



# SECAGEM DE MINÉRIO DE FERRO EM VAGÕES E PILHA: EXPERIMENTOS E SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL

Maciel da Costa Furtado

Tese de Doutorado apresentado ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Naturais da Amazônia, ITEC, da Universidade Federal do Pará, como parte do requisito necessário à obtenção do título de Doutor em Engenharia de Recursos Naturais.

Orientador: Prof. Dr. André Luiz Amarante Mesquita

Belém  
Maio de 2023

# SECAGEM DE MINÉRIO DE FERRO EM VAGÕES E PILHA: EXPERIMENTOS E SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL

Maciel da Costa Furtado

TESE SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE RECURSOS NATURAIS DA AMAZÔNIA (PRODERNA/ITEC) DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIO PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE DOUTOR EM ENGENHARIA DE RECURSOS NATURAIS.

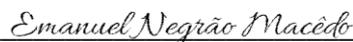
Aprovado por:



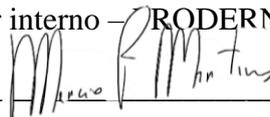
Prof. André Luiz Amarante Mesquita, Dr.  
(Orientador – PRODERNA/UFPA)



Prof. Lênio Jose Guerreiro de Faria, Dr.  
(Examinador interno – PRODERNA/UFPA)



Prof. Emanuel Negrão Macêdo, Dr.  
(Examinador interno – PRODERNA/UFPA)



Prof. Marcio Ferreira Martins, Dr.  
(Examinador externo à UFPA – PPGEM/UFES)



Prof. Rodrigo Béttega, Dr.  
(Examinador externo à UFPA – PPGEQ/UFSCar)



Prof. Arlindo Modesto Antunes, Dr.  
(Examinador externo, convidado – UFRA/Campus Tomé-Açu)

BELÉM, PA - BRASIL

MAIO DE 2023

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) de acordo com ISBD**  
**Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal do Pará**  
**Gerada automaticamente pelo módulo Ficat, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)**

---

F992s Furtado, Maciel da Costa.  
Secagem de Minério de Ferro em Vagões e Pilha: Experimentos  
e Simulação Computacional / Maciel da Costa Furtado. — 2023.  
XVIII, 112 f. : il. color.

Orientador(a): Prof. Dr. André Mesquita  
Tese (Doutorado) - Universidade Federal do Pará, Instituto de  
Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de  
Recursos Naturais na Amazônia, Belém, 2023.

1. CFD. 2. abordagem multifásica. 3. modelo matemático.  
4. meio poroso. 5. fino de minério. I. Título.

CDD 660.2

---

## **AGRADECIMENTOS**

Primeiramente a Deus por ter possibilitado a minha chegada até aqui, com muita garra e determinação;

À minha família pelo apoio e incentivo durante todo esse processo de formação. Em especial aos meus pais, Juscemir Garcia Furtado e Maria do Carmo da Costa Furtado pelo apoio moral e emocional. A minha esposa Juliane Furtado que sempre esteve ao meu lado dando todo apoio necessário;

Ao meu orientador Prof. Dr. André Luiz Amarante Mesquita, pela amizade construída durante esse período, por todo o apoio, paciência e valiosa orientação;

Agradeço à grupo de pesquisa FLUIDPAR da UFPA campus universitário de Tucuruí pela estrutura disponibilizada e pelo suporte pessoal e técnico necessário ao desenvolvimento desse trabalho no decorrer de todo esses anos;

Agradeço a empresa mineradora VALE por apoiar esse trabalho e toda as pesquisa envolvida.

Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Naturais da Amazônia - PRODERNA da UFPA pela oportunidade e por oferecer condições para o desenvolvimento desse trabalho. Agradecer também a Pró-Reitoria de Pesquisa e Pós-Graduação – PROPESP da UFPA pelo apoio dado através dos editais para o custeio que esse trabalho demandou.

Resumo da Tese apresentada ao PRODERNA/UFPA como parte dos requisitos necessários para obtenção de grau de Doutor em Engenharia de Recursos Naturais. (Dr. Eng.).

## SECAGEM DE MINÉRIO DE FERRO EM VAGÕES E PILHA: EXPERIMENTOS E SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL

Maciel da Costa Furtado

Maio/2023

Orientador: Prof. Dr. André Luiz Amarante Mesquita

Área de Concentração: Simulação e Processo

A emissão de poeira decorrente do manuseio e transporte de materiais particulados representa um empecilho de produção e processo para as indústrias mineradoras. Estas emissões são mais acentuadas quando tais materiais se encontram pouco úmidos, pois a umidade reduzida torna as partículas mais leves e mais susceptíveis à dispersão. Diante dessas questões, este trabalho propõe uma metodologia para o estudo teórico e experimental do processo de secagem que ocorre em finos de minério de ferro quando os mesmos são transportados em vagão ou armazenados em pilhas a céu aberto. O objetivo é esclarecer o efeito da umidade superficial no processo de arraste eólico de minérios de ferro em superfícies úmidas, como ocorre no transporte de minério de ferro em vagões abertos e nos pátios de estocagem de pilha de minério. Neste estudo, foram realizados testes em túnel de vento utilizando um modelo de vagão com finos de minério de ferro e um modelo de pilha de minério de ferro. Um estudo de secagem com leito de minério de ferro a baixa velocidade é também apresentado usando um túnel de vento de secagem. Um modelo matemático em CFD foi desenvolvido e os resultados concordaram bem com os resultados experimentais. O modelo matemático permitiu a avaliação do comportamento da secagem para diferentes valores de velocidade do fluxo de ar. Através da metodologia de estudo estabelecida foi possível mapear a distribuição a umidade interna do leito que ajuda a compreender a dinâmica do mecanismo de secagem e como isso pode influenciar na emissão de partículas na superfície umidade desses materiais.

Palavras-chaves: CFD, abordagem multifásica, modelo matemático, meio poroso, fino de minério, umidade.

Abstract of Thesis presented to PRODERNA/UFPA as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Natural Resources Engineering (D.Eng.)

DRYING IRON ORE IN WAGON AND PILE: EXPERIMENTS AND  
COMPUTATIONAL SIMULATION

Maciel da Costa Furtado

May/2021

Advisor: André Luiz Amarante Mesquita

Research Area: Simulation and Process

Dust emissions resulting from handling and transporting particulate materials are a problem in the mining industry. These emissions are more accentuated when the materials are not very humid because the reduced humidity makes the particles lighter and more susceptible to dispersion. Faced with these issues, this study proposes a methodology for the theoretical and experimental study of the drying process that occurs when iron ore fines are transported in wagons or stored in piles in the open. The objective is to clarify the effect of surface moisture in the process of dragging wind iron ores on moist surfaces, such as those found when transporting iron ore in open wagons and in ore pile storage yards. In this study, wind tunnel tests were carried out using a wagon model with fine iron ore and an iron ore pile model. A fixed bed drying study at low velocity is also presented using a wind tunnel dryer. A numerical CFD model was developed, and the results agreed well with the experimental results. The numerical model allowed the evaluation of the drying behavior for different values of air flow velocity. Through the established study methodology, it was possible to map the distribution of internal moisture in the bed, which helps to understand the dynamics of the drying mechanism and how this can influence the emission of particles on the surface moisture of these materials.

Keywords: CFD, multiphase approach, mathematical model, porous medium, ore fine, moisture.

# SUMÁRIO

<b>CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
1.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS.....	1
1.2. JUSTIFICATIVAS .....	3
1.3. OBJETIVOS .....	5
<b>1.3.1. Objetivo Geral .....</b>	<b>5</b>
<b>1.3.2. Objetivos Específicos.....</b>	<b>5</b>
1.4. CONTRIBUIÇÕES DA TESE .....	6
1.5. ESTRUTURA E ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO.....	6
<b>CAPÍTULO 2 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>7</b>
2.1. ASPECTOS GERAIS.....	7
2.2. FENOMENOLOGIA.....	8
<b>2.2.1. Descrição .....</b>	<b>8</b>
<b>2.2.2. Secagem em Meio Particulado.....</b>	<b>9</b>
2.3. MODELOS DE SECAGEM .....	15
<b>2.3.1. Modelos de Secagem em Leitos Porosos.....</b>	<b>15</b>
<b>2.3.2. Modelos Numéricos Multifásicos .....</b>	<b>20</b>
2.4. INCERTEZA EXPERIMENTAL .....	24
<b>CAPÍTULO 3 – FUNDAMENTOS DO MODELO MATEMÁTICO.....</b>	<b>30</b>
3.1. EQUAÇÕES GOVERNANTES .....	30
3.2. EVAPORAÇÃO INTERNA NO MEIO POROSO .....	37
3.3. CONDIÇÕES DE CONTORNO.....	38
3.4. CONDIÇÕES DE ACOPLAMENTO NA INTERFACE “s” .....	40
<b>CAPÍTULO 4 – MODELOS CFD E EXPERIMENTOS DE VALIDAÇÃO .....</b>	<b>41</b>
4.1. CASO 1 – ESCOAMENTO TRANSIENTE SOBRE MODELO DE VAGÃO.....	42
<b>4.1.1. Descrição .....</b>	<b>42</b>
<b>4.1.2. Material e Preparação da Amostra Úmida .....</b>	<b>43</b>
<b>4.1.3. Detalhamento do Experimento.....</b>	<b>46</b>

<b>4.1.4. Parâmetros de Modelagem do Modelo .....</b>	<b>48</b>
<b>4.1.5. Detalhamento da Solução Numérica.....</b>	<b>50</b>
<b>4.2. CASO 2 – ESTRATIFICAÇÃO DA UMIDADE EM MODELO DE VAGÃO ....</b>	<b>51</b>
<b>4.2.1. Descrição .....</b>	<b>51</b>
<b>4.2.2. Material e Preparação da Amostra Úmida .....</b>	<b>51</b>
<b>4.2.3. Detalhamento do Experimento.....</b>	<b>52</b>
<b>4.2.4. Parâmetros de Modelagem do Modelo .....</b>	<b>52</b>
<b>4.2.5. Detalhamento da Solução Numérica.....</b>	<b>54</b>
<b>4.3. CASO 3 – ESCOAMENTO TRANSIENTE SOBRE MODELO DE PILHA .....</b>	<b>54</b>
<b>4.3.1. Descrição .....</b>	<b>54</b>
<b>4.3.2. Material e Preparação da Amostra Úmida .....</b>	<b>55</b>
<b>4.3.3. Detalhamento do Experimento.....</b>	<b>56</b>
<b>4.3.4. Parâmetros de Modelagem do Modelo .....</b>	<b>58</b>
<b>4.3.5. Detalhamento da Solução Numérica.....</b>	<b>60</b>
<b>4.4. CASO 4 – ESCOAMENTO TRANSIENTE SOBRE LEITO DE MINÉRIO.....</b>	<b>62</b>
<b>4.4.1. Descrição .....</b>	<b>62</b>
<b>4.4.2. Material e Preparação da Amostra Úmida .....</b>	<b>62</b>
<b>4.4.3. Detalhamento do Experimento.....</b>	<b>63</b>
<b>4.4.4. Parâmetros de Modelagem do Modelo .....</b>	<b>63</b>
<b>4.4.5. Detalhamento da Solução Numérica.....</b>	<b>64</b>
<b>CAPÍTULO 5 – RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>	<b>66</b>
<b>5.1. CASO 1 – ESCOAMENTO TRANSIENTE SOBRE O MODELO DE VAGÃO .</b>	<b>66</b>
<b>5.1.1. Apresentação dos Resultados .....</b>	<b>66</b>
<b>5.1.2. Discussão .....</b>	<b>69</b>
<b>5.2. CASO 2 – ESTRATIFICAÇÃO DA UMIDADE EM MODELO DE VAGÃO ....</b>	<b>71</b>
<b>5.2.1. Apresentação dos Resultados .....</b>	<b>71</b>
<b>5.2.2. Discussão .....</b>	<b>77</b>

5.3. CASO 3 – ESCOAMENTO TRANSIENTE SOBRE MODELO DE PILHA .....	80
<b>5.3.1. Apresentação dos Resultados .....</b>	<b>80</b>
<b>5.3.2. Discussão .....</b>	<b>91</b>
5.4. CASO 4 – ESCOAMENTO TRANSIENTE SOBRE LEITO DE MINÉRIO.....	95
<b>5.4.1. Apresentação dos Resultados .....</b>	<b>95</b>
<b>5.4.2. Discussão .....</b>	<b>96</b>
<b>CAPITULO 6 – CONCLUSÃO .....</b>	<b>99</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>101</b>
<b>APÊNDICE – CONFIGURAÇÃO DO MODELO MULTIFÁSICO DE SECAGEM NO FLUENT .....</b>	<b>109</b>

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Emissão de poeira em operações com minério: (a) carregamento de vagão (BARROS, 2008), (b) processo de erosão de uma pilha de minério (LOREDO-SOUZA et. al., 2006).....	4
Figura 2 - Mecanismo de movimentação de partícula devido a ação do vento: (a) suspensão, (b) salto e (c) rolamento (NASCIMENTO, 2014). .....	4
Figura 3 - Visualização esquemática dos fenômenos envolvidos para o estudo da secagem em meios porosos. ....	9
Figura 4 - Diferentes maneiras pelas quais a água pode ser encontrada em um leito de partículas (SANOS JUNIOR, 2018).....	11
Figura 5 - Curvas de secagem típica: (a) cinética de secagem e (b) taxa de secagem. ..	12
Figura 6 - Ilustração dos intervalos de confiança para uma reta de regressão e para interpolação linear (CABRAL, 2004). ....	26
Figura 7 - Método gráfico para determinação da incerteza associada no ajuste de retas. ....	26
Figura 8 - Geometria e coordenadas do sistema para estudo da secagem em vagão e leito fixo.....	31
Figura 9 - Geometria e coordenadas do sistema para o estudo da secagem em pilha.....	31
Figura 10 - Túnel de vento desenvolvido por SANTOS JUNIOR (2015) para testes experimentais de secagem: (a) termo-higrômetro; (b) tubo de pitot, (c) modelo de vagão; (d) sistema de suporte do vagão ou pilha; (e) ventilador centrífugo; (f) inversor de frequência. ....	41
Figura 11 - Túnel de vento secador desenvolvido por SILVA (2021) para os testes experimentais de secagem: (a) sensor de temperatura; (b) sensor de umidade relativa do ar; (c) tubo de pitot; (d) sistema de pesagem + leito de secagem; (e) seção de estabilização do escoamento; (f) seção de aquecimento com resistências elétricas; (g) ventilador centrífugo; (h) seção de desumidificação do ar de entrada no túnel e (i) inversor de frequência. ....	42
Figura 12 - Disposição do modelo de vagão no interior do túnel de vento.....	43
Figura 13 - Distribuição granulométrica das partículas de minério de ferro tipo pellet feed. ....	44

Figura 14 - Curva de massa específica aparente do minério de ferro (SANTOS JUNIOR, 2018).....	44
Figura 15 - Preparação da amostra úmida com base na metodologia de SANTOS JUNIOR (2018). .....	46
Figura 16 - Sensor de umidade do material instalado no vagão em acrílico. ....	47
Figura 17 - Curva de calibração para o sensor de umidade.....	47
Figura 18 -Malha de volume finito para os domínios de fluxo externo e meio poroso para o estudo em vagão e leito de minério: 1-região distante das medições do vagão com malha não estruturada mais grosseira; 2-região próxima à região do vagão com malha não estruturada mais refinada; Região 3-interfacial de meios porosos e fluidos com camadas de prisma. ....	50
Figura 19 - Metodologia para coleta de amostras de material para avaliação de umidade (SANTOS JUNIOR, 2018).....	52
Figura 20 - Disposição do modelo da pilha no interior do túnel de vento. ....	55
Figura 21 - Distribuição granulométrica das partículas de minério de ferro tipo sinter feed (SILVA, 2021).....	56
Figura 22 - Visão geral da metodologia utilizada para o estudo da secagem em pilha. .	57
Figura 23 - Identificação das regiões coletadas (vista superior da pilha) (FUTADO et al., 2022).....	58
Figura 24 -Malha de volume finito para os domínios de fluxo externo e meio poroso para o estudo da pilha: 1-região distante das medições da pilha com malha não estruturada; 2-região próxima a pilha com malha não estruturada mais refinada; Região 3-interface do meio poroso e fluido com camadas de prisma.....	61
Figura 25 - Disposição do leito de minério de ferro no túnel de vento secador (SILVA, 2021).....	62
Figura 26 - Cinética de secagem para o estudo em vagão para velocidade de 50 km/h – Caso 1. ....	67
Figura 27 - Taxa de secagem em base seca em função do tempo para o experimental com ajuste de Page e simulação – Caso 1. ....	67
Figura 28 - Superfície do minério de ferro ao final do ensaio para o Caso 1.....	68
Figura 29 - Perfil de taxa de secagem em base seca versus o teor de umidade para o experimental com ajuste de Page e a simulação – Caso 1.....	68

Figura 30 – Resultados da simulação para a fração mássica de vapor d’água avaliados ao longo da altura h das linhas de referência a montante (a) e a jusante (b) do escoamento sobre o vagão em função do tempo. ....	69
Figura 31 - Localização das linhas de referência para os resultados mostrados na Figura 30 para avaliação da fração mássica de vapor a montante e a jusante do vagão. ....	69
Figura 32 - Umidade média por camada ao final dos testes para um tempo de secagem de 1,50 horas para o vagão submetido a um escoamento do ar de 40 e 70 km/h. ....	71
Figura 33 - Erro relativo médio por camada para as velocidades de 40 e 70 km/h. ....	72
Figura 34 - Gradiente médio de umidade por camada em função de sua profundidade para um teor de umidade inicial de referência de 8%. ....	72
Figura 35 - Umidade do material no interior do vagão ao final do ensaio para um teor de umidade de referência inicial de 8%. ....	73
Figura 36 - Contorno de velocidade do ar escoando sobre o vagão para a velocidade de entrada de 40 km/h. ....	73
Figura 37 - Contorno da intensidade turbulenta sobre a superfície do vagão. ....	74
Figura 38 - Perfil de temperatura versus tempo para a superfície do minério de ferro medida a partir do bordo de ataque do vagão a 40 km/h para um tempo de secagem de 1,50 horas. ....	74
Figura 39 - Perfil de temperatura versus tempo para a superfície do minério de ferro medida a partir do bordo de ataque do vagão a 70 km/h para um tempo de secagem de 1,50 horas. ....	75
Figura 40 - Perfil de temperatura do minério de ferro versus a profundidade do leito para as distâncias de 86, 172, 215 e 344 mm medidos a partir do bordo de ataque do vagão para 40 km/h para um tempo de secagem de 1,50 horas. ....	75
Figura 41 - Perfil de temperatura do minério de ferro versus a profundidade do leito para as distâncias de 86, 172, 215 e 344 mm medidos a partir do bordo de ataque do vagão para 70 km/h para um tempo de secagem de 1,50 horas. ....	76
Figura 42 - Contorno de temperatura no leito de minério de ferro para a Simulação 2 – 70 km/h. ....	76
Figura 43 - Contorno de temperatura da parede do vagão para Simulação 2 – 70 km/h. ....	77
Figura 44 - Localização das retas verticais usadas para avaliação dos perfis de velocidades do trabalho DUAN et al. (2021). ....	81

Figura 45 - Perfil de velocidade vertical avaliados a 25 mm a montante do bordo de ataque da pilha. ....	81
Figura 46 - Perfil de velocidade vertical avaliados acima do topo da pilha. ....	81
Figura 47 - Contorno de velocidade em torno do modelo de pilha: (a) dados experimentais do trabalho de DUAN et al. (2021), (b) dados da simulação numérica de DUAN et al. (2021) e (c) dados da simulação numérica do presente trabalho. ....	82
Figura 48 - Análise de convergência de malha para o perfil vertical de velocidade medido a 25 mm a montagem do bordo de ataque da pilha do trabalho de DUAN et al. (2021). ....	82
Figura 49 - Cinética de secagem para umidade média global da camada 1 da pilha. ....	83
Figura 50 - Cinética de secagem para umidade média global da camada 2 da pilha. ....	83
Figura 51 - Cinética de secagem para umidade média global da camada 3 da pilha. ....	84
Figura 52 - Erro médio relativo por camada da pilha. ....	84
Figura 53 - Cinética de secagem para camada 1 na região frontal da pilha. ....	85
Figura 54 - Cinética de secagem para a camada 1 na região central da pilha. ....	85
Figura 55 - Cinética de secagem para camada 1 no bordo de fuga da pilha. ....	86
Figura 56 - Erro médio relativo por região. ....	86
Figura 57 - Comparação da umidade avaliado na região frontal da pilha ao longo do tempo para os resultados experimental e simulado para camada 1. ....	88
Figura 58 - Comparação da umidade avaliado na no plano de simetria da pilha ao longo do tempo para os resultados experimental e simulado para a camada 1. ....	88
Figura 59 - Comparação da umidade avaliado na região do bordo de fuga da pilha ao longo do tempo para os resultados experimental e simulado para camada 1. ....	89
Figura 60 - Contorno de velocidade do escoamento ao redor da pilha. ....	90
Figura 61 - Resultados da simulação para a fração mássica de vapor d'água avaliados ao longo da altura h das linhas de referência a montante (a) e a jusante (b) do escoamento sobre a pilha como função do tempo. ....	90
Figura 62 - Localização da linhas de referência para o resultado mostrado nas Figura 61 para avaliação da fração mássica de vapor d'água a montante e a jusante da pilha. ....	91
Figura 63 - Cinética de secagem para o estudo em leito fixo para velocidade de 3,6 km/h – Caso 4. ....	95
Figura 64 - Taxa de secagem em base seca em função do tempo para o experimento e simulação – Caso 4. ....	96

Figura 65 - Perfil de taxa de secagem em base seca versos o teor de umidade para a  
simulação e experimento – Caso 4. .... 96

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Dados iniciais das propriedades termofísicas das fases envolvidas. ....	48
Tabela 2 - Propriedades do meio poroso de interesse para o minério de ferro pellet feed. .....	48
Tabela 3 - Condições iniciais para o domínio de fluxo externo – Caso 1. ....	49
Tabela 4 - Condições de contorno para o domínio de fluxo externo – Caso 1. ....	49
Tabela 5 - Condições iniciais para o conjunto vagão-minério de ferro – Caso 1. ....	49
Tabela 6 - Condições de contorno para o conjunto vagão-minério de ferro – Caso 1 ...	50
Tabela 7 - Detalhe da malha CFD usada na simulação em vagão. ....	50
Tabela 8 - Condições iniciais para o domínio de fluxo externo – Caso 2. ....	53
Tabela 9 - Condições de contorno para o domínio de fluxo externo – Caso 2. ....	53
Tabela 10 - Condições iniciais para o conjunto vagão-minério de ferro – Caso 2. ....	53
Tabela 11 - Condições de contorno para o conjunto vagão-minério de ferro – Caso 2.	54
Tabela 12 - Dados iniciais das propriedades termofísicas das fases envolvidas para o sínter feed. ....	58
Tabela 13 - Propriedades do meio poroso de interesse para o minério de ferro sínter feed. .....	59
Tabela 14 - Condições iniciais para o domínio de fluxo externo – Caso 3. ....	59
Tabela 15 - Condições de contorno para o domínio de fluxo externo – Caso 3. ....	59
Tabela 16 - Condições iniciais para a pilha – Caso 3. ....	60
Tabela 17 - Condições de contorno para a pilha – Caso 3. ....	60
Tabela 18 - Detalhe da malha CFD para validação do escoamento fluidodinâmico em torno da pilha. ....	61
Tabela 19 - Detalhe da malha CFD usada na simulação da secagem em pilha. ....	61
Tabela 20 - Condições iniciais para o domínio de fluxo externo – Caso 4. ....	64
Tabela 21 - Condições de contorno para o domínio de fluxo externo – Caso 4. ....	64
Tabela 22 - Condições iniciais para o leito de minério – Caso 4. ....	64
Tabela 23 - Condições de contorno para o leito de minério – Caso 4. ....	64
Tabela 24 - Teor médio de umidade para o estudo de convergência de malha em t = 3 horas como uma variável chave. ....	66
Tabela 25 - Teor médio de umidade para o estudo de convergência de malha em t = 1 hora como uma variável chave. ....	87

Tabela 26 - Erro relativo para os três tipos de malha analisados. .... 87

## LISTA DE SIMBOLOS

$\vec{V}$	vetor velocidade (m/s)
$\vec{v}$	vetor velocidade no meio poroso (m/s)
$\rho$	massa específica (kg/m <sup>3</sup> )
$p$	é a pressão estática (Pa)
$p_c$	pressão capilar (Pa)
$\bar{\tau}$	tensor de tensão de Reynolds
$\dot{m}$	termo fonte de transferência de massa entre as fases (kg/m <sup>3</sup> ·s), transferência de massa por convecção
$h$	entalpia específica (J/kg), calor latente (J/kg)
$k$	condutibilidade térmica (W/m·K)
$k_{eff}$	condutibilidade térmica de todas as fases (W/m·K)
$T$	temperatura (°C, K)
$A$	área (m <sup>2</sup> )
$A_i$	área específica (m <sup>-1</sup> )
$t$	tempo (s)
$Q$	termo fonte de troca de calor por convecção entre as fases (W/m <sup>3</sup> )
$\gamma$	fração mássica
$\mu$	viscosidade dinâmica (Pa·s)
$M_W$	peso molecular (kg/mol)
$\mathfrak{R}$	é a constante universal do gás ideal (m <sup>3</sup> ·Pa/mol·K)
$\alpha$	fração volumétrica
$\varepsilon$	porosidade do meio poroso
$\varepsilon_k$	erro aleatório
$c_p$	calor específica a pressão constante (J/kg·K)
$D_{v,m}$	coeficiente de difusão mássica de vapor de água na no ar úmido (m <sup>2</sup> /s)
$\phi_s$	termo fonte de transferência de calor devido a evaporação (W/m <sup>3</sup> )
$U$	umidade
$U^*$	umidade adimensional
$K$	permeabilidade absoluta (m <sup>2</sup> )
$K_{r,l}$ e $K_{r,g}$	são as permeabilidade relativa da fase líquida e gás
$d_p$	diâmetro da partícula (m), diâmetro da fase dispersa (m)

$S_f$	Saturação da fase, $f$
$n$	expoente de Corey
$\chi$	Fração molar
$\beta$	coeficiente para o tempo de relaxamento, erro fixo
$\lambda$	coeficiente de acomodação que contabiliza a evaporação da água
$H$	coeficiente de transferência de calor por convecção ( $\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}$ )
$\dot{q}_s$	fluxo de calor condução ( $\text{W}/\text{m}^2$ )
$Nu$	número de Nusselt
$Re$	número de Reynolds
$Pr$	número de Prandtl
$Sc$	número de Schimdt
$\phi$	umidade relativa (%)
$\delta_k$	erro total
$s_x$ e $s_y$	incerteza do declive da reta e da ordena
$s_{\bar{x}}$	desvio padrão dos valores da grandeza independente
$S_{y x}$	é o desvio padrão do ajuste de reta
$B$	limite de confiança para o erro fixo
$R$	função qualquer
$k$ e $n$	constantes empíricas do modelo de PAGE (1949)

### **Subscrito**

$g$	gás
$v$	vapor
$l$	líquido, água
$s$	sólido
$i$	componente da mistura
$crit$	crítico
$lg$	líquido-gás
$f$	fase $f$
$ref$	referência
$eff$	efetivo
$sat$	saturação
$w$	vagão

# CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO

## 1.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

A geração de poeira decorrente do transporte, manuseio e armazenamento de materiais particulados, particularmente finos de minério de ferro, são um problema significativo nas indústrias de mineração (LEÃO *et al.*, 2020). Isso ocorre porque a poluição do ar está se tornando um problema cada vez mais grave para a sociedade industrial, com agravamentos que vão desde a deterioração da qualidade do ar ambiente e da saúde humana (CHAULYA *et al.*, 2021) até a perda do próprio material e aumento dos custos diretos para a indústria (SUN *et al.*, 2019). Essas emissões são mais intensas quando os materiais estão levemente úmidos, pois a umidade reduzida torna as partículas mais leves e mais suscetíveis à dispersão (LIU *et al.*, 2020).

Compreender o mecanismo de secagem dessa classe de material pode fornecer informações úteis sobre as mudanças nas características das propriedades do material (HAN *et al.*, 2009) que levam à emissão de partículas devido ao arrasto do vento quando os materiais são transportados em vagões ou quando empilhados em pátios a céu abertos. O desenvolvimento de um modelo matemático consistente que possa descrever a transferência de calor e massa ao longo do processo de secagem é um ponto de partida necessário para a otimização dos processos de secagem por meio de simulações computacionais (KOWALSKI *et al.*, 2007). Portanto, o desenvolvimento de estudos teóricos e experimentais para prever o processo de secagem que ocorre nesses materiais é de fundamental importância para entender e possibilitar o desenvolvimento de modelos que possam prever a evolução da secagem e servir de base para o desenvolvimento de sistemas de controle de emissão de poeira.

Dentre as diversas ações implementadas pelas mineradoras para o controle das emissões de fino de material particulado, destaca-se o procedimento de aspersão de água. A adição de água na superfície do material aumenta a sua umidade, reduzindo as chances de que o particulado fino seja arrastado pela ação do vento e entre em suspensão (LIU *et al.*, 2020). Contudo, tal aspersão deve ser cuidadosamente controlada, pois, é desejado o mínimo de água e o máximo de minério, haja vista que o valor excessivo de água reduz o valor econômico do produto e limita as operações de embarque em navios, onde é necessário atender as regulamentações internacionais para o limite de umidade permitido (MOREIRA *et al.*, 2020). Diante disso, para que o processo de supressão de poeira por

meio do método de aspersão de água seja adequadamente utilizado e otimizado é essencial que o processo de secagem a partir das superfícies desses tipos de materiais, seja conhecido em detalhes. A partir do conhecimento e da previsão do comportamento da secagem desses materiais serão possíveis a mitigação de meios que possam reduzir a emissão da poeira desses materiais durante o transporte e manuseio.

Contudo, o fenômeno da secagem que ocorre em materiais particulados é complexo envolvendo processos simultâneos de transferência de calor, massa e momento. O processo de secagem pode ser descrito por um conjunto de equações governantes que são não lineares (KAHVECI, 2017). Muitos parâmetros que influenciam no processo são dependentes do arranjo da estrutura de partículas e são difíceis de medir e muitos variam para um mesmo tipo de material produzidos por diferentes processos (RAMACHANDRAN *et al.*, 2017). Diante disso, o processo de secagem é investigado por meio de técnicas numéricas e experimentais, pois permitem que o efeito de diferentes condições, internas e externas ao leito de minério que influenciam o comportamento da secagem desses materiais, sejam estudadas.

O estudo da modelagem de secagem pode ser dividido em três abordagens distintas: empírica, semiempírica e teórica (ERTEKIN e FIRAT, 2017, YI *et al.*, 2016). As abordagens empírica e semiempírica são amplamente utilizadas para modelagem de secagem de diversos materiais de diversas áreas da engenharia dado que relação entre o teor de umidade e o tempo de secagem é dado de forma direta, porém esses modelos não consideram os fenômenos físicos por trás do processo (NADHARI *et al.*, 2014). Na abordagem teórica o modelo matemático é baseado na solução das equações de transporte que envolvem a secagem baseados nas condições iniciais e de contorno do fenômeno físico do processo. Devido à complexidade das equações envolvidas, na abordagem teórica, as equações do modelo são resolvidas com auxílio de pacotes computacionais que se utilizam do método numérico de solução (KAHVECI, 2017).

Embora, a literatura sobre secagem seja extensa com aplicações em diversas áreas, existem poucos estudos sobre o processo de secagem que ocorre em concentrado fino de minério de ferro. Poucos estudos abordaram a secagem de finos de minério de ferro sujeitos ao transporte em vagões abertos ou em pilha de estocagem. Devido ao avanço da mecânica computacional em capacidade de memória e processamento as técnicas da Dinâmica dos Fluidos Computacionais, conhecida como CFD (*Computational Fluid Dynamics*) representam hoje poderosas ferramentas que auxiliam no estudo teórico da secagem de materiais de interesse para a indústria. Simular numericamente o processo

de secagem de finos de minério de ferro permite uma investigação detalhada dos fenômenos físicos envolvidos, o que não é possível com experimentos ou soluções analíticas de modelos teóricos.

## 1.2. JUSTIFICATIVAS

A cadeia de beneficiamento de minério de ferro é usualmente produzida em base úmida, gerando invariavelmente teores de umidade no corpo de minério. Esta umidade pode ser útil à medida que apresenta potencial para minimizar a geração de material particulado durante o transporte ferroviário do minério de ferro para os terminais portuários de embarque (PINTO *et al.*, 2015). Porém, para as operações de carregamento e transporte por navios, os níveis de umidade do minério de ferro podem vir a ser um problema à medida que ultrapassarem os limites de TML (*Transportable Moisture Limit*), que para o produto *sinter feed* apresenta magnitude de 10,45% (FERREIRA *et al.*, 2017).

Dentro do contexto ambiental, o manuseio e o transporte de minérios geram um impacto muito grande ao ambiente, propiciando a geração de poluição atmosférica, hídrica, entre outras. A poluição atmosférica é devido a grande quantidade de material particulado que é gerado e fica suspensa no ar. Isto ocorre porque praticamente todas as operações de movimentação, tais como, descarga, transporte e armazenagem suspendem poeiras (SANTOS JUNIOR, 2018). A emissão de particulados é muito mais acentuada quando os granéis sólidos são pouco úmidos, pois a umidade reduzida diminui a força de adesão das partículas, propiciando a emissão (HAN *et al.*, 2009). Como consequência dos elevados níveis de emissão os órgãos ambientais que regulam o padrão de qualidade do ar acabam impondo sanções a esses empreendimentos que acarretam suspensão das atividades de transporte e manuseio desses materiais, o que gera prejuízos econômicos às empresas (ESMAILI *et al.*, 2015). A Figura 1 mostra a situação de emissão de poeiras decorrente do carregamento e estocagem de minério em vagão e em pátio, respectivamente.



Figura 1 - Emissão de poeira em operações com minério: (a) carregamento de vagão (BARROS, 2008), (b) processo de erosão de uma pilha de minério (LOREDO-SOUZA *et. al.*, 2006).

A emissão de poeira em vagões e pilhas se dá pelo cisalhamento do ar com a superfície de material. A resultante das forças do ar sobre a superfície de minério influencia o movimento das partículas, podendo provocar três configurações possíveis, dependendo da intensidade eólica e do tamanho das partículas, sendo elas o deslizamento (*Creep*), o salto (*Saltation*) e a suspensão (*Suspension*), conforme mostra a Figura 2 (NASCIMENTO, 2014). A umidade presente na superfície do minério é responsável por influenciar a sensibilidade a emissão de partículas por causa dos seus efeitos nas forças de estabilização (HAN *et al.*, 2009). A presença de água nos interstícios das partículas inibe a geração de poeira porque acrescenta ao peso da partícula a força capilar. A força peso mais a força capilar se opõe às forças cisalhantes exercida pelo fluxo de ar evitando a emissão da partícula (SANTOS JUNIOR, 2018).

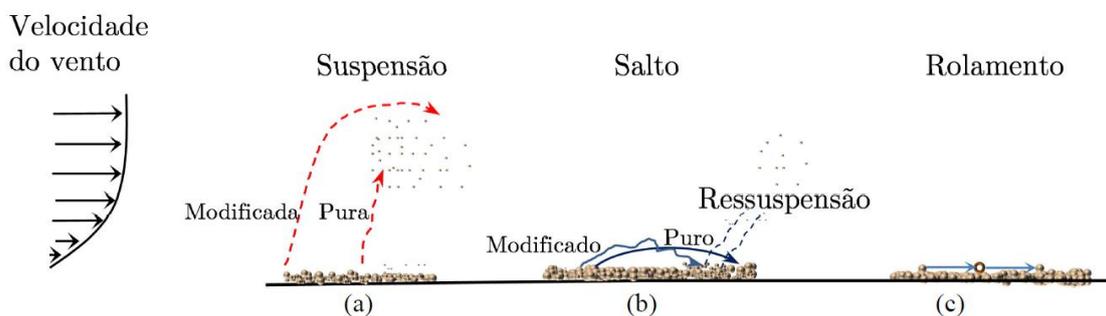


Figura 2 - Mecanismo de movimentação de partícula devido a ação do vento: (a) suspensão, (b) salto e (c) rolamento (NASCIMENTO, 2014).

Dessa forma, portanto, o minério de ferro seco e de granulometria fina exposto a condições ambientais tem o potencial de ser emitido, visto que a perda de umidade elimina as pontes de líquido que impõe a força de adesão capilar que mantêm as partículas unidas entre si, permitindo que sejam arrastadas pelo vento, formando a poeira. Atualmente esforços são conduzidos pela comunidade científica para melhor compreensão deste fenômeno e para o desenvolvimento de tecnologias que minimizem os efeitos prejudiciais dessa emissão.

A simulação do processo de secagem via CFD, visa a melhor compreensão dos fenômenos envolvidos bem como uma sistematização de projeto que permita a generalização dos resultados a serem obtidos no teste experimental, objetivando a construção de uma ferramenta de dimensionamento, que permita seu uso em diferentes escalas de processo. Neste trabalho um teste em túnel de vento foi executado em um modelo de vagão e de pilha contendo minério de ferro úmido. A avaliação e compreensão do processo de secagem nessa classe de materiais é importante, pois dará subsídio para o desenvolvimento de sistemas de abatimento de poeiras mais eficientes, tais como os métodos por supressores *sprays* a base de água, surfactante, polímeros e sais que já são usados comumente na indústria. Para isso, um modelo matemático será desenvolvido e validado a partir dos testes experimentais.

### 1.3. OBJETIVOS

#### 1.3.1. Objetivo Geral

Desenvolver um modelo matemático em CFD capaz de simular o processo de secagem que ocorre no minério de ferro quando transportado em vagão, em pilha e em leito de minério.

#### 1.3.2. Objetivos Específicos

- Validação de modelos matemático via CFD para do processo de secagem do minério de ferro;
- Elaboração de um modelo matemático que permita a análise detalhada dos fenômenos físicos inerente ao processo de secagem do minério de ferro;
- Estudar o efeito da umidade superficial no processo de arraste eólico de minério de ferro em superfícies úmidas;
- Validação via CFD do escoamento fluidodinâmico ao redor de um modelo de pilha;

- Mapear o gradiente de umidade presente no leito do minério úmido e avaliar como esse gradiente é afetado pela secagem.

#### 1.4. CONTRIBUIÇÕES DA TESE

As principais contribuições da tese são:

- O desenvolvimento de um modelo matemático com capacidade de prever o processo de secagem aplicado a fino de minério de ferro em leito de minério e pilha e, também, quando transportado em vagão.
- Estabelecimento de uma metodologia de estudo numérico-experimental para o estudo do processo de secagem do minério de ferro em vagão e pilha que ajude a compreender a sua relação com a umidade e a relação com a emissão de particulado.

#### 1.5. ESTRUTURA E ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

Esta tese de doutorado, está organizado da seguinte forma: o **Capítulo 1** trata dos aspectos gerais relacionados ao processo de secagem de materiais porosos e nela são apresentadas as justificativas do trabalho, o objetivo geral e específico, assim como, a contribuição da tese. O **Capítulo 2** trata da Revisão da Literatura relacionados ao estudo da secagem em meio poroso e granulares, bem como, a descrição do problema físico relacionado com o desenvolvimento do presente estudo e a importância da incerteza experimental para a qualidade das medições de testes de laboratório para a validação de modelos teóricos usados em engenharia. No **Capítulo 3** é apresentado os fundamentos do modelo matemático multifásico usado para simular o processo de secagem do minério de ferro do presente trabalho. O **Capítulo 4** trata da descrição dos experimentos necessários para a validação do modelo matemático, além disso, é apresentado também a caracterização das propriedades do material utilizado, além das técnicas de modelagem e solução usada no trabalho para a resolução das equações do modelo. O **Capítulo 5** trata dos resultados e discussão do trabalho para o modelo matemático multifásico e os experimentos para secagem do minério de ferro. No **Capítulo 6** por fim são apresentadas as principais conclusões do trabalho e sugestões para trabalhos futuros.

# CAPÍTULO 2 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

## 2.1. ASPECTOS GERAIS

O processo de secagem é um dos mais intensos da indústria e sua aplicação requer consumo considerável de energia para o processo (EL-BEHERY *et al.*, 2013). Em países desenvolvidos o consumo nacional de energia dedicados a secagem industrial pode chegar de 10 a 25%, e isso impacta diretamente no aspecto energético e ambiental de um país (DEFRAEYE, 2014). MUJUMDAR (2012) afirma que o processo compete com a destilação com a operação com maior consumo de energia devido ao alto calor latente da vaporização e à ineficiência associada ao uso do ar quente como meio de secagem. Apesar disso, o processo é imprescindível em muitas das atividades da indústria, tais como, as de alimentos, produtos agrícolas, farmacêutica processamento mineral e dentre outros (GEANKOPLIS, 1993). Assim, muitas pesquisas e novas tecnologias vem sendo desenvolvidas nessa área, para a otimização do processo que implicam em menores custo de produção e de consumo de energia.

De acordo com YIOTIS *et al.* (2006), a secagem de meios porosos é um processo de significativo interesse científico e industrial e o problema envolve vários mecanismos que se aplicam a escala do poro e afetam o comportamento macroscópico do processo de secagem. TWIER *et al.* (2018) afirma que o que torna o processo complexo é a transferência simultânea de calor e massa, caracterizado por calor convectivo externo, transferência de massa para o meio secante e o transporte interno no sólido úmido. Dessa forma, a secagem de sólidos porosos oferece um desafio técnico devido à presença de complexas interações entre os processos simultâneos de transferência de calor e massa, tanto na superfície quanto na estrutura dos poros dos materiais que estão sendo secos (DEFRAEYE, 2014). Dependendo da estrutura do corpo sólido, do teor de umidade, da temperatura e da pressão nos capilares e poros, a migração da umidade interna do material pode ocorrer por um mecanismo complexo (PATEL *et al.*, 2019). Além do mais, as condições externas como temperatura, umidade relativa do ar, pressão, velocidade do meio secante e a área da superfície exposta também tem um grande efeito nos mecanismos de secagem (ALMUBARAK *et al.*, 2013).

De acordo com KEMP e OAKLEY (2002) qualquer modelo de secagem só pode ser considerado verdadeira e confiável se for validada experimentalmente sob uma ampla gama de condições ambientais que possam influenciar no fenômeno. Contudo, segundo os mesmos autores muitas teorias de modelo de secagem que chegam a ser altamente

detalhadas e que foram publicadas nos últimos anos envolve pouco ou quase nenhuma comparação com resultados práticos com secadores reais. É essencial entender o significado físico do processo que está sendo modelado e validar a teoria através de experimentos em uma ampla variedade de condições. Ainda de acordo KEMP e OAKLEY (2002) o trabalho experimental é fundamental para a precisão de projeto de secadores, isso permite que os cálculos dos fenômenos de transporte envolvidos sejam mais confiáveis do que apenas baseado em dados termodinâmicos. Assim sendo, o experimento é usado para verificar o modelo teórico e encontrar os parâmetros difíceis de medir, permitindo assim, que os projetos de secadores em escala real possam ser modelados com precisão.

