



**Universidade Federal de São Carlos**  
CCET - Centro de Ciências Exatas e Tecnologia  
Departamento de Engenharia Química  
Rodovia Washington Luís, km 235, CEP 13.560-905 - São Carlos, SP (16) 3351-8026  
www.copict.ufscar.br - copict@ufscar.br

Trabalho de Graduação

**SIMULAÇÃO POR FLUIDODINÂMICA COMPUTACIONAL DE UM LEITO  
FLUIDIZADO NA OPERAÇÃO DE SECAGEM DE MINÉRIO DE FERRO**

Anna Júlia Campos Rocha

Trabalho de Graduação apresentado ao  
Departamento de Engenharia Química da  
Universidade Federal de São Carlos como parte  
dos requisitos necessários para conclusão do curso  
de graduação em Engenharia Química.

Orientadora: Amarílis Severino e Souza

Co- orientador: Rodrigo Béttega

**São Carlos 2024**

**Banca Examinadora**

Trabalho de Graduação apresentado no dia 9 de Setembro de 2024 perante a seguinte banca examinadora:

Orientadora: Profa. Dra. Amarílis Severino e Souza – DEQ/UFSCar

Professor convidado: Prof. Dr. Thiago Faggion de Pádua – DEQ/UFSCar

Professor da disciplina: Prof. Dr. Fábio Bentes Freire – DEQ/UFSCar

## **Agradecimentos**

Aos meus pais, Kátia e Paulo, que mesmo com a dor da distância e das visitas espaçadas, me apoiaram incondicionalmente nesse sonho. Eu tenho muito orgulho de ser filha de vocês. Agradeço também ao meu irmão, Pablo, e toda a minha família por acreditarem em mim.

À minha segunda família, meus amigos de São Carlos, que viveram essa experiência da graduação comigo e estiveram presentes em todos os altos e baixos. Em especial, as “meninas de casa”: Gabriele, Laura, Luana, Luanna, Luiza e Maria Júlia. Sem vocês eu não seria quem sou hoje e não teria chegado até aqui.

Aos meus amigos de Uberaba, que me apoiaram na decisão de ir para São Carlos desde o primeiro colegial e que comemoram cada conquista minha.

À banca examinadora, Fabio Bentes Freire, professor da disciplina, e Thiago Faggion de Pádua, professor convidado. E principalmente à orientadora Amarílis Severino e Souza e ao co-orientador Rodrigo Béttega, que não só me auxiliaram nessa etapa final da graduação, mas com quem eu pude trabalhar por dois anos e foram formadores da profissional que sou hoje.

## Resumo

O Brasil é um dos principais exportadores de minério de ferro, um importante produto devido ao seu uso na produção de aço e ao seu significativo impacto na balança comercial. Como a competitividade nesse setor é alta, torna-se crucial a atenção à qualidade do minério e aos custos de produção. O preço de venda do minério de ferro está essencialmente relacionado ao seu teor de ferro e à umidade do material. O minério brasileiro de Carajás/PA é notório por seu elevado teor de ferro. No entanto, para aumentar o valor agregado e para adequação às normas de transporte seguro do produto, é necessário controlar a sua umidade. Assim, o minério pode passar por um processo de secagem para atender aos requisitos de umidade estabelecidos para transporte e comercialização. Para otimizar o processo de secagem, é crucial analisar a dinâmica do escoamento multifásico envolvido. Um dos principais parâmetros para dimensionamento de um leito fluidizado na operação de secagem é a velocidade de mínima fluidização ( $U_{mf}$ ). Nesse contexto, o presente trabalho de graduação tem como objetivo analisar via Fluidodinâmica Computacional (CFD), pelo software ANSYS Fluent, o escoamento do minério de ferro em um leito fluidizado de dimensões de bancada, utilizando o modelo multifásico Euleriano Granular para descrever o comportamento da fase sólida. Em particular, analisando a influência da variação de parâmetros como o diâmetro da fase sólida na velocidade de mínima fluidização e comparando os resultados simulados com os de correlações da literatura. Para isso, a  $U_{mf}$  foi obtida nas simulações por CFD para dois diâmetros da fase sólida pela análise do comportamento da queda de pressão na entrada do leito para várias velocidades da fase fluida. A partir dos dados da simulação, obteve-se que o valor da velocidade de mínima fluidização para a fase sólida de diâmetro de partícula de 0,001 m foi de 1,75 m/s, enquanto para o diâmetro de 0,006 m foi de 6 m/s. Observou-se que quanto maior o diâmetro da fase sólida, maior a velocidade necessária para fluidização, isso porque quanto maior o diâmetro da partícula, menor o coeficiente de arraste. Comparando com os valores obtidos pelas correlações numéricas, pode-se observar que houve um desvio, entre 18,8 e 58,2%, quando foram utilizadas as correlações por serem projetadas para casos específicos. Concluiu-se que a CFD é uma ferramenta que possui potencial para estimar a velocidade de mínima fluidização em simulações de leitos fluidizados.

Palavras-chave: leito fluidizado, minério de ferro, secagem, Fluidodinâmica Computacional.

## Abstract

Brazil is one of the leading exporters of iron ore, an important product due to its use in steel production and its significant impact on the trade balance. Given the high competitiveness in this sector, attention to ore quality and production costs is crucial. The selling price of iron ore is essentially related to its iron content and the moisture of the material. Brazilian ore from Carajás/PA is renowned for its high iron content. However, to increase the added value and comply with safe transportation standards, controlling its moisture is necessary. The ore can undergo a drying process to meet the moisture requirements for transportation and marketing. To optimize the drying process, it is crucial to analyze the dynamics of the involved multiphase flow. One of the main parameters for sizing a fluidized bed in drying operations is the minimum fluidization velocity ( $U_{mf}$ ). In this context, the present undergraduate work aims to analyze, via Computational Fluid Dynamics (CFD) using the ANSYS Fluent software, the flow of iron ore in a bench-scale fluidized bed, using the Eulerian Granular multiphase model to describe the solid phase behavior. In particular, the study examines the influence of parameter variations such as the solid phase diameter on the minimum fluidization velocity and compares the simulated results with literature correlations. To achieve this,  $U_{mf}$  was obtained in CFD simulations for two solid phase diameters by analyzing the pressure drop behavior at the bed inlet for various fluid phase velocities. The simulation data revealed that the minimum fluidization velocity for a solid phase particle diameter of 0.001 m was 1.75 m/s, while for a diameter of 0.006 m, it was 6 m/s. It was observed that as the solid phase diameter increases, a higher velocity is required for fluidization because a larger particle diameter corresponds to a lower drag coefficient. Comparing with values obtained from numerical correlations, a deviation of between 18.8% and 58.2% was observed when using these correlations, as they are designed for specific cases. It was concluded that CFD is a tool with potential for estimating the minimum fluidization velocity in fluidized bed simulations.

Key words: fluidized bed, iron ore, drying, Computational Fluid Dynamics.

## Sumário

<b>1. Introdução</b> .....	1
<b>2. Revisão Bibliográfica</b> .....	3
a. Secagem minério de ferro .....	3
b. Leito Fluidizado .....	5
c. Simulações por Fluidodinâmica Computacional (CFD) .....	7
d. Velocidade mínima de fluidização .....	8
<b>3. Materiais e métodos</b> .....	11
a. Leito Fluidizado .....	11
b. Modelos matemáticos .....	12
i. Conservação da massa e do movimento .....	12
ii. Modelo de arraste .....	13
iii. Teoria Cinética Granular .....	14
c. Condições de Contorno .....	16
d. Solução numérica .....	16
e. Parâmetros de simulação .....	18
f. Obtenção de resultados da simulação .....	18
g. Correlações empíricas .....	19
<b>4. Resultados e discussões</b> .....	21
a. Diâmetro de partícula de 0,001 m .....	21
b. Diâmetro de partícula de 0,006 m .....	22
c. Discussão .....	24
<b>5. Conclusão</b> .....	25

## **Lista de Figuras**

Figura 1 - Fluxograma adaptado do processo de tratamento do minério de ferro

Figura 2 - Diagrama simplificado de um leito fluidizado em operação de secagem

Figura 3 - Curva da fluidodinâmica de escoamento

Figura 4 - Leito de bancada do Departamento de Engenharia Química UFSCar utilizado como referência para simulação

Figura 1 - Fotografias do pellet feed com diferentes umidades. Em (a) seco, em (b) com 13% B.U., em (c) com umidade de 18% B.U. e em (d) seco em estufa

Figura 2 - Malha utilizada na simulação com 4500 células. Em a) tem-se a malha do leito inteiro, enquanto em b) se tem um zoom da malha

Figura 7 - Velocidade por queda de pressão para o diâmetro de 1mm de partícula e linhas para determinação da interseção entre o período de leito fixo e o período de leito fluidizado - dados de simulação

Figura 8 - Fração volumétrica da fase sólida de diâmetro de 1mm ao longo do leito em diferentes velocidades

Figura 9 - Velocidade por queda de pressão para o diâmetro de 6mm de partícula e linhas para determinação da interseção entre o período de leito fixo e o período de leito fluidizado - dados de simulação

Figura 10 - Fração volumétrica da fase sólida de diâmetro de 6mm ao longo do leito em diferentes velocidades

**Lista de Quadros**

Quadro 1 - Características do procedimento de simulação utilizado para a simulação da fluidodinâmica

Quadro 2 - Parâmetros utilizados na simulação

Quadro 3 - Correlações numéricas utilizadas no trabalho, com o intervalo de diâmetro e densidade de partículas

