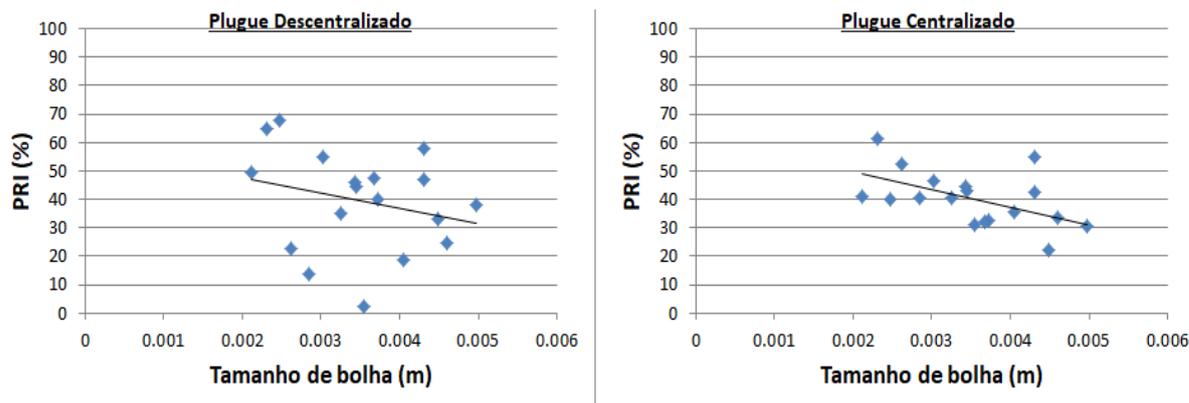


Figura 5.42 - Porcentagem de remoção de inclusões em função do tamanho de bolhas para 81 segundos de injeção no plugue descentralizado (à esquerda) e centralizado (à direita)

Nota-se que em tempos menores, há uma tendência pequena de bolhas maiores removerem mais inclusões, como mostrado na figura 5.41. Já em tempos maiores, acontece o contrário, existindo uma tendência maior de bolhas menores removerem mais inclusões.

Bolhas menores geram menor turbulência dentro da panela. Para tempos pequenos, em que a concentração de inclusões no banho é muito grande, o fenômeno da remoção ainda é muito maior do que o fenômeno da reversão, portanto, mesmo as bolhas maiores removerão muitas inclusões. Já em tempos maiores, nos quais já se removeu significativamente as inclusões, e a concentração de inclusões se torna maior nas camadas superiores da panela, a reversão passa a ser maior e bolhas menores tendem a ser melhores. Bolhas maiores têm maiores velocidades de ascensão, acelerando mais as partículas e gerando maior turbulência no banho. Essa turbulência nas partes superiores da panela aumenta a reversão das partículas.

Na figura 5.18 mostrada anteriormente é possível notar duas zonas de maior turbulência, na parte superior direita e na parte superior esquerda da panela em um perfil desenvolvido de borbulhamento. Essas zonas são as maiores responsáveis pela reversão de inclusões para o banho metálico.

6. CONCLUSOES

No presente trabalho, foi desenvolvido um modelamento físico para simulação da remoção de inclusões dentro da panela por borbulhamento de gás. Neste trabalho foram estudadas a influência da vazão e tempo de injeção de gás, área superficial e posição do plugue dentro da panela. Além disso, foram medidos os tamanhos das bolhas dentro da panela geradas pelos plugues nas diversas condições e vista a influência deste tamanho na remoção destas inclusões do aço. Também foi avaliada a remoção de inclusões levando em consideração seu tamanho.

Verificou-se que existem dois efeitos que são necessários para entendimento deste fenômeno: a ascensão e a reversão das partículas. A ascensão pode ser natural, devida à diferença de densidades do líquido e da partícula ou então pode ser induzida, pelo fluxo de gás dentro da panela. A reversão das partículas acontece quando a concentração de partículas na parte superior da panela é muito alta, e pelo próprio fluxo induzido na panela, elas descem novamente no interior da panela. A reversão também pode ser causada pela turbulência gerada nas partes superiores da panela, em que uma partícula pode ser acelerada para baixo, descendo de volta para o banho. Esses dois fenômenos foram bastante discutidos para cada caso.

