



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
NÚCLEO DE DESENVOLVIMENTO AMAZÔNICO EM ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM INFRAESTRUTURA E
DESENVOLVIMENTO ENERGÉTICO

LEANDRO FERREIRA BORBA LIMA

CÁLCULO DE AR INDUZIDO PELA QUEDA LIVRE DE MATERIAIS GRANULARES VIA CFD

Tucuruí-PA

2021

LEANDRO FERREIRA BORBA LIMA

CÁLCULO DE AR INDUZIDO PELA QUEDA LIVRE DE MATERIAIS GRANULARES VIA CFD

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Infraestrutura e Desenvolvimento Energético do Núcleo de Desenvolvimento Amazônico em Engenharia, da Universidade Federal do Pará, como requisito para a obtenção do título de Mestre em Infraestrutura e Desenvolvimento Energético. Área de concentração: Tecnologias Sustentáveis.

Orientador: Prof. Dr. André Luiz Amarante Mesquita

Tucuruí-PA

2021

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)

- L732c Lima, Leandro Ferreira Borba.
Cálculo de Ar Induzido Pela Queda Livre de Materiais
Granulares via CFD / Leandro Ferreira Borba Lima. — 2021.
115 f. : il. color.
- Orientador(a): Prof. Dr. André Luiz Amarante Mesquita
Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Pará,
Núcleo de Desenvolvimento Amazônico em Engenharia,
Programa de Pós-Graduação em Engenharia de
Infraestrutura e Desenvolvimento Energético, Tucuruí, 2021.
1. Controle de poeira. 2. Fluidodinâmica
computacional. 3. Emissão de particulados. 4. Ar
induzido. I. Título.

CDD 532

LEANDRO FERREIRA BORBA LIMA

CÁLCULO DE AR INDUZIDO PELA QUEDA LIVRE DE MATERIAIS GRANULARES VIA CFD

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Infraestrutura e Desenvolvimento Energético do Núcleo de Desenvolvimento Amazônico em Engenharia, da Universidade Federal do Pará, como requisito para a obtenção do título de Mestre em Infraestrutura e Desenvolvimento Energético. Área de concentração: Tecnologias Sustentáveis.

Orientador: Prof. Dr. André Luiz Amarante Mesquita

Aprovada em 17 de dezembro de 2021.

BANCA EXAMINADORA:



Prof. Dr. André Luiz Amarante Mesquita (PPGINDE/NDAE/UFPA) – Orientador



Prof. Dr. Luis Paulo Silveira Machado (PPGINDE/NDAE/UFPA) – Examinador Interno



Prof. Dr. Marcio Ferreira Martins (UFES) – Examinador Externo

Aos meus pais, Irair Mourane
Ferreira Lima e José Orleans Borba Lima,
os pilares da minha formação como ser
humano.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar a Deus, por ter permitido que eu tivesse saúde e determinação para não desanimar durante a realização deste trabalho. Aos meus pais José Orleans Borba Lima e Irair Mourane Ferreira Lima, a minha irmã Lorena Ferreira Borba Lima, que me incentivaram nos momentos difíceis e compreenderam a minha ausência enquanto eu me dedicava à realização deste trabalho.

Ao NDAE – Núcleo de Desenvolvimento Amazônico em Engenharia, junto à Universidade Federal do Pará, com o seu corpo docente, direção e administração que oportunizaram a janela que hoje vislumbro um horizonte superior.

Ao professor Dr. André Luís Amarante Mesquita, por ter sido meu orientador, me dar suporte no pouco tempo que lhe coube, pelas suas broncas, correções e incentivos, desempenhado tal função com muita dedicação, sempre me guiando para o bem.

Ao professor Msc. Maciel da Costa Furtado, por todos os conselhos, pela ajuda e pela paciência com a qual guiou o meu aprendizado, sempre estando do meu lado e me incentivando nos momentos de dificuldade.

Aos professores Dr. Luis Paulo Silveira Machado e Dr. Marcio Ferreira Martins, pelas correções e ensinamentos que me permitiram apresentar um melhor desempenho no meu processo de formação.

Aos amigos Gabriel Guedes, Romário de Souza Santos, Danilo Santos Silva, por todo o apoio e pela ajuda, que muitos contribuíram para a realização deste trabalho.

A todos os amigos que de alguma forma fizeram parte dessa jornada eu agradeço com um forte abraço.

RESUMO

A proposta desse trabalho consiste em apresentar um método de análise via ANSYS-Fluent utilizando a ferramenta DDPM (Dense Discrete Phase Model) do modelo multifásico euleriano visando um melhor entendimento do fluxo de material granulado juntamente com o ar induzido adjacente devido ao arraste proporcionado pelas partículas em queda livre, o que resultam na geração e propagação de poeira, executando simulações com materiais onde é variando densidade e diâmetros de partículas diferentes. O uso desta ferramenta de análise possibilitará a melhoria e aprimoramentos de projetos de despoeiramento nas indústrias que trabalham com materiais granulares que emitam poeira. As simulações realizadas foram comparadas com outros métodos computacionais e experimentos práticos, além de fórmulas teóricas desenvolvidas anteriormente.

Palavras-chaves: Controle de poeira. Fluidodinâmica computacional. Emissão de particulados. Ar induzido.

ABSTRACT

The proposal of the work consists of presenting an analysis method via ANSYS-Fluent using the DDPM tool (Dense Discrete Phase Model) of the integrated Eulerian multiphase model, a better understanding of the flow of granulated material with the adjacent induced air due to the drag provided by the free-falling particles, which result in the generation and propagation of dust, avoid simulations with materials where particle density and diameters are variable. The use of this analysis tool will make it possible to improve and improve de dusting projects in industries that work with granular materials that emit dust. The simulations carried out were compared with other computational methods and practical experiments, in addition to previous theoretical formulas.

Keywords: Dust control. Computational fluid dynamics. Dust. Emission of particulates. Induced Air.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

FIGURA 2.1 – ESQUEMA DE GERAÇÃO DE POEIRA PELA QUEDA LIVRE DE PARTÍCULAS.	24
FIGURA 2.2 -PARTÍCULA EM QUEDA LIVRE	25
FIGURA 2.3 -PARTÍCULA COM VELOCIDADE CONSTANTE	26
FIGURA 2.4 - APARATO EXPERIMENTAL WYPYCH E COOPER (2005).....	34
FIGURA 2.5 - PARTÍCULAS GRANDES CAINDO VERTICALMENTE SOB FORÇAS GRAVITACIONAIS.	36
FIGURA 2.6 - PARTÍCULAS MUITO FINAS AGINDO COMO FUMAÇA.	36
FIGURA 2.7 - ZONAS SENSÍVEIS EM CORREIAS TRANSPORTADORAS	40
FIGURA 2.8 - APARATO EXPERIMENTAL DE ULLMANN.	42
FIGURA 2.9 - APARATO EXPERIMENTAL DE OGATA.	43
FIGURA 2.10 - PRINCÍPIO DO CONCEITO DE XIAOCHUAN.	44
FIGURA 2.11 - NÚMERO DE REYNOLDS X NÚMERO DE FLUXO GRANULAR EM RELAÇÃO A H/D	50
FIGURA 2.12 - APARATO EXPERIMENTAL DE ESMAILI <i>ET AL.</i> , (2013).....	51
FIGURA 2.13 - APARATO EXPERIMENTAL DE ESMAILI <i>ET AL.</i> , (2013).....	54
FIGURA 2.14 - APARATO EXPERIMENTAL WANG <i>ET AL.</i> , (2016).....	55
FIGURA 2.15 - PLUMA DE PARTÍCULAS.	56
FIGURA 2.16 - APARATO EXPERIMENTAL WANG.....	57
FIGURA 2.17 - QUEDA LIVRE SEMICONFINADA.....	59
FIGURA 2.18 – LINHAS DE VELOCIDADE DAS PARTÍCULAS EM UM TIPO DE CHUTE.	62
FIGURA 2.19 – COMPARAÇÃO DE FLUXO DE AR SIMULADO ENTRE OS MODELOS 2D E 3D. ..	63
FIGURA 2.20 – PERFIL DE VELOCIDADE AXIAL DE AR INDUZIDO.	64
FIGURA 2.21 – SIMULAÇÃO DEM DOS PROJETOS DE CHUTES DE TRANSFERÊNCIA.	64
FIGURA 2.22 – ZONAS DE PROPAGAÇÃO DE POEIRA.....	65

FIGURA 2.23 – SEQUÊNCIA DE IMAGENS MOSTRANDO A MUDANÇA DAS LINHAS DE CORRENTE APÓS ATINGIR A ALTURA CRÍTICA ($D_c=10\text{MM}$).	66
FIGURA 2.24 – VETORES DE VELOCIDADE DO AR.	67
FIGURA 2.25 – CONTORNOS DE VELOCIDADE DO AR PARA AS PARTÍCULAS EM QUEDA.	68
FIGURA 2.26 – FORMA DE FLUXO DE MATERIAL A GRANEL.	69
FIGURA 4.1 – VISTA ESQUEMÁTICA.	78
FIGURA 4.2 – VOLUME DE CONTROLE DA REGIÃO CÔNICA ANALISADA.	79
FIGURA 4.3 – MALHA 4 GERADA PARA ANÁLISE.	80
FIGURA 4.4 – APLICAÇÃO DAS CONDIÇÕES DE CONTORNO.	81
FIGURA 4.5 – APARATO EXPERIMENTAL.	82
FIGURA 4.6 – RESULTADOS EXPERIMENTAL.	83
FIGURA 4.7 – GEOMETRIA DE 800MM DE ALTURA.	84
FIGURA 4.8 – MALHA PARA AS CAIXAS.	84
FIGURA 4.9 – TAMANHO DE PARTÍCULAS DO EXPERIMENTO.	85
FIGURA 4.10 – APLICAÇÃO DAS CONDIÇÕES DE CONTORNO.	86
FIGURA 5.1 - VELOCIDADE DAS ESFERAS DE PLÁSTICO DE 3MM , ESFERAS DE VIDRO DE 3MM E ESFERAS DE VIDRO DE 6MM COMPARADAS COM O EXPERIMENTO PRÁTICO.	87
FIGURA 5.2 – DEMONSTRAÇÃO 3D DO CAMPO DE VELOCIDADE DO AR PARA DAS ESFERAS DE VIDRO DE 3MM.	88
FIGURA 5.3 - VELOCIDADE DO AR DAS ESFERAS DE PLÁSTICO DE 3MM(A); VELOCIDADE DO AR DAS ESFERAS DE VIDRO DE 3MM(B); VELOCIDADE DO AR DAS ESFERAS DE VIDRO DE 6MM (C).	89
FIGURA 5.4 – RESULTADOS DA SIMULAÇÃO PARA A DISTRIBUIÇÃO DA VELOCIDADE DO AR NA SEÇÃO DE 900MM DE ALTURA.	90
FIGURA 5.5 - PERFIL DE VELOCIDADE DO AR PARA AS ESFERAS DE PLÁSTICO DE 3MM.	90

FIGURA 5.6 - PERFIL DE VELOCIDADE DO AR PARA AS ESFERAS DE VIDRO DE 3MM.....	91
FIGURA 5.7 - PERFIL DE VELOCIDADE DO AR PARA AS ESFERAS DE VIDRO DE 6MM.....	91
FIGURA 5.8 – VISTA ESQUEMÁTICA DO FLUXO DE PARTÍCULAS EM QUEDA LIVRE.	93
FIGURA 5.9 - DESLOCAMENTO DE AR EM RELAÇÃO À ALTURA DE QUEDA PARA AS ESFERAS DE PLÁSTICO DE 3MM USANDO UMA CORRELAÇÃO LINEAR.	94
FIGURA 5.10 - DESLOCAMENTO DE AR EM RELAÇÃO À ALTURA DE QUEDA PARA AS ESFERAS DE VIDRO DE 3MM USANDO UMA CORRELAÇÃO LINEAR.....	94
FIGURA 5.11 - DESLOCAMENTO DE AR EM RELAÇÃO À ALTURA DE QUEDA PARA AS ESFERAS DE VIDRO DE 6MM USANDO UMA CORRELAÇÃO LINEAR.....	95
FIGURA 5.12 - DESLOCAMENTO DE AR EM RELAÇÃO À ALTURA DE QUEDA PARA AS ESFERAS DE VIDRO DE 6MM USANDO UMA CORRELAÇÃO LINEAR.....	96
FIGURA 5.13 - CAIXA DE 800MM DE QUEDA EM 250 SEGUNDOS.	97
FIGURA 5.14 - CAIXA DE 800MM DE QUEDA EM 585 SEGUNDOS.	97
FIGURA 5.15 - CAIXA DE 800MM DE QUEDA EM 1500 SEGUNDOS.	97
FIGURA 5.16 - CAIXA DE 800MM DE QUEDA EM 2200 SEGUNDOS.	98
FIGURA 5.17 - GRÁFICO DISPONÍVEL NO FLUENT DA CAIXA DE 800MM DEMONSTRANDO A SAÍDA DE MASSA EM RELAÇÃO AO TEMPO.....	98
FIGURA 5.18 - CAIXA DE 1000MM DE QUEDA EM 2500 SEGUNDOS.	99
FIGURA 5.19 - CAIXA DE 1200MM DE QUEDA EM 3200 SEGUNDOS.	99
FIGURA 5.20 - CAIXA DE 1400MM DE QUEDA EM 2000 SEGUNDOS.	100
FIGURA 5.21 - CAIXA DE 1400MM DE QUEDA EM 4800 SEGUNDOS.	100
FIGURA 5.22 - CAIXA DE 1400MM DE QUEDA EM 5900 SEGUNDOS.	101
FIGURA 5.23 - CAIXA DE 1400MM DE QUEDA EM 6500 SEGUNDOS.	101
FIGURA 5.24 - CAIXA DE 1400MM DE QUEDA NO FINAL DOS 8388,56S DE INJEÇÃO DE MATERIAL.	102

FIGURA 5.25 - CAIXA DE 1600MM DE QUEDA EM 6800 SEGUNDOS	102
FIGURA 5.26 - GRÁFICO DA CAIXA DE 1400MM DEMONSTRANDO A SAÍDA DE MASSA EM RELAÇÃO AO TEMPO ATÉ O FINAL DA SIMULAÇÃO.....	103
FIGURA 5.27 - GRÁFICO DA CAIXA DE 1400MM DEMONSTRANDO A SAÍDA DE FLUXO DE MASSA EM RELAÇÃO AO TEMPO ATÉ O FINAL DA SIMULAÇÃO.....	103
FIGURA 5.28 – RELATÓRIOS GERADOS PELAS SIMULAÇÕES.....	104

LISTA DE TABELAS

TABELA 2.1 – CLASSIFICAÇÃO DE KLINZING (1981)	32
TABELA 2.2 – MODELOS DE AR INDUZIDO	39
TABELA 4.1 – ESPECIFICAÇÕES GERAIS DE UM DOS COMPUTADORES UTILIZADOS.....	77
TABELA 4.2 – ANÁLISE DE CONVERGÊNCIA DE MALHA PARA ESFERA DE PLÁSTICO DE 3MM .	81
TABELA 4.3 – CONFIGURAÇÃO DAS CONDIÇÕES DE CONTORNO PARA EXECUÇÃO DA SIMULAÇÃO.....	81
TABELA 4.4 – CONFIGURAÇÃO DE MODELAGEM CFD.....	82
TABELA 4.5 – CONFIGURAÇÃO DAS CONDIÇÕES DE CONTORNO PARA EXECUÇÃO DA SIMULAÇÃO.....	86
TABELA 4.6 – CONFIGURAÇÃO DE MODELAGEM CFD.....	86
TABELA 4.1 – PROPRIEDADES DO FLUXO – PP – 3MM.....	92
TABELA 4.2 – PROPRIEDADES DO FLUXO – GP – 3MM.	92
TABELA 4.3 – PROPRIEDADES DO FLUXO – GP – 6MM.	92
TABELA 5.4 – RESULTADOS ENCONTRADOS.	104

LISTA DE SIGLAS

ISO	-	International Organization for Standardization
LEV	-	Local exhaust ventilation
CFD	-	Computational Fluid Dynamics
CAE	-	Computer Aided Engineering
DDPM	-	Dense Discrete Phase Model
DPM	-	Discrete Phase Model
DEM	-	Discrete Element Method
MP-PIC	-	MultiPhase Particle In Cell
CPFD	-	Dinâmica de Fluidos de Partículas Computacionais
KTGF	-	Teoria Cinética de Fluxo Granular
PIV	-	Velocímetria de Imagem de Partículas
SIMPLE	-	Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equations

LISTA DE SÍMBOLOS

- ε - *Parâmetro de porosidade*
- K - *Fator de escoamento*
- Re_t - *Número de Reynolds para a partícula usando-se a velocidade terminal*
- Re_p - *Número de Reynolds para a partícula em termo da velocidade relativa entre as fases*
- U_g - *Velocidade média local em fase diluída*
- U_0 - *Velocidade do fluido sem a presença dos sólidos*
- U_t - *Velocidade Terminal*
- α_p - *Formato da partícula*
- d_p - *Diâmetro da partícula, em micrometros;*
- ρ_a - *Densidade do ar, em kg/m³;*
- ρ_p - *Densidade da partícula, em kg/ m³;*
- v_i - *Velocidade terminal, em m/s.*
- v_{hr} - *Velocidade no estado estacionário; em m/s*
- v_t - *Velocidade terminal; em m/s.*
- e_f - *Porosidade, sendo uma grandeza adimensional*
- s - *Parâmetro empírico para limitação do número de Reynolds.*
- d_0 - *Diâmetro de saída do silo*
- m_p - *Massa da partícula*
- C_d - *Coeficiente de atrito*
- ρ_p - *Massa especifica da partícula.*
- d_p - *Diâmetro da partícula.*
- ρ_f - *Densidade do fluido*
- g - *Aceleração da gravidade*
- \dot{m}_p - *Vazão Mássica*
- $A.$ - *Área da seção transversal da coluna de materiam*
- V_0 - *Velocidade de escoamento do material a granel.*
- A_0 - *Área da saída da tremonha*
- $C_{pl.}$ - *Constante dependendo do tipo de pluma*
- H - *Altura de queda*

$B = V_0 g$ - Sendo B uma constante.

V_0 - Velocidade inicial de fluxo de material

G' - Gravidade corrigida para a pluma

ρ_l - Densidade do ambiente.

\dot{M}_p - Vazão mássica de partículas

\dot{M}_a - Vazão mássica de ar

H - Altura de queda de partículas

W_f - Dissipação ficcional da energia mecânica (Atrito gerado pela parede).

U_{pd} - Velocidade média das partículas

U_{af} - Velocidade média do ar

A - Área da seção transversal da coluna de material

ρ_a - Densidade do ar

ε - Fração de vazios

C_d - Coeficiente de arrasto.

