

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

ANA CAROLINA RIBEIRO DAL BOSCO

Quantificação da remoção de inclusões através do balanço mássico em um
distribuidor de lingotamento contínuo de aços longos

Porto Alegre
2023

ANA CAROLINA RIBEIRO DAL BOSCO

Quantificação da remoção de inclusões através do balanço mássico em um distribuidor de lingotamento contínuo de aços longos

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

Orientador: Prof. Dr. Wagner Viana Bielefeldt

Porto Alegre

2023

ANA CAROLINA RIBEIRO DAL BOSCO

Quantificação da remoção de inclusões através do balanço mássico em um distribuidor de lingotamento contínuo de aços longos

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

Orientador: Prof. Dr. Wagner Viana Bielefeldt

Aprovado em: ___/___/___

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Dr. _____

Prof. Dr. _____

Prof. Dr. _____

AGRADECIMENTOS

Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e Materiais - PPGE3M pela oportunidade de realização de trabalhos em minha área de pesquisa.

Ao meu orientador, Wagner Viana Bielefeldt, pela orientação e pelos conhecimentos a mim transmitidos durante esse período e apoio na revisão deste trabalho.

Aos colegas Arthur Munch e Victor Goldschmidt, bolsistas de iniciação científica, pelo auxílio nas tarefas desenvolvidas durante o trabalho.

Ao CNPq e à UFRGS pela provisão da bolsa de mestrado.

RESUMO

As inclusões não metálicas são decorrentes do processo de fabricação do aço, desta forma, o estudo do tamanho e distribuição das inclusões no aço líquido é essencial para aprimorar o grau de limpidez e por consequência, a qualidade dos aços. Com o intuito de otimizar processos e a qualidade dos aços na indústria siderúrgica é necessário o estudo das inclusões óxidas e das interações destas com a escória durante o processo de lingotamento contínuo de aços. Modelos físicos são amplamente utilizados, pois estudos na planta são inviabilizados pelo custo e pelo risco de segurança em função das altas temperaturas. O objetivo deste trabalho é avaliar a remoção de inclusões por meio da quantificação de inclusões através do balanço mássico de inclusões passantes e não passantes pelo veio de um distribuidor de lingotamento contínuo de aços longos. Os resultados médios dos ensaios demonstraram que, para uma configuração em regime permanente, em função das velocidades de lingotamento de 0,69 m/min; 0,77 m/min e 0,86 m/min, obteve-se os valores médios de 0,99%; 0,90% e 0,45% de inclusões passantes para o veio lateral e 0,31%, 0,21% e 0,11% de inclusões passantes para o veio central, para as respectivas velocidades mencionadas. De acordo com os resultados gerais, em função das velocidades de lingotamento de 0,69 m/min; 0,77 m/min e 0,86 m/min, o resultado médio total para os ensaios foi de 0,65%; 0,55% e 0,28% de inclusões passantes pelo veio, respectivamente, o que é favorável para remoção de inclusões. Na faixa de até 250 μm de diâmetro da partícula, o fluxo da partícula satisfaz a lei de Stokes, já para a faixa de diâmetro de 500 μm da partícula, o fluxo da partícula satisfaz o adimensional de Reynolds, onde houve maior evidência de forças de inércia e maior percentual de partículas passantes para essa faixa.

Palavras-chave: Balanço de Massa, Remoção de inclusões, Modelagem física.

ABSTRACT

Non-metallic inclusions are a result of the steelmaking process, so studying the size and distribution of inclusions in liquid steel is essential for improving the degree of clarity and, consequently, the quality of steel. In order to optimize processes and steel quality in the steel industry, it is necessary to study oxide inclusions and their interactions with slag during the continuous casting process. Physical models are widely used, as in-plant studies are unfeasible due to the cost and safety risks posed by the high temperatures. The aim of this work is to evaluate the removal of inclusions by quantifying inclusions through the mass balance of inclusions passing and not passing through the shaft of a long steel continuous casting distributor. The average results of the tests showed that, for a configuration in permanent regime, as a function of the casting speeds of 0.69 m/min, 0.77 m/min and 0.86 m/min, the average values of 0.99%, 0.90% and 0.45% of inclusions passing through the side shaft and 0.31%, 0.21% and 0.11% of inclusions passing through the central shaft were obtained for the respective speeds mentioned. According to the general results, at casting speeds of 0.69 m/min, 0.77 m/min and 0.86 m/min, the total average result for the tests was 0.65%, 0.55% and 0.28% of inclusions passing through the shaft, respectively, which is favorable for removing inclusions. In the range up to 250 μm particle diameter, the particle flow satisfies Stokes' law, while for the 500 μm particle diameter range, the particle flow satisfies Reynolds' dimensionless, where there was greater evidence of inertial forces and a higher percentage of particles passing through this range.

Keywords: Mass balance; Removal of inclusions; Physical modeling.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Representação ilustrativa do processo de lingotamento contínuo de aços (exemplo para aços planos).....	15
Figura 2 - Representação das zonas de fluxo no distribuidor	17
Figura 3 - Curva padrão de DTR para um distribuidor de lingotamento contínuo...19	
Figura 4 - Relação entre modelo e protótipo de inclusões para diferentes massas específicas de partículas	23
Figura 5 - Vista frontal do modelo físico.....	38
Figura 6 - Vista lateral do modelo físico.....	39
Figura 7 - Vista Superior do modelo físico.....	39
Figura 8 - Polietileno de alta densidade em peneira metálica.....	39
Figura 9 - Modelo físico do distribuidor do laboratório de siderurgia	40
Figura 10 - Seringa para inserção das partículas no modelo físico.....	41
Figura 11 - Partículas passantes nos veios de saída do modelo físico do distribuidor.....	43
Figura 12-Secagem de partículas passantes na estufa	43
Figura 13 - Pesagem das partículas secas no filtro de saída do distribuidor.....	44
Figura 14 - Análise das partículas no granulômetro Cilas 1190	44
Figura 15 - Orientação das partículas nos eixos de simetria	55
Figura 16 - Mapas de contorno de velocidade do fluido de inclusões em estado estacionário com raios de 10, 100 e 1000 μm	57
Figura 17 - Medidas do modelo físico do distribuidor nas vistas frontal, lateral e superior.....	68

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Propriedades da água e do aço.....	20
Tabela 2 - Composição mássica de entrada em função do diâmetro da partícula...	40
Tabela 3 - Resultados das porcentagens de inclusões passantes do ensaio de remoção de inclusões	44
Tabela 4 - Composição mássica de inclusões passantes em função das velocidades de lingotamento.....	45
Tabela 5 - Composição percentual média de inclusões passantes em função do diâmetro da partícula	46
Tabela 6 - Equivalência de saída do teor de alumina em relação ao polietileno de alta densidade.....	50
Tabela 7 - Velocidade da partícula em função do diâmetro para o modelo físico.....	51
Tabela 8 - Velocidade da partícula em função do diâmetro para a indústria.....	51
Tabela 9 - O número de Reynolds em função do diâmetro da partícula no modelo físico.....	54
Tabela 10 - O número de Reynolds em função do diâmetro da partícula na indústria.....	54

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	11
2 OBJETIVOS	14
2.1 OBJETIVO GERAL.....	14
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	14
3 REVISÃO DA LITERATURA	15
3.1 ZONAS DE FLUXO DO AÇO NO DISTRIBUIDOR.....	16
3.2 CURVAS DE DISTRIBUIÇÃO DE TEMPOS DE RESIDÊNCIA (DTR).....	17
3.3 CRITÉRIOS DA MODELAGEM FÍSICA NO DISTRIBUIDOR.....	19
3.4 CRITÉRIOS DE SIMILARIDADE DE INCLUSÕES PARA SIMULAÇÃO EM MODELO FÍSICO.....	21
3.5 CRITÉRIOS DE COMPORTAMENTO DE INCLUSÕES NO DISTRIBUIDOR.....	23
3.6 MÉTODOS EMPREGADOS PARA QUANTIFICAR INCLUSÕES NÃO FLOTANTES..	25
3.7 MÉTODOS EMPREGADOS PARA REMOÇÃO E QUANTIFICAÇÃO DE INCLUSÕES FLOTANTES.....	27
3.8 PRINCÍPIOS E MÉTODOS DE CÁLCULO DE BALANÇO DE MASSAS.....	29
3.8.1 Definições para operações de balanço de massas.....	30
3.8.2 Equações de balanço de massas.....	30
3.8.3 Balanço de massas metalúrgicos para sistemas diversos.....	32
4 METODOLOGIA	38
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO	46
5.1 RAZÃO RESIDUAL DE INCLUSÕES PASSANTES.....	46
5.2 COMPOSIÇÃO MÁSSICA DE INCLUSÕES PASSANTES.....	47
5.3 COMPOSIÇÃO MÉDIA DE INCLUSÕES PASSANTES.....	48
5.4 CONVERSÃO DE RESULTADOS DO MODELO FÍSICO PARA O MODELO INDUSTRIAL.....	50
6 DISCUSSÃO	52
CONCLUSÕES	59
SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	59
REFERÊNCIAS	61
APÊNDICE A - Medidas do modelo físico do distribuidor	68
APÊNDICE B - Distribuição granulométrica de inclusões passantes para a velocidade de lingotamento de 0,69 m/min do veio lateral do ensaio I	69
APÊNDICE C - Distribuição granulométrica de inclusões passantes para a velocidade de lingotamento de 0,69 m/min do veio central do ensaio I	70
APÊNDICE D - Distribuição granulométrica de inclusões passantes para a velocidade de lingotamento de 0,69 m/min do veio lateral do ensaio II	71
APÊNDICE E - Distribuição granulométrica de inclusões passantes para a velocidade de lingotamento de 0,69 m/min do veio central do ensaio II	72
APÊNDICE F - Distribuição granulométrica de inclusões passantes para a velocidade de lingotamento de 0,69 m/min do veio lateral do ensaio III	73
APÊNDICE G - Distribuição granulométrica de inclusões passantes para a velocidade de lingotamento de 0,69 m/min do veio central do ensaio III	74
APÊNDICE H - Distribuição granulométrica de inclusões passantes para a velocidade	

de lingotamento de 0,77 m/min do veio lateral do ensaio I.....	75
APÊNDICE I - Distribuição granulométrica de inclusões passantes para a velocidade de lingotamento de 0,77 m/min do veio central do ensaio I.....	76
APÊNDICE J- Distribuição granulométrica de inclusões passantes para a velocidade de lingotamento de 0,77 m/min do veio lateral do ensaio II.....	77
APÊNDICE K - Distribuição granulométrica de inclusões passantes para a velocidade de lingotamento de 0,77 m/min do veio central do ensaio II.....	78
APÊNDICE L - Distribuição granulométrica de inclusões passantes para a velocidade de lingotamento de 0,77 m/min do veio lateral do ensaio III.....	79
APÊNDICE M- Distribuição granulométrica de inclusões passantes para a velocidade de lingotamento de 0,77 m/min do veio central do ensaio III.....	80
APÊNDICE N - Distribuição granulométrica de inclusões passantes para a velocidade de lingotamento de 0,86 m/min do veio lateral do ensaio I.....	81
APÊNDICE O - Distribuição granulométrica de inclusões passantes para a velocidade de lingotamento de 0,86 m/min do veio central do ensaio I.....	82
APÊNDICE P- Distribuição granulométrica de inclusões passantes para a velocidade de lingotamento de 0,86 m/min do veio lateral do ensaio II.....	83
APÊNDICE Q - Distribuição granulométrica de inclusões passantes para a velocidade de lingotamento de 0,86 m/min do veio central do ensaio II.....	84
APÊNDICE R - Distribuição granulométrica de inclusões passantes para a velocidade de lingotamento de 0,86 m/min do veio lateral do ensaio III.....	85
APÊNDICE S - Distribuição granulométrica de inclusões passantes para a velocidade de lingotamento de 0,86 m/min do veio central do ensaio III.....	86

1 INTRODUÇÃO

As inclusões não metálicas são inerentes ao processo de fabricação de aços. As inclusões são partículas não-metálicas presentes na matriz de ligas e metais, sendo definidas pelo tamanho em macro-inclusões ou micro-inclusões. A redução do número e do tamanho destas é um grande desafio para a indústria siderúrgica, principalmente no caso de aços conhecidos como aços limpos. A melhoria nas técnicas de avaliação da qualidade, a necessidade do aumento da qualidade dos aços e a elevada competitividade do mercado faz com que se busque produzir aços cada vez mais limpos com melhor capacidade de trabalho, podendo ser empregados em diferentes produtos com alta necessidade de resistência mecânica e química.

Inclusões não metálicas são nocivas à qualidade do aço e podem afetar as suas propriedades químicas e mecânicas, como a resistência à corrosão, a fadiga e a usinabilidade, exigindo estudos sobre os fatores de sua formação e crescimento. As inclusões não metálicas podem ser endógenas ou exógenas, sendo as primeiras oriundas do processo de fabricação do aço (resultantes de produtos de desoxidação ou dessulfuração, como Al_2O_3 e SiO_2) e as exógenas resultantes de eventos transientes ligados ao processo de fabricação, como por exemplo, arraste de escória ou pedaços de refratários (KUMAR et al., 2023).

Aços limpos referem-se aos aços com maior limpeza inclusionária. Devido ao seu efeito prejudicial ao aço, as macro-inclusões devem ser eliminadas, já as micro-inclusões podem gerar alguns efeitos benéficos para o aço, como aumentar o limite de dureza e escoamento, agir como núcleos para precipitação de nitretos e carbeto, e restringir o tamanho do grão (GUEDES, 2017).

As inclusões são geralmente partículas de sulfetos (por exemplo FeS, MnS), óxidos (por exemplo Al_2O_3) e nitretos, sendo de tamanho submicroscópico. Apesar de métodos que visem impedir a incorporação de inclusões no aço, o mesmo não é capaz de ser totalmente livre de inclusões, tendo quantidade estimada entre 10^{10} e 10^{15} inclusões por tonelada de aço (KUMAR et al., 2023).

A determinação para o tamanho das inclusões não é estabelecida como regra, pois as delimitações são variáveis na literatura. Alguns autores especificaram o tamanho de inclusões para cada classificação, tal como Chiaverini (1996) que classifica as micro inclusões de usina como aquelas que apresentam diâmetro entre

10 μm e 50 μm e as macro inclusões como aquelas que apresentam diâmetro superior à 75 μm , já Liu e coautores (2021) classificam as micro inclusões de usina como aquelas que apresentam diâmetro de até 100 μm . Costa e Silva, 2019, cita que a inclusão é definida como macro se for grande o suficiente para ocasionar falha imediata do produto durante o processamento ou uso, sendo todas as outras inclusões categorizadas como micro inclusões.

Continuamente busca-se desenvolver métodos em modelos físicos para quantificar as inclusões presentes no banho e passantes no distribuidor de lingotamento contínuo, debatendo-se o melhor material empregado para a simulação das inclusões e o modo de quantificá-las. A quantificação de inclusões passantes e não passantes permite avaliar o desempenho operacional do distribuidor de lingotamento contínuo. Por meio da modelagem física, é possível simular processos e analisar as variáveis em ambiente controlado. O Laboratório de Siderurgia –LaSid/UFRGS dispõe de um modelo físico de um distribuidor, em escala 1:1, que utiliza a água como fluido de simulação e polietileno de alta densidade como particulado para simular as inclusões.

Devido a massa específica de um tipo de inclusão não metálica ser cerca de metade da massa específica do aço líquido, essas inclusões podem ser removidas por mecanismos de flotação e subsequente captura pela camada de escória. Continuamente busca-se desenvolver métodos em modelos físicos para quantificar as inclusões presentes no banho e passantes no distribuidor de lingotamento contínuo, discutindo-se o melhor material empregado para a simulação das inclusões e o modo de quantificá-las.

A quantificação de inclusões passantes e não passantes permite avaliar o desempenho operacional do distribuidor de lingotamento contínuo. Por meio da modelagem física, é possível ensaiar alterações no processo e analisar as variáveis em um ambiente controlado. O modelo físico do distribuidor, utilizado neste trabalho, em escala 1:1, utiliza a água como fluido de simulação e polietileno de alta densidade como particulado.

Desta forma, o objetivo deste trabalho é quantificar as inclusões passantes e não passantes em função da variação da velocidade, em um modelo físico de distribuidor de lingotamento contínuo de aços longos para avaliação do desempenho operacional do distribuidor, de forma a se obter subsídios para o auxílio da limpeza inclusionária e melhor desempenho na produção de aços limpos.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

O objetivo geral deste trabalho é avaliar a remoção de inclusões por meio da quantificação destas através do balanço mássico de partículas passantes e não passantes pelo veio de um distribuidor de lingotamento contínuo de aços longos.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Os objetivos específicos deste trabalho são:

Quantificar as inclusões não-flotantes no modelo físico do distribuidor por meio do ensaio de remoção de inclusões, através da pesagem da massa das inclusões nos veios de saída do modelo físico do distribuidor;

Determinar o balanço mássico de inclusões em função das velocidades de lingotamento de 0,69 m/min; 0,77 m/min e 0,86 m/min;

Avaliar a remoção de partículas, em função das faixas de diâmetro de partícula de polietileno distribuídas em 500 μm , 250 μm , 180 μm , 75 μm e 38 μm ; através da análise granulométrica no granulômetro Cilas 1190;

Estabelecer hipóteses, com base na literatura, para avaliar a remoção de partículas como função do seu diâmetro.

3 REVISÃO DA LITERATURA

O processo de lingotamento contínuo proporciona uma produção de aço de maneira contínua e sequencial, gerando maior produtividade, maior qualidade de produto e economia de energia. De acordo com a World Steel Association, o lingotamento contínuo tornou-se o principal processo empregado na solidificação de aço pelas empresas siderúrgicas mundiais, representando 94,8% no ano de 2022.

O lingotamento contínuo é um processo de transferência de calor, em que o aço líquido é transformado em produto sólido semi-acabado, via solidificação para posterior processamento na laminação. Os produtos de lingotamento contínuo são divididos em barras redondas (de 127mm a 900mm de diâmetro), blocos (secção retangular de várias dimensões), placas (0,25mm a 400mm de espessura e largura entre 600mm e 2500 mm) e em tarugos (secção quadrada de 100mm a 180mm) (AMORIN, 2018).

O distribuidor, no processo de lingotamento contínuo de aços, é um reator intermediário entre a panela e o molde, que atua como reservatório para proporcionar as trocas de panelas e distribuir o aço para um ou mais veios de saída (moldes), conforme representado na figura 1 (ALVES, 2014).

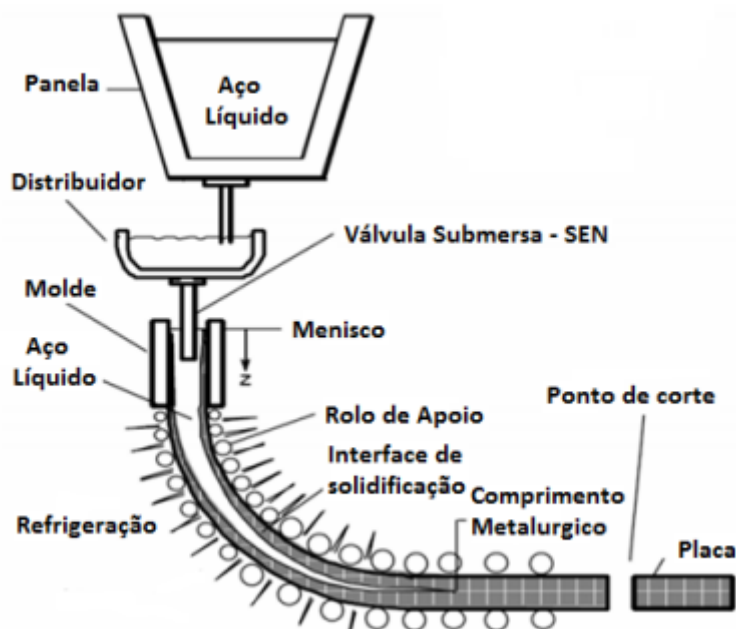


Figura 1 - Representação ilustrativa do processo de lingotamento contínuo de aços (exemplo para aços planos)(ARRUDA, 2015).

O distribuidor é essencial para o auxílio de remoção de inclusões não-metálicas e homogeneização térmica do aço. O fluxo do aço no distribuidor deve direcionar as inclusões para a camada sobrenadante do aço, com determinado nível de turbulência, evitando ao mesmo tempo, emulsificação e arraste de novas inclusões. Desta forma, favorecendo a flotação das inclusões não metálicas e, conseqüentemente, aumentando a limpidez inclusionária das placas produzidas (ALVES, 2014).

3.1 ZONAS DE FLUXO DO AÇO NO DISTRIBUIDOR

Para compreender o processo de limpidez inclusionária do aço líquido, é necessário conhecer o fluxo de aço dentro do distribuidor. Ananias (2019), cita que há três tipos de zonas de fluxos no distribuidor: zona de fluxo pistonado, zona de mistura perfeita e zona de volume morto.

A zona de fluxo pistonado é a área do distribuidor onde o fluxo do aço irá se mover praticamente com a mesma velocidade, apresentando um tempo mínimo de residência, e conseqüentemente, sendo a fração que representa a condição ideal para flotação das inclusões no distribuidor. A zona de mistura perfeita é a região com maior turbulência, tendendo a ser mais homogênea, auxiliando na redução dos gradientes de temperatura e de composição química no metal líquido. Entretanto, devido a turbulência, pode ocasionar o arraste de partículas não metálicas para dentro do aço líquido, distúrbios na ascensão das partículas não metálicas e o aumento da taxa de reoxidação no metal líquido (CAMPOS, 2019).

A zona de volume morto é a área que se caracteriza por possuir baixa velocidade, ocasionando a estagnação do volume de aço líquido. Esta zona, além de reduzir o volume útil do distribuidor, desfavorece a remoção de inclusões, provoca segregação de elementos químicos e diminuição da temperatura do aço líquido (ALVES E TAVARES, 2014). Wollmann (1999) menciona que, além das zonas estabelecidas, existe outra zona de fluxo designada de “curto circuito”. Nesta região, o fluxo de aço entra e sai do distribuidor de forma rápida, dificultando a ascensão e permanência das inclusões na camada sobrenadante do fluido, até mesmo inclusões de grande diâmetro. Esta zona é indesejável pois reduz o tempo de residência do aço líquido no distribuidor, acarretando na transferência das inclusões do distribuidor para o molde.

