

Universidade Federal de Ouro Preto Escola de Minas Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais



Universidade Federal de Ouro Preto

"SIMULAÇÃO FLUIDODINÂMICA DO FLUXO BIFÁSICO EM UM DISTRIBUIDOR DE LINGOTAMENTO CONTÍNUO COM BARREIRA GASOSA"

Autor: Matheus Teles Braga de OliveiraOrientador: Prof. D.Sc. Johne Jesus Mol Peixoto (DEMET/UFOP)

Ouro Preto/MG Agosto de 2021 Matheus Teles Braga de Oliveira

"Simulação Fluidodinâmica do Fluxo Bifásico em um Distribuidor de Lingotamento Contínuo com Barreira Gasosa"

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Metalúrgica da Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto como parte dos requisitos para a obtenção do Grau de Engenheiro Metalúrgico

Ouro Preto/MG Agosto de 2021





MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO Universidade Federal de Ouro Preto Escola de Minas Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais



ATA DE DEFESA DE MONOGRAFIA

Aos 31 dias do mês de agosto de 2021, às 16horas, por meio da plataforma de videoconferência do *Google Meet*, foi realizada a defesa de monografia de graduação em Engenharia Metalúrgica pelo aluno **Matheus Teles Braga de Oliveira**, sendo a comissão examinadora constituída pelos professores Johne Jesus do Mol Peixoto (Presidente), Heric Henrique Souza e Silva (IFMG/Campus Ouro Branco) e pelo mestrando Gustavo Santos Galante (Mestrando REDEMAT). O aluno apresentou a monografia intitulada "*Simulação Fluidodinâmica do Fluxo Bifásico em um Distribuidor de Lingotamento Contínuo com Barreira Gasosa*". A comissão deliberou, por unanimidade, pela aprovação da monografia, concedendo ao aluno um prazo de 15 dias para incorporar, ao texto final, as alterações sugeridas. Na forma regulamentar, lavrou-se a presente ata, que vai devidamente assinada pelos membros da comissão e pelo aluno.

Ouro Preto, 31 de agosto de 2021.



Campus Universitário – CEP: 35400-000 – Ouro Preto – MG Home page: http://www.em.ufop.br – E-mail: demet@em.ufop.br – Fones: (0xx31) 3559-1561/1562 – Fax: (0xx31) 3559-1561

RESUMO

O aprimoramento do uso do distribuidor abriu possibilidades de melhorias no processo de lingotamento contínuo do aço. Porém, há necessidade de se estudar a influência de forças de interação partícula-bolha em sistemas com injeção de gás, para a melhor compreensão do comportamento de uma cortina gasosa em distribuidores. O presente trabalho aborda o modelamento matemático de um distribuidor assimétrico de dois veios com diferentes condições de injeção de gás, para estudo do comportamento fluidodinâmico. O modelo matemático foi desenvolvido no *software* Ansys® CFX, considerando as forças de não-arraste, forças de sustentação e de dispersão turbulenta para diferentes vazões. Foi verificado, por meio de análise de vetores de velocidade de fluxo, que a injeção de gás gera zonas de recirculação dentro do distribuidor, podendo contribuir para flotação de inclusões por meio de coalescimento e adesão interfacial, por outro lado, diminui o tempo de permanência do fluido.

Palavras chave: Inclusão. Injeção de gás. Distribuidor. Modelamento matemático. Simulação.

ABSTRACT

The improvement of the tundish use opened up possibilities for more benefits in the continuous casting process. Study the influence of bubble-particle interaction forces is needed, in order to better understand the behavior of a gas curtain in the tundishes. This work deals with the mathematical modeling of an two strand asymmetric tundish with different gas injection conditions, for the study of fluid dynamic behavior. The work aims to evaluate the influence of a gas curtain on the tundish flow, through computer simulation. The mathematical model was developed in the Ansys® CFX software, considering non-drag forces acting in a multiphase system. It was evidenced, through flow velocity vectors analysis, that the injection of gas generates recirculation zones inside the distributor, which can contribute to the flotation of inclusions by coalescence and interfacial adhesion, on the other hand, the application of gas reduces the fluid's residence time.

Keywords: Inclusion. Gas injection. Tundish. Mathematical modeling. Simulation.

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1: Representação esquemática do processo de lingotamento contínuo 4
Figura 3.2: Zonas de fluxo em um distribuidor com barreiras de movimento5
Figura 3.3: Distribuidor de lingotamento contínuo com modificadores de fluxo6
Figura 3.4: Trinca originada a partir de uma inclusão não metálica
Figura 3.5: Exemplo de plugue poroso utilizado para injeção de gás em um distribuidor 9
Figura 3.6: Esquema representativo da interação partícula-bolha em função do ângulo de contato
Figura 3.7: Exemplificação de posicionamentos diferentes do plugue poroso
Figura 3.8: Perfis de velocidade para diferentes posições de injeção de gás no distribuidor
Figura 3.9: Linhas de fluxo em um distribuidor sem injeção de gás
Figura 3.10: Linhas de fluxo em um distribuidor com injeção de gás
Figura 3.11: Representação das linhas de curso em um distribuidor sem injeção de gás 14
Figura 3.12: Representação das linhas de curso em um distribuidor com injeção de gás 14
Figura 3.13: Comparação da eficiência de remoção de inclusões de diferentes tamanhos. 15
Figura 3.14: Fração volumétrica de gás obtida na simulação em comparação à filmada no
modelo físico utilizando câmera comum, sendo (a) com injeção de gás no fundo e em (b)
injeção de gás no fundo e nas paredes17
Figura 3.15: Perfil instantâneo da força de arrasto em diferentes regiões para diferentes
volumes de controle
Figura 3.16: Variação da velocidade vertical do líquido em função da largura do domínio.
Figura 4.1: Vista bidimensional do distribuidor20
Figura 4.2: Malha aplicada em uma geometria para simulação computacional
Figura 5.1: Esquema de medição do tamanho de bolha no modelo físico
Figura 5.2: Diâmetro médio das bolhas para diferentes vazões
Figura 5.3: Perfil da barreira gasosa para diferentes modelos de forças de sustentação com
vazão de gás de 1L/min
Figura 5.4: Perfil da barreira gasosa para diferentes modelos de forças de sustentação com
vazão de gás de 3L/min
Figura 5.5: Vista superior da cortina gasosa para diferentes modelos de forças de
sustentação com vazão de gás de 1L/min

Figura 5.6: Vista superior da cortina gasosa para diferentes modelos de forças de
sustentação com vazão de gás de 3L/min
Figura 5.7: Cortina gasosa do modelo físico para diferentes vazões: (a) 1L/min, (b) 3L/min
Figura 5.8: Modelos computacionais da força de dispersão turbulenta – (a) 1L/min e (b)
3L/min
Figura 5.9: Vista superior da cortina gasosa para diferentes modelos de forças de dispersão
turbulenta com vazão de gás de: (a) 1L/min e (b) 3L/min
Figura 5.10: Linhas de fluxo para diferentes configurações - (a) Sem barreiras, (b) com
barreiras e injeção de 1L/min de gás no modelo de Favre e (c) com barreiras e injeção de
gás no modelo de Favre
Figura 5.11: Vetores de velocidade do fluxo – (a) 1L/min Favre; (b) 3L/min Favre
Figura 5.12: Valores de: (a) tempo de residência para os modelos sem injeção de gás; (b)
tempo de residência para os modelos com injeção de 3L/min; (c) TMR para os modelos
sem injeção de gás; (d) TMR para os modelos com injeção de 3L/min de gás; (e) descarte
para os modelos sem injeção de gás; (f) descarte para os modelos com injeção de 3L/min
de gás
Figura 5.13: Valores do modelo matemático de 1L/min: (a) tempo de residência; (b)
descarte; (c) TMR
Figura 5.14: Curvas DTR dos modelos físicos e matemáticos com injeção de 3L/min de
gás
Figura 5.15: Curvas DTR dos modelos físicos e matemáticos sem injeção de gás
Figura 5.16: Valores da fração de volume morto (FVM) para os modelos físicos e
matemáticos: (a) sem injeção de gás; (b) com injeção de 3L/min de gás
Figura 5.17: Valores da fração de volume morto (FVM) para o modelo matemático com
injeção de 1L/min de gás

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1: Valores estimados e calculados para diferentes configurações empregadas r	10
modelamento matemático do distribuidor industrial1	.7
Tabela 4.1: Configurações dos modelos em relação às forças consideradas para simulaçã	о.
	21