D_p - Diâmetro da partícula

P_p - Densidade da partícula

P_g - Densidade do ar

U_g - Velocidade do ar

U_p - Velocidade da partícula

Ci_1 - Coeficiente Adimensional

t - Tempo de queda de uma partícula

Dt - Diâmetro do tubo

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	17
1.1. Justificativa	22
1.2 Objetivos	22
1.2.1 Objetivo Geral	22
1.2.2 Objetivos Específicos	22
1.3 Estrutura do Trabalho	23
2. REFERENCIAL TEÓRICO	24
2.1 Fundamentos da emissão de poeira em queda livre	24
2.2 Propriedades dos materiais particulados.....	28
2.3 Pesquisas anteriores sobre arrasto de ar em materiais particulados em queda livre. 32	
2.4 fluidodinâmica computacional com materiais particulados.	60
3. MODELO COMPUTACIONAL UTILIZADO	69
3.1 Modelo CFD de escoamento particulado	70
3.1.1 Modelo Multifluido – Euleriano	71
3.1.2 Modelo de Fase Discreta – DPM.....	73
3.1.3 Modelo de Fase Discreta Densa – DDPM.....	75
4. METODOLOGIA	77
4.1 Descrição do Software e Hardware Utilizados	77
4.2 Estudo de Caso 1	77
4.3 Estudo de Caso 2.....	82
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES	87
5.1 Estudo de Caso 1	87
5.2 Estudo de Caso 2.....	96
6. CONCLUSÃO	105
7. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	107
REFERÊNCIAS	108

1. INTRODUÇÃO

As operações e manuseio de materiais a granel que envolvem um fluxo constante de materiais são muito comuns na indústria. A descarga desses materiais a partir de tremonhas ou transportadores de correia geralmente exigem que o material caia sobre outros equipamentos ou dispositivos e, assim, partículas finas presentes nesse material se separam do fluxo principal e contaminam a atmosfera enquanto o material mais denso é movido pelos equipamentos. Além do mais, cerca de noventa por cento das emissões difusas de poeira são produzidas durante o armazenamento e transporte desse material (CHAKRAVARTY *et al.*, 2017).

O pó fugitivo também causa um importante impacto econômico. O custo de manuseio nas operações é significativa e pode representar um componente importante da produção e nos custos gerais. Portanto, um bom sistema de controle de poeira é essencial para atender requisitos externos e internos na indústria. Muito trabalho foi feito no estudo dos métodos de controle de poeira em processos industriais. Os métodos mais comuns usados para controlar a poeira são a ventilação e umedecimento, através da criação de névoa ou água fina com agentes que se ligam à poeira (HERRMANN & EVENSEN, 1994).

No entanto, em muitos processos industriais, o método de pulverização com umedecedores não é uma opção. Portanto, um sistema de ventilação bem projetado pode oferecer uma solução para capturar a poeira emitida pelo processo de trabalho e manutenção do ambiente operacional nos padrões de saúde e segurança exigidos pelos órgãos competentes. O sistema de ventilação também pode controlar o odor e outros fatores ambientais indesejáveis (HAO *et al.*, 2019).

Os sistemas de exaustão de poeira são as técnicas de controle de engenharia mais amplamente utilizadas, empregadas pelas plantas de processamento mineral para controlar a poeira e diminuir a exposição dos trabalhadores à poeira respirável. Um sistema de coleta de poeira bem integrado traz vários benefícios, resultando em um ambiente sem poeira que aumenta a produtividade e evita desperdícios de material. As técnicas mais comuns de controle de poeira em plantas de processamento mineral são as que utilizam

sistemas de exaustão por ventilação (LEVs, do inglês *local exhaust ventilation*) (CECALA *et al.*, 2018).

Os sistemas de exaustão eficazes normalmente incorporam um dispositivo de captura (gabinete, capô, rampa etc.) projetado para maximizar o potencial de coleta. Como parte de um sistema de coleta de poeira, os LEVs possuem várias vantagens: a capacidade de capturar e eliminar partículas muito finas que são difíceis de controlar usando técnicas de supressão de umidade; a opção de reintroduzir o material capturado de volta ao processo de produção ou descartar o material para que não seja prejudicial posteriormente no processo; e desempenho consistente em condições de clima frio por não sofrer grande impacto de baixas temperaturas, como são os sistemas de supressão de umidade (LIED, 2011; CECALA *et al.*, 2018).

Os LEVs podem ser a única opção de controle de poeira disponível para algumas operações cujo produto é higroscópico ou sofre sérias consequências de até pequenas porcentagens de umidade (por exemplo, operações com argila ou xisto). Na maioria dos casos, a poeira é gerada de maneiras óbvias. Sempre que houver uma operação de transporte, refinamento ou processamento de um material seco, há uma grande probabilidade de que seja gerado pó. Da mesma forma, uma vez que a poeira é liberada no ambiente da planta, ela produz uma nuvem de poeira que pode ameaçar a saúde do trabalhador. Além disso, altos níveis de poeira podem impedir a visibilidade e, assim, afetar diretamente a segurança dos trabalhadores (LIED, 2011).

Conforme descrito por Cecalá *et al.*, (2018) as cinco áreas que normalmente produzem poeira que devem ser controladas são as seguintes:

1. Os pontos de transferência dos sistemas de transporte, onde o material cai durante a transferência para outra peça de equipamento. Exemplos incluem a descarga de um transportador para outro transportador de correia, compartimento de armazenamento ou elevador de caçambas.

2. Processos específicos, tais como trituração, secagem, peneiramento, mistura, descarga de sacolas e carregamento de caminhões ou vagões.

3. Operações envolvendo deslocamento de ar, como enchimento de sacolas, paletização ou enchimento pneumático de silos.

4. Áreas externas onde fontes potenciais de poeira não são controladas, como perfuração de orifícios e de jateamento.

5. Áreas externas, como estradas de transporte, estoques e áreas não pavimentadas diversas, onde o potencial de geração de poeira é perturbado por várias atividades relacionadas à mineração e eventos como ventos fortes.

Embora as áreas 4 e 5 possam ser fontes significativas de poeira, elas geralmente não são incluídas no projeto de sistemas de ventilação de fábricas devido à vasta área abrangida e à imprevisibilidade das condições. Portanto, é necessário o controle de poeira por métodos alternativos aos LEVs. Os sistemas de controle de poeira envolvem várias decisões de engenharia, incluindo o uso eficiente do espaço disponível, o comprimento dos dutos, a facilidade de retornar a poeira coletada ao processo, os requisitos elétricos necessários e a seleção de equipamentos de filtro e controle ideais (LIED, 2011; CECALA *et al.*, 2018).

Portanto, a determinação da quantidade necessária de extração de ar dos pontos de exaustão no processo de manuseio de sólidos a granel é um campo de pesquisa do setor de controle de poeira.

Os processos mais difíceis de controlar a poeira gerada ocorrem quando o material granulado é posto em queda livre para ser estocado ou em direção para outra superfície, em movimento ou não. O exemplo disso é mostrado na figura 1.1. Uma maneira comum utilizada para sanar este problema é enclausurar parcialmente ou totalmente essas regiões, como por exemplos em correias transportadoras, onde o material é passado de uma correia para outra. Mesmo para frações pequenas de materiais, a quantidade de poeira fugitiva desses processos pode ser enorme dependendo das propriedades do material. Portanto, existem duas principais perguntas que precisam ser respondidas: Qual é o volume de ar empoeirado que deve ser extraído e qual é a concentração de poeira no ar (WYPYCH & COOPER, 2005).

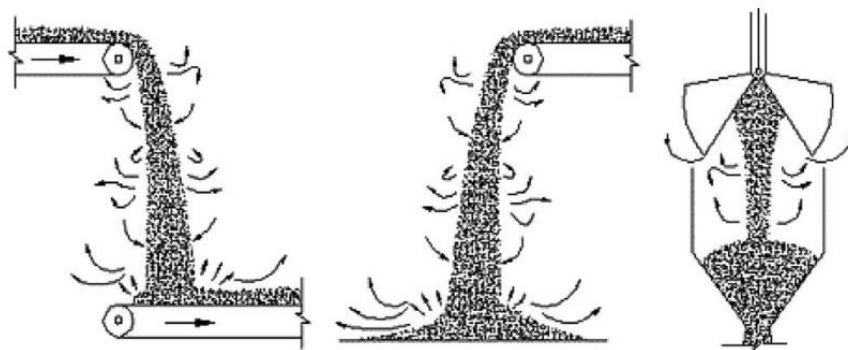


Figura 1.1 – Exemplos de processos de geração de poeira.

Fonte: Wypych e Cooper (2005)

Porém a dinâmica dos fluidos em um sistema de despeiramento é complexa e difícil de ser estudada, dependendo de várias variáveis e como a geometria do sistema e propriedades dos fluidos utilizadas. Pequenas diferenças podem gerar grandes variações de resultados. Em muitos os casos são construídos um modelo do sistema em escala reduzida ou até mesmo em tamanho real para serem feitos os estudos.

Maliska (2004) comenta que a experimentação em laboratório tem como principal vantagem o fato de tratar com uma configuração real. Contudo em alguns casos é extremamente cara ou até mesmo sem a menor possibilidade de ser realizada. Uma alternativa para tal situação seria a simulação numérica em função de, praticamente, não possuir restrições, podendo resolver problemas complexos com condições de contorno gerais em geometrias, também, complexas.

Neste sentido, o uso da ferramenta de CFD (Computational Fluid Dynamics) é hoje uma realidade, graças ao grande desenvolvimento dos computadores, que já conseguem atingir altas velocidades de processamento e grande capacidade de armazenamento (MALISKA, 2004).

Marini (2008) comenta que o uso da fluidodinâmica computacional para prever escoamentos internos e externos apresentou um grande crescimento a partir da década de 1980. A partir deste momento tal ferramenta passou a ser aplicada no projeto de motores movidos a combustão interna, câmaras de combustão, turbinas movidas a gás e fornos. Ainda, segundo este autor, os

atuais desafios são os escoamentos gás-sólido, gás-líquido, gás- sólido-líquido e a turbulência.

Atualmente os pacotes computacionais são cada vez mais completos tornando, portanto, a CFD uma ferramenta poderosa e capaz de englobar uma grande gama de áreas de aplicação industriais e científicas. Alguns exemplos de aplicação da CFD são (VERSTEEG & MALALASEKERA, 1995):

- Motores a combustão interna e turbinas a gás;
- Aerodinâmica de aeronaves e veículos;
- Hidrodinâmica de navios;
- Engenharia elétrica e eletrônica: equipamentos de resfriamento incluindo microcircuitos;
- Engenharia de processos químicos: mistura, separação, escoamentos multifásicos e reações químicas;
- Engenharia naval: estruturas de plataformas marítimas;
- Escoamentos em rios, estuários e oceanos;
- Engenharia biomédica: fluxo sanguíneo através de artérias e veias.

Hao e Zhang, (2019) investigaram a quantidade de fluxo de ar com poeira na operação de painéis solares juntamente com uma análise CFD, onde o movimento das partículas foi considerado, principalmente, como fluxo totalmente turbulento tendo influência direta no desempenho do sistema. Os mecanismos de entrada de ar no processo de queda de material particulado são muito complexos. Por isso, é imperativo investigar as características da entrada de ar em um fluxo de partículas em queda livre e estabelecer os modelos teóricos necessários para formular a lógica do arrastamento de ar no processo de queda de materiais a granel em uma simulação CFD, obtendo assim, resultados coerentes.

Portanto, o desempenho de modelos matemáticos aliados a ferramentas CAE (*Computer Aided Engineering*) podem ser usados para prever o volume de entrada de ar nas partículas em queda livre em função das propriedades do material a granel, do manuseio da matéria, parâmetros do processo, como distribuição de tamanho de partículas, densidade de partículas, vazão mássica de material a granel e altura de queda de partículas, etc (HAO, 2019).

1.1. Justificativa

As questões relacionadas a geração de poeira, que contribui para a poluição do ar proveniente de operações de manuseio de materiais a granel, vêm recebendo grande atenção há muitos anos. A poluição do ar, causada pelas emissões de poeira, está sendo observada com maior atenção por órgãos industriais e legislativos à medida que é dada maior importância sobre esta questão no meio ambiente e na proteção do trabalho em nossa sociedade.

As Autoridades Ambientais e de Saúde Ocupacional em conjunto com as autoridades de segurança frequentemente pressionam as empresas no quesito de controle de poeira. As emissões de poeira podem causar vários problemas na indústria, como riscos de higiene ocupacional, poluição ambiental, aumento do risco de incêndio e explosão, problemas de perda de produto ou contaminação e manutenção de equipamentos.

Sendo assim, o constante desenvolvimento de métodos para o aprimoramento do controle de poeira em materiais particulados em queda se torna um ponto muito importante para a busca de soluções nas indústrias e conseqüentemente para a sociedade. Portanto um estudo do modelo computacional aqui abordado vem para somar nestes estudos, de forma a proporcionar um melhor entendimento do fenômeno de geração de poeira em queda livre e propor uma nova ferramenta para minimizar os impactos causados pela geração de material particulado suspenso ao ar.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo Geral

Propor um modelo computacional de CFD utilizando a ferramenta DDPM do modelo multifásico Euleriano do Ansys - Fluent para análise da quantidade de ar arrastado e poeira capturada durante a queda livre de material particulado.

1.2.2 Objetivos Específicos

- I. Analisar os métodos empíricos e computacionais existentes para cálculo das vazões de despoeiramento em sistemas que utilizam material granulado em queda livre.

- II. Realizar simulação via CFD utilizando a ferramenta DDPM do Ansys-Fluente de modelos computacionais com material particulado.
- III. Avaliar os resultados das simulações realizadas e comparar com os experimentos práticos e simulações da literatura para verificar a eficiência dos modelos aplicados.
- IV. Analisar a influência da altura de queda no perfil de velocidades e consequentemente na quantidade de ar arrastado.
- V. Quantificar o material granular suspenso (poeira) durante a queda de materiais granulares variando à altura de queda.

1.3 Estrutura do Trabalho

Este trabalho encontra-se dividido em 5 capítulos.

- I. O primeiro capítulo aborda a introdução, objetivos e justificativas do estudo.
- II. No capítulo 2, apresenta-se a revisão bibliográfica sobre os estudos relacionados a queda livre de material particulado, apresentando as suas principais propriedades e a física envolvida no estudo em questão, apresentando os principais modelos matemáticos relacionados à vazão de despoeiramento e suas validações experimentais, além de estudos realizados computacionalmente com materiais particulados dando embasamento teórico e prático para este estudo.
- III. O capítulo 3 demonstra o modelo computacional utilizado nas simulações deste trabalho, assim como seu equacionamento.
- IV. O capítulo 4 trata dos procedimentos experimentais com a modelagem matemática e o método numérico empregado com as etapas da simulação.
- V. O capítulo 5 apresenta os resultados obtidos com as simulações bem como suas discussões dos resultados obtidos por meio do modelo de simulação empregado, e da comparação com os resultados da literatura. O capítulo 6 aborda as conclusões do trabalho bem como sugestões para trabalhos futuros.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Fundamentos da emissão de poeira em queda livre

Os métodos comuns de transporte de materiais a granel, nos quais o material passa por um processo queda livre e impacto subsequente sobre uma superfície sólida ou sobre o material como em um processo de empilhamento são mostrados na Figura 2.1, formando uma camada limite entre as partículas e o ar induzido pelos ventos na coluna de material. O núcleo do fluxo, mesmo com os ventos, consegue se manter constante até a zona de impacto gerando poeira fugitiva e fazendo uma pilha de material na zona de impacto; porém, Liu (2003) destacou que a queda livre de material particulado pode ser definida como uma partícula sobre a atuação da força da gravidade constante sofrendo uma aceleração durante um curto período de tempo até atingir uma velocidade constante.

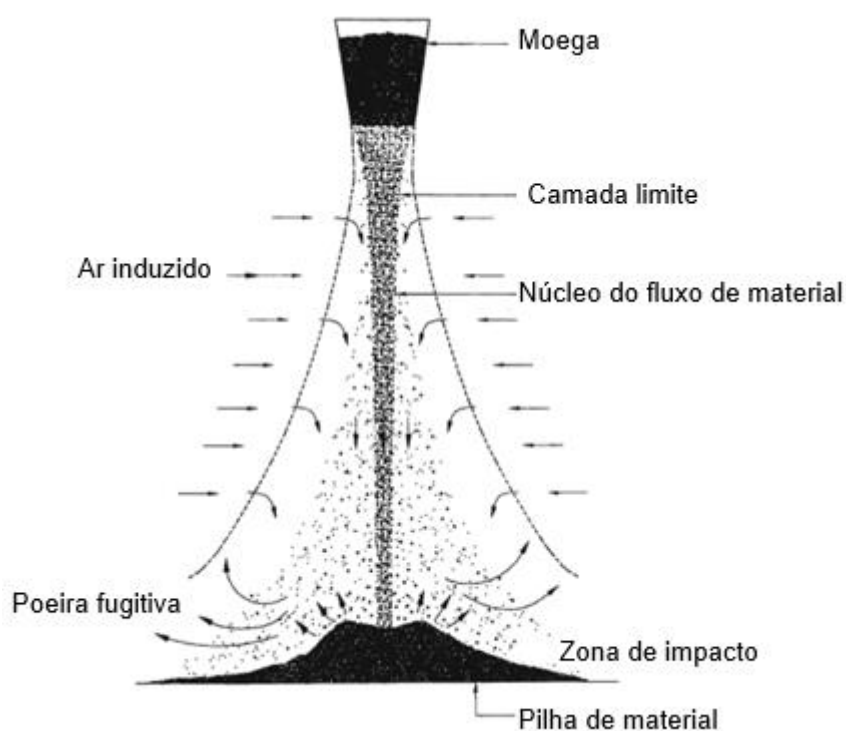


Figura 2.1 – Esquema de geração de poeira pela queda livre de partículas.

Fonte: Liu (2003).

Para Liu (2003), a dinâmica entre a corrente de partículas em queda envolve princípios básicos como a influência da ventilação natural do ambiente induzido ar na coluna de material influenciando assim nas partículas e na força

de arrasto gerada pela interação com estas partículas. Outro fator que frequentemente ocorre na queda livre de material são as colisões entre partículas devido aos formatos irregulares destas.

Brown e Schenelle (2002), propõe que as partículas compostas pelo fluxo de material particulado em queda são todas esféricas, com a força de arrasto atuando sobre estas para separar da coluna de material. O motivo desta separação das partículas da coluna de material, se deve ao fato de o ar induzido atuar com uma força maior ... que a soma da força gravitacional e a força de coesão dentro da coluna de material deixando as partículas finas em suspensão, conforme a Figura 2.2.