Quadro 4 - Valores da velocidade de mínima fluidização para cada correlação e desvio padrão para diâmetro de 1mm

Quadro 5 - Valores da velocidade de mínima fluidização para cada correlação e desvio padrão para diâmetro de 6mm

## Lista de Símbolos

$U_{mf}$	Velocidade de mínima fluidização [m/s]
$\alpha_q$	Fração volumétrica da fase $q$ [-]
$\rho_q$	Densidade da fase $q$ [kg/m <sup>3</sup> ]
$\vec{v}_q$	Velocidade da fase $q$ [m/s]
$p$	Pressão [N/m <sup>2</sup> ]
$p_s$	Pressão dos sólidos [N/m <sup>2</sup> ]
$\bar{\tau}_q$	Tensor das tensões viscosas da fase $q$ [N/m <sup>2</sup> ]
$K_{fs}$	Coefficiente de troca de momento entre fases [kg/ (m <sup>3</sup> .s)]
$\mu_f$	Viscosidade cisalhante do fluido [kg/m/s]
$\mu_s$	Viscosidade cisalhante granular [kg/m/s]
$\lambda_f$	Viscosidade bulk [Pa.s]
$\bar{I}$	Tensor unitário [N/m <sup>2</sup> ]
$d_s$	Diâmetro da partícula [m]
$C_D$	Coefficiente de arraste
$k_{\theta_s}$	Coefficiente de difusão da temperatura granular [-]
$\gamma_{\theta_s}$	Dissipação de energia [-]
$\theta_s$	Temperatura granular [m <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ]
$\phi_{fs}$	Coefficiente de especularidade
$\bar{\tau}_p$	Tensão de cisalhamento da fase sólida [N/m <sup>2</sup> ]
$g_0$	Função de distribuição radial [-]
$e_{ss}$	Coefficiente de restituição sólido-sólido [-]
$g$	Aceleração gravitacional [m/s <sup>2</sup> ]
$Re_{mf}$	Número de Reynolds
$Ar$	Número de Archimedes

## 1. Introdução

O minério de ferro desempenha um papel fundamental na economia brasileira, sendo um dos principais recursos minerais do país. O Brasil possui reservas significativas de minério de ferro, principalmente na região da Serra dos Carajás, no estado do Pará, e em Minas Gerais. Essas reservas têm contribuído significativamente para a economia nacional, sendo o Brasil um dos maiores produtores e exportadores mundiais desse minério (Vale S.A., acesso em 2024). No primeiro semestre de 2022, a exportação do minério de ferro representou 84,7% de toda a exportação de minérios do país. (Ministério de Minas e Energia - MME, 2022). A importância do minério de ferro no Brasil está intrinsecamente ligada à indústria siderúrgica, já que é a principal matéria-prima para a produção de aço. A exportação de minério de ferro também desempenha um papel importante na balança comercial brasileira, gerando receitas significativas para o país.

O preço de venda do minério de ferro é crucial para a viabilidade da operação de exploração e beneficiamento. Esse preço é determinado pelo teor de ferro e pela umidade do material. A busca por minérios de alta qualidade é constante na indústria siderúrgica para otimizar custos e processos, contribuindo para a competitividade. O minério de Carajás possui um teor de ferro de 67% (Vale S.A., acesso em 2024), o que não requer etapas de beneficiamento. Por isso, para apresentar um preço de venda mais atraente, é importante se atentar à sua umidade.

A umidade precisa obedecer a dois principais critérios. Primeiro, com a umidade muito baixa há problema no transporte ferroviário onde pode haver perda de particulado fino. Esta perda do particulado acarreta prejuízos financeiros, por haver uma perda de massa material, e danos ambientais, com a presença deste material no ar e no solo. (Costa, 2004) Segundo, a umidade não pode ser elevada a ponto de ultrapassar o valor estipulado pelo *Transportable Moisture Limit* (TML), que é um limite regulatório que prevê a umidade máxima para transporte seguro de materiais a granel em navios. Se o minério estiver acima da TML, pode haver liquefação da carga e ocasionar acidentes (Munro e Mohajerani, 2015). Em decorrência deste risco, são cobradas altas multas pelas cargas não embarcadas por não obedecerem ao valor da TML, o que ocasiona uma perda financeira e um impacto no preço de venda do minério. Por isso é importante estudar o processo de secagem de minério. Ele pode ser realizado por diversos equipamentos, entre eles em um leito fluidizado.

Em um processo de secagem, o leito fluidizado é um equipamento eficaz e amplamente empregado. O leito fluidizado consiste em um leito de partículas sólidas suspensas por um fluxo ascendente de gás, geralmente ar. Durante a operação de secagem, o material a ser seco é distribuído uniformemente sobre o leito fluidizado, formando uma camada de partículas que é então fluidizada pela corrente de gás. Esse movimento constante das partículas cria um ambiente altamente eficiente para a transferência de calor e massa, permitindo uma secagem rápida e homogênea do material. O controle preciso da temperatura e da vazão de gás é essencial para otimizar o processo. O leito fluidizado oferece vantagens como uma alta taxa de transferência de calor, tempos de residência curtos e a capacidade de processar partículas de diferentes tamanhos de maneira eficiente, tornando-o uma escolha valiosa em uma variedade de indústrias (Mujumdar, 2015).

A Dinâmica dos Fluidos Computacional (CFD) é uma ferramenta essencial para simular e analisar fenômenos fluidodinâmicos em diversas áreas, como engenharia aeroespacial, indústria automotiva, energia, processos químicos, construção civil e petróleo e gás. Utilizando métodos numéricos para resolver equações que descrevem o comportamento dos fluidos, a CFD permite visualizar e compreender o escoamento em diferentes condições, inclusive escoamentos multifásicos. Essa abordagem computacional oferece importantes resultados para o projeto, otimização e operação de sistemas, reduzindo a dependência de experimentos físicos e acelerando o desenvolvimento de produtos e processos.

Dessa maneira, o seguinte trabalho visa analisar via Fluidodinâmica Computacional (CFD), pelo software ANSYS Fluent, a fluidodinâmica do escoamento do minério de ferro em um leito fluidizado de dimensões de bancada. Em particular, analisando a influência da variação de parâmetros como o diâmetro da fase sólida na velocidade de mínima fluidização e comparando os resultados simulados com os de correlações da literatura.

## 2. Revisão Bibliográfica

### a. Secagem minério de ferro

O beneficiamento do minério de ferro ocorre a fim de aumentar a concentração do ferro, alterar sua granulometria e/ou o seu formato, sem alterar sua identidade física ou química. Esse processo que ocorre após a extração acontece em algumas etapas, apresentadas na Figura 1.

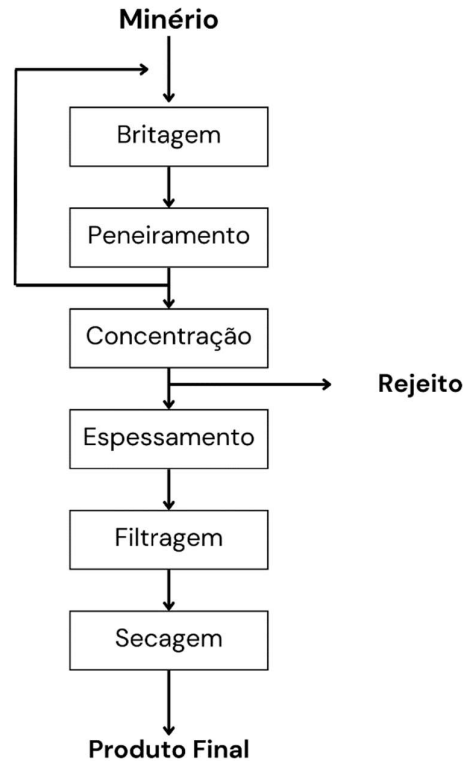


Figura 3 - Fluxograma adaptado do processo de tratamento do minério de ferro

Adaptado de (Luz, et al., 2010)

Inicialmente realiza-se a britagem e/ou moagem para que haja uma redução do tamanho do material extraído e em seguida esse material é peneirado para uniformização. Depois, o mesmo é concentrado e esse processo pode ocorrer de algumas maneiras, como separação magnética e flotação (Luz, et al., 2010). Dessa etapa sai o rejeito, que passa por um processo próprio para o seu tratamento, podendo ser destinado às barragens.

O concentrado passa pela etapa de espessamento onde a polpa de minério de ferro passa por um tanque, conhecido como espessador, onde ocorre a sedimentação das

partículas sólidas no fundo do tanque sendo assim possível separar o sólido da parte líquida. Para diminuir ainda mais a água presente no concentrado, ele passa por uma filtragem utilizando equipamentos como filtros prensa, filtros de disco a vácuo ou filtros de tambor a vácuo, dependendo das características do minério e dos requisitos de processo. Após essas etapas, a umidade do minério pode ainda estar acima da TML requerida para embarque, sendo aceitável passar pela etapa de interesse desse trabalho, a secagem convectiva do minério (Luz, et al., 2010).

A importância da secagem do minério de ferro e o controle da umidade são fundamentais em diversos aspectos na indústria de mineração e metalurgia. Este processo desempenha um papel crucial em garantir a eficiência operacional, a qualidade do produto final e a viabilidade econômica das operações (Souza Pinto, et al., 2020).