## 2.2. FENOMENOLOGIA

Neste trabalho é apresentado um estudo teórico e experimental do processo de secagem que ocorre em finos de minério de ferro. Três situações distintas encontradas na indústria são avaliadas. A primeira diz respeito a secagem que ocorre quando o minério é transportado em vagão simulando as condições de secagem que ocorre durante o transporte ferroviário. Na segunda o estudo da secagem é avaliado em um modelo de pilha simulando as condições de secagem que ocorre nos pátios de armazenamento das mineradoras. E, por último, o estudo da secagem em leito de minério a baixa velocidade é feito de forma análoga ao estudo em vagão, contudo, nesse caso, as condições ambientais que influenciam no processo, tais como, temperatura e umidade relativa são controladas para um estudo mais abrangente do processo. Todos os estudos aqui apresentados são realizados em modelos de escalas de laboratório.

### 2.2.1. Descrição

Uma descrição esquemática dos fenômenos envolvidos é mostrada na Figura 3. O ar escoa sobre uma amostra de material úmido que é poroso e está a uma temperatura inferior ao do ar ( $T_s < T_\infty$ ). Essa condição favorece a transferência convectiva de calor do ar para amostra úmida que promove um aumento da temperatura da superfície do material que é responsável pela evaporação da umidade ( $m_v''$ ). Ao mesmo tempo, ocorre a migração de água do interior do meio poroso para a superfície pelas forças capilares induzida pelo processo convectivo. O ar de secagem é considerado úmido e composto por uma mistura de ar seco e vapor de água, cuja umidade relativa é dada por  $\phi$ . A transferência de calor e massa é mantida desde que haja um gradiente de temperatura

( $T_s < T_\infty$ ) e de concentração mássica de vapor ( $\rho_{s,v} > \rho_{\infty,v}$ ) entre o ar de secagem e a amostra úmida.

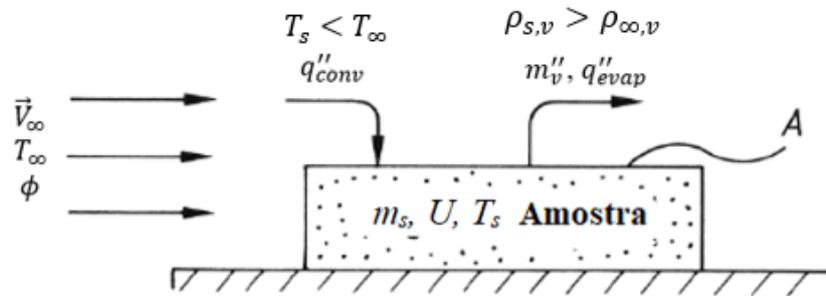


Figura 3 - Visualização esquemática dos fenômenos envolvidos para o estudo da secagem em meios porosos.

Adaptado: TSOTSAS *et al.* (2005)

### 2.2.2. Secagem em Meio Particulado

Secagem pode ser definida como a remoção térmica de umidade através de mecanismos como condução, convecção e radiação ou mesmo a combinação destes em materiais sólidos que podem ser porosos, particulados ou poroso-particulado. Para a umidade superficial, o meio secante transfere energia para que a umidade seja transportada. Já para a umidade da micro estrutura do material, este deve primeiro se dirigir para sua superfície para posterior evaporação, sendo que esta modalidade demanda maior consumo de energia.

Dentre as diversas classes de materiais a serem secos pelo processo de secagem os materiais porosos possuem uma posição de destaque nesse segmento. Esses materiais possuem espaços vazios chamado de poros e capilares que estão distribuídos de forma regular e irregular no interior do material sólido que o compõe (BEJAN, 2013). A umidade presente nesses sólidos ao interagirem com essa rede complexa desses materiais influencia diretamente a forma e no tipo de secagem a ser utilizado (CHEN *et al.*, 2020). Os materiais granulares ou particulados, são semelhantes aos meios porosos e, portanto, as pesquisas em meios porosos podem fornecer algumas referências para migração de umidade para esses tipos de materiais e facilitar o entendimento do processo de secagem.

De acordo com SRIKIATDEN e ROBERTS (2007) a estrutura física e a composição química do material influenciam diretamente nos mecanismos de transferência de calor e massa durante o processo de secagem. Assim, de acordo com a capacidade de retenção de água em seu interior esses materiais podem ser classificados como higroscópico e não-higroscópico. Materiais higroscópicos podem ser definidos

como materiais que possuem a propriedade de absorver a água presente em seu meio circundante, para essa classe de materiais a umidade permanece ligada em seu interior com a estrutura da mesma. Materiais minerais como o minério de ferro e alimentos em geral, podem ser considerados higroscópicos. Por outro lado, materiais não-higroscópicos possuem propriedades opostas, de modo que, a água não se liga ao interior do material. Lã, vidros e materiais cerâmicos são exemplos de materiais não-higroscópicos.

A secagem de um leito de partículas favorece a emissão de partículas ou poeira para atmosfera porque diminuem a força de adesão que atuam no material úmido. Desse modo, as forças que atuam sobre uma partícula em repouso submetida a um fluxo de ar são de dois tipos: forças responsáveis por colocar as partículas em movimento e forças responsáveis por resistir ao movimento (GOMES e MESQUITA, 2013). As forças responsáveis por colocar a partícula em movimento são aquelas associadas ao arrasto e sustentação. Por outro lado, as forças responsáveis pela resistência ao movimento são aquelas associadas à gravidade, adesão e atrito (UZI *et al.*, 2015). Quando as forças de arrasto e sustentação superam as forças resistivas, ocorrerá o movimento das partículas.

Para condições úmidas, as forças de adesão são as forças resistivas dominantes na partícula (GOMES e MESQUITA, 2013). Assim, as adesões que atuam entre as partículas determinam a capacidade de escoamento do material, bem como influenciam a forma estrutural do leito (BUTT *et al.*, 2011). Dependendo das condições do meio, as forças de adesão podem ser do tipo Van der Waals, capilares e eletrostáticas. Em geral, as forças de van der Waals e capilares são responsáveis por desempenhar um papel importante na força de adesão entre uma pequena partícula e a superfície em condições atmosféricas normais (YOU e WAN, 2013). Quando duas partículas entram em contato e a atmosfera circundante tem alguma umidade, ou quando uma certa quantidade de líquido é adicionada ao pó, forma-se um menisco e a força capilar torna-se significativamente maior entre as partículas em comparação com as forças de Van der Waals e eletrostática (BUTT *et al.*, 2011, YOU e WAN, 2013).

CHEN *et al.* (2020) afirma que de acordo com o volume de líquido presente no sistema, surgem quatro estágios de distribuição de água entre as partículas durante o processo conforme mostrado na Figura 4. Na Figura 4-a a água está no estado pendular e possui baixos níveis de umidade. Com o aumento do líquido, o estado funicular é atingido na Figura 4-b. Na Figura 4-c, todos os interstícios das partículas são preenchidos com líquido e o estado capilar é atingido. Para a Figura 4-d a água está no estado livre e para essa condição todo o material particulado está saturado por líquido, neste estado o minério

se torna uma polpa (PINTO *et al.*, 2020). CHEN *et al.* (1989) divide os quatro estágios de distribuição de água entre as partículas em: água capilar e água livre. Essa divisão é feita porque tanto no estado pêndulo, funicular e capilar, a água está sob ação capilar nos interstícios das partículas. SANTOS JUNIOR (2018) também afirma que, para solos como a areia, pode haver água adsorvida, com uma quantidade tão pequena de líquido que o regime higroscópico é praticamente inexistente.

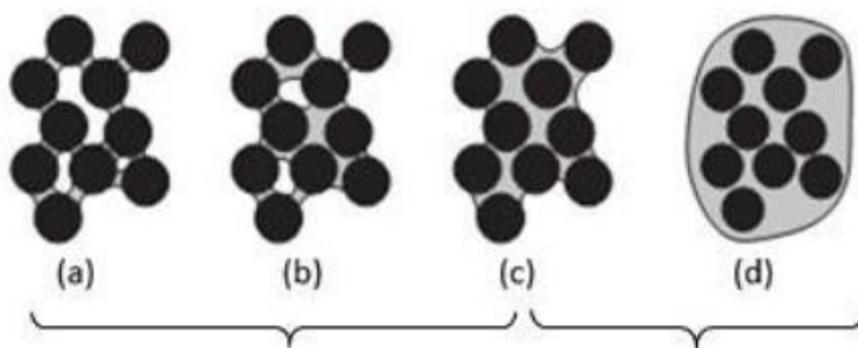


Figura 4 - Diferentes maneiras pelas quais a água pode ser encontrada em um leito de partículas (SANTOS JUNIOR, 2018)

A força de adesão capilar é causada pela ponte líquida e depende diretamente dos períodos envolvidos durante o processo de secagem (NASR *et al.*, 2017). A Figura 5 mostra duas curvas típicas do processo de secagem com os períodos envolvidos. Durante o período I, a umidade presente no leito pode ser do tipo água capilar ou água livre (CHEN *et al.*, 1989) e as forças de adesão associadas são tais que restringem ou impedem a emissão de partículas fugitivas para a atmosfera. O período II da taxa de secagem é caracterizado pelo início da secagem interna do meio poroso após uma secagem parcial da superfície exposta ao ar (EL-BEHERY *et al.*, 2013) e consequente início da emissão de poeira, pois as forças de adesão deixam de existir como consequência do processo de secagem superficial. O efeito da emissão de partículas é ainda mais acentuado quando se atinge o período III do processo de secagem, pois, neste período, a superfície do leito está completamente seca (NASR *et al.*, 2017), fazendo com que um maior número de partículas seja arrastado pela ação do campo de fluxo de ar. LIU *et al.* (2020) afirmam que o fenômeno da remoção de partículas em leitos granulares com a ação das forças de adesão capilar ainda é um problema que necessita de maiores investigações.

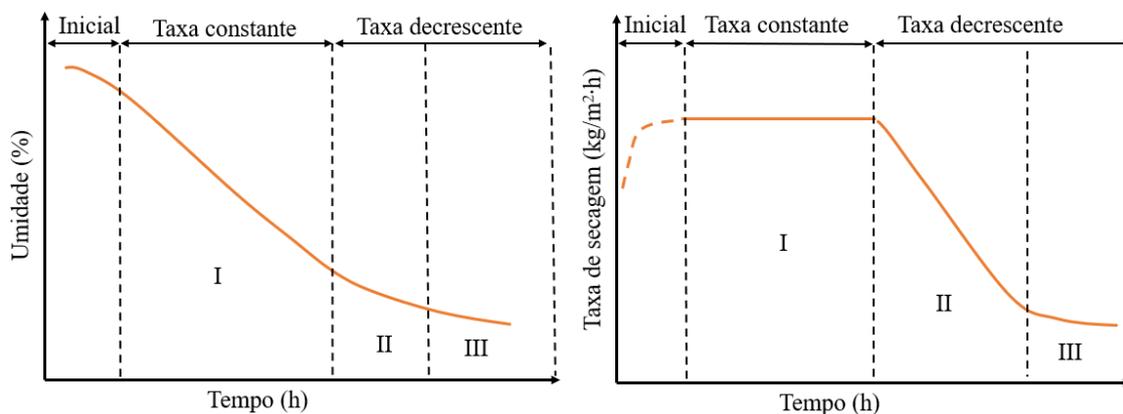


Figura 5 - Curvas de secagem típica: (a) cinética de secagem e (b) taxa de secagem.

Dentre as variáveis que podem influenciar na taxa de secagem, destacam-se a temperatura do meio, umidade e velocidade do ar, área de exposição do material a ser seco e a pressão (BALA, 2016). Para umidade em micro estrutura, fatores como a natureza física do material e a temperatura são relevantes. A secagem é uma das mais antigas operações unitárias, praticada principalmente na área da engenharia química e se apresenta também como uma das operações de mais intenso consumo de energia devido ao alto calor latente de vaporização (MUJUMDAR, 2015).

Segundo BELLEGHEM *et al.* (2012) o estudo teórico do processo de secagem é baseado em dois tipos de abordagem: abordagem analítica e abordagem numéricos. A abordagem analítica é geralmente limitada a estudos em 1 dimensão, isto é, casos simples, onde a difusividade é considerada constante ou a secagem é considerada a temperatura constante. Por outro lado, a abordagem numérica pode ser usada para casos mais complexos a partir da resolução simultânea das equações de transporte do calor, massa e momento. Na abordagem numérica é possível uma avaliação mais detalhada das condições que influenciam na secagem do meio.

Em estudos teóricos usando a abordagem numérica KAHVECI (2017) afirma que existem dois tipos de condições de contorno usadas para definir a transferência de massa na superfície do material durante a secagem. A primeira é a condição de contorno do tipo Dirichlet e a superfície do material é considerada com uma umidade em equilíbrio. De acordo com KAHVECI (2017) essa suposição tem sido usada em muitos modelos de secagem e causa maiores taxas de transferência de massa na superfície do material. O segundo tipo de condição de contorno, que é mais realista, é a condição de contorno do tipo Neumann e que também tem sido usada em vários estudos. Com esse tipo de condição de contorno, assume-se que o fluxo de umidade é proporcional à diferença no

teor de umidade entre a superfície e o ar de secagem. Para altos coeficientes de transferência de massa, ambas as condições de contorno se tornam idênticas.

A discussão sobre a utilização e o desempenho de novas tecnologias de secagem frente à secagem convencional é discutida de forma abrangente por KUNDRA e MUJUMDAR (2009). De forma geral, os autores trazem como ponto principal da discussão que a maioria das tecnologias de secagem disponíveis foi desenvolvida de forma empírica em épocas onde o consumo de energia e leis ambientais não eram tão rigorosas como nos dias atuais, mesmo se atendo às legislações. Assim destaca-se que a comparação entre o tradicional e o novo pode induzir a situações que levam a negligenciar novas tecnologias de secagem, pois estas muitas vezes podem não apresentar mesmo desempenho de tecnologias tradicionais e mesmo não atender de forma clara e objetiva as premissas termodinâmicas.

Os secadores atuais, com uma vida útil típica de algumas décadas, não foram projetados para um mundo onde o uso de energia se tornou uma parte importante do custo operacional e do ciclo de vida de um secador e onde o uso de tecnologia ecológica é fortemente encorajado (DEFRAEYE, 2014). A busca por novas tecnologias vem da necessidade de superar as principais dificuldades de tecnologias tradicionais, como capacidade de volume de material a ser tratado, o que implica em altos investimentos para áreas que tratem grandes volumes de materiais sólidos como, por exemplo, a indústria mineral. Em muitos casos, optam-se pelo tradicional, principalmente por não terem opções de pesquisa em escalas piloto e até mesmo em escala industrial para avaliar e desenvolver novas tecnologias.

No setor de mineração a exigência de sistemas de secagem mais eficientes e econômicos são de significativo interesse para o setor (PINTO *et al.*, 2020). Para concentrados de minério de ferro o grau de umidade desejado é um parâmetro sensível, pois baixos valores de umidade podem levar à geração de poeira e, por outro lado, o excesso de umidade pode afetar o carregamento de carga (MUJUMDAR, 2015, WU *et al.*, 2010). Por essas razões, uma redução moderada da umidade alcançada pelas operações de secagem é de grande interesse.

A necessidade do desenvolvimento de novas tecnologias de secagem tem levado aos avanços simultâneos nos métodos de análise de processamento de secagem, tanto experimental quanto numérico (DEFRAEYE, 2014). Tais métodos têm sido usados atualmente com avanços nos auxílios de projetos e avaliação de desempenhos de equipamentos e sistemas de secagem (KEMP, 2007), bem como no controle dinâmico de

processos de secagem que demandam otimização do processo (ZHANG *et al.*, 2006, WANG *et al.*, 2008). A otimização do processo é necessária para aumentar a eficiência do processamento, em termos de uso de energia e de tempo de produção (DEFRAEYE *et al.*, 2012).

RAMACHANDRAN *et al.* (2017) afirma que as técnicas de modelagem numérica usando o CFD são úteis para fornecer modelos muito bem detalhados e precisos da fase gás que inclui os efeitos turbulentos tridimensionais de redemoinhos e vórtice. Nas regiões do escoamento onde os padrões de fluxo locais desempenham papel importante nos leitos a serem secos, o CFD pode ser capaz de oferecer melhorias na compreensão e modelagem do problema físico (KEMP e OAKLEY, 2002). Segundo DEFRAEYE (2014) o estudo do processo de secagem usando o CFD é considerado decisivo para dar passos evolutivos na otimização do processo de secagem convencional e/ou para ajudar a conceituar, projetar e otimizar os processos de secagem da próxima geração.

A Dinâmica dos Fluidos Computacional usualmente conhecida como CFD (*Computational Fluid Dynamics*) representa hoje o maior conjunto de técnicas computacionais científicas disponíveis para a solução numérica de problemas da engenharia e de outras ciências relacionadas com dinâmica dos fluidos. Através da solução numérica das equações de transporte os pesquisadores estão usando cada vez mais o CFD para analisar e avaliar os problemas relacionados aos fenômenos de secagem em estufas, secagem em leitos fluidizados, armazenamento e manuseio de materiais granulares (BALA, 2017). De acordo com BALA (2017) o que deixa o uso das técnicas do CFD atraente é o fato delas além de permitirem o estudo do comportamento detalhado do campo de escoamentos permitir também estudo dos fenômenos envolvido durante a secagem de materiais. Contudo, vale ressaltar que apenas recentemente o CFD vem sendo usado na modelagem da transferência de calor e massa para secagem de materiais, portanto, seu campo de estudo segue ainda em desenvolvimento e como objeto de estudo.

Há diversos pacotes comerciais hoje disponíveis para simular e resolver os mais variados problemas da engenharia. Dentre os *softwares* comerciais disponíveis para CFD o ANSYS Fluent representa hoje uma das maiores plataformas de simulação numérica da fluidodinâmica computacional no mundo. O ANSYS Fluent é largamente utilizado em aplicações industriais e científicas. Além do Fluent outros softwares comerciais estão disponíveis, tais como, ANSYS CFX, o FIDAP e o Polyflow. Segundo BALA (2017) esses softwares possuem como vantagem a possibilidade de customização de seus algoritmos de cálculo através inserção das chamadas UDFs (*Use Defined Function*) o que

permite a entrada de novas correlações, além daquelas já existentes, o que possibilita uma modelagem mais abrangente e detalhada do fenômeno físico.

## 2.3. MODELOS DE SECAGEM

Nesta seção serão apresentadas as revisões da literatura sobre os aspectos gerais relacionados a secagem em meios porosos e da abordagem de modelagem numérica multifásica.

### 2.3.1. Modelos de Secagem em Leitos Porosos

A caracterização do processo de secagem de minério de ferro e outros materiais porosos têm sido estudada por diferentes pesquisadores utilizando diferentes ferramentas de análise. Os estudos de PINTO *et al.* (2020) discutiram a caracterização da cinética de secagem de concentrados de minério de ferro sob os efeitos de diferentes temperaturas do ar de secagem. BORBA (2017) simulou o processo de secagem em um modelo de vagão com minério de ferro e avaliou diferentes produtos supressores de poeira aplicados na superfície do minério umedecido a 7%. SANTOS JUNIOR (2018) utilizou um túnel de vento para simular o efeito de secagem que ocorre durante o transporte de finos de minério de ferro em um modelo de vagão para diferentes níveis de umidade do leito e velocidade de escoamento. MOHAN e TALUKDAR (2013) projetaram e construíram um túnel de vento para a secagem convectiva de materiais úmidos em diferentes temperaturas de secagem e forneceram todos os dados de projeto, componentes, materiais e especificações.

ATHAYDE *et al.* (2018) apresentaram um estudo sobre a cinética de secagem de pelotas de minério de ferro verde usando energia de micro-ondas para avaliar o tempo de secagem, taxa de secagem e resistência mecânica das pelotas. Os resultados do trabalho de ATHAYDE *et al.* (2018) foram comparados com a secagem convectiva tradicional, e descobriu-se que a energia de ativação da secagem por micro-ondas é aproximadamente duas vezes menor que a energia de ativação da secagem convectiva.

NAMKUNG e CHO (2004) determinaram as características de secagem de partículas de minério de ferro usando um secador de transporte pneumático vertical, e BANOONI *et al.* (2018) apresentaram uma revisão da literatura sobre as diferentes estratégias de modelagem numérica utilizadas para modelar o processo de secagem pneumática, onde foram apresentados os principais parâmetros e métodos numéricos utilizados na abordagem deste tipo de secagem. LJUNG *et al.* (2012) estudaram a

transferência de calor e massa que ocorre durante o processo de secagem de um leito poroso de pelotas de minério de ferro através de uma abordagem discreta e contínua para o leito de minério. METZGER e TSOTSAS (2005) estudaram a influência da distribuição do tamanho dos poros na secagem convectiva de um leito poroso através da abordagem de um modelo capilar, e as curvas de secagem e perfis de umidade no leito poroso foram apresentados para distribuições de diferentes tamanhos dos poros porosos.

SILVA (2021) projetou e construiu um túnel de vento de secagem visando o estudo da dinâmica de secagem do minério de ferro. O projeto da bancada contou com um sistema de refrigeração, aquecimento e umidificação que foram interligadas por um sistema de supervisão e controle o que permitia um controle adequado das variáveis externas que influenciavam o processo de secagem, tais como, temperatura, umidade relativa e velocidade de escoamento. A utilização da bancada mostrou-se satisfatória, pois permitiu um estudo detalhado da cinética de secagem sob diferentes condições de secagem para o minério de ferro úmido.

SANTOS *et al.* (2023) desenvolveram um sensor capacitivo aplicado a um protótipo de vagão de trem para medir a umidade do minério de ferro. O objetivo do trabalho era dar suporte aos estudos de emissão de particulado realizados em laboratório para o estudo da secagem de minério de ferro em vagão em condições semelhante aos encontrados durante o transporte ferroviário. O sensor utiliza o método *Real-Dual Frequency*, que diminui a influência da condutividade elétrica na constante dielétrica, mesmo utilizando baixa frequência (até 8 MHz). A partir da constante dielétrica, a umidade do minério de ferro é determinada a partir de calibração indireta, que obteve uma precisão de 0,07 pontos percentuais e um erro máximo de 0,39 pontos percentuais.

Um estudo da secagem em pilha de minério de ferro usando um túnel de vento é apresentado em FURTADO *et al.* (2022). Neste trabalho a secagem em pilha é avaliada através da metodologia de estratificação e coleta de amostras em camada do material da pilha ao final dos testes em túnel de vento que são pesadas em uma balança de precisão e em seguida colocada em uma estufa de secagem para a secagem por 24 horas. Após a secagem por 24 horas o material era novamente pesado e, com isso, era possível a determinação da umidade final da pilha em diferentes pontos. Os resultados do trabalho permitiram mapear os gradientes de umidade em várias partes e região da pilha e em função do tempo. Tais resultados reportados nesse trabalho são importantes para validação de modelos numéricos como os descritos na seção 3 deste trabalho.

PINTO *et al.* (2015) realizaram estudos de secagem em concentrado de minério de ferro utilizando um secador de bandeja em escala de laboratório. Nesse trabalho foi possível a identificação e avaliação dos períodos de taxa de secagem constante e decrescente. Os resultados apresentados indicaram que o estágio de distribuição da água entre as partículas se revela como água livre superficial e capilaridade, para a faixa de umidade de interesse de 13% a 6%. Uma regressão não linear foi realizada identificando o peso das variáveis em estudo permitindo assim um modelamento dos resultados de redução de umidade. O modelo apresentou boa concordância com os resultados experimentais com desvios menores que 10% entre os dados previstos e observados.

Uma investigação em túnel de vento da influência da umidade da superfície no arrastamento e erosão em areia de praia na costa sul tropical da China é apresentado por HAN *et al.* (2009). O estudo levou em consideração uma espessura de areia de 1 mm da superfície e a influência da umidade dessa camada no arrastamento e erosão da areia sob ação do vento. O estudo comparou vários modelos de predição para a velocidade limite de cisalhamento do sedimento úmido e foram encontradas diferenças substanciais entre os resultados previstos. Os autores concluíram que o aumento da resistência a erosão em baixos teores de umidade provavelmente resulta de forças coesivas em películas de água envolvendo as partículas de areia.

DEFRAEYE *et al.* (2012) estudaram a secagem convectiva de uma placa plana porosa insaturada com baixo número de Reynolds por meio da modelagem conjugada da transferência de calor e massa no fluxo de ar e material poroso. Uma revisão da dinâmica de migração de umidade em materiais porosos é apresentada em Chen *et al.*, (2018) e os modelos matemáticos dos estágios de secagens são mostrados.

LI *et al.* (2019) testaram diferentes formulações matemáticas usadas para estimar a evaporação de solos. As avaliações exigiram o desenvolvimento de três modelos numéricos na escala REV do poro que variam em sua complexidade conforme a caracterização do fluxo de água no meio poroso e a sua evaporação. O desempenho dos modelos foi avaliado com dados experimentais obtidos em túnel de vento com tanques de solo equipado com uma rede sensores para monitorar continuamente as variáveis água-temperatura-umidade. Os resultados da pesquisa indicaram que não é possível a obtenção de um único modelo para previsão da evaporação de solos e que cada modelo varia conforme os estágios envolvidos durante a secagem do solo.

A influência do efeito da camada-limite no comportamento do mecanismo de secagem de um leito fixo de partículas para vários materiais em uma superfície plana foi

investigada experimentalmente por ALMUBARAK (2013) em um túnel de vento secador. Os resultados mostraram que as características da camada-limite têm um efeito grande nos coeficientes locais de transferência de calor e massa e na distribuição da temperatura na superfície do leito. Além disso, os resultados também mostraram que o efeito da camada-limite aumenta a resistência a transferência de calor e massa para ou da superfície do leito à medida que o escoamento avança no sentido do escoamento a partir do bordo de ataque do leito, pois os valores dos coeficientes diminuem progressivamente com o aumento da distância da borda de ataque, onde a camada limite é espessa. Em TWIER *et al.* (2018), o processo de secagem de materiais porosos sob diferentes condições de secagem foi investigado experimentalmente. A partir dos resultados obtidos concluiu-se que a temperatura do ar de secagem foi considerada o fator mais importante na taxa de secagem para a estrutura da amostra quando comparado com os efeitos da velocidade do ar e da umidade relativa. Além disso, temperaturas e velocidades do ar mais altas e baixa umidade relativa são condições favoráveis ao processo de secagem.

PETRY (2007) estudou o problema da transferência de calor e massa em meios granulares. Em seu trabalho foi desenvolvido um modelo matemático que descreve os balanços de energia e de massa para o ar e os grãos. As equações do modelo são resolvidas numericamente por um esquema em diferenças finitas. Seus resultados numéricos são comparados com dados experimentais disponíveis na literatura e apresentam boa concordância. Tais resultados contribuem para obter um melhor entendimento da transferência de calor e massa em meio granulares, cujas aplicações são encontradas em muitas situações de interesse prático.

MARYNOWSKI (2016) investigou experimentalmente o fenômeno da evaporação em meios porosos com base na convecção forçada via imagens térmicas e estabeleceu um modelo com base nos resultados. Foram realizados 42 experimentos individuais em dois túneis de vento diferentes com três amostras diferentes de solos em quatro velocidades diferente do ar para investigar os efeitos da convecção forçada em vários tipos de solo. Os resultados dos experimentos serviram como base para reunir um banco de dados para prever o modelo de evaporação com base nas condições ambientais do solo e úteis para desenvolvimento de modelos numéricos com base na física para simular a evaporação na interface entre o meio poroso e a superfície livre.

Procedimentos para otimizar o desempenho da secagem convectiva de objetos úmidos porosos em um canal é realizado por SELIMEFENDIGIL *et al.* (2022). Simulações numéricas utilizando o método de elementos finitos foram utilizadas para

resolver as equações de transporte de transferência de calor e massa acoplado às equações de fluxo do canal. Um algoritmo COBYLA de otimização foi utilizado e acoplado as simulações numéricas das equações de transporte para encontrar o espaçamento ideal entre os objetos no canal que oferece o melhor desempenho de secagem convectiva.

FRANCO *et al.* (2020) realizaram experimentos de secagem intermitente em leitos de grãos de arroz, afim de avaliar os efeitos de diferentes temperaturas do ar de secagem e de tempos de revenimento. A secagem foi simulada por meio de um modelo de difusão líquida baseado na geometria esferoidal e para validar o modelo a solução foi ajustada aos dados experimentais para as temperaturas do ar de secagem de 40 e 70 °C e para períodos de revenimento variando de 0 a 180 minutos. Os resultados mostram que, para todos os experimentos de secagem intermitente de arroz em casca, o tempo efetivo de operação diminuiu em relação à secagem contínua. Além disso, a secagem intermitente produz menor temperatura na superfície do grão, o que minimiza os danos térmicos causados ao produto durante o processo. As simulações numéricas fornecem informações sobre a distribuição de umidade no interior do grão de arroz durante os períodos de interrupção na aplicação de ar quente.

GENARO (2021) em seu trabalho avaliou a eficácia de predição de um modelo matemático de secagem da literatura para secagem de alumina em leito fixo de camada espessa com e sem reversão do sentido do escoamento. Os resultados do trabalho mostram que a aplicação de reversão diminuiu os gradientes de umidade e temperatura do leito, quando comparados à secagem convencional com escoamento ascendente de ar. Além disso, os resultados obtidos para a simulação de secagem utilizando os modelos da literatura mostraram boa representação qualitativa do comportamento térmico e de umidade na secagem em camada espessa. Suas análises obtiveram erros relativos médios entre as temperaturas experimentais e as simulações de 1,70 a 6,59% e de 2,38 a 11,87% para o processo sem e com reversão, respectivamente.

TSUKERMAN *et al.* (2007) modelaram a cinética de secagem de um *pellet* individual de minério de ferro. Para esse objetivo os pellets de minério de ferro foram instrumentados para a medição da temperatura em fornos de laboratório equipados com termobalanças para o registro da perda de umidade conforme o material é seco. Os resultados do estudo mostram que há quatro etapas no processo de secagem dos pellets, sendo eles: 1- a evaporação da umidade na superfície do pellets; 2- um regime híbrido com evaporação do filme superficial e aparecimento de manchas secas com frente de evaporação se movendo no interior do pellet; 3- um núcleo úmido encolhendo deixando

atrás da frente de evaporação uma casca seca onde há difusão de vapor de água; 4- uma mudança na difusão do transporte de água em massa através da casca seca ocorre, quando a frente de evaporação está próxima do ponto de ebulição. Nesse trabalho as equações de transferência de calor e massa são resolvidas numericamente, e os valores simulados são comparados com os resultados experimentais.

### **2.3.2. Modelos Numéricos Multifásicos**

A utilização de técnicas numéricas para resolver problemas de escoamentos multifásicos em leitos porosos, como a secagem, é vital para a comunidade científica e industrial (ELGAMAL *et al.*, 2014). Devido aos avanços na infraestrutura computacional dos últimos anos, as técnicas numéricas de dinâmica de fluidos computacional (CFD) tem-se consolidado como uma das principais ferramentas de análise e estudo que permitem uma investigação teórica mais abrangente e detalhada da secagem de materiais (BALA, 2017). As simulações multifásicas via CFD permitem uma compreensão do comportamento físico das interações gás-líquido, gás-sólido e líquido-sólido que ocorrem em meios porosos o que permite estudar como elas influenciam as propriedades do meio poroso.

Em RAMACHANDRAN *et al.* (2017), é apresentada uma revisão da literatura sobre o estudo do processo de secagem utilizando fluidodinâmica computacional aplicada à solução de problemas nas mais diversas áreas da indústria, principalmente para problemas de escoamentos multifásicos envolvendo a secagem em meios porosos. LJUNG *et al.* (2011) simulou numericamente a secagem convectiva de uma pelota de minério de ferro individual que foi modelado como meio poroso, e os resultados da simulação numérica permitiram a previsão de diferentes processos que ocorrem durante a secagem. BURSTRÖM *et al.* (2018) modelaram a transferência de calor em um leito fixo de pelotas de minério de ferro usando um modelo de esfera discreta e um modelo de meio poroso contínuo usando CFD com o objetivo de simular a transferência de calor por convecção do fluxo de fluido quente através do leito fixo, incluindo dispersão de calor devido à configuração aleatória dos *pellets*.

FENG *et al.* (2010) desenvolveram um modelo matemático para o estudo dos processos de secagem e pré-aquecimento de pelotas de minério de ferro, onde os efeitos de parâmetros de processo como diâmetro médio da pelota, umidade inicial e temperatura foram investigados para o gás de entrada e os perfis de temperatura da pelota. O modelo foi validado a partir de medições reais do processo físico. KOWALSKI *et al.* (2007)

propuseram um modelo multifásico para a secagem que foi capaz de simular a transferência de calor e massa durante a secagem convectiva de materiais porosos com capilares saturados e insaturados com base na teoria de misturas e termodinâmica de processos irreversíveis, e os resultados numéricos foram validados por testes experimentais. Uma análise numérica da transferência de calor e massa por convecção de um objeto úmido poroso movendo-se em um canal bidimensional foi apresentada por SELIMEFENDIGIL *et al.* (2021), e o modelo foi validado por meio de testes experimentais disponíveis na literatura.

Em BALACHANDAR e EATON (2010) é apresentada uma revisão da literatura sobre as técnicas experimentais e computacionais para escoamentos multifásicos turbulentos dispersos. Os escoamentos multifásicos dispersos turbulentos são comuns em muitas aplicações ambientais e de engenharia. A revisão foca em três aspectos importantes do escoamento multifásico dispersos turbulentos que são: a concentração preferencial de partículas, gotículas e bolhas, o efeito da turbulência no acoplamento entre as fases dispersa e contínua e a modelagem da turbulência da fase primária devido a influência da presença de partículas ou bolhas. Em problemas que envolvem a secagem a natureza da turbulência do escoamento impacta diretamente nos resultados, pois o seu efeito afeta diretamente o modo transferência de calor e massa no meio.

Um modelo matemático para meios porosos para o escoamento bifásico gás-líquido em um leito fixo rotativo foi apresentado LU *et al.* (2018). As simulações numéricas foram conduzidas por meio do pacote comercial ANSYS Fluent usando um modelo matemático usando as técnicas de CFD multifásico euleriano-euleriano, que foi validado com base em dados experimentais disponíveis na literatura. Em GAO *et al.* (2018) e GAO *et al.* (2020) foram conduzidos estudos numéricos e experimentais sobre o processo de secagem em solos com superfícies onduladas; um modelo multifásico foi implementado no pacote comercial COMSOL Multiphysics para entender os mecanismos de evaporação em superfícies irregulares, fornecendo assim uma visão exploratória sobre o comportamento de secagem da superfície de solos sob condições turbulentas e baseadas em fluxo livre e com acoplamento de modelo do meio poroso.

Uma abordagem prática de modelagem em CFD para estimar as condições de contorno de saída para secadores industriais de vários estágios é mostrado em AFSHAR *et al.* (2019). A modelagem multifásica via dinâmica dos fluidos computacional de uma torre de secagem spray funcionando em regime estacionário é realizada por ALI *et al.* (2017) para estudar o comportamento de secagem de gotículas de pasta de detergente.

Nesse estudo, o software ANSYS Fluent é empregado para resolver a transferência de calor, massa e momento entre o gás quente e as gotas/partículas polidispersas usando a abordagem euleriana-lagrangiana. Em BABU *et al.* (2020) o projeto de uma câmara de secagem para secagem em bandeja de camadas finas é feito usando a dinâmica dos fluidos computacional para testar diferentes configurações da câmara para passagem do ar de secagem no secador. Dessa forma, são investigadas quatro diferentes geometrias otimizadas da câmara para secagem de folhas e elas são avaliadas teoricamente a partir do desempenho previsto usando o software ANSYS Fluent.

BATISTA e BETTEGA (2021) simularam numericamente o processo de secagem que ocorre em leito de jorro com grãos de sorgo através abordagem CFD multifásica euleriana-euleriana acoplada com o método dos Elementos Discretos, DEM (*Discrete Element Method*), a fim de identificar a melhor configuração geométrica do equipamento para otimizar o desempenho do processo de secagem. El-BEHERY *et al.* (2013) apresenta um estudo numérico e experimental sobre o desempenho de um secador de transporte pneumático. A modelagem CFD multifásica euleriana-euleriana de acoplamento de quatro vias é utilizada no estudo numérico e o estudo experimental é realizado em um secador de transporte pneumático vertical em escala de laboratório.

Em ELGAMAL *et al.* (2014) o comportamento da secagem de um único grão de arroz submetido a secagem convectiva foi investigado usando as técnicas de CFD. O modelo matemático foi validado a partir de testes experimentais de secagem em camada fina disponíveis na literatura e foram avaliados, principalmente, os efeitos da velocidade e temperatura do ar de secagem sobre o grão de arroz. Os resultados do estudo mostraram que a temperatura do ar foi a principal variável que afetou a taxa de secagem do grão de arroz.

VU e TSOTSAS (2018) apresentam uma revisão sobre a modelagem e simulação numérica da secagem em meios porosos. Neste trabalho são apresentados os diferentes modelos de migração de umidade durante o processo de secagem em meios porosos, assim como, suas restrições e aplicações. A revisão dos modelos de secagem como tal serve de base para o desenvolvimento de uma estrutura para simulação numérica. Dentre os modelos e teorias, nesta revisão destacam-se desde o mais simples, como a teoria da difusão, até os mais complexos, como a teoria da frente recuada, o modelo de Philip e de Vries, a teoria de Luikov, a teoria de Krischer e, finalmente, o modelo de Whitaker, no qual todos massas, transporte de calor e mudança de fase (evaporação) são levados em consideração.

Um estudo da modelagem e análise do processo de evaporação em meios porosos são apresentados por MOSTHAF *et al.* (2014). Nesse trabalho a influência das propriedades do meio poroso e a interação do meio poroso com o fluido na dinâmica de secagem são apresentados e discutidos usando um modelo matemático de fluxo livre acoplado com modelo de escoamento no meio poroso na escala do REV. Os autores apresentam uma discussão acerca das características dos estágios de secagem envolvido e como elas são influenciadas pelas propriedades do meio poroso e pela interação com o as características do fluxo livre. Os modelos numéricos apresentados no estudo são validados a partir de dados de testes experimentais e apresentam boa correlação na capacidade de previsão do processo de secagem.

KHAN *et al.* (2017) apresentam uma revisão da literatura sobre os modelos multifásico de transferência simultânea de calor e massa disponível para diferentes métodos de processamento de alimentos, tais como, secagem. A revisão dos parâmetros que são críticos na modelagem multifásica de secagem em meios porosos é apresentada, incluindo os parâmetros de entrada, propriedades dos materiais, técnica de simulação e hipóteses usadas.

Um modelo de meio poroso multifásico com acoplamento bidirecional termo-hidro e mecânico para secagem convectiva de alimentos é mostrado em ZHU *et al.* (2021). O trabalho avalia a secagem em um cogumelo que é modelado com um meio poroso úmido. O efeito de encolhimento provocado pela secagem e o seu impacto na transferência de calor e massa são abordados no estudo. O modelo proposto pelos autores é válido com base em resultados experimentais e segundo os mesmos o modelo pode fornecer suporte técnico para otimizar o processo de secagem e melhorar a qualidade de produtos alimentícios.

Nos trabalhos desenvolvidos por KUMAR *et al.* (2018) um modelo abrangente para a secagem em maçãs usando abordagem multifásica em meio poroso foi desenvolvido e validado. O modelo considerou o transporte de água líquida por difusão capilar e o transporte de vapor por difusão binária e pressão de gás. Uma formulação de não equilíbrio foi usada para calcular a taxa de evaporação, o que permitiu a ilustração separada do vapor e do transporte de água líquida. As equações foram resolvidas pelo método dos elementos finitos usando o software comercial COMSOL Multiphysics.

## 2.4. INCERTEZA EXPERIMENTAL

A validação de modelos teóricos usados em engenharia para análise de projeto é feita através de dados de testes experimentais. Contudo, a qualidade dos dados experimentais importa muito na hora de validar um modelo matemático, pois nem todos os dados experimentais são igualmente bons para análise de projetos em engenharia. Para isso, a análise de incerteza é o procedimento comum usado para quantificar a validade dos dados experimentais e a sua acurácia (FOX *et al.*, 2018). Assim sendo, a análise de incerteza é uma etapa fundamental e indispensável em um estudo científico experimental, não somente para mensurar o quanto é incerto um resultado experimental (KLINE, 1985, MOFFAT, 1982, MOFFAT 1988), quanto para o planejamento de experimentos (MOFFAT, 1985).

Em medições e trabalhos experimentais a presença de erros é inevitável. Esses erros podem ser definidos como a diferença entre o valor medido e o seu corresponde valor real (ABERNETHY *et al.*, 1985). Esses erros podem ainda ser divididos em dois tipos principais: o erro fixo ou sistemático e o erro aleatório. O erro fixo é aquele que vem da medição do equipamento e pode ser eliminado pela calibração ou correção do mesmo sendo o mesmo para cada leitura (FOX *et al.*, 2018). Por outro lado, o erro aleatório é diferente para cada leitura e não pode ser eliminado, sendo a sua origem incerta por sua própria natureza. Segundo ABERNETHY *et al.* (1985) o erro total de medição para uma experimentação pode ser definido como a soma dos erros fixos ( $\beta$ ) e aleatórios ( $\varepsilon_k$ ) como mostrado pela Eq. (1).

$$\delta_k = \beta + \varepsilon_k \quad (1)$$

O erro fixo ou sistemático pode ser estimado a partir de medições repetitivas de um mensurando cujo o valor é bem conhecido. Nesse tipo de erro quanto maior o número de medições repetitivas, melhor será a estimativa do erro. Esse erro pode ser avaliado experimentalmente ou analiticamente. Segundo MOFFAT (1988) o método experimental é feito através das curvas de calibração do equipamento e analiticamente é feito usando método de análise de Taylor para catalogar os erros em uma medição. Para este trabalho será dado ênfase para o método experimental para avaliação do erro sistemático.

Para o método experimental de avaliação do erro sistemático as análises por regressão linear ou polinomial são bastante recorrentes. A estimativa do erro sistemático, por esse método, recai sobre as curvas de calibração do instrumento de medição. Para o caso do conjunto de dados da calibração do instrumento puder ser representado por uma

regressão linear o intervalo de confiança para a reta de regressão do conjunto do conjunto pontos podem ser estimado como (CABRAL, 2004):

$$s_x = \frac{S_{y|x}}{s_{\bar{x}} \sqrt{N-1}} \quad (2)$$

$$s_y = \pm \frac{S_{y|x}}{\sqrt{N}} \quad (3)$$

onde  $s_x$  e  $s_y$  são as incertezas do declive da reta e da ordenada, respectivamente;  $s_{\bar{x}}$  é o desvio padrão dos valores da grandeza independente;  $S_{y|x}$  é o desvio padrão do ajuste de reta e  $N$  é o número de pontos medidos.

O desvio padrão,  $S_{y|x}$ , pode ser determinado com uso da Eq. (4) (CABRAL, 2004).

$$S_{y|x} = \sqrt{\frac{N-1}{N-2} (s_y^2 - b^2 s_{\bar{x}}^2)} \quad (4)$$

onde  $s_{\bar{y}}$  é o desvio padrão dos valores da grandeza dependente e  $b$  é o coeficiente linear da reta.

Para a interpolação linear de um valor  $y_0$  a partir de um  $x_0$  o intervalo de confiança para a previsão pode ser obtido pela Eq. (5) (CABRAL, 2004).

$$\beta = \pm S_{y|x} \sqrt{1 + \frac{1}{N} + \frac{(x - \bar{x})^2}{(N-1)} s_{\bar{x}}^2} \quad (5)$$

onde  $x$  é o valor local da variável independente e  $\bar{x}$  é o valor médio das variáveis independente.