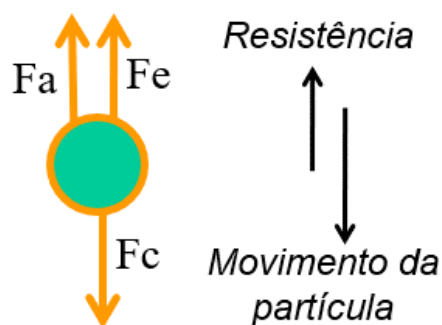


Figura 2.2 -Partícula em queda livre

Fonte: McCabe *et al.*, (1993)

Karamanev (1996), considerou duas forças principais que atuam em uma única partícula em queda livre, que são: a força de flutuabilidade e a força de arrasto. Essas forças existem sempre que ocorre movimento relativo entre o ar e as partículas. A força de arrasto é definida como a componente da força paralela à velocidade que o fluido em movimento exerce sobre a partícula. Esta força de arrasto é expressa em termos do coeficiente de arrasto C_d , da área projetada da partícula A_p e da velocidade relativa através da seguinte expressão 2.1 Karamanev (1966):

$$F_a = \frac{1}{2} \rho_f A_p C_d (V_r)^2 \quad [2.1]$$

Onde:

$$V_r = (V_f - V_p) \quad [2.2]$$

Para Karamanev (1996), o coeficiente de arrasto depende da condição do movimento, porém em seus cálculos Karamanev (1996), escolheu o regime turbulento, definindo o coeficiente de arrasto conforme Expressão 2.3:

$$c_d = \frac{1}{2} \frac{f_a}{\rho_f A_p v_r^2} \quad [2.3]$$

Onde:

d_p - Diâmetro da partícula, em micrometros;

ρ_a - Densidade do ar, em kg/m³;

ρ_p - Densidade da partícula, em kg/ m³;

v_i - Velocidade terminal, em m/s.

Na Figura 2.3 é apresentado a partícula com velocidade constante, onde a velocidade da partícula é igual a zero, ou seja, fazendo com que a velocidade relativa seja igual à do fluido.

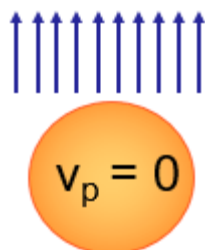


Figura 2.3 -Partícula com velocidade constante

Fonte: McCabe *et al.*, (1993)

Adotando o coeficiente de arrasto da equação 2.3, tendo como base o número de Arquimedes Ar e Modelo empírico de Karamanev (1996) para o cálculo da velocidade terminal de partículas esféricas sólidas e bolhas de gás, obtém-se uma relação simples, porém com elevado grau de incerteza. O que se pode obter é apenas uma razoável precisão de sua estimativa. O cálculo do coeficiente de arrasto com base no modelo empírico de Karamanev (1996), é obtido com o uso da Equação 2.4.

$$C_d = \frac{432}{A_r} \left(1 + 0.0470 A_r^{2/3} \right) + \frac{0.517}{1 + 154 A_r^{-1/3}} \quad [2.4]$$

Onde o número de Reynolds, Re , e de Arquimedes, A_r , são obtidos respectivamente pelas Equação 2.5 e 2.6 (MCCABE *et al.*, 2003):

$$Re^2 = \frac{4 A_r}{3 C_d} \quad [2.5]$$

$$A_r = \frac{d_p^{2/3}}{\mu^2} g \rho_f (\rho_p - \rho_f) \quad [2.6]$$

Wen e Yu (1966), buscando melhorar o entendimento da força de arrasto em um movimento de queda livre de material particulado, investigaram esta força agindo em um estado estacionário de uma partícula em suspensão e observaram a influência da porosidade neste fenômeno com o uso da Equação 2.7. A velocidade em estado estacionário está correlacionada com a força de arrasto de maneira a manter a partícula em repouso no processo de armazenamento na moega.

$$V_{hr} = v_t e_f^s \quad [2.7]$$

Onde:

v_{hr} - Velocidade no estado estacionário; em m/s

v_t -Velocidade terminal; em m/s.

e_f - Porosidade, sendo uma grandeza adimensional

s - Parâmetro empírico para limitação do número de Reynolds.

Beverloo *et al* (1961), definiu a taxa de fluxo mássico ou vazão mássica de uma tremonha cônica com o uso da Equação 2.8. A faixa de operação do parâmetro de diâmetro de saída da moega foi de 5 cm à 15cm e o diâmetro de partícula de 0,0093 cm à 0,03 cm. Então assim foram relatados valores para estas constantes empíricas C_{be} de 0,58 e k_b de 1,4 gerando a Equação 2.8.

$$\dot{m}_p = C_{be} \rho_b \sqrt{g} (d_0 - k_b d_p)^{2.5} \quad [2.8]$$

Onde:

d_0 -Diâmetro de saída do silo; em cm.

A partir da aplicação do balanço de massa e do uso da Equação 2.6 é possível a obtenção de uma expressão para a velocidade vertical média na saída de uma tremonha cônica como mostra a Equação 2.9, de Beverloo *et al* (1961). Entretanto, quando as partículas são muito finas o movimento do fluxo é diferente em comparação a partículas com granulometrias maiores. Este fenômeno ocorre, pois, a vazão a mássica de partículas finas é afetada significativamente pela resistência à pressão do ar. Isso faz com que as Equações 2.7 e 2.8 superestimem as vazões mássicas para materiais muito finos.

$$v_0 = \frac{4}{\pi d_0} C_{be} \sqrt{g} (d_0 - k_b d_p)^{2,5} \quad [2.9]$$

2.2 Propriedades dos materiais particulados

Com a finalidade de abordar os parâmetros básicos para o equacionamento de material particulado em queda livre e assim conseguir abordar adequadamente os métodos numéricos para o presente estudo, torna-se necessário definir vários destes parâmetros tais como: Forma e dimensão da partícula, esfericidade, densidade da partícula, porosidade, velocidade do fluido e do sólido, número de Reynolds, força de arrasto e etc.

Muitos trabalhos vêm apresentando dificuldades inerentes as formas e as dimensões das partículas, pois é necessário a utilização de equipamentos muito sofisticados. Assim McCabe *et al.*, (1993) definiram um fator de esfericidade para uma partícula irregular conforme Equação 2.10; McCabe *et al.*, (1993):

$$\Psi = \frac{\text{área superficial de uma esfera de igual volume de partícula}}{\text{área superficial da partícula}} \quad 0 < \Psi \leq 1 \quad [2.10]$$

A compreensão do comportamento das propriedades e dos fenômenos físicos envolvidos durante a queda livre de materiais particulados é muito importante para o projeto de sistema de despoeiramento. Com a finalidade de abordar os parâmetros básicos para o equacionamento de material particulado em queda livre e assim demonstrar adequadamente os métodos empíricos para a previsão da vazão de despoeiramento, é necessário a definição de algumas propriedades relacionada a esses materiais. Dentre essas propriedades tem se o volume de uma esfera; concentração de partículas; diâmetro equivalente; esfericidade; volume de uma partícula; área projetada de uma partícula; densidade da partícula; densidade aparente do sólido; densidade do fluido e fração de vazios.

Yang (2003), considera a dificuldade de se obter a medição do diâmetro de partículas não esféricas, por isso se torna mais conveniente definir o diâmetro equivalente D_{eq} e o diâmetro médio da partícula d_p . Através da Equação 2.11 é possível estimar o diâmetro equivalente da partícula (D_{eq}) a partir do diâmetro médio d_p para as classificações dos níveis de material particulado no ar e encorpado em legislações específicas de agências ambientais. O conceito do diâmetro equivalente é também utilizado em instrumentos de medição como o contador de partículas.

$$D_{eq} = \Psi d_p \quad (m) \quad [2.11]$$

De acordo com a ISO 08573 (2010), dado uma massa de partículas m , de densidade ρ_s e volume v_p , o numero total de partículas N pode ser calculado conforme a Equação 2.12. A utilização dessa variável para o estudo de materiais particulado surge da necessidade para conversão em concentração de partículas durante o tratamento de dados, uma vez que, o contador de partículas modelo CPT-100 utilizado durante os ensaios mede o número de partículas, mas o Ministério do Meio Ambiente adotou padrões da qualidade do ar com unidades em concentração de partículas.

$$N = \frac{\text{massa total}}{\text{massa de cada partícula}} \quad [2.12]$$

Fayed e Otten (1997), consideraram que um outro parâmetro básico que aparece com bastante frequência é a relação entre m_p e v_p , que são a massa e o volume de uma partícula isolada, excluindo-se a quantidade de vazios do material, como apresentado pela Equação 2.13. A densidade real, tem sido considerada parâmetro de entrada para o cálculo da vazão de despoeiramento.

$$\rho_p = \frac{m_p}{\text{volume total do sólido}} \quad [2.13]$$

Onde:

$$\begin{array}{l} m_p - \text{g} \\ \text{volume total do sólido} - \text{cm}^3 \end{array}$$

Green e Perry (2007), também definiram o conceito de densidade do material granulado, que em um sistema de volume v_p é chamado de massa específica aparente, ρ_p , sem considerar a fração de vazios, expressa pela Equação 2.14:

$$\rho_p = \frac{m_p}{v_p} \quad [2.14]$$

Mccabe *et al* (2005), estabeleceu a densidade aparente do material como massa total das partículas pelo volume que está massa total de partícula ocupa, conforme a Expressão 2.15:

$$\rho_{ap} = \frac{m_p}{\text{Volume total}} \left(\frac{\text{g}}{\text{cm}^3} \right) \quad [2.15]$$

Em qualquer transporte pneumático seja em fase densa ou diluída o parâmetro porosidade ε ou fração de vazios tem uma grande importância para entender o fenômeno de escoamento da mistura gás-sólido. Os métodos empíricos de Sun *et al*, (2019) e (2020) incorporaram a constante de vazios expressa pela Expressão 2.16:

$$\varepsilon = \frac{v - v_s}{v} = 1 - \frac{v_s}{v} = 1 - \frac{\rho_{ap}}{\rho_s} \quad [2.16]$$

Knowton (1997) mostra como é importante em qualquer segmento do transporte pneumático conhecer o equacionamento da velocidade do fluído, partindo do princípio no qual ocorre deslocamento com velocidades diferentes tanto do sólido como do fluído, no entanto ocorre mudança nesse fenômeno quando está se trabalhando com partículas muito finas, fazendo assim uma aproximação na qual as duas velocidades são iguais e surgindo assim a velocidade do fluído sem a presença dos sólidos ou velocidade superficial, expressa pela Expressão 2.17:

$$U_0 = \frac{\text{Vazão volumétrica do gás}}{\text{Área de secção do tubo}} = \frac{Q_g}{A} \quad [2.17]$$

A Expressão 2.17 se deriva da equação da continuidade para um escoamento unidimensional em regime permanente com uma velocidade média local em fase diluída U_g , composta pela seguinte equação 3.6 abaixo:

$$U_g = \frac{U_0}{\varepsilon} \quad [2.18]$$

Klinzing (1981) explica que diferente da velocidade da partícula sem a presença de sólidos, a Expressão 2.19 pode ser obtida a partir do balanço das forças, para a velocidade do sólido ou velocidade terminal, sendo representada pelo movimento de queda de uma partícula sólida em um fluído em repouso até atingir uma velocidade uniforme com uma aceleração nula (KLINZING, 1981):

$$U_t = \sqrt{\frac{4(\rho_p - \rho_f)gd_p}{3\rho_f C_D}} \quad [2.19]$$

Onde:

C_d – Coeficiente de atrito.

ρ_p – Massa específica.

d_p – Diâmetro da partícula.

ρ_f – Densidade do fluido.

g – Aceleração da gravidade.

Com o passar dos anos foi possível observar que a expressão 2.19, precisava de um fator *que* para a análise do escoamento, no qual o fluido estava sujeito, pois nem sempre o número de Reynolds da partícula era conhecido, então Klinzling (1981) expressou este fator pela seguinte expressão 2.20:

$$k = d_p \left[\frac{g \rho_f (\rho_s - \rho_f)}{\mu^2} \right]^{\frac{1}{3}} \quad [2.20]$$

Porém Klinzling (1981) resolveu ainda classificar o fator que em três zonas de regime de escoamento e assim surgiu três formas diferentes para calcular a velocidade terminal conforme será mostrado através da tabela abaixo:

Tabela 2.1 – Classificação de Klinzling (1981)

$k < 3,3$	$U_t = \frac{g d_p^2 (\rho_s - \rho_f)}{18 \mu}$	Escoamento Laminar
$3,3 < k < 43,6$	$U_t = \frac{0,153 g^{0,71} d_p^{1,14} (\rho_s - \rho_f)^{0,71}}{\rho_f^{0,29} \mu^{0,43}}$	Zona de transição
$43,6 < k < 2360$	$U_t = 1,74 \sqrt{\frac{(\rho_s - \rho_f) g d_p}{\rho_f}}$	Escoamento turbulento

2.3 Pesquisas anteriores sobre arrasto de ar em materiais particulados em queda livre.

O primeiro grande trabalho publicado para calcular a entrada de ar em um fluxo de material granular em queda livre foi realizado por Hemeon (1963) que

foi um dos primeiros pesquisadores nessa área, na qual desenvolveu um método para prever a quantidade de ar induzido com base na teoria relativa a uma única partícula caindo através do ar inativo sob a influência da gravidade. O fluxo considera que partículas em queda se deslocam do repouso para condições de fluxo turbulentas. Hemeon(1963) apontou que o trabalho realizado no ar por um fluxo de partículas em queda é a soma das forças de atrito produzidas por uma única partícula em queda livre. De acordo com essas premissas Hemeon(1963) propôs um modelo para a previsão da vazão de ar que é induzido no fluxo de partícula em queda livre, porém seu modelo matemático nos dias atuais é considerado muito conservador, por isso Wypych e Cooper (2005) resolveram aprimorar este modelo, considerando não mais a partícula em seu formato ideal, mas sim em formato de gota. Dado pela expressão 2.21:

$$Q_{ind} = \left(\frac{0,66 \text{ g } \dot{m} (H A)^2}{\rho_p d_p} \right)^{\frac{1}{3}} \quad [2.21]$$

Onde:

\dot{m}_p – Vazão Mássica .

H – Altura de queda.

A – Área da seção transversal da coluna de material .

ρ_p – Densidade da partícula.

d_p – Diâmetro da partícula.

O aparato experimental de Wypych e Cooper (2005), é mostrado na Figura 2.13 e consistia em duas plataformas. Nesse experimento o material é armazenado em uma moega com alimentação dupla, sendo montado em uma estrutura na qual poderia ser elevada ou abaixada, para garantir o fluxo de material constante durante cada ensaio. O registro de cada vazão mássica por ensaio é feito através de três células de cargas suspensas por cabos. A descarga do material passa por um furo, para ocorrer o choque com uma plataforma centralizada, formando assim uma pequena pilha de material.

Ainda de acordo com trabalho de Wypych e Cooper (2005), o ar é extraído do reservatório mostrado na Figura 2.4, utilizando o sistema de ventilação industrial, conseguindo assim manter a pressão do ar dentro do reservatório a mesma do ambiente. Além disso, o reservatório continha um observatório de pressão, entre o espaço da plataforma e parte externa permitindo assim, por meio da fumaça observar se o sistema de ventilação tinha conseguido extrair toda a poeira do ambiente. O granulado escolhido para se realizar os ensaios, foi a alumina, na qual produz um pó robusto e inerte, com granulometria média de $96 \mu\text{m}$, densidade de partículas igual à 2465 kg/m^3 , densidade aparente solta no valor de 1010 kg/m^3

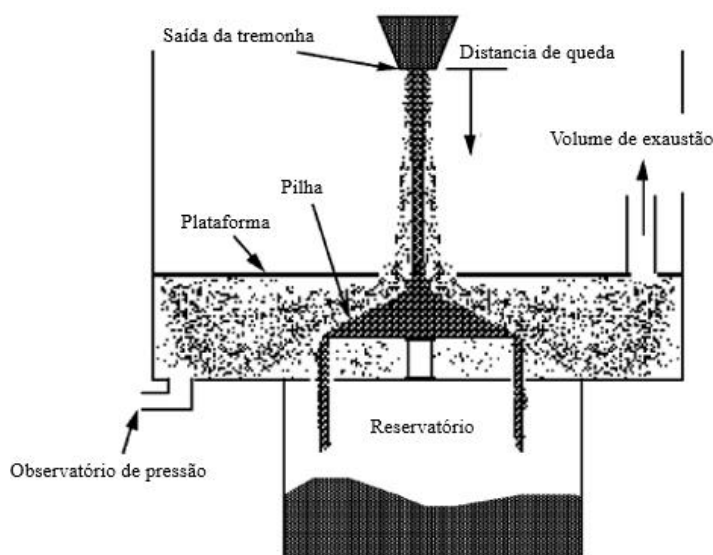


Figura 2.4 - Aparato experimental Wypych e Cooper (2005).

Fonte: Wypych e Cooper (2005).

Mais pesquisas com deslocamento de ar com materiais em queda livre foram realizadas por Plinke (1991), que realizou experimentos usando partículas, incluindo cimento e areia. Essas experiências confirmaram que a quantidade de ar arrastado aumenta conforme a altura de queda também aumenta, o que é de acordo com o trabalho de Hemeon, (1963).

Hemeon, (1963) afirmou então que a energia exercida pelas partículas no ar circundante aparece como movimento e calor do ar. Ele assumiu que a energia transformada em calor é insignificante e todo o movimento do ar resultante é totalmente linear (SHANTY, 1963; HEMEON, 1963). Tooker (1992)

estendeu as pesquisas de Hemeon, (1963) para investigar a geração de poeira fugitiva de materiais a granel fechados em operações de manipulação e transferência onde o movimento das partículas foi considerado principalmente como um fluxo totalmente turbulento. Ele baseou suas teorias no trabalho anteriormente publicado pela Hemeon, (1963) e introduziu novos conceitos para prever a entrada de ar em operações de manuseio de materiais. Tooker, (1992) afirmou que a pressão total na equação de potência de Hemeon, (1963) foi a soma da pressão da velocidade e da pressão de resistência do sistema, conforme Expressão 2.22:

$$P_t = P_v + P_s \quad [2.22]$$

Para Cooper e Arnold (1995) o modelo apresentado por Hemeon apresentava algumas desvantagens para a modelagem do processo de arraste de ar, como foi listado abaixo:

- Uma corrente contínua de material não apresenta o mesmo comportamento que as partículas individuais caindo sozinhas, pois as partículas de ar atingirão velocidades muito mais altas do que se agir individualmente no ambiente. Como as ondas turbulentas dos sistemas de exaustão entre o material particulado aumentarão, ocasionaram um aumento nos níveis de turbulência e influenciaram o movimento das próximas partículas.