Uma das principais relevâncias da umidade do minério é obedecer os critérios de transporte do material. Por ser transportado via ferrovia, a umidade não pode ser muito baixa para não haver perda de particulado fino durante o trajeto. Por outro lado, para a exportação e para o embarque nos navios, o minério precisa obedecer ao limite regulatório (TML) (Munro e Mohajerani, 2015). Caso a umidade do minério esteja acima do valor estabelecido por esse limite, a carga não pode ser embarcada, podendo haver atrasos e, conseqüentemente, prejuízos financeiros à mineradora. Por isso, a secagem do minério de ferro é uma etapa importante entre a extração e sua exportação.

Durante a secagem, destacam-se duas etapas principais: uma fase inicial em que a taxa de secagem se mantém constante e uma segunda fase em que a taxa de secagem diminui. Na primeira fase, ocorre a evaporação da umidade livre do material, ao mesmo tempo em que a umidade ligada é transportada do interior do sólido para sua superfície até atingir um ponto de umidade crítica ( $X_c$ ) (Souza Pinto, et al., 2020). Nesse ponto, observa-se a primeira ocorrência de *secura* na superfície do material, indicando que a transferência de umidade do interior para a superfície não é mais proporcional à perda de umidade para o meio. A partir desse momento, a temperatura do sólido aumenta de forma mais pronunciada e a secagem entra em sua fase decrescente (Mujumdar, 2015).

No caso do minério de ferro, de acordo com a literatura, ele apresenta o comportamento de secagem típico de um material não higroscópico, ou seja, não contém uma quantidade significativa de água ligada, e a perda de umidade ocorre principalmente nos estágios iniciais do processo de secagem (Souza Pinto, et al., 2020) Durante o período

de secagem com taxa constante, (Souza Pinto, et al., 2020) observaram que amostras de minério de ferro, quando secas em estufa com ventilação para renovação do ar e convecção forçada, mantiveram uma taxa de secagem relativamente constante até atingir o ponto de umidade crítica ( $X_c$ ), que é de aproximadamente 5% de umidade. Após esse ponto, a taxa de secagem passou a diminuir.

Realizada a secagem conforme as necessidades do processo, o minério se encontra nas condições adequadas para o transporte.

#### b. Leito Fluidizado

É possível a utilização de diversos equipamentos na operação de secagem, dependendo do sólido a ser seco e do custo previsto para o processo. O leito fluidizado é um equipamento frequentemente utilizado devido à sua eficiência e versatilidade e ele funciona com a passagem ascendente de um fluido, líquido ou gasoso, através de um leito de partículas sólidas, as quais entram em regime de fluidização. Como pode se observar na Figura 2, no caso de uma operação contínua, o fluido entra pela entrada 1 e ascende pelo corpo do leito enquanto o material sólido entra por 2. O produto seco sai em 3 e o particulado fino é recuperado depois da saída 4, usualmente por um ciclone.

Para um processo em batelada, uma quantidade fixa do minério é inserida na base da câmara de secagem e ocorre da mesma maneira a fluidização com a passagem do fluido pela entrada 1. Depois do tempo necessário para a secagem, o material é recolhido do equipamento e coletado o particulado fino na saída 4.

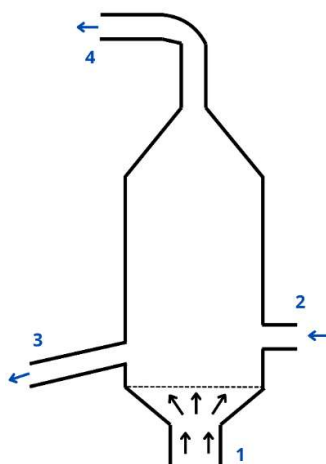


Figura 4 - Diagrama simplificado de um leito fluidizado em operação de secagem.

O primeiro uso em larga escala de um leito fluidizado foi em 1926 para gaseificação de carvão (Kunii, et al., 1923). Hoje, o leito fluidizado possui uma ampla gama de aplicações em diversos setores industriais e tecnológicos devido às suas propriedades únicas. Na indústria química, é utilizado para catalisar reações químicas de forma eficiente, proporcionando uma área de contato elevada entre os reagentes e o catalisador sólido. Na área de processamento de alimentos, o leito fluidizado é empregado na secagem de grãos, cereais e produtos alimentícios sensíveis ao calor, garantindo um processo de secagem rápido e uniforme. Além disso, na indústria farmacêutica, é utilizado para a granulação de medicamentos em pós, assegurando partículas uniformes e controladas. Essa versatilidade torna o leito fluidizado uma ferramenta essencial em diversas operações industriais modernas.

Utilizar um leito fluidizado em operações de secagem apresenta diversas vantagens significativas. Primeiramente, este método permite uma secagem rápida e uniforme devido à alta eficiência na transferência de calor entre o gás e as partículas sólidas. Adicionalmente, o leito fluidizado proporciona uma distribuição homogênea das partículas dentro do leito, evitando aglomerações e garantindo um maior contato entre o material a ser seco e o fluido. Outra vantagem é a capacidade de controlar com boa precisão parâmetros como temperatura, umidade e velocidade do ar, o que permite ajustes finos no processo de secagem para atender requisitos específicos de cada aplicação industrial (Law, et al., 2015).

Considerando a secagem em um leito fluidizado, a partir de uma determinada velocidade, chamada velocidade mínima de fluidização ( $u_{mf}$ ), o fluido passa a suportar o peso do material e o leito passa a operar em estado de mínima fluidização, ou seja, a mistura sólido-fluido passa a agir como um fluido. No caso da secagem, que envolve uma fase gasosa e uma fase sólida, a temperatura é considerada uniforme no leito e há elevada taxa de transferência de calor e massa. A velocidade mínima de fluidização é obtida experimentalmente ou por meio de correlações e relaciona a queda de pressão no leito e a velocidade superficial do gás. A fluidização no leito pode ainda variar com o aumento da velocidade de fluidização e as características do material sólido (Mujumdar, 2015).

### c. Simulações por Fluidodinâmica Computacional (CFD)

A Fluidodinâmica Computacional (CFD) pode ser definida com um conjunto de ferramentas computacionais, baseado em algoritmos numéricos, utilizado para solucionar e interpretar soluções em escoamentos de fluidos (Maliska, 2004).

Um processo como o de secagem pode ser impactado por muitas variáveis, incluindo a temperatura do ar de secagem, a velocidade do ar de secagem e o dimensionamento do equipamento, por exemplo. Para otimizar o processo de secagem e entender toda a fluidodinâmica do processo, pode se utilizar a simulação por CFD para não ser necessário construir todas as configurações necessárias para uma análise experimental.

Normalmente são utilizadas duas abordagens para descrever o escoamento multifásico em uma simulação CFD: Euler-Euler e Euler Lagrange.

Na abordagem Euler-Euler, cada fase é tratada como um fluido contínuo, e as equações de conservação de massa, momento e energia são resolvidas separadamente para cada fase. Essas equações são acopladas através de termos de interação que representam as trocas de massa, momentum e energia entre as fases. Dentro dessa abordagem, o modelo Euleriano Granular simula o comportamento de escoamentos multifásicos que envolvem partículas sólidas em suspensão, como em fluidização, transporte pneumático, e outros processos industriais. Neste modelo, as partículas sólidas são tratadas como um contínuo granular, e as equações de conservação de massa, momento e energia são resolvidas para essa fase granular em conjunto com as equações de conservação para a fase fluida (Maliska, 2004). O modelo Euleriano Granular se baseia na resolução das equações de conservação de massa, momento e energia para a fase granular, que são acopladas às equações para a fase fluida. As equações granulares levam em conta parâmetros que representam as interações entre as partículas, como colisões, arrasto e transferência de calor. Uma parte importante do modelo Euleriano Granular é a formulação do arrasto entre a fase sólida e o fluido. Diferentes correlações e modelos podem ser utilizados para representar o arrasto, dependendo das características do escoamento e das propriedades das partículas (Maliska, 2004).

Já na abordagem Euler-Lagrange, uma das fases é tratada como um fluido contínuo (fase contínua), enquanto a outra fase é tratada como um conjunto de partículas discretas (fase dispersa). As partículas são identificadas através do escoamento e

interagem com a fase contínua através de forças de arrasto, trocas de calor, e trocas de massa. As equações de movimento das partículas (normalmente descritas pelas equações de Newton) são resolvidas em conjunto com as equações de conservação de massa, momento e energia para a fase contínua (Gerber, et al., 2010). As interações entre as partículas e a fase contínua são modeladas através de correlações empíricas ou teóricas, como o coeficiente de arrasto, coeficiente de transferência de calor, e taxas de evaporação ou condensação.

Enquanto a abordagem Euler-Euler é mais adequada para escoamentos onde as fases estão bem misturadas e a interação entre elas é dominada por fenômenos macroscópicos, a abordagem Euler-Lagrange é mais adequada para escoamentos com partículas em suspensão ou gotículas dispersas na fase contínua, nos quais seja interessante conhecer a trajetória, velocidade e posição de cada partícula (Gerber, et al., 2010).

Considerando a quantidade de partículas, a geometria e os recursos computacionais disponíveis, é mais viável para o presente trabalho utilizar a abordagem do modelo granular Euleriano, visto que a abordagem Euler-Lagrange necessita de um elevado esforço computacional quando grandes quantidades de partículas estão presentes.