LISTA DE SÍMBOLOS/SIGLAS

- \vec{u}_g, \vec{u}_l = velocidade da bolha (g = na saída do bico de gás; l = no líquido) (m/s);
- C_D Coeficiente de arraste;

 C_L Coeficiente de sustentação; C_{TD} Coeficiente de dispersão turbulenta;

C_{WL} Coeficiente da força de lubrificação;

 C_{cd} Coeficiente de transferência de momento para a força de arraste;

 U_l , U_g Velocidade da fase (l = líquido; g = gás) (m/s);

- d_g Diâmetro da bolha gasosa (m);
- n_w Distância normal da parede (m).
- v_l Volume específico de líquido (m³/kg);
- α_g , α_l Fração volumétrica (l = líquido; g = gás);
- ρ_l Densidade do líquido (kg/m³);
- σ_{lg} Número de Schmidt turbulento;
- θ_A Ângulo Crítico de Adesão;
- $\theta_{\rm C}$ Ângulo Critico de Contato;
- LF Força de Sustentação (Lift Force)
- TDF Força de Dispersão Turbulenta (Turbulent Dispersion Force)

SUMÁRIO

1	INT	ΓRODUÇÃO	1
2	OB	JETIVOS	2
	2.1	Objetivo Geral	2
	2.2	Objetivos Específicos	2
3	RE	FERENCIAL TEÓRICO	3
	3.1	Lingotamento Contínuo	3
	3.2	Papel do Distribuidor no Processo de Lingotamento Contínuo	4
	3.3	Influências das Inclusões Sobre as Propriedades do Aço	7
	3.4	Injeção de Gás Aplicada ao Distribuidor	9
	3.4.	.1 Simulação computacional e injeção de gás aplicada ao distribuidor	10
	3.5	Modelagem do Escoamento Multifásico	15
	3.5.	.1 Abordagem Euleriana-Euleriana	16
	3.5.	.2 Abordagem Euleriana-Lagrangeana	16
	3.5.	.3 Forças de arraste e não-arraste das partículas	16
4	MA	ATERIAIS E MÉTODOS	20
	4.1	Definição do Domínio e Condições de Contorno	20
	4.2	Aplicação de Malha à Geometria	22
	4.3	Modelo Matemático	22
	4.4	Curvas de Distribuição do Tempo de Residência	24
5	RE	SULTADOS E DISCUSSÃO	26
	5.1	Pluma Gasosa	26
	5.2	Perfil de Velocidade	34
	5.3	Tempo de Residência	36
6	CO	NCLUSÃO	40
R	EFER	ENCIAL BIBLIOGÁFICO	42

1 INTRODUÇÃO

O distribuidor foi introduzido ao processo de lingotamento contínuo com a função de fornecer aço para os moldes e servir de reservatório de aço líquido na troca de panelas. Devido às exigências de se ter um aço cada vez mais límpido e de qualidade, o distribuidor vem sendo utilizado estrategicamente para remoção de inclusões (WOLLMANN, 1999). Em seus estudos Mazumdar e Guthrie (1999) expõem a capacidade de se expandir as funções do distribuidor, que passa a ser considerado um reator metalúrgico que auxilia no processo de remoção de inclusões do aço, homogeneização térmica e no controle de composição química.

O uso de modificadores de fluxo foi a tecnologia adotada para aumentar o tempo de residência do aço no distribuidor, de modo a potencializar a remoção de inclusões. Existem três zonas de fluxo no distribuidor: zona de mistura perfeita, que devido à alta turbulência os gradientes de composição e térmicos são dissipados, e também favorece o choque e coalescência de inclusões; zona de fluxo pistonado, que possui velocidade pontual máxima; zona morta é onde ocorre a estagnação do líquido no distribuidor, diminuindo assim o volume útil do equipamento (SZEKELY e ILEGBUSI, 1988; ALVES, 2014). O uso de cortinas gasosas, através de gás inerte por refratários porsos foi proposto para auxiliar na remoção de inclusões, tendo em vista que há interação entre as partículas e as bolhas de gás, provocando a flotação de inclusões de tamanho menor, e também aumento no tempo de residência do aço, beneficiando a remoção de inclusões de tamanho maior. A simulação computacional do comportamento do fluxo dentro de um distribuidor foi utilizada por Meijie *et al.* (2011), Silva (2017) para avaliar o efeito da injeção de gás dentro do distribuidor, tendo como resultado o aumento da eficiência de remoção através da interação bolha-partícula e alteração de fluxo.

Souza (2019), por meio de simulação fluidodinâmica computacional, observou que o uso de o uso de modificadores de fluxo juntamente com injetor de gás não provoca melhoria na remoção de inclusões. Por outro lado, em um sistema com apenas injeção de gás há melhora no índice de remoção de inclusões menores, tendo em vista que a utilização de mobiliários promove melhoria na flotação de inclusões de tamanho maior.

Nesse trabalho será abordada a utilização de simulação computacional em Ansys CFX ®, os efeitos da injeção de gás em um distribuidor de dois veios, analisando o comportamento do fluxo do sistema. Os resultados da simulação serão comparados e validados com dados experimentais, obtidos em modelo físico por Ananias (2019) e Velasco (2020).

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

Avaliar por meio de simulação computacional os impactos da inserção de cortina gasosa no sistema sobre o comportamento do fluxo em um distribuidor, com posicionamento assimétrico da válvula longa e inibidor de turbulência. Resultados experimentais obtidos por Ananias (2019) e Velasco (2020) serão utilizados para validação do modelo computacional.

2.2 Objetivos Específicos

- Analisar o comportamento do fluxo com sistema de injeção de gás, para diferentes configurações de modificadores de fluxo;
- Avaliar o efeito das forças de interação bolha/líquido sobre a cortina gasosa e o fluxo de líquido no distribuidor;
- Avaliar a eficiência de remoção de inclusões em sistemas com e sem injeção de gás, considerando diferentes tamanhos de partículas;

3 REFERENCIAL TEÓRICO

3.1 Lingotamento Contínuo

O lingotamento contínuo é um processo metalúrgico que ocorre a transição de fase do aço, passando de líquido para sólido. O objetivo principal dessa etapa é solidificar o aço, dandolhe uma forma específica para que seja empregado em outros passos da linha de produção. Essas formas são definidas pela seção transversal do molde, dando origem a um produto semiacabado. A Figura 3.1 ilustra o processo de lingotamento contínuo. O aço líquido é vazado da panela para o distribuidor, e depois para o molde de cobre resfriado por água, dando início à solidificação do aço. Segundo Peixoto (2016), o distribuidor funciona como um reservatório, para que seja fornecido aço líquido de forma contínua para o molde no momento de troca de panelas, garantindo a continuidade, a uniformidade térmica e composicional desse aço vazado.

É utilizada uma espécie de lubrificante para que não aconteça adesão da camada solidificada à parede do molde, e também um sistema de oscilação vertical desse molde. Assim que o aço sai do molde, este é sustentado e extraído por rolos, e recebe jatos de água para finalizar o processo de solidificação, tendo em vista que internamente ainda há presença de aço líquido. O resfriamento deve ser feito de forma contínua e homogênea a fim de garantir as mesmas propriedades ao longo da peça. Após alcançar a solidificação completa, o material é cortado no comprimento desejado (BRAGA, 2015).



Figura 3.1: Representação esquemática do processo de lingotamento contínuo. Disponível em: http://www.jfe-21st-cf.or.jp/chapter_2/2j_2.html. Acesso em: 06 set. 2021.

3.2 Papel do Distribuidor no Processo de Lingotamento Contínuo

O distribuidor desempenha uma função indispensável quando se trata de lingotamento contínuo, tendo em vista que é possível atrelar um processo realizado em batelada a um processo contínuo, sendo neste caso o refino secundário do aço e o processo de solidificação, respectivamente. Em sua essência, o distribuidor funciona como um reservatório de aço líquido, para que seja possível alimentar os moldes de forma controlada e uniforme. Esse equipamento permite a troca de panelas sem que o processo de lingotamento seja interrompido (SOUZA, 2019).

Estudos feitos por Mazumdar e Guthrie (1999) mostraram que é capaz de se expandir a utilidade do distribuidor, passando então a ser considerado como um reator metalúrgico pelo fato de contribuir na flotação de inclusões do aço, homogeneização térmica e no controle de composição química.

As zonas de um distribuidor podem ser separadas de acordo com o comportamento do fluxo metálico, como exemplificado na Figura 3.2. Szekely e Ilegbusi (1988) e Alves (2014) classificaram as zonas de fluxo do distribuidor da seguinte forma:

A zona de mistura perfeita é uma região de grande turbulência, fazendo com que a composição química do aço seja constante nesse volume. Por conta da alta intensidade de

misturamento, essa zona favorece o choque e coalescência de inclusões, fazendo com que esse aglomerado tenha maior facilidade de ser flotado.