- A maioria dos materiais a granel tem diferentes tamanhos de partículas, no entanto um único diâmetro de partícula deve ser escolhido na equação.

- Não há como determinar a área gerada pela coluna de fluxo de material, sem que o processo já esteja em vigor ou seja observável.

Com estas desvantagens apresentadas acima Cooper e Arnold (1995) elaboraram a possibilidade de se adotar que o fluxo de queda seria uma aglomeração de partículas, com isso o comportamento do fluxo poderia se basear em dois extremos: O primeiro extremo seria onde o fluxo é composto de partículas extremamente massivas que caem verticalmente sob a influência da gravidade apresentado na figura 2.5, já o segundo com o fluxo composto de partículas extremamente finas sem coesão que caem em uma pluma, sendo

análogo ao modo em que uma fumaça de ar quente flutuante sob em uma chaminé, conforme a figura 2.6.

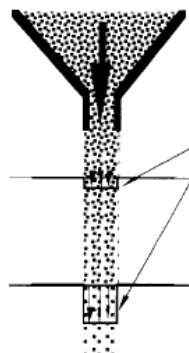


Figura 2.5 - Partículas grandes caindo verticalmente sob forças gravitacionais.

Fonte: Cooper e Arnold (1995).

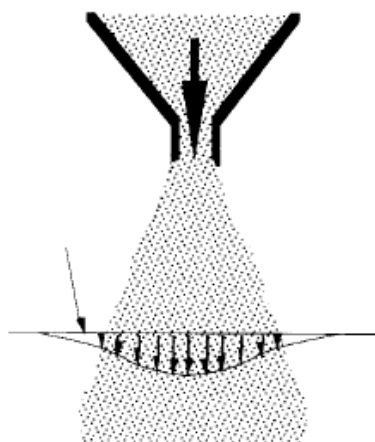


Figura 2.6 - Partículas muito finas agindo como fumaça.

Fonte: Cooper e Arnold (1995).

A situação 2 foi escolhida por Cooper e Arnold (1995), pois o fluxo de material pode ser considerado constante além da possibilidade de adotar uma tremonha com pouca força de arrasto atuando na maioria das partículas, juntamente com uma aceleração igual a constante gravitacional. Assumindo-se que o momento de ar induzido é desprezível em comparação com o das partículas sólidas dentro do ambiente e que a velocidade de deslizamento de ar com as partículas é muito pequena, com isso o ar induzido pode ser calculado pelo princípio de conservação do volume conforme a expressão:

$$Q_{ent} = \left((V_0^2 + 2gh)^{\frac{1}{2}} - V_0 \right) A_0 [m^3/s] \quad [2.23]$$

Onde:

V_0 – Velocidade de escoamento do material a granel.

A_0 – Área da saída da tremonha

O arrastamento teórico proposto por Cooper e Arnold (1995) considera um fluxo decrescente de material, levando em conta que a área de saída de tremonha é a mesma área da coluna de material gerada pelo fluxo e a poeira gerada é diretamente proporcional à altura de queda e a boca da saída do silo. O processo de ar induzido para queda de materiais granulares pode ser representado por um modelo simples de pluma analítica, pela seguinte expressão 2.24:

$$Q_a = C_{pl} B^{\frac{1}{3}} H^{\frac{5}{3}} \quad [m^3/s] \quad [2.24]$$

Onde:

C_{pl} – Constante dependendo do tipo de pluma.

H – Altura de queda.

$B = V_0 g$, Sendo B uma constante.

V_0 – Velocidade inicial de fluxo de material.

G' – Gravidade corrigida para a pluma, representado por $g' = \frac{\rho_l - \rho_{plume}}{\rho_0} g$

ρ_l – Densidade do ambiente.

Como a diferença da densidade das partículas do material em relação ao ar ambiente é muito grande, Cooper e Arnold (1995) desenvolveram para a equação $\frac{\rho_l - \rho_{plume}}{\rho_0}$, a sugestão de no caso utilizar uma pluma de um sólido a granel a variável fluxo de flutuação conforme expressão 2.25:

$$B = g \frac{\dot{m}_p}{p_b} \quad [2.25]$$

Com todas essas suposições podemos enfim obter a teoria de um novo tipo de pluma obtida por Cooper e Arnold (1995) conforme expressão 2.26:

$$Q_a = C_{pl} \left(g \frac{\dot{m}_p}{p_b} \right)^{\frac{1}{3}} z^{5/3} \quad [m^3/s] \quad 2.26]$$

Cooper e Arnold (1995) atentaram para a igualdade dos modelos de Hemeon (1963), modelo massivo de partículas e modelo de plumas. Estes parâmetros seriam a quantidade de ar arrastado para um fluxo constante de material aumentando juntamente com a altura de queda, o aumento da vazão mássica total de material, a diminuição da interação de cada partícula com o ambiente e a diminuição do ar induzido. A formulação assumida do ar exaurida, por unidade de vazão mássica de material (Q_{ent}) se relacionando com a altura de queda (h) e a massa de material, através da expressão 2.27:

$$Q_{ent}/\dot{m} \cong k(\dot{m})^m \times h^n \quad [m^3/s] \quad [2.27]$$

m, k, n – Constantes definidas empiricamente.

Realizando experimentos em seus aparatos experimentais Cooper e Arnold (1995) conseguiram encontrar valores eficazes para as variáveis empíricas para cada tipo de modelo citado acima, porém o modelo de plumas se tornou tão útil de acordo com Cooper e Arnold (1995) podendo ser utilizado com uma ferramenta de previsão da vazão de despoejamento. A equação 2.27 utilizada juntamente com uma constante de arrastamento de 0,031 foi adotada, com isso podia-se obter valores satisfatórias.

O trabalho experimental elaborado por Cooper e Arnold (1995) obteve uma previsão de ar induzido, utilizando a equação (2.26) para cada conjunto de situações, para h e m em relação a valores de L/kg, apresentando as seguintes vantagens:

- Melhor facilidade de cobrir situações industriais de maior escala.
- Com calibração adequada o modelo pode ser usado como ferramenta de projeto

Com base no estudo dos modelos clássicos citados acima, Cooper e Arnold (1995) criaram uma correlação de constantes empíricas para os três modelos citados acima como podemos ver através da tabela 2, através das constantes definidas empiricamente (m e n) com a finalidade de assim tornar mais eficaz o seu modelo empírico utilizando os modelos clássicos disponíveis na literatura, tentando assim conciliar os resultados experimentais com o teórico.

Tabela 2.2 – Modelos de ar induzido

Modelo	Expoentes	
	m	n
Hemeon	-0,67	0,67
Massivo de partículas	-1	0,5
Pluma	-0,67	1,67
Dados experimentais	-0,65	1,8

Fonte: Cooper e Arnold (1995)

Ullmann (1998), de modo a resolver o problema de geração de poeira durante o transporte de sólidos granulares e manuseio observou a necessidade da instalação de um exaustor na primeira correia transportadora e na correia receptora, eliminando assim três zonas sensíveis. O primeiro exaustor está localizado na zona 1, o segundo exaustor está localizado na zona 3, como demonstrado pela Figura 2.7, sendo: 1- momento em que o material é descarregado na correia, 2- o momento de queda livre do material entre as correias e 3- impacto na correia receptora.

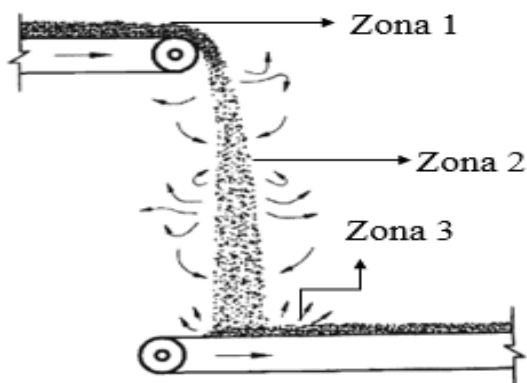


Figura 2.7 - Zonas sensíveis em correias transportadoras

Fonte: Liu, (2003)

Para Ullman (1998) a equação de balanço de energia é a forma de avaliar o ar induzido que é o principal componente do volume de exaustão, pois quando as partículas caem na superfície a energia potencial é convertida em calor devido a dissipação ficcional da energia mecânica e a energia cinética das partículas juntamente com o ar induzido. Este fenômeno é representado pela seguinte equação, sendo considerado uma energia cinética inicial das partículas desprezível, conforme expressão 2.28.

$$\dot{M}_p gH = \dot{M}_p \frac{U_{pd}^2}{2} + M_a \frac{U_{af}^2}{2} + W_f \quad [2.28]$$

Onde:

\dot{M}_p – Vazão mássica de partículas

\dot{M}_a – Vazão mássica de ar

H – Altura de queda de partículas .

W_f – Dissipação ficcional da energia mecânica (Atrito gerado pela parede).

U_{pd} – Velocidade média das partículas.

U_{af} – Velocidade média do ar.

Para a equação acima ser resolvida precisamos de mais uma equação pois U_{pd} e U_{af} são incógnitas. Os outros parâmetros como o termo de vazão

mássica do ar (\dot{M}_a) não são incógnitas e dependem de fluxo de massa do ar, conforme expressão 2.28:

$$\dot{M}_a = Q_a \rho_a = U_a A \varepsilon \rho_a \quad [2.29]$$

A – área da seção transversal da coluna de material.

ρ_a – Densidade do ar.

ε – fração de vazios

Ullmann, (1998) fez considerações para o cálculo da velocidade das partículas para o efeito do fluxo de ar induzido, são eles:

- (1) Todas as partículas são esféricas;
- (2) A fração de vazios é constante e a maior parte do volume é todo ocupado por ar;
- (3) As partículas não interagem com as outras partículas;
- (4) Os efeitos da velocidade do ar podem ser representados por uma velocidade média com vários perfis de velocidade planas, sendo essa velocidade média constante; $U_a = U_{at}$ (Velocidade do ar igual a velocidade de arrasto de ar) e
- (5) Partículas são tratadas como grupos únicos.

Estas partículas aceleram praticamente desde a velocidade vertical até uma velocidade terminal finita sob a influência da gravidade em conjunto com a força de arrasto, a ausência da circulação excessiva de ar vem pelo fato de o ar induzido ter uma velocidade menor do que as partículas para este método.

Com isso o volume total de exaustão segundo Ullmann (1998) se constitui da soma do ar induzido e um volume adicional necessário para evitar a fuga de ar carregado de partículas através de buracos e aberturas. Este sistema é constituído por duas correias transportadoras, constituídas de áreas livres abertas para a infiltração de ar ao redor das correias, indicados pela figura 2.8 como: A1 e A2. Outras coberturas e rachaduras em chutes bem projetados são insignificantes.

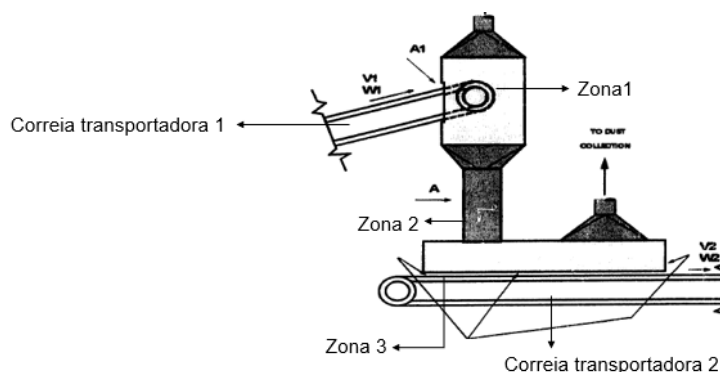


Figura 2.8 - Aparato experimental de Ullmann.

Fonte: Ullmann (1998)

Normalmente em projetos de exaustão é costume fornecer excesso de volume de ar para que o fluido seja sugado para dentro do gabinete em todas as fissuras e aberturas, geralmente recomenda-se uma velocidade de captura para evitar a fuga das partículas na abertura, variando entre 150 a 200 fpm (0.76 m/s – 1m/s) segundo o Industrial Ventilation America Manual (ACGIH, 2007).

Na segunda correia transportadora, há um fluxo forte de ar para dentro causado pelo movimento de ar induzido, sendo esse fluxo muito acima da velocidade de captura, por isso fornece a sucção de ar adicional para esse local seria redundante. No entanto na entrada da correia está sendo descarregado partículas para fora e com isso tende a arrastar o ar para fora do aparato experimental, por isso a sucção de ar deste fluído deve superar esse arrastamento.

Outra velocidade recomendada em qualquer projeto é a velocidade de admissão de ar V_2 devendo coincidir com a velocidade de captura, portanto a vazão volumétrica total do volume de exaustão é dada pela expressão 2.30:

$$Q_{EV} = A_2 V_2 \cong U_a A \varepsilon + A_2 V_2 \quad [2.30]$$

Enquanto Ogata (2001), limitou o método para o cálculo do ar arrastado utilizando o número de Reynolds inferior a 500, Hemeon (1963) atuou nos seus cálculos com o regime de escoamento na zona turbulenta, ou seja, número de Reynolds superior a 2400. O fato de se utilizar o número de Reynolds inferior a 500, é tornar o seu método mais restrito, pois ele acaba atendendo a um problema isolado da emissão de poeira.

O princípio de pilhagem de material, consiste em abastecer uma moega com uma grande quantidade de material para depois estocar esse material, foi feito por Ogata (2001), através da bancada de teste experimental apresentado na Figura 2.9, que possuía as características a seguir: diâmetro interno do reservatório é de 490 mm, a altura de queda do material é de 1000 mm e o ângulo de do silo é de 60°

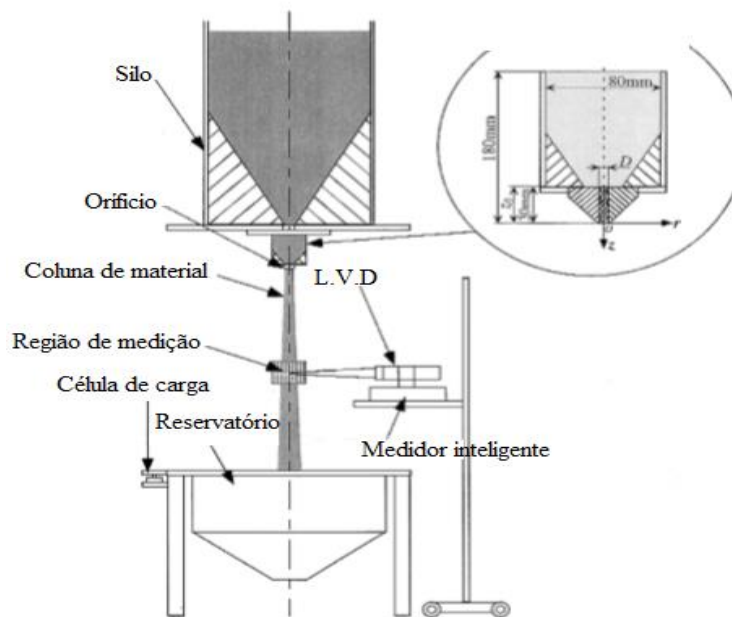


Figura 2.9 - Aparato experimental de Ogata.

Fonte: Ogata (2001)

Após vários ensaios a partir da sua bancada de teste, Ogata (2001), conseguiu estimar a quantidade de ar induzido gerado pela queda livre de material e assim calcular a vazão de despoejamento necessária para exaurir toda a poeira gerada pelo processo. O autor usou partículas esféricas de vidro em seus experimentos com diâmetro d_p igual a $454\mu m$ e densidade de material, ρ_b , igual a 2590 kg/m^3 . A vazão de despoejamento de acordo com o modelo de Ogata (2001) é mostrado na Equação 2.31.

$$Q_{ind} = \sqrt[3]{\frac{0,147\text{ m h}^{1,7} A^2}{\rho_p d_p^{1,6}}} \quad [2.31]$$

Ullmann (1998), analisou duas correias transportadoras em chutes de transferências, no aspecto da geração de poeira submetendo duas coifas localizadas na primeira correia transportadora e outra na segunda correias transportadora; com base nessa mesma idéia, Xiaochuan (2015) investigou a geração de poeira em um ambiente semiaberto conforme a Figura 2.10. Agora com duas correias receptoras em um ambiente semiaberto, com a primeira região com o ar empurrando a poeira gerada na cabeça da polia, a região 2 seria as partículas finas que se soltam durante a queda e a região 3 o choque do material com a correia receptora. Xiaochuan (2015) projetou um sistema de despoeiramento capaz de exaurir toda poeira gerada na região 1 + região 2 e região 3.

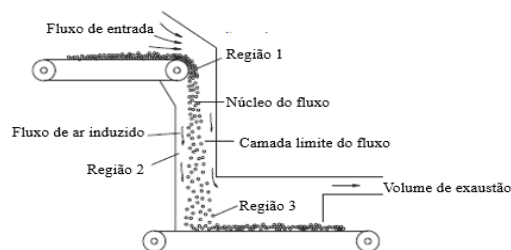


Figura 2.10 - Princípio do conceito de Xiaochuan.

Fonte: Xiaochuan *et al* (2015).

Wang (2012) definiu o estudo de dimensão como um método que garante a precisão dos parâmetros adimensionais do experimento físico baseando-se no princípio homogêneo dimensional. Partindo da ideia de que o fluxo de ar induzido percorre um comprimento de tubo de supressão de Diâmetro D a uma certa velocidade, próximo dos materiais em queda e também que a velocidade do fluxo de ar é igual à do material U_g . A outra ideia partiria de a possibilidade das partículas não interferirem umas nas outras, com isso a equação diferencial do movimento do fluxo de ar no tubo de supressão é dada pela expressão 2.32 (XIAOCHUAN *et al.*, 2015)

$$\rho_g \frac{\pi D^2}{4} u_g \frac{du_g}{dt} = C_d \frac{1}{2} \rho_g (u_g - u_p)^2 \frac{1}{4} \pi d_p^2 \left(\frac{\dot{m}_p}{\rho_p \pi \frac{d_p^3}{6}} \right) \quad [2.32]$$

$\frac{\pi D^2}{4}$ – área de secção.

$\left(\frac{M_p}{\rho_p \pi \frac{d_p^3}{6}} \right)$ – Numero de partículas em queda.

C_d – coeficiente de arrasto.

D_p – Diametro da partícula.

ρ_p – densidade da partícula.

ρ_g – densidade do ar.

U_g – velocidade do ar.

