



**Universidade Federal de Ouro Preto - UFOP**  
**Escola de Minas**  
**Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais**  
**Campus Morro do Cruzeiro**  
**Ouro Preto – Minas Gerais – Brasil**



**MONOGRAFIA DE GRADUAÇÃO**  
**EM ENGENHARIA METALÚRGICA**

**“AVALIAÇÃO DA EFICIÊNCIA DO SOFTWARE OPENFOAM® NA**  
**RESOLUÇÃO DE PROBLEMAS METALÚRGICOS”**

**Elisa Oliveira Linares**

**Ouro Preto, Janeiro de 2022**

**Elisa Oliveira Linares**

**“Avaliação da eficiência do software OpenFOAM® na resolução de problemas  
metalúrgicos”**

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 Engenharia  
Metalúrgica.

**Orientador: Prof. DSc. Johne Jesus Mol Peixoto**

**Ouro Preto, Janeiro de 2022**





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

## ATA DE DEFESA DE MONOGRAFIA

Ao décimo terceiro dia do mês de janeiro de 2022, às 10 horas, por meio da plataforma de videoconferência Google Meet, foi realizada a defesa de monografia pela aluna **Elisa Oliveira Linares**, sendo a comissão examinadora constituída pelo Prof. DSc. Johne Jesus do Mol Peixoto (Presidente), Prof. DSc. Carlos Antônio da Silva (DEMET/UFOP) e pelo Prof. MSc. Heric Henrique Souza e Silva (IFMG/Campus Ouro Branco). A aluna apresentou a monografia intitulada: "Avaliação da Eficiência do Software OpenFOAM® na Resolução de Problemas Metalúrgicos". A comissão deliberou, por unanimidade, pela aprovação da monografia, concedendo à aluna um prazo de 15 dias para incorporar, no texto final, as alterações sugeridas. Na forma regulamentar, lavrou-se a presente ata que vai devidamente assinada pelos membros da comissão e pela aluna.

Ouro Preto, 13 de janeiro de 2022.

Prof. DSc Johne Jesus Mol Peixoto  
 Orientador – Presidente

Prof. Prof. DSc. Carlos Antônio da Silva  
 Membro – DEMET/UFOP

Heric Henrique  
 Souza e Silva  
 2022.01.24 15:31:  
 24-03'00"

Prof. MSc Heric Henrique Souza e Silva  
 Membro - IFMG/ Campus Ouro Branco

DocuSigned by:

9061E86090D74FB

Elisa Oliveira Linares  
 Aluna

## RESUMO

Métodos computacionais foram desenvolvidos para reduzir, e em alguns casos eliminar, as dificuldades e limitações encontradas no estudo de processos por meio de soluções analíticas, como por exemplo, alto custo, ineficácia dos métodos físicos e longos tempos de análise. Um método computacional utilizado para analisar processos em que há escoamento de fluidos, transferência de calor e outros fenômenos relacionados é a Simulação Fluidodinâmica Computacional (CFD), que tem como princípio básico a resolução das equações de governo de fluidos, como conservação de massa, quantidade de movimento e energia. A principal vantagem dessa ferramenta é a possibilidade de analisar escoamentos que não são facilmente medidos ou simulados por meios físicos, além de apresentar resultados com um nível mais elevado de detalhes. Softwares são desenvolvidos com a finalidade de executar as simulações e atualmente estão disponíveis tanto softwares comerciais, como *ANSYS-CFX*, *ANSYS-Fluent* e *Flow3D*, quanto os gratuitos como o OpenFOAM<sup>®</sup>. Nesse sentido, o presente trabalho tem como objetivo avaliar, através da revisão da literatura, a eficiência do uso deste software na simulação de problemas metalúrgicos. Foram abordados aspectos relacionados às simulações utilizando o OpenFOAM<sup>®</sup>, incluindo suas características, vantagens e etapas de processamento. Após apresentação e discussão de artigos que analisaram processos metalúrgicos através de simulações fluidodinâmicas em OpenFOAM<sup>®</sup>, foi possível notar que tomando como exemplo a análise de fluxo e turbulência de um distribuidor, o comportamento de inclusões não metálicas no distribuidor, a distribuição de fluxos na zona de gotejamento do alto-forno, o bloqueio da válvula submersa no lingotamento contínuo, o estudo do processo de tratamento de alumínio, a formação de vórtices, a simulação computacional no OpenFOAM<sup>®</sup> apresenta resultados compatíveis com processos reais e simulações realizadas em softwares comerciais. Porém, para os demais casos, quando comparados a modelos físicos e demais softwares, os resultados não foram compatíveis, sendo as principais limitações o tempo de processamento e a necessidade de modelos mais avançados e mais refinados.

**Palavras chave:** CFD. OpenFOAM. Fenômenos de transporte. Metalurgia.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1- Fluxograma estudo CFD .....	10
Figura 3.1– Estrutura do OpenFOAM .....	13
Figura 3.2– Estrutura de diretórios do OpenFOAM .....	15
Figura 3.3– Painel de visualização .....	19
Figura 3.4– Códigos para visualização do caso <i>pitzDaily</i> .....	20
Figura 3.5– Visualização do caso <i>pitzDaily</i> no plano de corte z.....	20
Figura 3.6– Modelo do distribuidor para simulações CFD .....	21
Figura 3.7 – Modelo físico do distribuidor .....	22
Figura 3.8 – Malha típica utilizada para distribuidor com único veio .....	24
Figura 3.9 – Desenho do protótipo do distribuidor.....	24
Figura 3.10 – Modelos a) experimental e b) CFD .....	26
Figura 3.11 – Configuração de um modelo 2D para o cálculo (a) da velocidade do sólido e (b) do fluxo-solidificação .....	27
Figura 3.12 – Simulação do TSC de aço baixa liga.....	28
Figura 3.13– Modelo para simulação nas condições de a) sem entupimento e b) com entupimento .....	29
Figura 3.14 – Modelo 3D para simulação .....	30
Figura 4.1– Simulações da intensidade da turbulência dentro de um distribuidor obtidas por quatro tipos de softwares.....	32
Figura 4.2 – Comparação da distribuição de partículas entra a) simulação e b) experimento 1 .....	33

Figura 4.3 – Comparação da distribuição de partículas entra a) simulação e b) experimento 2 .....	33
Figura 4.4 – a) Trajetória de partículas de tamanho a) 20 $\mu$ m e b) 80 $\mu$ m em um distribuidor de lingotamento contínuo obtidas em simulação com o OpenFOAM.....	34
Figura 4.5 – Comparação da eficiência de separação entre o OpenFOAM® e o modelo físico.....	35
Figura 4.6 – Comparação da eficiência de separação entre filtração ativa e limpeza reativa usando quatro tipos de filtro .....	36
Figura 4.7 – Comparação dos perfis de velocidade do ferro líquido e da escória.....	37
Figura 4.8 – Análise da influência do padrão de fluxo na formação da casca sólida em relação à: a) velocidade do aço e b) distribuição da espessura na face larga .....	38
Figura 4.9 – Distribuição da a) tensão equivalente e b) magnitude do deslocamento para os casos $P_{ref}$ e E1 .....	40
Figura 4.10 – Formas de superfície livre obtidas (i) numericamente e (ii) experimentalmente no caso de (a) 300 rpm e (b) velocidade de rotação de 400 rpm .....	41

## **LISTA DE TABELAS**

Tabela 3.1 – Densidade das partículas e parâmetros de injeção .....	23
Tabela 3.2 – Parâmetros dos filtros analisados .....	25
Tabela 3.3 – Configurações para a condição de entupimento .....	29

## LISTA DE SIGLAS

AF	<i>Active Filtration</i>
CAD	<i>Computer-Aided Design</i>
CALPHAD	<i>Calculation of Phase Diagram</i>
CFD	<i>Computacional Fluid Dynamics</i>
FOAM	<i>Field Operation and Manipulation</i>
FSI	<i>Fluid-Structure Interaction</i>
LDA	<i>Laser Doppler Anemometer</i>
LES	<i>Large Eddy Simulation</i>
OPENFOAM	<i>Open Source Field Operation and Manipulation</i>
OPENFOAM-DEV	<i>Open Source Field Operation and Manipulation-developement</i>
PISO	<i>Pressure-Iimplicit Split-Operator</i>
RC	<i>Reactive Cleaning</i>
RSM	<i>Reynolds Stress Models</i>
SIMPLE	<i>Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equations</i>
SST	<i>Shear Stress Transport</i>
VTK	<i>Visualization ToolKit</i>
XDEM	<i>eXteneded Discrete Element Method</i>

## SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	9
2	OBJETIVOS.....	12
2.1	Objetivo Geral.....	12
2.2	Objetivos Específicos.....	12
3	REFERENCIAL TEÓRICO.....	13
3.1	O software OpenFOAM®.....	13
3.1.1	Estrutura de um caso no OpenFOAM®.....	14
3.1.2	Pré-Processamento.....	15
3.1.3	Processamento.....	17
3.1.4	Pós-Processamento.....	17
3.2	Aplicações em Problemas Metalúrgicos Utilizando o OpenFOAM®.....	20
3.2.1	Distribuidor.....	21
3.2.2	Alto-Forno.....	25
3.2.3	Lingotamento Contínuo.....	27
3.2.4	Alumínio.....	30
4	DISCUSSÃO DOS RESULTADOS APRESENTADOS NOS ARTIGOS.....	31
4.1	Distribuidor.....	31
4.2	Alto-Forno.....	36
4.3	Lingotamento Contínuo.....	38
4.4	Alumínio.....	40
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	42
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	44

## 1 INTRODUÇÃO

Segundo Venturin (2014), devido à complexidade das soluções analíticas, durante muitos anos, os fenômenos de transporte foram estudados e analisados principalmente através de métodos experimentais. Porém, métodos experimentais têm custo elevado, demandam muito tempo e nem sempre conseguem reproduzir fielmente a realidade, gerando informações imprecisas. Com isso, métodos computacionais começaram a ser desenvolvidos como ferramentas para a modelagem de processos, o que reduziu a necessidade de testes físicos, tornando mais rápido e mais barato o desenvolvimento dos projetos. Como exemplo de método computacional, tem-se o estudo da Dinâmica dos Fluidos Computacional.

De acordo com Versteeg e Malalasekera (2007) (*apud* LÓPEZ, 2017), a Dinâmica dos Fluidos Computacional (CFD do inglês, *Computational Fluid Dynamics*) é uma técnica utilizada com o propósito de prever e analisar sistemas em que há transferência de calor, escoamento de fluidos e demais fenômenos relacionados, através de simulação numérica computacional. Segundo Nascif e Escalera (2021), o princípio básico da Dinâmica dos Fluidos Computacional consiste na resolução das equações de governo de fluidos: conservação de massa, quantidade de movimento e energia. Uma análise CFD é dividida em três etapas macro: pré-processamento, cálculo das soluções através da resolução das equações e pós-processamento. A primeira envolve as fases de criação da geometria até a definição das condições de contorno, enquanto a última consiste na análise e interpretação dos resultados. A Figura 1.1 retrata, na forma de um fluxograma, todas as etapas de um estudo CFD.

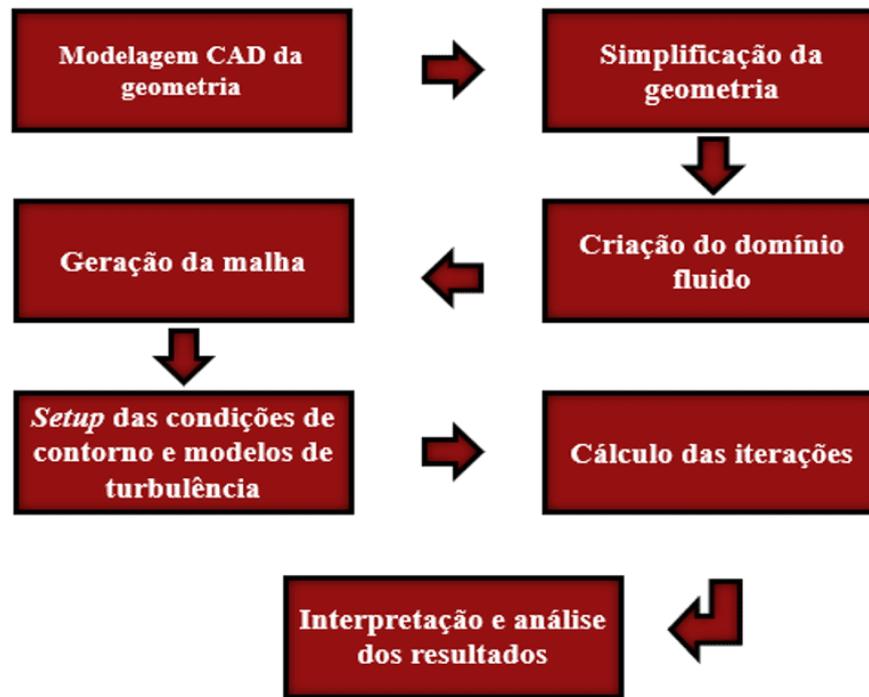


Figura 1.1- Fluxograma estudo CFD. NASCIF e ESCALEIRA (2021).