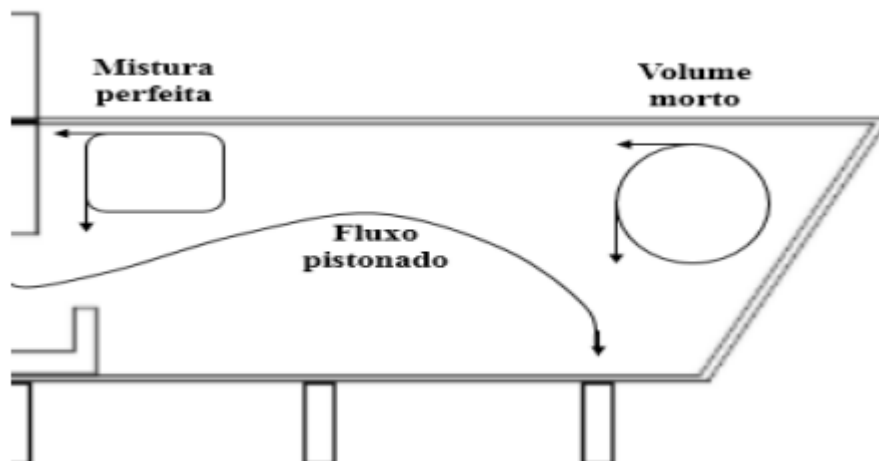


Figura 2 - Representação das zonas de fluxo no distribuidor (CAMPOS, 2019)

A divisão das zonas de fluxo do aço líquido é utilizada para analisar o escoamento interno do distribuidor em estado estacionário, para diversas configurações de distribuidor. A ascensão das inclusões para camada sobrenadante, reoxidação das inclusões no banho e a perda térmica do aço líquido são fatores que podem ser influenciados pelas condições do escoamento interno do aço (GOMES, 2021).

Para influenciar no escoamento pode-se empregar dispositivos modificadores de fluxo, condições operacionais de lingotamento além de utilizar determinadas geometrias de distribuidor (como por exemplo, retangular de veio único, retangular de seis veios e circular de quatro veios). Compreender o comportamento do fluxo de aço líquido no distribuidor pode auxiliar a indicar as regiões de baixa troca de calor, regiões de volume morto e regiões de elevada turbulência (ANANIAS, 2019).

3.2 CURVAS DE DISTRIBUIÇÃO DE TEMPOS DE RESIDÊNCIA (DTR)

As curvas de distribuição de tempos de residência são empregadas para analisar e caracterizar o fluxo de aço no interior do distribuidor e mensurar as frações volumétricas características (volume pistonado, volume de mistura e volume morto) (ROCHA E NEVES, 2023).

Em modelos físicos e matemáticos é empregada a injeção de um traçador (ácido ou corante) na corrente de entrada da água no distribuidor, sendo a sua

concentração detectada no canal de saída em função do tempo através de alguma variável, como condutividade elétrica.

O tempo de residência de um fluido em um distribuidor é definido como o tempo que cada elemento do fluido percorre o seu interior (GOMES, 2021). O tempo médio de residência teórico do fluido dentro do distribuidor é representado na equação 1, e pode ser definido como a razão entre o volume ocupado pelo fluido no interior do distribuidor (V) e a vazão volumétrica do distribuidor (Q). Este dado independe da curva de concentração, podendo ser calculado sem auxílio do traçador por estar relacionado às características de operação do sistema, mas é referência para os demais tempos característicos. (GOMES, 2021).

$$\bar{t} = V / Q$$

Equação 1 - Tempo de residência teórico (QUAN et al.,2023).

A curva de distribuição de tempo de residência de um fluido no distribuidor, é delineada por um tempo adimensional e uma concentração adimensional. O tempo adimensional, θ , é obtido pela razão entre um instante de tempo qualquer pelo tempo médio de residência teórico, indicando a fração de residência (ALVES, 2014).

$$\theta = t / \bar{t}$$

Equação 2 - Tempo adimensional de residência (ALVES, 2014).

A figura 3 representa uma curva padrão de distribuição de tempos de residência para um distribuidor no lingotamento contínuo, onde C representa o adimensional de concentração do traçador na saída do distribuidor e θ o adimensional de tempo.

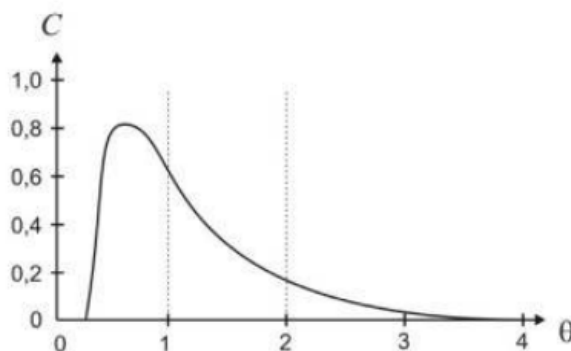


Figura 3 - Curva padrão de DTR para um distribuidor de lingotamento contínuo (ALVES, 2014)

A partir dos tempos de residência mínima, média e de pico este ensaio também pode auxiliar na modelagem de simulação numérica da remoção de inclusões no distribuidor (MACHADO, 2014)

3.3 CRITÉRIOS DA MODELAGEM FÍSICA NO DISTRIBUIDOR

O modelo físico deve respeitar os parâmetros de similaridade não somente com a finalidade de melhor compreensão dos processos, mas também para a produção de resultados de maior confiabilidade. Na inviabilidade do uso síncrono de todos os critérios do processo, é essencial reproduzir e compreender os fenômenos de maior importância e estabelecer ligações entre eles.

Os estudos diretamente na planta são inviabilizados pelo custo e pelo risco em função das altas temperaturas, entre 1550 ° C e 1600 ° C, e em não sendo possível a avaliação direta desses processos, os modelos em laboratórios são amplamente utilizados. A similaridade geométrica, no modelo físico do distribuidor, é conservada quando todas as medidas compreendidas possuem similar proporção ao distribuidor real (protótipo), segundo o fator de escala do modelo. Para utilização de modelos em escala 1:1, os critérios de comprimentos, vazões, velocidades e tamanhos de inclusão permanecem similares ao do protótipo (ROCHA E NEVES, 2023).

Wollmann (1999) cita as diferentes forças atuantes em cada fenômeno, das quais as forças gravitacionais e de inércia atuam no vazamento do aço líquido da panela para o distribuidor, a força de inércia e tensão superficial atuam na penetração do fluido no interior do distribuidor; as forças viscosas, gravitacionais e

de inércia atuam no escoamento do aço no interior do distribuidor e as forças de inércia e flotação atuam na flotação de partículas.

Segundo Boudjabi e co-autores (2008), as forças de inércia, gravitacionais e viscosas são as mais relevantes no estudo das linhas de fluxo do interior do distribuidor. Consideram que, para assegurar a similaridade dinâmica do escoamento do aço no modelo físico, deve-se manter a relação entre as forças de inércia e viscosas (número de Reynolds) e a relação entre as forças gravitacionais e de inércia (número de Froude). O número de Reynolds e o número de Froude são dados pelas equações 3 e 4, respectivamente:

$$Re = \frac{\rho u l}{\mu}$$

Equação 3 - Equação de Reynolds (YIN, YANG, ZHANG et al., 2023)

$$Fr = \frac{u}{\sqrt{gl}}$$

Equação 4 - Equação de Froude (YIN, YANG, ZHANG et al., 2023)

Onde ρ é a densidade do fluido (g/m^3), u é a velocidade do fluido (m/s), l é o comprimento característico (m), μ é a viscosidade do fluido (m^2/s), g é a aceleração gravitacional (m/s^2).

Os autores Liu *et al* (2022), Merder *et al* (2021), Xuan *et al* (2019), Wang *et al* (2021) e Zhu *et al* (2023) utilizaram a água como fluido de simulação do aço em seus ensaios para modelagem física. A manutenção dos adimensionais de Re e Fr ao mesmo tempo só é possível empregando água (aço a 1560°C e água a 20°C apresentam viscosidade cinemática na mesma ordem de grandeza, Tabela 1).

Tabela 1 - Propriedades da água e do aço.

Propriedades	Água (20 °C)	Aço (1560 °C)
Viscosidade Cinemática, ν (m^2/s)	$1,000 \times 10^{-6}$	$0,913 \times 10^{-6}$

Fonte: Adaptado de ZHU et al., 2023.

3.4 CRITÉRIOS DE SIMILARIDADE DE INCLUSÕES PARA SIMULAÇÃO EM MODELO FÍSICO

O alumínio é empregado amplamente como agente desoxidante na produção de aços comerciais. Na reação de desoxidação, a formação de inclusões de alumina (Al_2O_3) é resultante da reação de alumínio com o oxigênio dissolvido no aço. Devido ao alto ângulo de contato da inclusão de alumina com o aço líquido, as inclusões de alumina se aglomeram ao longo da superfície refratária das válvulas submersas, ocasionando obstruções das válvulas durante o processo de lingotamento contínuo (KUMAR et al, 2023). Tal fenômeno de obstrução é nomeado como “clogging”, e conforme citado por Zhu *et al* (2023) também pode se originar devido a outros fatores, tais como a formação de óxidos no fundo do distribuidor, óxidos presentes no aço e que são transportados para a parede da válvula em decorrência de baixo grau de superaquecimento ou à elevada taxa de perda de calor durante o lingotamento contínuo.

Os materiais empregados para simular inclusões devem apresentar interação com a água similar ao comportamento das inclusões com o aço. A maioria das inclusões que são objeto de estudo tem na sua composição alumina e sílica, e apresentam comportamento não molhável pelo aço. O arraste das inclusões para o veio se dá em função das linhas de fluxo do escoamento, da diferença de massa específica entre o banho e a partícula e também em função da molhabilidade. Quando o material empregado para simular as inclusões não metálicas possui ângulo de contato com a água menor que 90° o arraste das partículas para o veio ocorre mais facilmente.

Autores como Galante *et al* (2023); Prithvi, Mantripragada, e Sarkar (2020), e Wang *et al* (2021) empregaram o polietileno em seus ensaios, Zhu *et al* (2023) utilizaram partículas de cera roxa, já Braga e Tavares (2018) e Merder *et al* (2021) usaram partículas ocas de vidro como simuladores de inclusões não metálicas, sendo esses materiais empregados na simulação de inclusões, em função do fato de apresentarem uma massa específica inferior à da água e ângulo de contato superior a 90° , o que caracteriza um comportamento hidrofóbico.

Para modelos de laboratório em escala reduzida é observada a similaridade de Froude, no qual a equação do raio da inclusão, apresentada na equação 5,

admite que a razão entre as massas específicas do material particulado empregado na simulação e da água é a mesma que a razão entre as massas específicas das inclusões e do aço. Pode-se observar que a equação 5 é em função do fator de escala (λ), desta forma, quando se obedece a similaridade de Froude e se faz uma redução de escala, faz-se também uma redução do tamanho do particulado que simula as inclusões (SAHAI, Y.; EMI, T., 1996).

$$R_{inc,m} = \lambda^{0,25} R_{inc,p}$$

Equação 5 - Equação de similaridade de Froude para relação do raio de inclusão entre modelo e protótipo (SAHAI, Y.; EMI, T., 1996).

Os autores Galante *et al* (2023) empregaram a equação 6 em sua pesquisa, para um modelo físico de escala 1:3, como uma solução mais viável para determinar o valor do raio da inclusão para qualquer relação de massa específica no modelo e em qualquer fator de escala (λ). Essa equação possibilita variar as relações de massas específicas do modelo e protótipo. Desta forma, há uma série de possibilidades que permitem considerar tanto os diferentes tamanhos de inclusões, como também as composições químicas das diferentes espécies a serem simuladas. O uso desta equação possibilita determinar o valor da massa específica da inclusão no modelo através dos valores do fator de escala e da massa específica do aço e das inclusões.

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

Equação 6 - Estabelece a relação entre o raio da inclusão no modelo e o raio da inclusão no protótipo (SAHAI, Y.; EMI, T., 1996).

Mendonça (2016) cita em seu estudo os valores de massas específicas para três tipos de inclusões comumente encontradas nos aços ($\rho_{alumina} = 3960 \text{ kg/m}^3$, $\rho_{espinélio} = 3580 \text{ kg/m}^3$ e $\rho_{CaS} = 2500 \text{ kg/m}^3$), e que ao atribuir diferentes massas específicas de materiais para simular as inclusões no modelo ($\rho_{inc,m1} = 912 \text{ kg/m}^3$ e $\rho_{inc,m2} = 995 \text{ kg/m}^3$) obtém-se o gráfico apresentado na figura 4, no qual, $\rho_{inc,m1}$ representa a massa específica do polipropileno e $\rho_{inc,m2}$ representa um material qualquer com massa específica similar à massa específica da água.

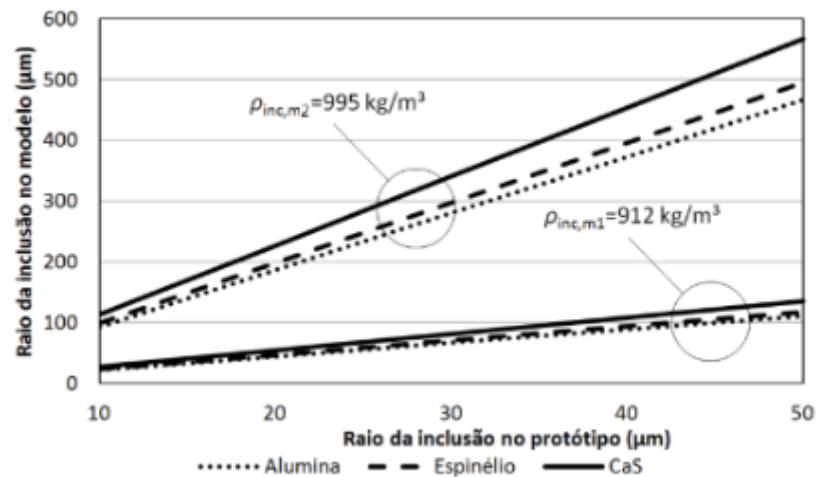


Figura 4 - Relação entre modelo e protótipo de inclusões para diferentes massas específicas de partículas (MACHADO, 2014).

O gráfico na figura 4 indica que, quanto mais próxima a relação da massa específica da inclusão empregada no modelo for da massa específica da água, maior é a relação entre o raio da inclusão no modelo e da inclusão no protótipo.

Para simular as inclusões de alumina ($\rho = 3960 \text{ kg/m}^3$) do processo, o material ainda mais empregado é o polietileno ($\rho = 960 \text{ kg/m}^3$) para reprodutibilidade do experimento em laboratório físico. Conclui-se que a seleção do material que simula as inclusões deve ser fundamentada em relações de massa específica e ângulo de contato entre elementos do protótipo-modelo com o fluido empregado, resultando na utilização do material particulado polietileno de alta densidade simulando inclusões de alumina, com uma boa relação granulométrica protótipo-modelo.

3.5 CRITÉRIOS DE COMPORTAMENTO DE INCLUSÕES NO DISTRIBUIDOR

Os autores Chattopadhyay e Isac (2012) citam que o comportamento de flotação da inclusão é um vetor de velocidade, sendo este derivado da combinação do vetor da Lei de Stokes e vetores associados à velocidade de escoamento do aço. Fatores como diâmetro, forma e massa específica da inclusão influenciam a velocidade de ascensão da partícula. Partículas menores apresentam menor velocidade de ascensão enquanto partículas maiores apresentam maior velocidade

de ascensão e maior facilidade de remoção por flotação (QUAN *et al*, 2023).

Por apresentar comportamento de flotação ocasionado pela diferença de massa específica com o aço líquido, uma forma eficaz de acelerar esse processo é através da agitação do banho (NEVES, MOTTA E VIANA, 2014). A captura da inclusão pela escória é um processo que ocorre em três etapas na panela: Na primeira etapa (1), ocorre a flotação da inclusão na interface aço-escória, em sequência (2), ocorre a separação da inclusão do aço líquido, rompendo a tensão superficial do aço pelo movimento de flotação da inclusão para a fase de escória, e na terceira etapa (3), ocorre a dissolução da inclusão na fase de escória (RAMOS, CISQUINI, BRAGA, *et al*, 2023).

O movimento das partículas é dependente das forças de interação entre inclusão/escória, pois se a interação for fraca, as inclusões estão subordinadas a reincorporação no metal. A força de reatividade (fixação) entre a fase de escória e a inclusão é determinada através da molhabilidade das inclusões pela escória (NEVES, MOTTA E VIANA, 2014)

Liu e co-autores (2021) desenvolveram um modelo de dinâmica de fluidos computacional (CFD) para simular a flotação da inclusão não metálica em aço e sua interação com a interface aço-escória. O experimento empregou água como aço, óleo de silicone como escória e esfera oca de alumina para simulação das inclusões, sendo validado pelo software COMSOL Multiphysics. Os autores concluíram que o fluxo de aço afeta diretamente o comportamento de flotação, micro inclusões satisfazem fluxos laminares (Lei de Stokes), enquanto que macro inclusões são influenciadas por fluxos turbulentos.

Além disso, o estudo mostrou que, devido a tensão interfacial, ocorre uma desaceleração da partícula antes da inserção na fase de escória, pois a interface cria uma “barreira” para o fluxo do fluido ao redor da partícula, contrariando a suposição dos modelos clássicos de que a partícula atinge a velocidade terminal após a inserção na escória. Outrossim, é que o aumento de densidade de inclusão gerará o aumento da profundidade de penetração estática de inclusão ao aço, mas também o grau de flexão da curva de interface. Isso implica dizer que, para macro inclusões com densidade de sedimentação na interface aço-escória, ocorre grande probabilidade de serem reintroduzidas ao aço por força de cisalhamento. (LIU, LIU, ZHAO, *et al.*, 2021)

Entretanto, o comportamento das inclusões também deve ser observado em aglomerados irregulares com morfologia diversas. Nesse sentido, Zhu e co-autores (2023), apresentaram um estudo sobre o movimento de clusters na interface aço-escória e os fatores qualitativos de separação e remoção na interface, realizado com simulação numérica por meio do programa FLUENT, e por meio de simulação física, onde os clusters foram fabricados por impressão 3D e a interface aço-escória foi representada por água-óleo. O estudo cita que os clusters giram no sentido anti-horário na interface, indicando que eles se invertem conforme são inseridos na interface, podendo atravessar a interface em diferentes ângulos ou direções, devido às suas morfologias divergentes, com o intuito de quebrar a restrição da interface.

Além disso, quando o diâmetro das inclusões aglomeradas é constante, a ocorrência de separação do cluster na interface é maior e o tempo para cruzar a interface é reduzido com o aumento da dimensão fractal. Por outro lado, quando a dimensão fractal é constante, a possibilidade de separação das inclusões aglomeradas aumenta com o aumento do diâmetro do aglomerado de inclusão, porém o tempo para cruzar a interface torna-se maior (ZHU, CUI, LI *et al.*, 2023).

3.6 MÉTODOS EMPREGADOS PARA QUANTIFICAR INCLUSÕES NÃO FLOTANTES

A literatura apresenta alguns métodos empregados por pesquisadores em quantificações de inclusões não metálicas no modelo físico, sendo os métodos via peneira e sensor de quantificação de partículas que utiliza a técnica ESZ (“Electric Sensing Zone”) como os mais citados.

Normalmente os ensaios de remoção de inclusões são executados em regime permanente, esse tipo de operação reproduz as condições de operações do distribuidor durante a maior parte do tempo e facilita os fenômenos de formação das inclusões. A operação do tempo de ensaio é calculada através do tempo de residência teórico (\bar{t}) é dado pela equação 1 (Vide tópico 3.2). Não há padronização entre as massas das partículas nos trabalhos pesquisados, é possível perceber uma grande variação mássica injetada.

Os autores Gabriel (2020), Galante *et al* (2023) e Liu *et al* (2022) empregaram o primeiro método citado, que visa quantificação de inclusões através de peneira metálica, os ensaios têm como finalidade capturar as partículas não

sobrenadantes nos veios de saída do modelo físico. Posteriormente, as peneiras são secadas em estufa para remoção de umidade e são pesadas. O cálculo do percentual das inclusões passantes (η_r) é dado pela razão entre a massa coletada no filtro (m_c) e a massa injetada no ensaio (m_i) multiplicado por 100, conforme equação 7.

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

Equação 7 - Equação do cálculo percentual das inclusões (SOUZA, MENDONÇA E TAVARES, (2020)).

Esse procedimento viabiliza a análise do tamanho das inclusões passantes no veio através de análise granulométrica do material coletado no ensaio. É um método mais benéfico visto que tem maior facilidade de adaptação e execução simplificada.

Os autores Guthrie e Isac (2012), Hudson e Apelian (2016) e Zhang *et al* (2014) citam o sistema LiMCA (Liquid Metal Cleanliness Analyser), que se baseia na zona de detecção elétrica. O LiMCA efetua a análise do metal líquido, que foi desenvolvido primariamente para o emprego em alumínio (LiMCA Al) e posteriormente para o aço líquido (LiMCA Fe). Os autores Isac *et al* (2011), Mendonça *et al* (2016) e Souza *et al* (2020) abordam o sistema APS III (Aqueous Particle Sensor III), uma versão moderna do sistema LiMCA, à base de água, desenvolvido para analisar o comportamento de inclusões não metálicas em modelagem física de processos metalúrgicos através da diferença de condutividade elétrica entre fluido de trabalho e o material particulado.

Ambos os métodos, LiMCA e APS III, baseiam-se no princípio de ESZ, no qual os sensores de corrente elétrica sinalizam a diminuição do sinal de corrente quando ocorre a passagem de partículas não condutoras. Esta técnica é capaz de prever os campos eletromagnéticos e fluxos de fluidos e movimentos de partículas dentro do ESZ, além de ser empregada para quantificar e detectar o tamanho de inclusões.

Em comparação com o método de separação via peneiras, o método de ESZ é mais avançado e proporciona maiores dados em relação à quantidade e tamanho de inclusões no decorrer do ensaio, entretanto é de difícil implementação e muito

mais oneroso que um método de separação via peneiras. Não foram encontrados trabalhos comparativos entre ambos os métodos na literatura pesquisada.

3.7 MÉTODOS EMPREGADOS PARA REMOÇÃO E QUANTIFICAÇÃO DE INCLUSÕES FLOTANTES

Os autores Souza *et al* (2020) e Shang (2020), citam que a última etapa metalúrgica em que o aço fundido flui, antes da solidificação no molde, é o distribuidor. Para aprimorar a limpidez do aço é primordial melhorar as condições de escoamento interno no distribuidor, a fim de evitar a reoxidação de inclusões no banho e favorecer a flotação de inclusões. Portanto para aumentar a remoção de inclusões, podem ser introduzidos dispositivos de controle de fluxo (DCF) como barragens e inibidores de turbulência, e injeção de gás inerte, como Ar e N₂, para direcionar o fluxo de aço para a superfície superior e aumentar o tempo de residência efetivo do aço no distribuidor, de forma a intensificar a flotação de inclusões para a camada sobrenadante no distribuidor.

No distribuidor, as inclusões podem colidir e se agregar junto ao fluxo de aço líquido. Dessa forma, Lu *et al* (2022), investigaram o efeito de uma câmara de turbilhamento (STF) no comportamento de colisão-coalescência das partículas, a fim de verificar a taxa de remoção de inclusões através de simulação matemática em um modelo físico do distribuidor. Os autores demonstraram que a taxa de remoção de inclusões com a inserção do STF aumentou de 30,09% para 43,20%. Além disso, considerando o efeito de colisão-coalescência, o diâmetro médio das partículas aumentou de 3,93 µm a 4,35 µm, com aumento de 10,68% na taxa de remoção de inclusão. Importante citar que resultados considerando a colisão-coalescência são mais consistentes com o comportamento real da inclusão no distribuidor.

O tubo longo é um tubo refratário empregado no distribuidor para evitar a reoxidação do banho e, por consequência, a geração de inclusões pela combinação com o O₂ do ar arrastado. Chattopadhyay *et al* (2011) demonstraram, através de modelagem física e matemática, que a inclinação de apenas 4° do alinhamento vertical do tubo pode ocasionar problemas de homogeneidade química e térmica nos veios, além de fluxo assimétrico e aumento do número de inclusões passantes.