A Figura 6 ilustra o conceito de intervalo de confiança para a reta de regressão e o conceito de intervalo de confiança para a previsão de interpolação linear segundo CABRAL (2004).

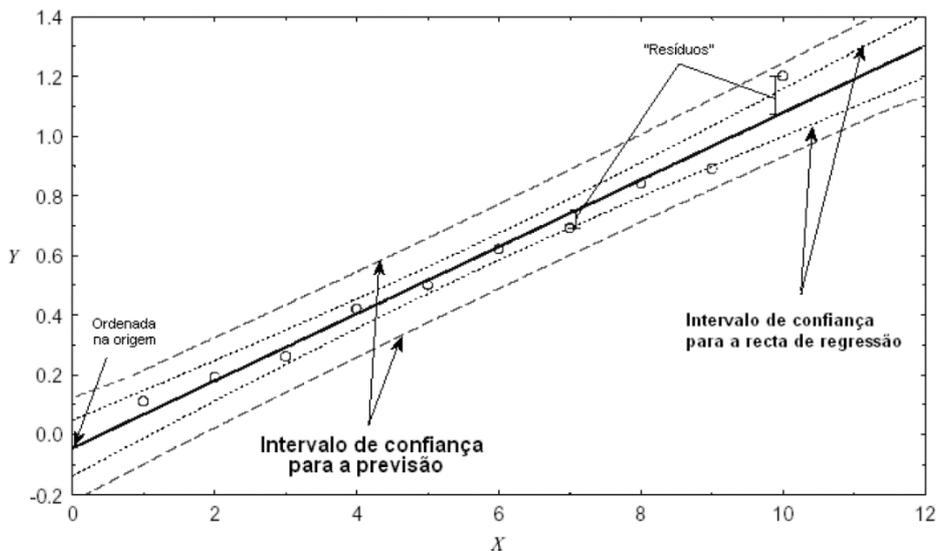


Figura 6 - Ilustração dos intervalos de confiança para uma reta de regressão e para interpolação linear (CABRAL, 2004).

O erro sistemático para os dados de calibração também pode ser obtido a partir do envelope formado pelo intervalo de confiança da previsão dado pelas retas auxiliares médias. A Figura 7 ilustra a estimativa do erro sistemático por esse método chamado de método gráfico para a regressão linear para estimativa da incerteza. De acordo com esse método retas auxiliares delimitam um o intervalo de confiança a partir do vértice mais distante formado pela incerteza da variável independente ( $s_x$ ) e dependente ( $s_y$ ) do conjunto de pontos acima ou abaixo da reta. A incerteza do erro dado por esse método é, então, determinada pela Eq. (6)

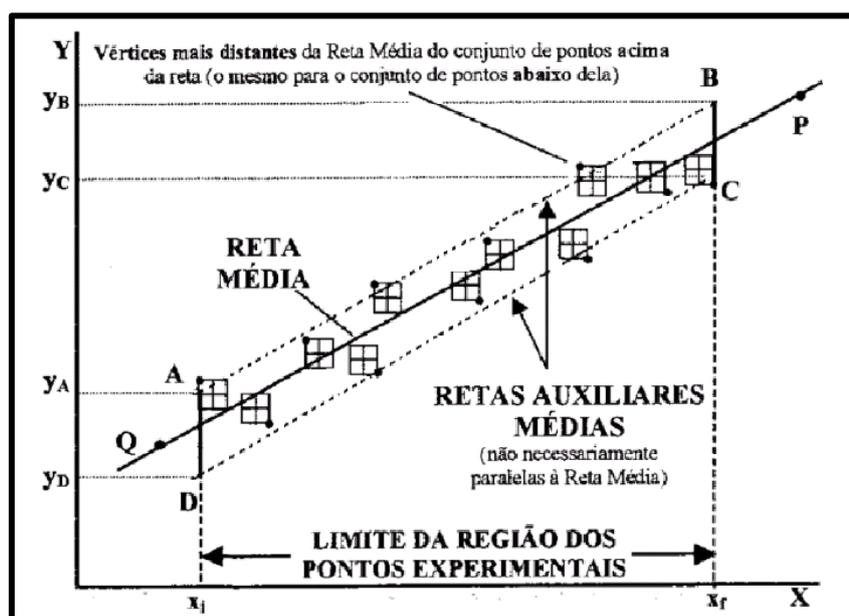


Figura 7 - Método gráfico para determinação da incerteza associada no ajuste de retas.

$$\beta = \pm \frac{1}{2} \left[ \frac{(y_a - y_d) + (y_b - y_c)}{x_f - x_i} \right] \quad (6)$$

Quanto ao erro aleatório de uma medição, o mesmo, pode ser representado por uma distribuição normal ou gaussiana e, nesse caso, o desvio padrão da curva representa a dispersão dos valores em relação ao seu ponto central ou médio (SANTOS, 2020). Para estimar o erro aleatório nos resultados experimentais é utilizado a análise de incerteza para prever a faixa ou região na qual o valor do erro aleatório é esperado com certa probabilidade (FOX *et al.*, 2018). A seguir será descrito o método para estimar o erro associado a incerteza aleatória com base na metodologia ASME do trabalho ABERNETHY *et al.* (1985) e do trabalho de MOFFAT (1988).

Para um número,  $N$ , suficientemente grande de medições o índice de precisão individual para cada ponto do erro aleatório pode ser calculado por meio da estimativa do desvio padrão experimental dado pela Eq. (7).

$$S_N = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2}{N-1}} \quad (7)$$

onde  $S$  é o índice de precisão individual,  $\bar{x}$  é o valor médio de  $x$ .

Em análises probabilísticas é importante determinar o índice de precisão da média que representa uma estimativa do desvio padrão da média do conjunto de  $N$  observações. Para um conjunto de medições o índice de precisão da média dado pela Eq. (8).

$$S_{\bar{x}} = \frac{S_N}{\sqrt{N}} \quad (8)$$

Várias fontes de erro estão presentes em uma medição. Esses erros estão divididos em três categorias: erros de calibração, erros de aquisição de dados e erros de redução de dados (ABERNETHY *et al.*, 1985). Para levar em conta cada uma dessas  $k$  fontes de erro, haverá um limite de confiança para o erro fixo e para o índice de precisão do erro aleatório que será dado pelas Eqs. (9) e (10).

$$S_N = \sqrt{S_1^2 + S_2^2 + \dots + S_k^2} \quad (9)$$

$$B = \sqrt{B_1^2 + B_2^2 + \dots + B_k^2} \quad (10)$$

onde  $B$  é o limite de confiança para o erro fixo que leva em consideração  $B_k$  fontes de erros e serve para estimar  $\beta$ .

Para o caso de o resultado de um experimento ser função de várias variáveis tem-se que:

$$R = f(x_1, x_2, x_3, \dots, x_i) \quad (11)$$

No caso da Eq. (11) o efeito sobre  $R$  de um erro na medição de  $x_i$  individual pode ser estimado por analogia com a derivada de uma função dada pela Eq. (12) (MOFFAT, 1988). De modo que, uma variação  $\delta x_i$  em  $x_i$  causaria uma variação em  $\delta R_i$  em  $R$ .

$$\delta R_i = \frac{\partial R}{\partial x_i} \delta x_i \quad (12)$$

O efeito da propagação do erro associado a incerteza de medição de todas as variáveis  $x_i$  pode ser determinada combinando a Eq. (12) com a raiz quadrada da soma de todos os termos elevado ao quadrado como mostrado pela Eq. (13) (KLINE e MCCLINTOCK, 1953).

$$\delta_R = \sqrt{\sum_{i=1}^N \left( \frac{\partial R}{\partial x_i} \delta x_i \right)^2} \quad (13)$$

A incerteza  $\delta x_i$  associada ao erro aleatório da variável  $x_i$  pode também ser estimada por uma função de probabilidade dada pela Eq. (14). No caso do uso da Eq. (14) assume-se que o erro aleatório segue um padrão na faixa dentro da qual é possível prever a probabilidade de sua ocorrência.

$$\delta x_i = \frac{t S_N}{\sqrt{N}} \quad (14)$$

onde  $t$  é o coeficiente  $t$  de Student que representa a distribuição de probabilidade da variável aleatória, que compensa a estimativa de  $S_N$  para um processo com poucas medições.

De acordo com CABRAL (2004), é ainda possível falar em erros absolutos e erro relativos, de acordo com a forma como são calculados. Os erros absolutos correspondem à diferença algébrica entre o valor medido e o valor tido como verdadeiro e que podem ser positivos ou negativos. Quando esses erros são positivos diz-se que os seus valores são superiores aos valores que seriam obtidos em uma medição ideal. Por outro lado, se as medições derem um erro inferior ao considerado ideal, diz-se que os erros são negativos. Por vezes, contudo, é muito mais útil apresentar valores relativos, quando se exprimem erros de medições e, sendo assim, a forma mais usual de apresentação é indicar os erros relativos que é expresso em termos de porcentagem. Assim sendo, podemos definir o erro relativo como:

$$Erro [\%] = \frac{V_m - V_v}{V_v} \times 100\% \quad (15)$$

onde  $V_m$  é o valor medido e  $V_v$  é o valor verdadeiro.

# CAPÍTULO 3 – FUNDAMENTOS DO MODELO MATEMÁTICO

As equações governantes para o fluxo de ar externo em torno de um modelo de vagão, pilha e leito de minério de ferro úmido, bem como a transferência de calor e massa dentro desse leito, serão descritas a seguir. Este modelo é baseado na abordagem multicomponente e multifásica Euleriana-Euleriana juntamente com o modelo de meio poroso. O detalhamento das condições do contorno usadas juntamente com as condições de acoplamento na interface para o fluxo externo e meio poroso também são mostrados nessa seção. As considerações a serem apresentadas dizem respeito à transferência de calor, massa e quantidade de movimento durante a secagem convectiva de minério de ferro úmido modelado com um meio poroso. As ferramentas utilizadas para o desenvolvimento desta teoria são os balanços de massa, quantidade de movimento, energia e os princípios de transferência de calor e massa.

O material em secagem é uma mistura de três fases, a saber, partículas sólidas (leito granular, modelado como um meio poroso), líquido (água, que umedece o leito granular) e gás (ar) existente nos poros (interstícios granulares).

## 3.1. EQUAÇÕES GOVERNANTES

As Figura 8 e Figura 9 mostram as geometrias e as coordenadas dos sistemas para os casos estudados, bem como os parâmetros de entrada e as condições de contorno. Para o domínio de fluxo externo, para ambos os casos, assume-se que somente a fase gás escoam nele. O domínio poroso está localizado internamente no domínio de fluxo externo e para o estudo da secagem em vagão e leito de minério, as paredes do vagão e do leito separam os lados do domínio poroso do domínio de fluxo externo e uma região de interface conecta os dois domínios. Para o estudo da secagem em pilha o domínio de fluxo externo interage com o domínio poroso através da interface que separa os dois domínios. A fase água líquida está dispersa no domínio poroso e representa a umidade do meio sólido. A fase gás flui no domínio de fluxo externo paralelamente à direção das interfaces, trocando calor, massa e momento com o domínio poroso através desta interface. O escoamento externo ao meio poroso provoca uma transferência de calor para esse meio que é responsável pela evaporação da fase líquida nesse meio. No interior do domínio poroso o transporte da fase líquida é considerado convectivo e mantido pelas forças

capilares, enquanto o transporte do vapor de água ocorre por difusão à medida que fase água líquida evapora e se mistura na fase gás (LJUNG *et al.*, 2011).

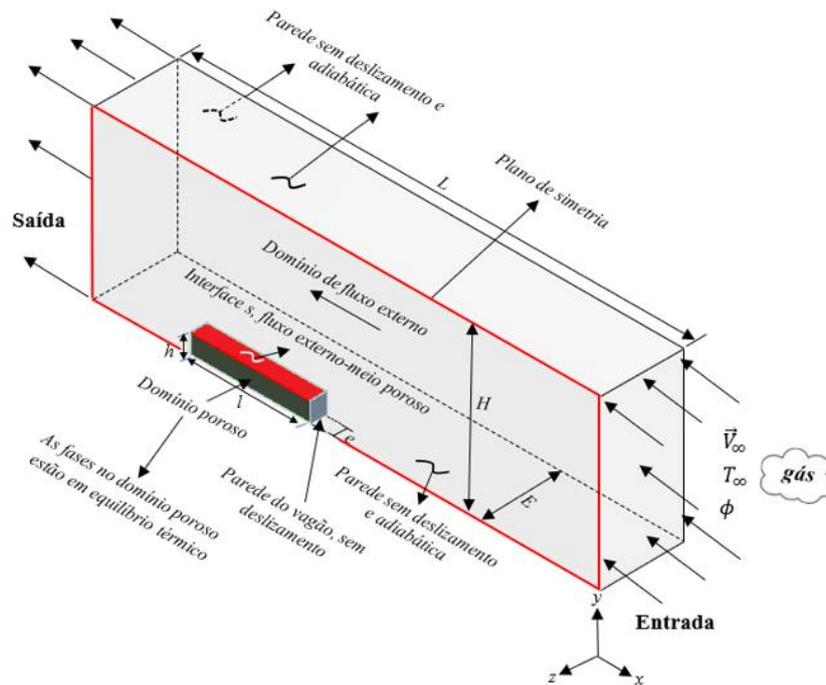


Figura 8 - Geometria e coordenadas do sistema para estudo da secagem em vagão e leito fixo.

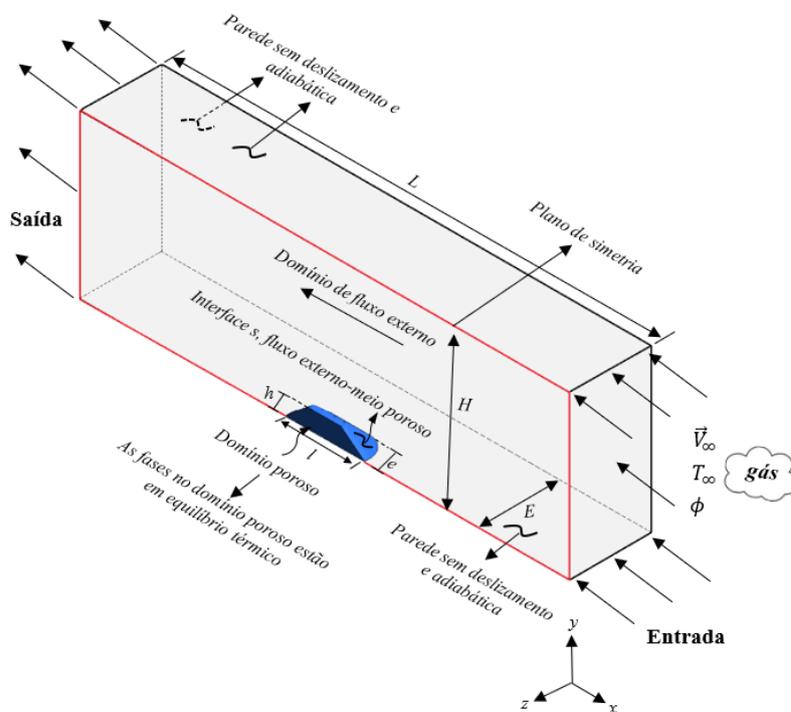


Figura 9 - Geometria e coordenadas do sistema para o estudo da secagem em pilha.

Primeiramente, são adotadas as seguintes hipóteses para o modelo e todas as equações abaixo.

1. As fases sólida (*s*), líquida (*l*) e gás (*g*) são representadas por suas frações de volume. A fase gás se comporta como um gás ideal.
2. A fase gás é o ar úmido e consiste em uma mistura de ar seco e vapor de água representado por suas frações mássicas;
3. Tanto as frações de volume quanto as de massa são funções contínuas no espaço e no tempo;
4. A fase sólida é modelada como um leito poroso fixo, e a distribuição do tamanho dos poros é uniforme e não muda durante o processo de secagem;
5. Na interface dos domínios (fluxo externo-meio poroso), o vapor de água está em equilíbrio termodinâmico e em estado saturado;
6. O meio poroso é isotrópico e as fases presentes neste domínio são consideradas em equilíbrio térmico;
7. A força da gravidade dentro dos poros é desprezada, pois seus efeitos são muito fracos em comparação com os da força capilar;
8. O escoamento externo da fase gás é considerado turbulento, enquanto o escoamento das fases dentro do minério de ferro (leito poroso) é laminar.

As equações de conservação da massa, quantidade de movimento e energia para o domínio de fluxo externo são dadas por (GAO *et al.*, 2018):

$$\nabla \cdot (\vec{V}_g) = 0 \quad (16)$$

$$\rho_g \frac{\partial (\vec{V}_g)}{\partial t} + \rho_g (\nabla \cdot \vec{V}_g \vec{V}_g) = -\nabla p + \nabla \cdot \bar{\bar{\tau}}_g + \dot{m} \vec{V}_g \quad (17)$$

$$\rho_g \frac{\partial (h_g)}{\partial t} + \rho_g \nabla \cdot (\vec{V}_g h_g) - \nabla \cdot (k_g \nabla T) = Q \quad (18)$$

onde  $\vec{V}_g$  é a velocidade do ar (*m/s*);  $\rho_g$  é a massa específica do ar úmido (*kg/m<sup>3</sup>*); *p* é a pressão estática (*Pa*);  $\bar{\bar{\tau}}_g$  é o tensor de Reynolds da fase gás;  $\dot{m} \vec{V}_g$  representa o termo fonte de transferência de momento devido à transferência de massa da porção da fase líquida que evapora e é absorvida na superfície do leito para o fluxo de ar externo, onde  $\dot{m}$  é o fluxo de massa de vapor de água na interface para o fluxo externo (*kg/m<sup>2</sup>·s*);  $h_g$  é a entalpia específica da fase gás (*J/kg*); *Q* é o termo fonte de troca de calor por convecção entre as

fases na interface fluxo externo-meio poroso;  $k_g$  é a condutividade térmica da mistura da fase gás ( $W/m \cdot K$ ) e  $T$  é a temperatura ( $K$ ).

O ar úmido escoando no domínio de fluxo externo é uma mistura de ar seco e vapor d'água; a equação de balanço de massa para o vapor de água presente no ar úmido é dada pela Eq. (19) (GAO *et al.*, 2018). A transferência de massa por difusão na Eq. (19) é negligenciada, e a convecção é considerada o mecanismo de transferência de massa dominante para à velocidade do fluxo de ar adotada neste estudo

$$\rho_g \frac{\partial(\gamma_v)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_g \vec{V}_g \gamma_v) = 0 \quad (19)$$

onde  $\gamma_v$  define a fração mássica de vapor de água presente na mistura da fase gás.

A relação entre as frações mássicas da mistura binária que compõe o ar úmido é dada por:

$$\gamma_{ar} + \gamma_v = 1 \quad (20)$$

onde  $\gamma_{ar}$  representa a fração mássica de ar seco presente na mistura da fase gás.

O tensor de Reynolds,  $\bar{\tau}_g$ , é expresso pela Eq. (21) (GAO *et al.*, 2018) calculado usando o modelo de turbulência  $k-\varepsilon$  realizável para o estudo em vagão e leito fixo e modelo  $k-\omega$  SST para o estudo em pilha para simular a natureza turbulenta dos escoamentos. Os modelos de turbulência  $k-\varepsilon$  e  $k-\omega$  são mais fáceis de implementar em simulações transientes do que em simulações de estado estacionário, particularmente em simulações de sistemas de secagem (AFSHAR *et al.*, 2019).

$$\bar{\tau}_g = \mu_g \left[ (\nabla \vec{V}_g + \nabla \vec{V}_g^T) \right] \quad (21)$$

onde  $\mu_g$  é a viscosidade dinâmica da fase gás ( $Pa \cdot s$ ) e  $\vec{V}_g^T$  é a transposta do tensor gradiente de velocidade da fase gás ( $m/s$ ).

A entalpia específica do ar úmido,  $h_g$ , está relacionada com a temperatura do sistema e com os componentes individuais da mistura (ar seco e vapores de água) como segue, (ALI *et al.*, 2017):

$$dh_g = c_{p,g} \int_{T_{ref}}^T dT \quad (22)$$

$$h_g = \sum_{i=1}^N \gamma_i h_i \quad (23)$$

onde  $c_{p,g}$  é o calor específico do gás ( $J/kg \cdot K$ ), que é considerado constante em relação à temperatura do gás, pois não varia significativamente dentro da faixa de temperaturas considerada.

A massa específica do gás é modelada usando a lei dos gases ideais em função da temperatura, dada por (ALI *et al.*, 2017):

$$\rho_g = \frac{p \sum M_{w,i} \gamma_i}{\Re T_g} \quad (24)$$

onde  $M_{w,i}$  é o peso molecular do componente  $i$  da mistura ( $kg/mol$ );  $\Re$  é a constante do gás ideal ( $m^3 \cdot Pa/mol \cdot K$ ) e  $T_g$  é a temperatura do gás (K).

A fase sólida é modelada como um meio poroso, cujo poros são ocupados pelas fases líquida (umidade) e gás (ar úmido). A dissolução do ar na água é desprezada e esses dois fluidos são imiscíveis. De acordo com ZHU *et al.* (2021), quando a velocidade do escoamento no meio poroso é muito lenta, os efeitos da turbulência e da resistência inercial podem ser desprezados. Para um leito poroso fixo, as equações de conservação de massa, conservação de momento e conservação de energia são dadas abaixo.

A equação de continuidade para as fases líquida e gás são (LJUNG *et al.*, 2011):

$$\varepsilon \frac{\partial(\alpha_l \rho_l)}{\partial t} + \varepsilon \nabla \cdot (\alpha_l \rho_l \vec{v}_l) = -\dot{m} \quad (25)$$

$$\varepsilon \frac{\partial(\alpha_g \rho_g)}{\partial t} + \varepsilon \nabla \cdot (\alpha_g \rho_g \vec{v}_g) = \dot{m} \quad (26)$$

onde  $\varepsilon$  é a porosidade do meio poroso;  $\rho_l$  e  $\rho_g$  são as massas específicas das fases água e gás, respectivamente ( $kg/m^3$ );  $\alpha_l$  e  $\alpha_g$  são as frações volumétricas das fases água e gás, respectivamente;  $\vec{v}_l$  e  $\vec{v}_g$  são as velocidades físicas das fases água e gás, respectivamente ( $m/s$ ) e  $\dot{m}$  é o termo fonte que representa a massa de vapor d'água adicionada à fase gasosa devido à vaporização da umidade das gotas/partículas na interface fluxo externo-meio poroso ( $kg/m^3 \cdot s$ ).

A equação de balanço de massa para o vapor de água presente na mistura da fase gasosa no meio poroso é descrita por (TAYLOR e KRISHNA, 1993):

$$\varepsilon \frac{\partial(\alpha_g \rho_g \gamma_v)}{\partial t} - \nabla \cdot (\alpha_g \rho_g D_{v,m} \nabla \gamma_v) = \dot{m} \quad (27)$$

onde  $D_{v,m}$  é o coeficiente de difusão de massa do vapor de água na mistura de fase gás ( $m^2/s$ ).

As equações de momento para as fases líquida e gás em um meio poroso são (ZHU *et al.*, 2021):

$$\begin{aligned} \varepsilon \frac{\partial(\alpha_l \rho_l \vec{v}_l)}{\partial t} + \varepsilon \rho_l \nabla \cdot (\alpha_l \vec{v}_l \vec{v}_l) = -\varepsilon \alpha_l \nabla(p - p_c) + \varepsilon \nabla \cdot [\alpha_l \mu_l (\nabla \vec{v}_l + \nabla \vec{v}_l^T)] \\ - \alpha_l^2 \varepsilon^2 \frac{\mu_l \vec{v}_l}{KK_{r,l}} - \dot{m} \vec{v}_l \end{aligned} \quad (28)$$

$$\begin{aligned} \varepsilon \frac{\partial(\alpha_g \rho_g \vec{v}_g)}{\partial t} + \varepsilon \rho_g \nabla \cdot (\alpha_g \vec{v}_g \vec{v}_g) = -\varepsilon \alpha_g \nabla(p - p_c) + \nabla \cdot [\varepsilon \alpha_g \mu_g (\nabla \vec{v}_g + \nabla \vec{v}_g^T)] \\ - \alpha_g^2 \varepsilon^2 \frac{\mu_g \vec{v}_g}{KK_{r,g}} + \dot{m} \vec{v}_g \end{aligned} \quad (29)$$

onde  $p_c$  é a pressão capilar da fase molhante (água);  $\mu_l$  e  $\mu_g$  são as viscosidades dinâmicas da fase líquida e gás, respectivamente ( $Pa \cdot s$ );  $K$  é a permeabilidade absoluta do meio poroso ( $m^2$ );  $K_{r,l}$  e  $K_{r,g}$  são as permeabilidades relativas das fases líquido e gás, respectivamente e  $\dot{m} \vec{v}_l$  e  $\dot{m} \vec{v}_g$  representa o termo fonte de transferência de momento devido a transferência de massa da fase líquido para a fase vapor, respectivamente.

A equação de energia para as fases presentes no meio poroso é (LJUNG *et al.*, 2011, GAO *et al.*, 2018):

$$\frac{\partial}{\partial t} [\alpha_g \rho_g h_g + \alpha_l \rho_l h_l + (1 - \varepsilon) \rho_s h_s] - \nabla \cdot (k_{eff} \nabla T) = \varphi_s \quad (30)$$

onde  $h_l$  e  $h_s$  são as entalpias específicas das fases líquido e minério de ferro, respectivamente ( $J/kg$ );  $\rho_s$  é a massa específica do minério de ferro ( $kg/m^3$ );  $k_{eff}$  é a condutividade efetiva de todas as fases incluindo água, gás e meio poroso ( $W/m \cdot K$ ) e  $\varphi_s$  representa o termo fonte de transferência líquida de calor devido a evaporação. Na Eq. (30) o termo convectivo é desprezado e a condução é considerada o mecanismo de transferência de calor dominante devido à baixa velocidade intersticial.

As relações entre as frações volumétricas, porosidade e umidade são as seguintes:

$$\alpha_g + \alpha_l + \alpha_s = 1 \quad (31)$$

$$\alpha_s = 1 - \varepsilon \quad (32)$$

$$U_l = \frac{\rho_l \alpha_l}{\rho_s \alpha_s} \quad (33)$$

A porosidade,  $\varepsilon$ , pode ser definida através da relação:

$$\varepsilon = \left( 1 - \frac{\rho_{ap}}{\rho_s} \right) \quad (34)$$

onde  $\rho_{ap}$  é a massa específica aparente do sólido poroso ( $kg/m^3$ ) e  $\rho_s$  é a massa específica real do meio poroso ( $kg/m^3$ ).

Para os casos, onde o escoamento no meio poroso é bifásico, a forma generalizada da lei de Darcy é sempre utilizada para descrever o escoamento (GAO *et al.*, 2018). Para as fases líquida e gás, as Eqs. (35) e (36) expressam as velocidades das fases com base na lei de Darcy, desconsiderando o termo de perda inercial (GAO *et al.*, 2018).

$$\vec{v}_l = -\frac{KK_{r,l}}{\mu_l} \nabla p_c \quad (35)$$

$$\vec{v}_g = -\frac{KK_{r,g}}{\mu_g} \nabla p_g \quad (36)$$

onde  $p_g$  é a pressão do gás nos poros ( $Pa$ ).

Substituindo as Eqs. (35) e (36) nas Eqs. (25) e (26) a equação de conservação de massa para as fases líquida e gasosa pode ser reescrita como:

$$\frac{\partial(\varepsilon\alpha_l\rho_l)}{\partial t} + \nabla \cdot \left( -\varepsilon\alpha_l\rho_l \frac{KK_{r,l}}{\mu_l} \nabla p_c \right) = -\dot{m} \quad (37)$$

$$\frac{\partial(\varepsilon\alpha_g\rho_g)}{\partial t} + \nabla \cdot \left( -\varepsilon\alpha_g\rho_g \frac{KK_{r,g}}{\mu_g} \nabla p_g \right) = \dot{m} \quad (38)$$

A permeabilidade absoluta do meio poroso,  $K$ , é estimada com base na equação de Ergun dada por:

$$K = \frac{d_p^2}{150} \frac{\varepsilon^3}{(1-\varepsilon)^2} \quad (39)$$

onde  $d_p$  é o diâmetro médio da partícula de minério de ferro ( $m$ ).

Com base na correlação da lei de potência de Corey, a permeabilidade relativa das fases é expressa da seguinte forma (CRUZ, 2015):

$$K_{r,l} = K_{(r,l)ref} \left( \frac{S_l - S_{(ir)_l}}{1 - S_{(ir)_l}} \right)^{n_l} \quad (40)$$

$$K_{r,g} = K_{(r,g)ref} \left( \frac{S_g}{1 - S_{(ir)_l} - S_{(ir)_g}} \right)^{n_g} \quad (41)$$

onde  $K_{(r,l)ref}$  e  $K_{(r,g)ref}$  são as permeabilidades relativas de referência no início do processo para as fases líquida e gás, respectivamente;  $S_l$  e  $S_g$  são as saturações volumétricas das fases líquida e gás no meio poroso, respectivamente;  $S_{(ir)_l}$  e  $S_{(ir)_g}$  são as saturações irreduzíveis das fases líquida e gás no meio poroso, respectivamente e  $n_l$  e  $n_g$  são os expoentes de Corey das fases líquida e gás, respectivamente.

A saturação volumétrica,  $S_f$ , define a fração de volume ocupada por cada fase fluida  $f$  (g, gás; l, líquido (água)) nos poros do leito poroso e pode ser expressa através da fração volumétrica como segue (KOWALSKI *et al.*, 2007):

$$S_f = \frac{\alpha_f}{\varepsilon} \quad (42)$$

Para a escala macro do poro, a pressão capilar é geralmente assumida como uma função da saturação da fase molhante (água) (ALAZAIZA *et al.*, 2019), e seu valor é modelado aqui com base no modelo de Van Genuchten mostrado na Eq. (43) (WANG *et al.*, 2021).

$$p_c = p_0 \left[ \left( \frac{S_l - S_{(ir)_l}}{1 - S_{(ir)_l}} \right)^{-\frac{1}{m}} - 1 \right]^{1/n_G} \quad (43)$$

onde  $p_0$  é a pressão de entrada do gás ( $Pa$ );  $m = 1 - 1/n_G$  é o fator de forma da curva de pressão capilar e  $n_G$  é o fator de distribuição do tamanho dos poros. Para este estudo, os valores  $p_0 = 667$  Pa e  $n_G = 2,68$  foram assumidos com base nos estudos de CARSEL e PARRISH (1998).

O coeficiente de difusão de massa,  $D_{v,m}$ , do vapor de água na mistura da fase gás da Eq. (27) é dado por (TAYLOR e KRISHNA, 1993):

$$D_{v,m} = \frac{1 - \chi_v}{\chi_v / D_v} \quad (44)$$

onde  $D_v$  é a difusividade de massa do vapor de água no ar assumida aqui igual a  $0,26 \cdot 10^{-4}$  m<sup>2</sup>/s para uma temperatura de referência de 25 °C (INCROPERA *et al.*, 2019) e  $\chi_v$  é a fração molar do vapor de água.

A condutividade efetiva do meio poroso,  $k_{eff}$ , da Eq. (30) é definido como uma combinação da condutividade das três fases envolvidas, definido como (LJUNG *et al.*, 2011, ZHU *et al.*, 2021):

$$k_{eff} = \alpha_g k_g + \alpha_l k_l + (1 - \varepsilon) k_s \quad (45)$$

onde  $k_g$ ,  $k_l$  e  $k_s$  são as condutibilidades térmicas das fases gás, líquido e material sólido, respectivamente ( $W/m \cdot K$ ).

### 3.2. EVAPORAÇÃO INTERNA NO MEIO POROSO

A taxa de evaporação interna no leito poroso do minério de ferro é calculada de acordo com o modelo de LEE (1979):

$$\dot{m} = \beta \alpha_l \rho_l \frac{T_l - T_{sat}}{T_{sat}} \quad (46)$$

onde  $T_l$  é a temperatura da fase líquida (K);  $T_{sat}$  é a temperatura de saturação da fase líquida (K) e  $\beta$  é um coeficiente conhecido como tempo de relaxação, definido como (LEE, 1979):

$$\beta = \frac{6}{d_l} \lambda \sqrt{\frac{M_l}{2\pi \mathfrak{R} T_{sat}}} h_L \left( \frac{\alpha_v \rho_v}{\rho_l - \rho_v} \right) \quad (47)$$

onde  $\lambda$  é o coeficiente de acomodação que representa a parcela de líquido que evapora e é absorvida na superfície pelo fluxo de gás; assume-se aqui igual a 1 e que leva em consideração condições de quase equilíbrio;  $d_l$  é o diâmetro da fase líquida dispersa (m);  $M_l$  é o peso molecular do líquido (kg/kmol);  $\mathfrak{R}$  é a constante universal dos gases (J/mol·K) e  $h_L$  é o calor latente de vaporização (J/kg). O coeficiente  $\beta$  deve ser ajustado com base em dados experimentais e, neste estudo, é assumido como  $5 \times 10^{-3}$  para o estudo em vagão,  $5 \times 10^{-1}$  para o leito fixo e 1 para o estudo em pilha.

A diminuição da energia interna no meio poroso devido à evaporação da água é dada por:

$$\varphi_s = -\dot{m} h_L \quad (48)$$

### 3.3. CONDIÇÕES DE CONTORNO

Para as paredes do vagão em contato com o escoamento externo, adota-se a condição de não deslizamento e para a troca de calor é assumida a condição de parede com acoplamento de dois lados, pois compartilha uma interface de zona sólida com zonas de fluido. Para essa condição, tem-se:

$$-k_w \frac{\partial T}{\partial \hat{n}} = H_g [T_{g,\infty} - T_w(t)] \quad (49)$$

onde  $H_g$  é o coeficiente de transferência de calor por convecção ( $W/m^2 \cdot K$ ) do escoamento externo da fase gás sobre o vagão resolvido internamente pelo pacote computacional para a condição de parede do tipo acoplada;  $\hat{n}$  é o vetor unitário normal à interface;  $k_w$  é a condutividade térmica do vagão ( $W/m \cdot K$ );  $T_{g,\infty}$  é a temperatura ( $^{\circ}C$ ) da fase gás na corrente livre no escoamento externo, e  $T_w$  é a temperatura ( $^{\circ}C$ ) do vagão no tempo  $t$ .

A transferência de calor da parede do vagão para o meio poroso ocorre por difusão e é dada por:

$$q_s'' = k_{eff} (\partial T / \partial \hat{n})_s \quad (50)$$

onde  $q_s''$  é o fluxo de calor a partir interface e/ou parede no sentido interno do leito poroso ( $W/m^2 \cdot K$ ) e  $k_{eff}$  é a condutibilidade térmica efetiva do meio poroso.

O termo  $Q$  da troca de calor por convecção entre as fases na Eq. (18) define a perda de energia térmica através da interface entre as fases. Este termo na equação de energia pode ser calculado com base na diferença de temperatura entre o fluxo livre e a interface  $s$  da seguinte forma (BALA, 2017):

$$Q = H_{lg} A_i (T_s - T_{g,\infty}) \quad (51)$$

onde  $T_s$  é a temperatura da fase dispersa na interface  $s$  ( $^{\circ}C$ );  $A_i$  é a área superficial específica da fase dispersa na interface ( $m^{-1}$ ) definida pela Eq. (52) (LJUNG *et al.*, 2011) e  $H_{lg}$  é o coeficiente de transferência de calor por convecção entre as fases ( $W/m^2 \cdot K$ ) e é dado pela Eq. (53).

$$A_i = \frac{6(1-\varepsilon)}{d_p} \quad (52)$$

$$H_{lg} = \frac{k_g Nu_g}{d_p} \quad (53)$$

onde  $Nu_g$  é o número de Nusselt para a fase gás e  $d_p$  é o diâmetro da fase dispersa na interface, nesse caso a umidade.

O coeficiente de transferência de calor por convecção entre as fases é determinado usando o modelo de HUGHMARK (1967) para o número de Nusselt:

$$Nu_g = 2 + 0.27 Re_g^{0.62} Pr^{1/3} \quad 776.06 \leq Re_g, \quad 0 \leq Pr < 250 \quad (54)$$

onde  $Re_g$  é o número de Reynolds da fase gás e  $Pr$  é o número de Prandtl.

A transferência líquida de calor para a superfície do sólido exposto à secagem convectiva é dada pela diferença entre a energia transferida por convecção e o calor perdido por evaporação na superfície:

$$\varphi_s = H_{lg} A_i (T_{g,\infty} - T_s) - \dot{m} h_L \quad (55)$$

A transferência de massa de vapor de água por convecção através da interface ( $kg/m^2 \cdot s$ ),  $s$ , é mantido pela diferença de concentração entre o vapor saturado na interface  $s$  e a umidade relativa circundante  $\phi$  e pode ser calculado pela Eq. (56) (INCROPERA *et al.*, 2019),

$$\dot{m} = \frac{H_m A_i}{\Re} \left[ \frac{M_l \cdot p_{v,sat}(T_s)}{T_s} - \frac{M_l \cdot p_{v,sat}(T_{g,\infty}) \cdot \phi}{T_{g,\infty}} \right] \quad (56)$$

onde  $H_m$  é o coeficiente de transferência de massa por convecção do vapor de água para a fase gás ( $m^2/s$ ), estimado com base na analogia de transferência de calor por convecção do modelo de HUGHMARK (1967);  $p_{v,sat}(T_s)$  é a pressão de saturação do vapor na temperatura de interface  $T_s$ ,  $p_{v,sat}(T_{g,\infty})$  é a pressão de saturação do vapor na temperatura do fluxo externo  $T_{g,\infty}$  e  $\phi$  é a umidade relativa do ar.

### 3.4. CONDIÇÕES DE ACOPLAMENTO NA INTERFACE “s”

Na interface,  $s$ , do meio poroso e fluxo externo, assume-se que apenas a fase gás atravessa esta interface e, portanto, o balanço de massa para o fluxo de gás é (GAO *et al.*, 2018):

$$-(\dot{m}_g)_{meio\ poroso} = (\dot{m}_g)_{fluxo\ externo} \quad (57)$$

A continuidade da concentração de vapor e do fluxo de vapor é descrita por (GAO *et al.*, 2018):

$$-\left[-\alpha_g \rho_g D_{v,m} \nabla \gamma_v\right]_{meio\ poroso} \cdot \hat{n} = \left[\rho_g \vec{V}_g \gamma_v\right]_{fluxo\ externo} \cdot \hat{n} \quad (58)$$

onde  $\hat{n}$  é o vetor unitário normal à interface. Assim, a fração de massa do vapor na interface  $s$  é dada por (GAO *et al.*, 2018):

$$(\gamma_v)_{meio\ poroso} = (\gamma_v)_{fluxo\ externo} \quad (59)$$

Para o balanço de energia em cada ponto na interface  $s$ , a exigência de conservação de energia estabelece o seguinte (GAO *et al.*, 2018):

$$-\left[-(k_{eff} \nabla T_s)\right]_{meio\ poroso} \cdot \hat{n} = \left[\rho_g \vec{V}_g h_g - (k_g \nabla T_g)\right]_{fluxo\ externo} \cdot \hat{n} \quad (60)$$

$$(T_s)_{meio\ poroso} = (T_s)_{fluxo\ externo} \quad (61)$$

## CAPÍTULO 4 – MODELOS CFD E EXPERIMENTOS DE VALIDAÇÃO

Para validar o modelo matemático, foram utilizados teste em túnel de vento. Os testes foram realizados usando dois modelos de tuneis de vento com ilustração esquemática das suas partes e componentes mostrados nas Figura 10 e Figura 11. O túnel de vento mostrado na Figura 10 é um túnel de vento convencional desenvolvido por SANTOS JUNIOR (2015) com seção de teste de 1,80 m de comprimento e seção aberta de 0,600 x 0,600 m que atinge uma velocidade máxima de 30 m/s. O túnel de vento mostrado na Figura 11 foi desenvolvido por SILVA (2021) e é um túnel de vendo de secagem com seção de teste que mede 1 m de comprimento e velocidade máxima de 11 m/s com seção transversal aberta de 0,300 x 0,200 m. O túnel de vento de secagem desenvolvido por SILVA (2021) pode atingir até 85 °C para o ar de secagem e é equipado com diversos controladores e sensores que permitem um controle adequado das condições ambientais que influencia na secagem do minério de ferro, tais como, temperatura e umidade relativa.

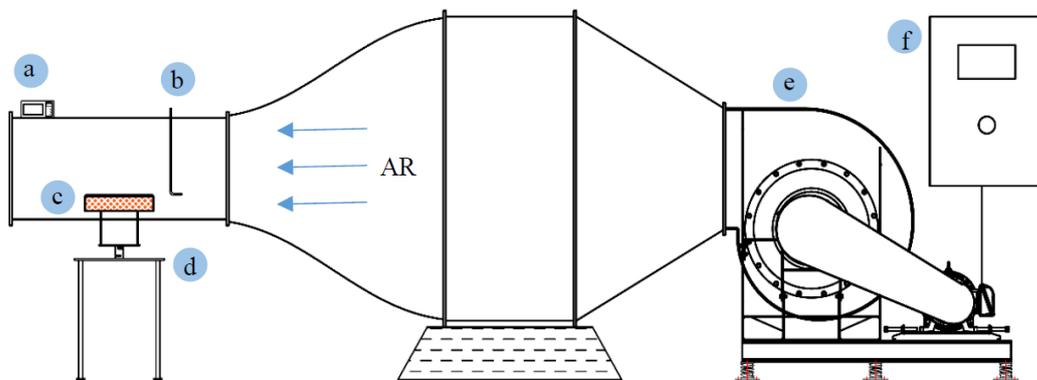


Figura 10 - Túnel de vento desenvolvido por SANTOS JUNIOR (2015) para testes experimentais de secagem: (a) termo-higrômetro; (b) tubo de pitot, (c) modelo de vagão; (d) sistema de suporte do vagão ou pilha; (e) ventilador centrífugo; (f) inversor de frequência.

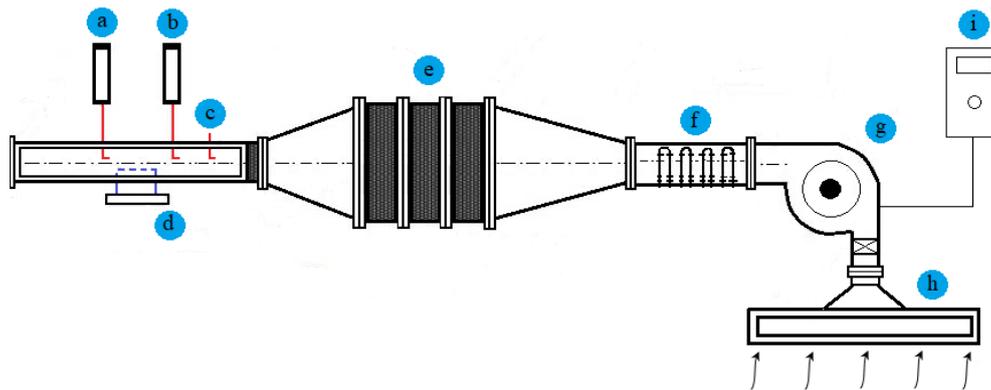


Figura 11 - Túnel de vento secador desenvolvido por SILVA (2021) para os testes experimentais de secagem: (a) sensor de temperatura; (b) sensor de umidade relativa do ar; (c) tubo de pitot; (d) sistema de pesagem + leito de secagem; (e) seção de estabilização do escoamento; (f) seção de aquecimento com resistências elétricas; (g) ventilador centrífugo; (h) seção de desumidificação do ar de entrada no túnel e (i) inversor de frequência.