Fiates (2015) destaca algumas vantagens da análise por CFD, como a possibilidade de simular processos em escala real, a repetitividade e a qualidade dos gráficos gerados. No que se refere às aplicações, é empregada em diversas áreas como, por exemplo, nas usinas energéticas, processos químicos e na área de aerodinâmica de veículos e aeronaves. (VERSTEEG; MALALASEKERA, 2007 *apud* LÓPEZ, 2017, p. 25).

Fernandes e Moreira (2019) citam, entre tantos softwares de simulação fluidodinâmica disponíveis, nomes muito utilizados, como o *Ansys-Fluent*, *Ansys-CFX* e *Flow3D*, que oferecem soluções completas que vão desde interfaces para criação de malha até softwares de pós-processamento. Os autores afirmam que o desenvolvimento de softwares *Open Source* vem ganhando destaque devido à possibilidade de colaboração entre os desenvolvedores, contribuindo para uma melhor adaptabilidade. Porém, isso torna seu uso mais difícil, já que não há preocupação com a interface gráfica.

Muitos pacotes de softwares, tanto comerciais quanto gratuitos, estão disponíveis para análises CFD. Os primeiros têm um nome mais consistente no mercado devido ao suporte técnico e por serem usados em universidades e indústrias, porém possuem um custo de licença muito elevado. Em razão disso, busca-se trabalhar com os gratuitos, como por exemplo, o OpenFOAM®, um software de código aberto em linguagem C++, no qual o

próprio usuário consegue criar seu próprio *solver* ou personalizar os existentes no banco de dados (FIATES, 2015).

A análise CFD de problemas metalúrgicos tem grande aplicabilidade, pois diminui e, em alguns casos, até elimina fases de testes físicos, que poderiam não ocorrer devido à inviabilidade técnica ou econômica. Encontram-se na literatura alguns trabalhos, que serão abordados ao longo deste texto, usando o OpenFOAM<sup>®</sup> como ferramenta para análise CFD para a resolução de problemas e melhoria de processos, como por exemplo, para a análise do comportamento de inclusões não metálicas no distribuidor (RAGHAVENDRA *et al.*, 2013), para compreensão da distribuição de fluxos na zona de gotejamento do alto-forno (BANIASADI e PETERS, 2018), para avaliação do potencial das ferramentas CFD para o desenvolvimento de processos metalúrgicos tomando como exemplo a análise de fluxo e turbulência de um distribuidor (ODENTHAL, JAVUREK e KIRSCHEN, 2010, para a avaliação da eficiência de dois métodos para remoção de inclusões (NEUMANN *et al.*, 2019), para a verificação da formação de pele no processo de lingotamento de placas finas (VAKHRUSHEV *et al.*, 2014), para a análise do entupimento da válvula submersa durante o lingotamento contínuo (LEE *et al.*, 2021) e para a avaliação da formação de vórtice durante a agitação mecânica em um processo de alumínio (YAMAMOTO *et al.*, 2019) Deseja-se avaliar se o uso do software OpenFOAM<sup>®</sup> tem alcançado sucesso para análise de processos metalúrgicos, e se seu desempenho tem sido satisfatório.

## **2 OBJETIVOS**

### **2.1 Objetivo Geral**

O principal objetivo deste trabalho é avaliar, através da revisão da literatura, a eficiência da simulação computacional utilizando o software OpenFOAM® na resolução de problemas metalúrgicos.

### **2.2 Objetivos Específicos**

- Apresentar e discutir resultados de artigos sobre o uso do software OpenFOAM® em problemas metalúrgicos;
- Verificar se os resultados obtidos com o uso deste software são coerentes com os resultados alcançados por outros softwares usados para simulação computacional ou por modelos físicos;
- Determinar para quais tipos de processos metalúrgicos o uso deste software é indicado para desenvolvimento de trabalhos envolvendo simulação fluidodinâmica.

### 3 REFERENCIAL TEÓRICO

Esta revisão bibliográfica tem como objetivos apresentar o software OpenFOAM®, incluindo sua criação e desenvolvimento, suas características, funcionalidades e suas vantagens, e mostrar exemplos da sua utilização em alguns problemas metalúrgicos.

#### 3.1 O software OpenFOAM®

O software OpenFOAM® (*Open Source Field Operation and Manipulation*) foi criação de Henry Weller, no ano de 1989 e nomeado primeiramente por “FOAM” (*Field Operation and Manipulation*). Em dezembro de 2004, Henry Weller, Chris Greenshields e Mattijs Janssens lançaram-no em código aberto como “OpenFOAM” e desde então, a cada ano, novas versões são desenvolvidas, gerenciadas e lançadas ao público, sendo sua versão atual a 9. Dez anos depois, em 2014, a “OpenFOAM-dev”, a linha de desenvolvimento do software, foi divulgada publicamente no GitHub (OPENFOAM, 2021).

OpenFOAM® é o principal software de código aberto gratuito em linguagem C++ usado para projetos de dinâmica de fluidos computacional (CFD). Sua estrutura pode ser dividida em três etapas macros: pré-processamento, processamento e pós-processamento como mostrado na Figura 3.1 (OPENFOAM, 2021).

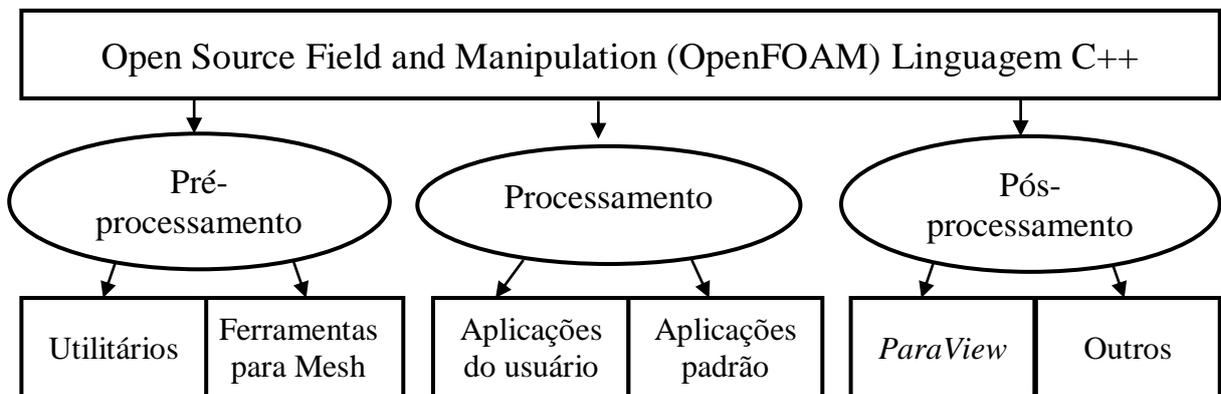


Figura 3.1– Estrutura do OpenFOAM. Adaptado de OPENFOAM (2021).

A estrutura conta com os *solvers*, os utilitários e as bibliotecas. Os *solvers* são direcionados a problemas de Mecânica dos Fluidos, os utilitários atuam na resolução de tarefas que envolvem a manipulação de dados e as bibliotecas dão suporte a ambos. Todos podem ser modificados pelos usuários, desde que estes tenham conhecimento sobre os pré-requisitos básicos do software, programação e física. (OPENFOAM, 2021).

Em relação às vantagens do OpenFOAM<sup>®</sup>, Júnior (2021) elenca sete, entre elas destacam-se, o código aberto, a linguagem C++ e a execução de problemas em paralelo. O código aberto garante uma maior liberdade ao usuário, dando a possibilidade de corrigir os erros encontrados e desenvolver novas aplicações, tornando o código mais confiável e sua expansão mais rápida. O uso da linguagem C++ viabiliza a construção de um código eficiente e de alto desempenho, por ser uma linguagem orientada a objetos. Segundo Lopes (2008) objetos são itens do software que modelam itens do mundo real e a orientação a objetos tem como principal vantagem a remoção de falhas encontradas na abordagem sequencial ou contínua, além de possibilitar a reusabilidade do código. De acordo com Júnior (2021) o software permite que os problemas sejam executados em paralelo, reduzindo o tempo de execução de problemas muito grandes. Além disso, outras vantagens são as ferramentas de criação de malha, pré e pós-processamento; a existência de malhas que acomodam geometrias diversas; a pluralidade de *solvers* e a opção de importar e exportar dados de outros softwares de análise CFD.

No que diz respeito às dificuldades encontradas para simulações com o OpenFOAM<sup>®</sup>, Fiates (2015) afirma que a falta de informação de como utilizá-lo, devido à ausência de uma documentação completa e de suporte técnico, torna-se a principal limitação deste software. Outro ponto levantado por Silva e Freire (2020) é que, devido à gratuidade e à ausência de uma interface gráfica intuitiva, o tempo de aprendizagem para manipulação do software é maior comparado aos comerciais.

### **3.1.1 Estrutura de um caso no OpenFOAM<sup>®</sup>**

De acordo com Fiates (2015), para que seja possível executar o software é necessário que os casos tenham uma estrutura básica. Júnior (2021, p. 32) define caso como “uma forma estruturada de arquivos com informações necessárias para a execução de uma simulação”. Há um conjunto de arquivos que contém todas as informações relevantes para a resolução de um caso, como por exemplo, descrição da geometria e malha utilizada, as condições de contorno, métodos numéricos e as propriedades físicas intrínsecas ao problema (FAVERO, 2009).

A estrutura de diretórios do OpenFOAM<sup>®</sup> é mostrada na Figura 3.2. O diretório principal, chamado de *case*, é dividido em três pastas: *system*, *constant* e *time* (FIATES, 2015). Em *system* estão todos os parâmetros associados à própria simulação e ele contém

pelo menos três arquivos: *controlDict*, onde são definidos os critérios de controle, como intervalo de tempo e indicadores para saída de dados; *fvSchemes*, onde são selecionados os esquemas de discretização e o *fvSolution*, onde são definidas as soluções da equação, tolerâncias e controles de algoritmo. Em *constant*, existem arquivos, como por exemplo o *transportProperties*, que caracterizam as propriedades físicas das malhas para a aplicação desejada e no subdiretório *polyMesh*, encontra-se uma completa descrição da malha a ser utilizada. Em *time directories*, estão alocadas as condições iniciais e de contorno, como pressão e velocidade. (OPENFOAM, 2021).

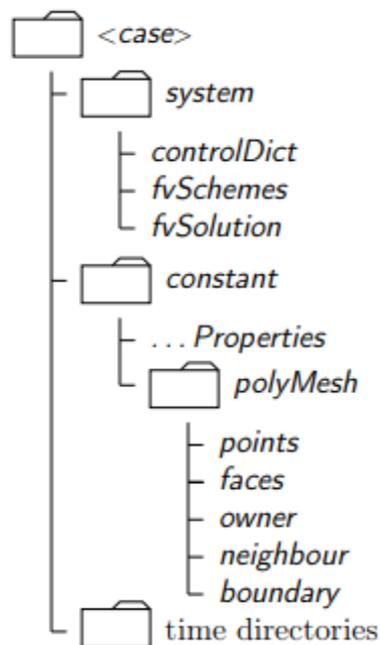


Figura 3.2– Estrutura de diretórios do OpenFOAM. OPENFOAM (2021).

### 3.1.2 Pré-Processamento

Análises CFD têm uma etapa primordial, a criação da geometria e da malha. A criação da malha é feita através da discretização do domínio em subdomínios. Quanto maior a quantidade de subdomínios, mais refinada é a malha e maior é o número de equações a serem resolvidas. Conseqüentemente, o tempo de processamento maior. Para evitar esse problema, opta-se por trabalhar com malhas que consigam entregar resultados precisos e que necessitem de um tempo de simulação aceitável (FAVERO, 2009). O OpenFOAM® dispõe de dois geradores originais de malha, o *blockMesh* e o *snappyHexMesh* (FIATES, 2015).

De acordo com Fiates (2015), para a geração de malhas no *blockMesh*, é preciso que o usuário descreva os vértices em coordenadas cartesianas. Ele cria malhas hexaédricas em multiblocos, mas tem como principal limitação a baixa qualidade para construir, subdividir e manipular esses blocos. A criação de malhas tridimensionais é o padrão do OpenFOAM® e suas configurações encontram-se na pasta *polyMesh*, dentro de *constant*. Quando um comando for executado, as informações compreendidas no arquivo *blockMeshDict* serão lidas e malha será criada, enquanto isso, os seguintes arquivos que compõe a malha serão escritos no diretório *polyMesh*: *points*, *faces*, *owner*, *neighbour* e *boundary*.

No que diz respeito à geometria, não há um editor CAD no OpenFOAM®, mas o usuário pode importar geometrias e malhas de outros softwares, comerciais ou livres, sem restrição quanto ao tipo de geometria, já que o OpenFOAM® aceita vários tipos, tetraédrica, prismática, piramidal, hexaédrica, etc (FAVERO, 2009).