A técnica de utilização de barragens e diques aperfeiçoa as condições para a

flotação de inclusões, devido ao aumento do tempo mínimo de residência do aço, além da diminuição de zonas mortas e da quantidade de descarte gerada durante a troca de painéis. Estudos realizados por Ananias et al (2019), demonstram que a utilização de barragens e diques em conjunto foram eficientes para uma melhor distribuição do fluxo na superfície livre do distribuidor e flotação de inclusões. Os autores Quan et al (2023) realizaram um estudo comparativo, concluíram que com a combinação de inibidor de turbulência (TI) e barragem, a taxa de remoção de inclusões com densidade de 2700 kg/m³ e tamanho de partícula de 5 µm é de 63,32%, enquanto a taxa de remoção de macro inclusões de diâmetro 150 µm pode chegar a 89,04%.

Outro método usualmente utilizado é a aplicação de gás inerte no distribuidor, visto que a flotação das inclusões não metálicas é favorecida pela ascensão dos gases em direção à escória. Os autores Cho e Lee (2011) demonstraram que a eficiência de remoção de inclusões depende da homogeneidade das bolhas no fluxo de água do tubo longo e do ângulo de contato da inclusão com o líquido, quanto maior o ângulo de contato, maior a eficiência.

O autor Sheng (2020) estudou os efeitos de controle de fluxo e da cortina de gás na limpeza do aço em um distribuidor de único veio. Os resultados mostram que os dispositivos de controle de fluxo e a cortina de gás inerte reduzem a extensão de volume morto no distribuidor e, assim, aumentam a eficiência de remoção das inclusões. A taxa de remoção de inclusão é melhorada quando uma bolha grande sofre segregação em bolhas pequenas, sugerindo que bolhas de menor tamanho são preferíveis para captura de inclusões em operações industriais reais. Além disso, a cortina de gás tem um efeito significativo na remoção de microinclusões (10 µm), pois elas tendem a ascender para a camada sobrenadante do aço com as bolhas de gás. A taxa de remoção de inclusão por captura de bolhas de injeção por gás inerte em função do fluxo ao redor da bolha pode ser expressa pela equação 8 :

$$\frac{dN}{dt} = \frac{1r_i}{2r_b} \sqrt{\frac{3}{2} Re_b} \cdot C_i N_b v_r b^2 \pi$$

Equação 8 - Taxa de remoção de inclusões por captura de bolhas (SHENG, 2020)

onde, r_i é o raio de inclusão, r_b é o raio da bolha, Re_b é o número de Reynolds para bolhas, C_i é a concentração de inclusão, N_b é o número de bolhas, v_r é a velocidade relativa entre o aço e o gás e b é a velocidade crítica raio de

aprisionamento.

Neves e coautores (2014) citam que, quanto menor o ângulo de contato entre escória/inclusão, maior será a molhabilidade da inclusão pela escória e, portanto, maior chance de remoção da inclusão do banho metálico ser incorporado pela escória. A eficiência na quantificação de remoção de inclusões flutuantes no distribuidor é dada pela equação 9.

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

Equação 9 - Equação da eficiência na quantificação da remoção das inclusões flutuantes (SOUZA, MENDONÇA E TAVARES, 2020)

Na equação 9, η_r (%) representa a eficiência de remoção, m_c representa massa de partículas de simulação de inclusões coletas na saída do distribuidor (g) e m_i representa a massa injetada no distribuidor (g).

Através da literatura, compreende-se que é fundamental manter critérios de similaridade de escoamento e parâmetros do distribuidor, entretanto deve-se direcionar essencial atenção às forças de tensão superficial visto que exercem papel relevante no processo de flotação e remoção de inclusões no distribuidor.

3.8 PRINCÍPIOS E MÉTODOS DE CÁLCULO DE BALANÇO DE MASSAS

Estudos de balanços mássicos são de grande relevância industrial uma vez que proporcionam dados que podem auxiliar em investimentos ou melhorias de condições em determinado processo. O balanço de massas envolvidas no processo contribui para a determinação de desempenho operacional em processos físicos ou químicos de concentração de elementos ou compostos através dos diferentes fluxos mássicos dos equipamentos.

O balanço de massas é fundamento no princípio de Lavoisier, segundo o qual a matéria não pode ser criada ou destruída em um dado sistema. Para estudo e desenvolvimento de um balanço de massa é imprescindível conhecer os materiais que irão compor o sistema. O modelo de balanço de partículas é baseado no princípio de que todas as quantidades de materiais que entram e saem do sistema

tenham seu peso e composição conhecidos (BOTELHO *et al.*, 2016).

Dessa forma, o balanço de massa de determinado sistema compõe o modelo matemático, do mesmo, a fim de haver melhor controle dentro do sistema durante os processos (AGUIAR, 2016).

3.8.1 Definições para operações de balanço de massas

Para a definição de um sistema de balanço de massas é primordial definir as premissas do modelo a ser montado. A classificação do balanço é de acordo com o modo operacional ou em relação a variação dos parâmetros com o tempo.

Em relação ao modo operacional, os processos podem ser divididos entre contínuos, batelada ou semi-contínuos, que consiste no modo de entrada e saída de massa no sistema. Sendo que no processo contínuo é no qual a massa de alimentação e os produtos fluem continuamente durante o processo, o processo em batelada no qual a massa não é adicionada nem removida do sistema durante a operação e o processo semi-contínuo no qual há entrada de massa, mas o produto não é removido durante o processo (ou vice-versa).

Fundamentado na dependência das variáveis do processo com relação ao tempo, pode-se obter a classificação dos processos em estado estacionário (ou regime permanente) e estado não estacionário (ou regime transiente). Os processos em estado estacionário (ou regime permanente) são operações de um sistema onde todas as variáveis são mantidas constantes com o tempo (ex : quantidade de massa, temperatura, pressão, vazão, entre outros), e processos em estado transiente (ou não permanente) são aqueles no qual uma ou mais variáveis de um processo variam com o tempo (ex: quantidade de massa, temperatura, pressão, vazão, entre outros) (ALENCAR, 2017).

3.8.2 Equações de balanço de massas

A equação geral de balanço de massa, representada na equação 10, pode ser formulada para qualquer elemento que entra ou deixa o sistema, podendo ser aplicada para a massa total do sistema, ou qualquer espécie atômica ou molecular envolvida no processo (VIRGÍLIO, 2011).

$$\sum M \text{ entrada} + \sum M \text{ geração} - \sum M \text{ saída} - \sum M \text{ consumo} = \sum M \text{ acúmulo}$$

Equação 10 - Equação geral do balanço de massas (VIRGÍLIO, 2011).

Os termos na equação referentes a “geração” e “consumo” se referem a processos onde há transformação química (reação) no sistema, podendo ser substituídos pelo termo “reage”. Caso um dado componente estiver sendo produzido no processo, o termo “reage” fica positivo, entretanto, se o componente estiver sendo consumido no processo, o termo “reage” fica negativo.

Já para os processos onde não há transformação química (reação), a equação do Balanço de Massa Total, representada na equação 11 é a mais empregada. Dessa forma, os termos de “geração” e “consumo” ou “reage” desaparecem, e a massa total do processo é calculada com todos os componentes mássicos que entram e saem do sistema.

Grande proporção dos processos metalúrgicos são em regime contínuo (normalmente processos de redução) ou por regime de batelada (em siderurgia tem-se os processos de aciaria, lingotamento e conformação mecânica) (ALENCAR, 2017).

Entende-se que as equações percentuais de inclusões apresentadas ao longo do trabalho são resultados matemáticos experimentais que apresentam a quantidade de inclusões que entram no distribuidor e atingem o veio, caracterizando a passagem das inclusões para o molde.

É possível determinar as inclusões captadas pela camada de escória na superfície do banho através do balanço de massa para esse sistema, utilizando como método de medição a comparação quantitativa entre as partículas dos sistemas. Quantificando o material particulado entrante e passante do sistema é possível equacionar o balanço mássico de partículas através princípio de Lavoisier, representado na equação 11:

$$\sum \text{Massa entrada} = \sum \text{Massa saída} + \sum \text{Massa acumulada}$$

Equação 11 - Equação de balanço de massas (ALENCAR, 2017).

O ensaio de quantificação de inclusões também visa obter informações acerca das distribuições granulométricas e concentração na simulação de inclusões,

obtendo informações melhores em função do diâmetro e concentração mássica das inclusões passantes e sobrenadantes no banho.

Não foram encontrados trabalhos de balanços de massas de inclusões não metálicas em modelos físicos na literatura pesquisada, entretanto alguns autores da literatura apresentam diferentes métodos de balanços mássicos para escória, aço e componentes químicos utilizados em sistemas metalúrgicos.

3.8.3 Balanço de massas metalúrgicos para sistemas diversos

Os autores Ekmekçi, Yetisken, e Çamdali (2007) modelaram um balanço de massas do forno elétrico a arco e do forno-panela (FEA + LF), através das taxas dos elementos de saída e componentes para o sistema de produção de aço, considerando 100 kg de cada um dos elementos de entrada. As reações químicas do sistema (FEA + LF) e análise química da entrada dos materiais são encontrados no escopo do artigo em questão, e são empregados para obter a modelagem do balanço mássico conforme as equações 12 e 13:

$$\sum M_{EAF} + \sum M_{LF} = 100 \text{ kg}$$

Equação 12 - Balanço de massas do forno elétrico a arco e do forno de panela (EKMEKÇI, YETISKEN, E ÇAMDALI, 2007).

$$(m_{SG} + m_{St-SL} + m_{DST} + m_{SL})_{EAF} + (m_{SG} + m_{St-SL} + m_{DST} + m_{SL})_{LF} = 100 \text{ kg}$$

Equação 13- Balanço de massas dos componentes do forno elétrico a arco e do forno de panela EKMEKÇI, YETISKEN, E ÇAMDALI, 2007).

Onde m_{SG} são os gases de chaminé, m_{St-SL} é o aço em escória, m_{DST} é a poeira da escória e m_{SL} é a escória. Os autores consideraram FEA e FP como um sistema completo, enquanto as análises de balanço de massa foram realizadas independentemente para cada um dos sistemas de FEA e FP. Como exemplo, é citado a obtenção de 95,93 kg de produto total de saída a partir da quantidade de entrada de 100 kg de ferro como um dos elementos de entrada do sistema (FEA + FP), o que significa que a eficiência de massa para elemento de ferro neste sistema é de 95,93%.

Os resultados obtidos proporcionam noções sobre a quantidade de materiais que são destruídos ou queimados para uma quantidade de entrada de 100 kg para o sistema (FEA + FP). Através do balanço mássico, pode-se determinar a quantidade necessária de entrada de materiais de acordo com a composição desejada do produto.

Os autores Aguiar e Castro (2016) realizaram um balanço de massa do alto-forno, com o intuito de prever a massa de ferro-gusa e a massa de escória a ser produzida em função da carga carregada no alto-forno, através da redução do teor de silício (dessiliciação) e fósforo (desfosforação); As equações empregadas como referência para o balanço de massas com os respectivos componentes são dadas nas equações 14 e 15:

$$\sum Mfe_{\text{entrada}} = \sum Mfe_{\text{saída}}$$

Equação 14 - Balanço de massas de ferro (AGUIAR E CASTRO, 2016).

$$\sum MSiO_2_{\text{entrada}} = \sum MSiO_2_{\text{saída}}$$

Equação 15 - Balanço de massas da sílica (AGUIAR E CASTRO, 2016).

Foram coletados dados mensais empregando as médias de análise química das cargas de escória e ferro-gusa, e aplicada a ferramenta Office Excel para análise dos dados. Os resultados foram capazes de avaliar o melhor mix de produção em função da qualidade e do tipo de rota de refino do ferro-gusa, além disso, o balanço mássico deste sistema apresentou um grau de confiança satisfatório de $R^2 = 0,985$ quando correlacionado aos dados industriais.

Os autores Castro-Cedeno et al (2019) realizaram uma simulação numérica da modificação de inclusões não metálicas pelo tratamento com cálcio na panela de argônio, com o objetivo de avaliar os efeitos da evaporação de Ca na agitação do banho por meio de simulações de fluidodinâmica e verificar o processo de modificação de inclusões devido ao tratamento com cálcio.

O balanço de massa para o consumo de cálcio é representado na equação 16. Após o cálcio injetado ter sido liberado $m_{Ca, inj}$, as gotículas de cálcio $m_{Ca, free}$ se dissipam livremente no aço líquido $m_{Ca, diss}$. Se o Ca for liberado abaixo da profundidade crítica, as gotículas de líquido em dissolução se modificam em bolhas de gás quando atingem a profundidade crítica. As bolhas de cálcio que se dissolvem

no aço eventualmente atingem a camada sobrenadante do banho , onde reagem com a escória $m_{Ca,slag}$ ou são queimadas na atmosfera $m_{Ca,vap}$. O cálcio que foi dissolvido no aço reage com as inclusões e as modifica. Uma parte das inclusões permanece no banho $m_{Ca,inc}$, enquanto o restante é removido do aço $m_{Ca,inc}$.

$$m_{Ca,inj} = m_{Ca,free} + m_{Ca,diss} + m_{Ca,slag} + m_{Ca,vap} + m_{Ca,inc} + m_{Ca,inc}$$

Equação 16 - Balanço de massas do consumo de cálcio na panela de argônio (CASTRO-CEDENO et al.,2019)

Nesse estudo, os cálculos de fluidodinâmica foram acoplados ao software termodinâmico da ArcelorMittal CEQCSI para obter a evolução da concentração das espécies dissolvidas. O teor de cálcio médio para pré-injeção, pós-injeção e distribuidor foram 5,5 ppm ; 14 ppm e 12,5 ppm, respectivamente.

Arzpeyma, Gyllenram e Jönsson (2020) desenvolveram um modelo de balanço de massas para uma operação de forno elétrico a arco (FEA), integrado com um modelo de escória de saturação de MgO para aplicação como web Java chamada RAWMATMIX. Os dados reais do forno industrial foram empregados para calibrar os parâmetros e determinar a precisão do modelo. Posteriormente, o modelo foi aplicado para avaliar o efeito das proporções de carga de ferro esponja briquetado a quente (HBI - hot briquetted iron) em materiais carregados sobre as quantidades de escória e composições.

As equações de balanço de massa desenvolvidas para esse sistema são descritas a seguir. O balanço mássico é escrito considerando que todos os componentes dos materiais de entrada e dos produtos de saída de um EFA podem ser balanceados pela equação 17:

$$\sum_j \sum_{i=1}^{V_j} M_i^j = \sum_{p=1}^{V_p} \sum_{i=1}^{V_i} M_i^p$$

Equação 17 - Balanço de massas para uma operação de forno elétrico a arco (ARZPEYMA , GYLLENRAM E JÖNSSON, 2020).

Onde M_i^j e M_i^p são a massa do componente i no material j e no produto p , respectivamente. A massa de entrada é composta por matérias-primas, que incluem

diferentes tipos de sucatas, HBIs e pós de carbono; lastro do FEA; formadores de escória (constituídos por cal e dolomita), Componentes refratários (que podem ser dissolvidos em escória); Oxigênio injetado e consumido durante a oxidação do metal, descarbonetação, oxidação de carbono em pó; combustão de combustível e pós-combustão; e adições de combustível através dos queimadores. A massa de saída é composta por aço fundido; escória derretida, que pode conter componentes sólidos de MgO; Salto quente, componentes de poeira em formas de óxido metálico; Gás, que pode consistir em CO, CO₂ e N₂.

O balanço de massas global pode ser representado na equação 18:

$$m_{Raw} + m_{SF} + m_{IHH} + m_{PCI} + m_O + m_{Fuel} + m_{EI} + m_R = m_{Dust} + m_{melt} + m_{slag} + m_{RHH} + m_{gas}$$

Equação 18 - Balanço de massas por componente para operação de forno elétrico a arco (ARZPEYMA, GYLLENRAM E JÖNSSON, 2020).

Onde, m_{Raw} , m_{SF} , m_{IHH} , m_{PCI} , m_O , m_{Fuel} , m_{EI} , m_R , m_{Dust} , m_{melt} , m_{slag} , m_{RHH} , m_{gas} são a massa da matéria-prima, formadores de escória, lastro de entrada, carbono em pó, oxigênio, combustível, refratário, poeira, fusão, escória, lastro residual e gás, respectivamente.

A concentração de elemento i na fusão, C_{eu}^{melt} , é representado pela equação 19:

$$C_i^{melt} = \frac{d_i M_{input} C_i^{input}}{M_{melt}}$$

Equação 19 - Concentração do elemento i na fusão (ARZPEYMA, GYLLENRAM E JÖNSSON, 2020).

Onde C_i^{input} é a concentração do componente i na massa total de entrada, M_{input} é a massa total de entrada, M_{melt} é a massa de aço fundido, d_i é o fator de rendimento ou distribuição para o elemento i , e pode ser calculado pela equação 20:

$$d_i = \frac{1}{1 + \frac{m_{slag}}{m_{melt}} L_i}$$

Equação 20 - Concentração do elemento i na massa de entrada (ARZPEYMA , GYLLENRAM E JÖNSSON, 2020).

A razão de distribuição do elemento i entre as escórias (% i) e a fusão [% i] pode ser calculada pela equação 21:

$$Li = \frac{(\% i)}{[\% i]}$$

Equação 21 - Razão do elemento i entre escória e fusão (ARZPEYMA , GYLLENRAM E JÖNSSON, 2020).

A massa do aço fundido (M_{melt}) é calculada pela equação 22:

$$M_{melt} = \sum_{i=1}^{Vi} d_i C_i^{input}$$

Equação 22 - Massa do aço fundido (ARZPEYMA , GYLLENRAM E JÖNSSON, 2020).

A concentração do elemento ip na escória é calculada pela equação 23, e SF_i é o fator de conversão elemento para óxido estequiométrico:

$$C_{ip}^{slag} = \frac{(1-d_i)SF_i M_{input} C_i^{input}}{M_{slag}}$$

Equação 23 - A concentração do elemento ip na escória (ARZPEYMA , GYLLENRAM E JÖNSSON, 2020).

A massa de escória pode ser calculada pela equação 24:

$$M_{slag} = \sum_{i=1}^{Vi} (1 - d_i) C_i^{input}$$

Equação 24 - Massa da escória (ARZPEYMA , GYLLENRAM E JÖNSSON, 2020).

O balanço de massas para este sistema é empregado para seleção de matérias-primas e pode ser usado para prever a concentração de elementos nas propriedades de fusão e escória. Os resultados indicam que o teor de HBI foi

aumentado de 13% para 40%, e que uma adição de 1% do HBI resulta em uma diminuição da quantia de 0,16 Nm³/t de oxigênio para oxidação de metais e um aumento de 34 kg de escória.

Todos os métodos acima citados apresentaram resultados consistentes nos balanços mássicos de escória, aço ou componentes químicos utilizados em sistemas metalúrgicos, entretanto métodos que não necessitem de softwares muito avançados representam uma alternativa mais viável e de melhor executabilidade.

4 METODOLOGIA

A metodologia desse estudo é dividida em: ensaio de linhas de fluxo, ensaio de remoção de inclusões e balanço mássico de partículas passantes e não passantes no modelo físico de distribuidor de lingotamento contínuo.

O Laboratório de Siderurgia da UFRGS, localizado no Campus do Vale da UFRGS, dispõe de um modelo físico isotérmico de distribuidor de lingotamento contínuo de aços longos, em escala 1:1, similar ao distribuidor industrial de uma usina siderúrgica. O modelo utiliza água a temperatura ambiente como fluido simulador do aço a 1560°C, e mantém os critérios de similaridade de Reynolds e Froude.

A figura 5, apresenta a vista frontal do distribuidor com sistema de haste tampão, empregada para controlar o fluxo do fluido que transcorre no interior do modelo físico. As figuras 6 e 7, apresentam a vista lateral e superior do modelo físico, respectivamente, e as medidas do modelo físico empregado são apresentadas no apêndice A.

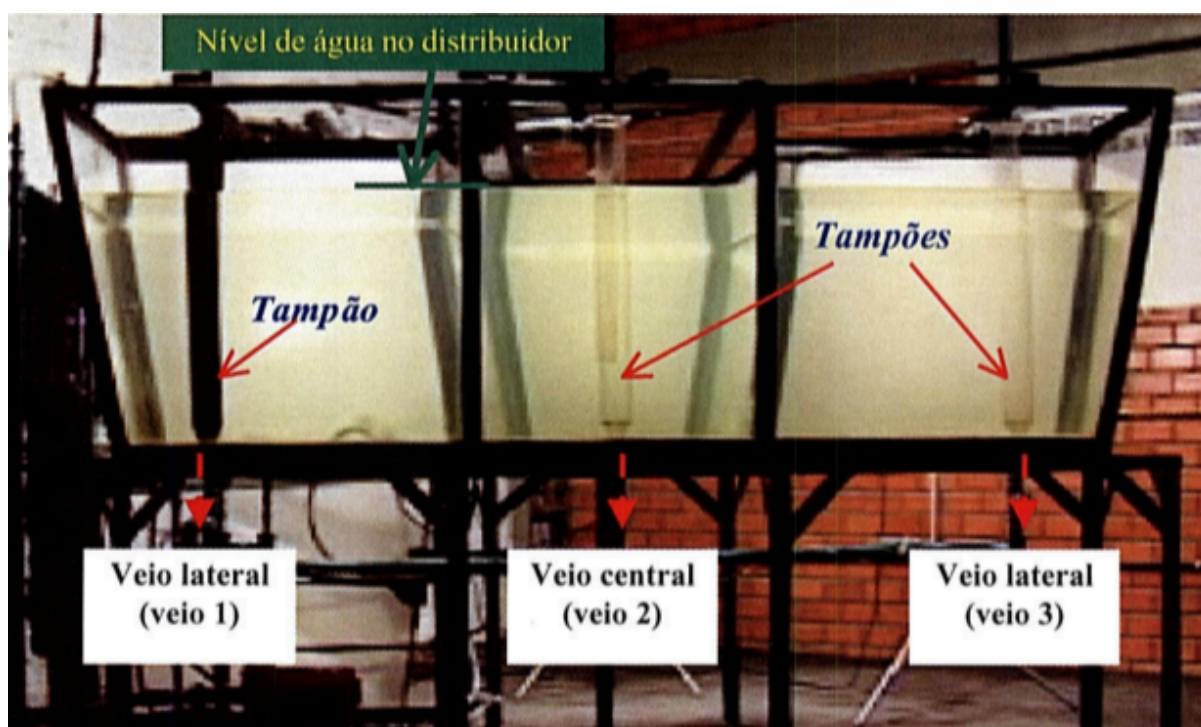


Figura 5 - Vista frontal do modelo físico (Wollmann, 1999)

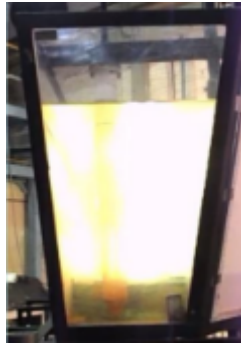


Figura 6 - Vista lateral do modelo físico (Pereira, 2016)

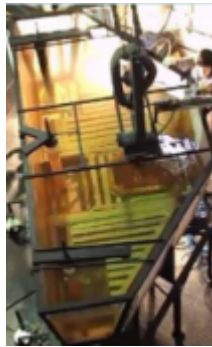


Figura 7 - Vista Superior do modelo físico (Pereira, 2016)

Anteriormente aos ensaios de balanço de massa, foram peneirados 10 kg de polietileno de alta densidade em peneira metálica, conforme figura 8, através do acoplamento de peneiras superpostas cujas aberturas vão sucessivamente diminuindo a escala, e acopladas em um equipamento constituído por sistema de vibração. Desta forma, foram obtidas diferentes faixas de diâmetro, sendo elas distribuídas em 500 μm , 250 μm , 180 μm , 75 μm e 38 μm . Em seguida, o polietileno peneirado foi armazenado com as suas respectivas faixas e acondicionados com a devida identificação.