A zona de fluxo pistonado é a parcela de volume em que o aço terá velocidade média praticamente constante e tempo de residência mínimo do metal, ou seja, a velocidade pontual nessa zona é máxima. Para aumentar a flotabilidade, é ideal que se aumente o tempo de residência do aço.

A zona morta ou zona de volume morto é a região em que ocorre a estagnação de líquido no distribuidor. Com seu tempo de permanência longo ocorre a segregação de elementos químicos no aço, acarreta na grande perda de energia térmica do sistema. O volume morto está relacionado ao índice de utilização do volume do distribuidor.



Figura 3.2: Zonas de fluxo em um distribuidor com barreiras de movimento (Adaptado de THOMAS, 1997).

Em um distribuidor sem a presença de barreiras de fluxo, Wollman (1999) observou que existe uma zona de fluxo em que o aço líquido percorre o caminho até a válvula interna pelo fundo do reator, denominada "curto circuito". O tempo de permanência do aço nessa região é extremamente inferior ao das outras zonas, de forma que a interação desse volume no distribuidor seja desprezada, portanto, não existem benefícios atrelados a esse fenômeno, já que devido o baixo tempo de permanência não permite a flotação de inclusões.

O comportamento do fluxo dentro de um distribuidor é um fator decisivo para o processo de remoção de inclusões, considerando que é necessário um tempo mínimo para cada inclusão chegar à superfície. Modificadores de fluxo foram adotados como estratégias para que o tempo de permanência do banho no distribuidor seja aumentado. A Figura 3.3

exemplifica um distribuidor que apresenta barreiras de movimentos e modificadores de fluxo (WOLLMAN, 1999).



Figura 3.3: Distribuidor de lingotamento contínuo com modificadores de fluxo (SOUZA, 2019).

Souza (2019) classifica os principais modificadores de fluxo utilizados em distribuidores apresentados a seguir:

Inibidor de Turbulência

Os inibidores de turbulência são compostos por materiais refratários posicionados abaixo da válvula longa, ao fundo do distribuidor, e tem como objetivo diminuir o impacto do jato de aço e favorece a mudança de fluxo para a superfície livre do distribuidor. A formação de "*clusters*" de inclusões pode ser favorecida, assim como a redução da agitação na superfície do metal líquido.

Dique

O dique é uma barreira para o fluxo do aço. Posicionado na parte superior do distribuidor, ele redireciona o fluxo para a parte inferior do sistema. Normalmente são utilizados em conjunto com outros tipos de modificadores de fluxo.

Barragens

As barragens são posicionadas no fundo do distribuidor e, na maioria das vezes, depois dos diques. Tem como objetivo mudar o fluxo para a superfície do distribuidor, favorecendo a

captação de inclusões pela camada de escória, diminuindo o efeito de curto circuito, que é o movimento preferencial do líquido para a saída do distribuidor. Existem variações das barragens, com furos e sem furos.

Injeção de gás

Outro modificador de fluxo utilizado é incorporação de um plugue poroso para injeção de gás inerte no distribuidor. Essa placa porosa é posicionada na parte inferior do distribuidor, e então é feita a aplicação de gás para que seja formada uma cortina de bolhas, induzindo o fluxo até à superfície do sistema. Estudos como o de Meijie *et al.* (2011) e o de Silva (2017) mostram que a injeção de gás colabora para o aumento da remoção de inclusões presentes no aço.

3.3 Influências das Inclusões Sobre as Propriedades do Aço

As inclusões não metálicas são constituídas por fases vítreo-cerâmicas aderidas à matriz metálica do aço, sendo classificadas de acordo com sua origem, denominadas endógenas ou exógenas. As inclusões endógenas são formadas à medida que o aço se solidifica, devido à diminuição da solubilidade das espécies químicas presentes no metal líquido, podendo ser geradas também a partir da desoxidação do aço e reoxidação pelo ar. É uma classe de inclusões inevitáveis, não havendo possibilidade de removê-las completamente, mas para evitar que fenômenos prejudiciais associados às inclusões ocorram, deve-se ter controle da fração volumétrica e do tamanho médio dessas fases (MAPELLI, 2008).

Já as inclusões exógenas são oriundas de elementos não metálicos advindos da escória, de partículas do refratário produto de erosão/corrosão e tratamento inadequado na adição de ligas. Essa classe de inclusões pode ser prevenida, e tem como características, grande tamanho, aparecem em pequeno número e são distribuídas de forma heterogênea no aço (MAPELLI, 2008).

Três mecanismos revelam como ocorrem os efeitos deletérios das inclusões nas propriedades mecânicas aço, segundo Mapelli (2008). No primeiro caso, as inclusões atuam como concentradores de tensão, fazendo com que haja uma expansão do campo de tensões adjacente. Esse fenômeno pode acarretar na formação de vazios ao redor das inclusões, que crescem e coalescem, provocando o surgimento de trincas, como apresenta a Figura 3.4. Esses vazios são originados por conta da fratura da própria inclusão ou por conta do seu descolamento da matriz.

O segundo mecanismo está associado à solubilidade dos gases presentes na matriz do aço. Pelo fato de um gás apresentar maior solubilidade na inclusão, conforme a temperatura cai, ocorre o acúmulo de gás nas inclusões, que funcionam como um tanque de gás pressurizado. Com isso, um campo de tensões é gerado e é somado a tensões externas.

O terceiro mecanismo surge a partir da diferença de coeficiente de expansão térmica entre a inclusão não metálica e a matriz metálica. No processo de resfriamento, são tensões residuais são geradas, afetando propriedades mecânicas dos aços.



Figura 3.4: Trinca originada a partir de uma inclusão não metálica (MAPELLI, 2008).

As principais propriedades mecânicas dos aços afetadas pelas inclusões são ductilidade, tenacidade, resistência à fadiga e a usinabilidade do metal. Um dos problemas mais críticos relacionados à presença de inclusão é a falha no momento da aplicação.

Os efeitos das inclusões são dependentes (ALVES, 2014):

- Do número de inclusões, das propriedades físicas, tamanho e morfologia;
- Da distribuição e da orientação em relação à tensão e do limite de resistência do aço;
- Da diferença do coeficiente de expansão térmica do metal e da inclusão.

Inclusões com tamanho maior que 10µm de alumina, espinélio e cálcio-aluminatos são responsáveis pela diminuição da resistência à fadiga dos aços, pois nucleiam trincas por conta de tensões localizadas. Por outro lado, inclusões de MnS melhoram a usinabilidade dos aços, por conta da fragilização causada por esse tipo de inclusão. Em uma peça que tenha em sua matriz inclusões de sulfetos alongados, há uma queda brusca nas propriedades mecânicas desse aço, sendo que esses sulfetos servem de caminho para a

propagação de trincas. A soldabilidade e resistência à corrosão também são propriedades afetadas negativamente (ALVES, 2014).

3.4 Injeção de Gás Aplicada ao Distribuidor

A injeção de gás para remoção de inclusões no distribuidor é utilizada assim como em outros reatores do refino secundário do aço. Estudos são desenvolvidos com a finalidade de aprimorar os processos, a fim de se obter bolhas com o menor tamanho possível e melhorar a homogeneização do banho metálico (SOUZA, 2019).

A aplicação de gás dentro do distribuidor é feita por um plugue poroso posicionado no fundo do reator, como apresentado na Figura 3.5.



Figura 3.5: Exemplo de plugue poroso utilizado para injeção de gás em um distribuidor (MENDONÇA, 2016).

A utilização dessa tecnologia gera uma cortina gasosa que age como uma barreira vertical, direcionando o fluxo para a superfície do distribuidor. O gás mais utilizado é o argônio, e é injetado por um difusor encapsulado por um material cerâmico poroso (MENDONÇA, 2016).

Rogler (2004) cita os mecanismos responsáveis pela flotação de inclusões no aço líquido em um distribuidor. Para que ocorra o fenômeno de arraste de uma inclusão por uma bolha, é preciso que a bolha de gás e a partícula se aproximem, e, durante o contato, a interface partícula-bolha seja menor que a espessura crítica, causando então a ruptura dessa interface, provocando então a aderência da partícula à superfície da bolha. Na Figura 3.6 são mostradas as relações angulares entre uma bolha ascendente e as partículas que entram em contato com a superfície. O ângulo crítico de adesão (θ_A) é definido como ângulo máximo em que ocorre a fixação da partícula na interface da bolha, e o ângulo crítico de (θ_C) colisão é definido como o ângulo máximo em que ocorre a colisão entre a partícula e a bolha.