A área superficial do plugue poroso apresenta grande efeito na remoção de inclusões, pois ela modifica os tamanhos, as velocidades e a quantidade de bolhas geradas. Para esta variável, quanto menor a área do plugue, menor será também a porcentagem de remoção de inclusões.

Analisada isoladamente, a vazão de gás não mostra boa correlação com a porcentagem de remoção de inclusões (PRI). Porém ao analisá-la em conjunto com a área do plugue, na forma de velocidade (Q/A), há uma melhor correlação com os resultados para PRI.

Para tempos menores, quanto maior Q/A , melhor será o tratamento. Para tempos maiores, o efeito contrário ocorre, quanto menor Q/A , maior será a PRI.

O fator Q/A tem relação direta com o tamanho da bolha. Quanto maior Q/A , maior será o tamanho da bolha. Sendo assim, bolhas maiores tendem a remover maior quantidade de inclusões em tempos pequenos, porém, com o passar do tempo, as bolhas menores tendem a ser mais eficientes. Isso é evidenciado pelo fator Q/A menor ter melhores resultados para PRI nos tempos maiores.

Como dito anteriormente, para vazões menores, os tempos menores são benéficos. Já para vazões maiores, os tempos maiores de tratamento começam a prejudicar a remoção de inclusão.

Em relação ao posicionamento do plugue, foi comparada a porcentagem de remoção de inclusões para as mesmas condições modificando apenas a posição do plugue na panela. Foi visto que não há diferenças significativas para remoção de inclusões no posicionamento do plugue poroso.

Em relação à granulometria das partículas, os resultados mostram que quanto maiores forem as inclusões, maior sua velocidade de ascensão e assim serão removidas mais facilmente. Em vazões menores, essas inclusões são facilmente removidas, precisando de pouco tempo para subirem às camadas superiores da panela. Com o passar do tempo, caso o borbulhamento continue, essas inclusões revertem ao banho metálico, tendo resultados piores.

Em vazões maiores, os resultados mostram que quanto maiores forem os tempos, maior será a PRI. Esse fato necessita de mais estudos para se descobrir sua razão.

Já para as inclusões menores, que têm menor velocidade de ascensão no aço, sua remoção é mais dificultada. Os resultados mostram que quanto menor a vazão de borbulhamento, maior será o tempo necessário para que as inclusões sejam removidas. Já em vazões maiores, essas inclusões precisam de um tempo menor para serem removidas. Essas inclusões são removidas mais lentamente e o aumento do tempo faz com que um maior número de inclusões saia. Já para vazões maiores, os gradientes de velocidades de fluxo no banho são maiores devido às altas velocidades das bolhas. Isso faz com que haja maior remoção de inclusões no início dos tratamentos, porém com o aumento da concentração de inclusões nas camadas superiores do banho, o fenômeno da reversão se torna maior, devido à maior turbulência e transferência de momentum gerado pelas bolhas maiores, que são geradas nestas vazões.

Para o tamanho das bolhas, em tempos menores, bolhas maiores tendem a ser mais efetivas na remoção de inclusões. Já em tempos maiores, as bolhas menores se tornam melhores.

Deve-se existir um balanço entre a quantidade de bolhas geradas e seu tamanho. Se a vazão for muito pequena, poucas bolhas serão geradas. Caso a vazão seja alta

demais, as bolhas começam a coalescer e ficam maiores, removendo menos inclusões. Os testes mostram que as melhores condições de trabalho são com o plugue 1 (maior área) em vazões intermediárias (2 a 6NI/min) e maior tempo de tratamento, 81 segundos. Caso a vazão seja muito pequena, poucas bolhas serão geradas, conforme mostrado na figura 5.1 e caso a vazão seja alta, as bolhas coalescerão, como mostrado a mesma imagem. Já o posicionamento do plugue é indiferente em relação à remoção de inclusões. Nas aciarias, comumente são utilizados plugues porosos descentralizados, por apresentarem menores tempos para homogeneização.

Convertendo esses valores para os valores utilizados nas usinas, os melhores resultados para remoção de inclusões foram:

- Vazão: 2,1 a 6,3 Nm³/h ou 0,19 - 0,58NI/(min.ton) de aço
- Tempo de Injeção de Gás: 180 segundos
- Posicionamento do plugue: Indiferente
- Plugue: Plugue 1 (de maior área)

7. RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

São necessários mais testes para se estudar o efeito da reversão com a abertura do olho na escória e sua diminuição com o passar do tempo.