Figura 8 - Polietileno de alta densidade em peneira metálica (Autor, 2022)

O polietileno é hidrofóbico e deve ser previamente molhado em álcool antes de ser injetado no modelo físico do distribuidor. O ensaio consiste em injetar uma mistura de PEAD com uma solução alcoólica (aproximadamente 150 gramas de PEAD em 500 ml de uma solução de etanol hidratado 70°).

Para a realização dos ensaios de balanço de massa, o distribuidor é operado em regime permanente com inibidor de turbulência. O modelo físico é posto em marcha e após atingir o nível de trabalho, espera-se 10 minutos para a estabilização do escoamento, conforme figura 9.



Figura 9 - Modelo físico do distribuidor do laboratório de siderurgia (Autor, 2022)

Sempre com o equipamento operando em regime permanente, injeta-se a mistura com o particulado por meio de um dispositivo de injeção localizado logo acima do tubo longo, na tubulação de entrada de água do modelo. Esta injeção é realizada em um pequeno intervalo de tempo, muito inferior ao tempo de residência do reator, de forma a caracterizar injeção por pulso. A seringa empregada tem escala de 1000 ml, sendo subdividida em seções de 50 ml de medição.



Figura 10 - Seringa para inserção das partículas no modelo físico (Autor, 2022)

A tabela 2 representa a composição mássica de entrada, a composição percentual individual e percentual cumulativa de entrada em função do diâmetro da partícula. A equação 25 permite determinar o valor da massa específica da inclusão no modelo através dos valores do fator de escala e da massa específica do aço e das inclusões.

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

Equação 25 - Estabelece a relação entre o raio da inclusão no modelo e o raio da inclusão no protótipo (GALANTE, 2023).

A equivalência do diâmetro da partícula utilizada no modelo físico em relação ao diâmetro da partícula industrial é representada na coluna 1 e coluna 2, respectivamente, na tabela 2. A equivalência da distribuição de diâmetro de inclusão na usina e de partículas de simulação pode ser encontrada no trabalho de Machado, 2014, sendo faixas de inclusão usualmente resultantes na indústria.

Tabela 2 - Composição mássica de entrada em função do diâmetro da partícula.

Polietileno (μm)	Usina (μm)	Injeção(g)	Individual %	Cumulativa%
500	140	60,45	40,3	98
250	70	42,15	28,1	57,7
180	50	39,15	26,1	29,6
75	20	3,75	2,5	3,5
38	10	1,5	1	1

Fonte: Autor, 2022.

Após a injeção dos 147 gramas de polietileno, o distribuidor é mantido em regime permanente por dois tempos de residência teóricos. O cálculo do tempo de residência teórico (\bar{t}) é dado pela equação 1 (Vide tópico 3.2), onde foi empregado a razão entre o volume ocupado pelo fluido no interior do distribuidor do modelo físico (2000 litros) e as vazões volumétricas (7200 l/h, 8000 l/h e 9000 l/h).

As velocidades de lingotamento (m/min) foram obtidas pela equação 26, através da razão entre a vazão volumétrica individual do veio de saída (l/h) e a área da secção de 240 mm do veio de saída (m), conforme o tamanho dos produtos obtidos pela operação de lingotamento contínuo da indústria (vide tópico 3).

$$v = Q/A$$

Equação 26 - Equação para cálculo da velocidade de lingotamento (Machado, 2014)

Transcorridos dois tempos teóricos, a entrada de água no modelo do distribuidor é desligada. A simulação física, realizada com o distribuidor trabalhando em regime permanente, com tempos de residência teóricos de $\bar{t} = 16,2$ minutos, $\bar{t} = 15$ minutos e $\bar{t} = 13,2$ minutos para as velocidades de lingotamento de 0,69 m/min; 0,77 m/min e 0,86 m/min, respectivamente.

A peneira metálica para separação do material particulado simulador de inclusões está acoplada no veio central e em um dos veios laterais, o segundo veio lateral é obtido por espelhamento, totalizando três veios de saída. A figura 11 apresenta a peneira metálica em um dos veios de saída do distribuidor.



Figura 11 - Partículas passantes nos veios de saída do modelo físico do distribuidor (Autor, 2022).

Os filtros são retirados, é verificada a presença de partículas, eles são colocados na estufa, com ajuste de temperatura em 70 °C e por período de 1h 30 min, conforme figura 12.



Figura 12 - Secagem de partículas passantes na estufa (Autor, 2022).

Transcorrido esse tempo, o polietileno de alta densidade (PEAD) seco é pesado e a granulometria do material é analisada por meio do granulômetro Cilas 1190 para verificar a distribuição percentual das partículas por faixa de diâmetro, representado nas figuras 13 e 14, respectivamente.



Figura 13 - Pesagem das partículas secas no filtro de saída do distribuidor (Autor, 2022).

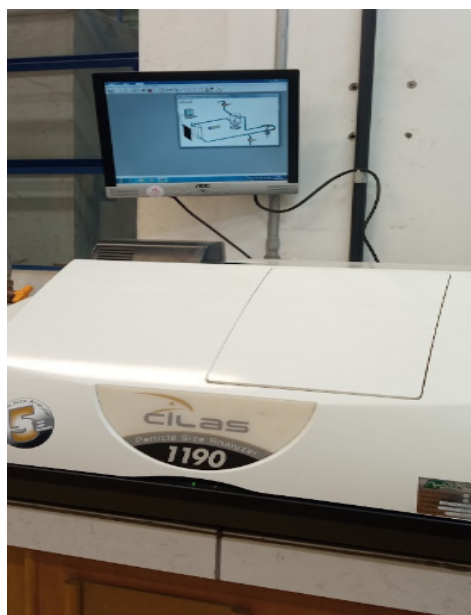


Figura 14 - Análise das partículas no granulômetro Cilas 1190 (Do Autor, 2023).

Calcula-se o percentual de inclusões passantes (% *RRI*) pela razão entre a massa obtida após secagem (inclusões passantes pelo veio) e a massa de inclusões adicionadas através do tubo longo.

$$\%RRI = \frac{\text{Quantidade de inclusões que saíram pelo veio}}{\text{Quantidade de inclusões de que foram adicionadas pela válvula}} \times 100$$

Equação 27 - Razão residual da inclusão (Machado, 2014).

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.

Todos os ensaios foram realizados em triplicata com o modelo operando em regime permanente, empregando um inibidor de turbulência e em diferentes velocidades de lingotamento usualmente utilizadas na indústria: 0,69 m/min; 0,77 m/min e 0,86 m/min.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Esta seção é dividida em: razão residual de inclusões passantes, composição mássica de inclusões passantes, composição média de inclusões passantes e conversão de resultados do modelo físico para o modelo industrial.

5.1 RAZÃO RESIDUAL DE INCLUSÕES PASSANTES

Na Tabela 3 estão apresentados os resultados encontrados no ensaio de remoção de inclusões. O percentual encontrado deve ser entendido como a quantidade de inclusões que entram no modelo e passam pelo veio. Ou então na prática, as inclusões que não seriam captadas pela camada de escória presente na superfície do banho.

Tabela 3 - Resultado de inclusões passantes do ensaio de remoção de inclusões.

Ensaio	Velocidade (m/min)	RRI (%) veio lateral	RRI (%) veio lateral	RRI (%) veio central	RRI (%) total	Desvio Padrão	Média
I	0,69	0,295	0,295	0,40	0,99	0,05	0,33
II	0,69	0,645	0,645	0,36	1,65	0,13	0,55
III	0,69	0,545	0,545	0,17	1,26	0,18	0,42
I	0,77	0,48	0,48	0,22	1,18	0,12	0,39
II	0,77	0,415	0,415	0,21	1,04	0,10	0,35
III	0,77	0,455	0,455	0,19	1,10	0,12	0,37
I	0,86	0,11	0,11	0,11	0,33	0,00	0,11
II	0,86	0,20	0,20	0,07	0,47	0,06	0,16
III	0,86	0,375	0,375	0,15	0,90	0,11	0,30

Fonte: Autor, 2023.

O desvio-padrão é calculado para os ensaios I, II e III, e representam uma medida para identificar a dispersão dos resultados, ou seja, indica quão homogêneos são os dados obtidos. Os resultados próximos de zero indicam baixa variabilidade e baixa dispersão, com boa precisão dos dados.

Os resultados médios dos ensaios I, II e III demonstraram que para uma configuração em regime permanente e velocidades de 0,69 m/min; 0,77 m/min e

0,86 m/min, houve baixo teor inclusionário nos veios de saída, representando que de forma geral, a maioria das inclusões inseridas no distribuidor atendeu ao processo de flotação e permanência na camada superior do fluido, indicando bons níveis de limpidez na saída do fluido simulador.

5.2 COMPOSIÇÃO MÁSSICA DE INCLUSÕES PASSANTES

O balanço de massa para este sistema foi realizado empregando a equação 11 (Ver tópico 3.8.1), para um sistema em operação permanente sem transformação química (reação).

Os valores das composições mássicas de inclusões passantes, em função das velocidades utilizadas, para uma entrada mássica de 147 g e para uma saída mássica dos dois veios laterais cada e veio central, são representados na tabela 4.

Tabela 4 - Composição mássica de inclusões passantes em função das velocidades de lingotamento.

Ensaio	Velocidade (m/min)	Entrada no veio (g)	Saída veio lateral (g)	Saída veio lateral (g)	Saída veio central (g)	Saída Mássica total (g)	Desvio Padrão	Média
I	0,69	147	0,433	0,433	0,59	1,456	0,07	0,49
II	0,69	147	0,946	0,946	0,532	2,424	0,20	0,81
III	0,69	147	0,798	0,798	0,257	1,853	0,26	0,62
I	0,77	147	0,708	0,708	0,318	1,734	0,18	0,58
II	0,77	147	0,609	0,609	0,312	1,53	0,14	0,51
III	0,77	147	0,667	0,667	0,281	1,615	0,18	0,54
I	0,86	147	0,163	0,163	0,16	0,486	0,00	0,16
II	0,86	147	0,291	0,291	0,107	0,689	0,09	0,23
III	0,86	147	0,554	0,554	0,217	1,325	0,16	0,44

Fonte: Autor, 2023.

Com base nos resultados das médias mássicas foi calculado a variação estatística das amostras resultantes, dentro do grupo de velocidades de 0,69 m/min; 0,77 m/min e 0,86 m/min, onde obteve-se os valores de 5,37% ; 2,96% e 2,51%, respectivamente, indicando baixa variabilidade e maior precisão dos resultados obtidos.

Os indicadores apresentados demonstram um percentual de inclusões passantes maiores para os veios laterais do que para o veio central, indicando que

houve maior limpidez inclusionária nos veios centrais. Essas relações serão elucidadas no tópico 6.

De acordo com os resultados, apenas 1,21% ; 1,10% e 0,56% do total de inclusões entrantes no distribuidor (147 g) saíram pelos veios nas velocidades de 0,69 m/min ; 0,77 m/min e 0,86 m/min, respectivamente. O baixo percentual de saída em relação à massa total de entrada expressa que dada essas configurações de velocidade, o distribuidor obteve bons níveis de limpidez inclusionária nos veios já que boa parte das inclusões ascendeu para a camada superior.

5.3 COMPOSIÇÃO MÉDIA DE INCLUSÕES PASSANTES

Os ensaios de remoção de inclusões, para as velocidades de lingotamento de 0,69 m/min, 0,77 m/min e 0,86 m/min, foram realizados em forma de triplicata. Os resultados individuais para cada ensaio realizado neste trabalho podem ser obtidos no apêndice. Os percentuais médios de inclusões passantes em função do diâmetro da partícula, para cada veio lateral e do veio central, estão dispostos na tabela 5.

Tabela 5 - Composição percentual média de inclusões passantes em função do diâmetro da partícula.

Diâmetro modelo	Diâmetro usina	Média (0,69 m/min)	Média (0,69 m/min)	Média (0,77 m/min)	Média (0,77 m/min)	Média (0,86 m/min)	Média (0,86 m/min)	Desvio padrão
Polietileno (µm)	Usina (µm)	Veio lateral	Veio central	Veio lateral	Veio central	Veio lateral	Veio central	Desvio padrão
500	140	35,45 %	35,60%	37,60%	26,87%	32,67%	26,94%	0,044
250	70	18,21%	18,10%	19,30%	22,21%	16,58%	21,68%	0,020
180	50	33,19%	33,01%	33,60%	37,42%	33,80%	34,90%	0,015
75	20	8,92%	8,93%	5,72%	9,18%	9,35%	10%	0,014
38	10	2,77%	2,82%	2,82%	3,50%	6,72%	5,66%	0,016

Fonte: Autor, 2023.

De acordo com percentual apresentado na tabela 5, para microinclusões de até 75 µm, notou-se um aumento no percentual de saída conforme o aumento da

velocidade de lingotamento e menor tempo teórico de ensaio, visto que inclusões menores têm menor velocidade de ascensão no aço e sua remoção é mais dificultada com menor tempo de operação para flotação.

Para a faixa de macroinclusões de 500 μm , houve uma redução no percentual de saída conforme o aumento da velocidade de lingotamento e menor tempo teórico de ensaio, visto que macropartículas têm um comportamento mais acelerado de flotação e a diminuição de tempo de operação faria com que concentração de macropartículas na parte superior do fluido durasse menos tempo e não ocorresse a reversão dessas macropartículas dentro do fluido devido a transferência de momento. A transferência de momento é a movimentação de energia dentro de um fluido, sendo que, em física de partículas, pode ser denominada como a energia transferida entre partículas durante uma interação.

Além disso, as inclusões de diâmetros de 180 μm e 500 μm obtiveram resultados próximos em termos percentuais de inclusões passantes, que será objeto de discussão.

Outras hipóteses levantadas em relação ao resultados são que, a configuração dos ensaios foi benéfica para as faixas de inclusões de 38 μm , 75 μm , 250 μm , que podem ter migrado para a zona de fluxo pistonado, e com maior tempo de permanência nessa zona do fluido, aumentaria o gradiente de ascensão dessas partículas para a camada sobrenadante, o que culminou em menor saída de inclusões no veio.

Já para a faixa de partículas de 180 μm pode ter ocorrido a migração destas para a zona de volume morto, o que acarretou na estagnação dessas partículas e baixa velocidade de ascensão, gerando uma saída mássica significativa dessa faixa para os veios.

E para a faixa de 500 μm se supõe que as mesmas migraram para a zona de fluxo perfeita, com mais rapidez devido a um maior gradiente de energia cinética devido ao grande diâmetro da partícula, entretanto, com a alta concentração dessas inclusões na camada sobrenadante pode ter corrido o efeito de reversão devido a maior transferência de energia entre as macroinclusões, levando a reintrodução destas para o fluido.

Importante citar que não foram realizados ensaios de distribuição de tempos de residência para este trabalho, e essas são apenas hipóteses levantadas acerca dos dados conhecidos na literatura e dos resultados observados no trabalho.

5.4 CONVERSÃO DE RESULTADOS DO MODELO FÍSICO PARA O MODELO INDUSTRIAL

Conforme mencionado no tópico 3.3, para obter a condição de similaridade entre o modelo e o protótipo do distribuidor de lingotamento contínuo é necessário a manutenção dos números de Reynolds e de Froude. O número de Froude estabelece a relação entre as forças de inércia e da gravidade, sendo a gravidade um dos fatores essenciais para a operação de lingotamento.

A relação da vazão volumétrica (Q) do modelo (m) e do protótipo (p), utilizando o número de Froude, é apresentada na equação 28. Na qual, a letra λ , representa o fator de escala entre modelo e protótipo, sendo o modelo de escala 1:1 empregado neste estudo.

$$\frac{Q_m}{Q_p} = \lambda^{5/2}$$

Equação 28 - Relação adimensional entre a vazão volumétrica do modelo (m) e o protótipo (p) empregando o número de Froude (MENDONÇA, 2016).

Desta forma, verifica-se que os valores de vazões volumétricas do fluido de 7200 L/h, 8000 L/h e 9000 L/h empregados no modelo são mantidos igualmente no protótipo, conforme a similaridade de Froude.

A relação da velocidade de lingotamento (v) do modelo (m) e do protótipo (p), utilizando o número de Froude, é apresentada na equação 29. Os valores de velocidade de lingotamento do fluido de 0,69 m/min ; 0,77 m/min e 0,86 m/min empregados no modelo são mantidos igualmente no protótipo, conforme a similaridade de Froude.

$$\frac{v_m}{v_p} = \sqrt{\lambda}$$

Equação 29 - Relação adimensional entre a velocidade de lingotamento do modelo (m) e o protótipo (p) empregando o número de Froude (MENDONÇA, 2016).

Conforme as condições de similaridade entre a relação granulométrica do protótipo - modelo de inclusões mencionadas no tópico 3.4, é realizado o cálculo da

relação granulométrica comparativa entre polietileno de alta densidade e inclusão de alumina no fluido simulador, obtida através da equação 30.

$$\rho_{fl,m} = \left(\frac{m_{inc,m}}{V_{dt,m}} \right)$$

Equação 30 - Relação granulométrica protótipo-modelo (Adaptado de Machado, 2014).

Onde, $\rho_{fl,m}$ é a massa específica do fluido empregado no modelo (g/m^3), $m_{inc,m}$ é a massa da inclusão no modelo (g) e $V_{dt,m}$ é o volume do modelo físico do distribuidor (m^3). A massa de polietileno de alta densidade injetada no distribuidor (147 g) e o volume do distribuidor do modelo físico (2 m^3), apresentam a concentração de entrada de alumina equivalente a 73,5 mg/L ou 73,5 ppm.

Importante citar que não foi realizado um estudo de concentração de inclusões do aço na planta industrial, sendo que diferentes concentrações de inclusões simuladas no modelo físico podem modificar o resultado final da remoção de inclusões, e que este cálculo é uma equivalência pressuposta conforme a relação do material simulador com o industrial empregado (Vide tópico 3.2).

A tabela 6, apresenta a equivalência do teor de saída da alumina, para os ensaios realizados, conforme valores calculados para a relação granulométrica do protótipo - modelo.

Tabela 6 - Equivalência de saída do teor de alumina em relação ao polietileno de alta densidade.

Ensaio	Velocidade de lingotamento (m/min)	Teor de alumina do veio lateral (mg/L)(ppm)	Teor de alumina do veio lateral (mg/L)(ppm)	Teor de alumina do veio central (mg/L)(ppm)	Teor de Alumina total (mg/L)(ppm)	Média de Alumina	Desvio Padrão
I	0,69	0,216	0,216	0,295	0,727	0,24	0,04
II	0,69	0,473	0,473	0,266	1,212	0,40	0,10
III	0,69	0,399	0,399	0,128	0,926	0,31	0,13
I	0,77	0,354	0,354	0,159	0,867	0,29	0,09
II	0,77	0,304	0,304	0,156	0,764	0,25	0,07
III	0,77	0,333	0,333	0,14	0,806	0,27	0,09
I	0,86	0,081	0,081	0,08	0,242	0,08	0,00
II	0,86	0,145	0,145	0,053	0,343	0,11	0,04
III	0,86	0,277	0,277	0,108	0,662	0,22	0,08

Fonte: Autor, 2023.

O desvio-padrão é calculado para os teores de equivalência da alumina, sendo que os resultados próximos de zero indicam a baixa variabilidade e baixa dispersão dos elementos dos resultados analisados.

Os resultados médios para os teores de equivalência da alumina indicam que houve baixo teor inclusivo nos veios de saída, principalmente para o veio central, onde obteve-se bons níveis de limpeza inclusiva.

6 DISCUSSÃO

Os autores Chattopadhyay e Isac (2012) citam que o comportamento de flotação da inclusão é um vetor de velocidade, sendo este derivado da combinação do vetor da Lei de Stokes e vetores associados à velocidade de escoamento do aço. Autores como Lee, Tse, Yi et al (2001) e Daoud (2006) abordam que fatores como o diâmetro da inclusão influenciam a velocidade de ascensão da partícula. Partículas menores apresentam menor velocidade de ascensão enquanto partículas maiores apresentam maior velocidade de ascensão e maior facilidade de remoção por flotação.

A velocidade de ascensão das partículas em função do diâmetro é calculada pela lei de Stokes, para um número de Reynolds menor que 1, assumindo forma esférica e condições de escoamento de um fluido viscoso (Coelho, 2013) e é dada pela equação 31:

$$v = (2gr^2 \Delta\rho) / 9\mu$$

Equação 31 - Lei de Stokes

Onde, v é velocidade de ascensão da partícula (cm/s), g é aceleração da gravidade (cm/s^2), r é raio da partícula (inclusão) (cm), $\Delta\rho$ é diferença da densidade líquido/partícula (g/cm^3) e μ = coeficiente de viscosidade do líquido (poise).

Para os valores da velocidade em função do diâmetro da partícula no modelo físico, temos os seguintes resultados, conforme tabela 7. Os valores da velocidade em função do diâmetro da partícula na indústria, para fins de percepção, são apresentados na tabela 8.

Tabela 7 - Velocidade da partícula em função do diâmetro para o modelo físico.

Polietileno (μm)	Velocidade da partícula (cm/s)
500	0,679
250	0,169
180	0,088
75	0,0153
38	0,0040

Fonte: Autor, 2023.

Tabela 8 - Velocidade da partícula em função do diâmetro para a indústria.

Usina (μm)	Velocidade da partícula cm/s
140	1,282
75	0,368
50	0,163
20	0,0262
10	0,00654

Fonte: Autor, 2023.

Evidentemente, nota-se pelos resultados obtidos nos ensaios com o modelo físico, que a lei de Stokes assumiu validade em inclusões passantes para a faixa de diâmetro de até 250 μm . Conclui-se que o processo atendeu o mecanismo de remoção de inclusões para estas faixas facilitou a flotação e à migração destas inclusões para a camada mais ascendente do fluido.

Contudo, nos três ensaios realizados as inclusões de diâmetros de 180 µm e 500 µm obtiveram resultados próximos em termos percentuais de inclusões passantes, o que implica dizer que, para os resultados obtidos nestes ensaios com velocidades de 0,69 m/min; 0,77 m/min e 0,86 m/min, um diâmetro maior (500 µm) não teve influência na permanência dessas partículas da camada mais ascendente do fluido. Neto e co-autores (2002) citam que a lei de Stokes é limitada e somente aplicável e válida para micro inclusões sólidas.