#### d. Velocidade mínima de fluidização

A velocidade de mínima de fluidização ( $U_{mf}$ ) é definida como a velocidade de transição entre um leito fixo para um leito fluidizado. Na Figura 3 tem-se a curva de fluidodinâmica do processo, que é dada pela relação da queda de pressão no leito com a velocidade da fase fluida, e através dessa curva pode se determinar a  $U_{mf}$  da fase sólida. Entre os pontos 1 e 2 da Figura 3 tem-se o comportamento de um leito fixo, no qual o peso dos sólidos é dominante e a velocidade não é suficiente para iniciar a fluidização.

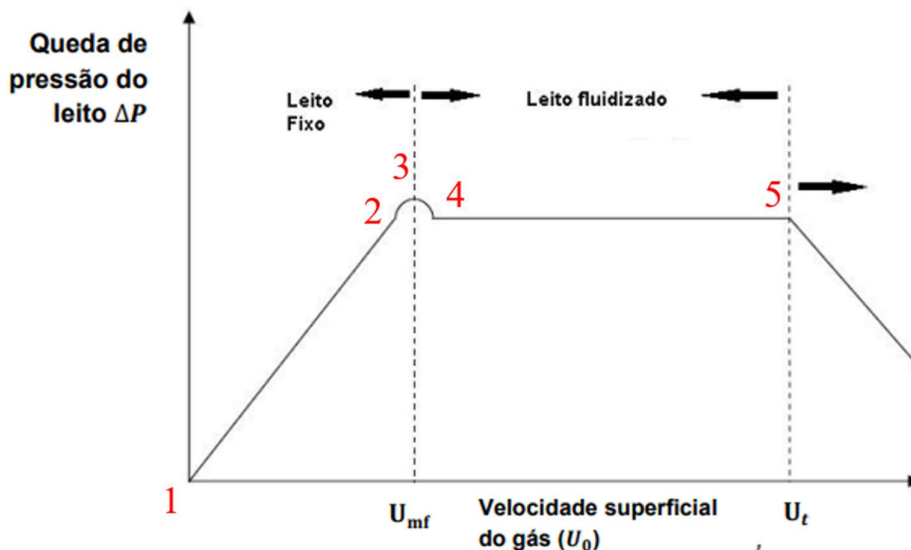


Figura 5 – Curva da fluidodinâmica de escoamento

Adaptado de RATTI,2015

O ponto 3 é onde se atinge a velocidade de mínima fluidização. Esse ponto é o de maior queda de pressão e ao aumentar um pouco a velocidade, as partículas começam a se movimentar e o leito se expande (Cremasco, 2012). Ocorre uma diminuição da queda de pressão que passa a ser constante e entre os pontos 4 e 5 tem se o período de leito fluidizado. Já com o aumento da velocidade para além do ponto 5, a força de arraste da fase fluida passa a ser maior que o peso das partículas, onde ocorre o transporte pneumático das partículas (Kunii, et al., 1923).

Por ser um parâmetro que afeta diretamente o regime de funcionamento de um leito, a  $U_{mf}$  é uma medida importante para o dimensionamento do leito fluidizado (Kunii, et al., 1923). Conhecendo a  $U_{mf}$  de um processo, é possível determinar em quais condições existe uma menor demanda energética, controlar melhor o processo e operar de maneira mais econômica, por exemplo.

O método clássico para definir a  $U_{mf}$  é através de medidas experimentais, porém podem-se utilizar correlações para prever o valor da velocidade de mínima fluidização. Atualmente, com o desenvolvimento da CFD, é possível simular as condições experimentais da fluidização de partículas sólidas e com isso calcular a  $U_{mf}$ . Como discutido no trabalho de Anantharaman, et al. (2017) que avalia as correlações numéricas

para o cálculo da velocidade de mínima fluidização, os autores mostram que ao longo das décadas tem aumentado o número de estudos publicados que falam sobre a determinação da  $U_{mf}$ , principalmente usando simulações. Isso mostra que o estudo da velocidade de mínima fluidização segue sendo objeto de investigação e de relevância na literatura.

Entre as variáveis que podem influenciar a velocidade de mínima fluidização da partícula sólida tem-se as propriedades do sólido e as propriedades da fase fluida. Para o sólido tem-se a forma da partícula e sua densidade. Entre as propriedades da fase fluida tem-se a densidade e a viscosidade. Importante ressaltar que as condições de operação do processo, como temperatura da fase fluida e pressão influenciam a densidade e a viscosidade do fluido, e conseqüentemente influenciam indiretamente a velocidade de mínima fluidização das partículas sólidas.

Nesse trabalho, comparou-se o valor calculado da  $U_{mf}$  utilizando simulações por CFD com resultados de correlações da literatura. Dentre as várias correlações existentes, é importante escolhê-las com base nas características do sólido e na faixa de validade que compreendem. Importante ressaltar que para os dois métodos é suposto que as partículas são esféricas e homogêneas. Além disso assume condições ideais, como leitos perfeitamente homogêneos e distribuição uniforme das partículas, o que pode não refletir a realidade em sistemas industriais.

### 3. Materiais e métodos

#### a. Leito Fluidizado

O leito fluidizado simulado foi baseado no leito fluidizado de bancada do Centro de Secagem do Departamento de Engenharia Química da UFSCar, representado na Figura 4. O equipamento é composto por um soprador acoplado com aquecedor, com controle de temperatura e velocidade do ar (1), por um sistema de alimentação de sólidos (2), uma câmara de secagem (3) e um ciclone (4). Para esse trabalho, simulou-se somente a câmara de secagem que é um cilindro de diâmetro de 7,2 cm e comprimento de 50 cm. A velocidade do ar atingida no equipamento era de no máximo 5 m/s.



Figura 6 - Leito de bancada do Departamento de Engenharia Química UFSCar utilizado como referência para simulação.

Além disso, é importante mencionar que, a amostra do experimento base, (Souza Pinto, et al., 2020) e (Souza, et al., 2022), foi minério de ferro do tipo *pellet feed* de  $d_p < 500\mu\text{m}$  e que durante sua preparação, a umidade presente fez com que o minério de ferro *pellet feed* se aglomerasse. Pode se observar como se apresenta o minério de ferro em diferentes umidades, em base úmida (B.U.), na Figura 5. Por isso, foi necessário extrudar o material através de uma tela de 6 mm (Figura 5b). Assim, considerou-se que o material

simulado possui um diâmetro de 6 mm. Para comparação, escolheu-se o diâmetro de partícula de 1 mm. Simulações por CFD preliminares indicaram que uma fase sólida com diâmetros menores que esse apresentava velocidades de mínima fluidização muito baixas, não sendo de interesse para a análise da operação de secagem em estudo.

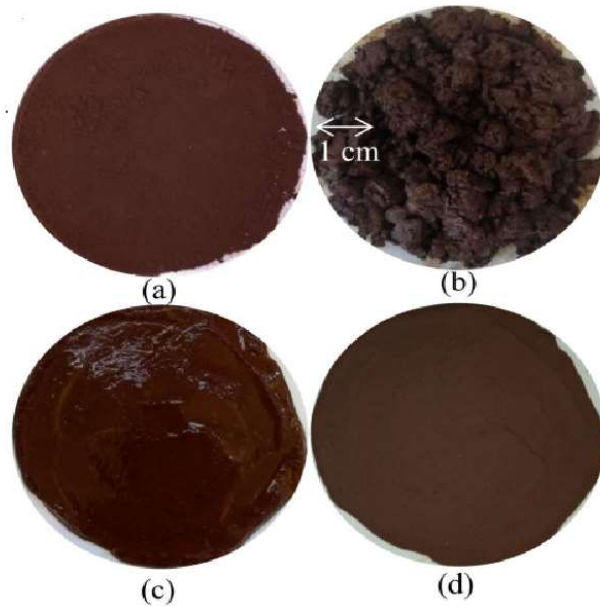


Figura 7 - Fotografias do pellet feed com diferentes umidades. Em (a) seco, em (b) com 13% B.U., em (c) com umidade de 18% B.U. e em (d) seco em estufa

Adaptado de (Souza Pinto, et al., 2020)

#### b. Modelos matemáticos

Nesse trabalho foi utilizado o modelo multifásico Euleriano Granular para descrever a fase sólida nas simulações. As fases sólida e fluida são tratadas como contínuas e interpenetrantes, cujo movimento é descrito pelas equações de conservação. Assim a solução numérica do modelo torna-se viável em domínios computacionais de maior escala e elevado número de partículas, como necessário para a seguinte pesquisa.

Nesta seção são apresentadas as principais equações e condições de contorno que foram empregadas nas simulações com base no trabalho de (Souza, et al., 2023).

##### i. Conservação da massa e do movimento

A equação da continuidade para as fases fluida ( $f$ ) e sólida ( $s$ ) é dada por:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\alpha_f \rho_f) + \nabla (\alpha_f \rho_f \vec{v}_f) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\alpha_s \rho_s) + \nabla (\alpha_s \rho_s \vec{v}_s) = 0 \quad (2)$$

$$\alpha_s + \alpha_f = 1 \quad (3)$$

Onde  $\alpha_q$ ,  $\rho_q$ , e  $\vec{v}_q$  são a fração volumétrica, densidade e velocidade da fase  $q$ , respectivamente. A soma das frações volumétricas de cada fase é igual a um. Os balanços de momento para cada fase são dados pelas equações:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\alpha_f \rho_f \vec{v}_f) + \nabla (\alpha_f \rho_f \vec{v}_f \vec{v}_f) = -\alpha_f \nabla p + \nabla \cdot \bar{\bar{\tau}}_f + \alpha_f \rho_f \vec{g} + K_{fs} (\vec{v}_f - \vec{v}_s) \quad (4)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\alpha_s \rho_s \vec{v}_s) + \nabla (\alpha_s \rho_s \vec{v}_s \vec{v}_s) = -\alpha_s \nabla p - \nabla p_s + \nabla \cdot \bar{\bar{\tau}}_s + \alpha_s \rho_s \vec{g} + K_{fs} (\vec{v}_f - \vec{v}_s) \quad (5)$$

Em que  $p$  é a pressão,  $p_s$  é a pressão dos sólidos,  $\bar{\bar{\tau}}_q$  é o tensor das tensões viscosas da fase  $q$ , e  $K_{fs}$  é o coeficiente de troca de momento entre fases. Já o termo  $(\vec{v}_f - \vec{v}_s)$  indica a velocidade relativa entre as fases.