A descrição experimental do processo de secagem utilizando minério de ferro em túnel de vento está dividida em 4 Casos, cada um com objetivos diferentes de avaliação do processo de secagem. Para todos os casos, a preparação das amostras de minério de ferro úmido fora realizada para uma umidade de referência de 8%. A descrição detalhada de cada caso utilizado neste estudo é dada nas seções a seguir.

#### 4.1. CASO 1 – ESCOAMENTO TRANSIENTE SOBRE MODELO DE VAGÃO

##### 4.1.1. Descrição

O experimento do Caso 1 é baseado nos trabalhos de SANTOS *et al.* (2023) e diz respeito ao estudo do processo de secagem em vagão utilizando um sensor de umidade. Para esse experimento foram utilizados o túnel de vento desenvolvido por SANTOS JUNIOR (2015) e o modelo de vagão utilizado media 0,430 m de comprimento, 0,120 m de largura e 0,0724 m de altura na escala de 1:20 do modelo real utilizado na Estrada de Ferro que liga Vitória no estado do Espírito Santos ao Estado de Mina Gerais. A Figura 12 mostra a disposição do modelo de vagão na seção de teste do túnel de vento.



Figura 12 - Disposição do modelo de vagon no interior do túnel de vento.

#### 4.1.2. Material e Preparação da Amostra Úmida

O material utilizado neste experimento foi o minério de ferro do tipo *pellet feed*. A caracterização física do material é apresentada a seguir e foi realizado no Laboratório da Universidade Federal do Pará (UFPA) no Núcleo de Desenvolvimento Amazônico em Engenharia (NADE) do grupo de pesquisa em Fluidodinâmica e Particulado (FluidPar) localizados na cidade de Tucuruí-PA.

A distribuição granulométrica do tamanho das partículas das amostras para o material foi determinada com base na norma ABNT NBR NM 248 (2003). O resultado da distribuição de tamanho é mostrado na Figura 13 , onde é indicado um tamanho médio de partícula entre  $50 \mu\text{m}$  e  $93 \mu\text{m}$  para o *pellet feed*. A massa específica foi medida usando um picnômetro com base na faixa de tamanho médio da granulometria, e foi obtido  $4,68 \text{ g/cm}^3 \pm 0,012$ .

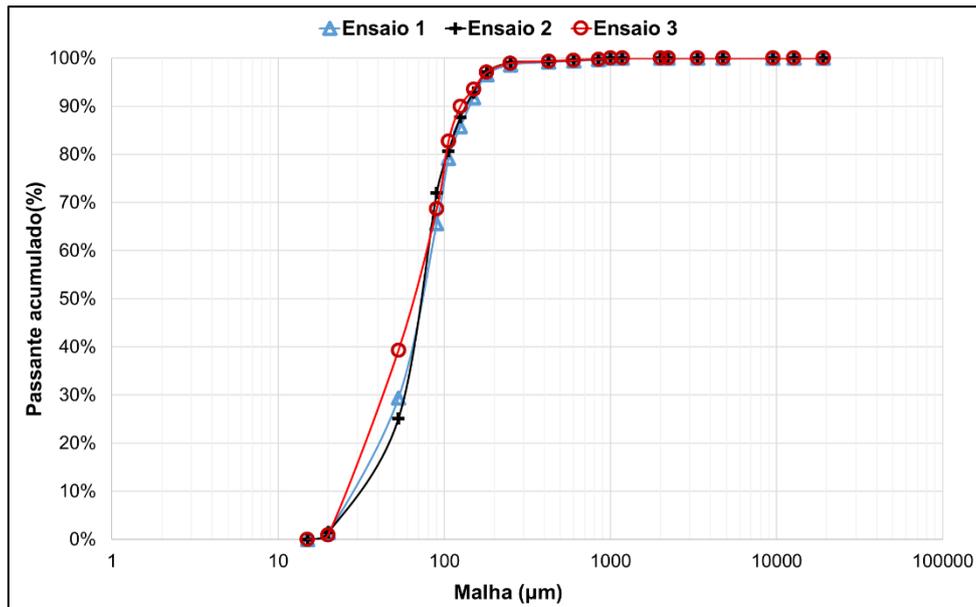


Figura 13 - Distribuição granulométrica das partículas de minério de ferro *tipo pellet feed*.

A massa específica aparente dos materiais foram determinadas com base na Norma ABNT NBR 7181 (2016). A Figura 14 mostra a curva de massa específica aparente obtida para uma umidade entre 0 e 13%. A massa específica aparente do *pellet feed* com 8% de umidade foi de  $\rho_{ap} = 1,50 \text{ g/cm}^3$ .

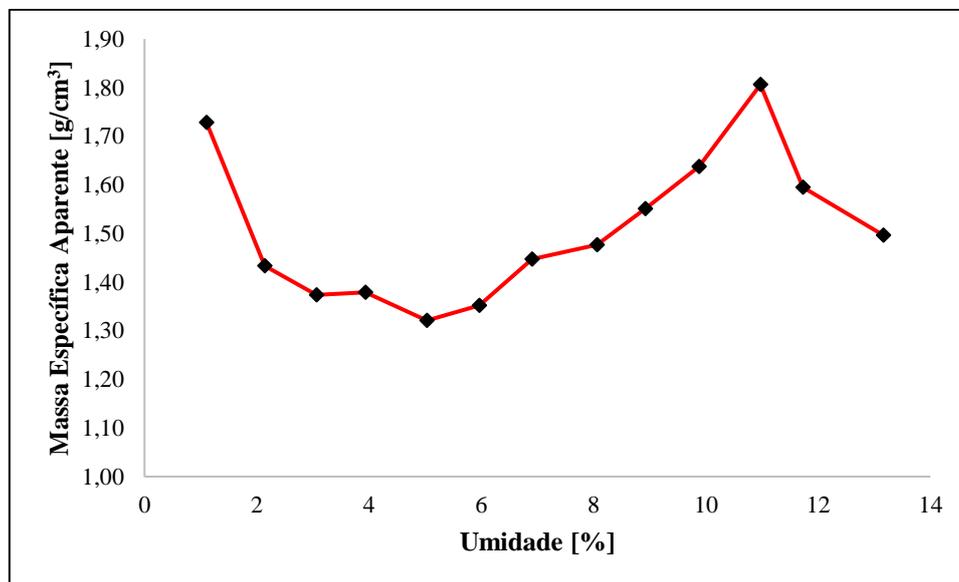


Figura 14 - Curva de massa específica aparente do minério de ferro (SANTOS JUNIOR, 2018).

Segundo LEAL FILHO *et al.* (2011), determinando os valores mínimos e máximos locais de cada curva de massa específica aparente, é possível obter valores limites para

os três tipos de água presentes em um leito de partículas: água adsorvida, água capilar e água livre. Para o pellet feed e sinter feed, a zona capilar de água situou-se entre 5% e 11% de umidade, o que inclui os estados funicular e capilar. O interesse em determinar a curva se concentra na água capilar, cuja pressão é exercida nos interstícios das partículas e ajuda a mantê-las juntas, o que pode levar à inibição da geração de poeira (SANTOS JUNIOR, 2018).

A preparação da amostra úmida de minério para obtenção da umidade de referência de 8% é baseada na metodologia do trabalho de SANTOS JUNIOR (2018) e está ilustrado no desenho esquemático da Figura 15. Primeiro é utilizado uma balança para medir a massa de material seco de minério necessário para preencher todo o modelo do vagão. Em seguida a mesma balança é usada para medir a quantidade de massa de água necessário para obtenção da umidade referência. A determinação da massa de água foi feita utilizando a Eq. (62) da umidade em base úmida. A preparação da amostra úmida é feita utilizando-se um misturador automatizado de velocidade controlável. O material seco é então levado ao misturador e a água é adicionada gradualmente, proporcionando uma mistura homogênea da massa de água com o minério seco. Após concluída a mistura do material, algumas amostras são coletadas e levado ao forno para secagem à 105 °C, durante 24 horas, para verificação da umidade inicial do material. O restante do material é levado à uma bandeja para estratificação do material úmido, que posteriormente será utilizado para o preenchimento do modelo de vagão. O modelo de vagão é preenchido de forma padronizada, seguindo a estratificação do material na bandeja. Cada número da estratificação da bandeja está relacionado com os números do preenchimento do modelo de vagão. Em seguida o modelo de vagão com minério úmido é levado para seção de teste do túnel de vento, onde é iniciado os testes.

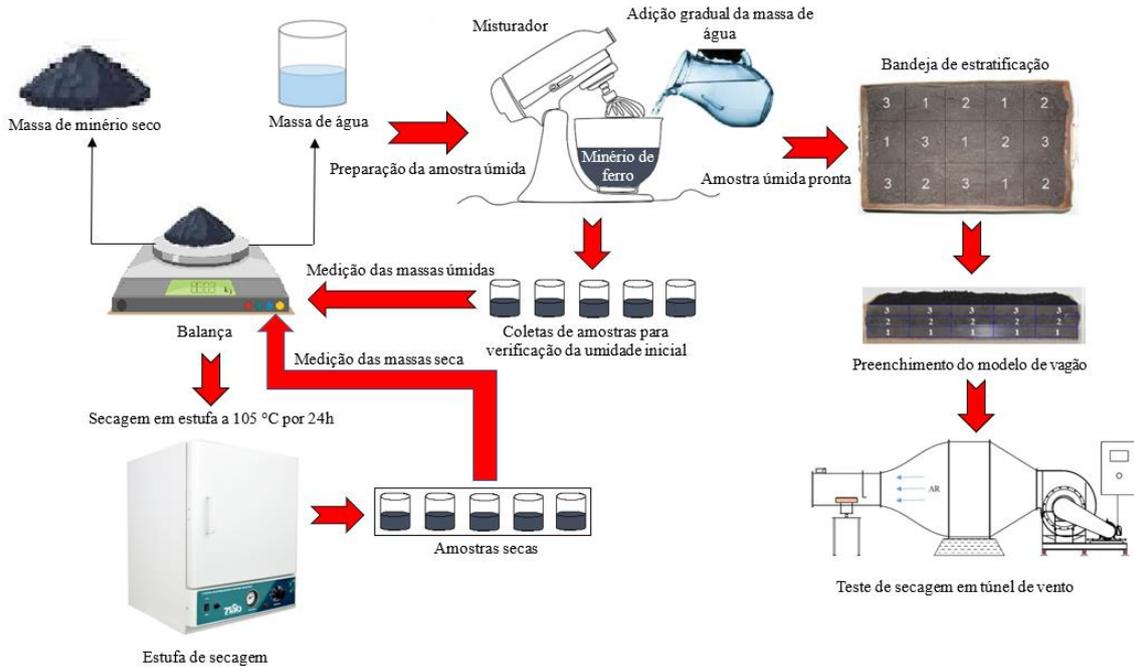


Figura 15 - Preparação da amostra úmida com base na metodologia de SANTOS JUNIOR (2018).

$$U = \frac{M_a}{M_a + M_s} \quad (62)$$

onde  $U$  é a umidade em base úmida,  $M_a$  é a massa de água e  $M_s$  é a massa de material seco.

#### 4.1.3. Detalhamento do Experimento

Neste experimento, o estudo do processo de secagem durou 6 horas e foi realizado para uma velocidade de entrada de ar em um túnel de vento de 50 km/h. Foi utilizado um modelo de vagão em acrílico com um sensor de umidade para medir a umidade do minério de ferro em função das constantes dielétricas da água e do ar. O sensor consistia em placas galvanizadas instaladas internamente nas paredes do vagão e mais um analisador de impedância, um registrador de dados, um display de dados e cabos de conexão do sensor. O objetivo da utilização do sensor foi a de permitir o monitoramento e avaliação da cinética de secagem em tempo real durante toda a secagem em túnel de vento. Uma umidade relativa média de 60% e uma temperatura média do ar ambiente de 32°C foram registradas usando um termo-higrômetro digital para esse teste. A Figura 16 mostra o sensor de umidade instalado dentro do vagão.

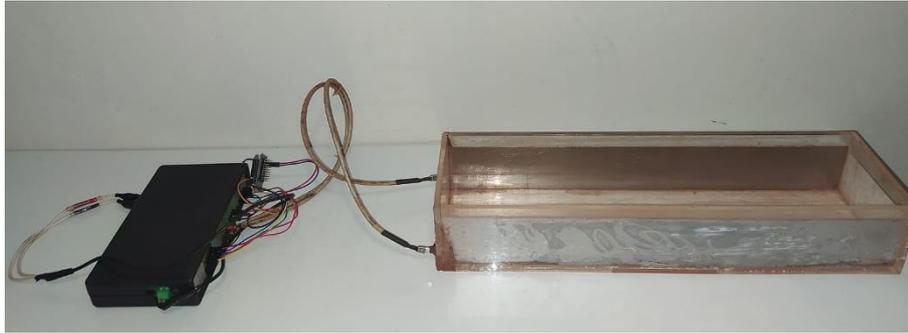


Figura 16 - Sensor de umidade do material instalado no vagão em acrílico.

O sensor foi calibrado para uma leitura precisa da umidade do leito de minério. Os resultados da curva de calibração são apresentados na Figura 17. As incertezas associadas à calibração do sensor foram determinadas com base na metodologia do trabalho de ABERNETHY *et al.* (1985) e seu valor médio foi de 0,03%.

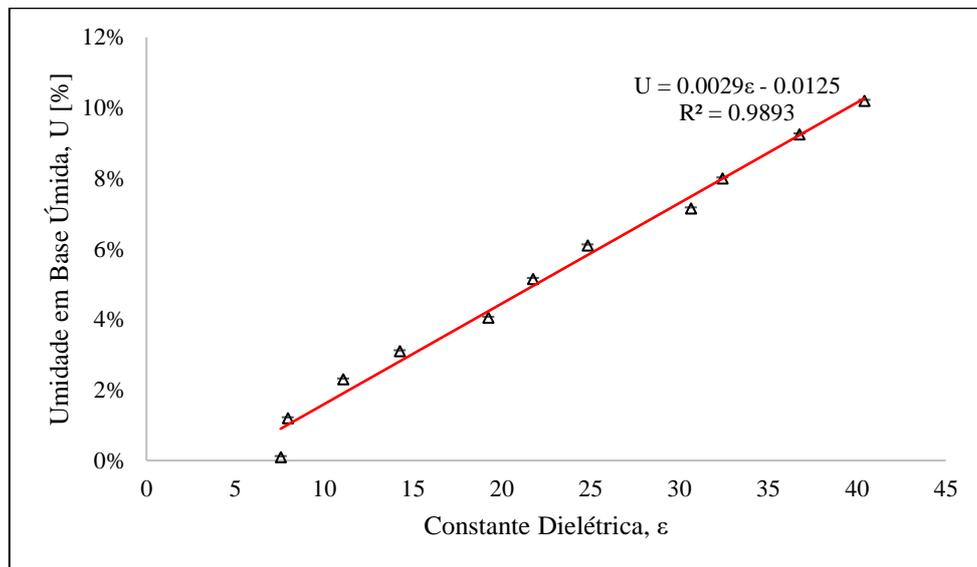


Figura 17 - Curva de calibração para o sensor de umidade.

A cinética de secagem foi avaliada por meio da umidade adimensional calculado por PINTO *et al.* (2020) da seguinte forma:

$$U^* = \frac{U_t - U_e}{U_0 - U_e} \quad (63)$$

onde  $U_t$  é a umidade no tempo  $t$  medido pelo sensor de umidade,  $U_e$  é a umidade de equilíbrio assumido aqui igual a 5,40% para um tempo de secagem durante o transporte em um vagão de 20 horas e  $U_0$  é a umidade inicial.

Neste estudo, os resultados experimentais para umidade adimensional em função do tempo foram ajustados com base no modelo matemático de PAGE (1949), conforme mostrado na Eq. (64).

$$U^* = \exp(-kt^n) \quad (64)$$

onde  $k$  e  $n$  são as constantes do modelo de PAGE (1949) calculadas com base no ajuste dos dados do modelo aos dados experimentais e  $t$  é o tempo medido durante a cinética de secagem. O modelo de PAGE (1949) usado neste trabalho se justifica, pois foi modelo que apresentou melhor ajuste aos dados dos testes experimentais conforme será mostrado a seguir em Resultados.

#### 4.1.4. Parâmetros de Modelagem do Modelo

As propriedades termofísicas iniciais do minério de ferro *pellet feed* (LJUNG *et al.*, 2011) e das fases envolvidas estão listadas na Tabela 1.

Tabela 1 - Dados iniciais das propriedades termofísicas das fases envolvidas.

Propriedades Termofísicas	Fases Envolvidas		
	gás	água	<i>pellet feed</i>
$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	gás ideal	998,20	4.650
$\mu$ (kg/m.s)	$1,88 \cdot 10^{-5}$	$10,03 \cdot 10^{-4}$	-
$c_p$ (J/kg.K)	1.007	4.182	586
$k$ (W/m.K)	$2,63 \cdot 10^{-2}$	0,60	5,27

As propriedades do meio poroso do minério de ferro *pellet feed* estão listadas na Tabela 2 para cada uma das fases envolvidas. A porosidade do meio foi determinada com base na Eq. (34) e nos dados de caracterização do material mostrados nas Figura 13 e Figura 14. A permeabilidade absoluta foi estimada com base na (39) e as permeabilidades relativas de referências das fases com base nas Eq. (40) e Eq. (41).

Tabela 2 - Propriedades do meio poroso de interesse para o minério de ferro *pellet feed*.

Parâmetros do Meio Poroso	<i>pellets feed</i>
Umidade do meio, $U$ (kg/kg)	0,08
Diâmetro da partícula, $d_p$ (m)	$5 \cdot 10^{-5}$
Porosidade, $\varepsilon$	0,60
Permeabilidade absoluta, $K$ (m <sup>2</sup> )	$7,29 \cdot 10^{-11}$
Permeabilidade relativa de referência do gás, $K_{(r,g)ref}$	0,30

Permeabilidade relativa de referência da água, $K_{(r,l)ref}$	0,40
Saturação residual do gás, $S_{(ir)g}$	0,10
Saturação residual da água, $S_{(ir)l}$	0,20
Expoente de Corey do gás, $n_g$	3
Expoente de Corey da água, $n_l$	3

As condições iniciais para o domínio de fluxo externo são mostradas na Tabela 3. Inicialmente as velocidades no domínio do fluxo externo é zero e a fase gás está a uma temperatura de 32 °C e 1 atm e, para essa condição, a fração mássica do vapor de  $\gamma_v = 0,011747$  corresponde à umidade relativa do ar de  $\phi = 60\%$ .

Tabela 3 - Condições iniciais para o domínio de fluxo externo – Caso 1.

Simulação	$T$	$\alpha_g$	$\gamma_v$	$\vec{V}$
	32 °C	1,00	$117,47 \cdot 10^{-4}$	0 m/s

A Tabela 4 mostra as condições de contorno usadas para o domínio de fluxo externo. É considerado uma velocidade e temperatura de entrada da fase gás de 50 km/h e 32 °C, respectivamente, e um tempo físico de secagem de 6 horas.

Tabela 4 - Condições de contorno para o domínio de fluxo externo – Caso 1.

Simulação	$\vec{V}_{entrada}$	$T_{entrada}$	Parede	Condições térmicas da parede	Saída
(50 km/h)	13,88 m/s	32 °C	Sem deslizamento	Adiabático	Pressão de saída

As condições iniciais e de contorno para o conjunto vagão-minério de ferro são mostrados nas Tabela 5 e Tabela 6. A fração volumétrica da água de  $\alpha_l = 0,15$  é o valor correspondente a uma umidade de aproximadamente 8% para o leito poroso calculado com base na Eq. (33) e dos dados mostrados nas Tabela 1 e Tabela 2. A porosidade do minério de ferro é determinada usando a Eq. (34) com os dados dos testes de caracterização de material disponíveis nas Figura 13 e Figura 14. A fração volumétrica do minério de ferro é então determinada usando a Eq. (32). A condição de sem deslizamento é adotada para a parede do conjunto vagão-minério de ferro e assume-se que não há troca de calor entre a parede do vagão e os domínios externo e poroso.

Tabela 5 - Condições iniciais para o conjunto vagão-minério de ferro – Caso 1.

Simulação	$T_{minério\ de\ ferro}$	$T_{vagão}$	$\alpha_g$	$\gamma_v$	$\alpha_l$	$\alpha_{minério\ de\ ferro}$
	25 °C	25 °C	0,45	0,00	0,15	0,40

Tabela 6 - Condições de contorno para o conjunto vagão-minério de ferro – Caso 1

Simulação	<i>Parede (vagão/domínio poroso)</i>	<i>Sinterface</i>	<i>Condições térmicas da parede (vagão/ domínio poroso)</i>
	Sem deslizamento	Interface	Adiabático

#### 4.1.5. Detalhamento da Solução Numérica

As equações do modelo são resolvidas usando o *software* comercial de CFD ANSYS Fluent 2022R2. A geometria e a malha para os modelos são desenvolvidas usando os compiladores *SpaceClaim* e *Mesh*, respectivamente, via ANSYS Workbench. Neste estudo, três malhas CFD são usadas para analisar a convergência dos resultados. A Figura 18 mostra a localização do vagão no domínio computacional para a malha. Os detalhes das três malhas investigadas para estudo em vagão são mostrados na Tabela 7.

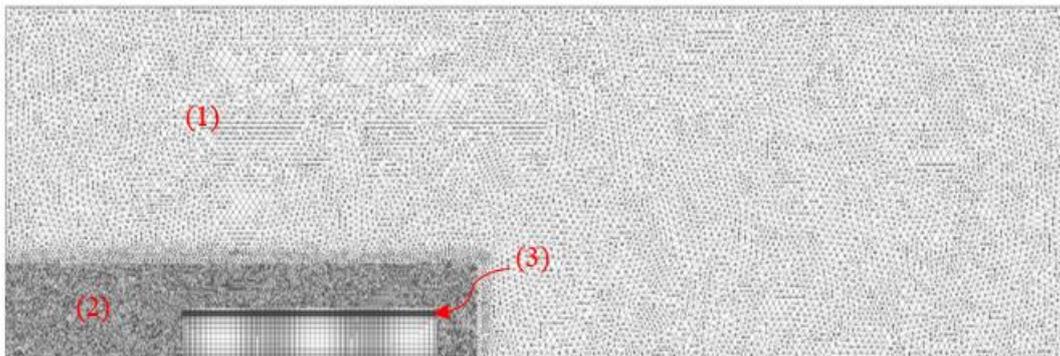


Figura 18 -Malha de volume finito para os domínios de fluxo externo e meio poroso para o estudo em vagão e leito de minério: 1-região distante das medições do vagão com malha não estruturada mais grosseira; 2-região próxima à região do vagão com malha não estruturada mais refinada; Região 3-interfacial de meios porosos e fluidos com camadas de prisma.

Tabela 7 - Detalhe da malha CFD usada na simulação em vagão.

Parâmetro	Malha 1	Malha 2	Malha 3
Tipo de malha	Não-estruturada	Não-estruturada	Não-estruturada
Tipo de célula	Tetraedro, hexaedro e prisma	Tetraedro, hexaedro e prisma	Tetraedro, hexaedro e prisma
Número de células	53.018	150.908	1.067.854
Número de nós	30.143	83.506	231.124
Qualidade ortogonal	Min = 0,32 e Max = 1	Min = 0,41 e Max = 1	Min = 0,16 e Max = 1

As equações do modelo foram implementadas utilizando a abordagem multifásica Euler-Euler acoplado com o modelo de meios porosos. Para o acoplamento pressão-

velocidade, o esquema SIMPLE acoplado por fase é usado, e para a discretização espacial dos termos de gradiente, o método baseado em células de mínimos quadrados é usado. O esquema de interpolação *upwind* de primeira ordem é usado para a discretização espacial dos termos advectivos. Para o modelo de turbulência, é usado o modelo  $k-\varepsilon$  realizável com uma parede de função escalável.

## 4.2. CASO 2 – ESTRATIFICAÇÃO DA UMIDADE EM MODELO DE VAGÃO

### 4.2.1. Descrição

O experimento do Caso 2 é baseado nos trabalhos de SANTOS JUNIOR (2018) e trata do estudo do processo de secagem em um modelo de vagão com as mesmas dimensões do Caso 1, porém, construído em chapa de aço 3 mm. A utilização do aço como material para o vagão neste experimento justifica-se devido às limitações construtivas do sensor de umidade. Em estudos de secagem, por exemplo, que envolvem vibrações semelhantes ao que ocorre durante o transporte, o sensor de umidade, baseado na medição do dielétrico, apresenta variações importantes devido à compactação do material no vagão, alterando os valores de calibração. Outra limitação do sensor é que sua utilização em outro tipo de material, como o aço, leva ao seu mau funcionamento. A utilização do aço para o vagão é interessante porque permite avaliar a umidade global do material ao final do ensaio, inserindo o modelo do vagão dentro de uma estufa de secagem à 105 °C, o que não é possível com o modelo do vagão de acrílico. Uma umidade relativa média de 60% e uma temperatura média do ar ambiente de 32°C foram registradas usando um termo-higrômetro digital para esse teste. O tempo de secagem para esse experimento foi 1,50 horas.

### 4.2.2. Material e Preparação da Amostra Úmida

O material utilizado neste experimento é o mesmo utilizado para o Caso 1, isto é, minério de ferro do tipo *pellet feed*. A distribuição granulométrica do tamanho de partículas das amostras é mostrada na Figura 13, onde é indicado um tamanho médio de partícula entre 50  $\mu\text{m}$  e 93  $\mu\text{m}$  para o *pellet feed*. A massa específica foi medida usando um picnômetro com base na faixa de tamanho médio da granulometria, e foi obtido 4,68  $\text{g}/\text{cm}^3 \pm 0,012$ . A curva de massa específica aparente é mostrada na Figura 14 e para a umidade de referência de 8% a massa específica aparente foi de 1,50  $\text{g}/\text{cm}^3$ .

A preparação da amostra úmida de minério de ferro para a umidade de referência de 8% é mostrada na Figura 15 e, assim como descrito para o Caso 1, é baseado na metodologia do trabalho de SANTOS JUNIOR (2018).

#### 4.2.3. Detalhamento do Experimento

Neste experimento, foram realizados testes com velocidades de 40 e 70 km/h para avaliar a influência do campo de velocidade na secagem do vagão. Para esse objetivo, a avaliação do mecanismo de secagem utilizou o processo de estratificação do material dentro do modelo de vagão ao final dos ensaios. Nesta metodologia, todo o material remanescente no interior do vagão foi dividido em 5 seções ao longo de seu comprimento e em 6 camadas ao longo de sua altura,  $h$ , conforme Figura 19. Foram coletadas 30 amostras em cápsulas de alumínio que foram pesadas em uma balança de precisão com resolução de 0,01 g e, em seguida, colocados em estufa para secagem a 100 °C por 24 horas. As cápsulas de alumínio tiveram identificação numérica auxiliar para identificar as regiões e camadas coletadas. Após a secagem, as amostras foram pesadas novamente, e assim foi possível avaliar o gradiente de umidade em diferentes pontos do material dentro do vagão.

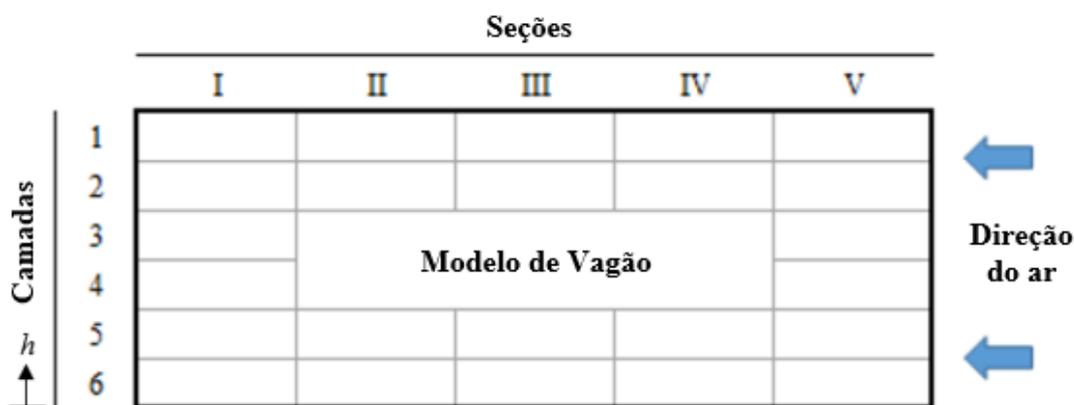


Figura 19 - Metodologia para coleta de amostras de material para avaliação de umidade (SANTOS JUNIOR, 2018).

#### 4.2.4. Parâmetros de Modelagem do Modelo

Duas simulações são necessárias para avaliar o processo de secagem que ocorre no estudo de Caso 2. A primeira diz respeito a secagem que ocorre simulando as condições de transporte para uma velocidade de 40 km/h do vagão e a segunda diz respeito as condições de transporte para a velocidade de 70 km/h. Os dados das propriedades termofísicas iniciais do minério de ferro *pellet feed* e das fases envolvidas estão listadas na Tabela 1. As condições iniciais para o domínio de fluxo externo para as duas

simulações são mostradas na Tabela 8. Assim como mostrado para o Caso 1, inicialmente a velocidade no domínio do fluxo externo é zero e a fase gás está a uma temperatura de 32 °C e 1 atm e, para essa condição, a fração mássica do vapor de  $\gamma_v = 0,011747$  corresponde à umidade relativa do ar de  $\phi = 60\%$ .

Tabela 8 - Condições iniciais para o domínio de fluxo externo – Caso 2.

Simulações 1 e 2	$T$	$\alpha_g$	$\gamma_v$	$\vec{V}$
	32 °C	1,00	$117,47 \cdot 10^{-4}$	0 m/s

A Tabela 9 mostra as condições de contorno usadas para o domínio de fluxo externo. As simulações 1 e 2 consideram velocidades de entrada da fase gás de 40 e 70 km/h, respectivamente, para uma temperatura de entrada 32 °C e um tempo de secagem física de 1,50 horas.

Tabela 9 - Condições de contorno para o domínio de fluxo externo – Caso 2.

Simulação	$\vec{V}_{entrada}$	$T_{entrada}$	Parede	Condições térmicas da parede	Saída
1 (40 km/h)	11,11 m/s	32 °C	Sem deslizamento	Adiabático	Pressão de saída
2 (70 km/h)	19,44 m/s	32 °C	Sem deslizamento	Adiabático	Pressão de saída

As propriedades do meio poroso do minério de ferro *pellet feed* estão listadas na Tabela 2 para cada uma das fases envolvidas. As condições iniciais e de contorno para o conjunto vagão-minério de ferro são mostrados nas Tabela 10 e Tabela 11. Os valores das frações volumétricas das fases mostrada na Tabela 10 foram determinadas assim como descrito para o Caso 1 na seção 4.1.4. A condição de não-deslizamento é adotada para a parede do conjunto vagão-minério de ferro. A troca de calor com as paredes do vagão é assumida, e as condições de contorno térmico para essa condição são modeladas por uma condição de parede acoplada de dois lados, pois compartilham uma interface de zona sólida com zonas de fluido. Assume-se que a parede do vagão troca calor com o fluxo externo por convecção e com o meio poroso por difusão. A condutividade térmica, o calor específico e a massa específica da parede do vagão são dadas como 16,27 W/m·K, 502,48 J/kg·K e 8.030 kg/m<sup>3</sup>, respectivamente (MORAN *et al.*, 2019).

Tabela 10 - Condições iniciais para o conjunto vagão-minério de ferro – Caso 2.

Simulação 1 e 2	$T_{minério\ de\ ferro}$	$T_{vagão}$	$\alpha_g$	$\gamma_v$	$\alpha_l$	$\alpha_{minério\ de\ ferro}$
-----------------	--------------------------	-------------	------------	------------	------------	-------------------------------

	25 °C	25 °C	0,45	0,00	0,15	0,40
--	-------	-------	------	------	------	------

Tabela 11 - Condições de contorno para o conjunto vagão-minério de ferro – Caso 2.

Simulação	Parede (vagão/domínio poroso)	Sinterface	Condições térmicas da parede (vagão/ domínio poroso)
1	Sem deslizamento	Interface	Acoplado
2	Sem deslizamento	Interface	Acoplado

#### 4.2.5. Detalhamento da Solução Numérica

As equações do modelo são resolvidas usando o *software* comercial de CFD ANSYS Fluent 2022R2. A geometria e a malha para os modelos são desenvolvidas usando os compiladores *SpaceClaim* e *Mesh*, respectivamente, via ANSYS Workbench. A localização do vagão no domínio computacional e os detalhes da malha usada para este caso são as mesmas descritas no Caso 1 mostrados na Figura 18 e Tabela 7, respectivamente.

As equações do modelo foram implementadas utilizando a abordagem multifásica Euler-Euler acoplado com o modelo de meios porosos. Para o acoplamento pressão-velocidade, o esquema SIMPLE acoplado por fase é usado, e para a discretização espacial dos termos de gradiente, o método baseado em células de mínimos quadrados é usado. O esquema de interpolação *upwind* de primeira ordem é usado para a discretização espacial dos termos advectivos. Para o modelo de turbulência, é usado o modelo  $k-\varepsilon$  realizável com uma parede de função escalável.

### 4.3. CASO 3 – ESCOAMENTO TRANSIENTE SOBRE MODELO DE PILHA

#### 4.3.1. Descrição

O experimento do Caso 3 é baseado nos trabalhos de FURTADO *et al.* (2022) que trata do estudo do processo de secagem em um modelo de pilha de minério de ferro. Para este estudo utilizou-se um modelo de pilha com dimensões de 0,293 m de comprimento, 0,190 m de largura e 0,07 m de altura na escala 1:200 do modelo real encontrados nos pátios de estocagem do porto de Vitória, no estado do Espírito Santo. A Figura 20 mostra a disposição do modelo da pilha na seção de teste do túnel de vento.

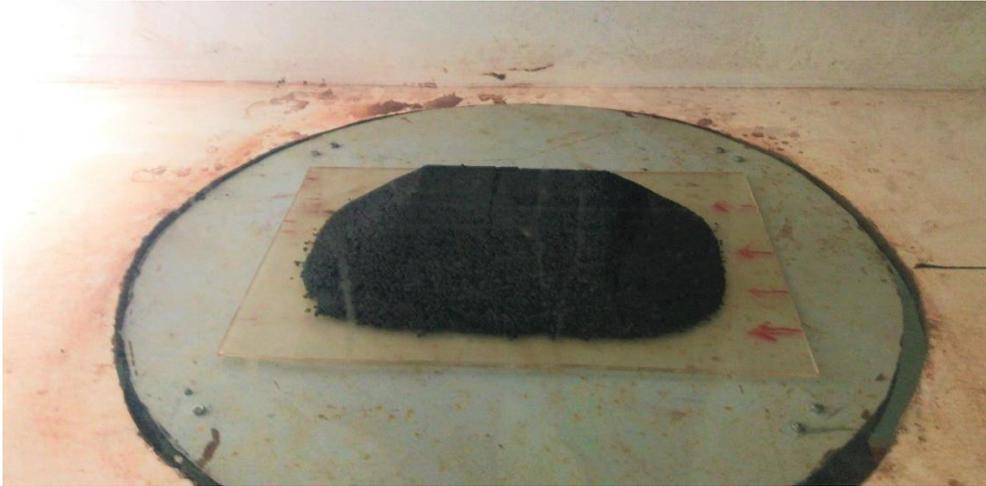


Figura 20 - Disposição do modelo da pilha no interior do túnel de vento.

#### 4.3.2. Material e Preparação da Amostra Úmida

O material utilizado neste experimento foi o minério de ferro do tipo *sinter feed*. A caracterização física do material é apresentada a seguir e foram realizados no Laboratório da UFPA no Núcleo de Desenvolvimento Amazônico em Engenharia (NADE) do grupo de pesquisa em Fluidodinâmica e Particulado (FluidPar) localizados na cidade de Tucuruí no estado do Pará.

A distribuição granulométrica do tamanho das partículas das amostras para o material foi determinada com base na norma ABNT NBR NM 248 (2003). O resultado da distribuição de tamanho das partículas é mostrado na Figura 21, onde é indicado um tamanho médio de partícula entre  $850 \mu\text{m}$  e  $9.520 \mu\text{m}$  para o *sinter feed*. A massa específica foi medida usando um picnômetro com base na faixa de tamanho médio da granulometria, e foi obtido  $3,99 \text{ g/cm}^3 \pm 0,012$  para o *sinter feed*.

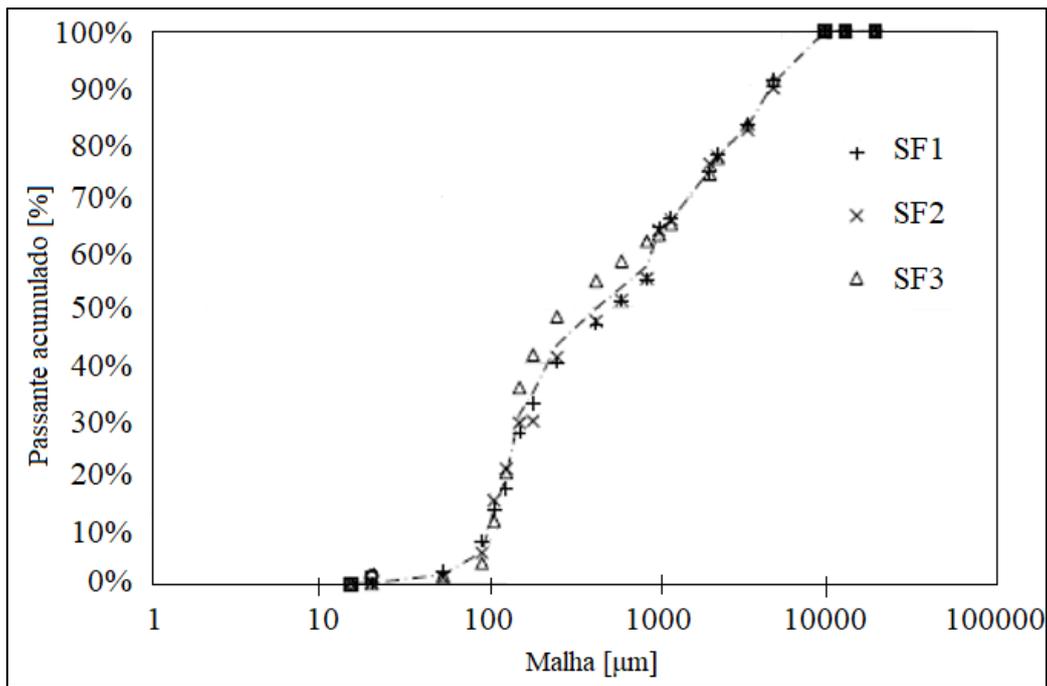


Figura 21 - Distribuição granulométrica das partículas de minério de ferro tipo *sinter feed* (SILVA, 2021).

A massa específica aparente do *sinter feed* é considerado a mesmo dos Casos 1 e 2 para 8% de umidade, isto é  $1,50 \text{ g/cm}^3$ . Da mesma forma, a preparação da amostra úmida da pilha para a umidade de referência de 8% é ilustrado na Figura 15 e foi feita com base na metodologia do trabalho de SANTOS JUNIOR (2018) e o seu detalhamento pode ser consultada na seção 4.1.2 do estudo de Caso 1.

#### 4.3.3. Detalhamento do Experimento

A metodologia de estudo utilizada é semelhante a descrição do experimento do Caso 2. Isto é, após o término da secagem em túnel de vento o material da pilha é estratificado e feito a coleta das amostras em camada para a secagem em estufa por 24 horas para verificação da umidade final após o término do ensaio. Para a estratificação e coleta do material da pilha, um grande de estratificação foi utilizada (Figura 22-c). A Figura 22 mostra uma visão geral do detalhamento das etapas envolvida durante o estudo da secagem da pilha.

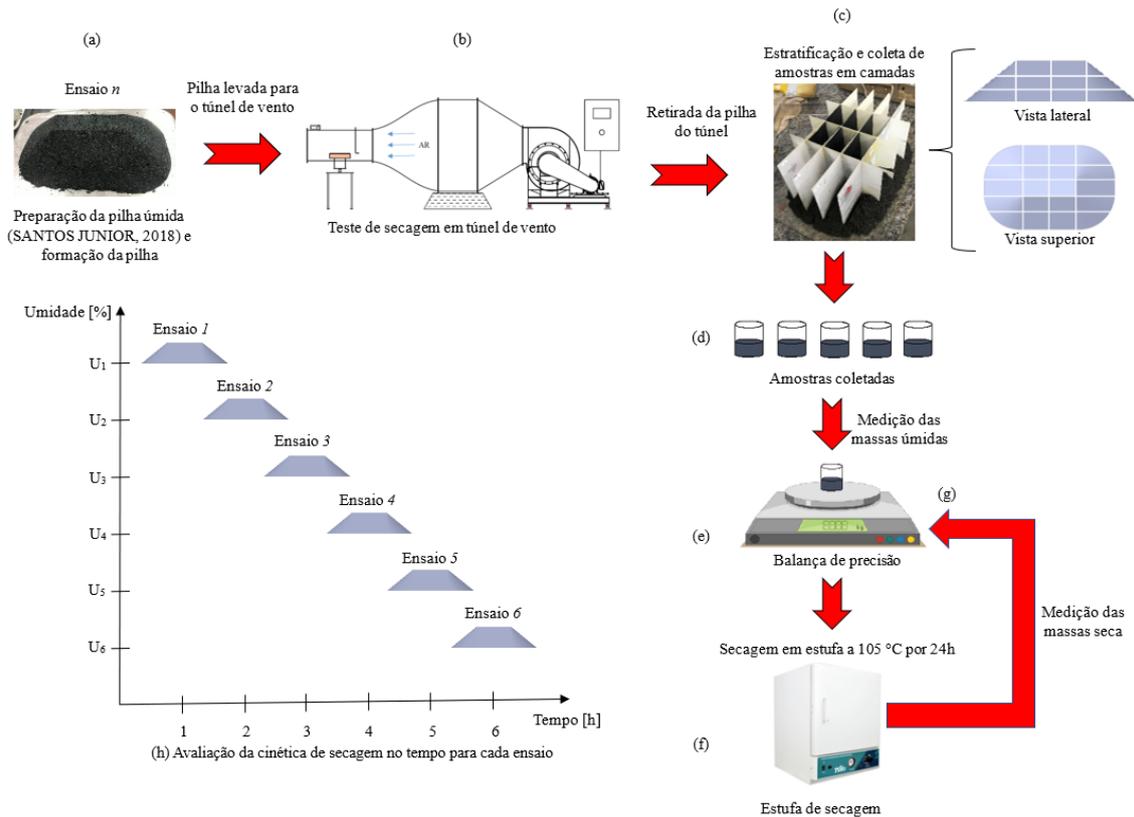


Figura 22 - Visão geral da metodologia utilizada para o estudo da secagem em pilha.