Com relação às condições iniciais e de contorno, o OpenFOAM® já conta com as principais condições de contorno instaladas, como simetria (*simetry*), entrada de massa (*inlet*), saída de massa (*outlet*), parede fixa ou móvel (*wall*) e condição atmosférica (*atmospheric*) e, caso seja necessário, o usuário pode criar novas condições (FAVERO, 2009). As condições de contorno são aplicadas em superfícies chamadas de *patches*, definidas no *blockMeshDict* e no *snappyHexMeshDict*, que escrevem e modificam o arquivo *boundary*, onde estão localizadas as condições de contorno, as quais podem ser alteradas pelos usuários sem sofrer alterações nas características da malha. Visando facilitar a simulação, as condições de contorno que são aplicadas em *patches* diferentes são agrupadas para diminuir a quantidade de dados (FIATES, 2015).

Ainda na etapa de pré-processamento, as condições da simulação, as propriedades físicas e modelos adicionais também devem ser definidas nos arquivos de controle. As condições são definidas no diretório *system* e as outras no diretório *constant*. Em relação aos arquivos de controle, existem três: *controlDict*, *fvSchemes* e *fvSolution*. No primeiro existem os parâmetros de controle relacionados ao tempo de simulação. No segundo há a especificação dos métodos para discretização dos termos das equações para que o usuário possa escolher, sendo a integração de Gauss para volumes finitos o método padrão do OpenFOAM®. No terceiro, definem-se os métodos para a solução de sistemas lineares, suas tolerâncias de erro e também parâmetros necessários para a solução da área de

escoamento (FAVERO, 2009). Além disso, o arquivo *fvSolution* aponta qual *solver* deverá ser usado para cada equação discretizada (OPENFOAM, 2021).

### 3.1.3 Processamento

O primeiro passo desta etapa é a escolha de um *solver* para resolver as equações do modelo (FAVERO, 2009). Segundo Silva e Freire, (2020), esta é uma das principais razões que favorecem a obtenção de um bom resultado da simulação, que deve sempre levar em consideração todos os fatores físicos do modelo tratado. Nos *solvers* estão todas as informações das rotinas de cálculos e os modelos para a resolução do processo desejado, e quando há o chamado para a execução, acontece a leitura dos parâmetros da simulação previamente definidos e especificados nos arquivos da etapa de pré-processamento.

O OpenFOAM® conta com uma gama de *solvers* prontos que podem ser utilizados em vários tipos de problemas, como escoamentos compressíveis ou incompressíveis, estacionários ou transientes, laminares ou turbulentos. Porém, caso haja a necessidade de uma modelagem para a qual não exista um *solver* pronto, o usuário pode criar o seu próprio (JUNIOR, 2021). Grande parte desses *solvers* padrão utiliza algoritmos *pressure-implicit split-operator (PISO)* ou *semi-implicit method for pressure-linked equations (SIMPLE)*. Ambos são procedimentos iterativos para solucionar equações de velocidade e pressão sendo o primeiro utilizado para escoamentos transientes e o segundo para estacionários (FIATES, 2015).

### 3.1.4 Pós-Processamento

Nesta etapa são apresentados os resultados da simulação. Para isso utilizam-se ferramentas que fazem a manipulação e a representação gráfica dos resultados (JUNIOR, 2020). O OpenFOAM® conta com uma ferramenta de pós-processamento chamada *ParaFOAM*, adaptada do software *ParaView* (OPENFOAM, 2021).

O *ParaView* é um programa de código aberto criado para a análise de conjuntos de dados muito grandes, sendo possível de ser executado tanto em supercomputadores para análise de dados de tamanho petaescala, quanto em laptops para dados menores. Ele utiliza o *VTK (Visualization Toolkit)* para o processamento e visualização de imagens. Os usuários conseguem de forma rápida criar visualizações para análise dos dados através de técnicas qualitativas e quantitativas, como construção de gráficos e verificação de fluxos por linhas

e vetores. A exploração dos dados pode ser feita de forma iterativa em 3D ou por meio dos recursos de processamento do *ParaView* (PARAVIEW, 2021). Também é possível utilizar outros softwares com recursos de visualização mais avançados, como *Enight*, *Fieldview* e *Fluent* e ainda, existe a opção de converter os resultados obtidos no OpenFOAM® para formato *VTK*, tornando possível a leitura dos dados em qualquer visualizador que use *VTK* (FAVERO, 2009).

O *paraFoam* é utilizado para o início do *ParaView* e é executado por um único comando feito dentro de um diretório, como qualquer utilitário. Ao iniciar o *ParaView*, uma janela é aberta. Os comandos ficam localizados no painel esquerdo, com: *Pipeline Browser*, *Properties panel* e *Other panels*. Em *Pipeline Browser* ficam os módulos que estão abertos no *ParaView*, sendo que os gráficos podem ser habilitados ou desabilitados a critério do usuário. *Properties panel* informa as seleções de entrada, como tempo e conta com um painel de exibição para controle da representação visual, por exemplo, para a seleção de cores. *Other panels* fornece informações como a geometria e o tamanho da malha (OPENFOAM, 2021).

O modo de operação do *ParaView* baseia-se em uma estrutura de árvore, onde os dados podem ser filtrados do módulo de caso para criar submódulos. Ele permite o usuário criar vários submódulos, esomente exibir aqueles em que seja possível a criação de imagens ou animações desejadas. Basicamente, a operação geral do *ParaView* é baseada no usuário, que faz uma seleção e, a seguir, clica no botão verde *Apply* localizado em *Properties panel*. Em *Properties window* fica localizado o painel de visualização, como mostrado na Figura 3.3, que contém as configurações para visualização dos dados para um determinado caso. Existem quatro itens que são particularmente importantes e merecem atenção: o intervalo de dados de um campo pode não ser atualizado automaticamente para os limites máximo/mínimo, portanto o usuário deve-se atentar para selecionar *Rescale* em intervalos apropriados; ao clicar em *Edit Color Map* uma janela será aberta contendo dois painéis. O primeiro é o *Color Scale*, onde as cores podem ser escolhidas. O segundo, *Color Legend*, tem um botão para alterar as cores, com uma legenda de barra de cores e contém também configurações para o layout da legenda, por exemplo, a fonte; a geometria pode ser vista com uma única cor ao selecionar *Solid Color*; a imagem pode ser feita em modo translúcido editando o valor em *Opacity text box*, onde 1 é sólido e 0 invisível (OPENFOAM, 2021).

Contorno, superfície ou pontos  
Cores  
Definir gama do mapa de cores / aparência

Mudar opacidade da imagem  
ex: torná-la translúcida

Método de interpolação

Ferramentas de manipulação  
da geometria



Figura 3.3– Painel de visualização. Adaptado de OPENFOAM (2021).

Há um conjunto de funções gerais de pós-processamento para visualização dos resultados, as funções simplificadas e as de superfície. No caso *pitzDaily* tomado como exemplo, as funções simplificadas já estão configuradas, sendo necessário somente configurar as de superfície. Isso é feito copiando o arquivo de superfícies para o diretório do sistema através do *foamGet*. O arquivo é então configurado com um conjunto de superfícies, incluindo planos de corte, que pode ser editado conforme a necessidade do usuário. No caso *pitzDaily*, o arquivo foi editado, como mostra a Figura 3.4, para gerar um plano de corte normal para a direção z (OPENFOAM, 2021).

```

16
17 #includeEtc "caseDicts/postProcessing/visualization/surfaces.cfg"
18
19 fields      (p U);
20
21 surfaces
22 (
23     zNormal
24     {
25         $cuttingPlane;
26         pointAndNormalDict
27         {
28             normalVector $z;
29         }
30     }
31 );
32
33 // *****

```

Figura 3.4– Códigos para visualização do caso *pitzDaily*. OPENFOAM (2021).

O usuário pode incluir a função no arquivo *controlDict*, junto com as demais funções através da adição de *#includeFunc*. A fim de testar a execução da função e visualizar os resultados obtidos pela simulação, o usuário pode acessar o pós-processamento do solver com o seguinte comando:

*simpleFoam -postProcess -func surfaces*

Isso gera arquivos no formato VTK com dados de pressão e velocidade, previamente escolhidos nos diretórios de tempo em *postProcessing/surfaces directory*. O usuário consegue selecionar o plano de corte usando o caminho: *ParaView →doing File →Opene* selecionando o arquivo desejado. No caso *pitzDaily*, tomado como por exemplo, ao selecionar *postProcessing / surface / 296 / U\_zNormal.vtko* arquivo gerado é o ilustrado na Figura 3.5 (OPENFOAM, 2021).

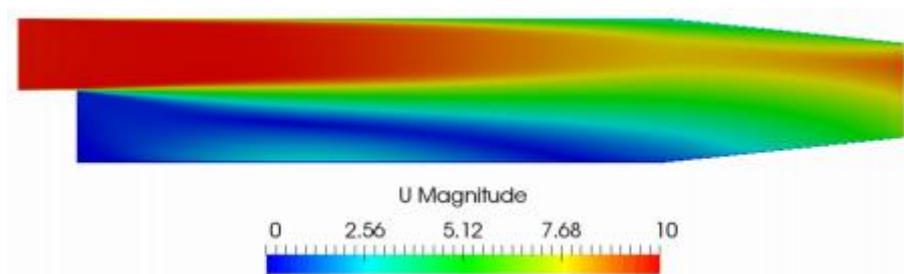


Figura 3.5– Visualização do caso *pitzDaily*no plano de corte z. Adaptado de OPENFOAM (2021).

### 3.2 Aplicações em Problemas Metalúrgicos Utilizando o OpenFOAM®

Os artigos a serem apresentados foram organizados conforme a área visando facilitar a apresentação do uso do software OpenFOAM® em problemas metalúrgicos.

### 3.2.1 Distribuidor

Odenthal, Javurek e Kirschen (2010) conduziram um estudo baseado na pesquisa dos membros do German Steel Institute sobre o modelo CFD (escala 1:1,7) de um distribuidor de único veio de 16 toneladas operado em estado estacionário e utilizado para a produção de aços inoxidáveis, mostrado na Figura 3.6. A motivação do estudo é avaliar o potencial das ferramentas CFD para o desenvolvimento de processos metalúrgicos, já que elas tornaram-se indispensáveis para o desenvolvimento de equipamentos siderúrgicos e novas tecnologias, devido a sua capacidade de melhorar a compreensão dos processos metalúrgicos, aumentando a confiabilidade operacional. Além disso, os computadores existentes conseguem manipular e processar milhões de células e somente nos últimos 15 anos, o número de problemas tratados via CFD aumentou em um fator de 20.

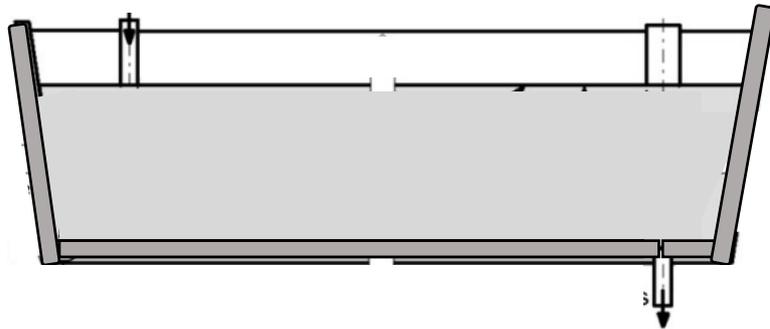


Figura 3.6– Modelo do distribuidor para simulações CFD. Adaptado de Odenthal *et al.*(2010).

A escolha do distribuidor é justificada por possuir estruturas de fluxo de fácil compreensão e ter à disposição dados experimentais confiáveis. Nas simulações realizadas foram definidos apenas a geometria e a malha do modelo, com 500.000 células, a vazão volumétrica ( $0,463\text{m}^3/\text{min}$ ) e válvula submersa com 1m de comprimento, enquanto os demais parâmetros foram escolhidos pelos pesquisadores. Para a geração da malha, foram usados os softwares Gambit, ICEM CFD e CFX-Mesh e as simulações foram realizadas nos softwares ANSYS-Fluent, OpenFOAM, ANSYS-CFX e Fastest 3D. (ODENTHAL, JAVUREK e KIRSCHEN, 2010).

Os modelos de turbulência utilizados na simulação foram standard k- $\epsilon$ , realizable k- $\epsilon$ , SST k- $\omega$  (*Shear Stress Transportk- $\omega$* ), RSM (*Reynolds Stress Models*), LES (*Large Eddy Simulation*). Os modelos da classe k- $\epsilon$  são baseados na hipótese de viscosidade turbulenta, ou seja, o efeito da turbulência no campo de fluxo médio de Reynolds é levado em consideração como viscosidade aumentada, dependente da turbulência, sendo o standard k-

$\epsilon$  o modelo mais conhecido, mas como tensões negativas podem aparecer, este modelo tem sido substituído pelo realizável  $k-\epsilon$ . Existe o modelo  $k-\omega$  *Shear Stress Transport* (SST), que combina os benefícios dos dois modelos; os Modelos de Tensão de Reynolds (RSM), uma classe mais elaborada, que reproduzem com melhor qualidade certos efeitos de fluxo, mas por ser baseado em suposições empíricas não pode ser considerado universal; e o LES, no qual é possível realizar cálculos sem simplificação de grandes estruturas de turbulência anisotrópica, onde há o transporte da quantidade principal de massa, momento e energia (ODENTHAL, JAVUREK e KIRSCHEN, 2010).