Figura 3.6: Esquema representativo da interação partícula-bolha em função do ângulo de contato (ROGLER, 2004).

Segundo Rogler (2004) o aumento da flotação de partículas por borbulhamento de gás acontece por conta de:

- Arraste bolha e partícula após a colisão, assim como a alta velocidade de transporte da inclusão capturada pela bolha até a superfície do metal líquido;
- A turbulência do sistema, que gera o aumento da taxa colisão entre partículas, formando assim aglomerados, beneficiando então a flotação dessas inclusões.

3.4.1 Simulação computacional e injeção de gás aplicada ao distribuidor

A modelagem matemática é uma técnica utilizada para análise e otimização do distribuidor, para prever e descrever as características do fluxo metálico e avaliar a influência no processo de remoção de inclusões presentes no aço líquido (MENDONÇA, 2016). Dessa forma, Souza (2019) simulou o escoamento de fluidos no interior de um modelo físico de um distribuidor de lingotamento contínuo com e sem a injeção de gás. Com a finalidade de estimar a remoção de inclusões em distribuidores que tem diferentes configurações de modificadores de fluxo e de injeção de gases, exemplificado na Figura 3.7. Estudos realizados em modelo físico por Mendonça (2016) foram utilizados para validação da simulação.



Figura 3.7: Exemplificação de posicionamentos diferentes do plugue poroso (SOUZA,

2019).

A Figura 3.8 ilustra os perfis de velocidade obtidos, por meio de CFD, para as diferentes configurações com injeção de gás. Em todas as configurações apresentadas fica evidente que a cortina gasosa funciona como uma barreira, deslocando o fluxo para a superfície do distribuidor. Foi observado por Mendonça (2016) e Souza (2019) que na configuração em que o plugue poroso foi posicionado a 28cm de distância da válvula longa (Figura 3.8(a)) a cortina gasosa sofre deslocamento por parte do escoamento do líquido.



Figura 3.8: Perfis de velocidade para diferentes posições de injeção de gás no distribuidor (SOUZA, 2019).

O modelo matemático utilizado por Souza (2019) apresenta limitações nos casos em que há elevada reincorporação de partículas presentes na escória para o banho, devido alta agitação do sistema. Também foi observado que uma configuração de um sistema com modificadores de fluxo e injeção de gás empregados conjuntamente não implica em melhores índices de flotação de inclusões. Configurações em que se tem apenas injeção gás tem melhores índices de eficiência de remoção de inclusões de tamanho menor, já em sistemas com modificadores de fluxo favorece a flotação de partículas maiores.

Meijie *et al.* (2011) apresentaram estudos sobre a eficiência de remoção de inclusões em um distribuidor de dois veios, com inibidor de turbulência, *baffler* e injeção de gás, utilizando modelamento matemático e testes industriais. Resultados foram obtidos realizando testes sem e com injeção de gás. As Figuras 3.9 e 3.10 mostram, respectivamente, as linhas de fluxo no interior do distribuidor. Na Figura 3.9 é possível observar que algumas linhas tem movimento ascendente natural, outras seguem o fluxo do metal se deslocando diretamente para o molde. Na Figura 3.10 a cortina gasosa gera duas zonas de refluxo, apresentando um perfil de recirculação, consequentemente, apresentando um tempo de residência maior comparado a um sistema sem injeção de gás.



Figura 3.9: Linhas de fluxo em um distribuidor sem injeção de gás (MEIJIE et al., 2011).



Figura 3.10: Linhas de fluxo em um distribuidor com injeção de gás (MEIJIE *et al.*, 2011). Analisando as linhas de curso das inclusões, apresentadas nas Figuras 3.11 e 3.12, é possível observar que após a barragem algumas inclusões sofrem movimento ascendente natural, atribui-se esse movimento às partículas de tamanho maior. Em um sistema sem a injeção de gás nota-se que certas inclusões começam um movimento em direção à superfície do distribuidor, mas devido à força de arraste do fluxo, são redirecionadas para o molde. Na Figura 3.12 observa-se uma concentração maior de inclusões antes do plugue poroso devido ao movimento de recirculação gerado pela cortina gasosa. Outro ponto importante é a quantidade de inclusões que se dirigem para o molde, sendo maior em um sistema sem injeção de gás (MEIJIE *et al.*, 2011).



Figura 3.11: Representação das linhas de curso em um distribuidor sem injeção de gás (MEIJIE *et al.*, 2011).



Figura 3.12: Representação das linhas de curso em um distribuidor com injeção de gás (MEIJIE *et al.*, 2011).

Nos testes industriais, foi avaliada a eficiência de remoção de inclusões por meio de análise de oxigênio no aço e análise metalográfica, demonstrada pela Figura 3.13, evidenciando o aumento na eficiência de remoção de inclusões, principalmente das de menor tamanho, que não sofrem um movimento ascendente natural, mas são removidas ao incorporar barreira gasosa no distribuidor.



Figura 3.13: Comparação da eficiência de remoção de inclusões de diferentes tamanhos (MEIJIE *et al.*, 2011).

Através de modelo físico e modelo matemático, CHEN *et al.* (2014) investigaram os efeitos da aplicação de um modificador de fluxo do tipo barragem e injeção de gás. Os resultados foram obtidos através da interpretação de curvas de distribuição de tempo de residência (DTR) originadas do processo experimental. Os autores discutem que o posicionamento do modificador de fluxo e do plugue poroso é determinante para o tempo de residência. Fez-se correlação do tempo de residência, volume morto e eficiência de flotação, de forma que, quanto maior o tempo de residência e menor volume morto, maior será a eficiência de remoção de inclusões.

Silva (2016) realizou testes em escala industrial, em uma usina siderúrgica fornecedora de matéria-prima para indústria automobilística. O estudo é baseado no efeito da injeção de gás inerte pela ponta das válvulas do tampão presentes no distribuidor. As amostras retiradas dos tarugos foram levadas a um microscópio eletrônico de varredura com detector de energia dispersiva para análise. As amostras do sistema com injeção de gás apresentaram menor número de inclusões e consequentemente menor área ocupada por essas partículas. Houve maior redução na quantidade de inclusões com faixa de tamanho entre 2,5µm e 5µm.

3.5 Modelagem do Escoamento Multifásico

Estudos que abordam problemas relativos à fluidodinâmica, transferência de calor e massa e design estrutural, normalmente fazem uso de softwares como CHAM Phoenics, o Ansys Fluent e o Ansys CFX, para complementar observações e ajudar no entendimento de alguns fenômenos (SILVA, 2017).

3.5.1 Abordagem Euleriana-Euleriana

Em um sistema que se aplica a abordagem Euleriana-Euleriana, fases diferentes são consideradas contínuas e interpenetrantes. O conceito de fração volumétrica, função do tempo e posição é aplicado, já que o volume de uma fase não é ocupado por outra. A equação da continuidade é aplicada para cada fase (SILVA, 2017).

3.5.2 Abordagem Euleriana-Lagrangeana

É uma abordagem restrita a sistemas multifásicos em que a fase dispersa representa uma pequena porção da fração volumétrica, mesmo que ocorre um grande aporte de massa. Aplica-se ao fluido a equação de Navier-Stokes, já para a fase dispersa adora-se o rastreio de grande número de partículas, bolhas ou gotas no volume de controle. Há possibilidade de transferência de momento linear, massa e energia por parte da fase dispersa para a fase fluida (SILVA, 2017).

3.5.3 Forças de arraste e não-arraste das partículas

Em um sistema multifásico as forças atuantes são classificadas como forças de arraste e forças de não-arraste. Forças devido à rotação do domínio, força de massa virtual, força de gradiente de pressão, força de dispersão turbulenta, força de lubrificação da parede e força de sustentação são classificadas como força de não-arraste. Os modelos de Schiller-Naumann, Ishii-Zuber e de Grace abordam as forças de arraste entre a fase dispersa e contínua de um sistema (NEVES, 2012).

Neves (2012) estudou o fluxo dentro de um distribuidor industrial com injeção de gás aplicado no fundo e nas paredes do equipamento, utilizando o modelo de Grace para tratar as forças de arraste. Na simulação computacional, foi considerado um sistema bifásico ar/água, desconsiderando a transferência de calor. Em relação às forças atuantes no sistema, o autor considerou apenas a força de arraste, já que os resultados obtidos desconsiderando as forças de não-arraste foram satisfatórios. A Figura 3.14 apresenta um corte transversal do distribuidor, mostrando a forma de aplicação do gás no sistema.