Conforme mostrado no fluxo da Figura 22, todo o material da pilha ao final do teste em túnel de vento é dividido em 4 seções ao longo do seu eixo longitudinal e 5 seções ao longo do eixo transversal. Cada região estratificada da pilha é identificada com um número, conforme mostra a Figura 23. Para as regiões da pilha com identificação dada por 1, 5, 6, 10, 11, 15, 16 e 20, a coleta de material foi feita em duas camadas ao longo de sua altura, por serem as regiões de borda da pilha e com menos material. Para as demais regiões da pilha a coleta foi feita em 3 camadas. Essas camadas foram coletadas com o uso de uma espátula, onde a coleta da primeira camada correspondeu a região próxima à superfície do leito (total de 20 amostras), a segunda camada correspondeu ao interior médio do leito (total de 20 amostras) e a terceira camada a parte mais profunda da pilha (12 amostras). Portanto, foram coletadas 52 amostras de material da pilha ao final de cada ensaio.

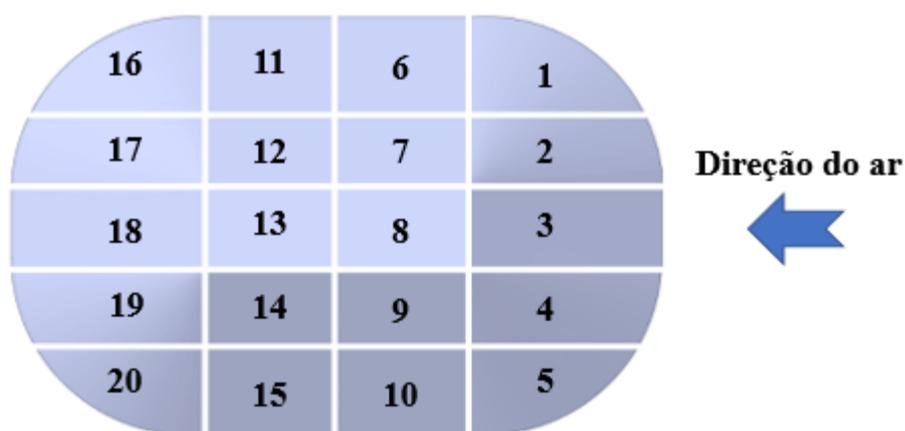


Figura 23 - Identificação das regiões coletadas (vista superior da pilha) (FUTADO *et al.*, 2022).

Esse experimento teve duração de 6 horas dividido em 6 ensaios. O primeiro ensaio teve duração de 1 hora e os ensaios subsequentes tiveram suas durações aumentada em 1 hora até fechar o total de 6 horas e 6 ensaios, conforme mostrado na Figura 22-*h*. Ao final de cada ensaio as amostras coletas são levadas para estufa para a secagem a 105 °C por 24 horas. Para cada ensaio foi considerado outro modelo de pilha e para minimizar os erros aleatórios de medição cada ensaio foi realizado em triplicata. Uma umidade relativa média de 70% e uma temperatura média do ambiente de 26°C foram registradas usando um termo-higrômetro digital para esse teste.

#### 4.3.4. Parâmetros de Modelagem do Modelo

Os dados das propriedades termofísicas iniciais do minério de ferro *sínter feed* (LJUNG *et al.*, 2011) e das fases envolvidas estão listadas na Tabela 12.

Tabela 12 - Dados iniciais das propriedades termofísicas das fases envolvidas para o *sínter feed*.

Propriedades Termofísicas	Fases Envolvidas		
	gás	água	<i>sínter feed</i>
$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	gás ideal	998,20	3.990
$\mu$ (kg/m.s)	$1,88 \cdot 10^{-5}$	$10,03 \cdot 10^{-4}$	-
$c_p$ (J/kg.K)	1.007	4.182	586
$k$ (W/m.K)	$2,63 \cdot 10^{-2}$	0,60	5,27

As propriedades do meio poroso do minério de ferro *sínter feed* estão listadas na Tabela 13 para cada uma das fases envolvidas. A porosidade do meio foi determinada com base na Eq. (34) e nos dados de caracterização do material mostrados nas Figura 14 e Figura 21. A permeabilidade absoluta foi estimada com base na (39) e as permeabilidade relativa de referências das fases com base nas Eq. (40) e Eq. (41).

Tabela 13 - Propriedades do meio poroso de interesse para o minério de ferro *sínter feed*.

Parâmetros do Meio Poroso	<i>sínter feed</i>
Umidade do meio, $U$ (kg/kg)	0,08
Diâmetro da partícula, $d_p$ (m)	$85 \cdot 10^{-5}$
Porosidade, $\varepsilon$	0,56
Permeabilidade absoluta, $K$ (m <sup>2</sup> )	$2,25 \cdot 10^{-10}$
Permeabilidade relativa de referência do gás, $K_{(r,g)ref}$	0,30
Permeabilidade relativa de referência da água, $K_{(r,l)ref}$	0,40
Saturação residual do gás, $S_{(ir)_g}$	0,10
Saturação residual da água, $S_{(ir)_l}$	0,20
Expoente de Corey do gás, $n_g$	3
Expoente de Corey da água, $n_l$	7

As condições iniciais para o domínio de fluxo externo são mostradas na Tabela 14. Inicialmente as velocidades no domínio do fluxo externo é zero e a fase gás está a uma temperatura de 26 °C e 1 atm e, para essa condição, a fração mássica do vapor de  $\gamma_v = 0,020577$  corresponde à umidade relativa do ar de  $\phi = 70\%$ .

Tabela 14 - Condições iniciais para o domínio de fluxo externo – Caso 3.

Simulação	$T$	$\alpha_g$	$\gamma_v$	$\vec{V}$
	26 °C	1,00	$205,77 \cdot 10^{-4}$	0 m/s

A Tabela 15 mostra as condições de contorno usadas para o domínio de fluxo externo. É considerado uma velocidade e temperatura de entrada da fase gás de 5,4 km/h e 26 °C, respectivamente, e um tempo físico de secagem de 6 horas.

Tabela 15 - Condições de contorno para o domínio de fluxo externo – Caso 3.

Simulação	$\vec{V}_{entrada}$	$T_{entrada}$	Parede	Condições térmicas da parede	Saída
(5,4 km/h)	1,50 m/s	26 °C	Sem deslizamento	Adiabático	Pressão de saída

As condições iniciais para pilha são mostradas na Tabela 16. As frações de volume mostradas na Tabela 16 para as fases envolvidas foram determinadas como descrito em Caso 1 na seção 4.1.4. A temperatura inicial assumida foi de 26 °C.

Tabela 16 - Condições iniciais para a pilha – Caso 3.

Simulação	$T_{\text{minério de ferro}}$	$\alpha_g$	$\gamma_v$	$\alpha_l$	$\alpha_{\text{minério de ferro}}$
	26 °C	0,42	0,00	0,1403	0,44

As condições de contorno para pilha são mostradas na Tabela 17. Para essa condição as interações escoamento externo-meio poroso ocorrem através de toda a interface que separa os dois domínios e, por isso, a única condição de contorno existente é a condição de interface.

Tabela 17 - Condições de contorno para a pilha – Caso 3.

	Parede
Simulação	Condição de interface sem deslizamento com transferência de calor e massa

#### 4.3.5. Detalhamento da Solução Numérica

As equações do modelo são resolvidas usando o *software* comercial de CFD ANSYS Fluent 2023R1. A geometria e a malha para o modelo são desenvolvidas usando os compiladores *SpaceClaim* e *Mesh*, respectivamente, via ANSYS Workbench. Para este caso, seis malhas CFD são usadas para avaliar a convergência dos resultados para a pilha. A Figura 24 mostra a localização da pilha no domínio computacional para a malha de volume finito e as Tabela 18 e Tabela 19 mostra os detalhes das seis malhas investigada. Os detalhes da malha mostrados na Tabela 18 foram usados para validar o escoamento fluidodinâmico em torno de um modelo de pilha com base em dados de testes experimentais disponível na literatura e os detalhes das malhas mostrada na Tabela 19 foram usadas para o estudo da secagem da pilha

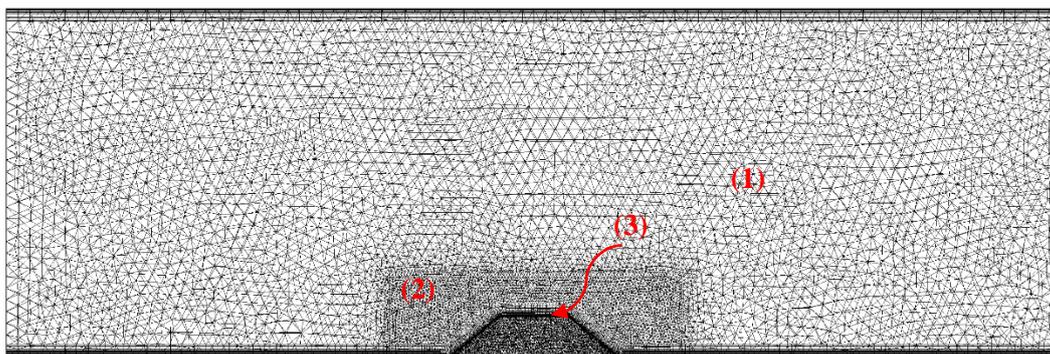


Figura 24 -Malha de volume finito para os domínios de fluxo externo e meio poroso para o estudo da pilha: 1-região distante das medições da pilha com malha não estruturada; 2-região próxima a pilha com malha não estruturada mais refinada; Região 3-interface do meio poroso e fluido com camadas de prisma.

Tabela 18 - Detalhe da malha CFD para validação do escoamento fluidodinâmico em torno da pilha.

Parâmetro	Malha 1	Malha 2	Malha 3
Tipo de malha	Não-Estruturada	Não-Estruturada	Não-Estruturada
Tipos de célula	Tetraédrica e prisma	Tetraédrica e prisma	Tetraédrica e prisma
Número de células	2.884.865	6.862.980	15.995.458
Número de nós	755.928	1.561.926	3.302.766
Qualidade ortogonal	Min = 0,15 e Max = 1	Min = 0,20 e Max = 1	Min = 0,21 e Max = 1

Tabela 19 - Detalhe da malha CFD usada na simulação da secagem em pilha.

Parâmetro	Malha 1	Malha 2	Malha 3
Tipo de malha	Não-Estruturada	Não-Estruturada	Não-Estruturada
Tipos de célula	Tetraédrica e prisma	Tetraédrica e prisma	Tetraédrica e prisma
Número de células	2.768.348	4.088.881	6.234.901
Número de nós	867.229	1.117.752	1.572.610
Qualidade ortogonal	Min = 0,20 e Max = 1	Min = 0,20 e Max = 1	Min = 0,17 e Max = 1

As equações do modelo foram implementadas utilizando a abordagem multifásica Euler-Euler acoplado com o modelo de meios porosos. Para o acoplamento pressão-velocidade, o esquema SIMPLE acoplado por fase é usado, e para a discretização espacial dos termos de gradiente, o método baseado em células de mínimos quadrados é usado. O esquema de interpolação *upwind* de primeira ordem é usado para a discretização espacial

dos termos advectivos. Para o modelo de turbulência, é usado o modelo  $k-\omega$  SST com lei de parede padrão.

#### 4.4. CASO 4 – ESCOAMENTO TRANSIENTE SOBRE LEITO DE MINÉRIO

##### 4.4.1. Descrição

O experimento do Caso 4 trata da secagem em leito de minério utilizando o túnel de vento de secagem desenvolvido por SILVA (2021) mostrado no esboço da Figura 11. Neste estudo um leito de minério de ferro é acomodado em um recipiente com dimensões de 0,290 m de comprimento, 0,120 m de largura e 0,05 m de altura. A secagem é, então, realizada em condições controladas de temperatura e umidade relativa do ar o que permite um estudo mais detalhado do processo. A Figura 25 mostra a disposição do leito de minério de ferro na seção de teste do túnel de vento secador.



Figura 25 - Disposição do leito de minério de ferro no túnel de vento secador (SILVA, 2021).

##### 4.4.2. Material e Preparação da Amostra Úmida

O material utilizado neste experimento é o mesmo utilizado para os Casos 1 e 2, isto é, minério de ferro do tipo *pellet feed*. A distribuição granulométrica do tamanho de partículas das amostras é mostrada na Figura 13, onde é indicado um tamanho médio de partícula entre  $50 \mu\text{m}$  e  $93 \mu\text{m}$  para o *pellet feed*. A massa específica foi medida usando

um picnômetro com base na faixa de tamanho médio da granulometria, e foi obtido  $4,68 \text{ g/cm}^3 \pm 0,012$ . A curva de massa específica aparente é mostrada na Figura 14 e para a umidade de referência de 8% a massa específica aparente foi de  $1,50 \text{ g/cm}^3$ .

A preparação da amostra úmida de minério de ferro para a umidade de referência de 8% foi feita, do mesmo modo, como descrito para todos os outros Casos, isto é, com base na metodologia do trabalho de SANTOS JUNIOR (2018). Desse modo, a descrição dessa metodologia pode ser consultada na seção 4.1.2.

#### 4.4.3. Detalhamento do Experimento

A secagem é avaliada para um leito exposto a secagem convectiva de baixa velocidade. O estudo durou 43 horas e foi realizada para uma velocidade de entrada do ar no túnel de vento de 3,6 km/h. A temperatura e a umidade relativa do ar foram mantidas em 50 °C e 25%, respectivamente, através do sistema de controle da bancada. Um recipiente em acrílico foi utilizado para acomodar o leito de minério no qual um sensor de umidade desenvolvido por SANTOS *et al.* (2023) foi instalado internamente para medir a umidade do leito. Um sistema de pesagem acoplado ao recipiente monitorou a variação da massa do material úmido no decorrer do tempo. O sistema de pesagem era composto por uma célula de carga com resolução de 1 grama ligado a um sistema de aquisição de dados que permitia a leitura e armazenamento dos dados da massa em tempo real. A curva de calibração do sensor de umidade para esse experimento, assim como para o experimento do Caso 1, é dado na Figura 17.

A cinética de secagem foi avaliada por meio da umidade adimensional calculado conforme a Eq. (63). A umidade de equilíbrio para esse estudo foi assumida igual a 0,18% para um tempo de secagem de 43 horas, pois para esse tempo de secagem foi observado que o valor da umidade era muito próximo de zero. Além disso, da mesma forma que no experimento do Caso 1, os resultados experimentais para umidade adimensional em função do tempo foram ajustados com base no modelo de PAGE (1949) dado pela Eq. (64).

#### 4.4.4. Parâmetros de Modelagem do Modelo

Os dados das propriedades termofísicas iniciais do minério de ferro *pellet feed* e das fases envolvidas estão listadas na **Erro! Fonte de referência não encontrada.** As condições iniciais para o domínio de fluxo externo são mostradas na Tabela 20. Inicialmente a velocidade no domínio do fluxo externo é zero e a fase gás está a uma

temperatura de 50 °C e 1 atm e, para essa condição, a fração mássica do vapor de  $\gamma_v = 0,005290$  corresponde à umidade relativa do ar de  $\phi = 25\%$ .

Tabela 20 - Condições iniciais para o domínio de fluxo externo – Caso 4.

Simulação	$T$	$\alpha_g$	$\gamma_v$	$\vec{V}$
	50 °C	1.00	$52,29 \cdot 10^{-4}$	0 m/s

A Tabela 21 mostra as condições de contorno usadas para o domínio de fluxo externo. É considerado uma velocidade e temperatura de entrada da fase gás de 3,6 km/h e 50 °C, respectivamente, e um tempo físico de secagem de 43 horas.

Tabela 21 - Condições de contorno para o domínio de fluxo externo – Caso 4.

Simulação	$\vec{V}_{entrada}$	$T_{entrada}$	Parede	Condições térmicas da parede	Saída
(3,6 km/h)	1 m/s	50 °C	Sem deslizamento	Adiabático	Pressão de saída

As propriedades do meio poroso do minério de ferro *pellet feed* estão listadas na Tabela 2 para cada uma das fases envolvidas. As condições iniciais para o leito de minério são mostradas na Tabela 22. As frações de volume mostradas na Tabela 22 para as fases envolvidas foram determinadas como descrito no Caso 1 na seção 4.1.4. A temperatura inicial foi assumida foi de 26 °C.

Tabela 22 - Condições iniciais para o leito de minério – Caso 4.

Simulação	$T_{minério\ de\ ferro}$	$\alpha_g$	$\gamma_v$	$\alpha_l$	$\alpha_{minério\ de\ ferro}$
	26 °C	0,46	0,00	0,1407	0,40

As condições de contorno para o leito de minério são mostradas na Tabela 23. Para essa condição as paredes do recipiente separam o domínio poroso do fluxo externo e para essas paredes são assumidas as condições de não deslizamento sem troca térmica e, além do mais, uma interface, *s*, conecta o domínio poroso ao fluxo externo.

Tabela 23 - Condições de contorno para o leito de minério – Caso 4

Simulação	Parede (recipiente/domínio poroso)	$S_{interface}$	Condições térmicas da parede (recipiente/domínio poroso)
	Sem deslizamento	Interface	Adiabático

#### 4.4.5. Detalhamento da Solução Numérica

As equações do modelo são resolvidas usando o *software* comercial de CFD ANSYS Fluent 2022R2. A geometria e a malha para os modelos são desenvolvidas

usando os compiladores *SpaceClaim* e *Mesh*, respectivamente, via ANSYS Workbench. A localização do vagão no domínio computacional são as mesmas descritas no Caso 1 mostrados na Figura 18. A malha de volume finitos para o vagão descrita no Caso 1 foi adaptada e utilizada para o estudo em leito de minério (Caso 4) de modo que o estudo de convergência de malha se aplica a esse caso.

As equações do modelo foram implementadas utilizando a abordagem multifásica Euler-Euler acoplado com o modelo de meios porosos. Para o acoplamento pressão-velocidade, o esquema SIMPLE acoplado por fase é usado, e para a discretização espacial dos termos de gradiente, o método baseado em células de mínimos quadrados é usado. O esquema de interpolação *upwind* de primeira ordem é usado para a discretização espacial dos termos advectivos. Para o modelo de turbulência, é usado o modelo  $k-\varepsilon$  realizável com uma parede de função escalável.

# CAPÍTULO 5 – RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados deste trabalho são apresentados e discutidos a seguir. Para validar a abordagem de modelagem, os resultados das simulações são comparados com os resultados dos testes experimentais. O estudo de convergência de malha para os resultados numéricos é mostrado e para o estudo em pilha esse estudo de convergência é acompanhado da validação do escoamento fluidodinâmico ao redor do modelo de pilha com base em dados de testes experimentais disponíveis na literatura. Para os experimentos as incertezas para a cinética de secagem e taxa de secagem foram determinadas com base na metodologia do trabalho de ABERNETHY *et al.* (1985) e LIRA *et al.* (2004).

## 5.1. CASO 1 – ESCOAMENTO TRANSIENTE SOBRE O MODELO DE VAGÃO

### 5.1.1. Apresentação dos Resultados

A Tabela 24 mostra os resultados da análise de convergência de malha para o estudo da secagem em vagão avaliado a 3 horas após o início do processo. A determinação do valor da umidade média simulado foi obtida com base na Eq. (33) e a do experimento a partir do sensor capacitivo.

Tabela 24 - Teor médio de umidade para o estudo de convergência de malha em  $t = 3$  horas como uma variável chave.

Malha	Umidade média simulado [%]	Umidade média experimental [%]
1	7,15	
2	7,26	7,06
3	7,04	

A Figura 26 mostra o perfil de umidade adimensional em função do tempo para o experimento e a simulação do Caso 1 para uma velocidade de 50 km/h.

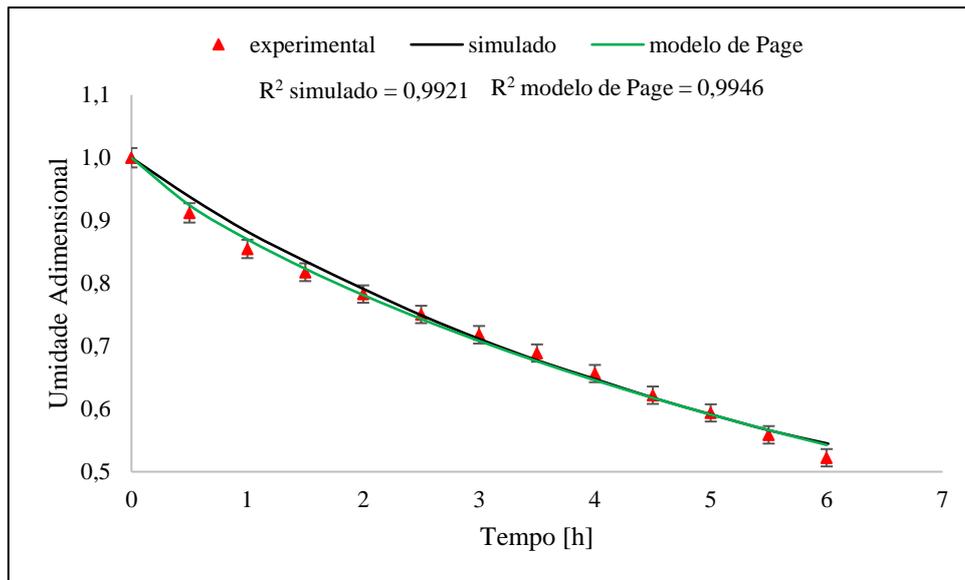


Figura 26 - Cinética de secagem para o estudo em vagão para velocidade de 50 km/h – Caso 1.

A taxa de secagem foi calculada com base na Eq. (65) para taxa de secagem em base seca e a comparação dos perfis de taxa de secagem do experimento e simulação é mostrada na Figura 27.

$$\dot{m} = -\frac{m_s}{A} \frac{dU}{dt} \quad (65)$$

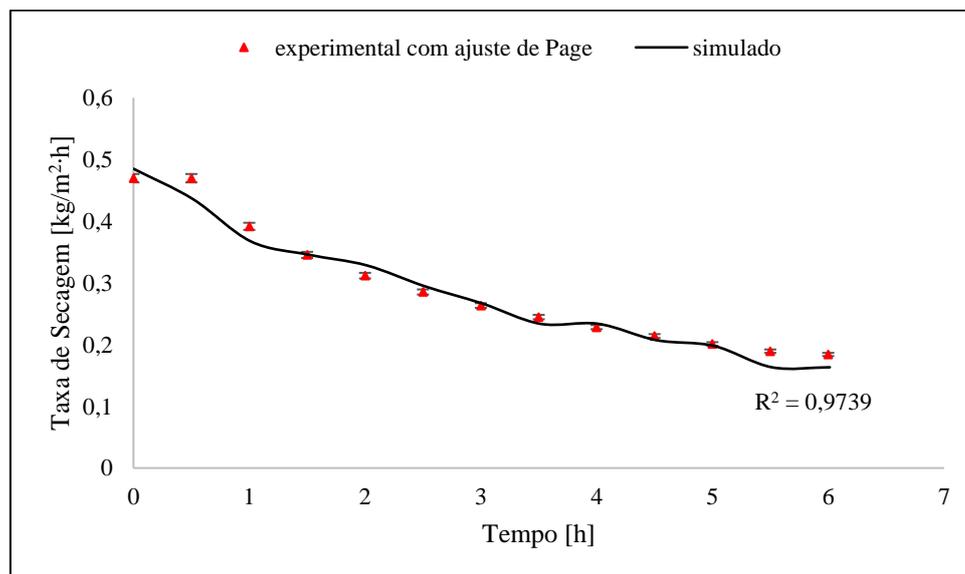


Figura 27 - Taxa de secagem em base seca em função do tempo para o experimental com ajuste de Page e simulação – Caso 1.

A Figura 28 mostra a superfície do minério ao final do ensaio para o Caso 1.

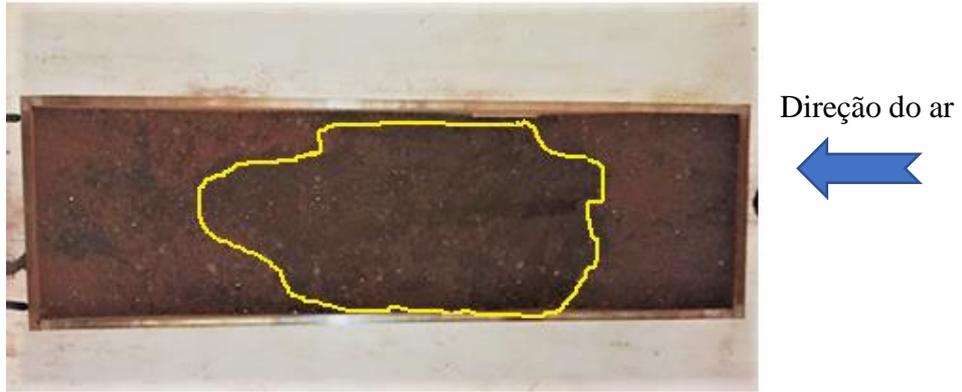


Figura 28 - Superfície do minério de ferro ao final do ensaio para o Caso 1.

A Figura 29 mostra a comparação dos perfis de taxa de secagem em função da umidade do leito para a simulação e aqueles medidos pelo experimento.

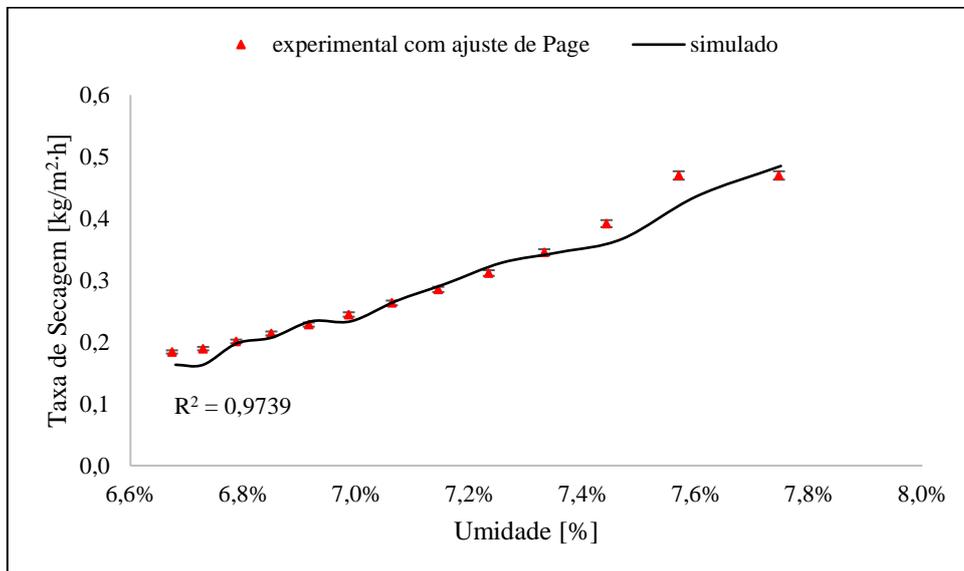


Figura 29 - Perfil de taxa de secagem em base seca versus a umidade para o experimental com ajuste de Page e a simulação – Caso 1.

A Figura 30 mostra os resultados da simulação para a fração mássica de vapor de água avaliados ao longo da altura  $h$  das linhas de referência a montante e a jusante do escoamento sobre o vagão como função do tempo. A Figura 31 mostra a localização das linhas de referência usados para os resultados mostrados na Figura 30 para avaliação da fração mássica de vapor.

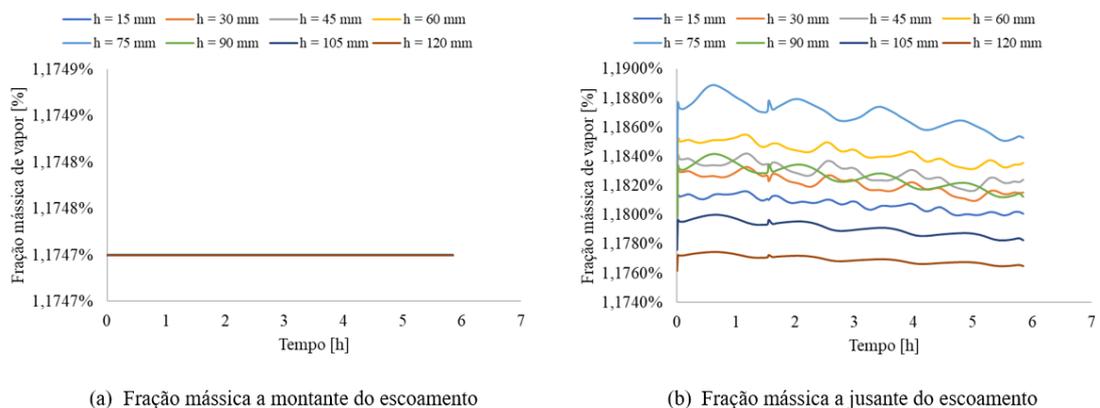


Figura 30 – Resultados da simulação para a fração mássica de vapor d’água avaliados ao longo da altura  $h$  das linhas de referência a montante (a) e a jusante (b) do escoamento sobre o vagão em função do tempo.



Figura 31 - Localização das linhas de referência para os resultados mostrados na Figura 30 para avaliação da fração mássica de vapor a montante e a jusante do vagão.

### 5.1.2. Discussão

A convergência de malha para as simulações em vagão foi avaliada examinando o teor médio de umidade do leito após 3 horas de simulação e comparada com os resultados dos dados do experimento do Caso 1. Os resultados são mostrados na Tabela 24. O critério de convergência foi de  $10^{-4}$  para todas as escalas residuais. Para 6 horas de simulação, aproximadamente 7.200 passos-de-tempo foram executados, com 3 segundos para cada tamanho de passo-de-tempo. Como mostrado, a Malha 3 deu o melhor ajuste aos dados experimentais; portanto, ela foi fornecida para o pós-processamento dos resultados.

Para os resultados mostrado na Figura 26 o modelo de secagem de PAGE (1949) foi aplicado à curva experimental obtida com as constantes ajustadas para  $k = 0,1392$  e  $n = 0,8257$  e que se mostrou satisfatório, com valores de  $R^2$  da ordem de 0,9946. O modelo matemático previu com sucesso a evolução da taxa de decaimento da umidade adimensional comparando com os dados da curva experimental, onde foram obtidos

valores de  $R^2$  na faixa de 0,9921, indicando boa concordância com o modelo experimental.

Os resultados da Figura 27 mostram que o modelo matemático foi consistente na maior parte do tempo com a taxa de secagem dos dados experimentais. No entanto, para o início do processo até 1 h e após 5,50 h para o estudo em vagão, os resultados numéricos divergiram ligeiramente da curva prevista experimentalmente. Apesar disso, é seguro afirmar que o modelo matemático previu com sucesso a taxa de secagem para o caso estudado.

No resultado mostrado na Figura 28, as áreas mais claras correspondem a superfície seca do minério que não foi varrido pelo vento, enquanto as áreas delimitadas pela linha amarela são mais escuras e correspondem à região varrida pelo vento. Nas regiões mais escuras, o minério estava mais úmido, pois a camada superior foi lavada durante o teste. Essa característica de perda de massa da superfície do vagão evidenciou o início dos períodos de diminuição da taxa de secagem, onde a secagem parcial da superfície do vagão levou à emissão de particulados para a atmosfera.

Os resultados da Figura 29 mostram que há uma variação na curva prevista pelo experimento e pela simulação até 7,40% da umidade, mas apesar disso, é seguro concluir que há boa concordância entre o experimento e a simulação. É possível notar que o período de taxa de secagem constante não foi observado durante o processo, e esse comportamento pode ser explicado pelo fato de o meio poroso úmido ser insaturado e possuir granulometria muito fina (50 a 93  $\mu\text{m}$ ), o que impõe uma certa resistência ao fluxo capilar (SANTOS JUNIOR, 2018) e assim resulta no não aparecimento do período de secagem constante. O período decrescente da taxa de secagem é observado ao longo do processo de secagem, e para esta condição, a superfície exposta do vagão começa a ficar parcialmente seca, o que aumenta a emissão de partículas finas de minério que saem da superfície do leito, corroborando com os resultados apresentados na Figura 28. Resultados como estes são importantes, pois fornecem informações valiosas e necessárias para a compreensão do início do processo de emissão de poeira. Esse conhecimento pode aprimorar o uso de métodos ativos para limitar a emissão de material particulado, como processos de aspersão de água, de forma controlada e otimizada.

Os resultados da Figura 30-a mostram que o percentual de fração mássica de vapor no escoamento externo a montante permanece constante ao longo de tempo de secagem, pois é uma região do escoamento que não tem adição de massa de vapor vindo do processo de secagem do vagão. Por outro lado, os resultados para o escoamento a jusante do vagão

mostrados na Figura 30-b mostram que o percentual da fração mássica de vapor no escoamento externo sofre alteração com relação ao balanço avaliado a montante do escoamento como resultado da fração de massa de vapor que sai do leito de minério e que é adicionado ao escoamento após o vagão. Além do mais, observa-se que para o escoamento a jusante a Figura 30-b mostra que ao longo do tempo conforme se avança na altura do eixo de referência mostrado na Figura 31 os efeitos da variação do percentual da fração mássica no escoamento externo tendem aos valores do escoamento livre. Tais resultado estão em total acordo com o que é esperado com relação ao balanço de massa de vapor a montante e a jusante do vagão.

## 5.2. CASO 2 – ESTRATIFICAÇÃO DA UMIDADE EM MODELO DE VAGÃO

### 5.2.1. Apresentação dos Resultados

Os resultados experimentais e simulados para a avaliação do teor médio de umidade em função das camadas do leito ao final dos testes para o vagão submetido a um escoamento do ar de 40 e 70 km/h são apresentadas na Figura 32.

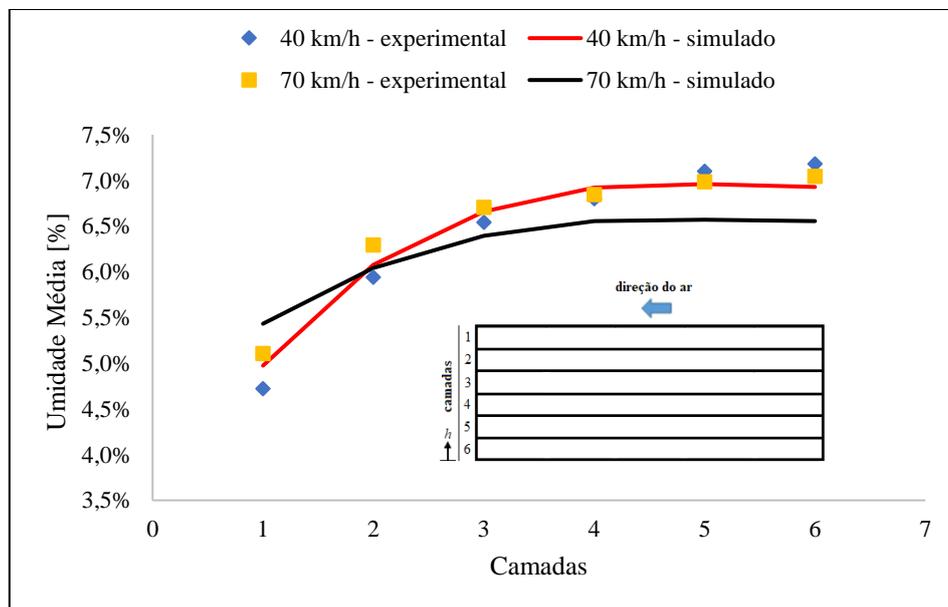


Figura 32 - Umidade média por camada ao final dos testes para um tempo de secagem de 1,50 horas para o vagão submetido a um escoamento do ar de 40 e 70 km/h.

O erro relativo médio por camada para velocidades de 40 e 70 km/h é mostrado na Figura 33.

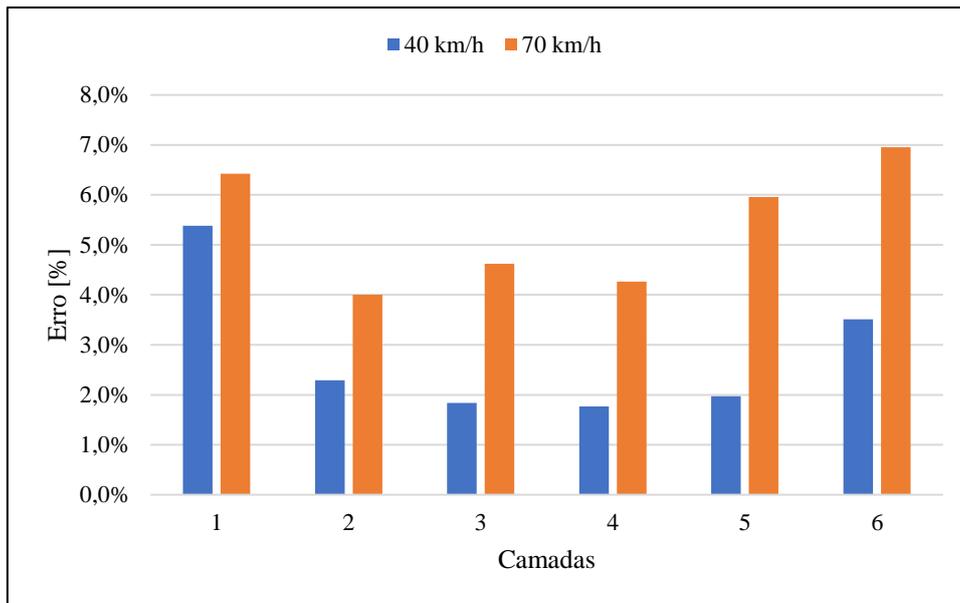


Figura 33 - Erro relativo médio por camada para as velocidades de 40 e 70 km/h.

A Figura 34 mostra os resultados experimentais e das simulações para o gradiente médio de umidade por camada (variação ao longo da altura da camada) em função da profundidade.

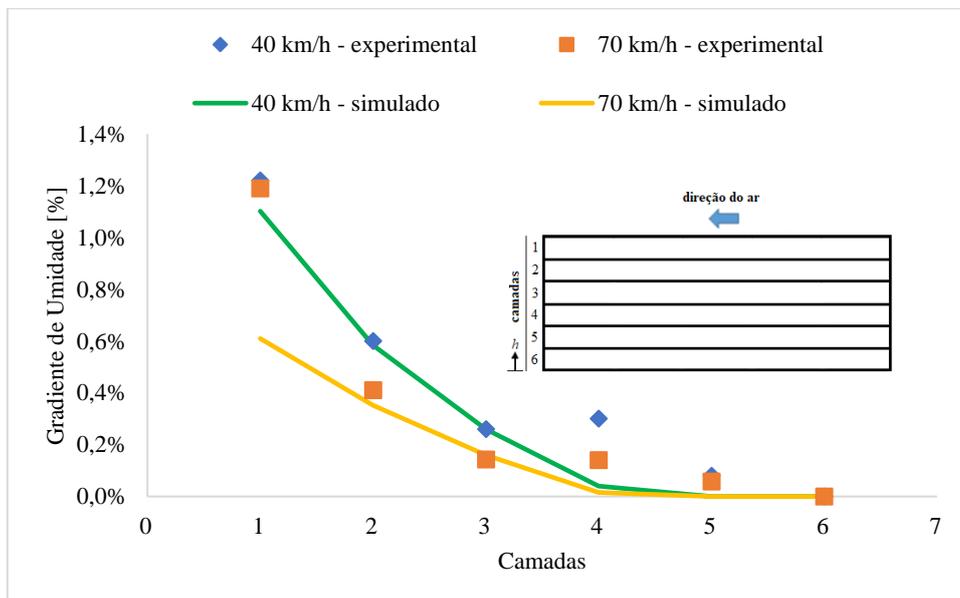


Figura 34 - Gradiente médio de umidade por camada em função de sua profundidade para uma umidade inicial de referência de 8%.

A Figura 35 mostra os gradientes de umidade em diferentes pontos do material dentro do vagão para os casos simulados e experimentais que foram pós-processado usando o Matlab.

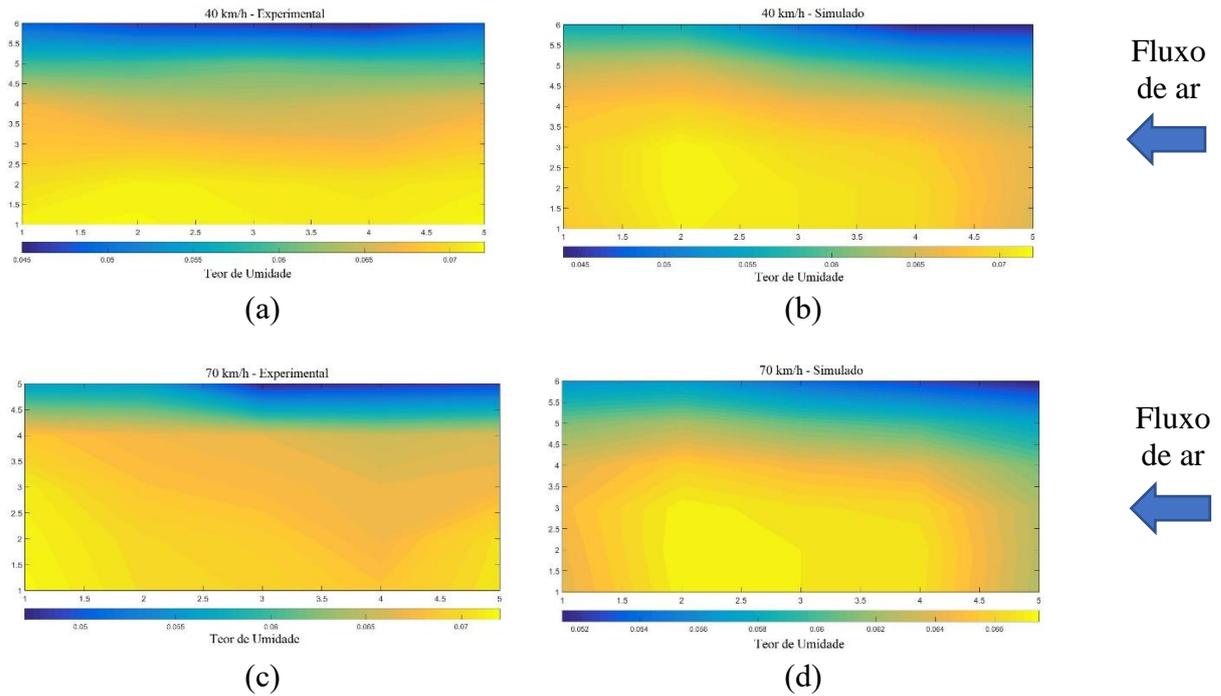


Figura 35 - Umidade do material no interior do vagão ao final do ensaio para uma umidade de referência inicial de 8%.

Os detalhes fluidodinâmicos do fluxo de ar ao redor do vagão são mostrados na Figura 36 para a Simulação 1 do escoamento do ar sobre o vagão a 40 km/h.

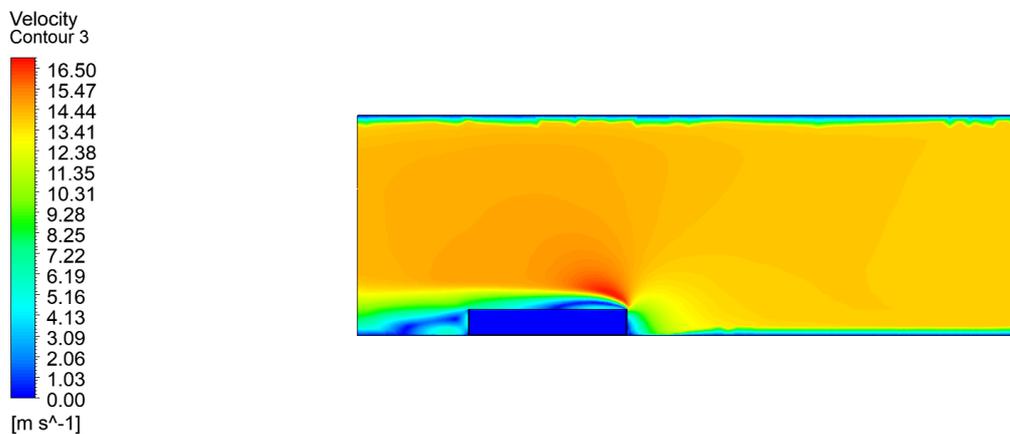


Figura 36 - Contorno de velocidade do ar escoando sobre o vagão para a velocidade de entrada de 40 km/h.