Vakhrushev *et al.* (2016) apresentam em seu trabalho um experimento com um modelo físico com água, mostrado na Figura 3.7, onde partículas de plástico são injetadas imitando o comportamento de inclusões não metálicas no aço, para avaliar a utilização dos modelos computacionais para análise do movimento de partículas em um distribuidor de lingotamento contínuo

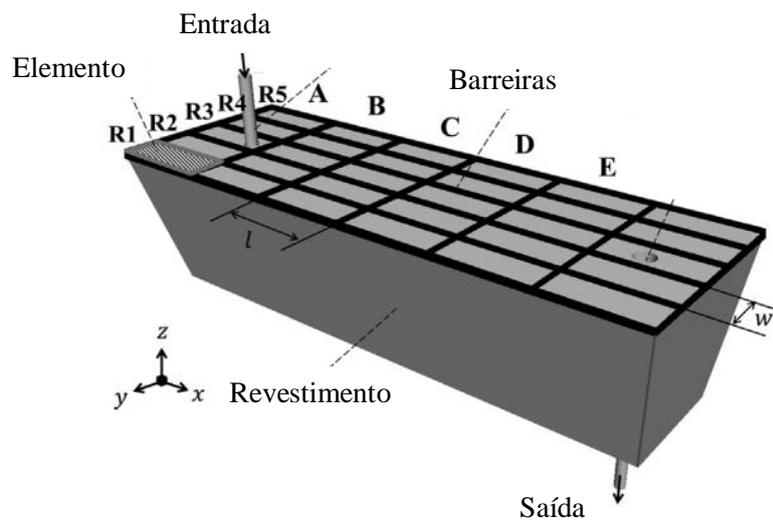


Figura 3.7 – Modelo físico do distribuidor. Adaptado de Vakhrushev *et al.* (2016).

Um modelo CFD 3D de fluxo transiente, foi desenvolvido no OpenFOAM® com as mesmas características do modelo físico citado. Para registrar a distribuição das partículas flotadas, foi estabelecido um limite de superfície superior, o qual foi dividido em 30 elementos, correspondendo às células da barreira de madeira do modelo físico. Conforme uma partícula atinge o limite superior, ela é removida e registrada como uma partícula que flutuou. As partículas que escapam do fluxo também são registradas. Foram realizadas duas simulações com diferentes configurações, listadas na Tabela 3.1. O tempo de cálculo para

rastreamento de partículas é de 33h para o experimento 1 com partículas grandes e 8 dias para o experimento 2 com pequenas partículas (VAKHRUSHEV *et al.*, 2016).

Tabela 3.1 – Densidade das partículas e parâmetros de injeção. Adaptado de Vakhrushev *et al.* (2016)

Número do experimento	Diâmetro das partículas	Número de partículas (milhões)	Taxa de injeção de partículas (kg s <sup>-1</sup> )	Fluxo médio de água (m <sup>3</sup> min <sup>-1</sup> )
Exp. 1	3,5 (mm)	0,1	0,0581	0,426
Exp. 2	74, 129, 173, 213, 250, 288, 330, 380, 444, 536 (µm)	0,001	0,0581	0,426

Raghavendra *et al.* (2013) apresentaram uma análise numérica para fins de investigação sobre o comportamento das inclusões em um distribuidor de lingotamento contínuo e o OpenFOAM<sup>®</sup> foi escolhido para modelar as inclusões através do Rastreamento de Partículas Lagrangianas. O distribuidor tem o papel de um reservatório no processo de lingotamento contínuo, facilitando na troca da panela sem interrupção do processo. Por isso, o processo de flotação é uma etapa importante, em que há a remoção das inclusões não metálicas provenientes da escória transportada da panela, da escória do distribuidor, de partículas erodidas do refratário e de produtos das reações químicas de desoxidação. Como consequência, tem-se um aço mais limpo, logo, com uma qualidade melhor (RAGHAVENDRA *et al.*, 2013).

Um modelo CFD foi desenvolvido para analisar o fluxo isotérmico e o comportamento de inclusões para um distribuidor com um único veio. A geometria e a malha utilizadas para a simulação foram criadas no software comercial *Gambit*, e, posteriormente, convertidas para uma malha compatível no OpenFOAM<sup>®</sup>, como pode ser visto na Figura 3.8 (RAGHAVENDRA *et al.*, 2013).

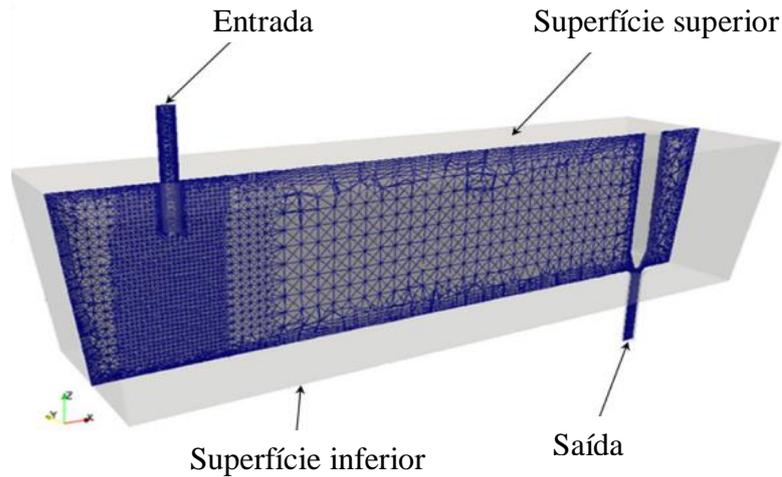


Figura 3.8 – Malha típica utilizada para distribuidor com único veio. Adaptado de Raghavendra *et al.*(2013).

Neumann *et al.* (2019) analisaram a simulação numérica para a remoção de inclusões em um distribuidor em relação a duas estratégias de limpeza, a filtragem ativa e a limpeza reativa. Na filtragem ativa, as inclusões são depositadas na superfície do filtro. Na reativa, isso também acontece, além do fato que elas flutam devido à ação de bolhas de monóxido de carbono geradas pela reação entre o carbono e o oxigênio presentes no aço líquido. Para comparação de desempenho das duas técnicas, simulações numéricas dos escoamentos bifásicos foram realizadas.

O modelo numérico conta com transporte de carbono dissolvido e movimento de flotação das inclusões não metálicas devido à formação de bolhas de monóxido de carbono. As simulações foram realizadas no software de código aberto OpenFOAM® versão 5.0, o modelo numérico foi implementado utilizando o *solver pimpleFOAM* e as malhas foram geradas no *CreativeFields*, através da ferramenta *cfMesh*. Como o propósito é investigar a interação do filtro com as inclusões, os filtros são imersos no distribuidor, como mostra a Figura 3.9 (NEUMANN *et al.*, 2019).

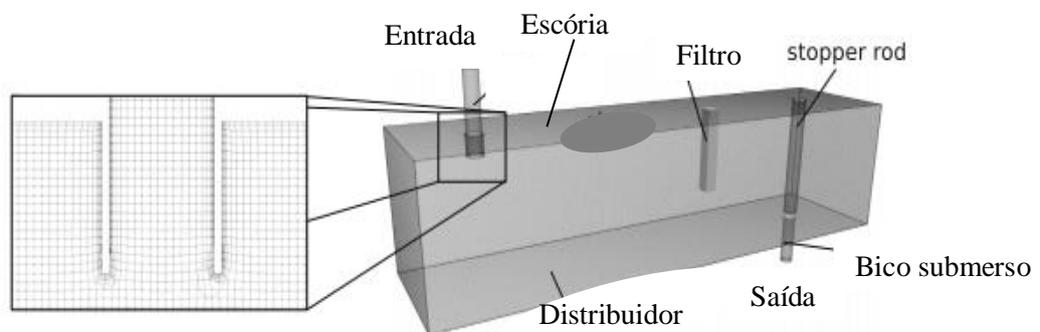


Figura 3.9 – Desenho do protótipo do distribuidor. Adaptado de Neumann *et al.*(2019).

Primeiramente, realizam-se simulações monofásicas durante 5 segundos. Em seguida, 1,2 milhões de partículas com diâmetro de 20 $\mu$ m são lançadas de forma homogênea no metal e a simulação para fluxo binário continua por mais 3 segundos a fim de se obter um campo de fluxo binário disperso (NEUMANN *et al.*, 2019).

Foram analisadas quatro configurações diferentes de filtro nas simulações e o impacto de cada uma na eficiência de limpeza do distribuidor é analisado. Na Tabela 3.2 são listados os parâmetros de cada filtro. O filtro 1 é o filtro de geometria base. O filtro 2 tem duas vezes o volume do filtro 1 e o filtro 3 tem quatro vezes o volume do filtro 1. O filtro 4 tem o mesmo volume, mas uma geometria mais compacta do que o filtro 1. Todos os filtros foram testados com filtragem ativa e o filtro 1 também foi utilizado na técnica de limpeza reativa (NEUMANN *et al.*, 2019).

Tabela 3.2 – Parâmetros dos filtros analisados. Adaptado de Neumann *et al.*(2019).

<b>Filtro</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>
Comprimento (mm)	25	35	50	35
Largura (mm)	25	35	50	35
Altura (mm)	157	157	157	80
Escala de volume	Base	2:1	4:1	1:1
$V_F/V_T$	0,16	0,31	0,63	0,16

### 3.2.2 Alto-Forno

Baniasadi e Peters (2018) realizaram um estudo sobre a capacidade do método de elementos discretos em tratar a zona de gotejamento do alto-forno, região onde coexistem duas fases líquidas: ferro fundido e escória, ambos com propriedades diferentes e que desempenham um papel importante nessa região, enquanto transferem massa e energia com a fase gasosa. Essas fases afetam a distribuição e composição da fase gasosa e também a pressão e a temperatura dentro do alto-forno. Por isso, é importante entender o comportamento das fases líquidas nesta zona, onde a pressão e a temperatura são tão altas, que impossibilitam a realização de medições experimentais e quando são possíveis, têm custo elevado (BANIASADI e PETERS, 2018).

A existência de várias fases fluidas e partículas sólidas na zona de gotejamento torna o Método dos Elementos Discretos uma abordagem adequada para resolver a zona de gotejamento de um alto-forno. No modelo proposto, as fases fluidas são analisadas por um modelo CFD, enquanto as partículas sólidas são resolvidas pelo Método de Elemento Discreto Estendido (XDEM), um método de simulação numérica multifísica, baseado no método de elemento discreto clássico, com algumas propriedades aprimoradas. A combinação dos dois preenche as lacunas que são deixadas quando eles são usados de maneira isolada (BANIASADI e PETERS, 2018).

A análise CFD foi baseada em um estudo experimental conduzido por Szekely e Kajiwara, o qual tinha um modelo com a especificação de produzir líquido na parte superior. A Figura 3.10 (a) ilustra o modelo experimental e (b) o modelo CFD. No que diz respeito às condições de contorno, a velocidade de entrada da fase gasosa foi definida como fixa e para as paredes foi definida a condição de não-deslizamento. Quanto às propriedades físicas dos fluidos, algumas suposições foram consideradas: as fases são compressíveis; o sistema é isotérmico; não há transferência de massa entre as fases; tanto a fase líquida quanto a gasosa compartilham a mesma pressão (BANIASADI e PETERS, 2018).

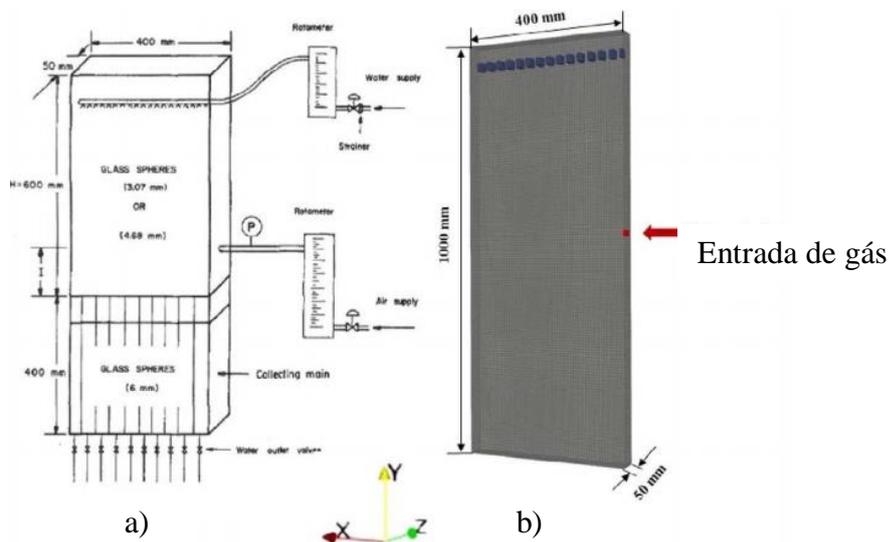


Figura 3.10 – Modelos a) experimental e b) CFD. Adaptado de Baniasadi e Peters (2018).