Silva (2018) cita em seu estudo que, em uma panela industrial de aciaria, a escória faria a fixação das inclusões, entretanto, no caso de uma escória saturada de inclusões, elas se situariam na parte superior da panela e seriam introduzidas de volta para o banho em caso de tempos longos de tratamentos. A reinserção de inclusões já removidas para o banho metálico recebe o nome de reversão ou recirculação.

Uma alta velocidade de ascensão da partícula implica que os gradientes de velocidade no banho metálico também serão maiores, tanto para ascensão quanto para descensão. Desta forma, a velocidade de ascensão maior pode auxiliar a remover as inclusões mais rapidamente, entretanto, também pode reintroduzir essas inclusões mais rapidamente. Com o aumento da concentração de macroinclusões na camada sobrenadante do banho, o fenômeno da reversão se torna maior, devido à maior transferência de energia (momentum) gerado entre as partículas.

Nos ensaios efetuados no modelo físico não existe uma camada simuladora da escória para fixação das inclusões, portanto poderia também simular o pior cenário em que a escória está saturada em inclusões e não às fixa mais.

Assim, os autores Kroll-Rabotin et al (2020), abordam que o número de Reynolds da partícula também teria uma influência na trajetória da partícula, além do diâmetro da partícula em si, o qual é calculado através da equação 32.

$$Re = \rho v D / \mu$$

Equação 32 - Equação de Reynolds

Onde, ρ é massa específica da partícula (kg/m³), v é velocidade relativa da partícula (m/s), D é o diâmetro da partícula (m) e μ é a viscosidade dinâmica do fluido (kg/m.s).

Os autores afirmam que, para um número de Reynolds da partícula maior que 1, um ciclo de recirculação se aproxima da partícula e leva a um maior componente da velocidade em função do plano de simetria Z, apresentada na figura 15:

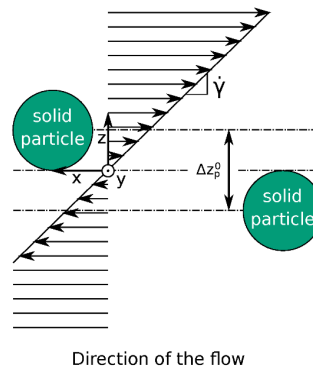


Figura 15 - Orientação das partículas nos eixos de simetria (KROLL-RABOTIN et al, 2020).

Esse ciclo faz com que a velocidade desvie a partícula, que conseqüentemente, interage na direção oposta. Os ensaios apresentados, mostraram um valor de $Re = 3,14$ para as partículas de $500 \mu m$, onde se obteve um percentual grande de inclusões passantes, provavelmente esse resultado se deve ao aumento da turbulência, devido a $Re > 1$ da partícula, onde mais energia é perdida, pois o choque entre as partículas do fluido e entre estas com a parede do distribuidor vai sendo intensificado. O número de Reynolds em função do diâmetro das partículas utilizadas nos ensaios no modelo físico é dado pela tabela 9, já o número de Reynolds em função do diâmetro das partículas na indústria, para fins de percepção, são apresentados na tabela 10.

Tabela 9 - O número de Reynolds em função do diâmetro da partícula no modelo físico.

Diâmetro (μm)	Reynolds da partícula (adimensional)
500	3,4
250	0,42
180	0,15
75	0,011
38	0,0015

Fonte: Autor, 2023.

Tabela 10 - O número de Reynolds em função do diâmetro da partícula na indústria.

Diâmetro (μm)	Reynolds da partícula (adimensional)
140	5,60
75	0,86
50	0,25
20	0,016
10	0,002

Fonte: Autor, 2023.

Os autores Liu et al (2021) corroboram com a visão de Neto e co-autores (2002) e citam que somente micropartículas obedecem ao fluxo de Stokes. Um modelo de dinâmica de fluidos computacional (CFD) foi utilizado pelos autores para validar o comportamento de três faixas de raio de inclusões (10 μm , 100 μm e 1000 μm). O modelo numérico foi validado por experimento em modelo físico utilizando água como fluido simulador.

Os autores apresentam em seu trabalho, os mapas de contorno de velocidade das inclusões durante a flutuação com raio de 10, 100 e 1000 μm , representados na figura 16, fornecendo detalhes das condições de fluxo do fluido circundantes. As distribuições de velocidade circundantes das inclusões de 10 μm e 100 μm são semelhantes, enquanto o campo de fluxo da inclusão de 1000 μm tem uma área relativamente menor. No caso da inclusão de 1000 μm , o fluxo descendente é relativamente próximo do corpo de inclusão em comparação com a inclusão de menor tamanho.

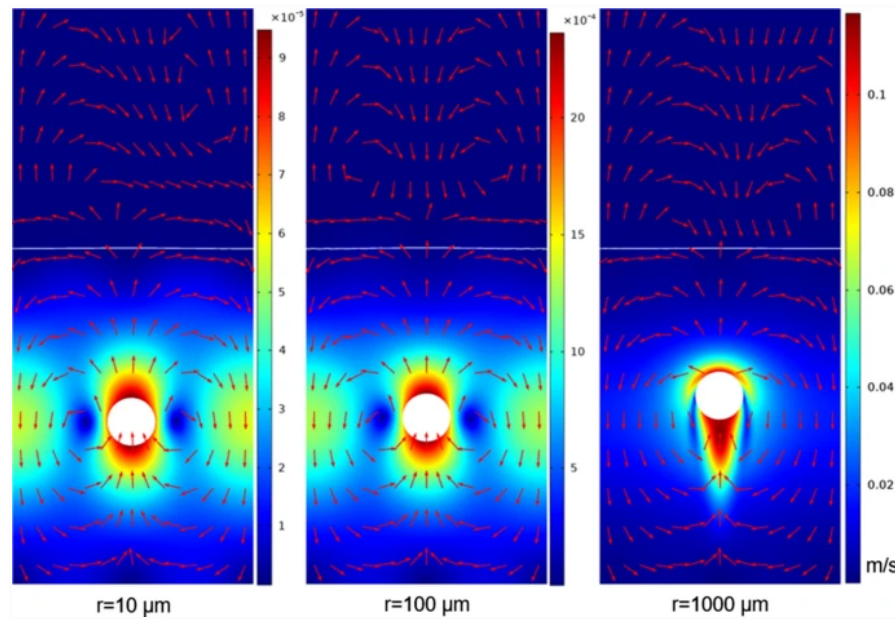


Figura 16 - Mapas de contorno de velocidade do fluido de inclusões em estado estacionário com raios de 10, 100 e 1000 μm (LIU et al, 2021).

As inclusões flutam e atingem a velocidade terminal, que é a velocidade máxima alcançada por um objeto à medida que flutua através de um fluido. Li *et al*, (2021) citam que a maioria dos estudos utilizam a Lei de Stokes para determinar a velocidade da partícula no fluido, onde os fluxos laminares das partículas satisfazem a lei de Stokes ($Re < 1$), ou seja, onde forças viscosas são dominantes. Entretanto, inclusões maiores possuem $Re > 1$, e por isso, não obedecem a lei de Stokes, sendo regidas por forças de inércia.

Além disso, os autores Yang et al (2018), analisaram a distribuição espacial de inclusões e sua trajetória dentro do distribuidor, e demonstraram que em fluxos turbulentos, pode ocorrer uma zona de recirculação, formando vórtices de fluxo nas laterais do distribuidor e um pequeno vórtice acima da saída central, enquanto o restante flui ao longo do fundo do distribuidor. Os percentuais de inclusões passantes maiores para os veios laterais do que para o veio central obtidos neste trabalho, corroboram com a literatura citada.

Os resultados encontrados nos ensaios e validados pela literatura, explicam o percentual das partículas passantes nos ensaios I, II e III com velocidades de 0,69 m/min; 0,77 m/min e 0,86 m/min, efetuados no modelo físico do distribuidor. Na faixa de até 250 μm de diâmetro, o fluxo da partícula satisfaz a lei de Stokes e

devido a isso, o processo atendeu o mecanismo de remoção de inclusões, já para a faixa de diâmetro de 500 μm da partícula, o fluxo da partícula satisfaz o adimensional de Reynolds, onde houve maior evidência de forças de inércia e maior percentual de partículas passantes para essa faixa.

CONCLUSÕES

O ensaio de remoção de inclusões no modelo físico do distribuidor de lingotamento contínuo utilizando micropartículas de polietileno como simulador das inclusões e água como fluido de simulação do aço é viável do ponto de vista experimental, conforme mostrado pelos resultados obtidos em laboratório.

Para análise dos resultados dos ensaios de remoção de inclusões, verificou-se que existem dois efeitos que são importantes para compreensão destes resultados: a ascensão das partículas e a reversão das partículas, sendo estes efeitos discutidos ao longo do trabalho.

O desvio-padrão calculado para os ensaios indicam homogeneidade nos dados obtidos, além de baixa variabilidade e baixa dispersão, com boa precisão dos resultados dos ensaios.

Os resultados médios da triplicata de ensaios demonstraram que para uma configuração em regime permanente e velocidades de 0,69 m/min; 0,77 m/min e 0,86 m/min, houve baixo teor inclusionário nos veios de saída, especialmente no veio central, onde ocorreu menor saída mássica. Representando que, a maioria das inclusões inseridas no distribuidor atendeu ao processo de flotação e permanência na camada superior do fluido, indicando bons níveis de limpidez nos veios de saída.

A lei de Stokes assumiu validade em inclusões passantes para a faixa de diâmetro de até 250 μm nos resultados obtidos nos ensaios I, II e III com velocidades de 0,69 m/min; 0,77 m/min e 0,86 m/min, empregadas. Conclui-se que o processo atendeu o mecanismo de remoção de inclusões, que facilitou a flotação e à migração destas inclusões para a camada mais ascendente do fluido.

O adimensional de Reynolds da partícula assumiu validade em inclusões passantes para a faixa de diâmetro de 500 μm , devido aos resultados de $Re > 1$ para essa faixa de inclusão, o que explica a trajetória ascendente e descendente dessa faixa de macro inclusões durante os ensaios efetuados no distribuidor de lingotamento contínuo e os percentuais de inclusões passantes para essa faixa de diâmetro, visto que o fenômeno de reversão se torna maior, devido à maior transferência de energia (momentum) gerado entre essas partículas.

SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

O ensaio de remoção de inclusões pode ter resultados mais aprimorados sobre o efeito da cinética das partículas em cada zona via emprego das curvas de distribuição de tempos de residência para cada configuração testada.

Realizar a granulometria das partículas entrantes e quantificação e análise das inclusões flotantes, a fim de aprimorar os resultados do desempenho do distribuidor.

Além disso, recomenda-se o emprego da padronização dos tempos de ensaios para diferentes velocidades de lingotamento, para analisar a distribuição granulométrica e verificar o efeito do tempo em diferentes configurações de velocidades.

REFERÊNCIAS

Aguiar, Péricles Guimarães Oliveira; Castro, Luis Fernando Andrade de. Balanço de massa integrado entre alto-forno e estação de pré-tratamento do gusa, p. 560-568. In: 46º Seminário de Redução/ 17º Minério de Ferro/ 4º Aglomeração, Rio de Janeiro, 2016.

ISSN: 2594-357X , DOI 10.5151/2594-357X-27989

Alencar, Roberto Abreu. Análise de tempos e balanço de massa do processo da aciaria de uma siderúrgica de grande porte. 2017. 70 f. Monografia (Graduação em Engenharia Metalúrgica) - Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2017.

<http://www.repositorio.ufc.br/handle/riufc/28644>

Alves, João Geraldo. Melhoria no padrão de escoamento do aço líquido no distribuidor do lingotamento contínuo 01 da APERAM Inox América do Sul. Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas da Universidade Federal de Minas Gerais Belo Horizonte, Escola de Engenharia da UFMG, 2014.

<https://ppgem.eng.ufmg.br/defesas/1522M.PDF>

Alves, João Geraldo; Tavares, Roberto Parreiras. Estudo do escoamento do aço líquido no distribuidor do lingotamento contínuo 01 da aperam inox america do sul , p. 2343-2351. In: 45º *Seminário de Aciaria - Internacional*, Porto Alegre - Brasil, 2014. ISSN: 2594-5300 , DOI 10.5151/1982-9345-24503

Amorim, Laudinei. Estudo de mistura de aços em distribuidor e nos veios aplicando simulação numérica, modelagem física e validação em planta industrial. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Ouro Preto. Universidade Federal de Ouro Preto, Escola de Minas, Rede Temática em Engenharia de Materiais, 2018.

https://www.repositorio.ufop.br/bitstream/123456789/10803/1/DISSERTA%C3%87%C3%83O_EstudoMisturaA%C3%A7os.pdf

Ananias, João Vítor Gomes Guimarães; Gabriel, Weslei Viana; Oliveira, Thiago Araujo Santos de; Abreu, Salvatore Giuliano Peixoto Tropia de; Silva, Itavahn Alves da; Peixoto, Johné Jesus Mol; Silva, Carlos Antônio da. Fluxo assimétrico em um distribuidor de dois veios e seu efeito sobre a qualidade do aço, p. 607-618. In: 50º *Seminário de Aciaria, Fundição e Metalurgia de Não-Ferrosos*, São Paulo, 2019.

ISSN: 2594-5300 , DOI 10.5151/2594-5300-33695

Arruda, José Dimas de. Análise via modelagem física e matemática da turbulência na interface metal/escória na região do menisco em um molde de lingotamento contínuo de placas. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Ouro Preto. Universidade Federal de Ouro Preto, Escola de Minas, Rede Temática em Engenharia de Materiais, 2015.

https://www.repositorio.ufop.br/bitstream/123456789/5802/1/DISS_%20An%C3%A1liseModelagemF%C3%ADsica.pdf

Arzpeyma N, Gyllenram R, Jönsson PG. Development of a Mass and Energy Balance Model and Its Application for HBI Charged EAFs. *Metals*. 2020; 10(3):311.

<https://doi.org/10.3390/met10030311>

Botelho, Thales; Medeiros, Gabriel Evangelista; Silva, André Luiz Vasconcellos da Costa e; Serra, Juliano Graziel. Estimativa da quantidade de escória passante no vazamento do fea através de balanço de massa, p. 311-319. In: *47th Steelmaking Seminar - International*, Rio de Janeiro, 2016.
ISSN: 2594-5300 , DOI 10.5151/1982-9345-27686

Boudjabi, Amel Férial; Bellaouar, Ahmed; Lachi, Mohammed; Elwakil, Nadim. (2008). Physical Modelling of a Continuous Casting Tundish: a Parametric Study of Residence Time Distribution Curves.
https://www.researchgate.net/publication/237286266_Physical_Modelling_of_a_Continuous_Casting_Tundish_a_Parametric_Study_of_Residence_Time_Distribution_Curves

Braga, B.M., Tavares, R.P. Similarity Criteria for the Study of Removal of Spherical Non-metallic Inclusions in Physical Models of Continuous Casting Tundishes: A More Fundamental Approach. *Metall Mater Trans B* 49, 2343–2356 (2018).
<https://doi.org/10.1007/s11663-018-1328-2>

Campos, Camila de Castro. Transiente térmico num distribuidor durante troca de painéis e influência sobre o padrão de fluxo. 2019. 47 f. Monografia (Graduação em Engenharia Metalúrgica) - Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2019.

Coelho, Paulo. Lei de Stokes - Estudo da Viscosidade na Mecânica dos Fluidos, 2013. Disponível em: <Lei de Stokes - Estudo da Viscosidade na Mecânica dos Fluidos - Engquimicasantosp>. Acesso em: 11 de agosto de 2023.

Chattopadhyay, K.; ISAC, M. Dimensionless numbers for tundish modelling and the Guthrie number (Gu). *Ironmaking and Steelmaking*, v. 39, p. 273-83, 2012.
<https://doi.org/10.1179/1743281211Y.0000000041>

Chiaverini, V. Aços e Ferros Fundidos. 7.ed. São Paulo: ABM, 1996. 599p.

Costa e Silva, André Luiz Vasconcellos da. The effects of non-metallic inclusions on properties relevant to the performance of steel in structural and mechanical applications, *Journal of Materials Research and Technology*, Volume 8, Issue 2, 2019, Pages 2408-2422, ISSN 2238-7854, <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2019.01.009>.

Daoud, Ismael Lis Alves. Estudo numérico do escoamento e do comportamento de inclusões não-metálicas em distribuidores de lingotamento contínuo de aço. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Escola de Engenharia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Minas, Metalúrgica e de Materiais, 2006. <http://hdl.handle.net/10183/8233>

E.I. Castro-Cedeno, A. Jardy, B. Boissiere, J. Lehmann, P. Gardin, A. Carré, S. Gerardin, Jean-Pierre Bellot, Numerical simulation of modification of non-metallic inclusions by calcium treatment in the argon-stirred ladle, *Metall. Res. Technol.* 116, 515 (2019). <https://doi.org/10.1051/metal/2018131>

Élida Gonçalves das Neves; Marcus Novaes Motta; José Flávio Viana. Previsão da limpeza do aço a partir da composição química da escória, p. 2064-2071. In: *45º Seminário de Aciaria - Internacional*, Porto Alegre - Brasil, 2014.
ISSN: 2594-5300 , DOI 10.5151/1982-9345-24256

Ekmekçi, İ., Yetisken, Y. & Çamdali, Ü. Mass Balance Modeling for Electric Arc Furnace and Ladle Furnace System in Steelmaking Facility in Turkey. *J. Iron Steel Res. Int.* 14, 1–6 (2007). [https://doi.org/10.1016/S1006-706X\(07\)60064-8](https://doi.org/10.1016/S1006-706X(07)60064-8)

Gabriel, Wesley Viana. Estudos sobre transiência e oscilação superficial em molde de Beam Blank e seus efeitos sobre a qualidade do aço. 2020. 154 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Materiais), Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2020.

<http://www.repositorio.ufop.br/handle/123456789/12404>

Galante, G.S., da Silva, C.A., Reis, R.F. et al. Estudos de Remoção de Inclusão em um Tundish de Duas Fitas: Efeito da Substituição de Inibidor de Turbulência por Barragens e Efeito de Assimetria de Conjunto de Concha e Cobertura de Concha Empregando Modelagem Física e Matemática. *Trans Indian Inst Met* (2023).

<https://doi.org/10.1007/s12666-023-02890-9>

Gomes, Misael Peixoto. Estudo da otimização do perfil refratário do distribuidor para redução da perda metálica no processo do lingotamento contínuo da csp.

Dissertação de mestrado acadêmico em Engenharia e Ciência de Materiais do Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciências dos Materiais do Centro de Tecnologia da Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2021.

Guedes, Thiago César Souza. Avaliação do comportamento das inclusões não metálicas de um aço peritético durante as etapas finais de refino. Monografia no Curso de Engenharia Metalúrgica do Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais da Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2017.

<http://www.repositorio.ufc.br/handle/riufc/29292>

Guthrie, Roderick and Isac, Mihaiela. "In-Situ Sensors for Liquid Metal Quality" *High Temperature Materials and Processes*, vol. 31, no. 4-5, 2012, pp. 633-643.

<https://doi.org/10.1515/htmp-2012-0101>

Holappa, L.; Helle, A. S. Inclusion Control in High-Performance Steels. *Journal of Materials Processing Technology*, v. 53, p. 177-186, 1995.

[https://doi.org/10.1016/0924-0136\(95\)01974-J](https://doi.org/10.1016/0924-0136(95)01974-J)

Hudson, S.W., Apelian, D. Detecção de inclusão em alumínio fundido: arte atual e novas avenidas para análise in situ. *Inter Metalcast* 10, 289–305 (2016).

<https://doi.org/10.1007/s40962-016-0030-x>

Isac, Mihaiela et al. Development of an Aqueous Particle Sensor (APSIII) System as a Research Tool for Studying the Behavior of Inclusions in Water Models of Tundish Operations. *Sensors, Sampling, and Simulation for Process Control*, p. 27-34, 2011.

<https://doi.org/10.1002/9781118061800.ch3>

Jung-Soo Cho, Hae-Geon Lee, Cold Model Study on Inclusion Removal from Liquid Steel Using Fine Gas Bubbles, *ISIJ International*, 2001, Volume 41, Issue 2, Pages 151-157, Released on J-STAGE May 31, 2007, Online ISSN 1347-5460, Print ISSN 0915-1559, <https://doi.org/10.2355/isijinternational.41.151>

Kinnor Chattopadhyay, Mihaiela Isac, Roderick I. L. Guthrie, Physical and Mathematical Modelling to Study the Effect of Ladle Shroud Mis-alignment on Liquid

Metal Quality in a Tundish, *ISIJ International*, 2011, Volume 51, Issue 5, Pages 759-768, Released on J-STAGE May 13, 2011, Online ISSN 1347-5460, Print ISSN 0915-1559, <https://doi.org/10.2355/isijinternational.51.759>

Kroll-Rabotin, J.-S.; Gisselbrecht, M.; Ott, B.; May, R.; Fröhlich, J.; Bellot, J.-P. Multiscale Simulation of Non-Metallic Inclusion Aggregation in a Fully Resolved Bubble Swarm in Liquid Steel. *Metals* 2020, 10, 517. <https://doi.org/10.3390/met10040517>

K Chattopadhyay & M Isac (2012) Dimensionless numbers for tundish modelling and the Guthrie number (*Gu*), *Ironmaking & Steelmaking*, 39:4, 278-283, DOI: 10.1179/1743281211Y.0000000041

Kumar, S., Keshari, K.K., Deva, A. et al. Abrupt Casting Failures Due to Sub Entry Nozzle Clogging in Calcium Treated Aluminum Killed Steel. *J Fail. Anal. and Preven.* 23, 221–233 (2023). <https://doi.org/10.1007/s11668-022-01569-5>

Liu, W., Liu, J., Liu, T. et al. Numerical and Physical Modeling of Liquid Inclusion's Behaviors in Steel-Slag Two-Phase System. *JOM* 74, 1568–1577 (2022). <https://doi.org/10.1007/s11837-022-05184-5>

Liu, W., Liu, J., Zhao, H. et al. Modelagem CFD de Movimento de Inclusão Sólida e Separação de Aço Líquido para Escória Derretida. *Metall Mater Trans B* 52, 2430–2440 (2021). <https://doi.org/10.1007/s11663-021-02203-9>

Lu, Jinlin & Li, Shihan & Luo, Zhiguo & Zou, Zongshu & Shao, Lei. (2022). Numerical simulation of collision removal of inclusion in swirling flow tundish. *International Journal of Chemical Reactor Engineering*. 20. 10.1515/ijcre-2021-0300.

Machado, Felipe das Dores. Modelagem física de remoção de inclusões em distribuidor de lingotamento contínuo de tarugos. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Escola de Engenharia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, 2014. <http://hdl.handle.net/10183/107487>

Mendonça, Alexandre de Freitas Gomes de; Faria, Melissa Souza de; Jesus, Daniel Andrade de; Silva, Gabriel Novaes da; Santos, Augusto Luis Almeida; Filgueira, Adrielle Cintra; Braga, Bernardo Martins; Tavares, Roberto Parreiras. Análise do efeito da injeção de gás no distribuidor para a remoção de inclusões , p. 266-276. In: 47th Steelmaking Seminar - International, Rio de Janeiro, 2016. ISSN: 2594-5300, DOI 10.5151/1982-9345-27666.