São necessários mais testes para visualização do fluxo causado pelo borbulhamento de ar dentro da panela.

São necessários mais experimentos para melhor entendimento da formação das bolhas a partir da pressão e vazão pelos poros do plugue.

Recomenda-se aplicar equações nos modelamentos computacionais para verificação do comportamento das inclusões e formação das bolhas.

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Alexiadis, A. – Bubble Dispersion Patterns in a Bubbly-flow released from a porous plug into a gas-stirred ladle. *Applied Mathematical Modeling*, volume 31, p. 1534–1547, 2006;

Anagbo, P.E. e Brimacombe, J.K. - Plume Characterization and Liquid Circulation in Gas Injection through a Porous Plug. *Metallurgical Transactions B*, volume 21B, 1990, p. 637 – 648;

AISE Steel Foundation - The making, shaping and treating of steel, 11th edition 1998, Three Gateway Center, Pittsburgh, PA, EUA;

Bagatini, M. C. – Notas de Aula. Siderurgia II. Belo Horizonte, janeiro de 2014;

Bragança, S.R. – Corrosion of refractories used in steel metallurgy. Part III: Characterization of commercial refractories. 2013, UFRGS – DEMAT, *Cerâmica* 59, p 39-46;

Carvalho, E.; Aleixo, R. – Análise Experimental da Turbulência em Escoamentos Rápidos. 8ª Jornada de Hidráulica, Recursos Hídricos e Meio Ambiente, 2013;

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. Department of Mining and Material Engineering. Mc Gill University, Montreal, 2010;

Chang, S. et al. – Removal of Inclusion Using Micro-bubble Swarms in a Four-strand, Full-scale, Water Model Tundish. *ISIJ International*, Vol. 56, p. 1188 – 1197, 2016;

Elias, R. C. A. – Modelamento Físico e Matemático da Placa de Mistura no Lingotamento Contínuo – Efeitos de Modificadores de Fluxo no Molde. Dissertação de Mestrado – PPGEM – UFMG, 2010.

Garrison Jr, W.M. and Wojcieszynski, A.L. – A discussion on the effect of inclusion volume fraction on toughness of steel. *Materials Science and Engineering A*, Vol 464 (2007), p. 321-329;

Hassal, G., Mills, K. - Fundamental studies related to the mechanisms of inclusion removal from steel, Final Report, 1998, European Comission

Kwon, Y.; Zhang, j. e Lee, I. – A CFD-Based Nucleation-growth-removal Model for Inclusion Behavior in a Gas-agitated Ladle During Molten Steel Deoxidation. *ISIJ International*, Vol. 48, p. 891 – 900, 2008;

Lou, W.; Zhu, M. – Numerical Simulation of Inclusion Behavior and Mixing Phenomena in Gas-stirred Ladles with Different Arrangement of Tuyeres. *ISIJ International*, Vol. 54, No 1, p. 9 - 18, 2014;

Maia, B. T. – Modelamento Físico e Matemático do Escoamento de Fluidos nos Processos BOF e EOF. Tese de Doutorado - PPGEM – UFMG, 2013;

Marcon, L. – Estudo da Evolução das inclusões do Aço SAE 8620 com o tratamento de inclusões com cálcio em escala laboratorial. Porto Alegre, UFRGS – PPGEM - Dissertação de mestrado, 2007;

Nascimento, R. P. – Remoção de Inclusões Não-metálicas do Aço Líquido Através do Borbulhamento de Argônio pelo Fundo do Distribuidor de Lingotamento Contínuo da Arcelor Mittal Tubarão. Dissertação de mestrado, REDEMAT, 2008;

Mazumdar, D.; Evans. J. W. – Modeling of Steelmaking Processes. CRS Press, Nova York, 2010;

Park, J., Jung, I., Lee, H. - Dissolution behavior of Al_2O_3 and MgO inclusions in the $CaO-Al_2O_3-SiO_2$ slags: formation of ring-like structure of $MgAl_2O_4$ and Ca_2SiO_4 around MgO inclusions. *ISIJ International*, Vol 46 (2006), No. 11, p. 1626-1634;

Payandeh, Y., Soltanieh, M. – Oxide Inclusions at different steps of steel production. *Journal of Iron and Steel Research, International*, 2007, p. 39-46;