Figura 3.14: Fração volumétrica de gás obtida na simulação em comparação à filmada no modelo físico utilizando câmera comum, sendo (a) com injeção de gás no fundo e em (b) injeção de gás no fundo e nas paredes (NEVES, 2012).

A Tabela 3.1 apresenta os resultados estimados e calculados para diferentes configurações aplicadas ao distribuidor, utilizando modelamento matemático. Em sistemas com injeção de gás, os tempos de residência aumentaram. A fração de volume de mistura aumentou nas configurações com injeção de gás, isso significa que houve maior homogeneização química e térmica no interior do distribuidor. Há também um aumento na probabilidade de coalescência de inclusões de menor tamanho. O aumento do fluxo pistonado está diretamente relacionado á flotação de inclusões, de modo que aumenta a probabilidade de remoção dessas partículas (NEVES, 2012).

	Valores Estimados			Valores Calculados			
	t _{min} (s)	t _{máx} (s)	C _{n, máx}	t _{médio} (s)	V _{morto} /V	V _{pistonado} /V	V _{mistura} /V
Sem injeção	82	172	1,00	307	0,18	0,23	0,59
Injeção no Fundo	98	256	1,07	334	0,08	0,28	0,64
Injeção no Fundo e nas Paredes	94	251	1,07	333	0,08	0,27	0,65

Tabela 3.1: Valores estimados e calculados para diferentes configurações empregadas no modelamento matemático do distribuidor industrial.

Georg *et al.* (2008) fizeram o modelamento matemático do escoamento de uma bolha de gás em meio líquido, com objetivo de instituir condições de contorno coerentes com a representação da forma e forças de arraste, de sustentação e de massa virtual. As simulações foram realizadas em domínios bidimensionais, para avaliar a influência da parede. No modelo proposto, foi considerado que a bolha sofre mudança na sua forma em função da velocidade de ascensão como mostra a Figura 3.15. É notada a influência da parede do domínio, de tal forma que quanto mais próximo a bolha está da parede, maior será a ação da força de arrasto sobre a partícula. O cálculo do coeficiente de arraste para o domínio (20cm x 20cm), aplicando a condição de não deslizamento foi próximo do experimental. Já o coeficiente de massa virtual apresentou aumento utilizando a condição de não-deslizamento. Por fim, foi verificado que a força de sustentação é nula.



Figura 3.15: Perfil instantâneo da força de arrasto em diferentes regiões para diferentes volumes de controle (GEORG, 2008).

Diaz *et al* (2008) estudaram os efeitos das forças de não-arrasto em uma cortina gasosa no fluxo de um meio líquido. Foram consideradas as forças de massa virtual e de sustentação, sendo que ambas estavam associadas à força de arraste. Foi verificado que a força de sustentação causa um deslocamento preferencial da cortina gasosa, como mostra a Figura 3.16, sendo que é imperceptível algum movimento preferencial ao se considerar a força de massa virtual.



Figura 3.16: Variação da velocidade vertical do líquido em função da largura do domínio (DIAZ *et al.*, 2008).

A força de massa virtual não possui efeito considerável em na velocidade terminal das bolhas, enquanto a força de sustentação tem efeitos negativos consideráveis sobre parâmetros mais altos de velocidade terminal das partículas (DIAZ *et al.*, 2008).

Por conta das diferentes configurações na injeção de gás e devido a sua importância no processo de remoção de inclusões do aço, é necessário explorar combinações das forças de interação que melhor descrevem o comportamento da cortina gasosa no distribuidor, e assim buscar o aprimoramento das simulações fluidodinâmicas desse reator.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

Nesse trabalho, será simulado o escoamento de fluxo de um sistema bifásico no interior de um modelo físico operando sem e com injeção de gás. Será adotado o sitema de turbulência o k–ε padrão, utilizando os valores das propriedades físicas do ar e da água pré-estabelecidos pelo *software* Ansys®. As simulações serão processadas através da versão do *software* CFX 20.1 (Ansys®) versão acadêmica. Os resultados do experimento feito por Ananias 2019, de um modelo físico em uma escala de 1:4 de um distribuidor de dois veios serão utilizados para validação do modelo matemático obtido nesse trabalho.

4.1 Definição do Domínio e Condições de Contorno

A Figura 4.1 ilustra a geometria do distribuidor modelada, desenvolvida no *software* Design Modeler. Por conta das condições de simetria, somente metade do domínio foi simulado.



Figura 4.1: Vista bidimensional do distribuidor.

Foram utilizadas diferentes configurações para fazer a modelagem. As configurações a empregadas são:

- a) Sem injeção de gás e com modificadores de fluxo;
- b) Com injeção de gás através de um anel poroso posicionado ao redor da válvula interna do distribuidor com vazão de gás de 1NL/min, e 3NL/min, conforme apresentado na Tabela 4.1, considerando:
 - b1) apenas a força de arraste para descrever a interação bolha/líquido;
 - b2) força de arraste e força de dispersão turbulenta;
 - b3) força de arraste e força de sustentação;

	Vazão	1 lpm	Vazão 3 lpm		
	LF	TDF	LF	TDF	
b1	Apenas Arraste		Apenas Arraste		
	х	Favre	х	Favre	
b2	x	Lopez de	×	Lopez de	
		Bertodano	X	Bertodano	
	CL 0,1	х	CL 0,1	х	
	CL 0,3	х	CL 0,3	х	
h2	CL 0,5	х	CL 0,5	х	
05	Tomiyama	х	Tomiyama	x	
	Legendre	×	Legendre	X	
	Magnaudet	X	Magnaudet	X	

Tabela 4.1: Configurações dos modelos em relação às forças consideradas para simulação.

As condições de contorno a serem adotadas são:

a) Superfície livre do distribuidor:

Na superfície livre, a saída de gás do sistema é permitida (condição de desgaseificação – "*degassing condition*" no CFX), e para fase líquida presente na superfície foi considerada a condição de escorregamento livre, restringindo apenas o deslocamento vertical;

b) Paredes do distribuidor e do mobiliário:

Nas paredes do distribuidor aplicou-se a condição de não-deslizamento, em que o fluido em contato com a parede tem velocidade nula;

c) Plano de simetria:

Utilizou-se apenas metade do volume de controle para modelamento, para reduzir o custo de processamento do computador;

d) Entrada de líquido:

A vazão mássica de entrada correspondente à metade de 40L/min (dada a condição de simetria). O regime de escoamento selecionado foi o subsônico, com intensidade de turbulência de 5% em média;

e) Saída de líquido:

Vazão de saída correspondente à metade de 20L/min (dada a condição de simetria)

f) Injeção de gás:

Na superfície do anel, a vazão de injeção de gás será de em kg/s, correspondente às vazões 1NL/min e 3NL/min, respeitando a condição de simetria.

g) Forças:

Foram consideradas as forças de arraste e de lubrificação de parede em todos os sistemas com injeção de gás. Das forças de não-arraste, foram avaliados os efeitos das forças de sustentação e de dispersão turbulenta.

Para simular a injeção de um traçador, a fim de se obter as curvas de tempo de residência (DTR), as simulações foram feitas em regime transiente, adotando o *timestep* de 0,001s, optando pela opção escalar volumétrica (kg/m³). Um pulso de traçador foi inserido pela válvula longa com 1 segundo de duração.

4.2 Aplicação de Malha à Geometria

A malha utilizada para simulação foi feita no *software* Meshing Modeler. Em seu trabalho, que não considerou a presença da barreira gasosa, Ananias (2019) obteve uma malha de 2mm nas paredes do inibidor, 5mm na região acima do inibidor de turbulência e na válvula longa, 6mm nas regiões próximas aos veios e 8mm no restante do domínio. Foram adotadas camadas de refinamento nas paredes através da ferramenta *inflation*, para ter maior precisão nos resultados devido a condição de não-deslizamento.



Figura 4.2: Malha aplicada em uma geometria para simulação computacional

4.3 Modelo Matemático

O modelo matemático utilizado considera o escoamento turbulento k– ϵ . Foram consideradas as forças de arraste (*Drag Force*), de sustentação (*Lift Force*), de lubrificação (*Wall Lubrication Force*) e de dispersão turbulenta (*Turbulent Dispersion Force*). A força de arraste é definida pela Equação (4.1) (CHEN et al., 2014):

$$\vec{F}_D = C_D \frac{3\alpha_g \alpha_l \rho_l}{4d_g} \left| \vec{u}_g - \vec{u}_l \right| \left(\vec{u}_g - \vec{u}_l \right)$$
(4.1)

em que:

 C_D = coeficiente de arraste; α_g, α_l = fração volumétrica (l = líquido; g = gás);

 $\rho_l = \text{densidade do líquido (kg/m³);}$

 d_g = diâmetro da bolha gasosa (m);

 \vec{u}_a , \vec{u}_l = velocidade da bolha (g = na saída do bico de gás; l = no líquido) (m/s).