Por sua vez, o tensor das tensões viscosas para cada fase é definido por:

$$\bar{\bar{\tau}}_f = \alpha_f \mu_f (\vec{v}_f + \vec{v}_f^T) + \alpha_f (\lambda_f - \frac{2}{3} \mu_f) \nabla \cdot \vec{v}_f \bar{\bar{I}} \quad (6)$$

$$\bar{\bar{\tau}}_s = \alpha_s \mu_s (\vec{v}_s + \vec{v}_s^T) + \alpha_s (\lambda_s - \frac{2}{3} \mu_s) \nabla \cdot \vec{v}_s \bar{\bar{I}} \quad (7)$$

Em que  $\mu_f$  é a viscosidade cisalhante do fluido,  $\mu_s$  é a viscosidade cisalhante granular,  $\lambda_f$  é a viscosidade bulk do gás,  $\lambda_s$  é a viscosidade bulk granular e  $\bar{\bar{I}}$  é o tensor unitário. Os termos granulares (referentes à fase sólida) são descritos na Teoria Cinética Granular

## ii. Modelo de arraste

Considerando que para esse trabalho é importante observar a fluidodinâmica do processo e a interação entre as fases, um parâmetro importante que dita o comportamento da fase sólida no leito é o fator de arraste. Nesse caso, o arraste foi incorporado no coeficiente de troca de momento entre fases  $K_{sf}$  de acordo com o modelo de GIDASPOW *et al.* (1992), que apresenta a forma:

$$K_{sf} = K_{fs} = \frac{3}{4} C_D \frac{\alpha_s \alpha_f \rho_f |\vec{v}_s - \vec{v}_f|}{d_s} \alpha_f^{-2,65}, \quad \alpha_f > 0,8 \quad (8)$$

$$K_{sf} = K_{fs} = 150 \frac{\alpha_s (1 - \alpha_f) \mu_f}{\alpha_f d_s^2} + 1,75 \frac{\alpha_s \rho_f |\vec{v}_s - \vec{v}_f|}{d_s}, \quad \alpha_f \leq 0,8 \quad (9)$$

Onde  $\mu_f$  é a viscosidade cisalhante do fluido,  $d_s$  é o diâmetro da partícula e  $C_D$  é o coeficiente de arraste, baseado no número relativo de Reynolds:

$$C_D = \frac{24}{\alpha_f Re_s} \left[ 1 + 0,15 (\alpha_f Re_s)^{0,687} \right] \quad (10)$$

$$Re_s = \frac{\rho_f d_s |\vec{v}_s - \vec{v}_f|}{\mu_f} \quad (11)$$

### iii. Teoria Cinética Granular

A equação que representa o transporte segundo a Teoria Cinética Granular é representada por DING e GIDASPOW (1990):

$$\frac{3}{2} \left[ \frac{\partial}{\partial t} (\rho_s \alpha_s \theta_s) + \nabla (\rho_s \alpha_s \vec{v}_s \theta_s) \right] = (-p_s \bar{I} + \bar{\tau}_s) : \nabla \vec{v}_s + \nabla \cdot (k_{\theta_s} \nabla \theta_s) - \gamma_{\theta_s} - \phi_{fs} \quad (12)$$

Onde  $k_{\theta_s}$  é o coeficiente de difusão da temperatura granular;  $\gamma_{\theta_s}$  é a dissipação de energia ocasionada pelas colisões,  $\theta_s$  é a temperatura granular e  $\phi_{fs}$  é a troca de energia entre a fase sólida e fluida. Além disso, o termo  $(-p_s \bar{I} + \bar{\tau}_s) : \nabla \vec{v}_s$  é definido como a geração de energia pelo tensor tensão da fase sólida.

O termo de pressão nos sólidos define a pressão exercida pela fase sólida para escoamentos granulares em regime compressível, que é calculada independentemente e usada no termo do gradiente de pressão, representado na Equação 12. A equação (LUN et al., 1984) para a pressão dos sólidos apresenta termos para a cinética e para a colisão entre partículas:

$$p_s = \alpha_s \rho_s \theta_s + 2 \rho_s (1 + e_{ss}) \alpha_s^2 g_0 \theta_s \quad (14)$$

Em que  $g_0$  é a função de distribuição radial e  $e_{ss}$  é o coeficiente de restituição sólido-sólido, que varia de 0 a 1 e determina a elasticidade do choque, sendo que para o valor 1 o choque é totalmente elástico e para o valor 0 o choque é totalmente inelástico.

A função de distribuição radial ( $g_0$ ) descreve as modificações que ocorrem no transporte cinético das partículas de acordo com o empacotamento local. OGAWA et al. (1980) propuseram uma função para descrever o movimento característico de materiais sólidos em estado de fluidização:

$$g_0 = \left[ 1 - \left( \frac{\alpha_s}{\alpha_{s,máx}} \right)^{1/3} \right]^{-1} \quad (15)$$

A difusão de energia é quantificada pelo termo  $k_{\theta_s} \nabla \theta_s$ , no qual  $k_{\theta_s}$  é o coeficiente de difusão, descrito na Equação 16:

$$k_{\theta_s} = \frac{150 \rho_s d_s \sqrt{\theta_s \pi}}{384(1+e_{ss})g_0} \left[ 1 + \frac{6}{5} \alpha_s g_0 (1 + e_{ss}) \right]^2 + 2 \alpha_s^2 \rho_s d_s (1 + e_{ss}) g_0 \sqrt{\frac{\theta_s}{\pi}} \quad (16)$$

A dissipação de energia devido às colisões entre partículas é dada pela equação de LUN et al. (1984).

$$\gamma_{\theta_s} = \frac{12(1-e_{ss}^2)g_0}{d_s \sqrt{\pi}} \rho_s \alpha_s^2 \theta_s^{3/2} \quad (17)$$

A troca de energia cinética devido às flutuações aleatórias na velocidade das partículas entre as fases sólida e fluida é quantificada por GIDASPOW et al. (1992).

$$\phi_{fs} = -3K_{fs}\theta_s \quad (18)$$

O tensor tensão da fase sólida contém as viscosidades bulk e cisalhantes oriundas da troca de momento entre sólidos devido aos movimentos translacional e de colisão.

A viscosidade bulk leva em conta a resistência das partículas à compressão e expansão e é dada segundo LUN et al. (1984):

$$\lambda_s = \frac{4}{3} \alpha_s \rho_s d_s g_0 (1 + e_{ss}) \left( \frac{\theta_s}{\pi} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (19)$$

A viscosidade cisalhante para a fase sólida é o resultado da soma dos termos de colisão ( $\mu_{s,col}$ ), cinético ( $\mu_{s,kin}$ ) e de fricção ( $\mu_{s,fr}$ ). As duas primeiras parcelas foram equacionadas segundo GIDASPOW et al. (1992). O componente de fricção leva em conta as tensões resultantes do atrito entre partículas quando a fase sólida atinge sua fração volumétrica máxima. A equação de SCHAEFFER (1987) foi utilizada para descrever esse efeito.

$$\mu_s = \mu_{s,col} + \mu_{s,kin} + \mu_{s,fr} \quad (20)$$

$$\mu_{s,col} = \frac{4}{5} \alpha_s \rho_s d_s g_0 (1 + e_{ss}) \left( \frac{\theta_s}{\pi} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (21)$$

$$\mu_{s,kin} = \frac{10}{96} \frac{\alpha_s d_s \sqrt{\theta_s \pi}}{\alpha_s (1 + e_{ss}) g_0} \left[ 1 + \frac{4}{5} g_{0,ss} \alpha_s (1 + e_{ss}) \right]^2 \quad (22)$$

$$\mu_{s,fr} = \frac{p_s \sin \phi_\sigma}{2\sqrt{I_{2D}}} \quad (23)$$

### c. Condições de Contorno

Para a fluidodinâmica, foram utilizadas as seguintes condições de contorno:

- Entrada de fluido: Entrada de ar na direção axial com perfil uniforme de velocidade;
- Saída: Pressão atmosférica prescrita;
- Simetria axial;
- Condição de não-deslizamento na parede para ambas as fases.

### d. Solução numérica

Para resolução das equações do modelo, foi empregado o *software* de CFD ANSYS Fluent 14.0. Nesse *software*, as equações de balanço de massa e quantidade de movimento são discretizadas no domínio e então resolvidas pelo método dos volumes finitos. Para as simulações deste trabalho, foi utilizado um computador Intel Core i7-12700F, 32 GB RAM.

O Quadro 1 apresenta a estrutura do modelo empregado e os parâmetros de simulação para a modelagem fluidodinâmica.