Sahai, Y.; Emi, T. – Criteria for Water Modeling of Melt Flow and Inclusion Removal in Continuous Casting Tundishes. *ISIJ International*, Vol 36, No 9, p. 1166 - 1173, 1996;

Söder, M. – Growth and Removal of Inclusion During Ladle Stirring. Tese de Licenciatura. Royal Institute of Metallurgy, Divisão de Metalurgia, Estocolmo, 2001;

Thomas, B. G.; Dennisov, A. e Bai, H. – Behavior of Argon Bubbles During Continuous Casting of Steel. ISS 80th Steelmaking Conference, Chicago, p. 1 – 10, 1997;

Van Ende, M. A. – Formation and Morphology of non-Metallic Inclusions in Aluminium Killed Steel, Tese de Doutorado, Université Catholique de Louvain, Bélgica, janeiro de 2010;

Wang, L.et. al. - Prediction of the Optimum Bubble Size for Inclusion Removal from Molten Steel by Flotation. ISIJ International, vol 36, No 1, p. 7 - 16, 1996;

Yang, H. L. et al. – Removal Behavior of Inclusion in Molten Steel by Bubble Wake Flow Based on Water Model Experiment. ISIJ International, vol 54, No 3, p. 578 – 581, 2014;

Yuan, F. et Al. – Numerical Simulation of Al_2O_3 deposition at a nozzle during continuous casting. Journal of University of Science and Technology Beijing. Vol 15, No 3, p 227, 2008;

Zhang, L. – Inclusion and Bubble in Steel – A Review. Journal of Iron and Steel Research International, Volume 13, p. 1 – 8, 2006.

ANEXO A

DESENVOLVIMENTO DAS EQUAÇÕES DO MODELAMENTO FÍSICO

1 – O porquê do modelamento físico em escala não atender ao critério de Reynolds e Froude.

Critério de Reynolds

$$\left(\frac{U.L}{\nu}\right)_{mod} = \left(\frac{U.L}{\nu}\right)_{prot} \quad ; \quad \nu_{aço}(1600^{\circ}C) = \nu_{água}(25^{\circ}C)$$

$$(U.L)_{prot} = (U.L)_{mod} \quad ; \quad L(mod) = L(prot).\lambda$$

$$U_{prot} = U_{mod}.\lambda$$

Critério de Froude

$$\left(\frac{U^2}{g.L}\right)_{mod} = \left(\frac{U^2}{g.L}\right)_{prot} \quad ; \quad L(mod) = L(prot).\lambda$$

$$U^2_{prot}.\lambda = U^2_{mod}$$

$$U_{prot} = U_{mod}.\lambda^{-0,5}$$

Ou seja, os dois critérios apresentam velocidades diferentes, não sendo possível atendê-los ao mesmo tempo.

2 – A escolha de Froude como critério.

Sabe-se que:

$$Re = \frac{F_I}{F_V}$$

Porém como as viscosidades na siderurgia são da ordem de 1.10^{-6} , “Re” tem sempre um valor alto, da ordem de 1.104.

Tornando a equação da forma:

$$1.10^4 F_V = F_I$$

Assim, obtém-se:

$$Fr = \frac{F_I}{F_G}$$

O valor de “Fr” depende apenas da gravidade, diâmetro característico e velocidade, obtendo-se valores até 1000 vezes menores que “Re”. Portanto temos “Fr” da ordem de 1.101.

$$1.10^1 F_G = F_I$$

Isso mostra, que em relação às forças de inércia, a força gravitacional tem um papel muito mais importante, sendo até mil vezes maiores que as forças viscosas. Portanto, o critério de Froude é preferível ao critério de Reynolds.

3 – Desenvolvimento das equações para velocidade, tempo, vazão e diâmetro de inclusões no modelamento na panela pelo critério de Froude.