A força de sustentação que se origina pela presença de um gradiente de velocidade resultado da variação de pressão nas regiões adjacentes à bolha, sendo perpendicular à direção do fluxo principal é representada pela Equação (4.2) (NEVES, 2012):

$$\vec{F}_L = -C_L \rho_l \alpha_g \left(\vec{u}_g - \vec{u}_l \right) \times (\nabla \times \vec{u}_l)$$
(4.2)

em que:

 C_L = coeficiente de sustentação (varia de 0,01 a 0,5 para o fluxo viscoso);

 α_q = fração volumétrica do gás;

 ρ_l = densidade do líquido (kg/m³);

 \vec{u}_g, \vec{u}_l = velocidade da bolha (g = na saída do bico de gás; l = no líquido) (m/s).

A força de lubrificação da parede tende a afastar o fluxo de bolhas que se concentram nas paredes do domínio e é aplicada conforme a Equação (4.3) (NEVES, 2012):

$$F_{WL} = C_{WL}\rho_l \alpha_g |U_l - U_g|^2 n_w \tag{4.3}$$

em que:

 C_{WL} = coeficiente da força de lubrificação (dado pelo modelo de Frank);

 α_g = fração volumétrica do gás;

 ρ_l = densidade do líquido (kg/m³);

 U_l , U_g = velocidade da fase (l = líquido; g = gás) (m/s);

 n_w = distância normal da parede (m).

A força de dispersão turbulenta é calculada baseada no modelo de Favre da força de arraste como mostra a Equação (4.4) (CFX *theory guide*):

$$F_{TD} = -C_{TD}C_{cd} \frac{v_l}{\sigma_{lg}} \left(\frac{\nabla \alpha_g}{\alpha_g} - \frac{\nabla \alpha_l}{\alpha_l} \right)$$
(4.4)

23

em que:

 C_{TD} = coeficiente de dispersão turbulenta (valor padrão igual a 1);

 C_{cd} = coeficiente de transferência de momento para a força de arraste;

 v_l = volume específico de líquido (m³/kg);

 α_g = fração volumétrica do gás;

 α_a = fração volumétrica do líquido;

 σ_{lg} = número de Schmidt turbulento (normalmente adota-se 0,9).

4.4 Curvas de Distribuição do Tempo de Residência

No modelo físico, Velasco (2020) obteve as curvas de distribuição de tempo de residência (DTR) utilizando como traçador uma solução salina saturada de KCl, e condutivímetros posicionados nas saídas do distribuidor. Neste trabalho foi utilizado um traçador e teve os resultados comparados aos obtidos por Velasco (2020). Com base nas curvas DTR determina-se o tempo mínimo de residência (TMR), tempo médio de residência (τ), a fração de volume morto (VM) e fração de fluxo pistonado (VP), representados pelas seguintes Equações 4.5, 4.7 e 4.8 (SILVA, 2017):

$$\tau = \int_0^\infty t. E(t) dt \tag{4.5}$$

E(t) =concentração de sal normalizada;

 τ = tempo médio de residência.

$$E(t) = \frac{QC_T}{M} \tag{4.6}$$

Q = vazão volumétrica;

C_T = Concentração de sal;

M = Massa total do traçador.

$$VP = \frac{TMR}{t} x \, 100 \tag{4.7}$$

$$VM = 1 - \int_0^{2t} E(t)dt$$
 (4.8)

24

Assim como Ananias (2019), a injeção de traçador foi simulada utilizando o CFX. Aqui foi avaliado o efeito da cortina de gás. Foram realizadas simulações em regime transiente (*timestep* de 0,01 s) para avaliar a dispersão do traçador, representado pela função *Additional Variables* (escalar volumétrica kg/m³). Como descrito por Ananias (2019), um pulso de traçador é adicionado na entrada do tubo longo com 1 s de duração, como ocorre no modelo físico. Os resultados de fluxo obtidos nas simulações em regime permanente com a presença da barreira gasosa são utilizados como condição inicial para garantir que o traçador seja inserido no modelo em uma etapa com fluxo completamente desenvolvido. Utilizando a ferramenta *Expert Parameters* do CFX foram desabilitadas as resoluções de todas as equações, exceto aquela correspondente ao transporte de massa do escalar, reduzindo o tempo necessário para simulação, o que permitiu alcançar o tempo total de 1200 segundos após a injeção do sal em até seis dias de processamento computacional.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos seguindo os passos propostos na metodologia. Os resultados do modelo físico estudado por Ananias (2019) demonstraram que as condições BD1 e BD2 apresentaram melhorias na redução da assimetria do distribuidor. O uso da barreira gasosa foi proposta e estudada no trabalho de Velasco, 2020 através do modelamento físico. Os resultados deste último foram utilizados para validação do modelo computacional apresentado neste trabalho.

5.1 Pluma Gasosa

Nos estudos do modelo físico feitos por Velasco (2020) foram realizadas as medições do tamanho de bolha para 1L/min e 3L/min, e afirma que o diâmetro das bolhas sofre pouca alteração como mostra a Figura 5.1. A mesma observação foi feita por Cwudziński (2017), para vazões de gás iguais a 0,5L/min, 1L/min e 1,5L/min. Os valores dispostos na Figura 5.2 foram utilizados como entrada para os modelos computacionais, sendo de 1,156mm para 1L/min e 1,348mm para 3L/min.



Figura 5.1: Esquema de medição do tamanho de bolha no modelo físico (VELASCO, 2020).



Figura 5.2: Diâmetro médio das bolhas para diferentes vazões (VELASCO, 2020)

Foram analisados, a partir do plano de simetria do distribuidor, os perfis da pluma gasosa considerando diferentes modelos da força de sustentação para vazão de 1L/min, como observado na Figura 5.1. Foi possível perceber que houve pouca variação na dissipação da coluna de gás se comparada ao modelo em que foi considerada apenas força de arraste. A medida que se aumenta o coeficiente de sustentação (CL) ocorre pequeno decréscimo da concentração de gás no centro da cortina. Lou e Zhu (2013) e Zhang et al (2013) também não observaram grande influência da força de sustentação na fração volumétrica da cortina gasosa. Diferentemente de Zhu et al. (2017), que observou certa tendência de deslocamento da pluma em direção à parede do sistema, nos casos em que a injeção de gás é feita em um ponto próximo à uma parede, explicando o gradiente de velocidade nas regiões adjacentes à bolha gerado pela força de sustentação.

De acordo com o CFX *theory guide* o modelo de Tomiyama é aplicável à injeção de gás no distribuidor, já que este é indicado para sistemas em que há bolhas deformáveis, prevendo assim o valor do coeficiente de sustentação em função da forma da bolha, Méndez et al. (2004) mostraram que a fração volumétrica de gás é diferente pra cada diâmetro, sendo necessário adequar os coeficientes para cada situação.





Os resultados obtidos nos modelos com vazão de 3L/min são visualmente equivalentes aos resultados com dos modelos com vazão de 1L/min, as características de mudança de comportamento da pluma para cada tipo de força de sustentação são parecidas para as duas vazões. Analisando a Figura 5.4 nota-se a diferença na distribuição de gás na metade superior da pluma de 3L/min, onde houve maior dispersão da cortina gasosa ao se comparar com os modelos de vazão igual a 1L/min. O modelo de Tomiyama e CL = 0,3 têm resultados muito parecidos, sendo que fração volumétrica de gás próxima ao plugue poroso tem forma e altura muito semelhantes. É notável a diferença entre as deformações das cortinas, sendo que para vazão igual a 1L/min a perna esquerda da pluma tem movimento ascendente perpendicular à superfície do distribuidor. Ao observar o comportamento horizontal, deixando de ter o caráter verticalizado observado nos sistemas de 1L/min. Já a parte da pluma que antes sofria deslocamento no sistema de 1L/min, passa a apresentar um perfil perpendicular à superfície do distribuidor. Esse fenômeno pode ser

explicado pelas zonas de recirculação geradas pela injeção de gás, que será apresentado no próximo tópico.