Quadro 6 - Características do procedimento de simulação utilizado para a simulação da fluidodinâmica

<b>Aspecto da simulação</b>	<b>Consideração</b>
Passo no tempo (s)	$10^{-4}$
Número máximo de iterações por passo no tempo	100
Método de solução	Acoplamento pressão-velocidade pelo esquema SIMPLE Discretização Upwind de 2ª ordem para o momento; Upwind de 1ª ordem fração volumétrica e turbulência; Formulação transiente: Implícita de 1ª ordem
Critério de convergência	$10^{-4}$ para a equação da continuidade $10^{-3}$ para as demais equações

A malha utilizada para simular o leito fluidizado foi 2D, com 3,6 cm de largura e 50 cm de comprimento, considerando a simetria axial. Para a escolha da malha utilizou-se o teste pelo método GCI (*Grid Convergence Index*), apresentado no trabalho de iniciação científica Rocha (2022) realizada no Edital PIBIC 001/2021. Por isso foi utilizada a malha de 4500 células representada na Figura 6.

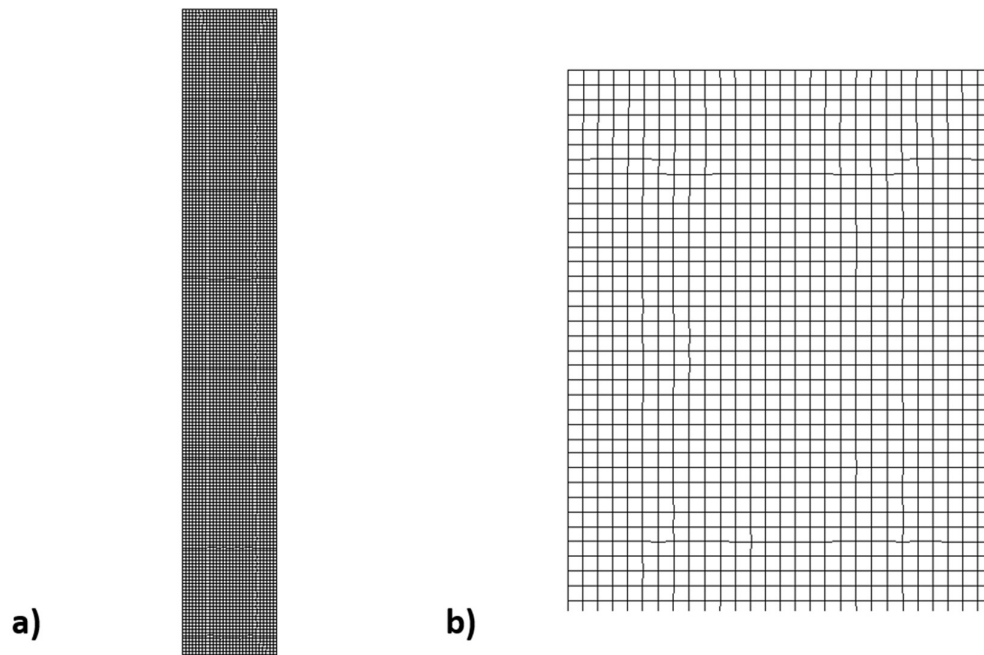


Figura 8 - Malha utilizada na simulação com 4500 células. Em a) tem-se a malha do leito inteiro, enquanto em b) se tem um zoom da malha

e. Parâmetros de simulação

Os parâmetros utilizados na simulação estão representados no Quadro 2.

Quadro 7 - Parâmetros utilizados na simulação

Parâmetro	Consideração
Diâmetro da fase sólida	0,006m e 0,001m
Fração volumétrica máxima da fase sólida	0,51
Massa específica do sólido	4220 kg/m <sup>3</sup>
Massa específica do ar	1,225 kg/m <sup>3</sup>
Viscosidade do ar	1,7894.10 <sup>-5</sup> kg/m/s
Gravidade	9,81 m/s <sup>2</sup>

f. Obtenção de resultados da simulação

Para a obtenção do valor da queda de pressão para cada velocidade simulada, foi inserido um monitor no contorno de entrada, que registra a queda de pressão para cada

passo no tempo de simulação pelo período total simulado. Fazendo a média dos dados durante 1 s a partir do momento que a simulação atinge o regime pseudo-estacionário, tem-se o valor de queda de pressão para cada velocidade simulada. O regime pseudo-estacionário foi identificado graficamente analisando os dados de queda de pressão por tempo em cada simulação.

Obtendo os dados de pressão para cada velocidade, construiu-se o gráfico como o da Figura 3, e a velocidade de mínima fluidização foi determinada assumindo que no período de leito fixo a queda de pressão era proporcional à velocidade e que, uma vez que o leito alcançou o estado de leito fluidizado, a queda de pressão passou a ser constante no leito, a velocidade de mínima fluidização foi determinada no ponto de interseção da linha ajustada da queda de pressão no padrão de fluxo do leito fixo e a pressão estática do leito.

Já para a obtenção dos contornos de fração volumétrica da fase sólida ao longo do leito, realizou-se uma simulação de 1 s já em regime estacionário e o contorno apresentado foi uma média de resultados nesse período.

#### g. Correlações empíricas

Dentre as correlações empíricas utilizadas para determinar a velocidade de mínima fluidização, a maioria requer o cálculo do número de Reynolds e do número de Archimedes, que estão descritos pelas equações:

$$Re_{mf} = \frac{\rho d_p U_{mf}}{\mu} \quad (24)$$

$$Ar = \frac{g \rho (\rho_p - \rho) d_p^3}{\mu^2} \quad (25)$$

Onde  $\mu$  é viscosidade da fase gasosa,  $\rho$  é a densidade da fase gasosa,  $\rho_p$  é a densidade da partícula e  $g$  é a aceleração da gravidade.

O formato geral das correlações pode apresentar quatro formas:

- $Re_{mf} = (K_1^2 + K_2 Ar)^{0,5}$ , onde  $K_1$  e  $K_2$  são constantes empíricas;
- $Re_{mf} = A. Ar^b$ , onde  $A$  e  $b$  são constantes empíricas;
- $Re_{mf} = \frac{Ar}{p+q\sqrt{Ar}}$ , onde  $p$  e  $q$  são constantes empíricas;
- $U_{mf} = K.X^\alpha$ , onde  $X = \left( \frac{d_p(\rho_p - \rho)g}{\mu} \left( \frac{\rho_p}{\rho} \right)^{1,23} \right)$  e  $K$  e  $\alpha$  são constantes empíricas.

Para este trabalho, foram utilizadas diferentes correlações considerando a massa específica e o diâmetro da partícula sólida, descritas no Quadro 3 abaixo. Dentre as correlações avaliadas para determinação da velocidade de mínima fluidização, foram escolhidas as cinco descritas no quadro, por abrangerem a massa específica da fase sólida de 4220 kg/m<sup>3</sup> e os diâmetros de partícula de 1000 e 6000 μm, referentes ao minério de ferro avaliado neste trabalho.

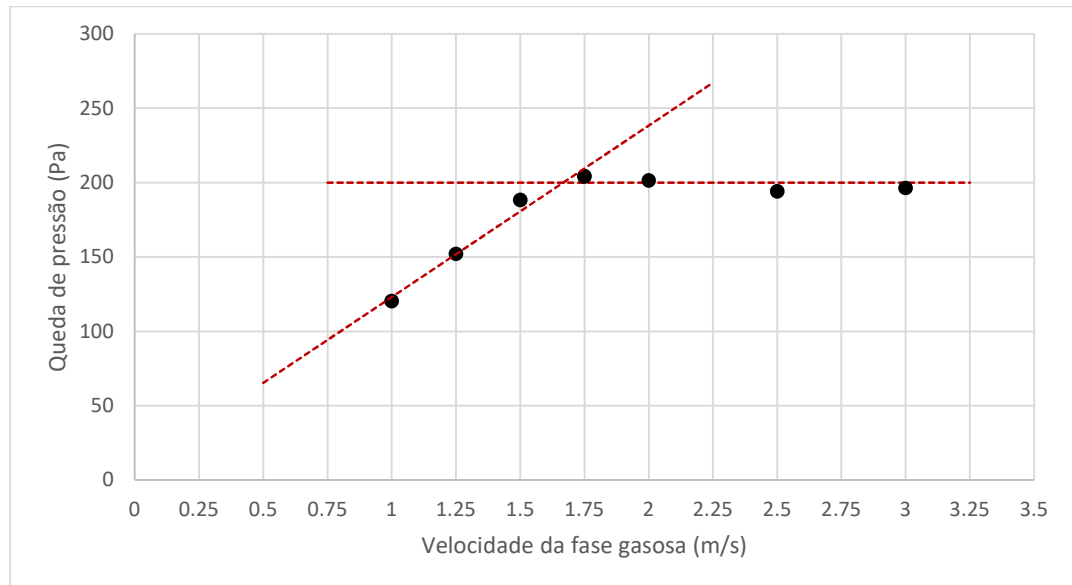
Quadro 8 – Correlações utilizadas no trabalho, com o intervalo de validade de aplicação para diâmetro e densidade de partículas

<b>Autor</b>	<b>Correlação</b>	<b>Diâmetro de partícula, <math>d_p</math> (μm)</b>	<b>Densidade de partícula, <math>\rho_p</math> (kg/m<sup>3</sup>)</b>
<b>Wen e Yu (1996)</b>	$Re_{mf} = (33,72 + 0,0408Ar)0,5 - 33,7$	2052 - 6350	2360 - 7840
<b>Bín (1994)</b>	$Re_{mf} = (27,312 + 0,0386Ar)0,5 - 27,31$	40 - 2120	1600 - 7500
<b>Baeyens e Geldart (1973)</b>	$Re_{mf} = 0,0009125Ar^{0,934}$	50 - 4000	850 - 8810
<b>Chyang e Huang (1988)</b>	$Re_{mf} = (33,32 + 0,033Ar)0,5 - 33,3$	699 - 6062	910 - 6860
<b>Riba, Routie e Couderc (1978)</b>	$Re_{mf} = 0,0154 \left( \frac{\rho}{\rho_p - \rho} \right)^{-0,4} Ar^{0,66}$	600 - 10360	1342 - 7741

#### 4. Resultados e discussões

##### a. Diâmetro de partícula de 0,001 m

Considerando uma média dos valores da pressão a partir do qual os cálculos convergem para cada velocidade do fluido, variando entre 1m/s e 3m/s, pode-se construir um gráfico de velocidade por pressão representado na Figura 5.