Velocidade

$$\left(\frac{U^2}{g.L}\right)_{mod} = \left(\frac{U^2}{g.L}\right)_{prot} \quad ; \quad L(mod) = L(prot).\lambda$$

$$U^2_{prot} \cdot \lambda = U^2_{mod}$$

$$U_{mod} = U_{prot} \cdot \lambda^{0,5} \quad ;$$

Vazão

$$Q = U.A \quad ; \quad A = \pi L^2/4$$

$$\lambda^{0,5} = \frac{\frac{Q_{mod}}{A_{mod}}}{\frac{Q_{prot}}{A_{prot}}} = \frac{Q_{mod} \cdot A_{prot}}{Q_{prot} \cdot A_{mod}} = \frac{Q_{mod} \cdot L_{prot}^2}{Q_{prot} \cdot L_{mod}^2} \quad ; \quad L(mod) = L(prot).\lambda$$

$$Q_{mod} = Q_{prot} \cdot \lambda^{2,5} \quad ;$$

Tempo

$$U_{mod} = U_{prot} \cdot \lambda^{0,5} \quad ; \quad U = L/t$$

$$\left(\frac{L}{t}\right)_{mod} = \left(\frac{L}{t}\right)_{prot} \cdot \lambda^{0,5} \quad ; \quad L(mod) = L(prot) \cdot \lambda$$

$$t_{mod} = t_{prot} \cdot \lambda^{0,5} \quad ;$$

Diâmetro da Inclusão

Considerando as inclusões como esferas que se comportam como partículas de Stokes, temos que as inclusões se movimentam no protótipo e na panela na mesma proporção que o fluido se movimenta no protótipo e na panela, da forma:

$$\frac{U_{fluido,mod}}{U_{fluido,prot}} = \frac{U_{part,mod}}{U_{part,prot}} \quad ; \quad U_{mod} = U_{prot} \cdot \lambda^{0,5}$$

$$\frac{U_{fluido,mod}}{U_{fluido,prot}} = \frac{U_{part,mod}}{U_{part,prot}} = \lambda^{0,5}$$

$$U_{part,mod} = \frac{2 \cdot R_{part,mod}^2 \cdot g \cdot (\rho_{agua} - \rho_{part,mod})}{9 \cdot \mu_{agua}}$$

$$U_{part,prot} = \frac{2 \cdot R_{part,prot}^2 \cdot g \cdot (\rho_{aço} - \rho_{part,prot})}{9 \cdot \mu_{aço}}$$

Assumindo que a viscosidade cinemática do aço (1600°C) e da água (25°C) são praticamente os mesmo, pode-se afirmar que

$$\frac{U_{fluido,mod}}{U_{fluido,prot}} = \frac{R_{part,mod}^2 \cdot \left(1 - \frac{\rho_{part,mod}}{\rho_{agua}}\right)}{R_{part,prot}^2 \cdot \left(1 - \frac{\rho_{part,prot}}{\rho_{aço}}\right)} = \lambda^{0,5}$$

Sendo assim, tem-se que a razão entre os raios das partículas é:

$$R_{part,mod} = R_{part,prot} \cdot \lambda^{0,25} \left[\frac{1 - \frac{\rho_{part,prot}}{\rho_{aço}}}{1 - \frac{\rho_{part,mod}}{\rho_{agua}}} \right]^{0,5}$$

No caso da razão entre as densidades das partículas na água e no aço serem mesma, da forma:

$$\frac{\rho_{part,mod}}{\rho_{\acute{a}gua}} = \frac{\rho_{part,prot}}{\rho_{a\grave{c}o}}$$

Essa relação entre os raios torna-se:

$$\frac{R_{part,mod}^2}{R_{part,prot}^2} = \frac{D_{part,mod}^2}{D_{part,prot}^2} = \lambda^{0,5}$$

E assim:

$$D_{part,mod} = D_{part,prot} \cdot \lambda^{0,25}$$

4 – Desenvolvimento da equação para conversão de Nm³ para m³.

Considerando os gases injetados como gases ideais, seguindo a lei:

$$P \cdot V = n \cdot R \cdot T$$

$$\frac{V_{ind} \left(\frac{Nm^3}{h} \right)}{V_{ind} \left(\frac{m^3}{h} \right)} \cdot \frac{101330}{(101330 + \rho_{a\grave{c}o} \cdot g \cdot \frac{H_{a\grave{c}o}}{2})} = \frac{n \cdot R \cdot 273}{n \cdot R \cdot T_{a\grave{c}o}}$$

$$V_{ind} \left(\frac{m^3}{h} \right) = V_{ind} \left(\frac{Nm^3}{h} \right) \cdot \frac{T_{a\grave{c}o}}{273} \cdot \frac{101330}{(101330 + \rho_{a\grave{c}o} \cdot g \cdot \frac{H_{a\grave{c}o,panela}}{2})}$$