U_p – velocidade da partícula

De acordo Ferreira *et al.*, (2007) existe um coeficiente de arraste que para uma ampla gama de número de Reynolds. A primeira escala de Reynolds utilizada foi a de: $0 < Re < 10^5$. Dado pela expressão 2.33.

$$C_d = \frac{24}{Re_g} \left(1 + \frac{1}{48} Re_g \right) \quad [2.33]$$

Para processos de queda livre o coeficiente de arrasto será dividido em três regiões: A região inicial era para pequenos números de Reynolds ($Re_g < 1$), onde a força de atrito do material provocada prioritariamente pela viscosidade do fluído, é a influência fundamental no coeficiente de arrasto das partículas. De acordo com Ferreira *et al.* (2007), Stokes desenvolveu uma expressão analítica para o coeficiente de arrasto. Dado pela expressão 2.34.

$$C_d = \frac{24}{Re_g} \quad [2.34]$$

A segunda região é para grandes números de Reynolds ($Re_g > 1000$), neste intervalo o efeito da viscosidade na velocidade da partícula é menor. A força de resistência do corpo com a separação da camada limite das partículas, é o principal fator no coeficiente de arrasto de partículas, sendo expresso pela expressão 2.35 (XIAOCHUAN *et al.*, 2015):

$$C_d = 0,44 \quad [2.35]$$

A região do meio desses dois intervalos, isto é $1 < Re_g < 1000$, nesta região duas forças influenciam o coeficiente de arrasto que são: as forças de resistência e a força de atrito. Com o Re_g , a força de atrito do material na velocidade de queda diminui pouco a pouco juntamente com a força de resistência, Ferreira *et al.*, (2007) coeficiente de arrasto pode ser expresso conforme expressão 2.36:

$$C_d = \frac{24}{Re_g} \left[1 + 0.15(Re_g)^{0.687} \right] \quad [2.36]$$

As equações 2.32 e 2.36 só podem ser utilizadas se for levado em consideração o fato de que todas as partículas são esféricas e únicas, embora nos processos de queda livre as aparências das partículas sejam anômalas e sua constituição sejam de várias partículas individuais (XIAOCHUAN *et al.*, 2015).

Materiais em que os grãos são afetados pela irregularidade das partículas, pelo impacto e contato das partículas entre si, conseqüentemente não é conveniente utilizar as equações 2.32 e 2.36 para calcular o estado do movimento das partículas (XIACHUAN *et al.*, 2015).

O movimento de queda de material particulado, é expresso pela equação de balanço de energia mostrando a transformação de energia entre a energia potencial das partículas em queda, o fluxo de ar induzido, a energia cinética de ambas as partículas e o calor devido a dissipação da energia mecânica no fundo

do tubo de supressão (XIAOCHUAN *et al*, 2015). A equação desse fenômeno é dada pela expressão 2.37:

$$m_p g h = m_p \frac{U_p^2}{2} + \rho_g \frac{\pi D^2}{4} U_g \frac{U_g^2}{2} + w_f \quad [2.37]$$

Sendo o termo w_f (*dissipação de atrito de energia mecânica*), sendo associado com o coeficiente de resistência total ξ do exaustor e expresso pela formulação 2.38:

$$w_f = \frac{\xi \rho_g u_g^2}{2} \quad [2.38]$$

Com as equações 2.32 e 2.37 podemos obter as principais variáveis que envolvem os fenômenos físicos do ar induzido são: $\rho_p, \rho_g, t, u_p, u_g, g, d_p, m_p, h, D$ e μ . Podendo ser excluída as variáveis t e u_p com as variáveis restantes podemos mostrar a expressão 2.39 (XIAOCHUAN *et al*, 2015):

$$f(\rho_g, u_g, g, d_p, m_p, \rho_p, h, D, \mu) = 0 \quad [2.39]$$

As dimensões básicas para esta função são: [L], [M] e [T] em todas as variáveis correspondentes, no entanto algumas variáveis como p_g, h e μ cuja as dimensões são $[ML^{-3}]$, [L], $[ML^{-1}T^{-1}]$ são selecionadas como variáveis de repetições (XIAOCHUAN *et al*, 2015).

Com isso, as variáveis restantes podem ser escolhidas como parâmetros π pelas variáveis repetidas p_g, h e μ . Em termos da velocidade do fluxo de ar induzido $u_g = \pi_1(\rho_g^a + h^b + \mu^c)$ cada uma das variáveis em relação a unidade ficaria com o seguinte formato: $[LT^{-1}] = [M^{(a+c)}L^{(-3a+b-c)}T^{(-c)}]$. A resolução da expressão começa equacionando-se os expoentes para cada uma das dimensões básicas, obtendo os seguintes expoentes: $a=-1$; $b=-1$ e $c=1$ de forma a que ele produza:

$$\pi_1 = u_g \rho_g h \mu^{-1};$$

$$\pi_2 = \rho_g^2 h^3 g \mu^{-2};$$

$$\pi_3 = d_p h^{-1};$$

$$\pi_4 = m_p h^{-1};$$

$$\pi_5 = \rho_p \rho_g^{-1}$$

$$\pi_6 = Dh^{-1}$$

A combinação de todas as equações sem dimensões acima é feita para se obter parâmetros como:

$$\frac{u_g \rho_g D}{\mu} - \text{Numero de Reynolds do Tubo} \quad [2.40]$$

$$\frac{m_p}{\mu D} - \text{Numero de fluxo de massa} \quad [2.41]$$

$$\rho_p \left(\frac{u_g D^2}{m_p} \right) - \text{Numero de fluxo de ar induzido;} \quad [2.42]$$

$$\frac{h}{d} - \text{Altura de queda} \quad [2.43]$$

$$\frac{m_p}{\left[\rho_p^{2(gh)^{\frac{1}{2}}} \right]} - \text{Numero de fluxo granular;} \quad [2.44]$$

Cada uma das expressões acima representa uma das características do fenômeno, por exemplo: O número de Reynolds do fluxo da tubulação indica as características de fluxo do fluxo de ar induzido no tubo de supressão, o número de fluxo de massa indica as características do fluxo de massa da fase de

partículas, o número de fluxo de ar induzido específico indica as características de fluxo do fluxo de ar induzido pelo qual é induzido pelo fluxo unitário de materiais em queda, a altura de queda indica as características da altura de queda das partículas e o número de fluxo granular indica as características de fluxo da fase das partículas (XIAOCHUAN *et al*, 2015)

O fluxo de ar induzido basicamente está correlacionado com o número de Reynolds e o número de fluxo granular, pois estes dois parâmetros contêm todas as variáveis válidas e relativas ao fenômeno de ar induzido (XIAOCHUAN *et al*, 2015)

Outros fatores adimensionais, como $\frac{m_p}{m_d}$, $\frac{\rho_p(u_g D^2)}{m_p}$ e $\frac{H}{d}$ são variáveis únicas de cada situação, com isso podemos definir a seguinte expressão 2.45:

$$f(\text{Re}, \text{Mass}) = 0 \quad [2.45]$$

Satisfazendo a teoria da similitude, da similaridade geométrica, similaridade dinâmica e cinemática entre os experimentos podem-se prever o fluxo de ar induzido da bancada a ser montada (XIAOCHUAN *et al*, 2015).

Em experiências práticas alguns fatores mudam de forma síncrona, no ar induzido os parâmetros que constituem esses fenômenos são adimensionais a regra da mudança do fluxo de ar induzido pela mudança de apenas um processo seria usado para a condição que tem dois ou mais modelos alterados de forma síncrona (XIAOCHUAN *et al*, 2015).

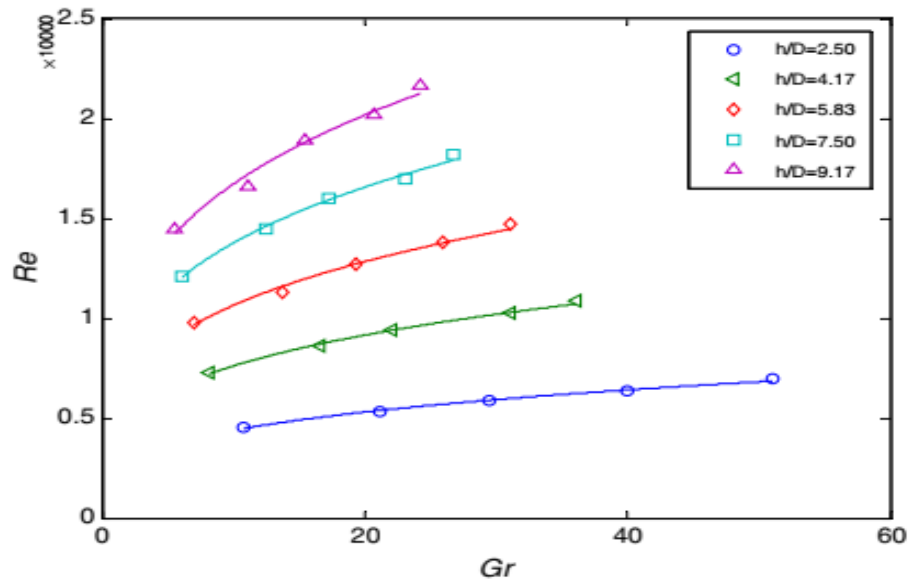


Figura 2.11 - Número de Reynolds x número de fluxo granular em relação a h/d
Fonte Xiaochuan *et al.*, (2015)

Em Xiaochuan *et al.*, (2015) a correlação das curvas do número de Reynolds com o número de fluxo granular (expressão 2.46) é mostrado com o gráfico da figura 2.11, na qual possibilita a análise de que o número de Reynolds aumentou de acordo com o aumento de Gr, onde estes parâmetros estão diretamente relacionados com a vazão volumétrica de ar em relação à altura de queda dos materiais. Foi avaliado que o valor de Reynolds é diretamente proporcional à potência de “0,27”, que apresenta uma referência importante para o cálculo de vazão de ar induzido em relação à altura de queda. Gerando a equação 2.46:

$$Re = \frac{u_g \rho_g D}{\mu} = C_{11} \left(\frac{m_p}{\rho_p (gh)^{\frac{1}{2}} d_p^2} \right)^{0.23} \quad [2.46]$$

C_{i1} – Coeficiente Adimensional

Deixando a equação 2.46 em relação a u_g temos uma fórmula sei empírica representando a velocidade do ar induzido, conforme a expressão 2.47:

$$u_g = C_{i1} \frac{\mu}{\rho_g} \left[\frac{m_p}{\rho_P (gh)^{\frac{1}{2}} d_p^2} \right]^{0.27} \quad [2.47]$$

Cooper e Arnold (1995), determinaram que todo o volume abastecido em uma moega deveria ser conservado ou exaurido com a vazão de despoejamento. No entanto, Esmaili *et al.*, (2013) definiu que o volume da coluna de material que está em queda livre por uma moega de saída circular representa o total de volume que deveria ser considerado como uma única partícula em queda livre sob influência de uma força de arrasto.

Posteriormente é preciso garantir que a cabine de geração de poeira seja totalmente vedada, garantindo uma pressão constante e o diâmetro da saída da moega seja o maior do que o diâmetro da coluna de material. A Expressão 2.48 representa a maneira de Esmaili *et al.*, (2013) de prever a vazão volumétrica utilizando o seu aparato experimental da Figura 2.12, sendo que a área da Expressão 2.48 é calculado usando a hipótese que as partículas são esféricas, tendo sua resolução na Equação 2.47.

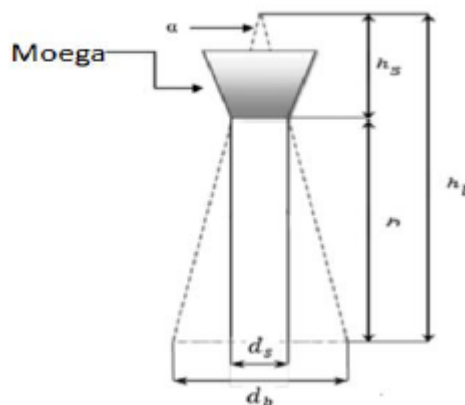


Figura 2.12 - Aparato experimental de Esmaili *et al.*, (2013).

Fonte: Esmaili *et al.*, (2013).

$$Q_{ind} = \frac{V_{cone}}{t_s} \quad [2.48]$$

Nas quais: V_{cone} é o volume do cone, t_s é o tempo de queda de uma única partícula sob a influência da força de arrasto e Q_{ind} é a quantidade de ar que é induzida no fluxo de partículas em queda livre, com isso assumimos que a forma de saída é circular, o volume do cone é dado pela expressão 2.49:

$$V_{cone} = \frac{\pi h}{12} (d_b^2 + d_b d_s + d_s^2) \quad [2.49]$$

A fórmula da velocidade de uma única da partícula sob a influência do ar é dada pela expressão 2.50:

$$v(t) = \sqrt{\frac{2mg}{\rho_s A c_d}} \tanh \left(t \sqrt{\frac{\rho_a g A c_d}{2m}} \right) + V_0 \quad [2.50]$$

Em que t é o tempo de queda de uma partícula, ρ_p e d_p são, respectivamente, a densidade e o diâmetro das partículas, m é a massa das partículas, ρ_a é a densidade do ar, c_d é o coeficiente de arrasto, A é área ocupada pela coluna de material e g é a constante gravitacional, dado pela expressão 2.51:

$$\frac{dh}{dt} = v \quad [2.51]$$

A altura de queda é dada pela expressão 2.52:

$$h = \int_0^t \sqrt{\frac{2mg}{\rho_a}} \tanh \left(t \sqrt{\frac{\rho_a g A c_d}{2m}} \right) dt \quad [2.52]$$

Resolvendo a integral da equação 2.48, o tempo de queda livre para uma única partícula sob a influência do arrasto é dado pela expressão 2.53:

$$t = \sqrt{\frac{2m}{\rho_a g A c_d}} \cos h^{-1} \left(e^{\frac{\rho_a A c_d h}{2m} + V_0} \right) \quad [2.53]$$

Substituindo 2.45 e 2.48 por 2.44, Q_{ind} são então dado pela expressão 2.54:

$$Q_{ind} = \frac{V_{cone}}{t_s} = \frac{\frac{\pi h}{12} (d_b^2 + d_b d_s + d_s^2)}{\sqrt{\frac{2m}{\rho_a}} \cos h^{-1} \left(e^{\frac{\rho_a A c_d h}{2m} + V_0} \right)} \quad [2.54]$$

Dado:

$$m = \frac{\pi d_p^3 \rho_p}{6} \quad [2.55]$$

$$A = \frac{\pi d_p^2}{4} \quad [2.56]$$

Esmaili *et al.*, (2013) considerou uma saída de tremonha circular, porém a equação 2.54 pode ser expandida para qualquer formato de saída, mas é preciso levar em conta algumas modificações no fluxo de escoamento do volume de material adicionando a condição inicial citada acima de que a velocidade do fluxo de partículas em queda é a mesma que a velocidade de uma única partícula.

Este método obteve resultados satisfatórios para granulares com tamanho médios superiores a 2mm, porém mostraram um erro máximo de 5%, já para

materiais mais finos como a areia este aumentou para 25 %, o mesmo foi observado no método proposto por Ogata (2001).

A bancada experimental de Esmaili *et al.*, (2013), é composto de Velocímetro por imagens de partículas (PIV), instalado a 900 mm abaixo da saída da moega, com uma função de medir os campos de velocidade da coluna de material. Além disso, uma tremonha com uma saída de 26 mm e um ângulo de 22 ° graus. O monitoramento da pressão dentro do reservatório foi feito através do nanômetro, os materiais utilizados foram esferas de vidro com 3mm de diâmetro, pelotas de plástico com 3mm de diâmetro e pelotas de plástico de 6mm. após um longo teste foi controlado com diâmetro de furo centralizado do reservatório, interferindo no uso de ar arrastado, pois, se esse for muito grande o ar pode escapar, porém, se for muito pequeno o todo o arrastar não é capturado. A Figura 2.13 representa o aparato experimental.

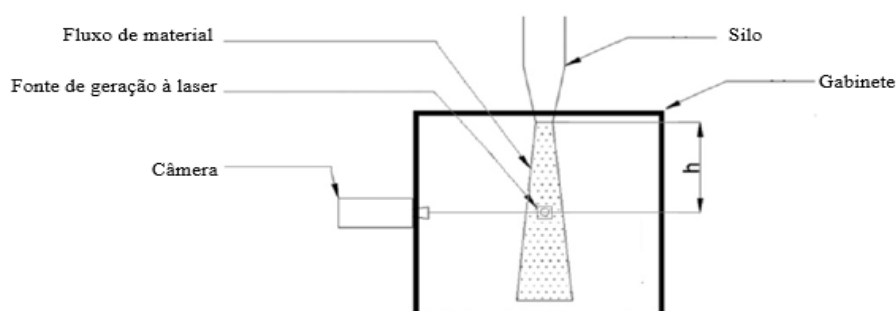


Figura 2.13 - Aparato experimental de Esmaili *et al.*, (2013).

Fonte: Esmaili *et al.*, (2013)

O processo de emissão de poeira está diretamente ligado a variáveis como altura de descarga, vazão mássica, diâmetro de suspensão e densidade aparente. Porém, Wang *et al.*, (2016), investigou em seus estudos o material caindo sobre duas superfícies, sendo uma rígida e outra sobre um fio d'água de 5 cm, na análise foi estudado: a classificação do fluxo em estável, turbulento e dispersivo, para assim avaliar o volume de exaustão de poeira gerada.

O aparato experimental de Wang *et al.* (2016), na Figura 2.14, era composto por três componentes principais: conjunto de silo e tremonha, gabinete de teste e o sistema de coleta de poeira. O silo tem um diâmetro interno de 10 cm e altura de 10 cm conectado a uma tremonha, de saída cônica com

semiângulo de 30° sendo montado em uma estrutura de aço, que pode ser elevado e abaixado.

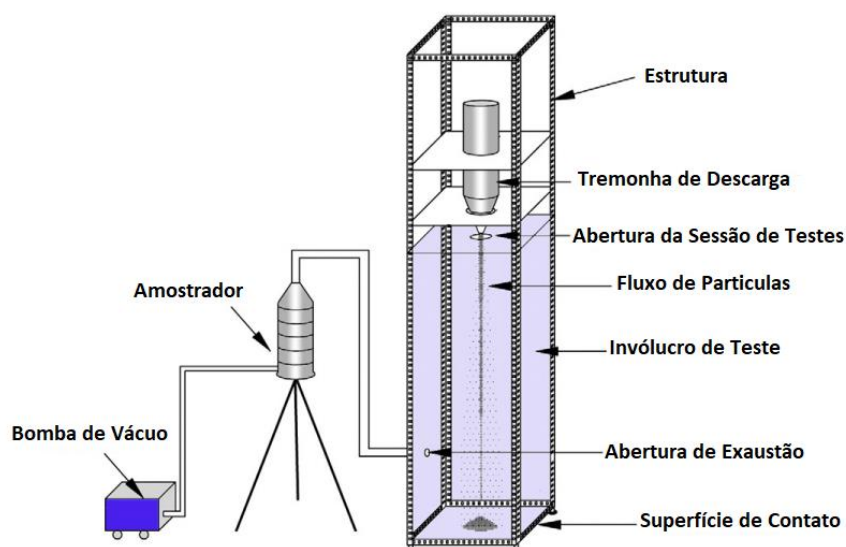


Figura 2.14 - Aparato experimental Wang *et al.*, (2016).