Merder, T.; Pieprzyca, J.; Warzecha, M.; Warzecha, P.; Hutny, A. Evolution of the Numerical Model Describing the Distribution of Non-Metallic Inclusions in the Tundish. *Materials* 2021, 14, 2229. <https://doi.org/10.3390/ma14092229>

Munch, Arthur Rios. Medidas do modelo físico do distribuidor nas vistas frontal, lateral e superior. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2023.

Neto, Marcolina Fernandes; Pires, José Carlos dos Santos; Nunes, Carlos Ângelo; Garcia, Amauri. Investigação de inclusões não metálicas em aço de baixo carbono desoxidado ao alumínio na etapa de refino. II Congresso Nacional de Engenharia

Mecânica, João Pessoa, PB, 2002.

<https://www.abcm.org.br/anais/conem/2002/trabalhos/tema01/CPB0077.PDF>

Prithvi, R.Y., Mantripragada, V.T. & Sarkar, S. On Path Oscillation of a Particle-Laden Bubble in Stationary Liquid. *Trans Indian Inst Met* 73, 2061–2067 (2020). <https://doi.org/10.1007/s12666-020-01966-0>

Pereira, Augusto Lachini. Modelagem física do escoamento em um distribuidor de lingotamento contínuo de aços. Salão de Iniciação Científica XXVIII C, UFRGS, 2016.

Quan, Q., Zhang, Zx., Qu, Tp. et al. Physical and numerical investigation on fluid flow and inclusion removal behavior in a single-strand tundish. *J. Iron Steel Res. Int.* (2023). <https://doi.org/10.1007/s42243-022-00884-3>

Ramos, S.V., Cisquini, P., Braga, B.M. et al. Evaluation of the Contamination in Tundishes During Filling Stage and Plasma Heating Practice Using a Novel Dynamic Model. *Metall Mater Trans B* 54, 230–248 (2023). <https://doi.org/10.1007/s11663-022-02683-3>

Rocha, Devans; Neves, Leonardo. Modelo matemático e estatístico para o mapeamento do volume morto no interior do distribuidor de lingotamento contínuo. *Tecnologia em Metalurgia, Materiais e Mineração*, 2023. DOI:10.4322/2176-1523.20222723

Rocha, Vinicius Cardoso da; Viscosidade efetiva de escórias e parâmetro cinético de agitação aplicados na limpeza inclusionária de aços especiais durante desgaseificação a vácuo - Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Escola de Engenharia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, 2016. <http://hdl.handle.net/10183/150578>

Sheng, D.-Y. Mathematical Modelling of Multiphase Flow and Inclusion Behavior in a Single-Strand Tundish. *Metals* 2020, 10, 1213. <https://doi.org/10.3390/met10091213>

S.H. Lee, C. Tse, K.W. Yi, P. Misra, V. Chevrier, C. Orrling, S. Sridhar, A.W. Cramb, Separation and dissolution of Al₂O₃ inclusions at slag/metal interfaces, *Journal of Non-Crystalline Solids*, Volume 282, Issue 1, 2001. [https://doi.org/10.1016/S0022-3093\(01\)00327-1](https://doi.org/10.1016/S0022-3093(01)00327-1)

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. Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas da Universidade Federal de Minas Gerais Belo Horizonte, Escola de Engenharia da UFMG, 2018. <https://repositorio.ufmg.br/handle/1843/RAOA-BBQNEC>

Souza, G. M. de ., Mendonça, A. de F. G. de ., & Tavares, R. P.. (2020). Physical and mathematical modeling of inclusion behavior in a tundish with gas curtain. *REM - International Engineering Journal*, 73(REM, Int. Eng. J., 2020 73(4)), 531–538. <https://doi.org/10.1590/0370-44672020730010>

Xuan, C., Persson, E.S., Sevastopolev, R. *et al.* Motion and Detachment Behaviors of Liquid Inclusion at Molten Steel–Slag Interfaces. *Metall Mater Trans B* 50, 1957–1973 (2019). <https://doi.org/10.1007/s11663-019-01568-2>

Wang, Q., Tan, C., Huang, A. *et al.* Numerical Simulation on Refractory Wear and Inclusion Formation in Continuous Casting Tundish. *Metall Mater Trans B* 52, 1344–1356 (2021). <https://doi.org/10.1007/s11663-021-02097-7>

Wollmann, André Mendes. Estudos de fluxos em um distribuidor de lingotamento contínuo. Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica) - Universidade Federal do Rio Grande Do Sul, Porto Alegre, 1999.
<http://hdl.handle.net/10183/119130>

World Steel in Figures 2023. World Steel, 2023. Disponível em: <https://worldsteel.org/steel-topics/statistics/world-steel-in-figures-2023/>. Acesso em: 30 de Janeiro de 2023.

Yanbin Yin, Jianhong Yang, Jiongming Zhang, Lei Tang, Physical modeling of slag carryover in the last stage of ladle teeming during continuous casting with dynamic change of slide gate opening, *Journal of Materials Research and Technology*, Volume 23, 2023, Pages 1781-1791, ISSN 2238-7854, <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2023.01.148>.

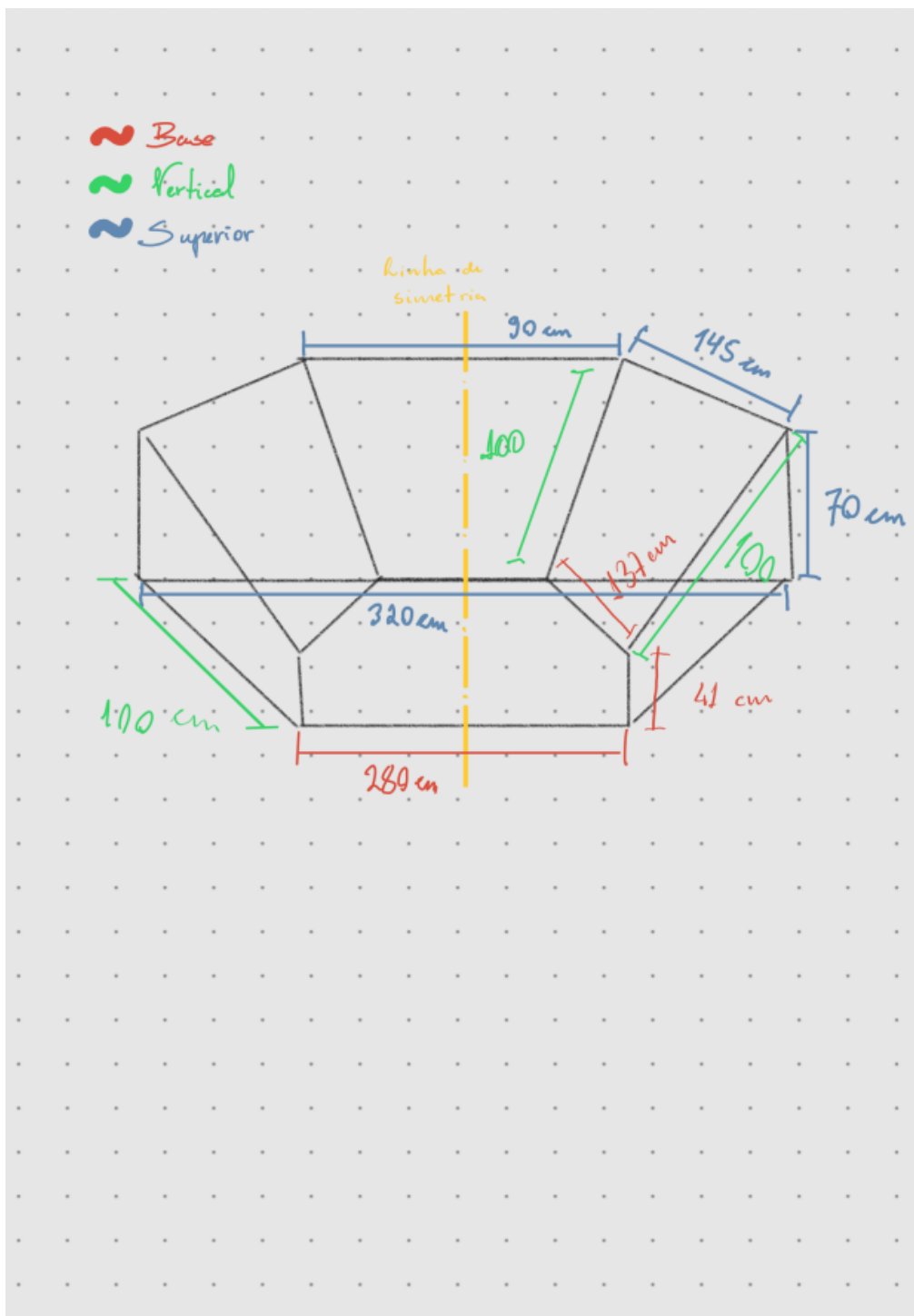
Yang, B., Lei, H., Bi, Q. *et al.* Numerical Simulation of Collision-Coalescence and Removal of Inclusions in a Tundish. *JOM* 70, 2950–2957 (2018). <https://doi.org/10.1007/s11837-018-3061-3>

Yogeshwar Sahai, Toshihiko Emi, Criteria for Water Modeling of Melt Flow and Inclusion Removal in Continuous Casting Tundishes, *ISIJ International*, 1996, Volume 36, Issue 9, Pages 1166-1173, Released on J-STAGE May 31, 2007, Online ISSN 1347-5460, Print ISSN 0915-1559, <https://doi.org/10.2355/isijinternational.36.1166>

Zhang, L., Wang, S., Dong, A. *et al.* Application of Electromagnetic (EM) Separation Technology to Metal Refining Processes: A Review. *Metall Mater Trans B* 45, 2153–2185 (2014). <https://doi.org/10.1007/s11663-014-0123-y>

Zhu, Y., Cui, H., Li, T. *et al.* Study on the Motion Behavior of Inclusion Clusters at the Steel–Slag Interface. *Metall Mater Trans B* 54, 101–114 (2023). <https://doi.org/10.1007/s11663-022-02673-5>

Zhu, Hh., Wang, M., Yao, C. *et al.* Influence of non-iso-velocity casting on flow-field index of a 41-ton six-strand tundish by physical and numerical modeling. *J. Iron Steel Res. Int.* 30, 51–63 (2023). <https://doi.org/10.1007/s42243-022-00821-4>

APÊNDICE A - Medidas do modelo físico do distribuidor**Figura 17** - Medidas do modelo físico do distribuidor nas vistas frontal, lateral e superior (Munch, 2023)

APÊNDICE B - Distribuição granulométrica de inclusões passantes para a velocidade de lingotamento de 0,69 m/min do veio lateral do ensaio I



DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA

CILAS 1190 Líquido

Faixa : 0.04 µm - 2500.00 µm / 100 Classes

Ref da amostra	: Sample	Ultrasom	: 60 s
Sample Name	: Polietileno	Obscurations	: 3 / 1.62 %
Sample type	: Polimero	Diâmetro a 10%	: 75.91 µm
Comentários	:	Diâmetro a 50%	: 209.58 µm
Líquido	: Ethanol	Diâmetro a 90%	: 409.73 µm
Agente dispersante	:	Diâmetro médio	: 228.67 µm
Operador	: Lasid 2	Mie	: 1.510-0.100/1.361
Empresa	: UFRGS	Densidade/Fator	-----
Localização	: Porto Alegre - RS	Superfície específica	-----

x	0.04	0.07	0.10	0.20	0.30	0.40	0.50	0.60	0.70	0.80
Q3	0.00	0.00	0.00	0.06	0.12	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15
q3	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00
x	0.90	1.00	1.10	1.20	1.30	1.40	1.60	1.80	2.00	2.20
Q3	0.15	0.15	0.18	0.21	0.24	0.28	0.35	0.42	0.49	0.56
q3	0.00	0.00	0.03	0.03	0.03	0.05	0.05	0.05	0.06	0.07
x	2.40	2.60	3.00	4.00	5.00	6.00	6.50	7.00	7.50	8.00
Q3	0.62	0.68	0.77	0.91	0.99	1.05	1.07	1.09	1.10	1.12
q3	0.06	0.07	0.06	0.04	0.03	0.03	0.02	0.02	0.01	0.03
x	8.50	9.00	10.00	11.00	12.00	13.00	14.00	15.00	16.00	17.00
Q3	1.14	1.16	1.18	1.18	1.18	1.19	1.21	1.23	1.25	1.27
q3	0.03	0.03	0.02	0.00	0.00	0.01	0.02	0.03	0.03	0.03
x	18.00	19.00	20.00	22.00	25.00	28.00	32.00	36.00	38.00	40.00
Q3	1.29	1.31	1.33	1.39	1.50	1.66	1.95	2.34	2.57	2.81
q3	0.03	0.03	0.03	0.06	0.08	0.13	0.19	0.30	0.38	0.42
x	45.00	50.00	53.00	56.00	63.00	71.00	75.00	80.00	85.00	90.00
Q3	3.52	4.34	4.88	5.45	6.92	8.77	9.76	11.05	12.39	13.78
q3	0.54	0.70	0.83	0.93	1.12	1.38	1.62	1.79	1.98	2.18
x	95.00	100.0	106.0	112.0	125.0	130.0	140.0	145.0	150.0	160.0
Q3	15.21	16.68	18.47	20.30	24.35	25.92	29.07	30.65	32.23	35.35
q3	2.37	2.56	2.75	2.97	3.30	3.58	3.80	4.03	4.17	4.32
x	170.0	180.0	190.0	200.0	212.0	242.0	250.0	300.0	400.0	500.0
Q3	38.43	41.46	44.42	47.31	50.66	58.49	60.45	71.59	88.98	98.45
q3	4.54	4.74	4.90	5.04	5.14	5.29	5.39	5.47	5.41	3.80

x : diâmetro / µm Q3 : valor cumulativo / % q3 : density distribution

APÊNDICE C - Distribuição granulométrica de inclusões passantes para a velocidade de lingotamento de 0,69 m/min do veio central do ensaio I

DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA										
CILAS 1190 Líquido										
Faixa : 0.04 µm - 2500.00 µm / 100 Classes										
Ref da amostra	: Sample									
Sample Name	: Polietileno									
Sample type	: Polimero									
Comentários	:									
Líquido	: Ethanol									
Agente dispersante	:									
Operador	: Lasid 2									
Empresa	: UFRGS									
Localização	: Porto Alegre - RS									
Ultrasom	: 60 s									
Obscurations	: 5 / 2.26 %									
Diâmetro a 10%	: 80.84 µm									
Diâmetro a 50%	: 216.16 µm									
Diâmetro a 90%	: 413.62 µm									
Diâmetro médio	: 233.90 µm									
Mie	: 1.510-0.100/1.361									
Densidade/Fator	: -----									
Superfície específica	: -----									

x	0.04	0.07	0.10	0.20	0.30	0.40	0.50	0.60	0.70	0.80
Q3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.07	0.10	0.10	0.10	0.10	0.11
q3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	0.01	0.00	0.00	0.00	0.01
x	0.90	1.00	1.10	1.20	1.30	1.40	1.60	1.80	2.00	2.20
Q3	0.13	0.15	0.18	0.22	0.25	0.29	0.36	0.43	0.51	0.58
q3	0.02	0.02	0.03	0.04	0.03	0.05	0.05	0.05	0.07	0.07
x	2.40	2.60	3.00	4.00	5.00	6.00	6.50	7.00	7.50	8.00
Q3	0.64	0.70	0.79	0.93	1.00	1.00	1.01	1.02	1.04	1.06
q3	0.06	0.07	0.06	0.04	0.03	0.00	0.01	0.01	0.03	0.03
x	8.50	9.00	10.00	11.00	12.00	13.00	14.00	15.00	16.00	17.00
Q3	1.08	1.09	1.12	1.15	1.18	1.20	1.23	1.25	1.28	1.30
q3	0.03	0.02	0.03	0.03	0.03	0.02	0.04	0.03	0.04	0.03
x	18.00	19.00	20.00	22.00	25.00	28.00	32.00	36.00	38.00	40.00
Q3	1.33	1.36	1.38	1.45	1.56	1.70	1.95	2.27	2.45	2.66
q3	0.05	0.05	0.04	0.07	0.08	0.11	0.17	0.25	0.30	0.37
x	45.00	50.00	53.00	56.00	63.00	71.00	75.00	80.00	85.00	90.00
Q3	3.24	3.92	4.37	4.86	6.11	7.74	8.62	9.79	11.01	12.30
q3	0.45	0.58	0.70	0.81	0.96	1.23	1.45	1.64	1.82	2.04
x	95.00	100.0	106.0	112.0	125.0	130.0	140.0	145.0	150.0	160.0
Q3	13.63	15.02	16.72	18.48	22.40	23.94	27.05	28.61	30.18	33.30
q3	2.23	2.45	2.64	2.89	3.23	3.56	3.80	4.03	4.19	4.38
x	170.0	180.0	190.0	200.0	212.0	242.0	250.0	300.0	400.0	500.0
Q3	36.40	39.46	42.46	45.40	48.82	56.86	58.87	70.40	88.52	98.38
q3	4.63	4.85	5.02	5.19	5.32	5.50	5.60	5.73	5.70	4.00

x : diâmetro / µm Q3 : valor cumulativo / % q3 : density distribution

APÊNDICE D - Distribuição granulométrica de inclusões passantes para a velocidade de lingotamento de 0,69 m/min do veio lateral do ensaio II



DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA

CILAS 1190 Líquido

Faixa : 0.04 μm - 2500.00 μm / 100 Classes

Ref da amostra	: Sample	Ultrasom	: 60 s
Sample Name	: Polietileno	Obscurations	: 5 / 2.02 %
Sample type	: Polimero	Diâmetro a 10%	: 64.38 μm
Comentários	:	Diâmetro a 50%	: 188.25 μm
Líquido	: Ethanol	Diâmetro a 90%	: 397.29 μm
Agente dispersante	:	Diâmetro médio	: 212.49 μm
Operador	: Lasid 2	Mie	: 1.510-0.100/1.361
Empresa	: UFRGS	Densidade/Fator	-----
Localização	: Porto Alegre - RS	Superfície específica	-----

x	0.04	0.07	0.10	0.20	0.30	0.40	0.50	0.60	0.70	0.80
Q3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.07	0.10	0.10	0.10	0.10	0.12
q3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.01
x	0.90	1.00	1.10	1.20	1.30	1.40	1.60	1.80	2.00	2.20
Q3	0.14	0.17	0.20	0.24	0.27	0.31	0.40	0.48	0.55	0.63
q3	0.01	0.02	0.03	0.04	0.03	0.05	0.06	0.06	0.06	0.07
x	2.40	2.60	3.00	4.00	5.00	6.00	6.50	7.00	7.50	8.00
Q3	0.69	0.75	0.86	1.02	1.12	1.20	1.23	1.26	1.28	1.31
q3	0.06	0.06	0.07	0.05	0.04	0.04	0.03	0.03	0.03	0.04
x	8.50	9.00	10.00	11.00	12.00	13.00	14.00	15.00	16.00	17.00
Q3	1.33	1.35	1.37	1.37	1.37	1.37	1.37	1.37	1.37	1.37
q3	0.03	0.03	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
x	18.00	19.00	20.00	22.00	25.00	28.00	32.00	36.00	38.00	40.00
Q3	1.37	1.37	1.38	1.40	1.50	1.68	2.07	2.64	2.99	3.37
q3	0.00	0.00	0.02	0.02	0.07	0.14	0.25	0.42	0.56	0.64
x	45.00	50.00	53.00	56.00	63.00	71.00	75.00	80.00	85.00	90.00
Q3	4.46	5.71	6.53	7.39	9.53	12.12	13.46	15.16	16.88	18.60
q3	0.80	1.02	1.21	1.35	1.57	1.87	2.11	2.27	2.45	2.60
x	95.00	100.0	106.0	112.0	125.0	130.0	140.0	145.0	150.0	160.0
Q3	20.33	22.06	24.13	26.19	30.58	32.24	35.50	37.11	38.69	41.78
q3	2.76	2.91	3.06	3.23	3.45	3.65	3.79	3.96	4.02	4.13
x	170.0	180.0	190.0	200.0	212.0	242.0	250.0	300.0	400.0	500.0
Q3	44.78	47.68	50.48	53.18	56.29	63.43	65.19	75.11	90.36	98.64
q3	4.27	4.38	4.47	4.54	4.60	4.65	4.67	4.69	4.57	3.20

x : diâmetro / μm Q3 : valor cumulativo / % q3 : density distribution

APÊNDICE E - Distribuição granulométrica de inclusões passantes para a velocidade de lingotamento de 0,69 m/min do veio central do ensaio II



DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA

CILAS 1190 Líquido

Faixa : 0.04 µm - 2500.00 µm / 100 Classes

Ref da amostra	: Sample	Ultrasom	: 60 s
Sample Name	: Polietileno	Obscurations	: 3 / 1.07 %
Sample type	: Polimero	Diâmetro a 10%	: 61.34 µm
Comentários	:	Diâmetro a 50%	: 187.63 µm
Líquido	: Ethanol	Diâmetro a 90%	: 398.21 µm
Agente dispersante	: Lasid 2	Diâmetro médio	: 211.75 µm
Operador	: UFRGS	Mie	: 1.510-0.100/1.361
Empresa	: UFRGS	Densidade/Fator	-----
Localização	: Porto Alegre - RS	Superfície específica	-----

x	0.04	0.07	0.10	0.20	0.30	0.40	0.50	0.60	0.70	0.80
Q3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01
q3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01
x	0.90	1.00	1.10	1.20	1.30	1.40	1.60	1.80	2.00	2.20
Q3	0.03	0.06	0.09	0.12	0.16	0.20	0.29	0.37	0.45	0.53
q3	0.01	0.02	0.03	0.03	0.04	0.05	0.06	0.06	0.07	0.07
x	2.40	2.60	3.00	4.00	5.00	6.00	6.50	7.00	7.50	8.00
Q3	0.60	0.66	0.77	0.93	1.04	1.12	1.16	1.19	1.22	1.25
q3	0.07	0.07	0.07	0.05	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04
x	8.50	9.00	10.00	11.00	12.00	13.00	14.00	15.00	16.00	17.00
Q3	1.28	1.31	1.34	1.34	1.34	1.34	1.34	1.34	1.34	1.34
q3	0.04	0.05	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
x	18.00	19.00	20.00	22.00	25.00	28.00	32.00	36.00	38.00	40.00
Q3	1.34	1.35	1.37	1.42	1.58	1.83	2.33	3.02	3.42	3.86
q3	0.00	0.02	0.03	0.05	0.11	0.19	0.33	0.51	0.64	0.75
x	45.00	50.00	53.00	56.00	63.00	71.00	75.00	80.00	85.00	90.00
Q3	5.08	6.46	7.34	8.26	10.51	13.19	14.56	16.27	18.00	19.72
q3	0.90	1.14	1.31	1.45	1.66	1.95	2.17	2.30	2.48	2.61
x	95.00	100.0	106.0	112.0	125.0	130.0	140.0	145.0	150.0	160.0
Q3	21.43	23.14	25.17	27.18	31.44	33.04	36.19	37.74	39.26	42.24
q3	2.75	2.90	3.03	3.17	3.37	3.54	3.69	3.84	3.90	4.01
x	170.0	180.0	190.0	200.0	212.0	242.0	250.0	300.0	400.0	500.0
Q3	45.13	47.92	50.63	53.25	56.27	63.25	64.98	74.83	90.24	98.63
q3	4.14	4.24	4.36	4.44	4.50	4.58	4.62	4.69	4.65	3.27

x : diâmetro / µm Q3 : valor cumulativo / % q3 : density distribution

APÊNDICE F - Distribuição granulométrica de inclusões passantes para a velocidade de lingotamento de 0,69 m/min do veio lateral do ensaio III



DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA

CILAS 1190 Líquido

Faixa : 0.04 μm - 2500.00 μm / 100 Classes

Ref da amostra	: Sample	Ultrasom	: 60 s
Sample Name	: Polietileno	Obscurations	: 5 / 2.11 %
Sample type	: Polimero	Diâmetro a 10%	: 68.64 μm
Comentários	:	Diâmetro a 50%	: 195.65 μm
Líquido	: Ethanol	Diâmetro a 90%	: 400.72 μm
Agente dispersante	:	Diâmetro médio	: 218.19 μm
Operador	: Lasid 2	Mie	: 1.510-0.100/1.361
Empresa	: UFRGS	Densidade/Fator	-----
Localização	: Porto Alegre - RS	Superfície específica	-----

x	0.04	0.07	0.10	0.20	0.30	0.40	0.50	0.60	0.70	0.80
Q3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01
q3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01
x	0.90	1.00	1.10	1.20	1.30	1.40	1.60	1.80	2.00	2.20
Q3	0.03	0.06	0.09	0.13	0.16	0.20	0.29	0.37	0.44	0.52
q3	0.01	0.02	0.03	0.04	0.03	0.05	0.06	0.06	0.06	0.07
x	2.40	2.60	3.00	4.00	5.00	6.00	6.50	7.00	7.50	8.00
Q3	0.58	0.64	0.74	0.90	0.99	1.05	1.07	1.10	1.12	1.14
q3	0.06	0.07	0.06	0.05	0.04	0.03	0.02	0.04	0.03	0.03
x	8.50	9.00	10.00	11.00	12.00	13.00	14.00	15.00	16.00	17.00
Q3	1.17	1.19	1.21	1.21	1.21	1.21	1.21	1.21	1.21	1.21
q3	0.04	0.03	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
x	18.00	19.00	20.00	22.00	25.00	28.00	32.00	36.00	38.00	40.00
Q3	1.21	1.22	1.24	1.30	1.42	1.60	1.96	2.45	2.75	3.07
q3	0.00	0.02	0.03	0.05	0.08	0.14	0.23	0.36	0.48	0.54
x	45.00	50.00	53.00	56.00	63.00	71.00	75.00	80.00	85.00	90.00
Q3	3.99	5.05	5.76	6.49	8.35	10.65	11.86	13.40	14.98	16.59
q3	0.68	0.88	1.06	1.15	1.37	1.67	1.92	2.08	2.27	2.45
x	95.00	100.0	106.0	112.0	125.0	130.0	140.0	145.0	150.0	160.0
Q3	18.23	19.88	21.87	23.87	28.19	29.84	33.11	34.73	36.33	39.47
q3	2.64	2.80	2.97	3.16	3.42	3.66	3.84	4.02	4.11	4.23
x	170.0	180.0	190.0	200.0	212.0	242.0	250.0	300.0	400.0	500.0
Q3	42.54	45.52	48.40	51.20	54.41	61.83	63.67	74.02	89.93	98.58
q3	4.41	4.54	4.64	4.75	4.79	4.88	4.92	4.94	4.81	3.37

x : diâmetro / μm Q3 : valor cumulativo / % q3 : density distribution

APÊNDICE G - Distribuição granulométrica de inclusões passantes para a velocidade de lingotamento de 0,69 m/min do veio central do ensaio III



DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA

CILAS 1190 Líquido

Faixa : 0.04 μm - 2500.00 μm / 100 Classes

Ref da amostra	: Sample	Ultrasom	: 60 s
Sample Name	: Polietileno	Obscurations	: 4 / 1.54 %
Sample type	: Polimero	Diâmetro a 10%	: 68.25 μm
Comentários	:	Diâmetro a 50%	: 190.67 μm
Líquido	: Ethanol	Diâmetro a 90%	: 397.83 μm
Agente dispersante	:	Diâmetro médio	: 214.80 μm
Operador	: Lasid 2	Mie	: 1.510-0.100/1.361
Empresa	: UFRGS	Densidade/Fator	-----
Localização	: Porto Alegre - RS	Superfície específica	-----

x	0.04	0.07	0.10	0.20	0.30	0.40	0.50	0.60	0.70	0.80
Q3	0.00	0.00	0.00	0.06	0.13	0.17	0.17	0.17	0.17	0.17
q3	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00
x	0.90	1.00	1.10	1.20	1.30	1.40	1.60	1.80	2.00	2.20
Q3	0.17	0.17	0.19	0.23	0.26	0.30	0.38	0.46	0.53	0.60
q3	0.00	0.00	0.02	0.04	0.03	0.05	0.05	0.06	0.06	0.06
x	2.40	2.60	3.00	4.00	5.00	6.00	6.50	7.00	7.50	8.00
Q3	0.67	0.73	0.82	0.97	1.06	1.13	1.16	1.19	1.22	1.24
q3	0.07	0.06	0.05	0.04	0.03	0.03	0.03	0.03	0.04	0.03
x	8.50	9.00	10.00	11.00	12.00	13.00	14.00	15.00	16.00	17.00
Q3	1.27	1.29	1.34	1.38	1.40	1.40	1.40	1.40	1.40	1.40
q3	0.04	0.03	0.04	0.04	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
x	18.00	19.00	20.00	22.00	25.00	28.00	32.00	36.00	38.00	40.00
Q3	1.40	1.40	1.40	1.40	1.44	1.57	1.86	2.31	2.59	2.90
q3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.03	0.10	0.19	0.33	0.45	0.52
x	45.00	50.00	53.00	56.00	63.00	71.00	75.00	80.00	85.00	90.00
Q3	3.81	4.90	5.63	6.40	8.36	10.81	12.09	13.74	15.43	17.14
q3	0.66	0.89	1.08	1.20	1.43	1.76	2.01	2.20	2.40	2.57
x	95.00	100.0	106.0	112.0	125.0	130.0	140.0	145.0	150.0	160.0
Q3	18.87	20.62	22.71	24.81	29.30	31.01	34.37	36.02	37.65	40.84
q3	2.75	2.93	3.09	3.28	3.52	3.75	3.90	4.04	4.14	4.25
x	170.0	180.0	190.0	200.0	212.0	242.0	250.0	300.0	400.0	500.0
Q3	43.94	46.92	49.81	52.58	55.77	63.06	64.86	74.93	90.29	98.63
q3	4.40	4.48	4.60	4.64	4.71	4.74	4.76	4.75	4.59	3.21

x : diâmetro / μm Q3 : valor cumulativo / % q3 : density distribution

APÊNDICE H - Distribuição granulométrica de inclusões passantes para a velocidade de lingotamento de 0,77 m/min do veio lateral do ensaio I



DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA

CILAS 1190 Líquido

Faixa : 0.04 μm - 2500.00 μm / 100 Classes

Ref da amostra : 8000_A1_2
 Sample Name : Polietileno
 Sample type : Polimero
 Comentários :
 Líquido : Ethanol
 Agente dispersante :
 Operador : Lasid 2
 Empresa : UFRGS
 Localização : Porto Alegre - RS

Ultrasom : 60 s
 Obscurations : 4 / 2.22 %
 Diâmetro a 10% : 85.33 μm
 Diâmetro a 50% : 213.45 μm
 Diâmetro a 90% : 411.11 μm
 Diâmetro médio : 232.81 μm
 Mie : 1.510-0.100/1.361
 Densidade/Fator : _____
 Superfície específica : _____

x	0.04	0.07	0.10	0.20	0.30	0.40	0.50	0.60	0.70	0.80
Q3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.05	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08
q3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00
x	0.90	1.00	1.10	1.20	1.30	1.40	1.60	1.80	2.00	2.20
Q3	0.08	0.08	0.10	0.13	0.16	0.20	0.28	0.35	0.43	0.50
q3	0.00	0.00	0.02	0.03	0.03	0.05	0.05	0.05	0.07	0.07
x	2.40	2.60	3.00	4.00	5.00	6.00	6.50	7.00	7.50	8.00
Q3	0.57	0.63	0.73	0.89	0.97	1.03	1.05	1.07	1.10	1.12
q3	0.07	0.07	0.06	0.05	0.03	0.03	0.02	0.02	0.04	0.03
x	8.50	9.00	10.00	11.00	12.00	13.00	14.00	15.00	16.00	17.00
Q3	1.15	1.18	1.24	1.30	1.37	1.44	1.51	1.57	1.63	1.69
q3	0.04	0.05	0.05	0.06	0.07	0.08	0.08	0.08	0.08	0.09
x	18.00	19.00	20.00	22.00	25.00	28.00	32.00	36.00	38.00	40.00
Q3	1.75	1.80	1.85	1.95	2.06	2.16	2.30	2.46	2.56	2.67
q3	0.09	0.08	0.09	0.09	0.08	0.08	0.09	0.12	0.16	0.19
x	45.00	50.00	53.00	56.00	63.00	71.00	75.00	80.00	85.00	90.00
Q3	3.01	3.47	3.80	4.17	5.22	6.69	7.54	8.68	9.91	11.22
q3	0.26	0.39	0.50	0.60	0.79	1.10	1.38	1.57	1.81	2.04
x	95.00	100.0	106.0	112.0	125.0	130.0	140.0	145.0	150.0	160.0
Q3	12.61	14.06	15.87	17.73	21.92	23.57	26.88	28.54	30.20	33.50
q3	2.29	2.52	2.77	3.01	3.40	3.75	3.98	4.21	4.36	4.55
x	170.0	180.0	190.0	200.0	212.0	242.0	250.0	300.0	400.0	500.0
Q3	36.75	39.94	43.05	46.08	49.58	57.71	59.73	71.16	88.82	98.43
q3	4.78	4.97	5.12	5.26	5.35	5.47	5.53	5.58	5.47	3.84

x : diâmetro / μm Q3 : valor cumulativo / % q3 : density distribution

APÊNDICE I - Distribuição granulométrica de inclusões passantes para a velocidade de lingotamento de 0,77 m/min do veio central do ensaio I



DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA

CILAS 1190 Líquido

Faixa : 0.04 μm - 2500.00 μm / 100 Classes

Ref da amostra	: 8000_B1_2	Ultrasom	: 60 s
Sample Name	: Polietileno	Obscurations	: 4 / 2.36 %
Sample type	: Polimero	Diâmetro a 10%	: 78.14 μm
Comentários	:	Diâmetro a 50%	: 186.91 μm
Líquido	: Ethanol	Diâmetro a 90%	: 294.98 μm
Agente dispersante	:	Diâmetro médio	: 189.08 μm
Operador	: Lasid 2	Fraunhofer	
Empresa	: UFRGS	Densidade/Fator	-----
Localização	: Porto Alegre - RS	Superfície específica	-----

x	0.04	0.07	0.10	0.20	0.30	0.40	0.50	0.60	0.70	0.80
Q3	0.00	0.00	0.00	0.11	0.19	0.23	0.23	0.23	0.23	0.23
q3	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00
x	0.90	1.00	1.10	1.20	1.30	1.40	1.60	1.80	2.00	2.20
Q3	0.23	0.23	0.24	0.26	0.28	0.30	0.37	0.46	0.56	0.65
q3	0.00	0.00	0.01	0.02	0.02	0.02	0.04	0.06	0.07	0.07
x	2.40	2.60	3.00	4.00	5.00	6.00	6.50	7.00	7.50	8.00
Q3	0.74	0.83	0.97	1.18	1.28	1.34	1.36	1.39	1.41	1.43
q3	0.08	0.08	0.07	0.05	0.03	0.02	0.02	0.03	0.02	0.02
x	8.50	9.00	10.00	11.00	12.00	13.00	14.00	15.00	16.00	17.00
Q3	1.46	1.48	1.54	1.59	1.65	1.70	1.76	1.82	1.87	1.93
q3	0.04	0.03	0.04	0.04	0.05	0.05	0.06	0.06	0.06	0.07
x	18.00	19.00	20.00	22.00	25.00	28.00	32.00	36.00	38.00	40.00
Q3	1.98	2.04	2.09	2.19	2.31	2.42	2.57	2.76	2.89	3.03
q3	0.07	0.08	0.07	0.08	0.07	0.07	0.08	0.12	0.18	0.20
x	45.00	50.00	53.00	56.00	63.00	71.00	75.00	80.00	85.00	90.00
Q3	3.52	4.19	4.67	5.20	6.60	8.36	9.27	10.42	11.58	12.77
q3	0.31	0.47	0.61	0.72	0.89	1.10	1.24	1.33	1.43	1.55
x	95.00	100.0	106.0	112.0	125.0	130.0	140.0	145.0	150.0	160.0
Q3	13.97	15.20	16.76	18.41	22.37	24.07	27.75	29.76	31.87	36.36
q3	1.65	1.79	2.00	2.23	2.69	3.23	3.70	4.27	4.64	5.19
x	170.0	180.0	190.0	200.0	212.0	242.0	250.0	300.0	400.0	500.0
Q3	41.18	46.26	51.63	56.97	63.13	76.13	78.91	91.13	99.32	100.00
q3	5.93	6.63	7.41	7.76	7.88	7.32	6.37	5.00	2.12	0.23

x : diâmetro / μm Q3 : valor cumulativo / % q3 : density distribution

APÊNDICE J- Distribuição granulométrica de inclusões passantes para a velocidade de lingotamento de 0,77 m/min do veio lateral do ensaio II



DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA

CILAS 1190 Líquido

Faixa : 0.04 µm - 2500.00 µm / 100 Classes

Ref da amostra : 8000_A2_3
 Sample Name : Polietileno
 Sample type : Polimero
 Comentários :
 Líquido : Ethanol
 Agente dispersante :
 Operador : Lasid 2
 Empresa : UFRGS
 Localização : Porto Alegre - RS

Ultrasom : 60 s
 Obscurations : 4 / 2.27 %
 Diâmetro a 10% : 82.52 µm
 Diâmetro a 50% : 207.37 µm
 Diâmetro a 90% : 407.13 µm
 Diâmetro médio : 228.43 µm
 Mie : 1.510-0.100/1.361
 Densidade/Fator : -----
 Superfície específica : -----

x	0.04	0.07	0.10	0.20	0.30	0.40	0.50	0.60	0.70	0.80
Q3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
q3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
x	0.90	1.00	1.10	1.20	1.30	1.40	1.60	1.80	2.00	2.20
Q3	0.00	0.00	0.02	0.05	0.08	0.12	0.20	0.27	0.35	0.43
q3	0.00	0.00	0.02	0.03	0.03	0.05	0.05	0.05	0.07	0.07
x	2.40	2.60	3.00	4.00	5.00	6.00	6.50	7.00	7.50	8.00
Q3	0.49	0.55	0.65	0.80	0.87	0.92	0.95	0.97	1.00	1.03
q3	0.06	0.07	0.06	0.05	0.03	0.02	0.03	0.02	0.04	0.04
x	8.50	9.00	10.00	11.00	12.00	13.00	14.00	15.00	16.00	17.00
Q3	1.06	1.09	1.16	1.22	1.29	1.36	1.42	1.48	1.54	1.59
q3	0.04	0.05	0.06	0.06	0.07	0.08	0.07	0.08	0.08	0.07
x	18.00	19.00	20.00	22.00	25.00	28.00	32.00	36.00	38.00	40.00
Q3	1.63	1.67	1.71	1.77	1.84	1.90	2.01	2.17	2.27	2.40
q3	0.06	0.06	0.07	0.06	0.05	0.05	0.07	0.12	0.16	0.22
x	45.00	50.00	53.00	56.00	63.00	71.00	75.00	80.00	85.00	90.00
Q3	2.79	3.33	3.72	4.16	5.38	7.07	8.03	9.30	10.67	12.11
q3	0.29	0.45	0.59	0.70	0.91	1.24	1.54	1.72	1.98	2.21
x	95.00	100.0	106.0	112.0	125.0	130.0	140.0	145.0	150.0	160.0
Q3	13.61	15.17	17.10	19.07	23.45	25.16	28.56	30.26	31.95	35.30
q3	2.43	2.67	2.90	3.14	3.50	3.82	4.02	4.25	4.37	4.55
x	170.0	180.0	190.0	200.0	212.0	242.0	250.0	300.0	400.0	500.0
Q3	38.57	41.76	44.85	47.85	51.31	59.27	61.24	72.31	89.27	98.49
q3	4.73	4.89	5.01	5.13	5.20	5.27	5.31	5.32	5.17	3.62

x : diâmetro / µm Q3 : valor cumulativo / % q3 : density distribution

APÊNDICE K - Distribuição granulométrica de inclusões passantes para a velocidade de lingotamento de 0,77 m/min do veio central do ensaio II



DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA

CILAS 1190 Líquido

Faixa : 0.04 µm - 2500.00 µm / 100 Classes

Ref da amostra	: 8000_B2_3	Ultrasom	: 60 s
Sample Name	: Polietileno	Obscurations	: 3 / 1.13 %
Sample type	: Polimero	Diâmetro a 10%	: 63.46 µm
Comentários	:	Diâmetro a 50%	: 168.58 µm
Líquido	: Ethanol	Diâmetro a 90%	: 383.12 µm
Agente dispersante	:	Diâmetro médio	: 198.24 µm
Operador	: Lasid 2	Mie	: 1.510-0.100/1.361
Empresa	: UFRGS	Densidade/Fator	-----
Localização	: Porto Alegre - RS	Superfície específica	-----

x	0.04	0.07	0.10	0.20	0.30	0.40	0.50	0.60	0.70	0.80
Q3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01
q3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01
x	0.90	1.00	1.10	1.20	1.30	1.40	1.60	1.80	2.00	2.20
Q3	0.03	0.06	0.09	0.13	0.17	0.22	0.31	0.41	0.51	0.60
q3	0.01	0.02	0.03	0.04	0.04	0.06	0.06	0.07	0.08	0.08
x	2.40	2.60	3.00	4.00	5.00	6.00	6.50	7.00	7.50	8.00
Q3	0.68	0.76	0.88	1.06	1.18	1.28	1.33	1.38	1.43	1.48
q3	0.08	0.08	0.07	0.05	0.04	0.04	0.05	0.06	0.06	0.06
x	8.50	9.00	10.00	11.00	12.00	13.00	14.00	15.00	16.00	17.00
Q3	1.54	1.59	1.69	1.79	1.87	1.95	2.01	2.06	2.11	2.14
q3	0.08	0.07	0.08	0.09	0.08	0.08	0.07	0.06	0.06	0.04
x	18.00	19.00	20.00	22.00	25.00	28.00	32.00	36.00	38.00	40.00
Q3	2.16	2.18	2.20	2.22	2.27	2.35	2.59	3.00	3.27	3.58
q3	0.03	0.03	0.03	0.02	0.03	0.06	0.15	0.28	0.41	0.49
x	45.00	50.00	53.00	56.00	63.00	71.00	75.00	80.00	85.00	90.00
Q3	4.54	5.76	6.59	7.49	9.82	12.79	14.36	16.38	18.44	20.52
q3	0.67	0.95	1.17	1.34	1.62	2.03	2.34	2.56	2.78	2.98
x	95.00	100.0	106.0	112.0	125.0	130.0	140.0	145.0	150.0	160.0
Q3	22.61	24.69	27.18	29.63	34.78	36.70	40.40	42.18	43.92	47.27
q3	3.16	3.32	3.50	3.64	3.84	4.00	4.08	4.15	4.20	4.25
x	170.0	180.0	190.0	200.0	212.0	242.0	250.0	300.0	400.0	500.0
Q3	50.44	53.43	56.27	58.94	61.95	68.61	70.21	78.94	91.95	98.87
q3	4.28	4.28	4.30	4.26	4.23	4.12	4.02	3.92	3.70	2.54

x : diâmetro / µm Q3 : valor cumulativo / % q3 : density distribution

APÊNDICE L - Distribuição granulométrica de inclusões passantes para a velocidade de lingotamento de 0,77 m/min do veio lateral do ensaio III



DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA

CILAS 1190 Líquido

Faixa : 0.04 µm - 2500.00 µm / 100 Classes

Ref da amostra	: 8000_A2_4	Ultrasom	: 60	s
Sample Name	: Polietileno	Obscurations	: 4 / 1.94	%
Sample type	: Polimero	Diâmetro a 10%	: 74.70	µm
Comentários	:	Diâmetro a 50%	: 203.88	µm
Líquido	: Ethanol	Diâmetro a 90%	: 405.26	µm
Agente dispersante	:	Diâmetro médio	: 224.27	µm
Operador	: Lasid 2	Mie	: 1.510-0.100/1.361	
Empresa	: UFRGS	Densidade/Fator	-----	
Localização	: Porto Alegre - RS	Superfície específica	-----	

x	0.04	0.07	0.10	0.20	0.30	0.40	0.50	0.60	0.70	0.80
Q3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.09	0.13	0.13	0.13	0.13	0.14
q3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	0.01	0.00	0.00	0.00	0.01
x	0.90	1.00	1.10	1.20	1.30	1.40	1.60	1.80	2.00	2.20
Q3	0.16	0.19	0.22	0.26	0.30	0.34	0.42	0.51	0.59	0.68
q3	0.01	0.03	0.03	0.04	0.04	0.05	0.05	0.07	0.07	0.08
x	2.40	2.60	3.00	4.00	5.00	6.00	6.50	7.00	7.50	8.00
Q3	0.75	0.82	0.93	1.09	1.19	1.26	1.29	1.33	1.36	1.40
q3	0.07	0.08	0.07	0.05	0.04	0.03	0.03	0.05	0.04	0.05
x	8.50	9.00	10.00	11.00	12.00	13.00	14.00	15.00	16.00	17.00
Q3	1.44	1.48	1.56	1.65	1.73	1.82	1.91	1.99	2.07	2.15
q3	0.06	0.06	0.07	0.08	0.08	0.10	0.11	0.10	0.11	0.12
x	18.00	19.00	20.00	22.00	25.00	28.00	32.00	36.00	38.00	40.00
Q3	2.23	2.30	2.37	2.51	2.70	2.88	3.16	3.47	3.65	3.85
q3	0.12	0.11	0.12	0.13	0.13	0.14	0.18	0.23	0.29	0.34
x	45.00	50.00	53.00	56.00	63.00	71.00	75.00	80.00	85.00	90.00
Q3	4.41	5.08	5.53	6.03	7.35	9.11	10.07	11.36	12.71	14.13
q3	0.42	0.56	0.68	0.80	0.99	1.29	1.54	1.76	1.96	2.18
x	95.00	100.0	106.0	112.0	125.0	130.0	140.0	145.0	150.0	160.0
Q3	15.61	17.13	19.01	20.93	25.18	26.84	30.14	31.79	33.43	36.67
q3	2.41	2.61	2.84	3.07	3.40	3.72	3.92	4.13	4.25	4.41
x	170.0	180.0	190.0	200.0	212.0	242.0	250.0	300.0	400.0	500.0
Q3	39.85	42.96	45.97	48.89	52.26	60.05	61.97	72.82	89.47	98.52
q3	4.61	4.78	4.90	5.01	5.09	5.18	5.19	5.23	5.09	3.57

x : diâmetro / µm Q3 : valor cumulativo / % q3 : density distribution

APÊNDICE M- Distribuição granulométrica de inclusões passantes para a velocidade de lingotamento de 0,77 m/min do veio central do ensaio III



DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA

CILAS 1190 Líquido

Faixa : 0.04 µm - 2500.00 µm / 100 Classes

Ref da amostra	: 8000_B2_4	Ultrasom	: 60 s
Sample Name	: Polietileno	Obscurations	: 4 / 1.71 %
Sample type	: Polimero	Diâmetro a 10%	: 60.95 µm
Comentários	:	Diâmetro a 50%	: 177.64 µm
Líquido	: Ethanol	Diâmetro a 90%	: 390.40 µm
Agente dispersante	:	Diâmetro médio	: 204.13 µm
Operador	: Lasid 2	Mie	: 1.510-0.100/1.361
Empresa	: UFRGS	Densidade/Fator	-----
Localização	: Porto Alegre - RS	Superfície específica	-----

x	0.04	0.07	0.10	0.20	0.30	0.40	0.50	0.60	0.70	0.80
Q3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.05	0.08	0.08	0.08	0.08	0.10
q3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.01
x	0.90	1.00	1.10	1.20	1.30	1.40	1.60	1.80	2.00	2.20
Q3	0.12	0.16	0.20	0.24	0.29	0.34	0.44	0.54	0.63	0.72
q3	0.01	0.03	0.04	0.04	0.05	0.06	0.06	0.07	0.07	0.08
x	2.40	2.60	3.00	4.00	5.00	6.00	6.50	7.00	7.50	8.00
Q3	0.81	0.88	1.01	1.21	1.34	1.45	1.49	1.54	1.59	1.64
q3	0.09	0.07	0.08	0.06	0.05	0.05	0.04	0.06	0.06	0.07
x	8.50	9.00	10.00	11.00	12.00	13.00	14.00	15.00	16.00	17.00
Q3	1.69	1.74	1.84	1.94	2.03	2.12	2.19	2.27	2.34	2.40
q3	0.07	0.07	0.08	0.09	0.09	0.09	0.08	0.10	0.09	0.08
x	18.00	19.00	20.00	22.00	25.00	28.00	32.00	36.00	38.00	40.00
Q3	2.46	2.52	2.58	2.70	2.89	3.12	3.52	4.06	4.38	4.72
q3	0.09	0.09	0.10	0.11	0.12	0.17	0.25	0.39	0.50	0.56
x	45.00	50.00	53.00	56.00	63.00	71.00	75.00	80.00	85.00	90.00
Q3	5.72	6.89	7.67	8.49	10.59	13.21	14.60	16.37	18.17	20.01
q3	0.71	0.93	1.13	1.25	1.50	1.84	2.13	2.31	2.50	2.71
x	95.00	100.0	106.0	112.0	125.0	130.0	140.0	145.0	150.0	160.0
Q3	21.86	23.71	25.93	28.14	32.85	34.62	38.08	39.76	41.42	44.64
q3	2.88	3.03	3.20	3.38	3.61	3.79	3.93	4.03	4.12	4.20
x	170.0	180.0	190.0	200.0	212.0	242.0	250.0	300.0	400.0	500.0
Q3	47.73	50.68	53.51	56.20	59.27	66.20	67.89	77.21	91.18	98.76
q3	4.29	4.34	4.40	4.41	4.43	4.40	4.37	4.30	4.08	2.86

x : diâmetro / µm Q3 : valor cumulativo / % q3 : density distribution

APÊNDICE N - Distribuição granulométrica de inclusões passantes para a velocidade de lingotamento de 0,86 m/min do veio lateral do ensaio I



DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA

CILAS 1190 Líquido

Faixa : 0.04 μm - 2500.00 μm / 100 Classes

Ref da amostra	: 8000_B2_4	Ultrasom	: 60	s
Sample Name	: Polietileno	Obscurations	: 4 / 1.71	%
Sample type	: Polimero	Diâmetro a 10%	: 60.95	μm
Comentários	:	Diâmetro a 50%	: 177.64	μm
Líquido	: Ethanol	Diâmetro a 90%	: 390.40	μm
Agente dispersante	:	Diâmetro médio	: 204.13	μm
Operador	: Lasid 2	Mie	: 1.510-0.100/1.361	
Empresa	: UFRGS	Densidade/Fator	: -----	
Localização	: Porto Alegre - RS	Superfície específica	: -----	

x	0.04	0.07	0.10	0.20	0.30	0.40	0.50	0.60	0.70	0.80
Q3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.05	0.08	0.08	0.08	0.08	0.10
q3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.01
x	0.90	1.00	1.10	1.20	1.30	1.40	1.60	1.80	2.00	2.20
Q3	0.12	0.16	0.20	0.24	0.29	0.34	0.44	0.54	0.63	0.72
q3	0.01	0.03	0.04	0.04	0.05	0.06	0.06	0.07	0.07	0.08
x	2.40	2.60	3.00	4.00	5.00	6.00	6.50	7.00	7.50	8.00
Q3	0.81	0.88	1.01	1.21	1.34	1.45	1.49	1.54	1.59	1.64
q3	0.09	0.07	0.08	0.06	0.05	0.05	0.04	0.06	0.06	0.07
x	8.50	9.00	10.00	11.00	12.00	13.00	14.00	15.00	16.00	17.00
Q3	1.69	1.74	1.84	1.94	2.03	2.12	2.19	2.27	2.34	2.40
q3	0.07	0.07	0.08	0.09	0.09	0.09	0.08	0.10	0.09	0.08
x	18.00	19.00	20.00	22.00	25.00	28.00	32.00	36.00	38.00	40.00
Q3	2.46	2.52	2.58	2.70	2.89	3.12	3.52	4.06	4.38	4.72
q3	0.09	0.09	0.10	0.11	0.12	0.17	0.25	0.39	0.50	0.56
x	45.00	50.00	53.00	56.00	63.00	71.00	75.00	80.00	85.00	90.00
Q3	5.72	6.89	7.67	8.49	10.59	13.21	14.60	16.37	18.17	20.01
q3	0.71	0.93	1.13	1.25	1.50	1.84	2.13	2.31	2.50	2.71
x	95.00	100.0	106.0	112.0	125.0	130.0	140.0	145.0	150.0	160.0
Q3	21.86	23.71	25.93	28.14	32.85	34.62	38.08	39.76	41.42	44.64
q3	2.88	3.03	3.20	3.38	3.61	3.79	3.93	4.03	4.12	4.20
x	170.0	180.0	190.0	200.0	212.0	242.0	250.0	300.0	400.0	500.0
Q3	47.73	50.68	53.51	56.20	59.27	66.20	67.89	77.21	91.18	98.76
q3	4.29	4.34	4.40	4.41	4.43	4.40	4.37	4.30	4.08	2.86

x : diâmetro / μm Q3 : valor cumulativo / % q3 : density distribution

APÊNDICE O - Distribuição granulométrica de inclusões passantes para a velocidade de lingotamento de 0,86 m/min do veio central do ensaio I



DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA

CILAS 1190 Líquido

Faixa : 0.04 μm - 2500.00 μm / 100 Classes

Ref da amostra	: Sample	Ultrasom	: 60	s
Sample Name	: Polietileno	Obscurations	: 6 / 0.91	%
Sample type	: Polimero	Diâmetro a 10%	: 32.39	μm
Comentários	:	Diâmetro a 50%	: 132.32	μm
Líquido	: Ethanol	Diâmetro a 90%	: 368.70	μm
Agente dispersante	:	Diâmetro médio	: 169.16	μm
Operador	: Lasid 2	Mie	: 1.510-0.100/1.361	
Empresa	: UFRGS	Densidade/Fator	-----	
Localização	: Porto Alegre - RS	Superfície específica	-----	

x	0.04	0.07	0.10	0.20	0.30	0.40	0.50	0.60	0.70	0.80
Q3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02
q3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01
x	0.90	1.00	1.10	1.20	1.30	1.40	1.60	1.80	2.00	2.20
Q3	0.05	0.09	0.14	0.20	0.27	0.33	0.48	0.62	0.76	0.89
q3	0.02	0.03	0.04	0.06	0.07	0.07	0.09	0.10	0.11	0.11
x	2.40	2.60	3.00	4.00	5.00	6.00	6.50	7.00	7.50	8.00
Q3	1.01	1.12	1.32	1.68	1.95	2.17	2.27	2.36	2.45	2.53
q3	0.12	0.12	0.12	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.11	0.10
x	8.50	9.00	10.00	11.00	12.00	13.00	14.00	15.00	16.00	17.00
Q3	2.61	2.70	2.86	3.03	3.22	3.41	3.61	3.83	4.06	4.32
q3	0.11	0.13	0.13	0.15	0.18	0.20	0.23	0.27	0.30	0.36
x	18.00	19.00	20.00	22.00	25.00	28.00	32.00	36.00	38.00	40.00
Q3	4.58	4.86	5.16	5.80	6.88	8.07	9.81	11.67	12.63	13.61
q3	0.38	0.43	0.49	0.56	0.71	0.88	1.09	1.32	1.49	1.60
x	45.00	50.00	53.00	56.00	63.00	71.00	75.00	80.00	85.00	90.00
Q3	16.06	18.53	19.99	21.44	24.75	28.35	30.07	32.16	34.17	36.11
q3	1.74	1.97	2.10	2.21	2.36	2.53	2.63	2.72	2.78	2.85
x	95.00	100.0	106.0	112.0	125.0	130.0	140.0	145.0	150.0	160.0
Q3	37.97	39.77	41.84	43.82	47.87	49.33	52.14	53.48	54.78	57.29
q3	2.88	2.94	2.98	3.02	3.09	3.12	3.18	3.20	3.22	3.26
x	170.0	180.0	190.0	200.0	212.0	242.0	250.0	300.0	400.0	500.0
Q3	59.66	61.92	64.07	66.11	68.43	73.69	74.97	82.13	93.11	99.03
q3	3.28	3.32	3.33	3.34	3.34	3.33	3.30	3.29	3.20	2.22

x : diâmetro / μm Q3 : valor cumulativo / % q3 : density distribution

APÊNDICE P- Distribuição granulométrica de inclusões passantes para a velocidade de lingotamento de 0,86 m/min do veio lateral do ensaio II



DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA

CILAS 1190 Líquido

Faixa : 0.04 μm - 2500.00 μm / 100 Classes

Ref da amostra	: 9000_A2	Ultrasom	: 60 s
Sample Name	: Polietileno	Obscurations	: 5 / 2.55 %
Sample type	: Polimero	Diâmetro a 10%	: 88.30 μm
Comentários	:	Diâmetro a 50%	: 215.94 μm
Líquido	: Ethanol	Diâmetro a 90%	: 412.63 μm
Agente dispersante	:	Diâmetro médio	: 235.42 μm
Operador	: Lasid 2	Mie	: 1.510-0.100/1.361
Empresa	: UFRGS	Densidade/Fator	-----
Localização	: Porto Alegre - RS	Superfície específica	-----

x	0.04	0.07	0.10	0.20	0.30	0.40	0.50	0.60	0.70	0.80
Q3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
q3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
x	0.90	1.00	1.10	1.20	1.30	1.40	1.60	1.80	2.00	2.20
Q3	0.00	0.00	0.02	0.04	0.07	0.11	0.18	0.25	0.32	0.39
q3	0.00	0.00	0.02	0.02	0.03	0.05	0.05	0.05	0.06	0.07
x	2.40	2.60	3.00	4.00	5.00	6.00	6.50	7.00	7.50	8.00
Q3	0.46	0.51	0.61	0.75	0.81	0.81	0.81	0.81	0.81	0.81
q3	0.07	0.06	0.06	0.04	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
x	8.50	9.00	10.00	11.00	12.00	13.00	14.00	15.00	16.00	17.00
Q3	0.83	0.84	0.87	0.91	0.94	0.98	1.01	1.04	1.07	1.09
q3	0.03	0.02	0.03	0.04	0.03	0.04	0.04	0.04	0.04	0.03
x	18.00	19.00	20.00	22.00	25.00	28.00	32.00	36.00	38.00	40.00
Q3	1.12	1.14	1.16	1.20	1.25	1.29	1.39	1.53	1.62	1.73
q3	0.05	0.03	0.03	0.04	0.03	0.03	0.07	0.11	0.15	0.19
x	45.00	50.00	53.00	56.00	63.00	71.00	75.00	80.00	85.00	90.00
Q3	2.08	2.55	2.90	3.28	4.36	5.87	6.72	7.88	9.12	10.44
q3	0.27	0.40	0.54	0.62	0.82	1.13	1.39	1.61	1.83	2.06
x	95.00	100.0	106.0	112.0	125.0	130.0	140.0	145.0	150.0	160.0
Q3	11.84	13.29	15.09	16.96	21.14	22.78	26.09	27.75	29.41	32.71
q3	2.31	2.53	2.76	3.03	3.40	3.74	3.99	4.23	4.37	4.57
x	170.0	180.0	190.0	200.0	212.0	242.0	250.0	300.0	400.0	500.0
Q3	35.97	39.17	42.29	45.33	48.86	57.06	59.10	70.68	88.64	98.40
q3	4.80	5.00	5.16	5.30	5.41	5.54	5.60	5.67	5.58	3.91

x : diâmetro / μm Q3 : valor cumulativo / % q3 : density distribution

APÊNDICE Q - Distribuição granulométrica de inclusões passantes para a velocidade de lingotamento de 0,86 m/min do veio central do ensaio II



DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA

CILAS 1190 Líquido

Faixa : 0.04 µm - 2500.00 µm / 100 Classes

Ref da amostra : 9000_B2	Ultrasom : 60 s
Sample Name : Polietileno	Obscurations : 4 / 2.29 %
Sample type : Polimero	Diâmetro a 10% : 78.97 µm
Comentários :	Diâmetro a 50% : 187.18 µm
Líquido : Ethanol	Diâmetro a 90% : 295.41 µm
Agente dispersante :	Diâmetro médio : 189.65 µm
Operador : Lasid 2	Fraunhofer
Empresa : UFRGS	Densidade/Fator -----
Localização : Porto Alegre - RS	Superfície específica -----

x	0.04	0.07	0.10	0.20	0.30	0.40	0.50	0.60	0.70	0.80
Q3	0.00	0.00	0.00	0.08	0.16	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19
q3	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00
x	0.90	1.00	1.10	1.20	1.30	1.40	1.60	1.80	2.00	2.20
Q3	0.19	0.19	0.19	0.20	0.21	0.23	0.30	0.39	0.49	0.58
q3	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.02	0.04	0.06	0.07	0.07
x	2.40	2.60	3.00	4.00	5.00	6.00	6.50	7.00	7.50	8.00
Q3	0.67	0.75	0.88	1.05	1.14	1.14	1.14	1.16	1.18	1.20
q3	0.08	0.07	0.07	0.04	0.03	0.00	0.00	0.02	0.02	0.02
x	8.50	9.00	10.00	11.00	12.00	13.00	14.00	15.00	16.00	17.00
Q3	1.22	1.23	1.26	1.30	1.33	1.37	1.41	1.45	1.50	1.55
q3	0.02	0.01	0.02	0.03	0.03	0.04	0.04	0.04	0.06	0.06
x	18.00	19.00	20.00	22.00	25.00	28.00	32.00	36.00	38.00	40.00
Q3	1.60	1.65	1.71	1.81	1.92	2.02	2.15	2.33	2.46	2.60
q3	0.07	0.07	0.09	0.08	0.06	0.07	0.07	0.11	0.18	0.20
x	45.00	50.00	53.00	56.00	63.00	71.00	75.00	80.00	85.00	90.00
Q3	3.10	3.79	4.29	4.84	6.29	8.11	9.05	10.24	11.44	12.65
q3	0.32	0.49	0.64	0.74	0.92	1.14	1.28	1.37	1.48	1.58
x	95.00	100.0	106.0	112.0	125.0	130.0	140.0	145.0	150.0	160.0
Q3	13.88	15.14	16.71	18.38	22.36	24.05	27.73	29.73	31.82	36.29
q3	1.70	1.83	2.01	2.26	2.70	3.21	3.70	4.25	4.60	5.16
x	170.0	180.0	190.0	200.0	212.0	242.0	250.0	300.0	400.0	500.0
Q3	41.08	46.13	51.48	56.81	62.96	75.96	78.75	91.04	99.31	100.00
q3	5.89	6.59	7.38	7.75	7.87	7.32	6.40	5.03	2.14	0.23

x : diâmetro / µm Q3 : valor cumulativo / % q3 : density distribution

APÊNDICE R - Distribuição granulométrica de inclusões passantes para a velocidade de lingotamento de 0,86 m/min do veio lateral do ensaio III



DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA

CILAS 1190 Líquido

Faixa : 0.04 μm - 2500.00 μm / 100 Classes

Ref da amostra	: ANA	Ultrasom	: 60 s
Sample Name	: Polietileno	Obscurations	: 5 / 2.30 %
Sample type	: Polimero	Diâmetro a 10%	: 77.89 μm
Comentários	:	Diâmetro a 50%	: 196.07 μm
Líquido	: Ethanol	Diâmetro a 90%	: 399.12 μm
Agente dispersante	:	Diâmetro médio	: 220.08 μm
Operador	: Lasid 2	Mie	: 1.510-0.100/1.361
Empresa	: UFRGS	Densidade/Fator	-----
Localização	: Porto Alegre - RS	Superfície específica	-----

x	0.04	0.07	0.10	0.20	0.30	0.40	0.50	0.60	0.70	0.80
Q3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
q3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
x	0.90	1.00	1.10	1.20	1.30	1.40	1.60	1.80	2.00	2.20
Q3	0.00	0.00	0.02	0.05	0.09	0.13	0.22	0.30	0.38	0.46
q3	0.00	0.00	0.02	0.03	0.04	0.05	0.06	0.06	0.06	0.07
x	2.40	2.60	3.00	4.00	5.00	6.00	6.50	7.00	7.50	8.00
Q3	0.53	0.59	0.69	0.83	0.90	0.90	0.91	0.93	0.96	0.99
q3	0.07	0.06	0.06	0.04	0.03	0.00	0.01	0.02	0.04	0.04
x	8.50	9.00	10.00	11.00	12.00	13.00	14.00	15.00	16.00	17.00
Q3	1.02	1.05	1.11	1.17	1.23	1.29	1.34	1.39	1.43	1.46
q3	0.04	0.04	0.05	0.05	0.06	0.06	0.06	0.06	0.05	0.04
x	18.00	19.00	20.00	22.00	25.00	28.00	32.00	36.00	38.00	40.00
Q3	1.49	1.51	1.53	1.56	1.59	1.63	1.73	1.91	2.04	2.19
q3	0.04	0.03	0.03	0.03	0.02	0.03	0.06	0.13	0.21	0.25
x	45.00	50.00	53.00	56.00	63.00	71.00	75.00	80.00	85.00	90.00
Q3	2.70	3.39	3.88	4.44	5.94	7.99	9.12	10.62	12.20	13.85
q3	0.37	0.56	0.72	0.87	1.09	1.46	1.76	1.98	2.22	2.46
x	95.00	100.0	106.0	112.0	125.0	130.0	140.0	145.0	150.0	160.0
Q3	15.55	17.29	19.42	21.58	26.29	28.10	31.67	33.44	35.18	38.60
q3	2.68	2.89	3.12	3.35	3.66	3.94	4.11	4.30	4.38	4.52
x	170.0	180.0	190.0	200.0	212.0	242.0	250.0	300.0	400.0	500.0
Q3	41.92	45.11	48.19	51.14	54.51	62.18	64.06	74.47	90.12	98.61
q3	4.67	4.76	4.86	4.91	4.94	4.95	4.93	4.87	4.64	3.25

x : diâmetro / μm Q3 : valor cumulativo / % q3 : density distribution

APÊNDICE S - Distribuição granulométrica de inclusões passantes para a velocidade de lingotamento de 0,86 m/min do veio central do ensaio III



DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA

CILAS 1190 Líquido

Faixa : 0.04 µm - 2500.00 µm / 100 Classes

Ref da amostra	: 9000_B2_3	Ultrasom	: 60 s
Sample Name	: Polietileno	Obscurations	: 5 / 2.43 %
Sample type	: Polimero	Diâmetro a 10%	: 82.34 µm
Comentários	:	Diâmetro a 50%	: 200.58 µm
Líquido	: Ethanol	Diâmetro a 90%	: 401.64 µm
Agente dispersante	:	Diâmetro médio	: 223.93 µm
Operador	: Lasid 2	Mie	: 1.510-0.100/1.361
Empresa	: UFRGS	Densidade/Fator	-----
Localização	: Porto Alegre - RS	Superfície específica	-----

x	0.04	0.07	0.10	0.20	0.30	0.40	0.50	0.60	0.70	0.80
Q3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
q3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
x	0.90	1.00	1.10	1.20	1.30	1.40	1.60	1.80	2.00	2.20
Q3	0.00	0.00	0.02	0.06	0.09	0.13	0.22	0.30	0.39	0.46
q3	0.00	0.00	0.02	0.04	0.03	0.05	0.06	0.06	0.07	0.06
x	2.40	2.60	3.00	4.00	5.00	6.00	6.50	7.00	7.50	8.00
Q3	0.53	0.60	0.70	0.84	0.90	0.90	0.91	0.94	0.97	1.00
q3	0.07	0.07	0.06	0.04	0.02	0.00	0.01	0.03	0.04	0.04
x	8.50	9.00	10.00	11.00	12.00	13.00	14.00	15.00	16.00	17.00
Q3	1.03	1.06	1.13	1.20	1.27	1.34	1.40	1.46	1.51	1.56
q3	0.04	0.05	0.06	0.06	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07
x	18.00	19.00	20.00	22.00	25.00	28.00	32.00	36.00	38.00	40.00
Q3	1.60	1.63	1.66	1.70	1.71	1.71	1.73	1.82	1.90	2.00
q3	0.06	0.05	0.05	0.04	0.01	0.00	0.01	0.07	0.13	0.17
x	45.00	50.00	53.00	56.00	63.00	71.00	75.00	80.00	85.00	90.00
Q3	2.35	2.87	3.27	3.72	5.02	6.85	7.89	9.29	10.78	12.36
q3	0.25	0.42	0.59	0.70	0.95	1.31	1.63	1.86	2.11	2.37
x	95.00	100.0	106.0	112.0	125.0	130.0	140.0	145.0	150.0	160.0
Q3	14.00	15.70	17.79	19.92	24.62	26.43	30.03	31.82	33.58	37.05
q3	2.60	2.84	3.08	3.32	3.67	3.96	4.17	4.37	4.45	4.61
x	170.0	180.0	190.0	200.0	212.0	242.0	250.0	300.0	400.0	500.0
Q3	40.42	43.68	46.82	49.83	53.28	61.14	63.06	73.74	89.84	98.57
q3	4.77	4.89	4.98	5.03	5.08	5.09	5.06	5.02	4.80	3.36

x : diâmetro / µm Q3 : valor cumulativo / % q3 : density distribution