*Figura 9 - Velocidade por queda de pressão para o diâmetro de 1mm da fase sólida e linhas para determinação da interseção entre o período de leito fixo e o período de leito fluidizado - dados de simulação*

Analisando então a Figura 7, pode-se determinar que para essas condições, a  $U_{mf}$  foi de aproximadamente 1,75m/s.

Pela Figura 8 que apresenta o comportamento da fração volumétrica da fase sólida no leito para cada velocidade simulada, foi possível analisar que a partir de 1,5 m/s a altura do leito expandiu, o que mostra que a velocidade de mínima fluidização mostrada pelo gráfico é coerente.

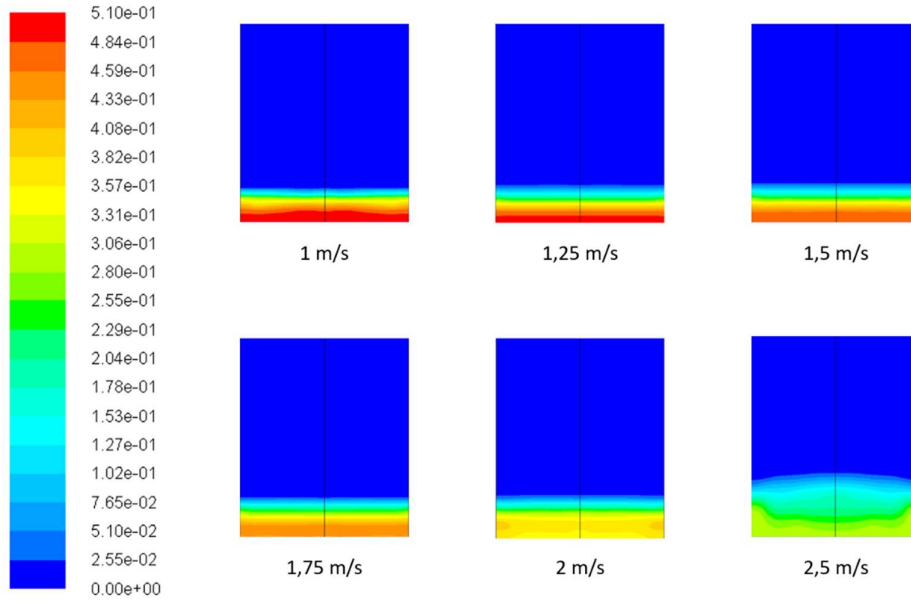


Figura 10 - Fração volumétrica da fase sólida de diâmetro de 1mm ao longo do leito em diferentes velocidades

Considerando o diâmetro de 0,001m, que é 1000 $\mu$ m, e que a massa específica da partícula sólida é de 4220 kg/m<sup>3</sup>, utilizaram-se três correlações para calcular a velocidade de mínima fluidização e com os resultados e o desvio padrão em relação ao resultado da simulação apresentados no Quadro 4.

Quadro 9 - Valores da velocidade de mínima fluidização para cada correlação e desvio padrão para diâmetro de 1mm

Correlação	Resultado	Desvio Padrão
Wen e Yu	$U_{mf} = 0,77 \text{ m/s}$	56,0%
Bín	$U_{mf} = 0,82 \text{ m/s}$	53,1%
Baeyens e Geldart	$U_{mf} = 0,96 \text{ m/s}$	45,1%

b. Diâmetro de partícula de 0,006 m

Igualmente para 0,006m, foi considerado uma média dos valores da pressão a partir do qual os cálculos convergem para cada velocidade do fluido, variando entre 2 m/s e 20 m/s, pode-se construir um gráfico de queda de pressão por velocidade do ar na entrada do leito, representado na Figura 9.

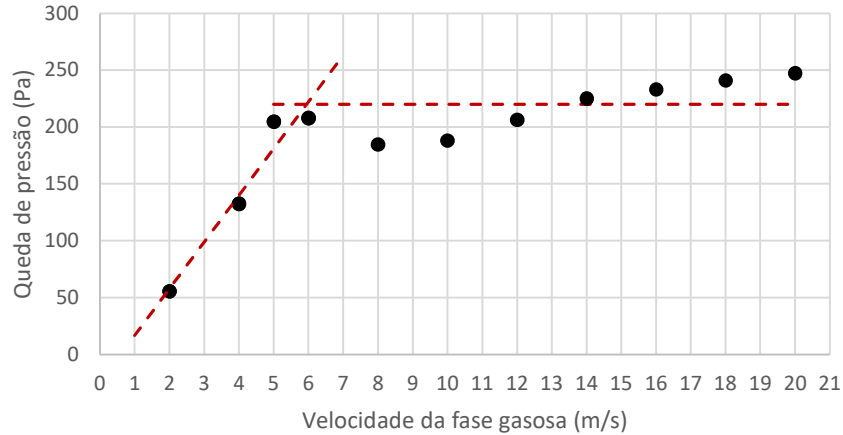


Figura 11 - Velocidade por queda de pressão para o diâmetro de 6mm da fase sólida e linhas para determinação da interseção entre o período de leito fixo e o período de leito fluidizado - dados de simulação

Analisando então a Figura 9, pode-se determinar que para essas condições, a  $U_{mf}$  foi de aproximadamente 6 m/s.

Pela Figura 10 que demonstra o comportamento da fração volumétrica da fase sólida no leito para cada velocidade do ar na entrada do leito simulada, é possível analisar que a partir de 5 m/s a altura do leito expandiu, o que mostra que a velocidade de mínima fluidização mostrada pelo gráfico é coerente.

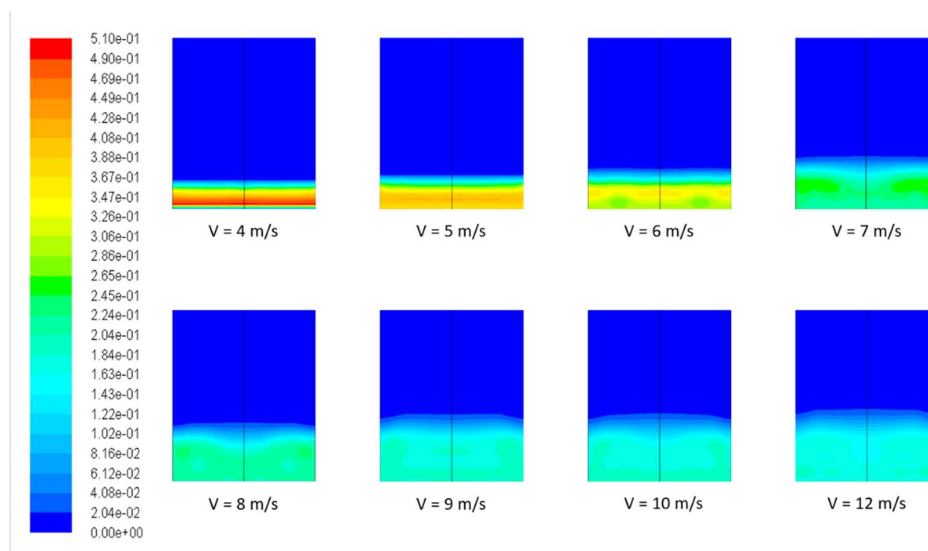


Figura 12 - Fração volumétrica da fase sólida de diâmetro de 6mm ao longo do leito em diferentes velocidades

Considerando o diâmetro de 0,006 m e que a massa específica da partícula sólida é de 4220 kg/m<sup>3</sup>, utilizou-se de três correlações numéricas para calcular a velocidade de mínima fluidização com os resultados e o desvio padrão em relação ao resultado da simulação apresentados no Quadro 5.

Quadro 10 - Valores da velocidade de mínima fluidização para cada correlação e desvio padrão para diâmetro de 6mm

<b>Correlação</b>	<b>Resultado</b>	<b>Desvio Padrão</b>
<b>Wen e Yu</b>	$U_{mf} = 2,77 \text{ m/s}$	53,8%
<b>Chyang e Huang</b>	$U_{mf} = 2,51 \text{ m/s}$	58,2%
<b>Riba, Routie e Couderc</b>	$U_{mf} = 4,87 \text{ m/s}$	18,8%

### c. Discussão

Falando inicialmente do comportamento dos gráficos, pode-se observar que na Figura 7, para o diâmetro de 0,001m, a curva se assemelha a curva padrão de fluidodinâmica de escoamento em um leito. Já a Figura 9, para o diâmetro de 0,006m, apresenta uma maior variação dos valores de queda de pressão. Como discutido em (Kunii, et al., 1923), o comportamento da queda de pressão em partículas médias pode ser mais imprevisível devido ao rearranjo das partículas e isso influencia o comportamento do gráfico.