### 3.2.3 Lingotamento Contínuo

Vakhrushev *et al.* 2014 estudaram a formação de pele no processo de lingotamento de placas finas em molde tipo funil. Este tipo lingotamento vem ganhando cada vez mais espaço, competindo com o lingotamento de placas convencionais para produção de produtos planos, devido a algumas vantagens, como por exemplo, pertencer à cadeia de produção de lingotes e laminação direta, garantir alta produtividade e economia de energia. Porém, há relatos de pontos negativos como a sensibilidade a *breakouts* e formação de trincas nas bordas e na superfície.

O ponto chave na modelagem computacional desse processo é considerar a evolução da casca sólida e a zona pastosa parcialmente sólida, que tem forte interação com o fluxo turbulento, o que a torna sujeita à deformação contínua. Contudo, o objetivo desta simulação é modelar algumas características do processo e não replicar o processo real que acontece na indústria (VAKHRUSHEV *et al.*, 2014).

Calcula-se o movimento da fase sólida através de um modelo viscoplástico rígido de fluxo incompressível. O estudo foi dividido em duas partes, na primeira, um modelo 2D foi criado a fim de simular a solidificação e o movimento da pele, como mostra a Figura 3.11. Na segunda parte, foi desenvolvido um modelo 3D, mostrado na Figura 3.12, para demonstrar a adequação ao modelo (VAKHRUSHEV *et al.*, 2014).

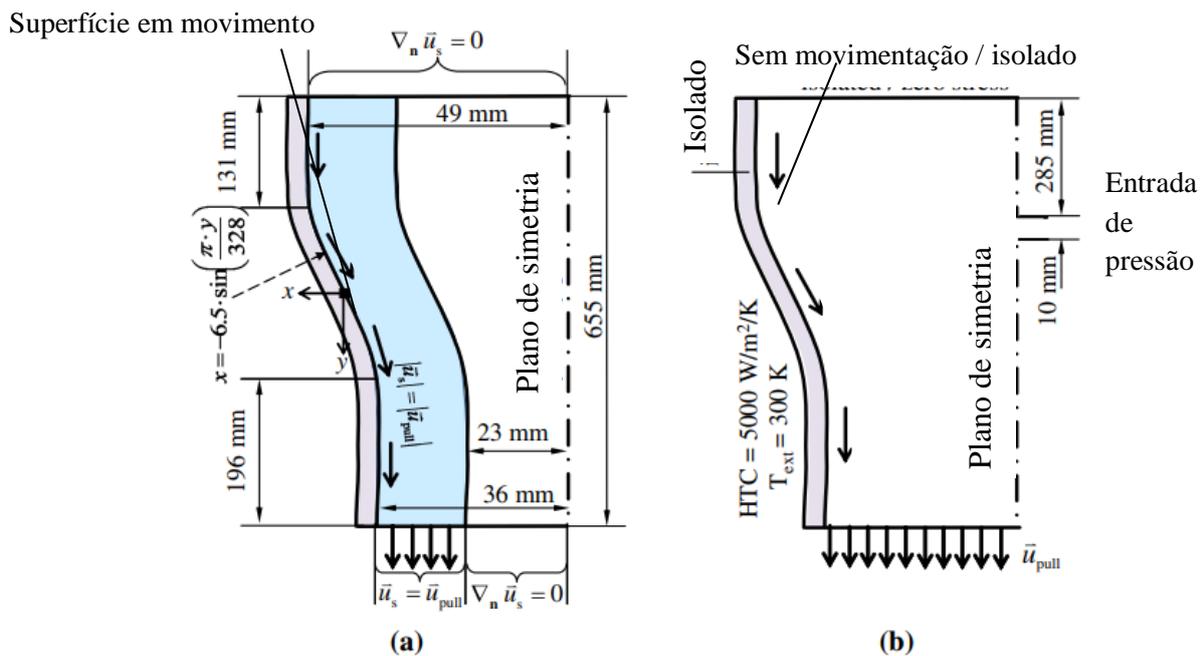


Figura 3.11 – Configuração de um modelo 2D para o cálculo (a) da velocidade do sólido e (b) do fluxo-solidificação. Adaptado de Vakhrushev *et al.* (2014).

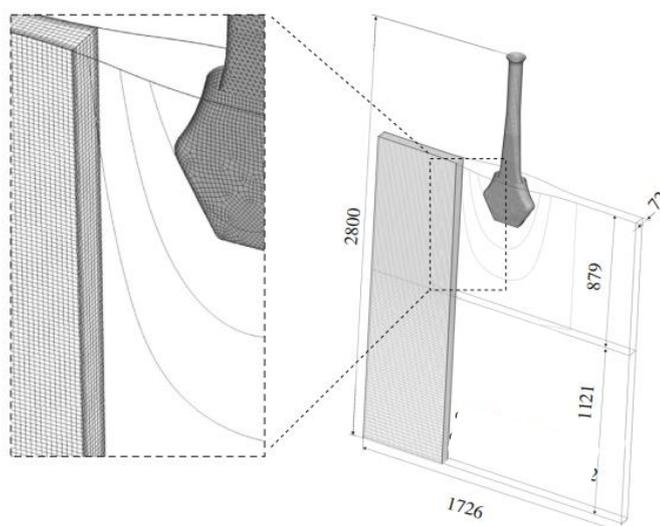


Figura 3.12 – Simulação do TSC de aço baixa liga. Adaptado de Vakhrushev *et al.* (2014).

No modelo 2D a seção de solidificação foi reduzida a uma forma sinuosa com o objetivo de reproduzir a região do molde interno, em formato de funil. Os cálculos foram feitos em duas etapas. A primeira, mostrada na Figura 3.11 (a), foi para a velocidade do sólido, onde uma parte foi preenchida com a pele e a outra com o aço líquido. Já a segunda, ilustrada na Figura 3.11 (b), foi para calcular o fluxo e o processo de solidificação. A técnica de adaptação de malha foi utilizada. As simulações foram realizadas em paralelo, iniciando com uma malha com 1mm e, gradualmente, reduzido para 0,25mm, até o momento em que o refinamento não teve mais efeito sobre o resultado da simulação. Na simulação do TSC de aço baixa liga em 3D, a fim de garantir resultados precisos, a técnica de adaptação de malhas também foi utilizada, iniciando com tamanho de 2mm e reduzindo até atingir 0,4mm. Todas as simulações foram executadas em paralelo em 8 CPUs (Intel Nehalem Cluster 2,93 GHz), e o tempo de processamento esperado de 100 segundos demorou 2 semanas (VAKHRUSHEV *et al.*, 2014).

Lee *et al.*(2021) conduziram um estudo para analisar o entupimento da válvula submersa entre o distribuidor e o molde. As inclusões aderem à entrada devido às reações químicas entre o aço líquido e a parede, ocasionando o entupimento. Este é um problema que compromete a produtividade do processo de lingotamento do aço, pois pode ocasionar fluxo assimétrico e distribuição de temperatura no molde e, conseqüentemente, o aparecimento de defeitos. O entendimento dos fatores que causam e influenciam o entupimento é de extrema importância para que o processo ocorra sem problemas e que a qualidade do aço seja mantida.

Lee *et al.* (2021) realizaram simulações FSI (*Fluid-Structure Interaction*) com intervalo de tempo de  $2,5 \times 10^{-4}$ s no OpenFOAM® (versão 4.0) para três condições de operação: sem entupimento, com entupimento e em relação à massa do entupimento. Para a primeira condição, o modelo utilizado é mostrado na Figura 3.13 (a). Já para simular a condição de entupimento, foram adicionadas inclusões, representadas por camadas planas uniformes, localizadas na parede interna, na saída e na entrada do molde, como ilustra a Figura 3.12 (b), além de quatro configurações diferentes ( $P_{ref}$ , E1, E2 e E3) listadas na Tabela 3.3.

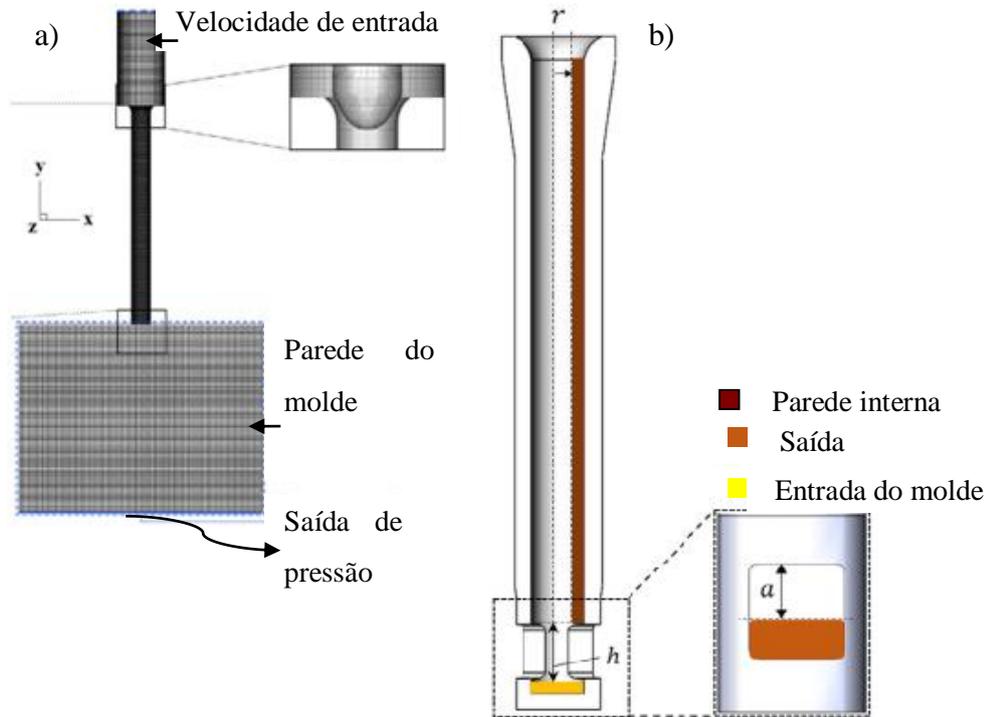


Figura 3.13– Modelo para simulação nas condições de a) sem entupimento e b) com entupimento. Adaptado de Lee *et al.* (2021).

Tabela 3.3 – Configurações para a condição de entupimento. Adaptado de Lee *et al.* (2021).

Condições	$\Delta m$ (kg)	$\Delta m_r$ (%)	$\Delta m_a$ (%)	$\Delta m_h$ (%)	$r$ (mm)	$a$ (mm)
$P_{ref}$	0	0	0	0	50	68,41
E1	6,384	61,1	10,7	28,2	47	21,76
E2	6,384	59,1	12,2	28,7	47,10	15,23
E3	6,384	62,5	10,3	27,1	46,93	23,40

### 3.2.4 Alumínio

Yamamoto *et al.* (2019) realizaram um estudo sobre a formação de vórtice durante a agitação mecânica em um processo de produção de alumínio. A agitação mecânica é utilizada, como por exemplo, em fornos de espera a fim de homogeneizar o banho e eliminar impurezas e inclusões. Porém, um problema causado pela agitação mecânica é a formação de filmes de óxido e inclusões acarretando na deterioração das propriedades mecânicas do alumínio. Considerando os processos industriais, foi utilizado neste estudo um rotor de fluxo com mesmo formato usado na indústria do alumínio, pois para obter um nível de eficiência elevado nos processos industriais é de extrema importância ter o controle da agitação mecânica.

Yamamoto *et al.* (2019) conduziram o experimento em um modelo físico com água e o modelo CFD, e em ambos as lâminas do rotor foram inclinadas em 30 graus. A simulação numérica foi realizada no OpenFOAM® (versão 3.0.1) com o *solver interDyMFoam* e a Figura 3.14 ilustra o modelo desenvolvido. Em relação às condições de contorno, a condição de não-deslizamento foi adotada para todos os limites da parede.

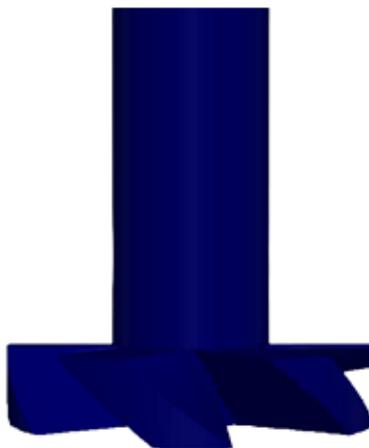


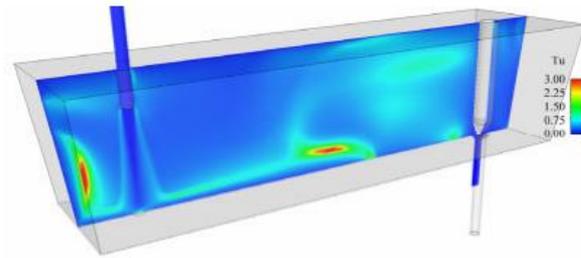
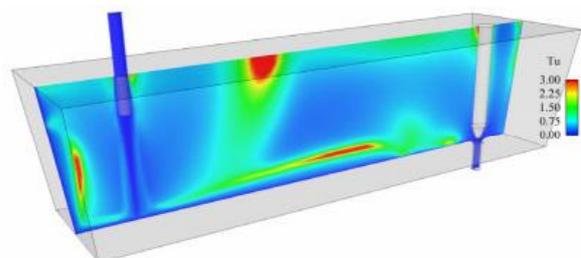
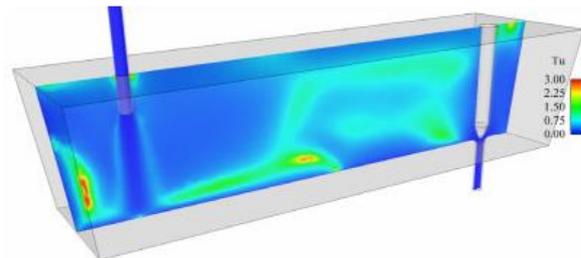
Figura 3.14 – Modelo 3D para simulação. Yamamoto *et al.* (2019).