A Figura 37 mostra o contorno da intensidade turbulenta sobre a superfície do vagão como consequência da perturbação do escoamento pelo vagão.



Figura 37 - Contorno da intensidade turbulenta sobre a superfície do vagão.

A Figura 38 mostra o perfil de temperatura em função do tempo para a superfície do minério de ferro medida a partir do bordo de ataque do vagão a 40 km/h.

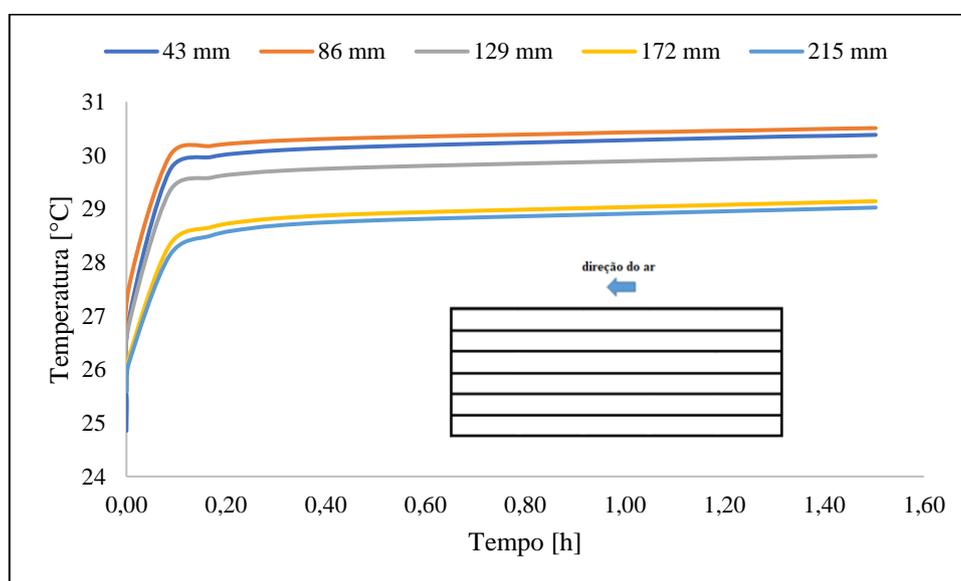


Figura 38 - Perfil de temperatura versus tempo para a superfície do minério de ferro medida a partir do bordo de ataque do vagão a 40 km/h para um tempo de secagem de 1,50 horas.

A Figura 39 mostra o perfil de temperatura em função do tempo para a superfície do minério de ferro medida a partir do bordo de ataque do vagão a 70 km/h.

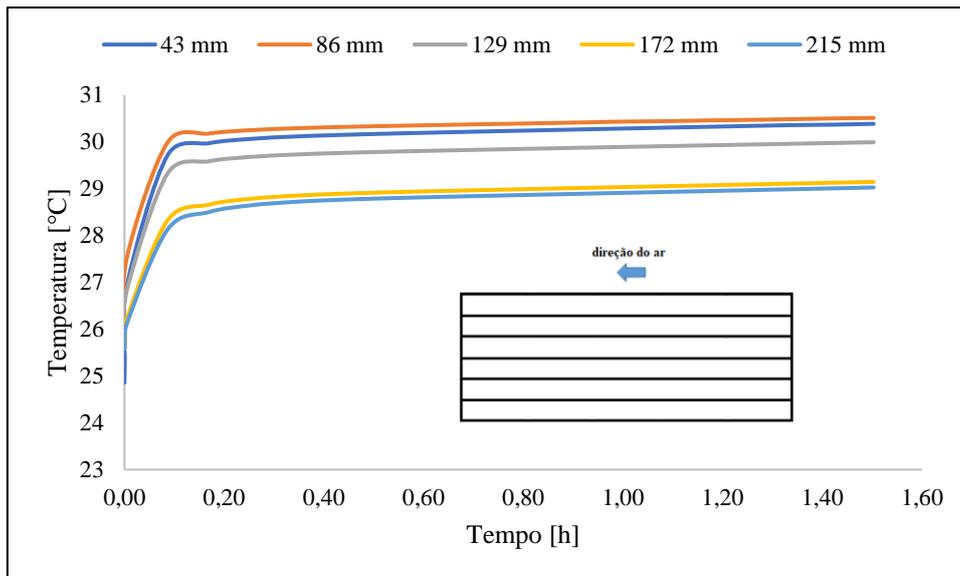


Figura 39 - Perfil de temperatura versus tempo para a superfície do minério de ferro medida a partir do bordo de ataque do vagão a 70 km/h para um tempo de secagem de 1,50 horas.

A Figura 40 apresenta o perfil de temperatura do minério de ferro versus a profundidade do leito localizado nas distâncias de 86, 172, 215 e 344 mm medidos a partir do bordo de ataque do vagão para 40 km/h.

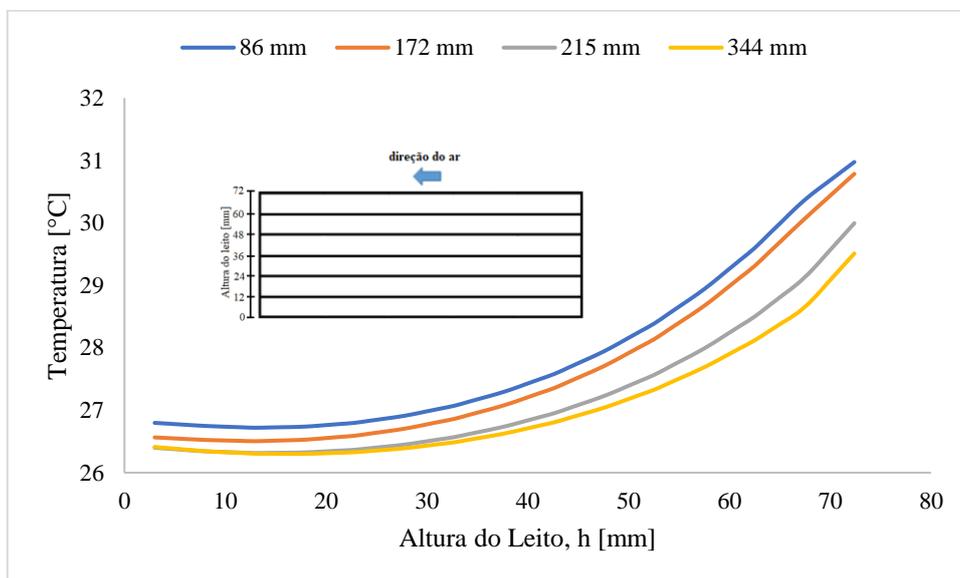


Figura 40 - Perfil de temperatura do minério de ferro versus a profundidade do leito para as distâncias de 86, 172, 215 e 344 mm medidos a partir do bordo de ataque do vagão para 40 km/h para um tempo de secagem de 1,50 horas.

A Figura 41 apresenta o perfil de temperatura do minério de ferro versus a profundidade do leito localizado nas distâncias de 86, 172, 215 e 344 mm medidos a partir do bordo de ataque do vagão para 70 km/h.

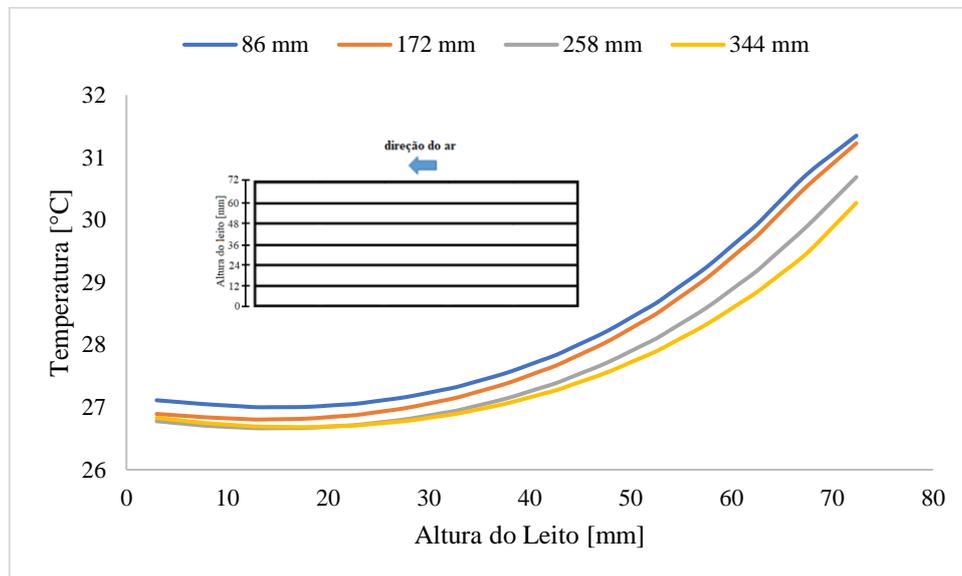


Figura 41 - Perfil de temperatura do minério de ferro versus a profundidade do leito para as distâncias de 86, 172, 215 e 344 mm medidos a partir do bordo de ataque do vagão para 70 km/h para um tempo de secagem de 1,50 horas.

Na Figura 42 é mostrado o contorno de temperatura do leito de minério de ferro para a simulação 2 para velocidade do ar de 70 km/h

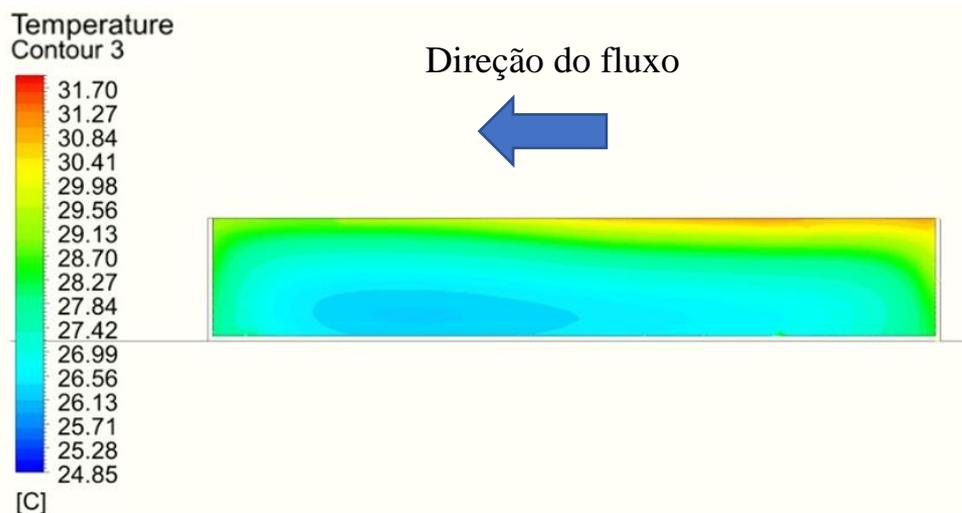


Figura 42 - Contorno de temperatura no leito de minério de ferro para a Simulação 2 – 70 km/h.

A Figura 43 mostra o contorno de temperatura da parede do vagão para simulação 2 para a velocidade do escoamento do ar sobre o vagão de 70 km/h.

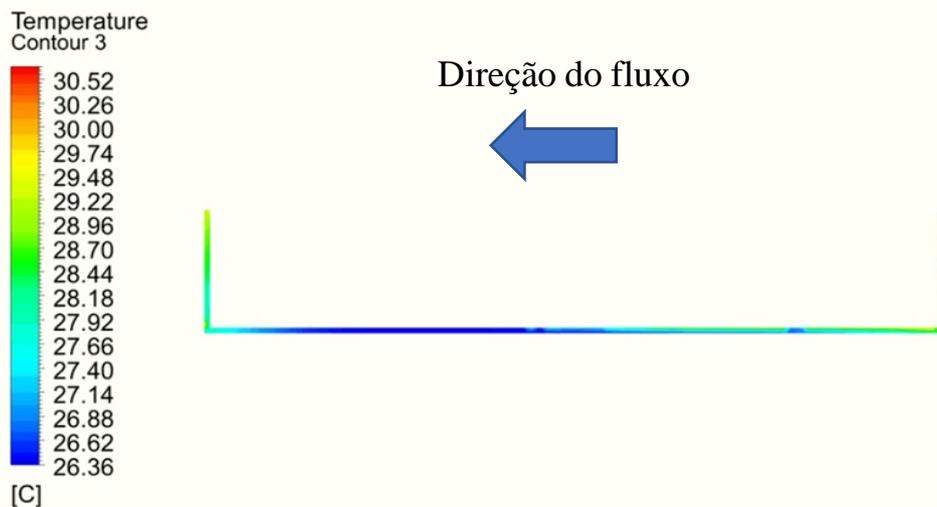


Figura 43 - Contorno de temperatura da parede do vagão para Simulação 2 – 70 km/h.

### 5.2.2. Discussão

A malha escolhida para o Caso 1 a partir da análise de convergência de malha mostrada na Tabela 24 é usada para o pós-processamento do Caso 2. Para o Caso 2 o critério de convergência foi de  $10^{-4}$  para todas as escalas residuais. Para 1,50 horas de simulação, aproximadamente 1.800 passos-de-tempo foram executados, com 3 segundos para cada tamanho de passo-de-tempo.

Conforme mostrado na Figura 32 o resultado da simulação para a velocidade de 70 km/h, o teor médio de umidade para as camadas 2 a 6 foi menor que o resultado experimental para a mesma velocidade. Além disso, a umidade final da camada 1 do experimento e da simulação para a velocidade de 40 km/h foi menor do que para a velocidade de 70 km/h. Isso contradiz o que era esperado, ou seja, esperava-se que velocidades mais altas tivessem uma taxa de secagem mais rápida e menos umidade final do que velocidades mais baixas. Essa falta de tendência nos resultados pode ser explicada pelo fato de ter havido perda de massa de material durante os ensaios experimentais, já que o gráfico avalia apenas a perda de umidade.

Ainda de acordo com a Figura 32, é possível observar que para as camadas de 1 e 2, os valores da umidade final tanto para o experimento quanto para as simulações corresponderam aproximadamente ao limite de umidade em que ocorre a transição da água do estado funicular para o estado pendular. Como essas camadas ficavam próximas à superfície exposta ao fluxo de ar, essa condição levava a uma maior emissão de partículas para a atmosfera devido à diminuição da força de adesão capilar, uma vez que as pontes líquidas afastavam as partículas e reduziam a resistência às partículas

aglomeração (SANTOS JUNIOR, 2018). Informações como esta são particularmente importantes para apoiar os procedimentos de controle de emissão de poeira nas operações de transporte. Considerando os custos e a quantidade de supressor de pó a ser aplicado sob a superfície do leito, é especialmente importante levar em consideração a umidade da superfície do leito para reduzir a emissão de material particulado à medida que a secagem durante o transporte avança.

Conforme mostrado na Figura 33 os maiores percentuais de erros foram observados nas camadas 1, 5 e 6 para a velocidade de 70 km/h, embora os percentuais não tenham sido maiores de 10%, o que é aceitável para o estudo. Isso mostrou que os resultados da simulação corroboram com os resultados experimentais.

Conforme pode-se observar na Figura 34 os resultados numéricos dos gradientes de umidade nas velocidades de 40 e 70 km/h deram um bom ajuste com relação aos dados experimentais. Para esses resultados, observou-se um comportamento assintótico para as curvas experimentais e numéricas, e isso foi resultado da menor taxa de evaporação nas camadas próximas à superfície, pois as camadas mais profundas tiveram um teor médio de umidade maior do que as camadas mais próximas da superfície, o que criou uma barreira para que a taxa de migração de umidade atingisse seu potencial, uma vez que os capilares nas camadas mais profundas ainda estavam cheios de água.

Como observado na Figura 35 a simulação e os resultados experimentais para a velocidade de 40 km/h mostraram algumas diferenças na umidade na superfície do vagão. Para a simulação a 40 km/h, houve uma perda de umidade mais acentuada na frente do vagão, enquanto que para o experimento a perda foi mais uniforme e distribuída no meio da superfície. No entanto, os resultados simulados e experimentais para a velocidade de 70 km/h mostraram boa concordância com a distribuição do gradiente de umidade no interior e na superfície do leito. Os resultados mostraram que houve uma diminuição gradativa e significativa da umidade das amostras coletadas em cada camada à medida que a camada se aproximava da superfície do material exposto ao fluxo de ar. Esta observação pode ser explicada pelo fato de que a secagem ocorreu na superfície da camada superior no modelo do vagão.

A Figura 36 mostra que a geometria do vagão causou uma perturbação no campo de fluxo, que causou um aumento no campo de velocidade na borda de ataque do vagão. Este efeito levou a um aumento da intensidade da turbulência na superfície exposta do minério de ferro, conforme mostrado na Figura 37. Os efeitos turbulentos contribuíram

para amplificar os efeitos da transferência de calor e massa na superfície do leito, o que favoreceu a secagem do leito e conseqüentemente, a emissão de poeira.

A partir dos dados das propriedades térmicas e fluidas das fases e da solução numérica das equações de transporte, como momento e energia, foram analisadas previsões numéricas da troca térmica entre o fluido, o vagão e o leito de minério para as Simulações 1 e 2 do Caso 2. Inicialmente, conforme mostrados nas Figura 38 e Figura 39 em  $t = 0$  horas, a temperatura de toda a superfície do vagão era igual a  $25\text{ }^{\circ}\text{C}$  e à medida que o escoamento ao redor do vagão avançava no tempo, ocorria a troca de calor entre o escoamento externo e a superfície do minério, sendo verificado um aumento da temperatura de toda a superfície do minério durante os 12 minutos iniciais. Essa condição, muitas vezes chamada de zona de aclimatação, ocorreu durante o processo de secagem e foi responsável por potencializar momentaneamente a retirada de água (PINTO *et al.*, 2020). Após esse período, a temperatura da superfície aumentou de forma suave e quase imperceptível.

Ainda de acordo com as Figura 38 e Figura 39, as regiões da superfície mais próximas ao bordo de ataque do vagão foram os pontos de maior temperatura, sendo que a temperatura diminuiu com o aumento da distância desta região na direção do fluxo. Tal comportamento é explicado pelo desenvolvimento da camada limite térmica que diminui o gradiente de temperatura à medida que sua espessura aumenta na direção do fluxo. Da analogia da transferência de calor e massa, os resultados apresentados na Figura 35 para a velocidade de  $70\text{ km/h}$  corroboram os resultados apresentados na Figura 39, onde os pontos onde ocorre a maior perda de umidade correspondem aos pontos onde a troca térmica é mais acentuada.

Os resultados numéricos previstos para o perfil de temperatura em função da profundidade do leito para as simulações a  $40$  e  $70\text{ km/h}$  são mostrados nas Figura 40 e Figura 41, respectivamente, localizados nas distâncias de  $86$ ,  $172$ ,  $215$  e  $344\text{ mm}$  medidas a partir do bordo de ataque do vagão. Os resultados mostram a presença de um gradiente de temperatura decrescente da superfície para o interior do leito. Esta característica sugere que a taxa de secagem correspondeu ao período II porque a temperatura começou a aumentar gradativamente como resultado da troca de calor entre a superfície do leito e o ar de secagem (LJUNG *et al.*, 2011). Uma frente de evaporação dividiu o sistema em uma zona mais quente e seca na superfície e uma zona mais fria e úmida no fundo do leito. A Figura 42 mostra o contorno do campo de temperatura no leito de minério de ferro para a Simulação 2.

Os resultados numéricos para o contorno de temperatura da parede do vagão para a simulação 2 para a velocidade do escoamento do ar sobre vagão de 70 km/h é mostrado na Figura 43. Os resultados mostram que a região frontal do vagão experimentou o maior campo de temperatura, e esta temperatura foi próxima à temperatura de corrente livre de 32 °C. A temperatura foi maior na região superior da frente do vagão, pois neste ponto o escoamento foi acelerado e as camadas limite térmica e de velocidade tiveram menor influência. Tal comportamento sugere que nas regiões da parede com gradientes de temperatura elevados, a taxa de secagem nesses contatos é mais elevada. Por outro lado, a região do bordo de fuga do vagão sofreu menores variações no campo de temperatura, o que refletiu nos teores de umidade ali observados que foram maiores do que nas demais regiões.

### 5.3. CASO 3 – ESCOAMENTO TRANSIENTE SOBRE MODELO DE PILHA

#### 5.3.1. Apresentação dos Resultados

Para o estudo em pilha a análise de convergência de malha foi feita a partir da validação do escoamento externo sobre o modelo de pilha. Para essa validação os dados dos resultados da simulação deste trabalho para o escoamento ao redor de um modelo pilha foram comparados com os dados dos testes experimentais e numéricos do trabalho de DUAN *et al.* (2021). Em seu trabalho, DUAN *et al.* (2021), modelou o perfil de velocidade com base na equação de lei de potência dada pela Eq. (66) e para reprodução desses resultados por parte do presente trabalho para validar o escoamento esse perfil de velocidade foi implementado na entrada do domínio usando uma UDF (*User Defined Function*).

$$\frac{u}{U_0} = \left(\frac{y}{\delta}\right)^\alpha \quad (66)$$

onde  $U_0$  é a velocidade de referência,  $\delta$  é a espessura da camada limite que para este caso é igual a 0,125 m,  $\alpha$  é um expoente igual a 0,15 e  $y$  é a altura de referência medida a partir da base (DUAN *et al.*, 2021).

No trabalho de DUAN *et al.* (2021) é apresentado um estudo das características de dispersão das partículas de poeira ao redor de um modelo de pilha de carbonato de sódio sob ação de um vento unidirecional que são estudadas através de testes em túnel de vento e simulação numérica. A realização dos testes experimentais é feita em um túnel de vento

com secção de testes com dimensões iguais aos do trabalho SANTOS JUNIOR (2015). Nesse estudo os níveis de emissão de poeira e as características fluidodinâmica do escoamento do ar ao redor da pilha são avaliados para as velocidades de referência do ar de 0,87 m/s, 3,22 m/s e 7,22 m/s. As velocidades de referências são avaliadas a partir do perfil de velocidades vertical para as regiões próximo a pilha localizadas a montante e acima do topo da pilha. A Figura 44 mostra a localização das retas verticais usadas para avaliar o perfil de velocidade a montante e acima do topo da pilha.

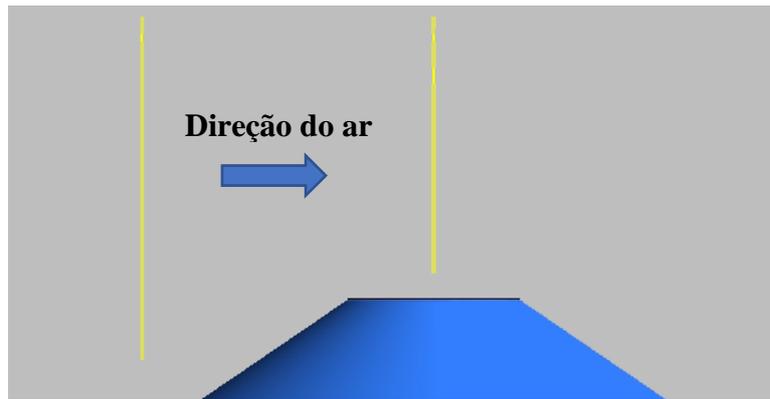


Figura 44 - Localização das retas verticais usadas para avaliação dos perfis de velocidades do trabalho DUAN *et al.* (2021).

A Figura 45 e Figura 46 mostram os resultados das simulações deste trabalho e a comparação com os dados experimentais e numéricos do trabalho de DUAN *et al.* (2021) para os valores de perfis de velocidades avaliados a montante e acima do topo da pilha.

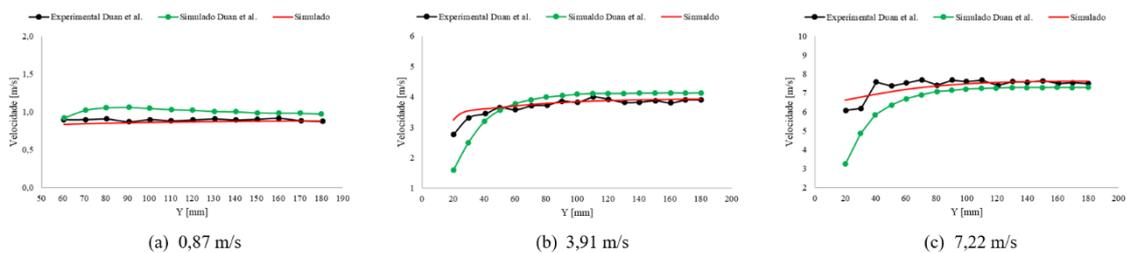


Figura 45 - Perfil de velocidade vertical avaliados a 25 mm a montante do bordo de ataque da pilha.

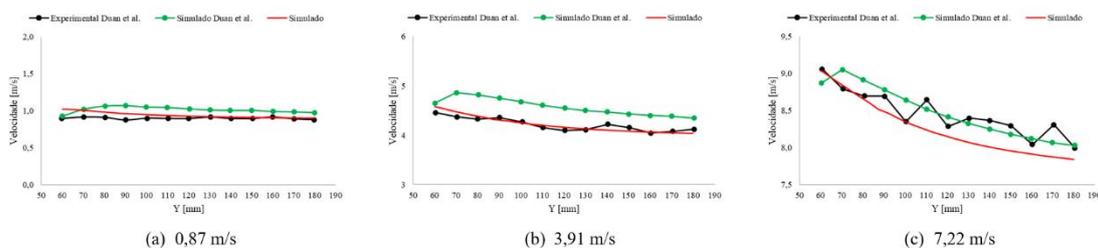


Figura 46 - Perfil de velocidade vertical avaliados acima do topo da pilha.

O contorno de velocidade em torno do modelo da pilha é mostrado na Figura 47 para a velocidade de referência de 7,22 m/s para os dados simulados deste trabalho e para os daqueles do trabalho de DUAN *et al.* (2021).

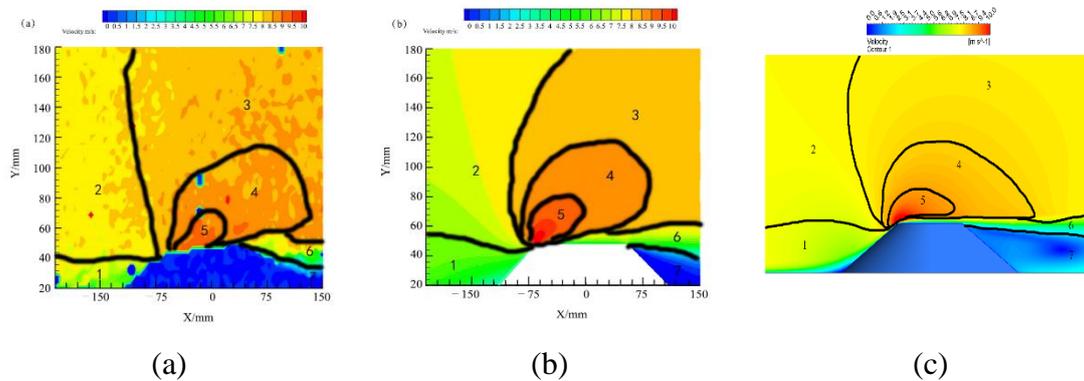


Figura 47 - Contorno de velocidade em torno do modelo de pilha: (a) dados experimentais do trabalho de DUAN *et al.* (2021), (b) dados da simulação numérica de DUAN *et al.* (2021) e (c) dados da simulação numérica do presente trabalho.

O estudo de convergência de malha para o trabalho de DUAN *et al.* (2021) é mostrado na Figura 48 para o perfil vertical de velocidade de 0,87 m/s medido a 25 mm a montagem do bordo de ataque da pilha para os detalhes da malha mostrados na Tabela 18.

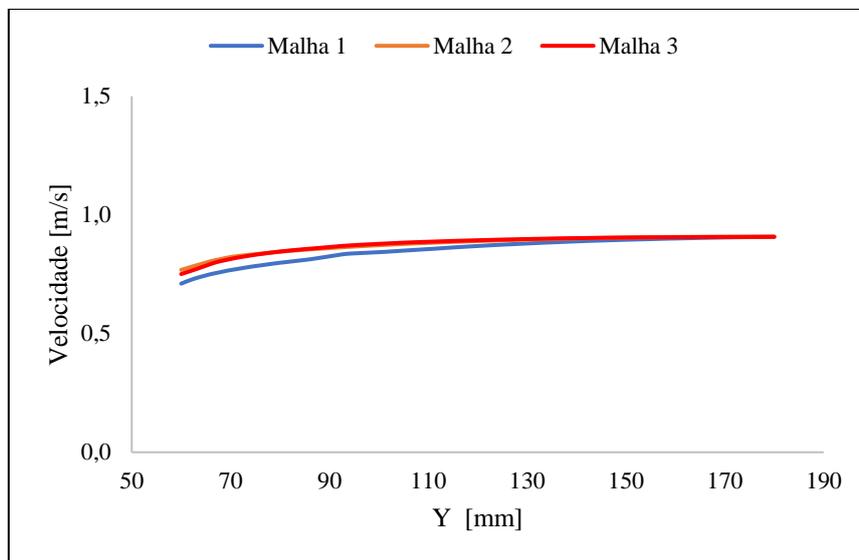


Figura 48 - Análise de convergência de malha para o perfil vertical de velocidade medido a 25 mm a montagem do bordo de ataque da pilha do trabalho de DUAN *et al.* (2021).

As Figura 49, Figura 50 e Figura 51 mostram as comparações dos resultados dos experimentos e das simulações para as cinéticas globais de secagem da pilha para as camadas 1, 2 e 3, respectivamente.

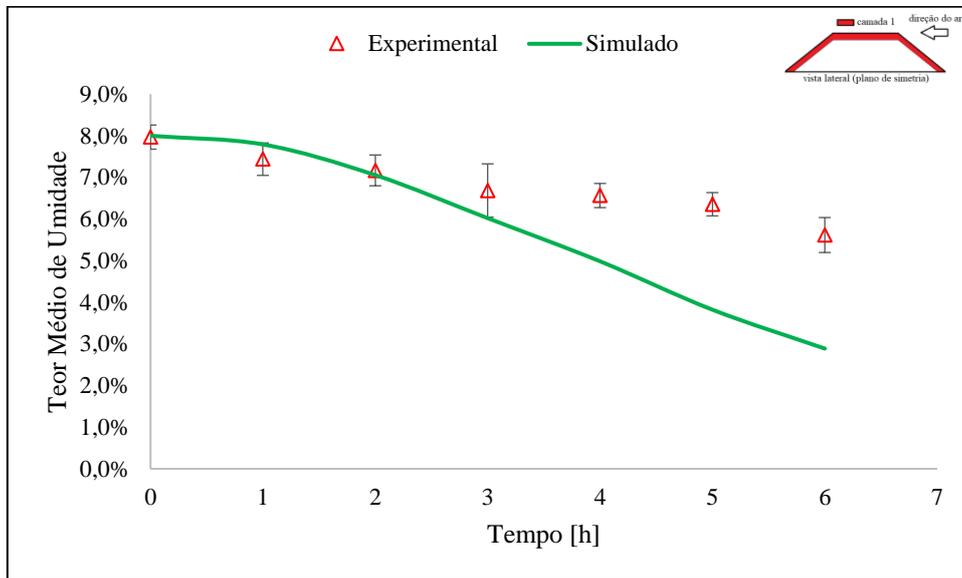


Figura 49 - Cinética de secagem para umidade média global da camada 1 da pilha.

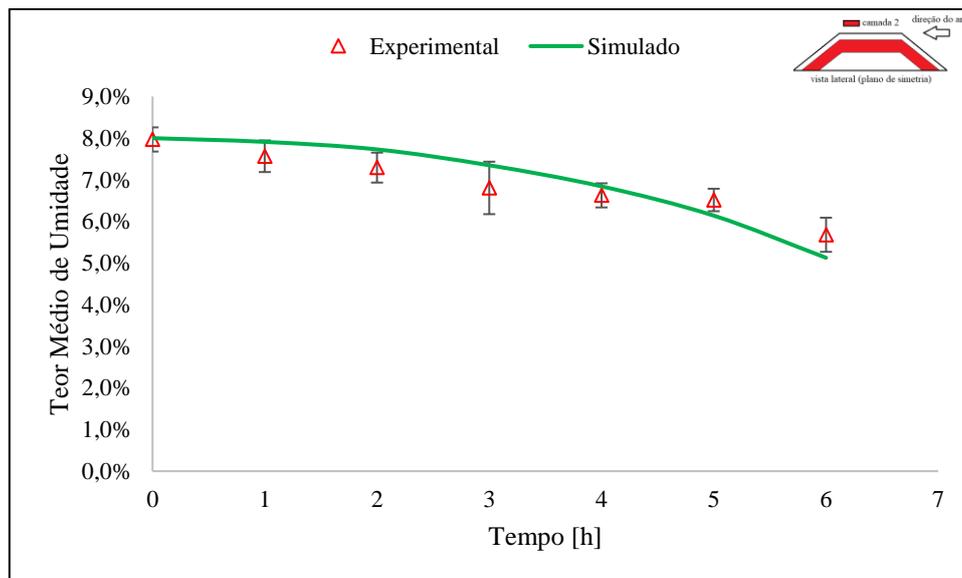


Figura 50 - Cinética de secagem para umidade média global da camada 2 da pilha.

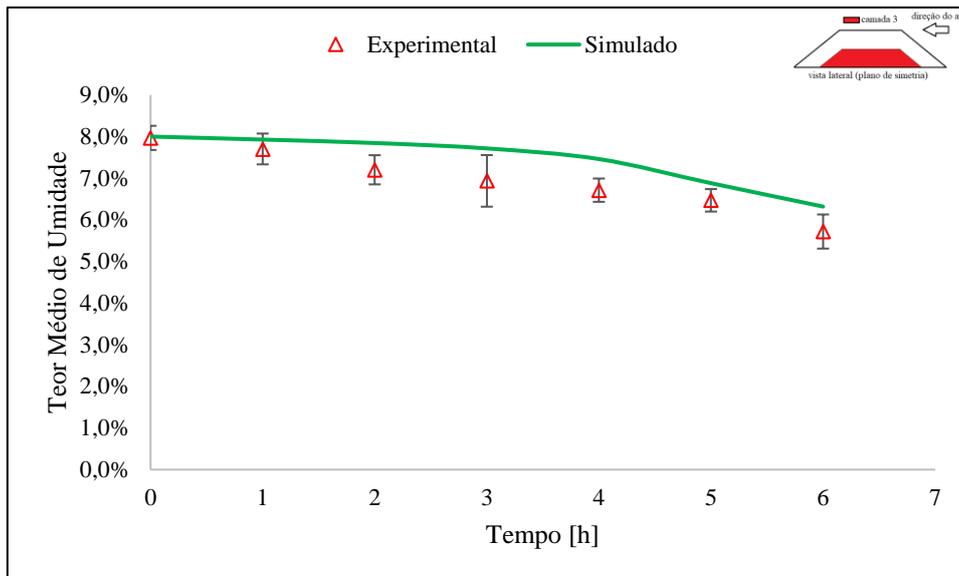


Figura 51 - Cinética de secagem para umidade média global da camada 3 da pilha.

A Figura 52 mostra o erro médio relativo por camada da pilha da comparação dos resultados da simulação com os dados do experimento.

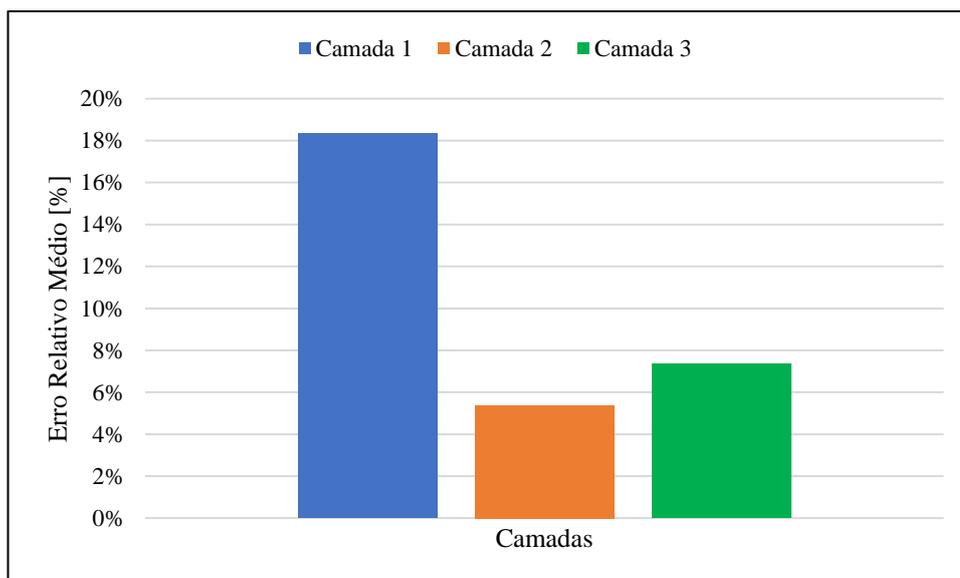


Figura 52 - Erro médio relativo por camada da pilha.

Os resultados da avaliação da cinética de secagem para diferentes regiões da pilha são mostrados nas Figura 53, Figura 54 e Figura 55 para os experimentos e as simulações.

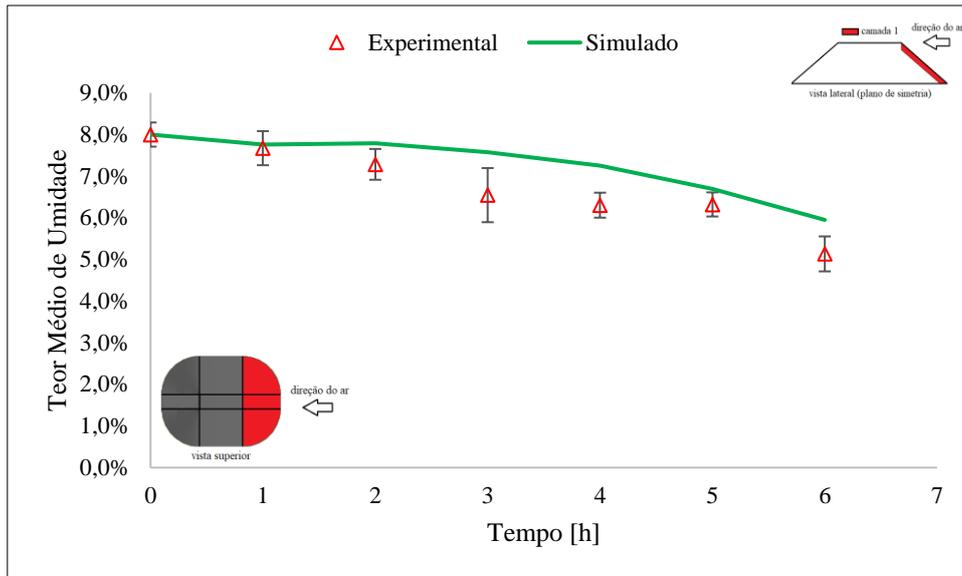


Figura 53 - Cinética de secagem para camada 1 na região frontal da pilha.

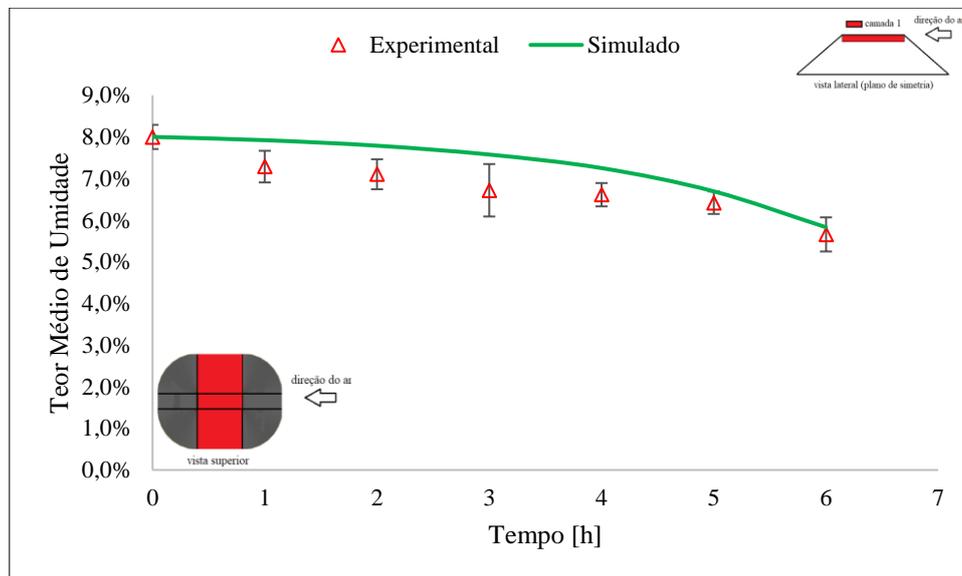


Figura 54 - Cinética de secagem para a camada 1 na região central da pilha.

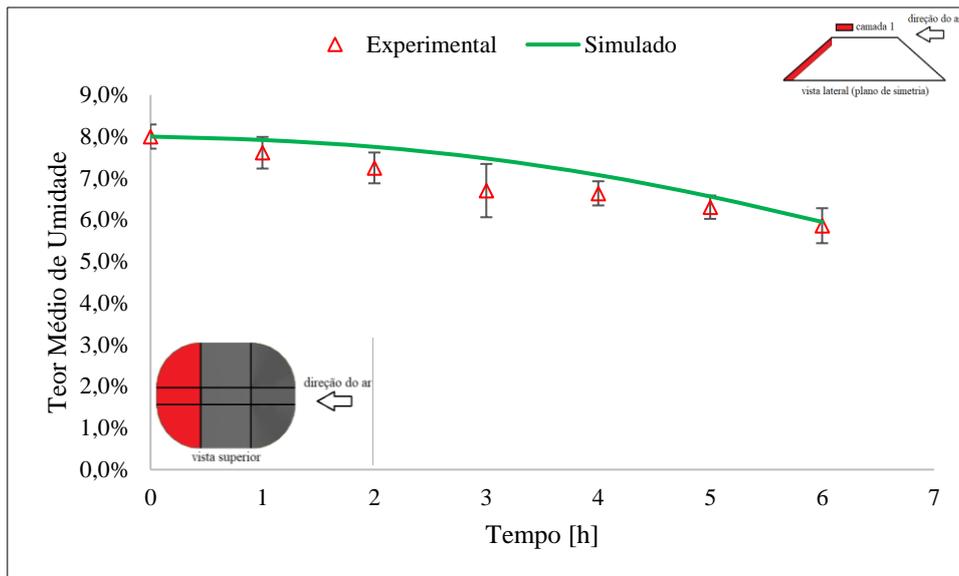


Figura 55 - Cinética de secagem para camada 1 no bordo de fuga da pilha.

A Figura 56 apresenta o erro relativo médio por região da pilha associado a previsão dos resultados da simulação em comparação aos dados experimentais.