Comparando as velocidades obtidas pela simulação, temos a relação que quanto maior o diâmetro, maior a velocidade de mínima fluidização. Isso pode ser explicado considerando que o diâmetro da partícula é diretamente proporcional ao número de Reynolds e, conseqüentemente, inversamente proporcional ao coeficiente de arraste (Equações 24 e 10). Assim, quanto maior o tamanho da partícula, maior a velocidade necessária para igualar as forças de arraste e peso da partícula.

Observando os resultados obtidos em ambos os casos, pode-se observar que houve um desvio padrão significativo entre os valores calculados pelas correlações e os valores obtidos pela simulação. Importante ressaltar que as correlações são projetadas para atender casos específicos e mesmo possuindo um intervalo de usabilidade de cada correlação considerando o diâmetro e a densidade da fase sólida, não é possível determinar o valor com precisão para todos os casos que abrange.

Além disso, podem existir alguns motivos para a diferença entre o valor encontrado na simulação e os valores encontrados com as correlações relacionados também a simulação. Entre eles a posição do monitor para obtenção da pressão. No caso deste trabalho, o monitor estava alocado na entrada do leito, tendo então o valor da pressão nas células de entrada e usualmente em experimentos, essa pressão é medida antes do leito de partículas. Outra questão é que existe o erro atrelado a malha computacional simulada. Para malhas com mais células é possível obter valores mais próximos aos experimentais. Por isso, para uma comparação mais precisa, seria necessário comparar o mesmo processo experimentalmente.

## **5. Conclusão**

Com este trabalho foi possível concluir que as velocidades de mínima fluidização obtidas na simulação por CFD indicaram que partículas de maior diâmetro requerem uma maior velocidade de mínima fluidização. Tal comportamento é fisicamente coerente e pode ser explicado pela relação diretamente proporcional entre o diâmetro da partícula e o número de Reynolds, e a relação inversamente proporcional daquele com o coeficiente de arraste. Além disso, os resultados mostraram um desvio padrão considerável entre os valores calculados pelas correlações e aqueles obtidos pela simulação. Assim, embora a simulação por CFD seja um método promissor para estimar a velocidade de mínima fluidização as correlações forneçam uma referência útil para estimar a  $U_{mf}$ , tais métodos ainda não dispensam a comparação do valor final de  $U_{mf}$  com a obtida em algum teste experimental para validação.

Para trabalhos futuros e para uma determinação mais precisa da  $U_{mf}$ , seria necessário a comparação com dados experimentais. Trabalhos futuros envolvendo simulações utilizando abordagem Euleriana-Lagrangeana também seriam interessantes para avaliar com mais detalhes a interação entre as fases sólida e fluida.

**Referências:**

ANANTHARAMAN, ADITYA, COCCO, RAY A. E CHEW, JIA WEI. 2017. **Evaluation of correlations for minimum fluidization velocity (UMF)** IN. 2017.

A.K. BIN, **Prediction of the minimum fluidization velocity**, *Powder Technol.* 81 (1994) 197–199

C.S. CHYANG, W.C. HUANG, **Characteristics of large particle fluidization**, *J. Chin. Inst. Chem. Eng.* 19 (1988) 81–89.

C.Y. WEN, Y.H. YU, **A generalized method for predicting the minimum fluidization velocity**, *AICHE J.* 12 (1966).

CAMPBELL, C. S., & BRENNEN, C. E. (1985). **Computer simulation of granular flows**. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 17(1), 13-39.

COSTA, RICARDO DALLA. **Mineração e Industrialização de Ferro e Impactos Ambientais**. 2004.

CREMASCO, M.A. . **Fluidização**. *Operações Unitárias em Sistemas Particulados e Fluidodinâmicos*. 2012.

L.S. FAN, C. ZHU, **Dense-Phase Fluidized Beds, Principles of Gas-Solid Flows**, *Cambridge University Press, Cambridge*, 1998 371–420.

FATTAHI, M.; HOSSEINI, S. H.; AHMADI, G. **CFD simulation of transient gas to particle heat transfer for fluidized and spouted regimes**. *Applied Thermal Engineering*, p. 1–12, 2015.

FORTUNA, A. O. **Técnicas computacionais para dinâmica dos fluidos: conceitos básicos e aplicações**. Sao Paulo: EdUSP, 2000. 426 p. (Academica; v.30)

FOUST, A. S.; WENZEL, L. A.; CLUMP, C. W.; MAUS, L.; ANDERSEN, L. B. **Princípios de Operações Unitárias**. Rio de Janeiro: LTC, 1982.

GEANKOPLIS, C. J. **Transport Processes and Unit Operations**. 4o ed. New Jersey: PRT Prentice Hall, 2003.

GERBER, S., BEHRENDT, F. E OEVERMANN, M. **A comparative study of Euler-Euler and Euler-Lagrange modeling of wood gasification in a dense fluidized bed.** 2010

GIDASPOW, D.; BEZBURUAH, R.; DING, J. **Hydrodynamics of Circulating Fluidized Beds, Kinetic Theory Approach**, Fluidization VII. In: E. Foundation (Org.); 7th Engineering Foundation Conference on Fluidization. p.75–82, Nova Iorque, 1992.

HOSSEINI, S. H.; AHMADI, G.; OLAZAR, M. **CFD simulation of cylindrical spouted beds by the kinetic theory of granular flow.** Powder Technology, v. 246, p. 303–316, 2013.

J.P. RIBA, R. ROUTIE, J.P. COUDERC, **Minimum conditions for fluidisation by a liquid**, Can. J. Chem. Eng. 56 (1978) 26–30.

J. BAEYENS, D. GELDART, **Predictive calculations of flow parameters in gas fluidized beds and fluidisation behaviour of various powders**, Proc. Conf. La Fluidisation et ses Applications, Cepadues Editions, Toulouse, France 1973, p. 226

KUNII, D.; LEVENSPIEL, O. **Fluidization Engineering.** 2o ed. New York: Academic Press, 1973.

LAW, C. L.; MUJUMDAR, A. S. **Fluidized bed dryers. Handbook of Industrial Drying.** 4o ed, 2015. Boca Raton: CRC Press.

LUZ, A. B. DA ;LINS, F. A. F. **Introdução ao Tratamento de Minérios. Tratamento de Minérios.** Rio de Janeiro : s.n., 2010, pp. 3 - 20.

MALISKA, C. R. **Transferência de calor e mecânica dos fluidos computacional.** 2. ed. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, 2004, 453 p.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA (MME). **Boletim do setor mineral, 2022.** Acesso em: 05/2024.

MUJUMDAR, A. S. Chapter 1 **Principles, Classification, and Selection of Dryers.** In: A. S. Mujumdar (Org.); Handbook of Industrial Drying. 4o ed, p.3–30, 2015b. Boca Raton: CRC Press.

MUJUMDAR, A. S. Chapter 42 **Drying in Mineral Processing.** In: A. S. Mujumdar (Org.); Handbook of Industrial Drying. 4o ed, p.861–866, 2015a. Boca Raton: CRC Press.

MUNRO, M. C.; MOHAJERANI, A. **Determination of the transportable moisture limit of iron ore fines for the prevention of liquefaction in bulk carriers.** *Marine Structures*, v. 40, p. 193–224, 2015. Elsevier Ltd. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.marstruc.2014.11.004>&gt;. .

ROACHE, P. J. **Quantification of uncertainty in computational fluid dynamics.** *Annu. Ver. Fluid. Mech*, v. 29, p. 123–160, 1997.

RICHARDSON, L. F. **The Approximate Arithmetical Solution by Finite Differences of Physical Problems Involving Differential Equations, with an Application to the Stresses in a Masonry Dam.** *Transactions of the Royal Society of London*, v. 210, n. A, p. 307–357, 1910.

ROCHA, ANNA J. C. Simulação por CFD de umleito fluidizado em operação de secagem de minério de ferro. São Carlos: s.n., 2022.

SOUZA, A. S. **AVALIAÇÃO POR CFD DA FLUIDODINÂMICA E DA TRANSFERÊNCIA DE CALOR EM LEITOS DE JORRO PARA DIFERENTES ÂNGULOS DA BASE CÔNICA.** 2019. Dissertação (Pós-graduação) - UFSCar, [S. l.], 2019. Disponível em: <https://repositorio.ufscar.br/handle/ufscar/11193>. Acesso em: 28 jun. 2022.

SOUZA, A. S., et al. **Convective drying of iron ore fines: A CFD model.** *Drying Technology*. 2023.

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

SOUZA, A. S.; PINTO, T. C. S.; SARKIS, A. M.; PÁDUA, T. F.; BÉTTEGA, R. **Energy Analysis of the Convective Drying of Iron Ore Fines.** *Chem. Ind. Chem. Eng. Q.* 2022, 1–35. <https://doi.org/https://doi.org/10.2298/CICEQ220208026S>.

VALE S. A. MINERAÇÃO. Site da Vale. [Online] <https://www.vale.com/pt/mineracao>

WILLIAMS-GARDNER, A. **Industrial Drying.** *Industrial Drying*, 1971. London: Leonard Hill.