Fonte: Wang *et al.*, (2016).

Wang *et al.*, (2016), conclui que a geração de poeira para as duas superfícies de contato se aproxima um pouco, porém a diferença começa a aparecer quando se utiliza um diâmetro de saída maior do que 4mm, no entanto para as duas superfícies quando se utiliza um diâmetro da saída inferior a 2mm a geração de poeira é idêntica mesmo variando à altura de descarga.

Além disso verificou-se que a redução do impacto durante a queda livre e a redução na geração de poeira dentro do gabinete de teste é consideravelmente importante, quando o fluxo de material está no regime transitivo e dispersivo.

A Figura 2.15, representa um aglomerado de partículas em queda livre, onde algumas partículas foram classificadas com as letras A B e C. Para Sun *et al.*, (2019), quando este aglomerado está em queda livre as partículas A e B acabam em contato com uma força de arrasto maior, pois estão mais próximas da camada limite e então entram em suspensão surgindo assim um volume de vazios no agrupamento de material.

Concluindo que a fração de vazios está diretamente ligado a força de arrasto, Sun *et al* (2019), resolveu expressar a sua equação do volume de exaustão pela Equação 2.57:

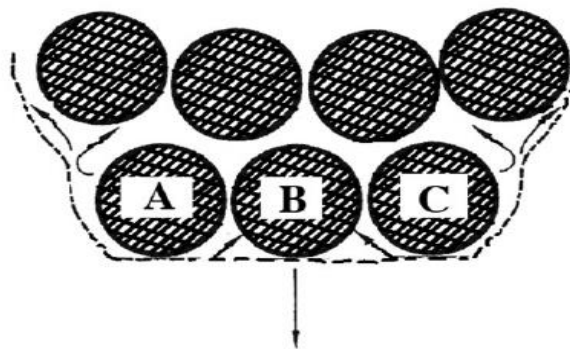


Figura 2.15 - Pluma de partículas.

Fonte: Sun *et al* (2019).

$$Q_a = \left(\frac{15m_p A_p^{2/3} \rho_a^{2/3}}{\rho_p \rho_a^{2/3} d_p^{5/3}} + (v_0^2 z + gz^2)(v_0^2 + 2gz)^{-1/3} \times \left(1 - \frac{m_p}{\rho_p A_0} (v_0^2 + 2gz)^{-1/2} \right) \right)^{1/3} \quad [2.57]$$

Onde:

m_p – Massa da partícula (kg);

A_p – Área da partícula (m²)

d_p – Diâmetro da partícula; micro

v_0 – Velocidade inicial; m/s

ρ_a – Densidade do ar; kg/m³

z - Altura; m

A_0 - área inicial; m²

A existência de poucos estudos experimentais em relação à influência do tamanho de partículas em diâmetro dos tubos, pelos quais estão caindo material durante o transporte de materiais a granel, fez com que Wang, (2020) desenvolvesse a Equação empírica 2.58, para a velocidade do fluxo de ar induzido, para prever a quantidade de ar induzido sob várias condições de operação. Utilizando uma faixa de coeficiente de arrasto entre 0.62-0.94, com uma faixa de diâmetro de partículas entre 3.27 a 9.223 mm

O dispositivo experimental de Wang, (2020) para obter resultados elaborados para o desenvolvimento dessa equação sei empírica, pode ser

visualizado na Figura 2.16, onde se tem um silo de armazenamento localizado em cima de um ajuste de alimentação que controla o fluxo mássico de material. A geração de poeira ocorre devido ao choque do material com a plataforma de impacto localizada no meio do reservatório e então com um equipamento de medição se mede a velocidade desse ar induzido.

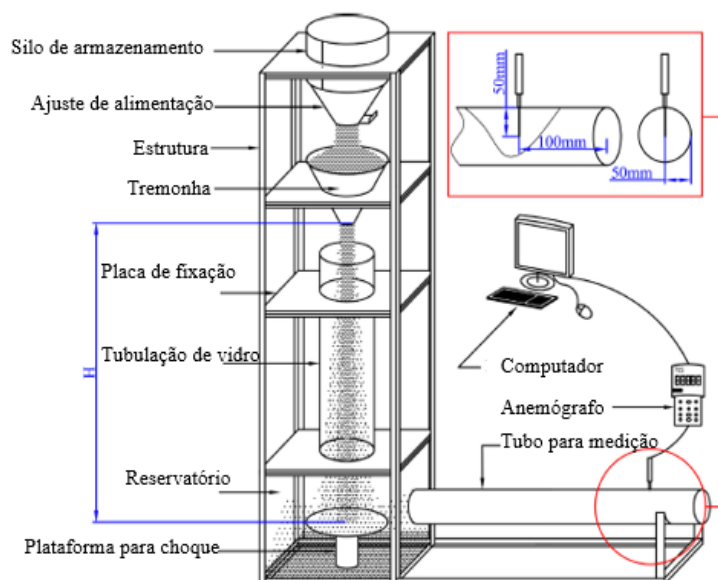


Figura 2.16 - Aparato experimental Wang.

Fonte: Wang, (2020)

Assim como o modelo de Xiaochuan *et al* (2015), baseado em testes experimentais, Wang, (2020) modelou o fenômeno físico do seu processo experimental através do cálculo do número de Reynolds e da velocidade do ar durante a exaustão do material particulado pelo sistema de exaustão, tendo o número de Reynolds dado pela Equação 2.58:

$$Re = \frac{\rho_p d_p u_g}{\mu} = k \left[\frac{m_p}{\rho_g g^{1/2} h^{3/2} D} \right]^{0.44} \quad [2.58]$$

Assim como feito para Equação 2.46 reorganizando os termos da Equação 2.58 para a velocidade do ar, u_g , obtendo a equação 2.59:

$$u_g = \frac{k\mu}{\rho_p d_p} \times \left[\frac{m_p}{\rho_g g^{1/2} h^{3/2} D} \right]^{0.44} \quad [2.59]$$

Onde:

u_g – Velocidade do ar; m/s

ρ_g - Densidade do ar; kg/m³

m_p - Massa da partícula; em kg

h - Altura de queda; m

d_p - Diâmetro da partícula;

Dt – Diâmetro do tubo

g - Gravidade

ρ_p - Densidade da partícula kg/m³

Onde K é uma constante empírica determinada experimentalmente, para um diâmetro fixo de tubo, para diferentes alturas de queda e tamanho de partículas.

Com base na teoria da queda livre de material para a remoção de poeira relacionada ao volume de exaustão, Sun *et al.*, (2020), desenvolveu um modelo sei empírico para processos de queda livre de partículas em ambientes confinado e não confinados, através de formulas teóricas do modelo de Sun *et al* (2019), para o volume de exaustão e uma simulação numérica para analisar a velocidade das partículas nestes dois processos citados acima. A Figura 2.17 mostra um conjunto de partículas com algumas destas partículas classificadas pelas letras E, F e D. Segundo Sun *et al* (2020), as partículas E e F tem mais facilidade de ficarem suspensas, pois a força de arrasto presente nestas partículas é maior do que as de manterem estas unidas, sobrando assim apenas a partícula D com uma força da gravidade atuando sobre ela.

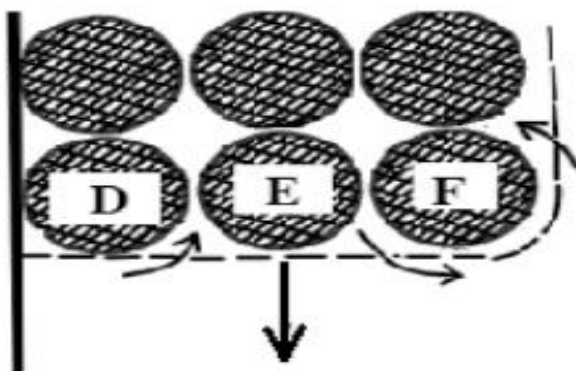


Figura 2.17 - Queda livre semiconfinada.

Fonte: Sun *et al* (2020).

Sun *et al.*, (2020), se baseou em seu modelo empírico anterior de Sun *et al.*, (2019), incorporando a queda livre de material próximo a superfície de contatos, gerando a Expressão 2.60, de volume de exaustão:

$$Q_s = 0.783 \left(\frac{9m_p A_p^2 \mu_a^{2/3}}{2g \rho_p \rho_a^{2/3} d_p^{5/3}} (v_0^2 + 2gh)^{5/3} \left(1 - \frac{m_p}{\rho_p A_0} \right) (v_0^2 + 2gh)^{-1/2} \right)^{1/3} \quad [2.60]$$

O parâmetro comum de projeto utilizado por todos os métodos da previsão do volume de exaustão da previsão do volume de exaustão são a vazão mássica (\dot{m}), aplicada nos manuais de ventilação industrial, e que indica a quantidade em massa de um fluido que escoar através de uma certa secção em um intervalo de tempo considerado. Porém os manuais de ventilação incorporam poucas variáveis de entrada como a densidade de material, vazão mássica e fator de segurança que protege o sistema de despoejamento. Wang, (2020) e Sun *et al* (2020) em seus protocolos experimentais utilizam equipamentos sofisticados de medição e equipamentos que conseguem obter um melhor controle das variáveis de entrada do processo.

Muitos modelos matemáticos ainda trabalham com o comportamento do sólido a granel no estado estático. Isto é, o material no geral, é descarregado diretamente na moega ao invés de usar um chute de transferência, uma vez que a moega tem maior capacidade de armazenamento que as correias transportadoras; principalmente ainda tentando avaliar a alteração no diâmetro da partícula, densidade aparente do material e altura de descarga e carga. Isso acontece por que, na indústria da mineração, os processos com sólidos a granel no estado estático segundo Luz, (2010) são essenciais, pois: formam a reserva de operação na época da chuva ou paradas previstas; facilitam a homogeneização do material que alimenta outras minas e ajuda no transporte de material particulado para outras minas.

Os métodos de Sun *et al* (2019) e Sun *et al* (2020), incluíram o volume de vazios, pois perceberam que quando a coluna de material está em queda o ar

do ambiente atua de maneira a diminuir a força de manter o agrupamento de partículas unido até as partículas finas se soltarem e ficarem suspensas sobrando uma fração de vazios no espaço ocupado pelas partículas finas.

Os Modelos para a previsão da vazão de despoeiramento em queda livres de materiais como: Cooper e Arnold (1995); Ullmann (1998); Hemeon (1963); modelo de pluma simples de Cooper e Arnold (1995); Ogata (2001); Wypych e Cooper (2005); Esmaili et al., (2013); Sun *et al* (2019) e (2020), propõem soluções que levam em considerações as leis para a queda livre de material em uma superfície de contato, buscando estabelecer uma metodologia a ser empregada de maneira confiável para a determinação da vazão de despoeiramento de material granular.

2.4 Fluidodinâmica computacional com materiais particulados.

O manuseio de sólidos a granel muitas vezes envolve a queda livre de material granulado, como por exemplo um processo de liberação de material de uma tremonha ou silo para realizar um determinado abastecimento. As partículas em queda livre podem induzir o fluxo de ar parado devido à interação partícula-fluido. O ar induzido geralmente é influenciado pela corrente de queda do material e, ao mesmo tempo, as partículas finas contidas na corrente de partículas serão arrastadas pelo fluxo de ar, causando a emissão de poeira no ar. A emissão de poeira é perigosa para a qualidade de ar dos ambientes e para a saúde das pessoas se não for devidamente controlado. Até explosões podem acontecer quando a concentração de material particulado atinge certo valor (LULBADDA *et al.*, 2017).

Portanto, diferentes tipos de modelos CFD estão disponíveis para a previsão de fluxos gás-sólidos. Cada modelo tem méritos e desvantagens inerentes. Portanto, um determinado modelo pode ser apropriado sobre outro, dependendo dos fatores priorizados pelo usuário, por exemplo, acurácia dos resultados, tempo computacional, aplicabilidade em sistemas de grande escala, etc. Além disso, os modelos ainda estão longe da perfeição e os modelos atuais já passaram por muitas melhorias ao longo do tempo (ARIYARATNE *et al.*, 2018).

Ao lidar com a modelagem de escoamentos gás-sólidos, os métodos Euleriano-Euleriano e Euleriano-Lagrangiano são as abordagens mais utilizadas (Chen & Wang, 2014). Na abordagem Euleriana-Euleriana, todas as fases são tratadas como fases contínuas, essa abordagem é aplicável para prever o fluxo de material a granel em finas camadas de material homogêneo com distribuição de tamanho de partícula bastante fina (DONOHUE *et al.*, 2009; KATTERFELD *et al.*, 2010; MER *et al.*, 2018).

Na abordagem Euleriana-Lagrangiana, a fase fluida é tratada como uma fase contínua, mas a fase sólida é tratada como uma fase discreta. O modelo Euleriano-Euleriano para fluxos granulares é descrito sob a abordagem Euleriana-Euleriana e existem quatro modelos principais sob a abordagem Euleriana-Lagrangiana, a saber, Modelo de Fase Discreta Lagrangiana (DPM), Modelo de Fase Discreta Densa incorporado com Teoria Cinética de Fluxo Granular (DDPM-KTGF), Método de Elemento Discreto CFD (CFD-DEM) e Esquema numérico de Dinâmica de Fluidos de Partículas Computacionais (CPFD) incorporado com o método MultiPhase-Particle-In-Cell (MP-PIC). Além da diferença na forma de tratamento da fase sólida, outra diferença básica dos modelos em ambas as abordagens é a forma de tratar as interações entre partículas (p-p). O DPM negligencia as interações p-p e outros modelos consideram as interações p-p por meio de diferentes abordagens, como teoria cinética de fluxo granular, modelo de tensão normal de partícula, modelo de esfera macia, etc (ARIYARATNE *et al.*, 2018).

Uchiyama, (2004) utilizou um método numérico de vórtice bidimensional para analisar o fluxo do material particulado que passa por um orifício e cai em um volume de controle predefinido. Neste estudo os efeitos do diâmetro e da densidade das partículas no fluxo de material são investigados e comparados com um modelo analítico, como resultado foi possível verificar que os valores obtidos para o fluxo de ar induzido estão de acordo com o modelo massivo de partículas proposto por Cooper e Arnold, (1995).

No estudo de Chen *et al.*, (2012), as análises realizadas tiveram como objetivo reduzir as emissões de poeira em chutes de transferência de transportadores de correia em instalações de manuseio de materiais a granel. Várias configurações de chutes transferência foram investigadas com o objetivo

de analisar o desempenho do sistema, onde foram efetuados testes de modelos em escala e simulação de CFD (Figura 2.18). A análise CFD foi usada para investigar o padrão de fluxo do material granular e do ar arrastado em cada uma das configurações no chute de transferência, usando um modelo tridimensional de Euler-Euler. As emissões de poeira previstas obtidas a partir das simulações compararam favoravelmente com os resultados dos testes em modelo de escala, demonstrando que o CFD pode ser efetivamente usado para avaliar qualitativamente o desempenho dos projetos de chutes de transferência em relação à emissão de poeira.

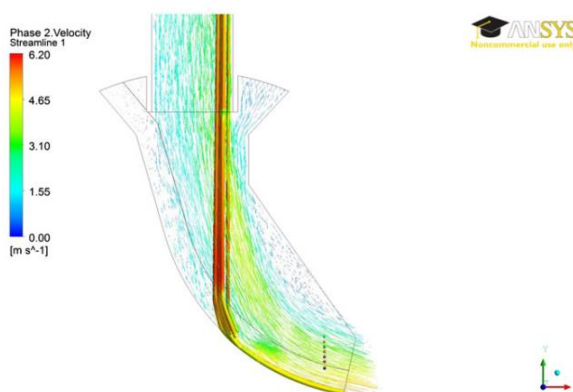


Figura 2.18 – Linhas de velocidade das partículas em um tipo de chute.

Fonte: Chen *et al.*, (2012).

De acordo com Chu *et al.* (2020), nos últimos anos a modelagem numérica provou ser uma ferramenta muito útil para melhorar a compreensão e os fundamentos de fluxos de fluidos presentes na literatura, o autor desenvolveu um estudo via CFD-DEM (Método dos Elementos Discretos). Um modelo 2D foi comparado com outros dois modelos 3D e em seguida o modelo 2D foi validado por experimentos, por fim o modelo foi utilizado para prever o efeito da variação da altura da queda e vasão de material para a geração de poeira (Figura 2.19). Logo foi observado que tanto o fluxo de ar quanto a força de arrasto total aumentam proporcionalmente com o aumento da altura de queda do material, podendo variar de acordo com o acúmulo de material, pois esse fator influencia diretamente à altura de queda. Outro ponto importante é que o fluxo de ar é difícil de ser estimado usando somente a força de arrasto do material com o ar. Uma relação linear entre a altura de queda e a taxa de fluxo de ar induzido é avaliada

como uma boa saída para a continuação dos estudos. Shulz *et al.* (2019) também utilizou CFD-DEM em uma modelagem de acoplamento para investigar a liberação de poeira durante o manuseio de materiais granulares.

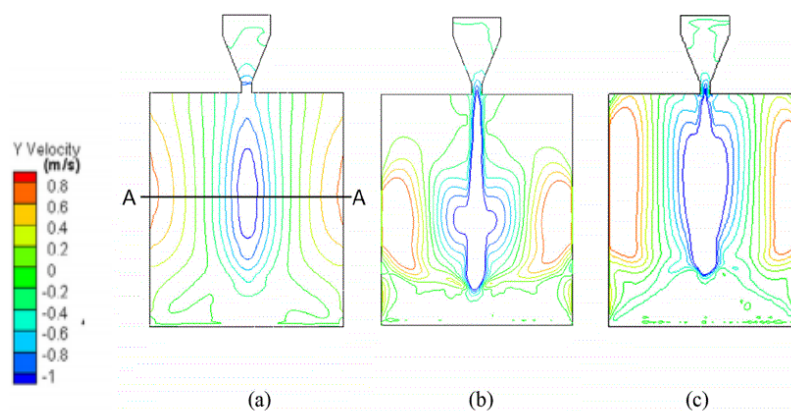


Figura 2.19 – Comparação de fluxo de ar simulado entre os modelos 2D e 3D.

Fonte: Chu *et al.*, (2020).