## 4 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS APRESENTADOS NOS ARTIGOS

Neste capítulo os resultados obtidos com o software OpenFOAM<sup>®</sup> nos problemas metalúrgicos citados anteriormente são apresentados e analisados a fim de verificar se estes são coerentes com os resultados alcançados por outros softwares usados para simulação computacional ou por modelos físicos e determinar para quais tipos de processos metalúrgicos o uso deste software é indicado no desenvolvimento de trabalhos de simulação fluidodinâmica.

### 4.1 Distribuidor

Odenthal, Javurek e Kirschen (2010), após análise das simulações CFD de um distribuidor de único veio realizadas nos softwares OpenFOAM<sup>®</sup>, ANSYS-Fluent, ANSYS-CFX e Fastest 3D, observaram que todos os softwares, comerciais, gratuito e de desenvolvimento próprio, previram com bom grau de precisão, o fluxo global e a estrutura de turbulência dentro do distribuidor, assim como a curva de tempo de residência, além de que todas as estruturas obtidas apresentam boa concordância com as medições de referência, as quais foram obtidas pelo LDA (*Laser Doppler Anemometer*). A intensidade da turbulência obtida pelos quatro softwares é mostrada na Figura 4.1, onde estão identificados o software (OpenFOAM, ANSYS-Fluente, ANSYS-CFX, Fastest 3D), o modelo de turbulência (standard k- $\epsilon$ , realizable k- $\epsilon$ , SST k- $\omega$ , RSM) e a condição de contorno (parede sem atrito, simetria).

Fastest 3D, standard k- $\epsilon$ , parede sem atritoANSYS-Fluent, realizable k- $\epsilon$ , simetriaANSYS-CFX, standard k- $\epsilon$ , parede sem atrito

OpenFOAM, RSM, parede sem atrito

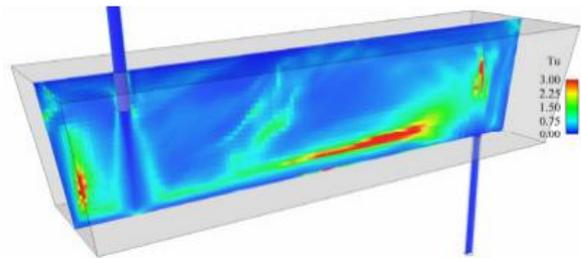


Figura 4.1– Simulações da intensidade da turbulência dentro de um distribuidor obtidas por quatro tipos de softwares. Odenthal, Javurek e Kirschen (2010).

Este estudo permitiu concluir que a simulação CFD para processos metalúrgicos é necessária, principalmente quando a observação direta é impossibilitada ou dificultada e quando busca-se promover uma modificação significativa, pois notou-se que nos casos de modificações menores, em termos de fluxo e calor, os erros computacionais eram significativos. Deve ser ressaltado que no processo real de produção de aço pequenas mudanças são difíceis de serem percebidas devido às condições flutuantes do processo, como por exemplo, temperatura, composição do aço e concentração de inclusões, induzindo a considerar que sejam feitas modificações mais orientadas para o fluxo (ODENTHAL, JAVUREK e KIRSCHEN, 2010).

Vakhrushev *et al.* (2016), ao simular o movimento de inclusões no distribuidor e comparar com resultados de modelos físicos, encontraram uma boa concordância para o experimento 1 feito com partículas de 3,5mm, mas, para o experimento 2, com partículas menores, houve uma incompatibilidade de resultados, como se a dissipação das partículas tivesse sido subestimada pela simulação. As Figuras 4.2 e 4.3 ilustram os resultados obtidos pelos experimentos 1 e 2, respectivamente.

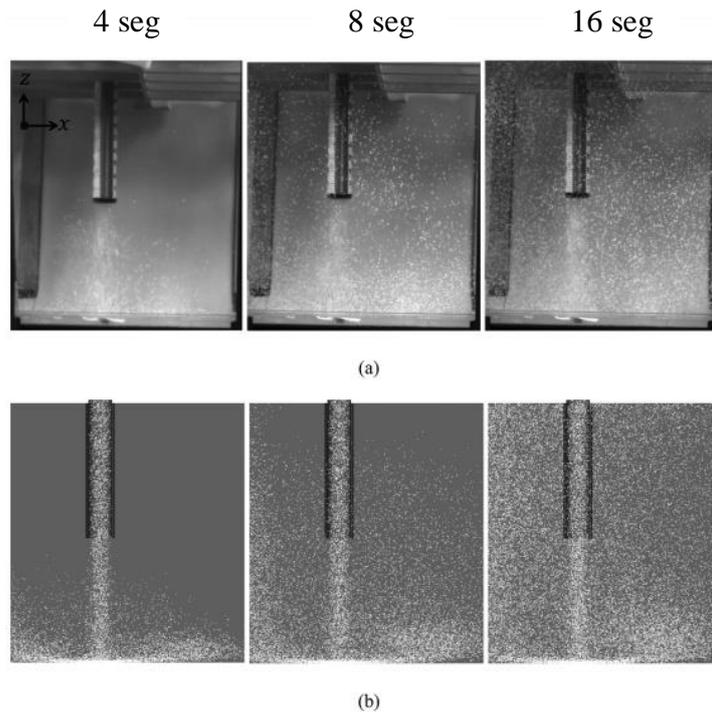


Figura 4.2 – Comparação da distribuição de partículas entra a) simulação e b) experimento 1. Adaptado de Vakhrushev *et al.* (2016).

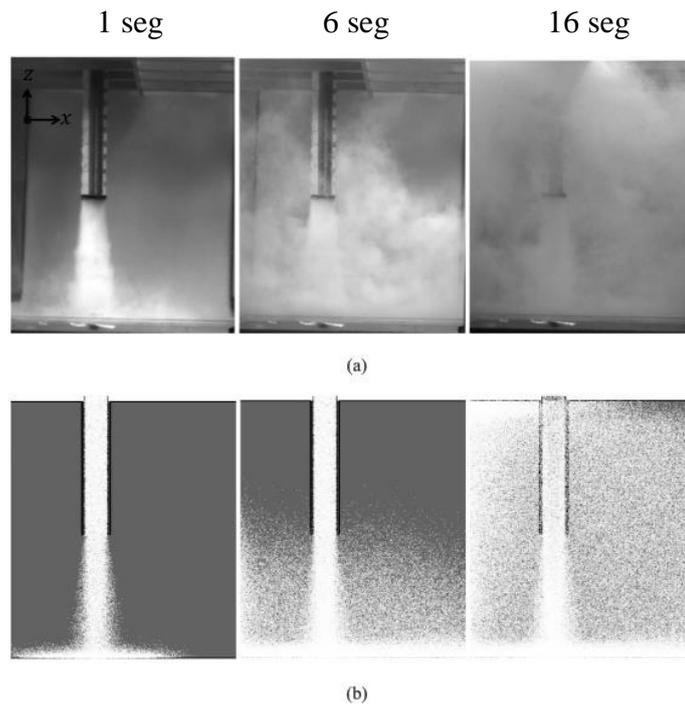


Figura 4.3 – Comparação da distribuição de partículas entra a) simulação e b) experimento 2. Adaptado de Vakhrushev *et al.* (2016).

Vakhrushev *et al.* (2016) destacam que para o experimento 1 todas as partículas flutam, tanto no modelo físico quanto na simulação computacional. Enquanto que para o experimento 2, a previsão da simulação é que 9% das partículas injetadas escapem do fluxo de saída, mas no modelo físico observa-se que essa porcentagem é de 24%. Com

relação ao tempo de flotação da simulação, para o experimento 1 ele é 6s, concordando com o modelo físico, mas para o experimento 2 ele é maior. Portanto, os autores concluem que o modelo atual, amplamente usado tanto no código comercial quanto no código aberto, só deve ser usado para prever o movimento das partículas qualitativamente, pois ainda está sujeito a melhorias antes de ser usado para simulação quantitativa de processos.

Para explicar a incompatibilidade de resultados para o experimento 2 algumas razões são apontadas, como a simplificação da distribuição do tamanho das partículas; a imprópria suposição de fluxo em estado quase estacionário; a não consideração da interação de partícula-partícula, por exemplo, aglomeração; o nível de dissipação de turbulência das partículas e ressaltam que a principal desvantagem de realizar a modelagem numérica desse problema é que muitos parâmetros precisam ser escolhidos arbitrariamente (VAKHRUSHEV *et al.*, 2016).

Raghavendra *et al.*(2013) realizaram simulações isotérmicas de um modelo físico de distribuidor a fim de validar os resultados obtidos pela simulação no OpenFOAM®. No modelo CFD, as inclusões são consideradas de forma esférica, partículas na faixa de 20–80µm de diâmetro com uma densidade constante de 210kg/m<sup>3</sup>. A ferramenta de pós-processamento utilizada foi o *ParaFoam*. Na Figura 4.4 apresenta-se a trajetória das partículas dentro do distribuidor, sendo a) a simulação com partículas de 20µm e a b) com as partículas de 80 µm. Nota-se que o número relativo de partículas na parte superior do distribuidor é maior para partículas de 80µm de diâmetro.

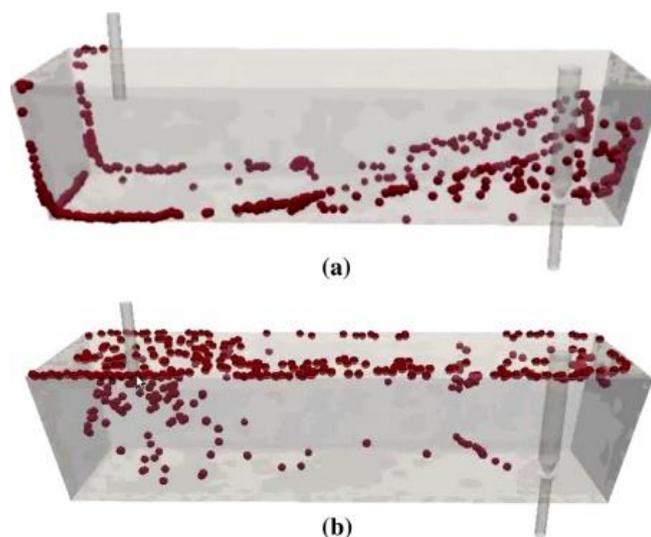


Figura 4.4 – a) Trajetória de partículas de tamanho a) 20µm e b) 80 µm em um distribuidor de lingotamento contínuo obtidas em simulação com o OpenFOAM. Raghavendra *et al.*(2013).

Para analisar quantitativamente o comportamento das partículas no distribuidor, definiu-se um parâmetro denominado eficiência de separação, dado pela fórmula:

$$\beta = \frac{N_e - N_s}{N_e}$$

Sendo  $N_e$  o número de partículas injetadas e  $N_s$  o número de partículas que se moveram para a saída. A eficiência de separação é um parâmetro de extrema importância na análise dos movimentos de inclusão dentro do distribuidor. A Figura 4.5 mostra a comparação da simulação numérica do OpenFOAM® com os resultados experimentais. Nota-se que os resultados têm boa concordância, embora, um desvio com os resultados experimentais (dentro de 10–18%) possa ser encontrado. Tal desvio pode ser atribuído pela incorporação de algoritmos de solução e esquemas convectivos, mas uma maior resolução da malha pode proporcionar melhores resultados. Os autores ressaltam que nem sempre é possível reproduzir as condições experimentais exatas em simulações numéricas e que uma discrepância dessa magnitude é muito comum em tais estudos (RAGHAVENDRA *et al.*, 2013).

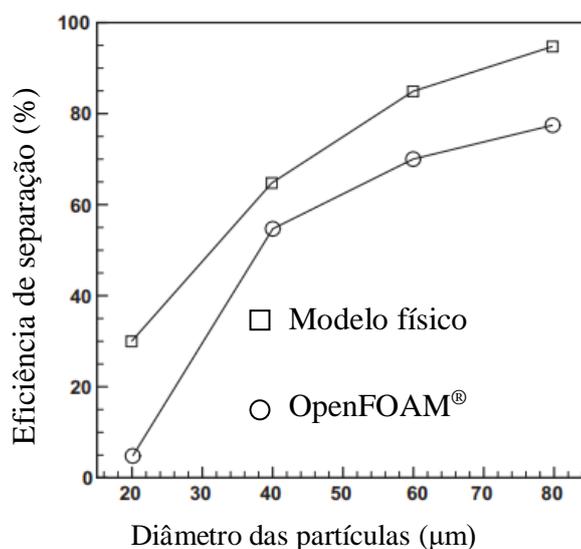


Figura 4.5 – Comparação da eficiência de separação entre o OpenFOAM® e o modelo físico. Adaptado de Raghavendra *et al.*(2013).