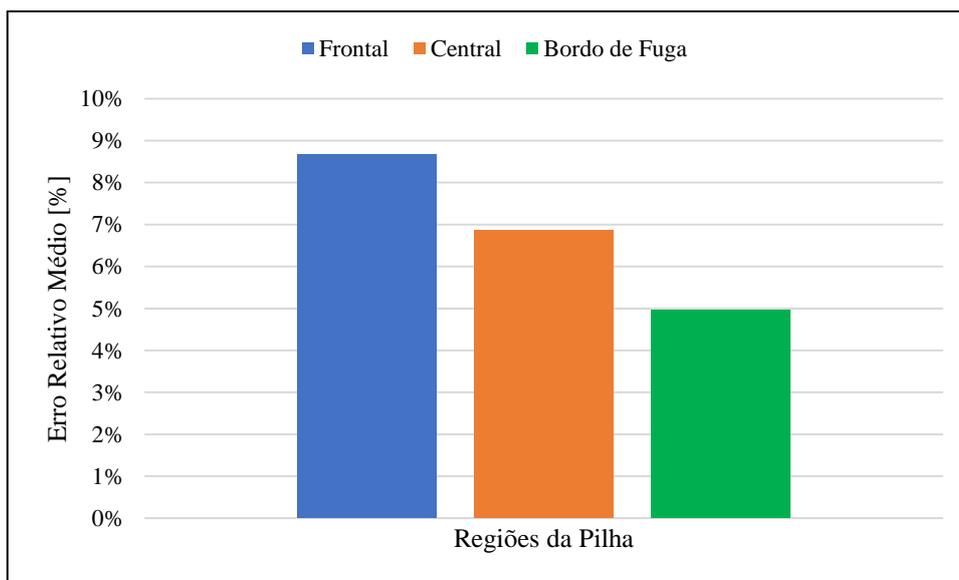


Figura 56 - Erro médio relativo por região.

A Tabela 25 mostra os resultados da análise de convergência de malha para as malhas mostradas na Tabela 19 para o estudo da secagem em pilha avaliado a 1 hora após o início do processo para a camada 1 para as regiões, frontal, longitudinal e bordo de fuga.

Tabela 25 - Teor médio de umidade para o estudo de convergência de malha em t = 1 hora como uma variável chave.

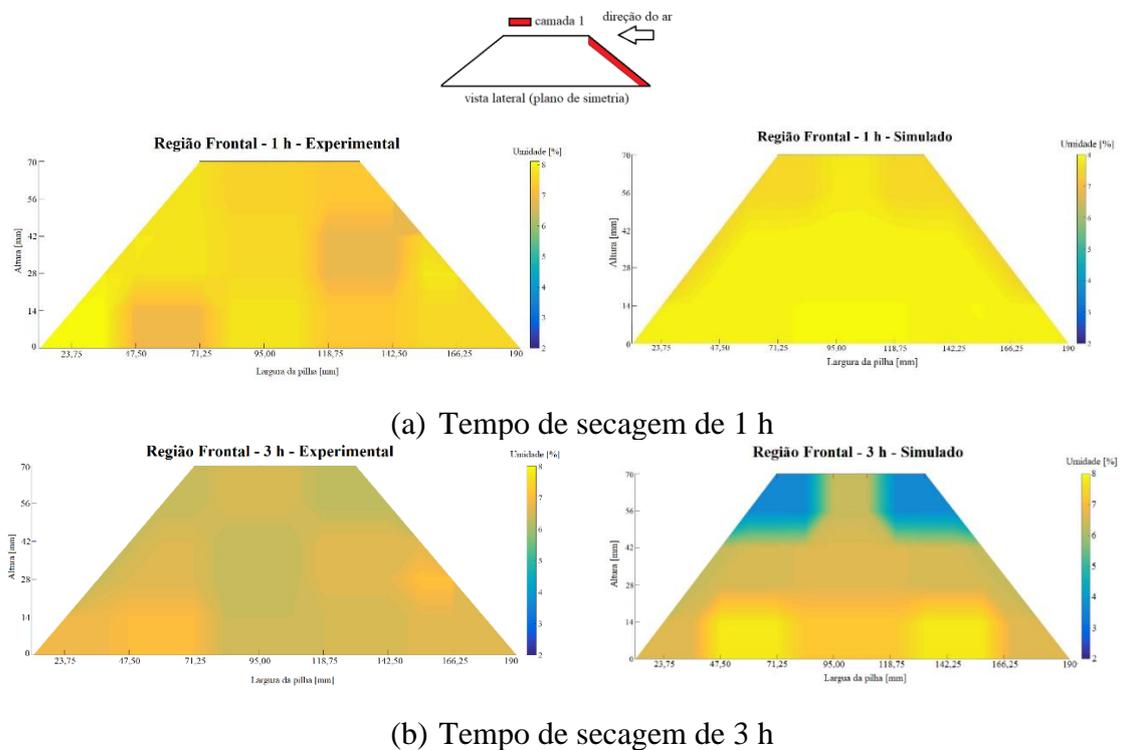
Umidade Média da Camada 1					
Tempo [h]	Região	Malha 1	Malha 2	Malha 3	Experimental
1	Frontal	7,56%	7,89%	7,73%	7,67%
	Centro	7,89%	7,95%	7,90%	7,26%
	Bordo de Fuga	7,89%	7,96%	7,90%	7,61%

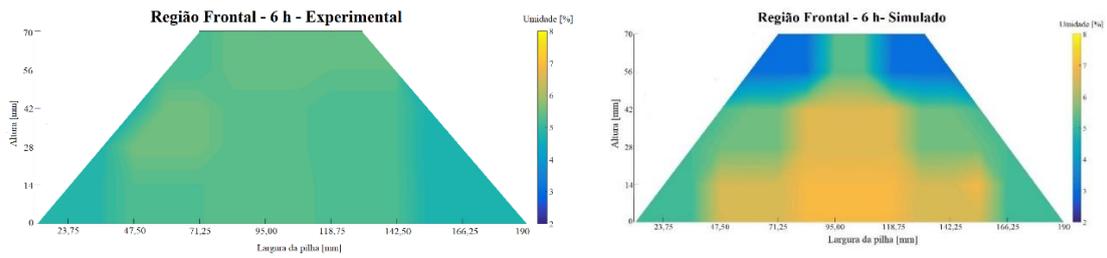
A Tabela 26 mostra o erro relativo para cada tipo de malha com base nos dados do experimento para a camada 1 para as diferentes regiões mostradas.

Tabela 26 - Erro relativo para os três tipos de malha analisados.

Erro relativo [%]			
Região	Malha 1	Malha 2	Malha 3
Frontal	1,42%	2,88%	0,82%
Centro	8,24%	9,06%	8,31%
Bordo de fuga	3,62%	4,54%	3,76%

A Figura 57 mostra a comparação da umidade do interior da pilha ao longo do tempo para o experimento e a simulação avaliados na região frontal da pilha para camada 1.

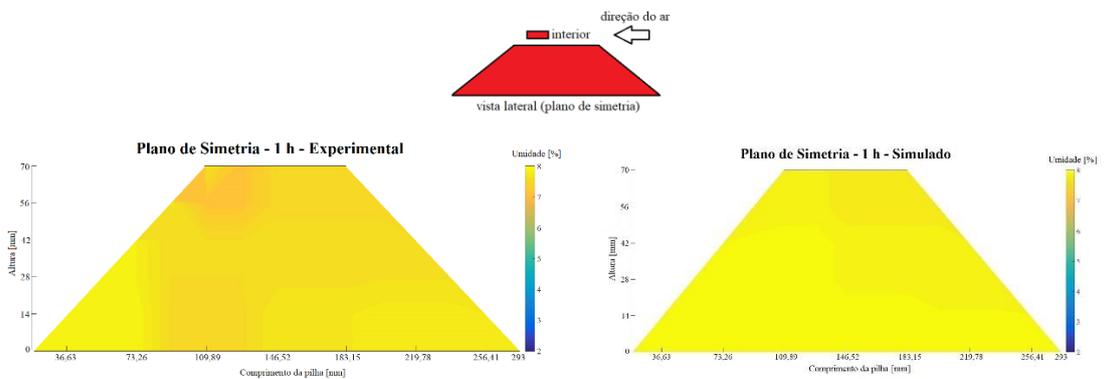




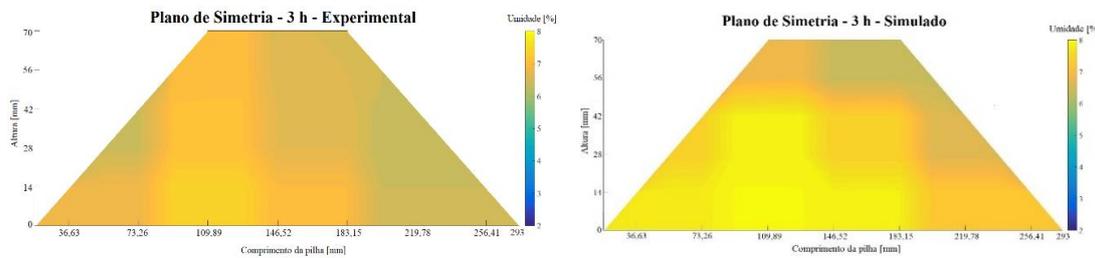
(c) Tempo de secagem de 6 h

Figura 57 - Comparação da umidade avaliada na região frontal da pilha ao longo do tempo para os resultados experimental e simulado para camada 1.

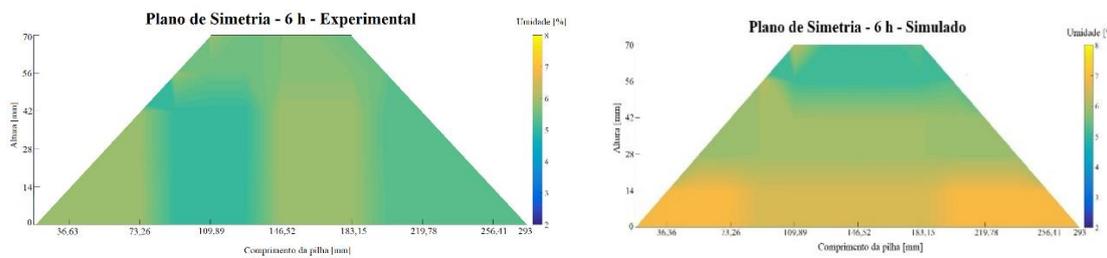
A Figura 58 mostra a comparação da umidade do interior da pilha ao longo do tempo para o experimento e a simulação avaliados na região do plano de simetria da pilha.



(a) Tempo de secagem de 1 h



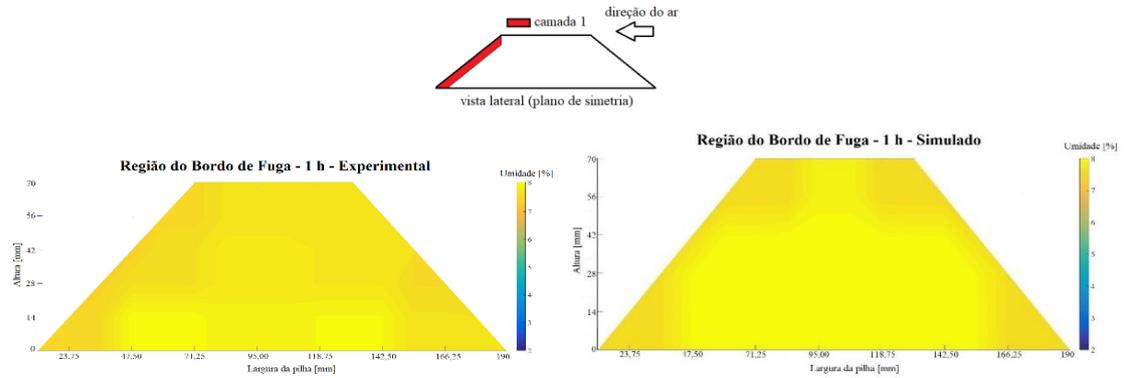
(b) Tempo de secagem de 3 h



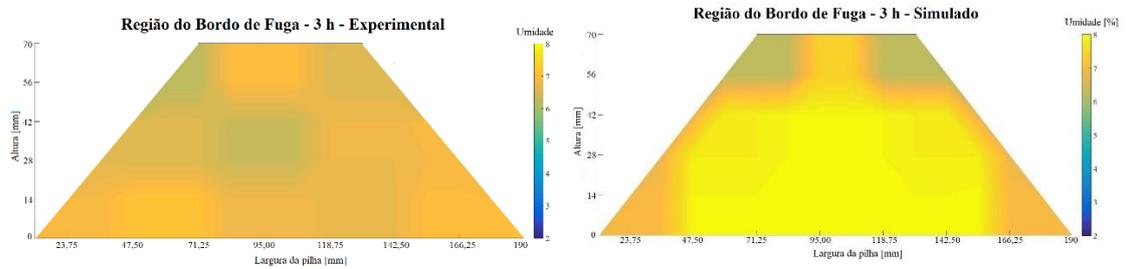
(c) Tempo de secagem de 6 h

Figura 58 - Comparação da umidade avaliada no plano de simetria da pilha ao longo do tempo para os resultados experimental e simulado para a camada 1.

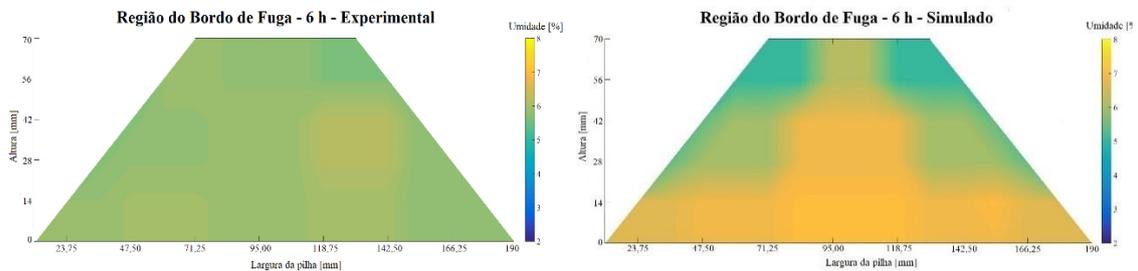
A Figura 59 mostra a comparação da umidade do interior da pilha ao longo do tempo para o experimento e a simulação avaliados na região do bordo de fuga da pilha para a camada 1.



(a) Tempo de secagem de 1 h



(b) Tempo de secagem de 3 h



(c) Tempo de secagem de 6 h

Figura 59 - Comparação da umidade avaliado na região do bordo de fuga da pilha ao longo do tempo para os resultados experimental e simulado para camada 1.

A Figura 60 mostra o contorno de velocidade da fase gás em torno da pilha.

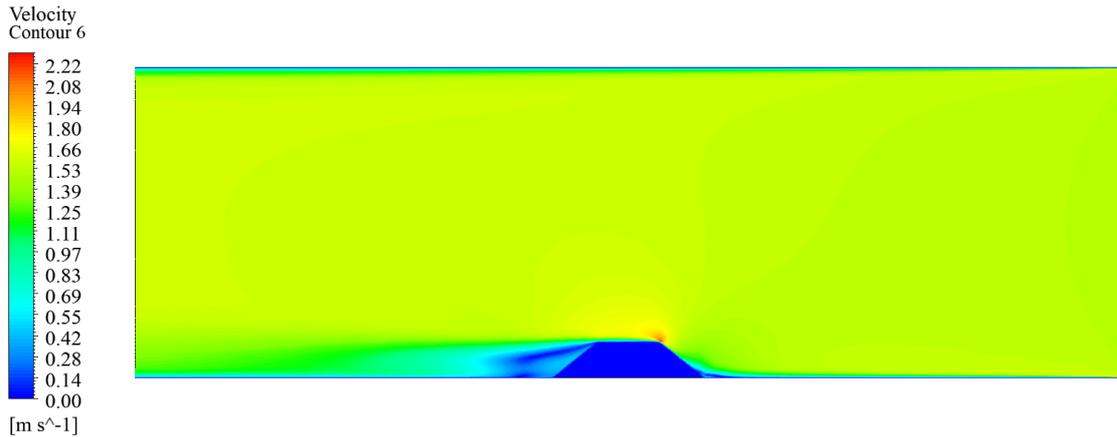
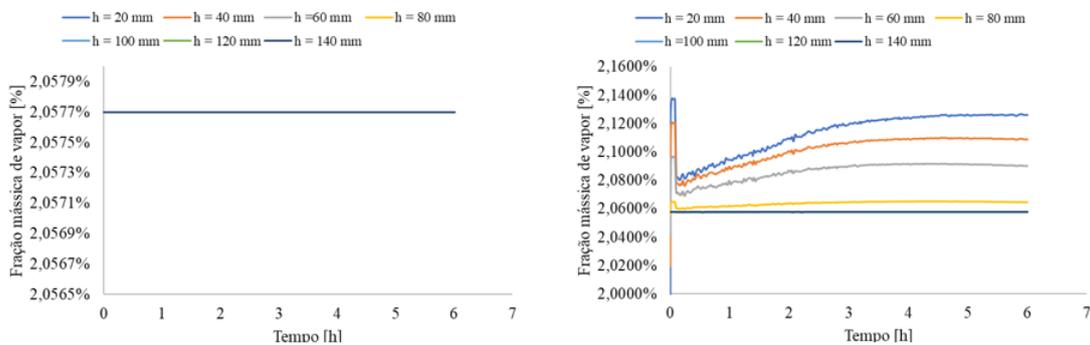


Figura 60 - Contorno de velocidade do escoamento ao redor da pilha.

A Figura 61 mostra os resultados da simulação para o balanço de fração mássica de vapor d'água avaliados ao longo da altura  $h$  das linhas de referência localizados a montante e a jusante do escoamento sobre o vagão como função do tempo. A Figura 62 mostra a localização das linhas de referência usadas para os resultados mostrados na Figura 61 para a avaliação da fração mássica de vapor.



(a) Fração mássica a montante do escoamento

(b) Fração mássica a jusante do escoamento

Figura 61 - Resultados da simulação para a fração mássica de vapor d'água avaliados ao longo da altura  $h$  das linhas de referência a montante (a) e a jusante (b) do escoamento sobre a pilha como função do tempo.



Figura 62 - Localização da linhas de referência para o resultado mostrado nas Figura 61 para avaliação da fração mássica de vapor d'água a montante e a jusante da pilha.

### 5.3.2. Discussão

Os dados do trabalho de DUAN *et al.* (2021) foram reproduzidos no presente trabalho com o propósito de validar o escoamento fluidodinâmico ao redor da pilha para o presente estudo. Os resultados das Figura 45 e Figura 46 mostram que os dados da simulação concordam bem com os dados dos testes experimentais e da simulação numérica do trabalho DUAN *et al.* (2021) para os três perfis de velocidade estudado nas posições a montante e no topo da pilha. Apesar do perfil de velocidade para a velocidade de referência de 7,22 m/s avaliado acima do topo da pilha ser o que apresentou maior dispersão em relação aos dados experimentais conforme mostrado na Figura 46-c é possível afirmar que o resultado é confiável, pois o erro médio relativo está dentro da margem de 10% aceitável. Os resultados apresentados na Figura 47 demonstram mais uma vez que o contorno de velocidade do trabalho de DUAN *et al.* (2021) concorda bem com os dados da simulação deste trabalho validando a abordagem de modelagem.

Como mostrado na Figura 48 os três tipos de malha analisadas mostram-se adequadas para representação do escoamento ao redor da pilha com pouco variabilidade observada em especial entre as malhas 2 e 3. Diante disso, as configurações dos parâmetros que caracterizam a malha 2 foi utilizada para simulação e pós-processamento dos resultados da secagem em pilha de minério de ferro que será apresentado e discutido a seguir para o Caso 3. Além do mais, para essa simulação foram utilizados aproximadamente 21.600 passos-de-tempo com tamanho para cada passo-de-tempo de 1 segundo o que correspondeu a um tempo físico total de simulação de 6 horas e o critério de convergência adotado foi de  $10^{-4}$  para todas as escalas de residuais.

Conforme pode-se observar na Figura 49 o resultado da simulação para camada 1 após 3 horas do início do processo afastou-se consideravelmente dos valores previsto pelos dados experimentais. Tal divergência observada para a camada 1 pode estar

associada às incertezas das definições termofísicas das fases e das propriedades do meio poroso derivadas empiricamente e que podem resultar em imprecisões nos resultados da modelagem. Por outro lado, para as camadas 2 e 3 mostrados nas Figura 50 e Figura 51, respectivamente, o modelo matemático teve uma boa aderência aos dados dos testes experimentais.

O erro médio relativo total da umidade média por camada é mostrado na Figura 52. Como é possível notar o maior erro é mostrado nos dados referentes à camada 1 que foi de aproximadamente 18%, erros esses associados em sua grande parte ao desvio da previsão numérica ocorrido a partir das 4 horas de simulação conforme discutido e mostrado na Figura 49. O erro médio total das outras camadas deu abaixo de 10% o que mostra que os resultados numéricos para essas camadas foram bastante consistentes com os dados dos testes experimentais.

O resultado da avaliação da cinética de secagem para diferentes regiões da pilha são mostrados nas Figura 53, Figura 54 e Figura 55 para o experimento e a simulação. É possível observar que para todas regiões da pilha os resultados da simulação mostram que decaimento de umidade no tempo é mais lento do que comparado com dados experimentais, mas ainda sim os dados concordam bem como os resultados dos testes experimentais. Tanto os resultados experimentais quanto o numérico mostram que até 2 horas após o início da secagem a região frontal da pilha apresentou teores de umidade da superfície ligeiramente superiores aos da região central e do bordo de fuga. Uma explicação provável para isso pode estar relacionada ao fato de a taxa de evaporação ser menor que taxa de migração de água para as camadas superiores nessa região. Após 2 horas a região frontal passa a apresentar um decaimento de umidade maior comparado as demais regiões, resultado esse já esperado, em virtude dos efeitos de transferência de calor e massa decorrente do desenvolvimento da camada limite do escoamento sobre a pilha.

Para os resultados do teor médio de umidade das regiões frontal, central e bordo de fuga da pilha a Figura 56 apresenta o erro médio relativo total para cada região avaliada ao final dos testes. É possível observar que a avaliação do teor médio de umidade para cada região teve uma boa representatividade, onde é possível notar que para todas as regiões avaliadas o erro médio ficou abaixo dos 10% validando, assim, a abordagem de modelagem para essa condição.

A Figura 57 mostra o gradiente de umidade da pilha para a região frontal avaliado ao longo do tempo e a comparação entre experimental e simulado. Diferenças marcantes

podem ser observadas como, por exemplo, nos tempos  $t = 3$  horas e  $t = 6$  horas nas Figura 57-b e Figura 57-c, respectivamente. Para esses resultados os dados do experimento mostram que a distribuição da unidade no interior do leito se dá de maneira bem uniforme, enquanto que os resultados da simulação mostram que nas regiões das bordas laterais superior da pilha ocorreu uma remoção potencializada de umidade nessas regiões. Essa imprecisão do modelo matemático em comparação com os dados experimentais refletem o erro mostrado na Figura 52 para camada 1. Além disso, ao final do tempo de secagem de 6 horas é possível observar que os resultados da simulação mostram um núcleo ligeiramente mais úmido em comparação com os resultados do experimento, apesar disso, o erro associado a essa diferença se encontra dentro da margem dos 10%, como mostrado pela Figura 56 o que demonstra que resultados da simulação é consistente com ao do experimento nessas regiões.

Os gradientes de umidade avaliados ao longo do eixo longitudinal da pilha no decorrer do tempo são mostrados na Figura 58 para o experimento e simulação. Conforme pode-se observar os gradientes de umidade dos resultados simulados concordam bem com os resultados experimentais. Para os resultados da simulação ao final do tempo de secagem de 6 horas, como mostrado na Figura 58-c, é possível notar que o gradiente de umidade na camada 3 é mais intenso quando comparado aos resultados do experimento. Apesar da diferença com relação aos dados experimentais, tais resultados estão de acordo com o que acontece com o fenômeno da secagem, onde a migração da umidade do interior para superfície divide o meio em duas regiões distintas que é uma região mais seca próximo a superfície e uma mais úmida no interior.

A Figura 59 mostra o gradiente de umidade da pilha para a região do bordo de fuga e a comparação com os dados experimentais e numérico. A comparação dos resultados mostram haver diferenças no gradiente de umidade em certas regiões, principalmente como mostrado nas Figura 59-b e Figura 59-c, mas que ainda sim são satisfatórios quando levado em consideração a margem de erro tolerável mostrado na Figura 56 para essa região. A comparação dessa região da pilha com as demais mostra que a região do bordo de fuga é a menos afetada pelo escoamento durante a secagem e que a região frontal foi a região, onde a secagem foi mais intensa.

Os detalhes do escoamento fluidodinâmico da fase gás em torno da pilha é mostrado na Figura 60. É possível observar um aumento do campo de velocidade na região frontal da pilha a partir do topo e esse aumento é influenciado pelo desenvolvimento da camada limite do escoamento em torno da pilha o que é responsável por aumentar taxa de secagem

nessa região corroborando com os resultados mostrados nas Figura 57-b e Figura 57-c. A velocidade do vento é um dos fatores importantes que afetam a secagem de materiais porosos e a conseqüentemente emissão de poeira. O estudo detalhado do comportamento do escoamento ao redor da pilha pode fornecer informações úteis que ajudam a compreender o mecanismo de secagem e conseqüentemente a sua relação a com dispersão de material particulado seco.

Os resultados da simulação mostrados na Figura 61 demonstra que o balanço de massa de vapor a montante e jusante estão de acordo com a física do processo. Para os resultados mostrados na Figura 61-a, assim como observado para o Caso 1 na Figura 30-a, a porcentagem de fração mássica de vapor é constante e isso ocorre porque é uma região do escoamento anterior ao bordo de ataque da pilha e, portanto, sem o efeito do vapor gerado pela secagem. Para os resultados mostrados na Figura 61-b o efeito da secagem do leito altera a concentração mássica de vapor após o bordo de ataque da pilha. Em até 3 horas de simulação essa alteração da fração mássica de vapor d'água a jusante do escoamento da pilha é crescente para os pontos localizados nas alturas de 20 a 60 mm da linha de referência e para as alturas de 80 a 140 mm tende aos valores da corrente livre. Após 3 horas os valores das frações mássicas a jusante avaliada ao longo da linha vertical de referência tende um padrão estacionário com os pontos mais próximo do solo experimentando uma maior concentração de fração mássica.

Os resultados numérico e experimental do processo de secagem em pilha de minério de ferro mostrou que há uma diminuição gradual e significativa no valor da umidade conforme as camadas se aproximam da superfície do material exposto ao ar de secagem. Essa observação é explicada devido ao fato de que ocorre a secagem das camadas superiores da pilha, regiões estas, mais propensas a emissão de partículas conforme a secagem avança. A região frontal da pilha é a região com maior taxa de secagem e isso pode ser observado nos resultados das imagens a partir da comparação com as outras regiões. Para todos os resultados, a umidade das camadas inferiores migra por capilaridade até a superfície para daí serem evaporada. Tais resultados são importantes, pois fornecem informações valiosas para o estudo e desenvolvimento de modelos numéricos como os apresentados aqui que ajudam a compreender o fenômeno. Os erros apreciáveis foram observados, principalmente na camada superficial da pilha, o que demonstra que o modelo matemático precisa ser melhorado para uma melhor fidelidade do estudo em questão.

## 5.4. CASO 4 – ESCOAMENTO TRANSIENTE SOBRE LEITO DE MINÉRIO

### 5.4.1. Apresentação dos Resultados

A Figura 63 mostra a cinética de secagem adimensional para o experimento e a comparação com os resultados simulado para o leito de minério

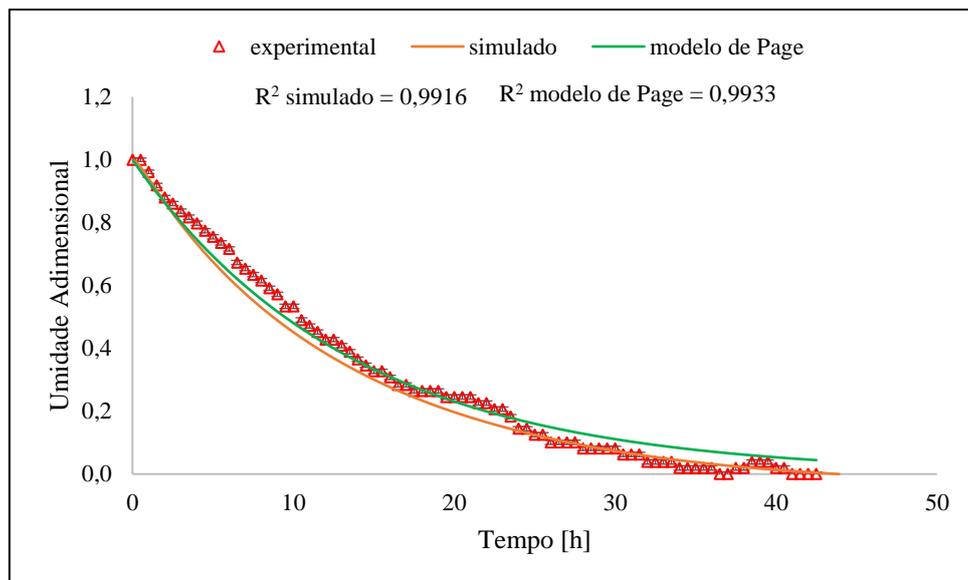


Figura 63 - Cinética de secagem para o estudo em leito fixo para velocidade de 3,6 km/h – Caso 4.

A taxa de secagem do leito, calculada segundo a Eq. (65), em função do tempo é mostrada na Figura 64.

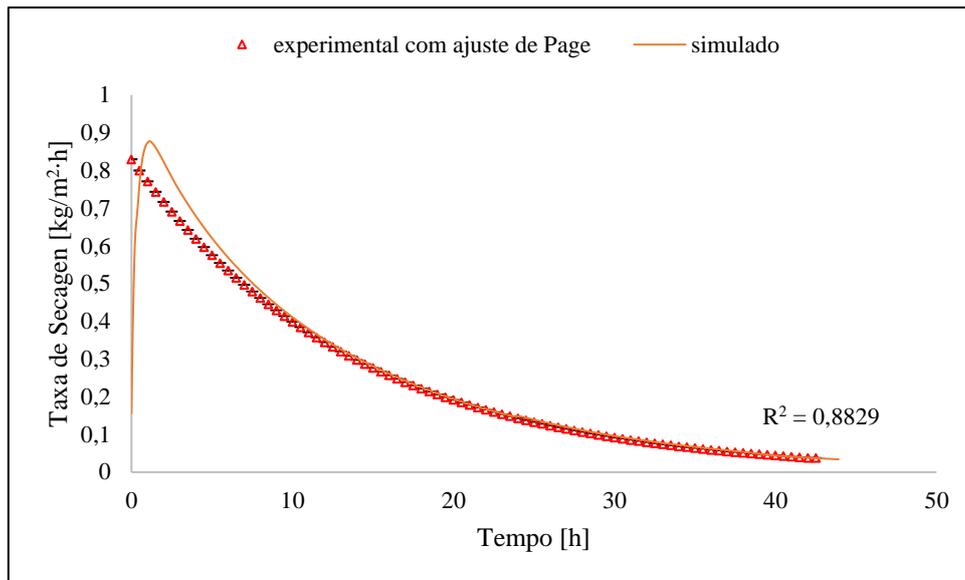


Figura 64 - Taxa de secagem em base seca em função do tempo para o experimento e simulação – Caso 4.

O perfil de taxa de secagem em função da umidade para o experimento e simulação é mostrado na Figura 65.

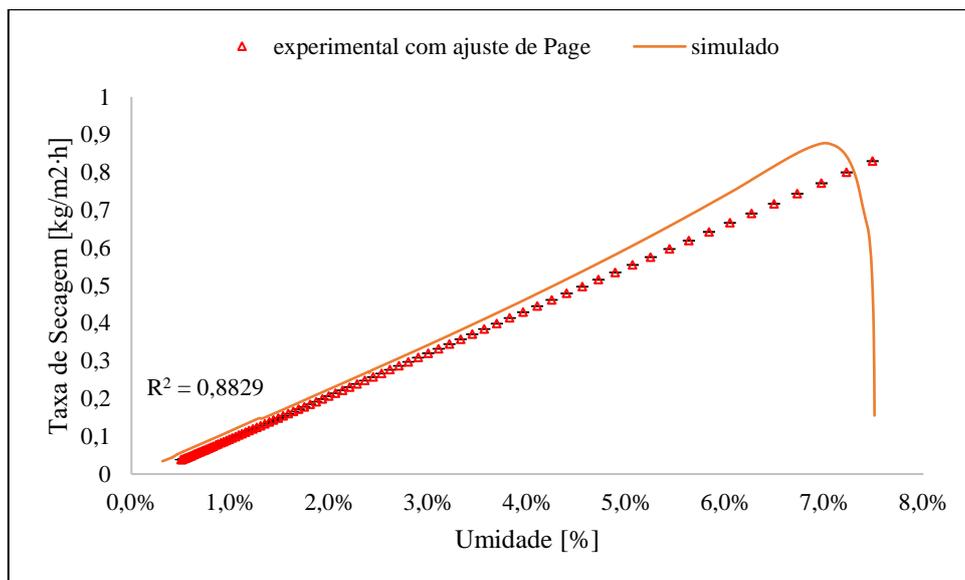


Figura 65 - Perfil de taxa de secagem em base seca versus a umidade para a simulação e experimento – Caso 4.

#### 5.4.2. Discussão

A malha de volume finitos escolhida para o Caso 1 a partir da análise de convergência de malha dos resultados mostrado na Tabela 24 foi adaptada e utilizado para o Caso 4. Para essa simulação foram utilizados aproximadamente 53.600 passos-de-

tempo com 3 segundos para cada tamanho de passo-de-tempo o que corresponde um tempo físico total de simulação de 43 horas. O critério de convergência foi de  $10^{-4}$  para todas as escalas residuais.

A Figura 63 mostra a cinética de secagem adimensional para a simulação e o experimento para o leito de minério. O modelo de PAGE (1949) também foi aplicado à curva experimental obtida, onde as constantes foram ajustadas para  $k = 0,073242$  e  $n = 1$  e se mostraram satisfatórias, com valores de  $R^2$  da ordem de 0,9933. Os resultados mostram que os dados da simulação apresentaram boa concordância com os dados dos testes experimentais, assim como para o Caso 1. Além disso, é possível observar que o decaimento da umidade com o tempo é mais acentuado até 10 horas após o início do processo e que após esse período o decaimento da umidade torna-se mais demorado no decorrer do tempo, tal comportamento observado é típico do estágio decrescente do processo de secagem. Nesse trabalho é possível observar que a umidade de equilíbrio para essas condições é atingida após 40 horas e seu valor corresponde aproximadamente a 0,18 %.

A comparação dos perfis de taxa de secagem em função do tempo para o experimento e simulação são mostrados na Figura 64. Os resultados dos modelos numéricos foram consistentes na maior parte do tempo com a taxa de secagem dos dados experimentais para o leito fixo. No entanto, para o início do processo os resultados numéricos divergiram ligeiramente da curva prevista experimentalmente durante as primeiras horas do início do processo. Apesar disso, é seguro afirmar que o modelo matemático previu com sucesso a taxa de secagem para os dois casos estudados.

Os resultados da taxa de secagem versus a umidade para a simulação e o experimento são mostrados na Figura 65. Para esse estudo, assim como mostrado na Figura 29 os resultados da simulação tiveram um bom ajuste a curva dos dados experimentais e, além disso, o período de taxa secagem constante também não foi observado durante o processo pelos motivos já citados anteriormente para o Caso 1. Além do mais, quando esses resultados são comparados com os resultados da Figura 29 do estudo em vagão, é possível observar que apesar do campo de escoamento externo ter sido menor para o leito de minério comparado ao vagão a taxa de secagem observada no leito foi maior do que a secagem em vagão e, esse fato pode estar associado a três fatores. O primeiro pode ser explicado pelo fato de as dimensões do leito de minério ser ligeiramente menor do que as dimensões do modelo de vagão o que pode influenciar na velocidade de migração da umidade do interior para superfície dado que a altura do leito

é menor do que o vagão. O segundo fator está associado à umidade relativa do ar de secagem no leito de minério ser menor do que a observado no estudo em vagão o que favorece a secagem. E, por último e mais importante, tem-se a influência do campo de temperatura do ar de secagem durante o processo que para o experimento foi de 50 °C, enquanto que para o estudo em vagão foi de 32 °C o que representa um aumento de 56,25%. Os resultados obtidos aqui para o estudo da secagem em leito fixo reforçam o que TWIER *et al.* (2018) e ELGAMAL *et al.* (2014) afirmam em seus trabalhos, onde a temperatura do ar de secagem é considerada o fator mais importante na taxa de secagem quando comparado com os efeitos da velocidade do ar e da umidade relativa.

## CAPITULO 6 – CONCLUSÃO

Neste trabalho foi apresentado um estudo do processo de secagem que ocorre no minério de ferro para condições semelhantes aquelas encontradas na indústria. Dessa forma, as características do processo de secagem foram investigadas através de uma metodologia teórica e experimental estabelecida, onde foi possível avaliar parâmetros importantes que influenciam o processo, tais como, o campo de velocidade, temperatura, umidade relativa e as propriedades do meio poroso. Um modelo matemático capaz de simular esse processo foi desenvolvido e aplicado para o estudo da secagem em vagão, pilha e leito fixo. O modelo matemático foi validado a partir de dados de testes experimentais e os resultados mostram-se satisfatório. O desenvolvimento do modelo matemático permitiu uma análise detalhada dos fenômenos físicos envolvidos durante a secagem do minério de ferro, onde foi possível estudar o efeito da umidade superficial desse material e a sua correlação com o processo de arraste eólico, como ocorre no transporte em vagões abertos e em pátios de armazenamento de pilhas.

As curvas da cinética de secagem para o estudo em vagão e leito de minério foram obtidas com o uso de um sensor de umidade e seus resultados foram comparados com os resultados numérico da simulação que mostraram boa correlação. Os resultados numéricos para o gradiente de umidade no interior do vagão para velocidades variando de 40 a 70 km/h mostraram-se satisfatórios em relação aos resultados experimentais. A avaliação da umidade final média por camada nos experimentos não mostrou uma tendência muito clara em relação à velocidade. As investigações mostraram que para as camadas mais próximas da superfície, os teores médios finais de umidade ficaram na faixa de 4,50% a 5,50%, e não foram suficientes para impedir a emissão de partículas para a atmosfera porque as forças capilares responsáveis pela adesão de partículas devido a pontes líquidas foram significativamente menores para esta faixa de umidade. Para os resultados da secagem em pilha o modelo matemático se mostrou satisfatório, porém, erros consideráveis foram apreciados na comparação com os dados experimentais o que demonstra que para o estudo envolvendo a pilha o modelo matemático precisa ser melhorado. Tal desvio pode estar associado às complexas interações entre as fases e aos processos simultâneos de transferência de calor e massa, que são altamente dependentes das características do meio poroso, como porosidade, permeabilidade absoluta, permeabilidade relativa, condutividade térmica e assim por diante. Portanto, uma

avaliação mais detalhada das características do ambiente e das fases envolvidas deve ser melhor investigada para que o modelo possa ser aprimorado.

Foi apresentada uma análise teórica do comportamento térmico das interações entre o escoamento externo, vagão e meio poroso. Os resultados permitiram uma análise qualitativa do comportamento do campo de temperatura em pontos específicos do vagão e do leito de minério, o que pode contribuir para o efeito de secagem. Uma investigação mais detalhada desse comportamento térmico se faz necessária, como medições experimentais e monitoramento do campo de temperatura do vagão e do leito.

Portanto, este trabalho procurou mostrar que o estudo do processo de secagem que ocorre em fino de minério de ferro é importante, pois pode ajudar no entendimento e desenvolvimento de soluções que minimize os impactos gerados pela emissão de poeira quando tais materiais estão pouco úmidos. Através da metodologia de estudo estabelecida foi possível mapear os gradientes de umidade no interior do material o que ajuda a entender a dinâmica de migração da umidade durante o processo. As informações do valor de umidade próxima a superfície do minério podem ser usadas em sistema inteligentes de aspersão de produtos supressores de poeiras, tais como, as a base de água ou surfactante, para otimizar a pulverização usadas sobre a superfície dos vagões abertos ou de pilhas de minério de ferro.

#### SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Desenvolver um modelo matemático que possa prever o desprendimento de partículas que estar sendo acoplado com o modelo matemático de secagem do presente trabalho;
- Realizar novos estudos com testes experimentais de secagem em pilha para avaliação de parâmetros importantes, tais como, temperatura e velocidade de escoamento;
- Simular numericamente e experimentalmente o efeito da secagem em pilha e vagão quando sub o efeito de elementos supressores como surfactantes para avaliar como isso afeta a secagem interna do leito.
- Fazer uma análise estatística mais detalhada das variáveis medida durante o procedimento experimental.

# REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABERNETHY, R. B.; BENEDICT, R. P.; DOWDELL, R. B. “ASME Measurement Uncertainty”. **Journal of Fluids Engineering**. 107, pp. 161-163, 1985.

ALAZAIZA, M. Y. D.; COPTY, N. K.; NGIEN, S. K. *et al.*, “Characterization of Capillary Pressure–Saturation Relationships for Double-Porosity Medium Using Light Transmission Visualization Technique”. **Transport in Porous Media**. 130, pp. 513-528, 2019.

ALI, M.; MAHMUD, T.; HEGGS, P. J. *et al.*, “CFD Modeling of a Pilot-Scale Countercurrent Spray Drying Tower for the Manufacture of Detergent Powder”. **Drying Technology**. 35, 3, pp. 281-299, 2017.

ALMUBARAK, A. “Investigation of Drying Mechanism of Solids Using Wind Tunnel”. Edited by Noor Ahmed. **Wind Tunnel Designs and Their Diverse Engineering Applications**. Chapter 8. Web of Science. IntechOpen, 2013.

ATHAYDE, M.; FONSECA, M. C.; BAGATINI, M. C. “Iron Ore Pellet Drying Assisted by Microwave: A Kinetic Evaluation”. **Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review**. 39, 4, pp. 266-275, 2018.

AFSHAR, S.; METZGER, L.; PATEL, H. *et al.*, “A Practical CFD Modeling Approach to Estimate Outlet Boundary Conditions of Industrial Multistage Spray Dryers: Inert Particle Flow Field”. **Drying Technology**. 37, 7, pp. 824-838, 2019.

Associação Brasileira de Normas Técnicas 2003 – ABNT. Agregados – Determinação da Composição Granulométrica. Comitê Brasileiro de Cimento, Concreto e Agregados (ABNT/CB-18). NBR NM 248 – Aggregates – Sieve analysis of fine and coarse aggregates. July 2003. Disponível em: <[http://professor.pucgoias.edu.br/sitedocente/admin/arquivosupload/17827/material/nbr\\_nm248\\_2003.pdf](http://professor.pucgoias.edu.br/sitedocente/admin/arquivosupload/17827/material/nbr_nm248_2003.pdf)>. Acessado em 05/01/2022.

Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT NBR 7181, Norma Brasileira. Solo – Análise Granulométrica. 2ª Edição, 2016.

BABU, A. K.; KUMARESAN, G.; RAJ, V. A. A. *et al.* “CFD studies on different configurations of drying chamber for thin-layer drying of leaves”. **Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects**. 42, 18, pp. 2227-2239, 2020.