Sun *et al.* (2020), apresentou um modelo baseado na teoria do jato de ar para um fluxo de partículas em queda utilizando a ferramenta DPM (Discrete Phase Model) para analisar a quantidade de ar induzido devido ao arrasto em materiais em queda livre com contato de uma parede (Figura 2.20). Os experimentos foram realizados em dois ambientes, sendo um confinado e outro não confinado. As simulações numéricas foram desenvolvidas para analisar a velocidade da partícula e o ar arrastado sob o processo de queda livre. Como resultado foi analisado que o fluxo de ar da partícula confinada é menor que o fluxo de ar arrastado no ambiente não confinado. As simulações demonstram que à medida que a distância das partículas na parede aumenta, o fluxo de ar induzido também aumenta.

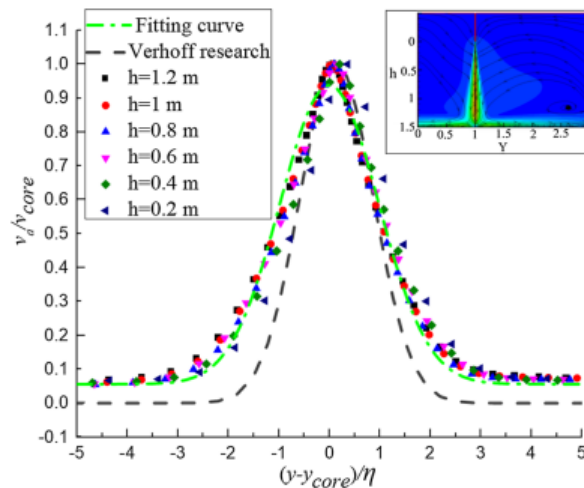


Figura 2.20 – Perfil de velocidade axial de ar induzido.

Fonte: Sun *et al.* (2020).

Katterfeld *et al.*, (2010) mostraram como a simulação DEM e CFD pode ser combinada para analisar o fluxo de material a granel e ar dentro dos compartimentos de chutes de transferência. Juntamente com um modelo empírico para emissões difusas, é possível calcular os parâmetros básicos para instalações de exaustão de poeira. Os autores justificam que a análise permite uma redução na geração de poeira, pois consideram a melhoria do projeto de chute, através das simulações realizadas. A figura 2.21 mostra a comparação do fluxo de material com o designe original e a da direita o designe otimizado pelos autores avaliando o fluxo de partículas e suas velocidades.

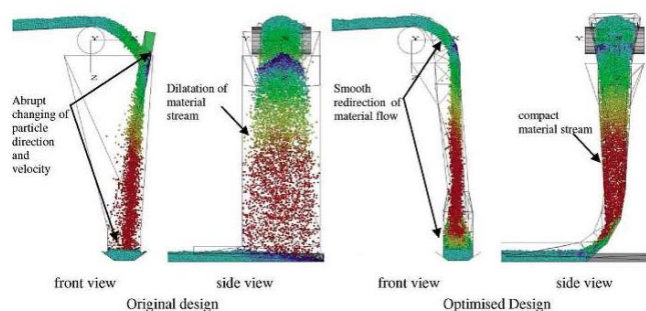


Figura 2.21 – Simulação DEM dos projetos de chutes de transferência.

Fonte: Katterfeld *et al.*, (2010).

Leão *et al.*, (2020) apresenta um modelo para a propagação de partículas de poeira, impulsionada apenas por material a granel em queda livre. O presente trabalho aplicou CFD usando um modelo semelhante a um fluido com uma

mistura de ar e poeira para avaliar a propagação de poeira em um campo aberto, com base no princípio de que o movimento da poeira ocorre quase estaticamente. Como resultado, os fluxos de ar foram analisados e foi possível identificar zonas que podem servir como fonte de propagação da poeira quando submetida a uma força externa (Figura 2.20). Os autores ainda concordam que esta previsão está longe de ser uma afirmação definitiva, uma vez que as zonas de propagação de poeira podem ser influenciadas dependendo da corrente de ar, da mesma forma que o acúmulo do material também tem influência direta na análise do modelo. À medida que a pulha cresce à altura de queda do fluxo de material diminui, afetando as linhas de propagação da poeira.

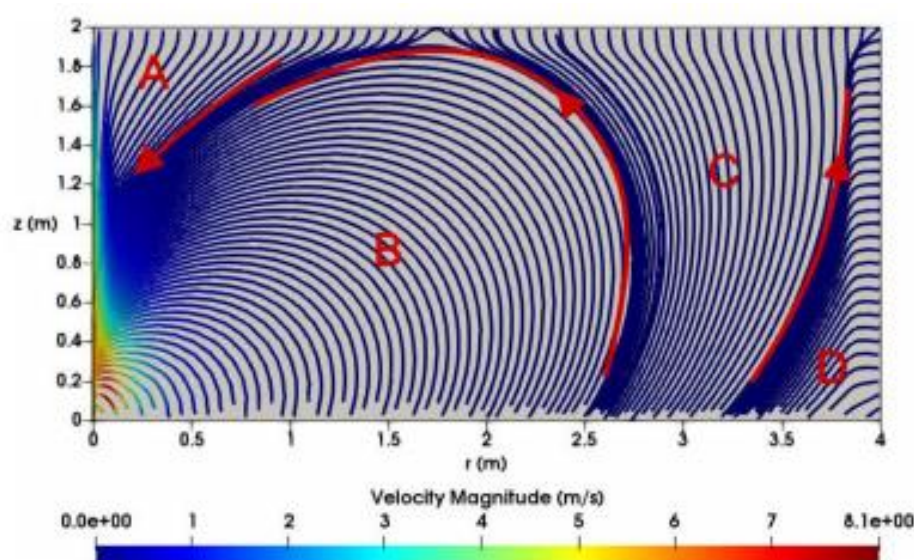


Figura 2.22 – Zonas de propagação de poeira.

Fonte: Leão *et al.*, (2020).

Outro trabalho desenvolvido por Leão *et al.*, (2021) demonstrou uma solução analítica do campo de pressão via CFD que permitiu a visualização do campo vetorial de velocidade e das massas de ar próximo ao núcleo do fluxo do material granulado em queda, gerando caminhos preferenciais para formação e escape da poeira. Este estudo foi comparado com estudos empíricos permitindo comparações e a validação da simulação CFD. Como resultado principal, os resultados indicam a existência de uma altura crítica que gera o surgimento de um vórtice toroidal em torno do fluxo principal de material em queda, ocasionando um aumento da absorção das partículas de poeira aumentando a dispersão da mesma. A figura 2.23 mostra as mudanças de linhas de corrente

próximas ao fluxo de material devido à formação do vórtice: A). As linhas de corrente de ar induzidas permanecem paralelas ao núcleo e escapam quase paralelas ao piso. B) Estado transitório, a camada limite começa a se desprender do fluxo de material, e a formação de uma via de escape já está caracterizada. C) O vórtice é formado pela aceleração do fluxo e expandindo a camada limite. A poeira é lançada para cima e para fora do vórtice de uma região ascendente descrita pelo laranja para vermelho cor. É provável que esta região contribua consideravelmente para a dispersão de poeira

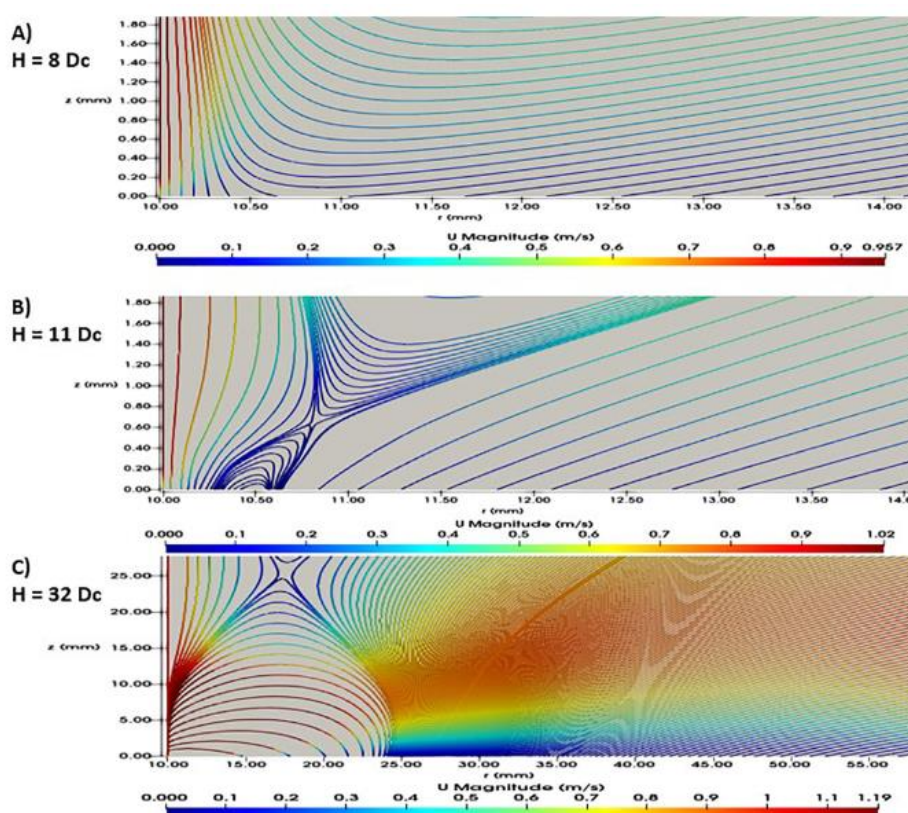


Figura 2.23 – Sequência de imagens mostrando a mudança das linhas de corrente após atingir a altura crítica ($D_c=10\text{mm}$).

Fonte: Leão *et al.*, (2021).

Witt *et al.* (2002) colocam que a remoção de poeira dos transportadores constitui um problema ambiental e operacional significativo para os operadores das indústrias de mineração, geração de energia e processos. Um meio de reduzir a remoção de poeira é fornecer defletores de fluxo de ar ou outras modificações aerodinâmicas no transportador. Um modelo de dinâmica de fluidos computacional (CFD) foi desenvolvido para levar em conta o efeito da

direção do vento (Figura 2.24), velocidade e proteção do transportador na perda de poeira dos transportadores. O modelo é desenvolvido na estrutura do CFX4 para simular o fluxo de ar em torno do transportador. Medições experimentais da remoção de poeira da superfície de um leito de minério em um túnel de vento a diferentes velocidades do vento são usadas para caracterizar a poeira. Com base nos dados experimentais, é desenvolvido um modelo para prever a distribuição de massa e tamanho de partículas suspensas na superfície do leito em diferentes velocidades do ar. O modelo de perda de poeira é acoplado a um modelo de rastreamento de partículas Lagrangiano para prever trajetórias de partículas. A validação do modelo é realizada comparando as previsões de CFD com o trabalho de teste do túnel de vento e mostra uma boa concordância. Os resultados são apresentados para um design típico do transportador. A combinação de modelagem experimental e CFD é considerada uma ferramenta poderosa para analisar a perda de poeira dos transportadores e pode ser estendida a estoques e outras situações em que a perda de poeira é um problema.

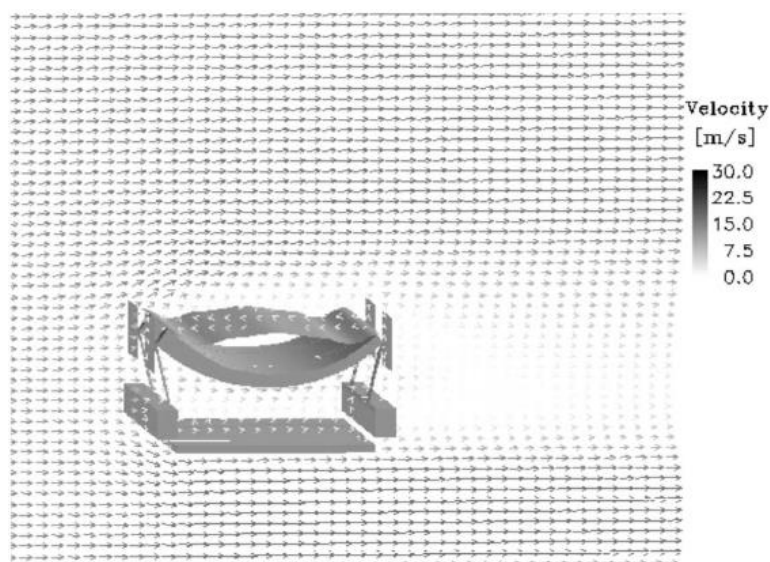


Figura 2.24 – Vetores de velocidade do ar.

Fonte: Witt *et al.*, (2002).

No estudo de Potapov *et al.*, (2013), um experimento foi realizado usando um modelo em escala para medir o fluxo de ar ao redor da saída de uma rampa de transferência. Foi utilizado um sistema utilizando a Velocímetria de Imagem de Partículas (PIV) para medir o fluxo de ar graças às vantagens da visualização

e medição multiponto. Os experimentos foram comparados com simulações acopladas CFD-DEM através dos softwares Fluent - Rock. Vários modelos de turbulência e leis de interações partículas-gás foram testados e concluiu-se que para este problema a escolha das leis de interações e turbulência não afeta os resultados da simulação em qualquer grau. Após as simulações ficou claro a validade deste modelo para a previsão de fluxo de ar (Figura 2.25) em chutes de transferência em escala industrial, sendo o causador da geração de poeira pelo ar induzido pelas partículas (POTAPOV *et al.*, 2013).

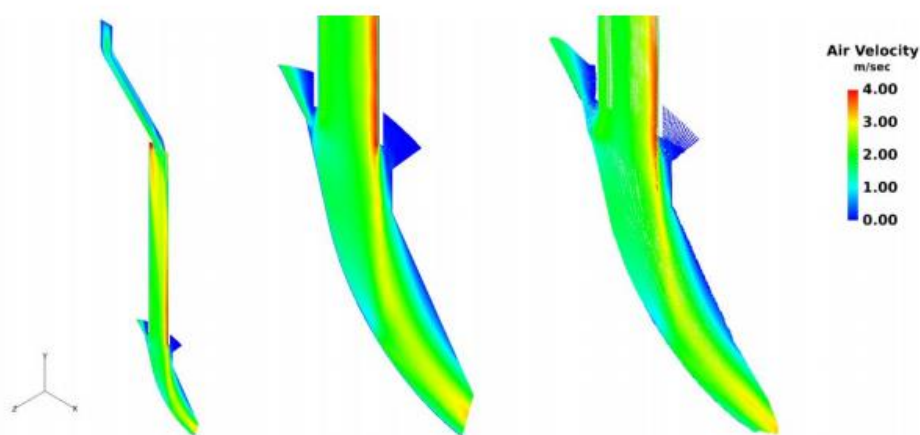


Figura 2.25 – Contornos de velocidade do ar para as partículas em queda.

Fonte: Potapov *et al.*, (2013).

Esmaili *et al.* (2015) realizou simulações computacionais via Ansys – CFX (Figura 2.26) usando o modelo prático de Ansart *et al.*, (2009) após fazer um review do trabalho desenvolvido por Hemeon, (1963) no qual analisou a velocidade do ar em um fluxo de queda de partículas em queda livre, variando o tamanho das partículas e a densidade, onde foi observado que o fluxo de ar com partículas maiores terá menor velocidade do ar circundante ao fluxo de partículas menores, além disso, aumentar da densidade das partículas resultará em um aumento de concentração de partículas no centro da corrente de ar. Outra análise realizada comprovou que aumentando a densidade do material para um mesmo tamanho de partícula, a velocidade do ar circundante aumentará, no qual de maneira análoga, é observado que aumentando o diâmetro das partículas, a velocidade do ar diminui. Por fim o modelo CFD proposto apresentou uma excelente correlação nas velocidades de partículas entre as simulações e

velocidade teoricamente calculadas no trabalho do mesmo autor em Esmaili *et al.*, (2013), para velocidades teoricamente calculadas para uma partícula em queda livre sob a influência do arrasto, no caso o presente trabalho usou o modelo de arrasto de Gidaspow, (1994).

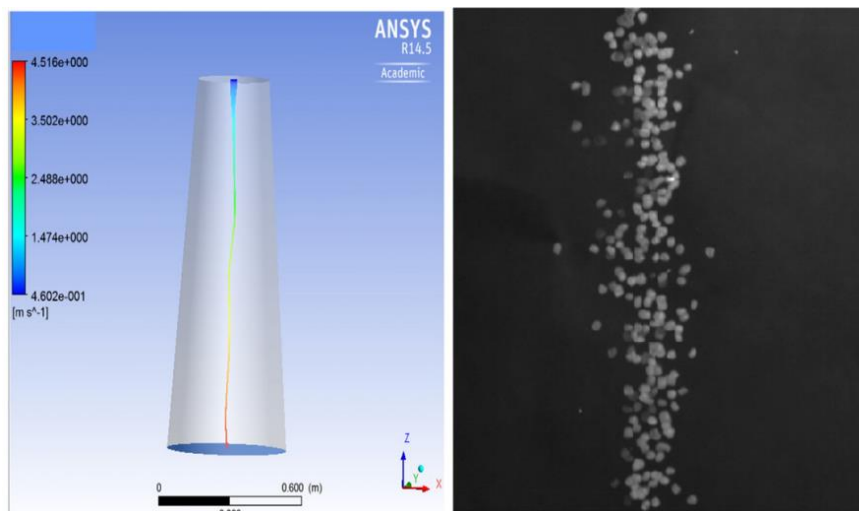


Figura 2.26 – Forma de Fluxo de material a granel.

Fonte: Esmaili *et al.*, (2013).

3. MODELO COMPUTACIONAL UTILIZADO

Em resumo, os sistemas particulados podem ser representados, basicamente, por duas abordagens: euleriana ou lagrangeana (DE LAI, 2013). A abordagem euleriana considera o sistema particulado de forma estatística, as trajetórias das partículas não são calculadas, ao invés disso, é considerado um campo de probabilidade da existência das frações volumétricas de cada fase, em determinada região do escoamento. Esta técnica é denominada de promediação local da presença das partículas (GIDASPOW, 1994). A vantagem deste modelo está relacionada ao esforço computacional reduzido quando comparado ao método lagrangeano, devido ao fato do método considerar várias partículas (de forma estatística) em um único elemento da malha computacional, sem a necessidade de calcular a posição de cada partícula. A dificuldade do método é observada quando os efeitos de interação entre as partículas são complexos, trazendo mais incertezas na modelagem do problema. A abordagem lagrangeana considera o sistema particulado de forma determinística, a trajetória e forças de interação são realizadas de forma individual para cada partícula. As

trajetórias das partículas são determinadas pela lei de Newton do movimento, sendo as forças de interação sobre as partículas modeladas de acordo com cada problema (MASSARANI, 2002).