Utilizando o *solver* pimpleFoam da versão 5.0 do OpenFOAM, Neumann *et al.* 2019 analisaram quatro tipos de filtros para dois métodos de remoção de inclusões no distribuidor, a filtração ativa (AF) e a limpeza reativa (RC). A Figura 4.6 compara a eficiência de remoção de partículas utilizando as duas técnicas para os quatro tipos de filtros. Nota-se que para a filtração ativa nenhum dos quatro casos (AF1 a AF4) apresentou uma capacidade de filtração significativa, sendo que a maior parte das partículas

permanece no distribuidor ou escapa sem ser filtrada. Por outro lado, para os casos de limpeza reativa (RC1 a RC4), a maior parte das partículas adere à superfície da escória devido ao efeito das bolhas de monóxido de carbono que elevam as partículas. Percebe-se também que o filtro 3 tem maior eficiência. O motivo de tal resultado é o fato de ser o filtro com maior volume, logo descarrega maior parte do carbono no aço.

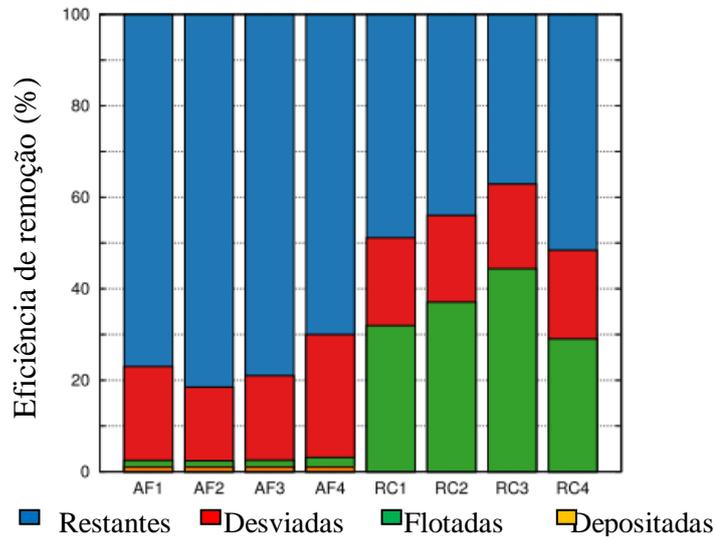


Figura 4.6 – Comparação da eficiência de separação entre filtração ativa e limpeza reativa usando quatro tipos de filtro. Adaptado de Neumann *et al.* (2019).

Neumann *et al.* 2019 afirmam que a velocidade do fluxo, o número inicial de inclusões e a geometria do filtro têm impactos perceptíveis na eficiência de limpeza reativa e que há a necessidade de se realizar novos estudos a fim de aprofundar o conhecimento sobre este mecanismo. Os autores ressaltam que outros modelos numéricos avançados devem ser desenvolvidos e que devem incluir um modelo de reação mais refinado, por exemplo, com base no método Calphad (*Calculation of Phase Diagram*). Além disso, devem ser feitos levantamentos paramétricos a fim de se obter uma melhor configuração para as geometrias do filtro e para o posicionamento do mesmo dentro do distribuidor. E com base nos resultados dos levantamentos paramétricos, devem ser conduzidos mais ensaios industriais para verificar a eficiência do método de limpeza reativa nas condições de operação da planta.

## 4.2 Alto-Forno

Para validar o modelo criado em OpenFOAM®, Baniyadi e Peters (2018) utilizaram o estudo experimental sobre mapa de fluxo de gases e líquidos em contra-corrente conduzido por Szekely e Kajiwara, que examinaram a má distribuição do padrão

de fluxos de gás e líquido na zona de gotejamento de um alto-forno projetando um fluxo de ar e água em contracorrente através de um leito compactado de esferas de vidro

Sobre o modelo CFD desenvolvido, a Figura 4.7 ilustra o perfil de velocidade do ferro líquido e da escória através do leito compactado de partículas. Percebe-se que o ferro líquido flui mais rápido do que a escória devido à sua maior densidade e menor viscosidade. É importante ressaltar que devido ao fato de ambas as fases coexistirem líquidas na zona de gotejamento, há interação entre elas (BANIASADI e PETERS, 2018).

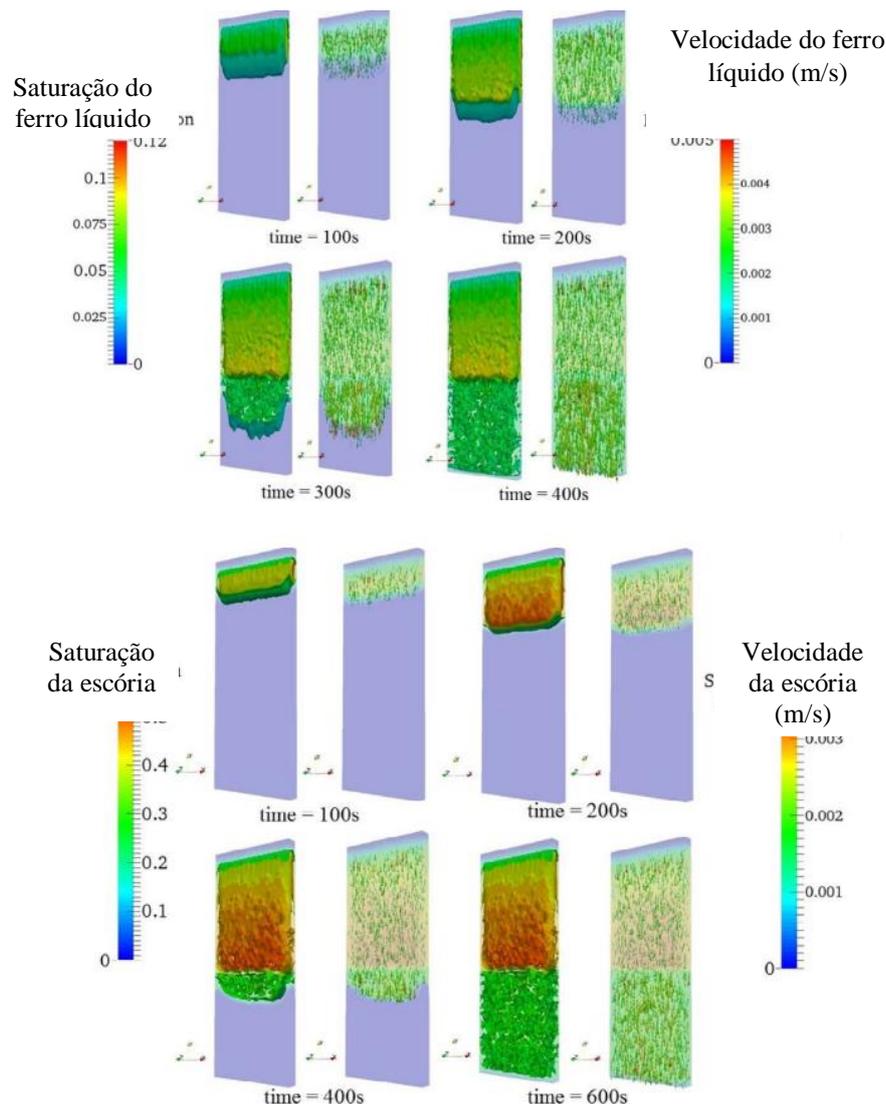


Figura 4.7 – Comparação dos perfis de velocidade do ferro líquido e da escória. Adaptado de Baniyadi e Peters (2018).

Baniyadi e Peters (2018) afirmam que os resultados obtidos pelo modelo CFD confirmam o efeito da estrutura de empacotamento na saturação do líquido e nas velocidades encontrado no experimento, ou seja, que as velocidades do líquido e do gás não são uniformes devido à influência da distribuição não uniforme da porosidade. Além

de confirmar que o Método de Elemento Discreto Estendido é confiável para entender o comportamento de fases fluidas na zona de gotejamento de um alto-forno, podendo ser uma excelente oportunidade para melhor compreender e controlar o processo no forno, onde é difícil realizar medições.

### 4.3 Lingotamento Contínuo

Vakhrushev *et al.* (2014) analisaram a formação de casca no processo de lingotamento de placas finas em molde tipo funil e constataram que existe uma grande influência das interações do fluxo com a zona pastosa porosa (região interdentrídica) na formação da pele. A evolução de formação da pele é mostrada na Figura 4.8, em relação a dois aspectos: a velocidade do aço, mostrada em (a), e em relação à distribuição da espessura da casca, mostrada em (b). Ao analisar a distribuição de fase sólida na face larga nota-se que há uma irregularidade na formação da pele, que ocorre devido, principalmente, ao padrão de fluxo específico.

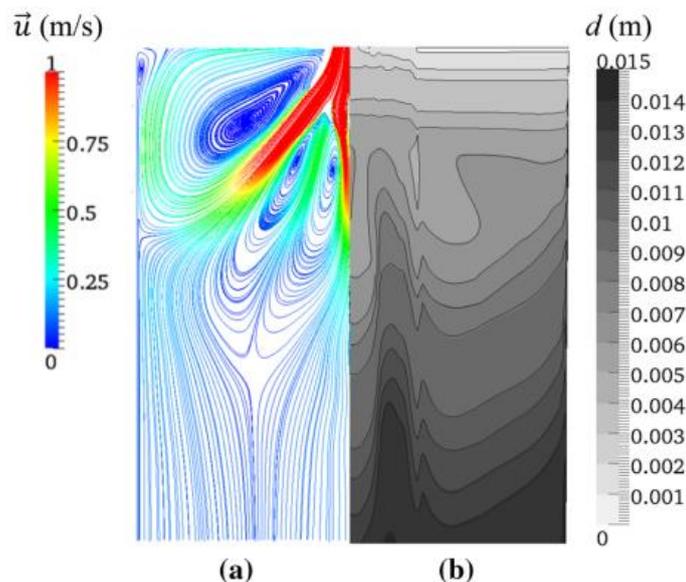


Figura 4.8 – Análise da influência do padrão de fluxo na formação da casca sólida em relação à: a) velocidade do aço e b) distribuição da espessura na face larga. Vakhrushev *et al.* (2014).

Mesmo sem um modelo físico para validação direta de resultados, validações indiretas foram realizadas usando a literatura e modelos experimentais. Comparando com o experimento de Camporredondo *et al.* há uma boa concordância qualitativa da espessura da prevista, indicando que o modelo atual fornece uma boa previsão da evolução da formação da casca. (VAKHRUSHEV *et al.*, 2014 *apud* CAMPORREDONDO *et al.*, 2004, p. 557).

Outra comparação foi feita com os experimentos realizados por Liu *et al.*, sendo que os modelos e configurações usados são semelhantes, assim como os resultados da espessura da casca (VAKHRUSHEV *et al.*, 2014 *apud* LIU *et al.*, 2011, p. 398).

Vakhrushev *et al.* (2014) destacam que apesar da concordância de resultados, o custo de cálculo do modelo 3D ainda é muito alto, demandando duas semanas para o processamento. Os autores ressaltam que o alto custo não é devido ao uso do OpenFOAM<sup>®</sup>, pois o mesmo modelo foi simulado utilizando o ANSYS-Fluent, chegando-se à mesma conclusão. Portanto, este modelo não é recomendado para a solução de problemas de processos industriais, mas pode ser utilizado em estudos laboratoriais para fins de otimização de parâmetros e para aprofundar a compreensão do processo.

Para validar o modelo desenvolvido no OpenFOAM<sup>®</sup>, Lee *et al.* (2021) utilizaram o método de detecção com base nas características de vibração para analisar o entupimento da válvula submersa. Para isso, o vibrômetro de sensoriamento RSV 150 foi escolhido para realizar medição do deslocamento oscilante e da frequência e constatou-se que há uma boa concordância entre as frequências medidas e as previstas pela simulação, com erros inferiores a 2% para os casos  $P_{ref}$ , E1, E2 e E3. Para o caso sem entupimento ( $P_{ref}$ ), a frequência medida foi 23,43Hz e a prevista 22,98Hz, com um erro relativo de 1,9%, enquanto que para os casos E1, E2 e E3 as frequências medidas foram 21,90, 21,8 e 22,09Hz com erros relativos de 0,6%, 1,0% e 0,3%, respectivamente.

Outro ponto observado por Lee *et al.* (2021) após análise da tensão de cisalhamento para os quatro casos, foi a indicação da tensão de cisalhamento máxima na saída da válvula submersa, com tendência de aumento com o avanço do entupimento. Na Figura 4.9 (a) é possível observar a tensão equivalente máxima na região inferior do bico, em consequência da maior pressão e velocidade do fluido, devido a obstrução parcial da saída, obrigando o fluido a mudar bruscamente sua direção. A Figura 4.9 (b) ilustra a distribuição espacial da magnitude do deslocamento do fluxo na válvula, atingindo seu máximo na parte inferior. Devido aos bons resultados encontrados, os autores afirmaram que mais simulações FSI em grande escala devem ser realizadas utilizando softwares livres, como o OpenFOAM<sup>®</sup>, aproveitando os recursos de computação aprimorados.