BALA, B. K. **Drying and Storage of Cereal Grains**. 2ª Edition, Jessore-Bangladesh, Wiley Blackwell, 2017.

BALACHANDAR, S. e EATON, J. K. “Turbulent Dispersed Multiphase Flow”. **Annual Review of Fluid Mechanics**. 42, pp. 33-111, 2010.

BANOONI, S.; HAJIDAVALLOO, E.; DORFESHAN, M. “A Comprehensive Review on Modeling of Pneumatic and Flash Drying”. **Drying Technology**. 36, 1, pp. 33-51, 2018.

BATISTA, J. N. M. e BÉTTEGA, R. “Evaluation of the Effect of Cone Geometry on Spouted Bed Fluid Dynamics by CFD-DEM Simulation”. **Drying Technology**. 40, 10, pp. 2073-2086.

BEJAN, A. **Convection Heat Transfer**. 4ª Edition, Durham, North Carolina-EUA, John Wiley & Sons, 2013.

BELLEGHEM, M. V.; BACKER, L.; JANSSENS, A. *et al.*, “Conjugate Modelling of Convective Drying Phenomena in Porous Building Materials”. **Journal of Physics: Conference Series**. 395, 012142, 2012.

BORBA, M. V. S., 2017, **Avaliação do Uso de Diferentes Tipos de Polímeros de Pó no Controle de Emissões Atmosféricas Durante o Transporte de Minério de Ferro na EFVM - Estrada de Ferro Vitória a Minas**. Dissertação de M.Sc., Instituto Vale/ITV, Belém, PA, Brasil.

BARROS, A. L. M., 2008, **Distribuição Horária de Lotes de Vagões GDE para Carregamento de Minério na EFVM**. Curso de Especialização de Transportes Ferroviário de Carga/IME, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

BURSTRÖM, P. E. C.; FRISHFELDS, V.; LJUNG, A. L. *et al.*, “Modelling Heat Transfer During Flow Through a Random Packed Bed of Spheres”. **Heat Mass Transfer**., 54, pp. 1225–1245, 2018.

BUTT, H. J.; MAKOWSKI, M.; KAPPL, M. *et al.*, “On the Adhesion Between Individual Particles”. **KONA Powder and Particle Journal**. N° 29, 2011.

CABRAL, P. **Erros e Incertezas nas Medições**. Rio de Janeiro. Julho de 2004. Disponível em: <<https://www.studocu.com/pt-br/document/instituto-federal-de-educacao-ciencia-e-tecnologia-sul-rio-grandense/engenharia-de-controle-e-automacao/paulo-cabral-erros-e-incertezas-nas-medicoes-julho-2004/50217107>> Acessado em: 20/04/2023.

CARSEL, R.; PARRISH, R. “Developing Joint Probability Distributions of Soil Water Retention Characteristics”. **Water Resources Research**. 24, 5, pp. 755–769, 1988.

CHAULYA, S. K.; CHOWDHURY, A.; KUMAR, S. *et al.*, “Fugitive Dust Emission Control Study for a Developed Smart Dry Fog System”. **Journal of Environmental Management**. 285, 112116, pp. 1-12, 2021.

CHEN, P. and PEI, D. C. T. A “Mathematical Model of Drying Processes”. **Int. J. Heat Mass Transfer**. 32, 2, pp. 297–310, 1989.

CHEN, J.; WILLIAMS, K.; CHEN, W. *et al.*, “A Review of Moisture Migration in Bulk Material”. **Particulate Science and Technology**. 38, pp. 247-260, 2020.

CRUZ, D. A., 2015, **Estudo das Curvas de Permeabilidade Relativa Água-Óleo Considerando o Efeito de Forças Capilares na Produção Adicional de Óleo**. Dissertação de M.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

DEFRAEYE, T.; BLOCKEN, B.; CARMELIET, J. "Analysis of Convective Heat and Mass Transfer Coefficients for Convective Drying of a Porous Flat by conjugate

modelling". **International Journal of Heat and Mass Transfer**. 55, 1-3, pp. 112-124, 2012.

DEFRAEYE, T. "Advanced Computational Modelling for Drying Process - A Review". **Applied Energy**. 131, pp. 323-344, 2014.

DUAN, Z.; WANG, Y.; JIAO, Q. *et al.*, "Local Dispersion Characteristics of Dust in Large Open-Air". **Environmental Science and Pollution Research**. 28, pp. 47182–47195, 2021.

EL-BEHERY, S. M.; EL-ASKARY, W. A.; HAMED, M. H. *et al.*, "Eulerian–Lagrange Simulation and Experimental Validation of Pneumatic Conveying Dryer". **Drying Technology**. 31, pp. 1374-1387, 2013.

ELGAMAL, R.; RONSSE, F.; RADWAN, S. M. *et al.*, "Coupling CFD and Diffusion Models for Analyzing the Convective Drying Behavior of a Single Rice Kernel". **Drying Technology**. 32, 3, pp. 311-320, 2014

ERTEKIN, C.; FIRAT, M. Z. "A Comprehensive Review of Thin-Layer Drying Models Used in Agricultural Products". **Critical Review in Food Science and Nutrition**, 54, pp. 701-717, 2017.

ESMAILI, A. A.; DONOHUE, T. J.; WHEELER, C. A. *et al.*, "One the Analysis of a Coarse Particle Free Falling Material Stream". **International Journal of Mineral Processing**. 142, pp. 82-90, 2015.

FERREIRA, R. F.; POLICARPO, D. L. V.; PADULA, V. P. *et al.*, "Limite de Umidade Transportável de Minério de Ferro: Aspectos Regulatórios e Técnicos". **Tecnologia em Metalurgia, Materiais e Mineração**. 14, 1, pp. 16-23, 2017.

FENG, J.; ZHANG, Y.; ZHENG, H.; *et al.*, "Drying and Preheating Processes of Iron Ore Pellets in a Traveling Grate". **International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials**. 17, 5, pp. 535, 2010.

FRANCO, C. M. R.; LIMA, A. G. B.; FARIAS, V. S. O. *et al.*, "Modeling and experimentation of continuous and intermittent drying of rough rice grains". **Heat and Mass Transfer**. 56, pp. 1003-1014, 2020.

FOX, R. W.; PRITCHARD, P. J.; MCDONALD, A.T. **Introdução à Mecânica dos Fluidos**. 9ª Edição, Editora Gen/LTC, 2018.

FURTADO, M. C.; FONTANA, A. R. L.; SILVA, D. S. *et al.*, Estudo em Túnel de Vento da Secagem de Pilha de Armazenamento de Minério de Ferro. **XL Congresso Brasileiro de Sistemas Particulados**. Uberlândia-MG, outubro de 2022.

GAO, B.; DAVARZANI, H.; HELMIG, R. *et al.*, "Experimental and Numerical Study of Evaporation from Wavy Surface by Coupling Free and Porous Media Flow". **Water Resources Research**. 54, 11, pp. 9096-9117, 2018.

GAO, B.; FARNSWORTH, J.; SMITS, K. M. "Evaporation from undulating soil surfaces Under Turbulent Airflow Through Numerical and Experimental Approaches" **Vadose Zone Journal**. 19, 1, pp. 1-19, 2020.

GEANKOPLIS, C. J. **Transport Processes and Unit Operations**. 3<sup>a</sup> Ed. University of Minnesota - USA. By PTR Prentice-Hall International, Inc., 1993.

GENARO, L. B., 2021, **Leito Fixo com Reversão do Ar de Secagem: Estudo Experimental e Numérico da Secagem de Alumina**. Dissertação de M.Sc., UFSCar/CCET/PPEQ, São Carlos, SP, Brasil.

GOMES, L. M.; MESQUITA, A L. “Effect of particle size and sphericity on the pickup velocity in horizontal pneumatic conveying”. **Chemical Engineering Science**. 104, pp. 780-789, 2013.

HAN, Q.; QU, J.; ZHANG, K. *et al.*, “Wind Tunnel Investigation of the Influence of Surface Moisture Content on the Entrainment and Erosion of Beach Sand by Wind Using Sands from Tropical Humid Coastal Southern China”. **Geomorphology**. 104, pp. 230-237, 2009.

HUGHMARK, G. A. “Mass and Heat Transfer from Rigid Spheres”. **AICHE Journal**. 13, pp. 1219-1221, 1967.

INCROPERA, F. P.; DEWITT, D. P.; BERGMAN, T. L. *et al.*, **Fundamentos de Transferência de Calor e de Massa**. 8<sup>a</sup> Edição, Gen/LTC, 2019.

KAHVECI, K. “Modeling and Numerical Simulation of Simultaneous Heat and Mass Transfer During Convective Drying of Porous Materials”. **Textile Research Journal**. 87, pp. 617-630, 2017.

KEMP, I. C.; OAKLEY, D. E. “Modelling of Particulate Drying in Theory and Practice”. **Drying Technology**. 20, 9, pp. 1699–1750, 2002.

KEMP, I. C. “Process-systems Simulation Tools”. In: TSOTSAS, E.; MUJUMDAR, A. S. editors. **Mod. Dry. Technol. - Comput. Tools Differ. Scales**. Weinheim-Germany: Wiley-VHC Verlag GmbH, 1, pp. 261–305, 2007.

KOWALSKI, S. J.; MUSIELAK, G.; BANASZAK, J. “Experimental Validation of the Heat and Mass Transfer Model for Convective Drying”. **Drying Technology**. 25, pp. 107–121, 2007.

KUNDRA T.; MUJUMDAR, A.S. **Advanced Drying Technologies**. 2<sup>a</sup> Edition, Boca Raton-USA, CRC Press, Taylor & Francis Group, 2009.

KHAN, M. I. H.; JOARDDER, M. U. H.; KUMAR, C. *et al.* "Multiphase Porous Media Modelling: A novel approach to predicting food processing performance". **Critical Reviews in Food Science and Nutrition**. 58, 4, pp. 528-546, 2017.

KLINE, S. J.; MCCLINTOCK, F. A. “Describing Uncertainties in Single-Sample Experiments. **Mechanical Engineering**, 75, pp. 3-8, 1953.

KLINE, S. J. **The purpose of uncertainty analysis**. Journal of Fluid Engineering, 107, pp. 153-160, 1985.

LEAL FILHO, L. S.; ISHI, H. A.; AZEVEDO, R. C. **Subsídios Técnicos para Redução de Poeira no Transporte de Minério de Ferro pela EFVM**. Universidade de São Paulo – USP, 2011.

LEÃO, R. X. A.; AMORIM, L. S.; MARTINS, M. F. *et al.*, “A Model for Velocity Streamlines of Airborne Dust Particles Spreading Caused by Free-Falling bulk Materials”. **Powder Technology**. 371, pp. 190-194, 2020.

LI, Z.; VANDERBORGHT, J.; SMITS, K. M. “Evaluation of Model Concepts to Describe Water Transport in Shallow Subsurface Soil and Across the Soil-Air Interface”. **Transport in Porous Media**. 128, pp. 945-976, 2019.

LIRA, I.; CORDERO, R. R.; FRANCOIS, M. *et al.*, “The Uncertainty of Experimental Derivatives: Application to Strain Measurement”. **Measurement Science and Technology**. 15, pp. 2381–2388, 2004.

LIU, Z.; FU, J.; YANG, M. *et al.*, “New Model for Particle Removal from Surface in Presence of Deformed Liquid Bridge”. **Journal of Colloid and Interface Science**. 562, pp. 268-272, 2020.

LOREDO-SOUZA, A. M.; SCHETTINI, E. B. C.; GUIMARÃES, A. F. *et al.*, Wind Testing of a Coal Pile of the CVRD – Vitória, Brazil, and the Effects Caused by Porous Fences. **Tenth Americas Conference on Wind Engineering Pre-Proceedings**. Baton Rouge, Louisiana, USA, June of 2005.

LU, X.; XIE, P.; INGHAM, D. B. *et al.* “A Porous Media Model for CFD Simulations of Gás-Liquid Two-Phase Flow in Rotating Packed Beds”. **Chemical Engineering Science**. 189, pp. 123-134, 2018.

LEE, W. H. A. **Pressure Iteration Scheme for Two-Phase Modeling**. Technical Report LA-UR, pp. 79-975. Los Alamos Scientific Laboratory, Los Alamos, New México, 1979.

LJUNG, A. L.; FRISHFELDS, V.; LUNDSTROM, T. S. *et al.*, “Discrete and Continuous Modeling of Heat and Mass Transport in Drying of a Bed of Iron Ore Pellets”. **Drying Technology**. 30, pp. 760–773, 2012.

LJUNG, A. L.; LUNDSTRÖM, T. S.; MARJAVAARA, B. D. *et al.*, “Convective Drying of an Individual Ore Pellet – Analysis with CFD”. **International Journal of Heat and Mass Transfer**. 54, pp. 3882-3890, 2011.

MARYNOWSKI, R., 2016, **Experimental Investigations on Evaporation from Porous Media**. Ph.D thesis, University of Windsor, Windsor, Ontario, Canadá.

METZGER, T.; TSOTSAS, E. “Influence of Pore Size Distribution on Drying Kinetics: A Simple Capillary Model”. **Drying Technology**. 23, pp. 1797–1809, 2005.

MOFFAT, R. J. “Contributions to the Theory of Single Uncertainty Analysis”. **Transactions of the ASME**. 104, pp. 250-258, 1982.

MOFFAT, R. J. “Using Uncertainty Analysis in the Planning of an Experiment”. **Journal of Fluid Engineering**. 107, pp. 173-178, 1985.

- MOFFAT, R. J. “Describing the Uncertainties in Experimental Results”. **Experimental Thermal and Fluid Science**. 1, pp. 3-17, 1988.
- MOHAN, V. P. C.; TALUKDAR, P. “Design of an Experimental set up for Convective Drying: Experimental Studies at Different Drying Temperature”. **Heat Mass Transfer**. 49, pp. 31-40, 2013.
- MORAN, M. J.; SHAPIRO, H. N.; BROETTNER, D. D. *et al.*, **Princípios de Termodinâmica para Engenharia**. 8ª Edição, Editora Gen/LTC, 2019.
- MOREIRA, D. D. C.; SANTOS, C. A. S.; MESQUITA, A. L. A. *et al.*, “Influence of Particle Size Distribution of Iron Fines on Liquefaction During Marine Transportation”. **Powder Technology**. 373, pp. 301-309, 2020.
- MOSTHAF, K.; HELMIG, R.; OR, D. "Modeling and analysis of evaporation processes from porous media on the REV scale". **Water Resources Research**. 50, 2, pp. 1059-1079, 2014.
- MUJUMDAR, A. S. **Industrial Transfer Process**. Department of Mechanical Engineering. National University of Singapore. 2011/2012.
- MUJUMDAR, A. S. “Principles, Classification, and Selection of Dryers”. Edited by Mujumdar, A. S. **Handbook of Industrial Drying**. Chapter 1. Ed. CRC Press: Boca Raton, 2015.
- NASCIMENTO, E. L., 2014, **Suspensão e Deposição de Material Particulado Emitido por Pilhas de Estocagem de Granulados: Uma Abordagem Numérica Empregando LES**. Tese de D.Sc., PPEA/UFES, Vitória, ES, Brasil.
- NADHARI, W. N. A. N.; HASHIM, R.; SULAIMAN, O. *et al.*, “Drying Kinetics of Oil Palm Trunk Waste in Control Atmosphere and Open Air Convective Drying”. **In Journal Heat and Mass Transfer**. 68, pp. 14-20, 2014.
- NAMKUNG, W.; CHO, M. “Pneumatic Drying of Iron Ore Particles in a Vertical Tube”. **Drying Technology**. 22, 4, pp. 877-891, 2004.
- NASR, B.; DHANIYALA, S.; AHMADI, G. “Particle Resuspension from Surface: Overview of Theoretical Models and Experimental Data”. **In Developments in Surface Contamination and Cleaning**. Chapter 2. William Andrew. Applied Science Publisher, 2017.
- PAGE, G. E., 1949, **Factors Influencing the Maximum Rates of Air Drying Shelled Corn in Thin Layers**. Ph.D. Thesis, Purdue University, Department of Mechanical Engineering, West Lafayette, Indiana, USA.
- PATEL, H. V.; KUIPERS, J. A. M.; PETERS, E. A. J. F. “Effect of Flow and Fluid Properties on the Mobility of Multiphase Flows Through Porous Media”. **Chemical Engineering Science**. 193, pp. 243-254, 2019.
- PETRY, V. J., 2007, **Desenvolvimento de um Modelo para a Transferência de Calor e Massa em Meio Granulares**. Tese de D.Sc., PPGMAp/UFRGS, Porto Alegre, RS, Brasil.

PINTO, T. C. S.; MORAES JUNIOR, D.; LIA, L. R. B. et al. Mecanismo de Secagem Visando a Redução de Umidade em Sinter Feed de Minério de Ferro. **16º Simpósio Brasileiro de Minério de Ferro e 3º Simpósio Brasileiro de Aglomeração de Minério de Ferro**. Rio de Janeiro-RJ, Agosto de 2015.

PINTO, T. C. S.; SOUZA, A. S.; BATISTA, J. N. M. *et al.*, “Characterization and Drying Kinetics of Iron Ore Pellet Feed and Sinter Feed”. **Drying Technology**. 39, pp. 1359-1370, 2020.

RAMACHANDRAN, R. P.; AKBARZADEH, M.; PALIWAL, J. *et al.*, “Computational Fluid Dynamics in Drying Process Modelling - a Technical Review”. **Food and Bioprocess Technology**. 11, pp. 271-292, 2017.

SANTOS, G. A.; PINTO, E. S.; SILVA, A. J. C. *et al.*, “Real-Time Capacitive Sensor Applied to a Train Wagon Prototype for Measuring Iron Ore Moisture”. **IEEE Latin American Transactions**. 21, 4, pp. 595-601, 2023.

SANTOS JUNIOR, R. M., 2018, **Procedimentos Experimentais para Avaliação da Emissão de Poeira em Manuseio de Minério**. Dissertação de M.Sc., UFPA/NDAE/PPGINDE, Tucuruí, PA, Brasil.

SANTOS JUNIOR, R. M., 2015, **Projeto e Construção de um Túnel de Vento Subsônico de Circuito Aberto**. Trabalho de Conclusão de Curso (TCC), UFPA/ITEC, Belém, PA, Brasil.

SELIMEFENDIGIL, F.; COBAN, S. O.; OZTOP, H. F. “Numerical Analysis of Heat and Mass Transfer of a Moving Porous Moist Object in a Two Dimensional Channel”. **Internacional Communications in Heat and Mass Transfer**. 121, 105093, 2021.

SELIMEFENDIGIL, F.; COBAN, S. O.; ÖZTOP, H. F. "Optimization of Convective Drying Performance of Multiple Porous Moist Objects in a 3D Channel". **International Journal of Thermal Sciences**. 172, 107286, 2022.

SILVA, A. J. C., 2021, **Desenvolvimento e Aplicação de um Túnel de Secagem para Minério**. Dissertação de M.Sc., UFPA/NDAE/PPGINDE, Tucuruí, PA, Brasil.

SUN, H.; LI, A.; WU, J. “Entrained Air by Particle Plume: Comparison Between Theoretical Derivation and Numerical Analysis”. **Particulate Science and Technology**. 39, pp. 141-149, 2019.

SRIKIATDEN, J.; ROBERTS, J. S. “Moisture Transfer in Solid Food Materials: Review of Mechanisms, Models and Measurements”. **International Journal of Food Properties**. 10, pp. 739-777, 2007.

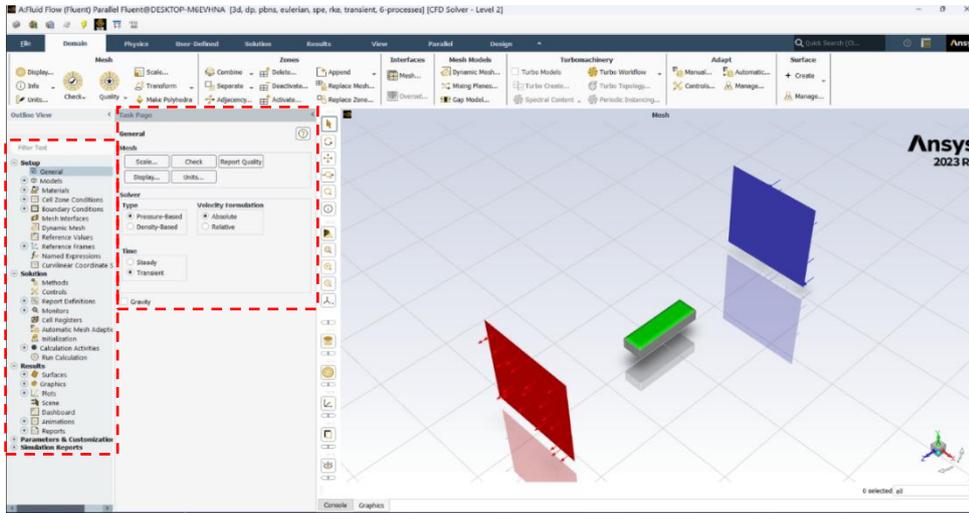
TAYLOR, R.; KRISHNA, R. **Multicomponent Mass Transfer**. Wiley, New York. 1993.

TSOTSAS, E.; GNIELINSKI, V.; SCHLÜNDER, E. U. **Drying of Solid Materials**. 2005. Disponível em: <[https://ethz.ch/content/dam/ethz/special-interest/mavt/process-engineering/particle-technology-laboratory-dam/documents/lectures/practica/lecture-documents-2016/Additional\\_theory.pdf](https://ethz.ch/content/dam/ethz/special-interest/mavt/process-engineering/particle-technology-laboratory-dam/documents/lectures/practica/lecture-documents-2016/Additional_theory.pdf)>. Acessado em 14/02/2020.

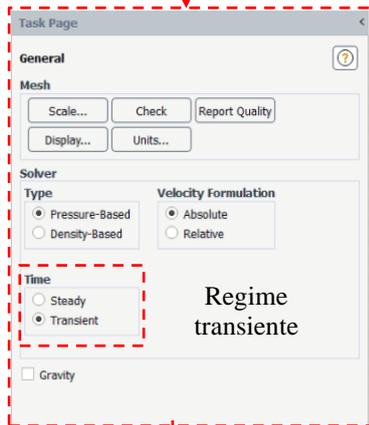
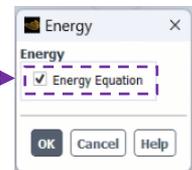
- TSUKERMAN, T.; DUCHESNE, C.; HODOUIN, D. "On the Drying Rates of Individual Iron Oxide Pellets". **International Journal of Mineral Processing**. 83, pp. 99-115, 2007.
- TWIER, A.; OMER, E. A. A.; ALMADANI, R. A. *et al.*, "Experimental Study of Drying Process of Porous Materials". November, 2018. Disponível em: <<https://www.researchgate.net/publication/329019290>>. Acessado em: 19/04/2023.
- UZI, A.; OSTROVSKI, Y.; LEVY, A. "Modeling and Simulation of Mono-Layer Coating". **Drying Technology**. 33, 15-16, pp. 1798-1807. 2015.
- VU, H. T. e TSOTSAS, E. "Mass and Heat Transport Models for Analysis of the Drying Process in Porous Media: A Review and Numerical Implementation". **International Journal of Chemical Engineering**. Vol. 2018.
- WANG, H. G.; YANG, W. Q.; SENIOR, P.; *et al.*, "Investigation of batch fluidized-bed Drying by Mathematical Modeling, CFD simulation and ECT Measurement". **AIChE Journal**. 54, pp. 427-44, 2008.
- WANG, J.; ZHANG, L.; GE, K. *et al.*, "Capillary Pressure in the Anisotropy of Sediments with Hydrate Formation". **Fuel**. 289, 119938, 2021.
- WU, Z. H.; HU, Y. J.; LEE, D. J. *et al.*, "Dewatering and Drying in Mineral Processing Industry: Potential for Innovation". **Drying Technology**. 28, 834-842, 2010.
- YI, T.; DYE, J. C.; SHIRCLIFF, M. E. *et al.*, "A New Physics-Based Drying Model of Thin Clothes in Air-Vented Clothes Dryers". **IEEE/ASME Transactions on Mechatronics**. 21, pp. 872-878, 2016.
- YIOTIS, A. G.; TSIMPANOIANNIS, I. N.; STUBOS, A. K. *et al.*, "Pore-Network Study of the Characteristic Periods in the Drying of Porous Materials". **Journal of Colloid and Interface Science**. 297, pp. 738-748, 2006.
- YOU, S. and WAN, M. P. **Mathematical Models for the van der Waals Force and Capillary Force between a Rough Particle and Surface**. School of Mechanical and Aerospace Engineering, Nanyang Technological University, 639798 Singapore, 2013.
- ZHU, Y.; WANG, P.; SUN, D. *et al.*, "Multiphase Porous Media Model with Thermo-Hydro and Mechanical Bidirectional Coupling for Food Convective Drying". **International Journal of Heat and Mass Transfer**. 175, 121356, 2021.
- ZHANG, M.; TANG, J.; MUJUMDAR, A. S. *et al.*, "Trends in Microwave-Related Drying of Fruits and Vegetables". **Trends Food Sci Technol**. 17, pp. 34-524, 2006.

# APÊNDICE – CONFIGURAÇÃO DO MODELO MULTIFÁSICO DE SECAGEM NO FLUENT

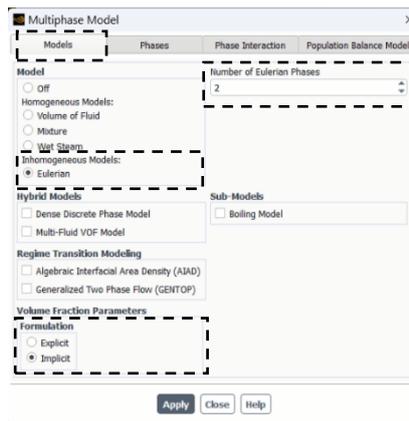
## Setup do



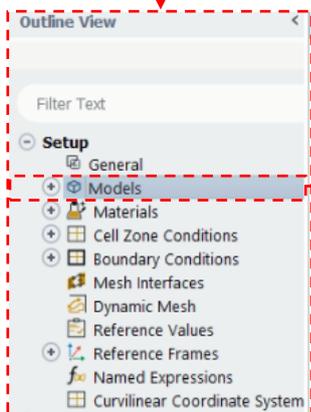
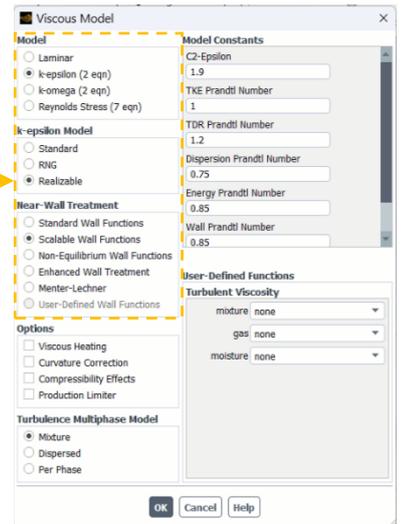
Ativando a equação da



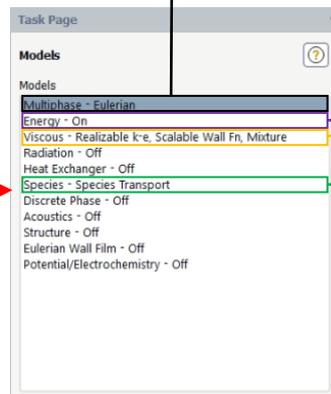
Ativando o modelo multifásico



Ativando o modelo de turbulência

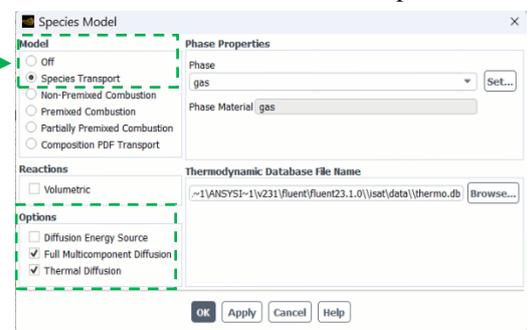


Árvore de

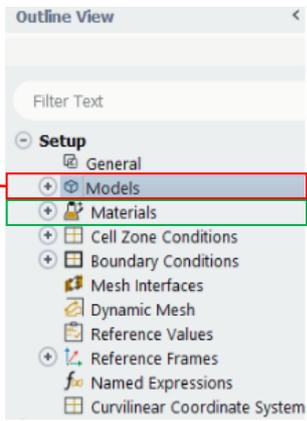


Definindo os modelos físicos

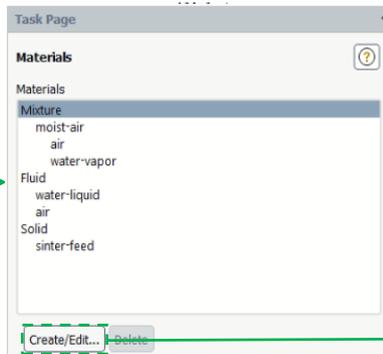
Ativando o modelo multicomponente



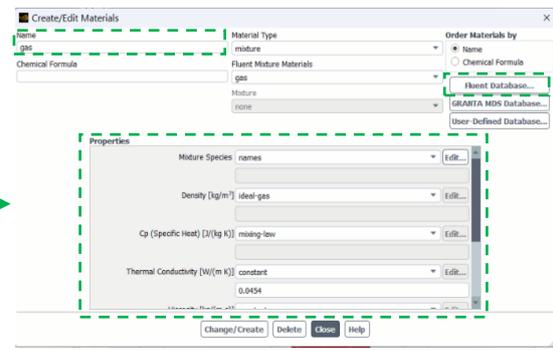
Árvore de



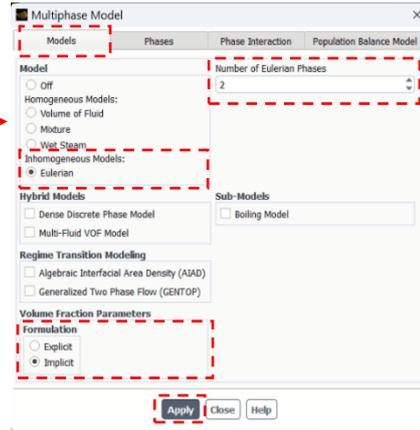
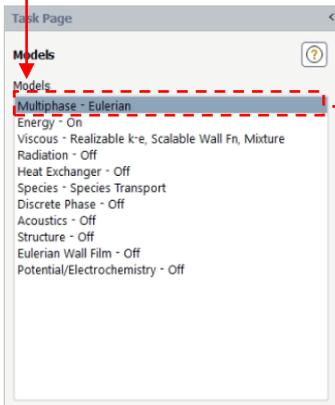
Configurações dos materiais (mistura de gases, fluidos e



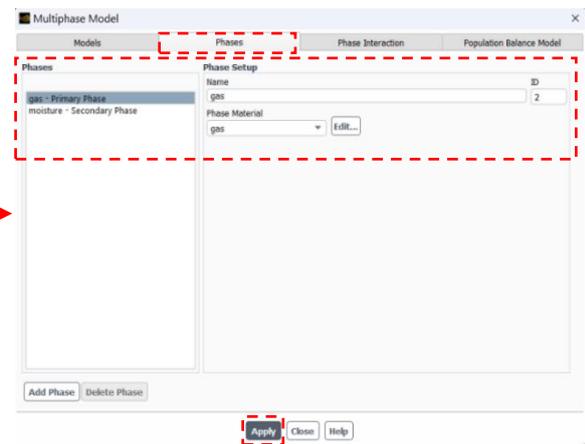
Edição e/ou adição dos



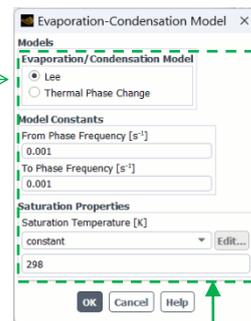
Configuração das fases e do modelo



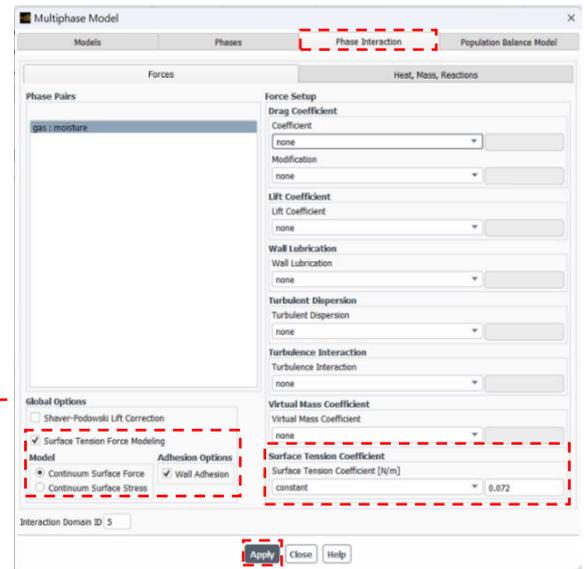
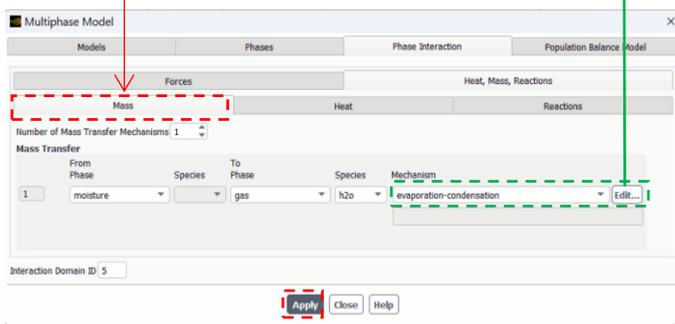
Definindo as fases do modelo



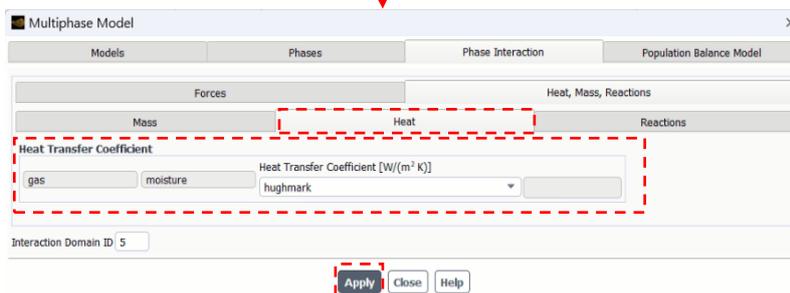
Modelo transferência de massa entre as



Configuração de transferência de massa entre

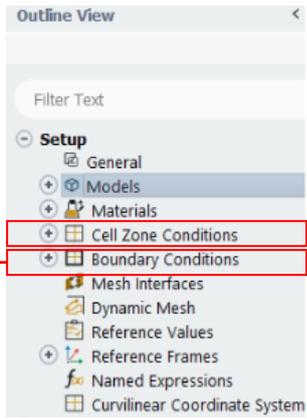


Configuração das interações entre as

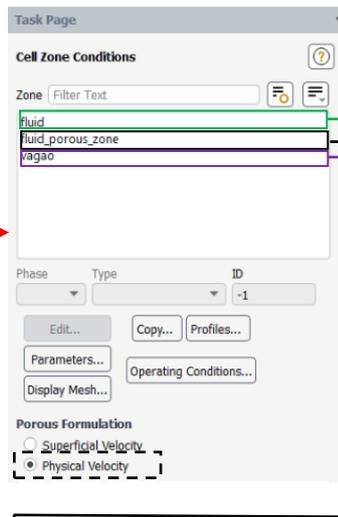


Modelo de transferência de calor entre as

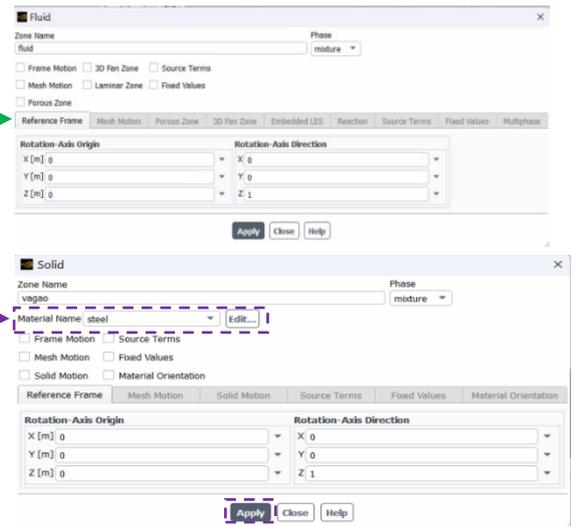
Árvore de



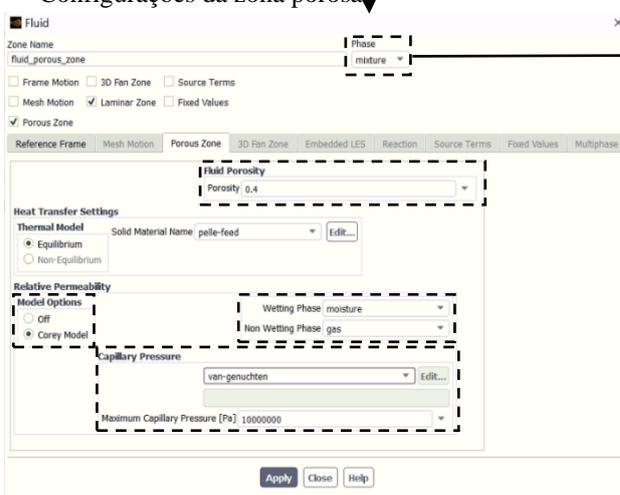
Configurações dos domínios



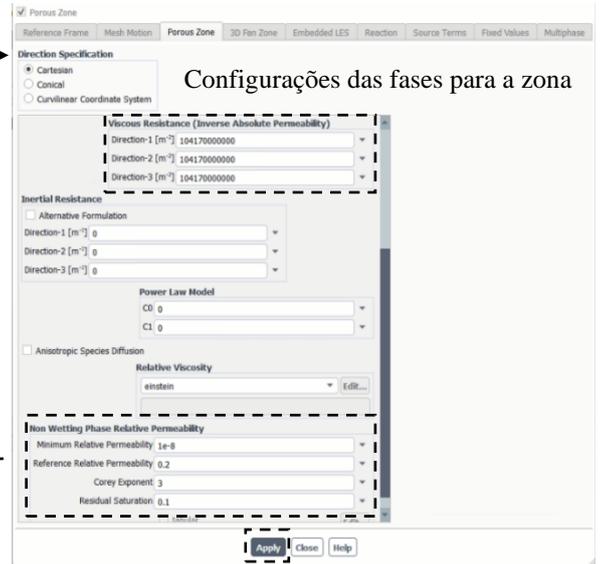
Configurações da zona fluido



Configurações da zona porosa

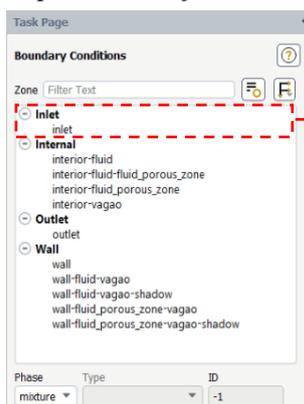


Configurações da zona sólida

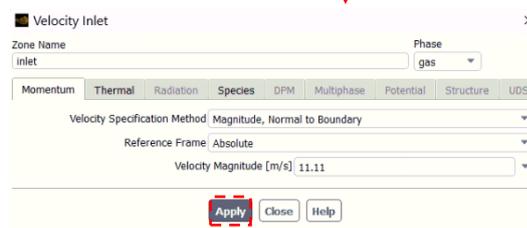
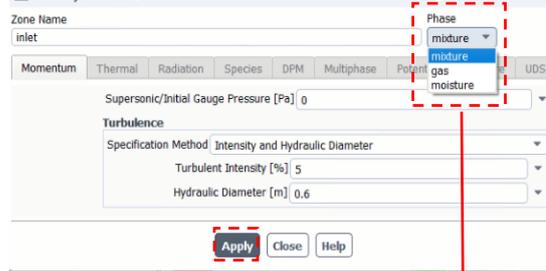


Configurações das fases para a zona

Árvore para as condições de contorno



Definições das condições de contorno na entrada para as fases



Condições de contorno para fase gás na entrada

**Solution**

- Methods
- Controls
- Report Definitions
- Monitors
- Cell Registers
- Automatic Mesh Adaption
- Initialization
- Calculation Activities
- Run Calculation



**Solution Methods**

**Pressure-Velocity Coupling**

Scheme  
Phase Coupled SIMPLE

Solve N-Phase Volume Fraction Equations

**Spatial Discretization**

Gradient  
Least Squares Cell Based

Pressure  
Second Order

Density  
First Order Upwind

Momentum  
First Order Upwind

Volume Fraction  
First Order Upwind

Turbulent Kinetic Energy  
First Order Upwind

Turbulent Dissipation Rate  
First Order Upwind

Energy  
First Order Upwind

Interfacial Area Concentration  
First Order Upwind

gas h2o  
First Order Upwind

Pseudo Time Method  
Off

Transient Formulation  
First Order Implicit

**Solution**

- Methods
- Controls
- Report Definitions
- Monitors
- Cell Registers
- Automatic Mesh Adaption
- Initialization
- Calculation Activities
- Run Calculation

**Task Page**

**Solution Initialization**

Initialization Methods

- Hybrid Initialization
- Standard Initialization

Compute from

Reference Frame

- Relative to Cell Zone
- Absolute

Initial Values

Gauge Pressure [Pa]: 0

Turbulent Kinetic Energy [m<sup>2</sup>/s<sup>2</sup>]: 0.4628704

Turbulent Dissipation Rate [m<sup>2</sup>/s<sup>2</sup>]: 1.232031

gas X Velocity [m/s]: 0

gas Y Velocity [m/s]: 0

gas Z Velocity [m/s]: 0

aa\_s\_b?n

Initialize | Reset | Patch...

Reset DPM Sources | Reset LWF | Reset Statistics

VOF Check

**Patch**

Reference Frame: Relative to Cell Zone (0)

Phase: gas

Variable: X Velocity, Y Velocity, Z Velocity, Temperature, h2o

Volume Fraction Patch Options

- Patch Reconstructed Interface
- Volumetric Smoothing
- Smoothing Relaxation Factor: 0.5

Zones to Patch: fluid, fluid\_porous\_zone, vsgao

Registers to Patch: [0/0]

Patch | Smooth | Close | Help

**Patch**

Reference Frame: Relative to Cell Zone (0.225)

Phase: moisture

Variable: X Velocity, Y Velocity, Z Velocity, Temperature, Interfacial Area\_Concentration, Volume Fraction

Volume Fraction Patch Options

- Patch Reconstructed Interface
- Volumetric Smoothing
- Smoothing Relaxation Factor: 0.5

Zones to Patch: fluid, fluid\_porous\_zone, vsgao

Registers to Patch: [0/0]

Patch | Smooth | Close | Help

**Task Page**

**Run Calculation**

Check Case... | Preview Mesh Motion...

**Time Advancement**

Type: Fixed | Method: User-Specified

Parameters

Number of Time Steps: 10000 | Time Step Size [s]: 1

Max Iterations/Time Step: 30 | Reporting Interval: 5

Profile Update Interval: 1

**Options**

- Extrapolate Variables
- Report Simulation Status
- Specify Solid Time Step Size

**Solution Processing**

Statistics

- Data Sampling for Time Statistics

Data File Quantities...

**Solution Advancement**

Calculate