Figura 5.4: Perfil da barreira gasosa para diferentes modelos de forças de sustentação com vazão de gás de 3L/min.

Os resultados apresentados na Figura 5.5 mostram as projeções da pluma gasosa no plano de superfície do distribuidor com vazão igual a 1L/min para diferentes modelos de força sustentação. Foi observado assimetria na forma e na fração volumétrica da cortina, evidenciando maior concentração de gás próxima à parede do distribuidor. Essa região que apresenta maior fração volumétrica sofre menor influência por parte do fluxo de líquido, de forma a permitir o acúmulo de gás nessa localidade.



Figura 5.5: Vista superior da cortina gasosa para diferentes modelos de forças de sustentação com vazão de gás de 1L/min.

As projeções de vista superior para os sistemas com vazão de 3L/min, estão dispostas na Figura 5.6. Houve maior espalhamento da cortina gasosa em comparação aos sistemas com vazões de 1L/min, visto que ao centro há uma concentração de gás considerável, variando de 0,012 a 0,018. Foi observada maior dissipação da cortina a medida que se aumentou o coeficiente de sustentação, ainda assim existe assimetria na fração volumétrica, sendo que próximo à parede dos distribuidor, à esquerda, a concentração de gás é maior. Um ponto a ser destacado é a semelhança de dois pares de modelos, sendo eles, CL = 0.3 e Tomiyama, e CL = 0,5 e Magnaudet. Como citado anteriormente, o formato das bolhas é proporcional ao coeficiente de sustentação. O modelo de Tomyiama considera bolhas deformáveis e tem forte semelhança com o modelo de CL = 0,3, já o modelo de Legendre & Magnaudet considera bolhas perfeitamente esféricas e indeformáveis, gerando resultados muito próximos ao de CL = 0.5. Isso reforça o argumento de Méndez et al. (2004) de que o coeficiente de sustentação decresce de acordo com o aumento da deformação da bolha, tendo em vista que em um sistema onde o coeficiente máximo de 0,5, se obtém resultados muito próximos ao de um modelo que não considera a deformação das bolhas, como o de Legendre e Maugnadet.



Figura 5.6: Vista superior da cortina gasosa para diferentes modelos de forças de sustentação com vazão de gás de 3L/min.

A Figuras 5.7, 5.8 e 5.9 apresentam a comparação entre o modelo físico e as simulações que consideraram a força de dispersão turbulenta. O modelo de Lopez de Bertodano utiliza valores de coeficiente de dispersão tubulenta em um intervalo de 0,1 a 500, os resultados obtidos foram com C_{TD} de 1,0. Em casos que não se conhece o coeficiente de dispersão turbulenta, é indicado o modelo de Favre. É evidente o efeito dessa força, que provoca a dispersão adicional de fases, ocasionado pela combinação de vórtices turbulentos e arraste de interfaces (GAMBOA, 2017).

O modelo de Favre expressa melhor o comportamento da pluma do modelo físico para as duas vazões. No sistema de vazão igual a 1L/min a pluma sofre deslocamento em direção à parede do distribuidor, possivelmente provocado pelo fluxo vindo do centro do reator. O centro da pluma no modelo de Favre expressa com bastante precisão o fenômeno de dissipação observado no modelo físico, em que ocorre o espalhamento das bolhas para o centro e para as adjacências da cortina. O modelo de Lopez de Bertodano prevê a diferença no valor de fração volumétrica na base de saída de gás, o que não é observado no modelo físico, onde se vê homogeneidade na injeção. Como visto anteriormente para a força de sustentação, no sistema de 3L/min também acontece o deslocamento da pluma para a parte interna do distribuidor.

(a) 1 L/min



(b) 3 L/min



Figura 5.7: Cortina gasosa do modelo físico para diferentes vazões: (a) 1L/min, (b) 3L/min (VELASCO, 2020)



Figura 5.8: Modelos computacionais da força de dispersão turbulenta – (a) 1L/min e (b) 3L/min.



Figura 5.9: Vista superior da cortina gasosa para diferentes modelos de forças de dispersão turbulenta com vazão de gás de: (a) 1L/min e (b) 3L/min.

5.2 Perfil de Velocidade

Para analisar o comportamento do fluxo de líquido dentro do distribuidor, foram utilizadas linhas de fluxo da água no sistema, apresentadas na Figura 5.10. Assim como Wollman (1999) apontou em seu trabalho, é possível observar o fenômeno de curto circuito em um distribuidor sem barreiras, o que é extremamente indesejado no processo de remoção de inclusões, já que não há tempo hábil para a flotação de inclusões. Para todos os modelos, o inibidor de turbulência redireciona o líquido para a superfície do reator e gera um perfil de recirculação. Para os sistemas apresentados na Figura 5.10 (b) e (c) as barreiras redirecionam o líquido para a superfície conferindo a possibilidade de captação de inclusões pela camada de escória, além aumentar o volume útil do distribuidor.



Figura 5.10: Linhas de fluxo para diferentes configurações – (a) Sem barreiras, (b) com barreiras e injeção de 1L/min de gás no modelo de Favre e (c) com barreiras e injeção de gás no modelo de Favre.

Para analisar com maior precisão o efeito da cortina gasosa no comportamento do fluxo, foram utilizados os vetores de velocidade da fase líquida no plano de simetria do distribuidor, como apresenta a Figura 5.11. De modo geral, no sistema com 3L/min de injeção de gás, a velocidade do fluido é maior se comparada à do sistema de 1L/min. Em ambas configurações são constatadas duas zonas de recirculação adjacentes à barreira de gás. Como observado anteriormente, a pluma gasosa do modelo 1L/min Favre sofre leve deslocamento em direção à parede do distribuidor, provavelmente provocado pela zona de recirculação próxima às barreiras físicas. Já no modelo de 3L/min Favre a barreira gasosa potencializa as zonas de recirculação, aumentando a velocidade do fluxo e provocando aumento da zona próxima à parede do distribuidor, fazendo com que a pluma seja deslocada em direção ao centro do reator. A injeção de gás redireciona o fluido para a superfície do sistema, promovendo a facilitação da flotação das inclusões presentes no banho metálico. Além disso, como visto nos trabalhos de Meijie et al. (2011) e CHEN et al. (2014), a incorporação de cortina gasosa no distribuidor aumenta a eficiência de remoção de inclusão pelos fenômenos de interação de interfaces e coalescimento de partículas inferiores à 20µm. O aumento das zonas de turbulência sugere o aumento de choque e coalescimento de inclusões, porém a captura por interação de interfaces deve ser estudada mais profundamente em um modelo trifásico.

Ressalta-se que velocidade com que o líquido chega à superfície é diferente para os dois casos em que há injeção de gás, assim como Silva (2019) expôs, a simulação computacional possui limitação em relação à análise de reincorporação de escória no líquido devido forte agitação próxima à interface.



Figura 5.11: Vetores de velocidade do fluxo – (a) 1L/min Favre; (b) 3L/min Favre.

5.3 Tempo de Residência

As curvas de concentração do traçador foram utilizadas para calcular o tempo médio de residência (τ), o tempo mínimo de residência (TMR) e o descarte dos modelos físicos e computacionais apresentados na Figura 5.12. No trabalho feito por Velasco (2020), foram realizados experimentos utilizando sal traçador para o sistema sem injeção de gás e para o sistema com injeção de 3L/min de ar comprimido. É possível notar concordância no comportamento do modelo físico com matemático, tendo uma variação inferior a 10% para o tempo de residência. A aplicação de ar a 3L/min no distribuidor provocou aumento na diferença do tempo mínimo de residência, porém há grande variação no veio 1 e variação sutil no veio 2. Há aumento do descarte para o veio 1 no sistema com injeção a 3L/min e redução para o veio 2. Segundo Neves (2012) esse aumento do descarte apresentado pelo veio 1 prejudica o rendimento de lingotamento.



Figura 5.12: Valores de: (a) tempo de residência para os modelos sem injeção de gás; (b) tempo de residência para os modelos com injeção de 3L/min; (c) TMR para os modelos sem injeção de gás; (d) TMR para os modelos com injeção de 3L/min de gás; (e) descarte para os modelos sem injeção de gás; (f) descarte para os modelos com injeção de 3L/min de gás. * Resultados de modelo físico são de Velasco (2020)

A Figura 5.13 apresenta os resultados obtidos para o modelo matemático de Favre considerando a força de dispersão turbulenta com vazão igual a 1L/min. Fica evidente que os valores de τ e TMR diminuem para o veio 1 à medida que se aumenta a vazão de gás.