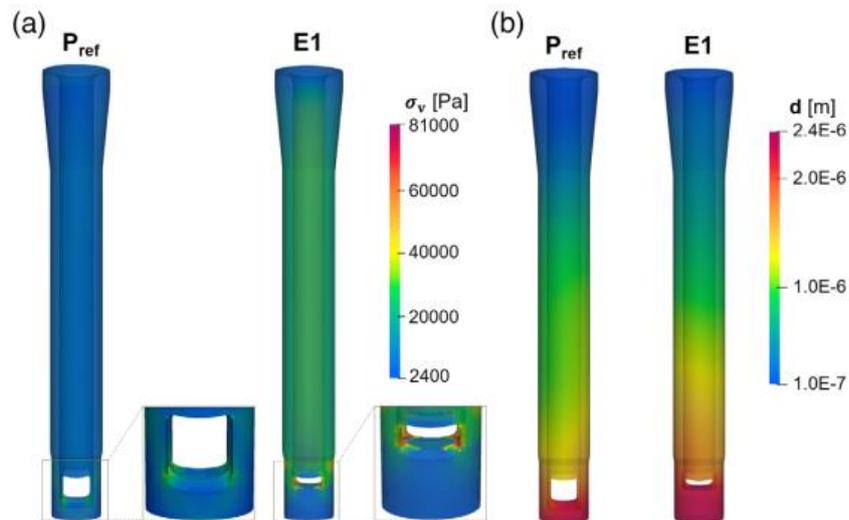


Figura 4.9 – Distribuição da a) tensão equivalente e b) magnitude do deslocamento para os casos  $P_{ref}$  e E1. Lee *et al.* (2021).

#### 4.4 Alumínio

Yamamoto *et al.* (2019) conduziram experimentos em um modelo físico com água a fim de validar os resultados da simulação computacional. Os autores descobriram que a amplitude de oscilação da superfície livre torna-se maior com o aumento da velocidade de rotação do rotor e sabe-se que no processo real de tratamento de alumínio líquido, uma grande amplitude de oscilações da superfície livre pode resultar no arraste de inclusões de óxido e a formação de filme de óxido. Portanto, as oscilações da superfície livre devem ser eliminadas ou, pelo menos, controladas.

As formas da superfície livre obtidas em (a) 300 rpm e (b) 400 rpm são mostradas na Figura 4.10. Nota-se que a amplitude e a localização da superfície livre obtidas na simulação estão de acordo com as experimentais e em ambas, as oscilações resultam em respingos de líquido. Portanto, pode-se considerar que a simulação numérica fornece previsões bastante próximas do movimento da superfície livre (YAMAMOTO *et al.*, 2019).

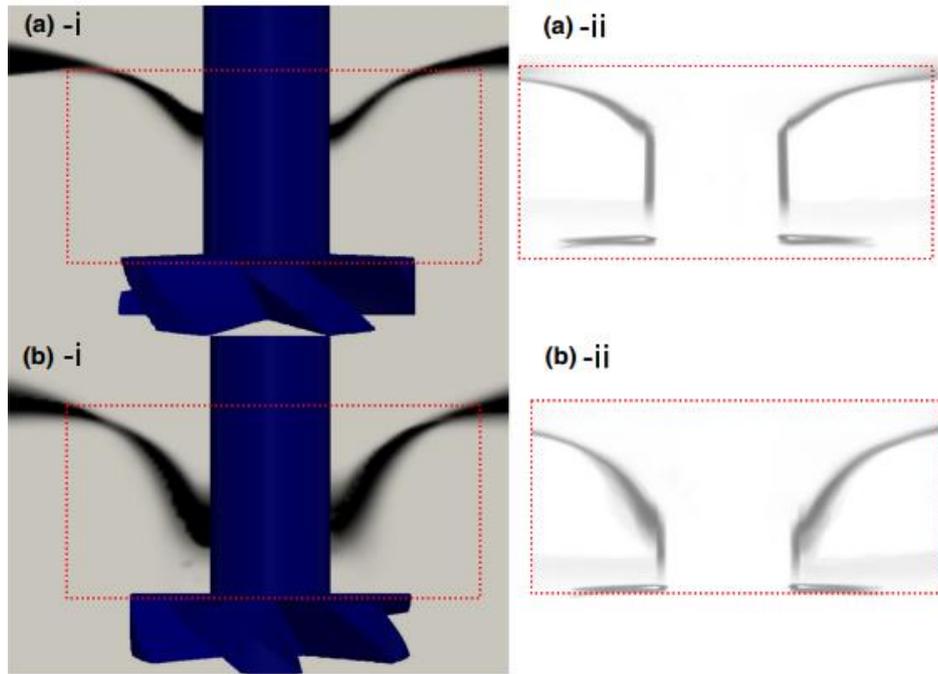


Figura 4.10 – Formas de superfície livre obtidas (i) numericamente e (ii) experimentalmente no caso de (a) 300 rpm e (b) velocidade de rotação de 400 rpm. Yamamoto *et al.* (2019).

## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho analisou o uso do software de código livre OpenFOAM<sup>®</sup> na resolução de alguns problemas metalúrgicos e verificou para quais seu uso é recomendado. Os problemas analisados foram a avaliação do potencial das ferramentas CFD para o desenvolvimento de processos metalúrgicos tomando como exemplo: a análise de fluxo e turbulência de um distribuidor, o estudo do comportamento de inclusões não metálicas no distribuidor, a avaliação da eficiência de dois métodos para remoção de inclusões, a compreensão da distribuição de fluxos na zona de gotejamento do alto-forno, a verificação da formação de casca no processo de lingotamento de placas finas, a análise do entupimento da válvula submersa durante o lingotamento contínuo e a avaliação da formação de vórtice durante a agitação em um processo de fabricação de alumínio.

Após análise dos resultados obtidos, chegou-se a conclusão que para a validação do comportamento de inclusões não metálicas no distribuidor, para a compreensão da distribuição de fluxos na zona de gotejamento do alto-forno, para a análise do entupimento da válvula submersa no lingotamento contínuo e para o estudo do processo de tratamento de alumínio na verificação da formação de vórtice, a simulação computacional no OpenFOAM<sup>®</sup> fornece previsões que têm boa concordância com resultados obtidos por modelos físicos e processos reais. Porém, com relação ao trabalho de Vakhrushev *et al.* (2016) sobre o movimento de inclusões em um distribuidor, recomenda-se o uso do OpenFOAM<sup>®</sup> somente para avaliação de modo qualitativo, com a obtenção de bons resultados.

Em contrapartida, para os demais problemas, o software não foi recomendado. Para a análise das duas estratégias de remoção de inclusões (filtragem ativa e limpeza reativa) em um distribuidor foi indicado o desenvolvimento de novos modelos numéricos mais avançados, com um modelo de reação mais refinado. Sobre a formação de casca no processo de lingotamento de placas finas em molde tipo funil, apesar da concordância de resultados, o tempo de processamento do modelo 3D ainda é muito alto, apresentando limitações para a solução de problemas de processos industriais.

Portanto, apesar de algumas limitações, o OpenFOAM<sup>®</sup> mostra-se como uma boa alternativa gratuita para simulações multifísicas de problemas metalúrgicos, sendo capaz

de fornecer resultados compatíveis com modelos físicos (experimentais) e simulações obtidas em softwares comerciais.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BANIASADI, M.; PETERS, B. Preliminary investigation on the capability of eXtended Discrete Element Method for treating the dripping cone of a Blast Furnace. **ISIJ International**, v. 58, n. 1, p. 25-34, 2018.

CAMPORREDONDO, J.E.; ACOSTA, F.A.; CASTILLEJOS, A.H.; GUTIÉRREZ, E.P.; DE LA PENHA, R. Analysis of thin-slab casting by the compact-strip process: Part II. Effect of operating and design parameters on solidification and bulging. **Metallurgical and Materials Transactions B**, v. 35, p. 561-573, 2004.

FAVERO, J.L. **Simulação de escoamentos viscoelásticos: desenvolvimento de uma metodologia de análise utilizando o software OpenFOAM e equações constitutivas diferenciais**. 2009. 127f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Escola de Engenharia, Universidade Estadual do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2009.

FERNANDES, T.F.D.D.; MOREIRA, N.L. Uma interface de controle para a Fluidodinâmica Computacional. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 41, n. 4, p. 01-11, 2019.

FIATES, J. **Desenvolvimento de uma metodologia para simulação de dispersão de gás inflamável por meio de CFD utilizando OpenFOAM**. 2015. 83f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Química) - Faculdade de Engenharia Química, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2015.

JÚNIOR, L.H. **Simulações numéricas de escoamentos viscoelásticos utilizando OpenFOAM®**. 2021. 96f. Dissertação (Mestrado em Matemática Aplicada e Computacional) - Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente, 2021.

LEE, W.; KIM, J. G.; JUNG, J.; HUH, K. Prediction of Nozzle Clogging through Fluid–Structure Interaction in the Continuous Steel Casting Process. **Steel Research International**, v. 92, n. 4, p. 549-559, 2021.

LIU, H.; YANG, C.; ZHANG, H.; ZHAI, Q.; GAN, Y. Numerical Simulation of Fluid Flow and Thermal Characteristics of Thin Slab in the Funnel-Type Molds of Two Casters. **ISIJ International**, v. 51, n. 3, p. 392-401, 2010.

LÓPEZ, D.P.P. **Simulação computacional de CFD de um pequeno trocador de calor de casco e turbo**. 2017. 83f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia de Energias) - Instituto Latino-americano de Tecnologia, Infraestrutura e Território, Universidade Federal da Integração Latino-americana, Foz do Iguaçu, 2017.

NASCIF, G.N.A.; ESCALEIRA, P.A.G. Análise fluidodinâmica computacional para otimização de um veículo Baja SAE. **Multidisciplinary Scientific Journal Núcleo do Conhecimento**, v. 15, n. 6, p. 33-57, 2021.

NEUMANN, S.; ASAD, A.; KASPER, T.; SCHWARZE, R. Numerical simulation of metal melt flow in a OneStrand tundish regarding active filtration and reactive cleaning. **The Minerals, Metals & Materials Society and ASM International**, v. 50, p. 2334-2342, 2019.

ODENTHAL, H.J.; JAVUREK, M.; KIRSCHEN, M. CFD Benchmark for a Single Strand Tundish (Part I). **Steel Reserch Internacional**, v. 80, n. 4, p. 264-274, 2010.

ODENTHAL, H.J.; JAVUREK, M.; KIRSCHEN, M.; VOGL, N. CFD Benchmark for a Single Strand Tundish (Part II). **Steel Reserch Internacional**, v. 81, n. 7, p. 529-541, 2010.

OPENFOAM. The OpenFOAM Foundation, 2021. Disponível em: <https://openfoam.org/>. Acesso em 11 jun. 2021.

PARAVIEW. ParaView, 2021. Disponível em: <https://www.paraview.org/>. Acesso em 22 jun. 2021.

RAGHAVENDRA, K.; SARKAR, S.; AJMANI, S.K.; DENYS, M.B.; SINGH, M.K.; Mathematical modelling of single and multi-strand tundish for inclusion analysis. **Elsevier Inc.**, v. 37, n. 9, p. 6285-6300, 2013.

SILVA, L.F.LR. **Desenvolvimento de metodologias para simulação de escoamentos polidispersos usando código livre**. 2008. 243f. Tese (Doutorado em Engenharia Química)

– Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2008.

SILVA, P.J.A.; FREIRE, E.R.C.G. Simulação computacional do escoamento em degrau por volumes finitos utilizando OpenFOAM. **Revista de Matemática de Ouro Preto**, v. 1, n. 1, p. 131-150, 2020.

VAKHRUSHEV, A.; WU, M.; LUDWIG, A.; TANG, Y.; HACKL, G.; NITZL, G. Numerical investigation of shell formation in thin slab casting of funnel-type mold. **The Minerals, Metals & Materials Society and ASM International**, v. 45, p.1024-1037, 2014.

VAKHRUSHEV, A.; WU, M.; LUDWIG, A.; TANG, Y.; HACKL, G.; NITZL, G.; WINCOR, R. A water experiment benchmark to evaluate numerical models for the motion of particles in continuous casting tundish. **Steel Research International**, v. 88, n. 1, 2017.

VENTURIN, V.S. **Simulação computacional de bio-escoamentos utilizando o OpenFOAM**. 2014. 99f. Trabalho de Conclusão de Curso. Bacharelado em Engenharia Mecânica - Centro Tecnológico, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2014.

VERSTEEG, H.K.; MALALASEKERA, W. **An Introduction to Computational Fluid Dynamics: The finite volume method**. 2. ed. England: Pearson Education Limited, 2007.517p.

YAMAMOTO, T.; KATO, W; KOMAROV, S. V.; ISHIWATA, Y. Investigation on the surface vortex formation during mechanical stirring with an axial-flow impeller used in an aluminum process. **The Minerals, Metals & Materials Society and ASM International**, v. 45, p.2547-2556, 2019.