Figura 5.13: Valores do modelo matemático de 1L/min: (a) tempo de residência; (b) descarte; (c) TMR.

A Figura 5.14 e Figura 5.15 apresentam as curvas DTR para os modelos físicos e matemáticos com injeção de 3L/min de gás e sem injeção de gás. Os resultados obtidos mostram que há concordância quanto ao comportamento das curvas.



Figura 5.14: Curvas DTR dos modelos físicos e matemáticos com injeção de 3L/min de gás



Figura 5.15: Curvas DTR dos modelos físicos e matemáticos sem injeção de gás.

A fração de volume morto (FVM) foi calculada para os modelos físicos e matemáticos sem gás e com injeção de 3L/min, como apresenta a Figura 5.16. É notavel a queda da FVM para o veio 1 no modelo computacional de 3L/min. A aplicação do gás feita no veio 1 gerou zonas de recirculação que podem ter contribuido para a redução da fração de volume morto. Esse aumento do volume útil do distribuidor é importante para homogeneidade e qualidade do aço.



Figura 5.16: Valores da fração de volume morto (FVM) para os modelos físicos e matemáticos: (a) sem injeção de gás; (b) com injeção de 3L/min de gás.

A fração de volume morto do veio 1 para o modelo matemático de 1L/min foi ainda menor se comparado ao de 3L/min, e pode ser observado na Figura 5.17. Como argumentado por Ananias (2019) é desejável ter um sistema com baixos valores de fração de volume morto e alto tempo de permanência e o modelo de 1L/min matemático se mostra com potencial para ter boa performance se comparado aos demais modelos matemáticos anteriormente apresentados.



Figura 5.17: Valores da fração de volume morto (FVM) para o modelo matemático com injeção de 1L/min de gás.

6 CONCLUSÃO

Acerca dos resultados obtidos foi possível concluir que:

- A força de sustentação pouco influencia na fração volumétrica do gás, diferentemente da força de dispersão turbulenta, que altera significativamente o perfil da pluma gasosa;
- Os modelos matemáticos de Favre geram cortinas gasosas com perfis mais próximos àqueles observados nos modelos físicos;
- As zonas de recirculação geradas pelas cortinas gasosas sugerem que há aumento da eficiência de remoção de inclusões pelo fenômeno de coalescimento;
- A aplicação de gás em um distribuidor não necessariamente aumenta o tempo de residência no sistema.

REFERENCIAL BIBLIOGÁFICO

ALVES, J. G. Melhoria no Padrão de Escoamento do Aço Líquido no Distribuidor do Lingotamento Contínuo 01 da APERAM Inox América do Sul. 2014. 64f. Dissertação (Mestrado em Metalurgia Extrativa) - Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2014.

ANANIAS, J. V. G. G. Fluxo Assimétrico em um Distribuidor de Dois Veios e Seu Efeito Sobre a Qualidade Do Aço. 2019. 40f. Monografia (Bacharel em Engenharia Metalúrgica) - Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2019.

BRAGA, B. M. Modelamento Matemático da Inertização de Distribuidores para Lingotamento Contínuo de Aço. 2015. 197f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas) - Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2015.

CHEN, D., XIE X., LONG, M., ZHANG, M., ZHANG, L., LIAO, Q. Hydraulics and Mathematics Simulation on the Weir and Gas Curtain in Tundish of Ultrathick Slab Continuous Casting. **Metallurgical and Materials Transactions B**, v.45B, p. 392-398, 2014.

CWUDZIŃSKI, A. Physical and Mathematical Modeling of Bubbles Plume Behaviour in One Strand Tundish. **Metall. Res. Technol.**, v. 115 (1), 2018.

DÍAZ, M. E., IRANZO, A., CUADRA, D., BARBERO, R., MONTES, F., GALÁN, M. (2008). Numerical Simulation of the Gas–Liquid Flow in a Laboratory Scale Bubble Column: Influence of Bubble Size Distribution and Non-Drag Forces. **Chemical Engineering Journal.** v. 139, p. 363-379, 2008.

GAMBOA, Y. Metodologia de Projeto do Conjunto Rotor-Difusor de Bombas Multifásicas com Base em CFD e Técnicas de Otimização. 2017. 141f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Itajubá, 2012.

GEORG I. C., REZENDE R. V. P., MALISKA C. R. Estudo Numérico do Escoamento Ascendente de Uma Bolha de Gás em um Meio Líquido. *In*: 1º Encontro Brasileiro sobre Ebulição, Condensação e Escoamento Multifásico Líquido-Gás, 2008, Florianópolis.

LOU, W., ZHU, M. Numerical Simulation of Gas and Liquid Two-Phase Flow in Gas-Stirred Systems Based on Euler–Euler Approach. **Metall Mater Trans B**, v. 44, p. 1251– 1263, 2013.

MAPELLI, C. Non-Metallic Inclusions and Clean Steel, La Metallurgia Italiana, p. 43-52, jun. 2008. MAZUMDAR, D., GUTHRIE, I. L. The physical and mathematical modeling of continuous casting tundish systems. **ISIJ International**, v. 39, n. 6, p. 524-547, 1999.

MEIJIE, Z., HUAZHI, G., AO, H., HONGXI, Z., CHENGJI, D. Numerical Simulation and Industrial Practice of Inclusion Removal from Molten Steel by Gas Bottom-blowing in Continuous Casting Tundish. **Journal of Mining and Metallurgy**, v. 47, p. 137-147, 2011.

MENDEZ, C.G., NIGRO, N., & CARDONA, A. (2005). Drag and non-drag force influences in numerical simulations of metallurgical ladles. Journal of Materials **Processing Technology**, v. 160, p. 296-305, 2004.

MENDONÇA, A. F. G. Avaliação do Efeito da Injeção de Gás Sobre a Flotação de Inclusões em um Distribuidor de Lingotamento Contínuo. 2016. 161f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas) - Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2016.

NEVES, L. Modelamento Matemático do Escoamento Multifásico no Desgaseificador RH e no Distribuidor de Lingotamento Contínuo. 2012. 131f. Tese (Doutorado em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas) – Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2012.

PEIXOTO, J. J. M. Modelamento Físico e Matemático do Fluxo no Interior de um Molde de Lingotamento Contínuo de Beam Blank Alimentado Com Duas Válvulas Submersas Tubulares. 2016. 103f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais) -REDEMAT, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2016.

ROGLER, J. P. Modeling of Inclusion Removal in a Tundish by Gas Bubbling. 2004.67f. Dissertação.(Mestrado em Engenharia Química) - Ryerson University, Toronto, 2004.

SILVA, F. A. Avaliação do Efeito da Injeção de Gás Nitrogênio por Meio de Hastes Tampão na Limpeza e Lingotabilidade de Aços Especiais. 2016. 89f. Monografia (Bacharelado em Engenharia Metalúrgica) - Universidade Federal Do Rio Grande Do Sul, Porto Alegre, 2016.

SILVA, H. H. S. **Remoção de Inclusões em um Distribuidor Assistida por Injeção de Gás Inerte.** 2017. 55f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais) - Rede Temática em Engenharia de Materiais - REDEMAT, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2017.

SOUZA, G. M. Avaliação do Efeito da Injeção de Gás na Remoção de Inclusões em Distribuidor de Lingotamento Contínuo por Meio de Modelagem Matemática. 2019. 85f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas) - Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2019.

SZEKELY, J.; ILEGBUSI, O. J. The Physical and Mathematical Modeling of Tundish Operations. New York: Springer-Verlag, 1988. 111 p.

THOMAS, B. G. Modeling Study of Intermixing in Tundish and Strand During a Continuous-Casting Grade Transition. **Iron and Steelmaker (ISS Transactions)**, Warrendale, v. 24, n. 12, p. 83-96, 1997.

VELASCO, C. Fluxo Assimétrico em Distribuidor de Lingotamento e Seus Efeitos Sobre a Qualidade do Lingotado. Relatório de Iniciação Científica (PIBIC/CNPq) – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2020.

WOLLMANN, A. M. Estudos de Fluxo em um Distribuidor de Lingotamento Contínuo. 1999. 93f. Dissertação (Mestrado em Metalurgia Extrativa) - Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1999.

ZHANG, Y., BAI, Y., & WANG, H. CFD analysis of inter-phase forces in a bubble stirred vessel. **Chemical Engineering Research & Design**, v. 91, p. 29-35, 2013.

ZHU, B., LIU, Q., KONG, M. Effect of Interphase Forces on Gas–Liquid Multiphase Flow in RH Degasser. **Metall Mater Trans B**, v. 48, p. 2620–2630, 2017.