Nesta abordagem a fase contínua do meio fluido é representada pelas equações de Navier-Stokes, que são acopladas através de termos para as forças de interação da fase particulada. A vantagem do modelo lagrangeano é o nível de detalhamento das informações e análises obtidas da dinâmica do escoamento particulado. Por outro lado, o esforço computacional utilizado nas simulações pode inviabilizar a solução de determinadas configurações que exigem passos de tempo significativamente pequenos para a correta simulação numérica. Outra dificuldade do método é a modelagem das forças de colisões entre as partículas e obstáculos sólidos, que precisam representar efeitos característicos dos regimes de escoamento abordados (ANSYS, 2019).

3.1 Modelo CFD de escoamento particulado

Nos últimos anos tem sido dedicado um esforço significativo para o aprimoramento de ferramentas numéricas, como o CFD (Computational Fluid Dynamics), para prever fluxos complexos. Durante os estudos foi identificado que os sistemas contendo uma ou mais fases particuladas são os mais complexos e desafiadores no ramo de modelagem de fluxos multifásicos. Portanto, para prever com precisão o comportamento dos sólidos, é necessário escolher um método capaz de contabilizar não apenas as interações partícula-fluido, mais também as demais interações presentes no sistema em três dimensões e em qualquer distribuição de tamanho de partículas (PARKER *et al.*, 2013).

O modelo adotado neste trabalho para comparar com o modelo abordado por Esmaili *et al* (2015), é o Dense Discrete Phase Model (DDPM), disponível no programa ANSYS FLUENT. O modelo DDPM é responsável pela solução acoplada das equações da fase fluida (Euleriana) e das partículas que serão injetadas em seu domínio utilizando o Modelo de Fase Discreta (DPM) para escoamentos densos. A vantagem do modelo DDPM está no nível de detalhamento das informações e das análises obtidas da dinâmica do escoamento particulado, principalmente pela possibilidade de vários tamanhos

de partículas e várias configurações que podem ser imputadas nas partículas. O estudo de Esmaili *et al.*, (2015) é elaborado pelo modelo Euleriano-Granular, dentre as diferenças entre a abordagem aqui adotada com o modelo DDPM e a abordagem adotada pelo autor, podem ser citadas (ANSYS,2019):

- O modelo Euler-Lagrange com o modelo DDPM representa o fluido a partir da abordagem euleriana e as partículas pela abordagem lagrangeana. Já o modelo Euler-Granular utiliza a abordagem euleriana tanto para modelar o escoamento do fluido quanto das partículas.

- A abordagem Euler-Granular trata o fluido e as partículas sólidas como fluidos contínuos interpenetrantes. A abordagem Euler-Lagrange/DDPM trata as partículas sólidas como partículas discretas dispersas em um fluido contínuo.

3.1.1 Modelo Multifluido – Euleriano

Durante a modelagem de escoamentos multifásicos com a abordagem multifluidos (Euleriana-Euleriana), o tratamento das fases sólidas como sendo “pseudo fluidos” faz com que as equações governantes para essas fases possuam a mesma forma das equações resolvidas para as fases fluidas reais. Entretanto, tanto as equações da fase fluida quanto as da fase sólida (pseudo fluido) possuem algumas diferenças fundamentais em relação às equações governantes para escoamentos monofásicos, sendo as principais diferenças a consideração dos conceitos de fração volumétrica e massa específica efetiva. A fração volumétrica, denotada aqui por α_q representa a fração de um determinado volume que é ocupada por uma determinada fase. Assim, para satisfazer os princípios básicos de conservação, a soma das frações volumétricas de todas as fases do sistema deve ser igual 1, conforme equação 3.1 a seguir:

$$\sum_{q=1}^n \alpha_q = 1 \quad [3.1]$$

Sendo que q representa qualquer uma das fases do sistema, α_q é a fração volumétrica dessa fase e n o número de fases (fluidos e pseudo fluidos) no sistema. Quando o valor de n é igual ou maior do que 3 o modelo é chamado de modelo multifluidos e quando n é igual a 2 o modelo é chamado de modelo de dois fluidos.

Utilizando-se o conceito de fração volumétrica, a massa específica efetiva pode ser definida como a equação 3.2 a seguir (ANSYS., 2020):

$$\dot{\rho}_q = \alpha_q \rho_q \quad [3.2]$$

sendo que $\dot{\rho}_q$ e ρ_q são, respectivamente a massa específica efetiva e a massa específica física real da fase "q".

Utilizando-se o conceito de massa específica efetiva, as equações governantes do movimento de um fluido ou pseudo fluido "q" no contexto do modelo multifluidos podem ser escritas de forma generalizada, conforme mostrado nas equações 3.3 e 3.4 a seguir:

$$\frac{\partial \alpha_q \rho_q}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha_q \rho_q \mathbf{v}_q) = \sum_{p=1}^n (\dot{m}_{pq} + \dot{m}_{qp}) + S_q \quad [3.3]$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} (\alpha_q \rho_q \mathbf{v}_q) + \nabla \cdot (\alpha_q \rho_q \mathbf{v}_q \mathbf{v}_q) = & \alpha_q \nabla P + \nabla \bar{\tau}_q + \alpha_q \rho_q \mathbf{g} + \sum_{p=1}^n (\mathbf{R}_{pq} + \dot{m}_{pq} \mathbf{v}_{pq} + \\ & \dot{m}_{qp} \mathbf{v}_{qp}) + (\mathbf{F}_q + \mathbf{F}_{lift,q} + \mathbf{F}_{wl,q} + \mathbf{F}_{td,q}) \end{aligned} \quad [3.4]$$

As equações 3.3 e 3.4 são, respectivamente, as equações da continuidade e da conservação da quantidade de movimento para uma fase q . Nestas equações, g é a aceleração da gravidade, n é o número total de fases no sistema, P é a pressão e, α_q , ρ_q e \mathbf{v}_q são, respectivamente, a fração volumétrica, a massa específica real e o vetor velocidade da fase q . O termo S_q é um termo fonte/sumidouro de massa da fase q que pode ser definido como um valor constante ou variável.

O termo F_q representa uma força de campo externa diferente da força da gravidade como, por exemplo, uma força eletromagnética e $F_{lift,q}$ é uma força de sustentação. O termo $F_{wl,q}$ é chamado de "força de lubrificação de parede" e é importante em problemas de escoamentos bifásicos líquido-gás onde é responsável por "empurrar" a fase secundária (bolhas) para longe das paredes. Já o termo $F_{vm,q}$ é uma força de massa virtual e $F_{td,q}$ é uma força de dispersão turbulenta.

Já $\bar{\tau}_q$ é o tensor tensão-deformação da fase q e os termos \dot{m}_{pq} e \dot{m}_{qp} caracterizam, respectivamente, as taxas de transferência de massa da p-ésima para a q-ésima fase e da q-ésima para a p-ésima fase. Assim, \mathbf{v}_{pq} e \mathbf{v}_{qp} representam as velocidades das fases durante esses processos de transferências de massa (não confundir vazão mássica com velocidade da fase, apesar de estarem correlacionadas).

Para o “fechamento” dá a Equação 3.4 para a conservação do momento da fase q deve ser realizado por meio da escolha de expressões adequadas para o termo R_{pq} , chamado de “termo de força de interação entre as fases” e que está sujeito às seguintes condições 3.4 e .39:

$$R_{pq} = -R_{qp} \quad [3.5]$$

$$R_{qq} = 0 \quad [3.6]$$

No software ANSYS FLUENT o termo mostrado na Eq. (3.4) para o somatório das forças de interação entre a fase q e as demais fases do sistema é representado na seguinte forma da equação 3.7:

$$\sum_{p=1}^n R_{pq} = \sum_{p=1}^n K_{pq} (v_p - v_q) \quad [3.7]$$

Onde v_p e v_q são, respectivamente, as velocidades das fases p e q , e o termo K_{pq} ($=K_{qp}$) é o coeficiente de transferência de momento entre as fases, também chamado de coeficiente de troca na interface. Para escoamentos bifásicos do tipo gás-sólido esse coeficiente de troca pode ser chamado de **coeficiente de troca fluido-sólido** e pode ser representado por K_{ls} , onde o subscrito “s” significa “sólido” e o subscrito “l” significa “fluido”, podendo o mesmo ser escrito na seguinte forma geral da equação 3.8:

$$K_{ls} = \frac{\alpha_s \rho_s f}{\tau_s} \quad [3.8]$$

Sendo que f é definido de maneira diferente para os diferentes modelos de coeficiente de troca (conforme descrito mais adiante) e τ_s é o “termo de relaxação da partícula”, definido como demonstrado na equação 3.9:

$$\tau_s = \frac{\rho_s d_s^2}{18\mu_l} \quad [3.9]$$

No qual d_s na equação 3.9 é o diâmetro médio das partículas da fase sólida e μ_l é a viscosidade do fluido.

3.1.2 Modelo de Fase Discreta – DPM

O modelo que representa o escoamento líquido-sólido, através de uma abordagem Euler-Lagrange, no programa ANSYS FLUENT é o Modelo de Fase

Discreta o DPM (Discrete Phase Model). Na formulação padrão do modelo DPM é feita uma consideração em relação à fração volumétrica da fase discreta das partículas, ε_p , que deve ser suficientemente pequena em comparação com a fração volumétrica da fase contínua, ε_f ($\varepsilon_p < 10\% \varepsilon_f$), de modo que a influência desta fração volumétrica seja negligenciada no equacionamento da fase contínua. A forma geral das equações do modelo DPM para a conservação de massa e quantidade de movimento (Fluent, 2019), para a fase contínua, é expressa, conforme expressão 3.10 e 3.11:

$$\frac{\partial \rho_b}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_b \mathbf{u}_b) = S_{\Sigma\beta} \quad [3.10]$$

$$\frac{\partial \rho_\beta u_\beta}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_\beta u_\beta u_\beta) = -\nabla p_\beta + \nabla \cdot (u_\beta \nabla \cdot \mathbf{u}_\beta) + \rho_\beta \mathbf{g} + F_{DPM} + F_{\Sigma\beta} \quad [3.11]$$

Sendo $S_{\Sigma\beta}$ os termos fontes de troca de massa com a fase contínua ($S_{\Sigma\beta} = 0$ para o presente trabalho devido a não troca de massa entre as fases, pois admite-se a partícula inerte no meio fluido), F_{DPM} é o termo fonte do acoplamento para a troca de quantidade de movimento da fase discreta e $F_{\Sigma\beta}$ representa os outros termos fontes de forças que atuam sobre a fase contínua.

A trajetória da fase discreta é calculada através da solução do conjunto de equações diferenciais ordinárias (com base na segunda lei de Newton), representadas pelas expressões 3.12 e 3.13. O cálculo é feito através do balanço de forças que atuam sobre a partícula em relação à própria inércia da partícula. A determinação da velocidade e posição da partícula é resolvida pela integração gradual ao longo de cada passo de tempo da fase discreta. A integração ao longo do tempo da expressão 3.12 fornece a velocidade da partícula para cada ponto ao longo da trajetória calculada pela expressão 3.13, sendo o conjunto armazenado em um plano referencial lagrangeano. O conjunto de equações (movimento e posição) do modelo DPM, para a fase discreta, é expresso, de forma geral, por:

$$m_p \frac{du_p}{dt} = m_p \frac{18u_b}{\rho_p d_p^2} (\mathbf{u}_\beta - \mathbf{u}_p) + m_p + \frac{\rho_p - \rho_\beta}{\rho_p} \mathbf{g} + F_{\Sigma p} \quad [3.12]$$

$$\frac{dx_p}{dt} = \mathbf{u}_p \quad [3.13]$$

O primeiro termo (lado direito), equação 3.12, representa a força de arrasto, em função do número de Reynolds. O segundo termo agrupa a força de empuxo em conjunto com a força da gravidade. O último termo da equação, $F_{\Sigma p}$ (N), expressa as demais forças que podem ser incorporadas no modelo DPM (Lai, 2013). Neste trabalho será utilizado o modelo de arrasto de Gidaspow, (1994) selecionado no modelo da configuração da fase discreta no Fluent.

Uma característica particular do modelo DPM é a forma de representação do movimento das partículas, que são consideradas como pontos de massa em movimento. A forma e volume das partículas são tratadas como abstrações, cujos detalhes do escoamento ao redor da geometria das partículas (vórtices, descolamentos, camada limite) são negligenciados. Conforme exposto, o modelo DPM possui limitações essenciais em relação ao problema do presente trabalho. A primeira limitação é a inviabilidade de representar de forma correta o escoamento com alta concentração de partículas, que se faz necessário para os meios particulares. Esta limitação é suprida com a utilização do modelo DDPM (Seção 3.1.2), que modifica as equações da fase contínua, principalmente, pela inclusão do efeito da fração volumétrica de cada fase. Possibilitando assim analisar a influência da fase dispersa densa na fase contínua.

3.1.3 Modelo de Fase Discreta Densa – DDPM

O Modelo de Fase Discreta Densa DDPM (Dense Discrete Phase Model) é uma extensão do modelo DPM, disponível no código do programa ANSYS FLUENT, que permite a solução de problemas com alta concentração de partículas. O modelo DDPM considera a fração volumétrica das partículas na solução das equações da fase contínua, permitindo uma melhor troca de quantidade de movimento no acoplamento entre as fases. Na literatura, o modelo DDPM é considerado como um modelo híbrido, proposto por Popoff e Braun (2007), pois utiliza a abordagem Euler-Euler (para obter os campos médios das propriedades) em conjunto com a abordagem Euler-Lagrange (para obter a trajetória das partículas) (NIEMI, 2012). A combinação destas abordagens

fornece um conjunto de equações para o cálculo dos termos de acoplamento entre as fases e o cálculo da fração volumétrica de cada fase. A forma geral das equações do modelo DDPM para a conservação de massa e quantidade de movimento, para a fase contínua, é expressa, respectivamente, pela expressão 3.14 e 3.15 (POPOFF & BRAUM, 2007; CLOETE *et al.* 2010, 2016):

$$\frac{\partial \varepsilon_{\beta} \rho_{\beta}}{\partial t} + \nabla \cdot (\varepsilon_{\beta} \rho_{\beta} \mathbf{u}_{\beta}) = \sum (\dot{m}_{\beta\alpha} + \dot{m}_{\alpha\beta}) \quad [3.14]$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \varepsilon_{\beta} \rho_{\beta} \mathbf{u}_{\beta}}{\partial t} + \nabla \cdot (\varepsilon_{\beta} \rho_{\beta} \mathbf{u}_{\beta} \mathbf{u}_{\beta}) = & -\varepsilon_{\beta} \nabla p_{\beta} + \nabla \cdot (\varepsilon_{\beta} u_{\beta} \nabla \cdot \mathbf{u}_{\beta}) + \varepsilon_{\beta} \rho_{\beta} \mathbf{g} + \sum (K_{\alpha\beta} (\mathbf{u}_{\alpha} - \\ & \mathbf{u}_{\beta}) + \dot{m}_{\beta\alpha} \mathbf{u}_{\beta\alpha} - \dot{m}_{\alpha\beta} \mathbf{u}_{\alpha\beta}) + \mathbf{F}_{DPM} + \mathbf{S}_{DPM} \end{aligned} \quad [3.15]$$

Sendo ε_{β} a fração volumétrica da fase fluido, $\dot{m}_{\beta\alpha}$ e $\dot{m}_{\alpha\beta}$ representam a transferência de massa, respectivamente, da fase β para a fase α e da fase α para a fase β , ambas por unidade de volume da fase primária β (fluido), $u_{\beta\alpha}$ e $u_{\alpha\beta}$ são as velocidades de transporte entre as fases, determinadas em função do sentido da taxa de transferência da massa (e.g., para $m_{\alpha\beta} > 0$ significa que a fase α transfere massa para a fase β com velocidade $u_{\alpha\beta} = u_{\alpha}$), $K_{\alpha\beta}$ é o coeficiente de acoplamento entre as fases. F_{DPM} é o termo de acoplamento para a troca de quantidade de movimento devido as forças da fase discreta e o S_{DPM} é o termo fonte da fase discreta devido ao deslocamento da fase contínua em relação a entrada da fase discreta (partícula) em um determinado volume.

O acoplamento entre as fases é feito através do termo F_{DPM} , que incorpora a troca (ganho ou perda) de quantidade de movimento, devido à passagem da fase discreta através de cada volume de controle da malha computacional da fase contínua. O termo de acoplamento da quantidade de movimento é dado pela expressão 3.16:

$$\mathbf{F}_{DPM} = \sum \left(K_{p\beta} (\mathbf{u}_p - \mathbf{u}_{\beta}) + F_{\Sigma_{p\beta}} \right) \dot{m}_p \Delta t \quad [3.16]$$

Onde: $K_{p\beta}$ o coeficiente de acoplamento da força de arrasto (F_d) e $F_{\Sigma p\beta}$ as demais forças da fase discreta, incorporadas no DDPM, que possuem acoplamento com o fluido. Para o atual estudo, $F_{\Sigma p\beta}$ pode ser representada pelas forças de massa virtual F_{vm} e/ou de sustentação F_{ls} .

4. METODOLOGIA

Serão apresentadas neste capítulo as descrições destes estudos de caso e todos os materiais e métodos utilizados na obtenção dos resultados discutidos no capítulo 5, de tal forma a facilitar a sua apresentação e análise.

4.1 Descrição do Software e Hardware Utilizados

Os estudos descritos no presente trabalho foram realizados no laboratório de simulação computacional do Laboratório de Fluidodinâmica e Particulados da Universidade Federal do Pará (UFPA). Em todas essas simulações utilizou-se o software comercial ANSYS FLUENT 21, bem como computadores do tipo Workstation, em modo de processamento paralelo de memória dividida em uma máquina local, sempre com a utilização de 8 (oito) núcleos físicos de processamento. A tabela 4.1 mostra as especificações gerais de um dos computadores utilizados:

Tabela 4.1 – Especificações gerais de um dos computadores utilizados.

Parâmetros	Especificações
Tipo de computador	Workstation
Processador	Intel (R) Xeon (R) Gold CPU 6140 @ 2.3 GHz - 2.29 GHz (2 processadores: 36 núcleos físicos + 36 núcleos virtuais)
Memória (RAM)	128 GB
Tipo de sistema	Sistema Operacional Windows 10 de 64 Bits

Fonte: Autor (2021).

4.2 Estudo de Caso 1

Como não são fornecidas informações detalhadas nos manuais do software ANSYS FLUENT 21 sobre a formulação matemática do modelo de pacotes de partículas utilizado o modelo DDPM, optou-se por verificar as potencialidades desse modelo por meio de comparação com resultados disponíveis na literatura neste primeiro estudo. Após comprovada de forma

prática, essa abordagem será utilizada em todas as simulações do leito de alumina analisado no estudo de caso 2.

Aqui será descrito o procedimento realizado na simulação numérica para obtenção dos resultados para cálculo das vazões de despeiramento devido à queda de material granulado. O trabalho foi realizado em quatro etapas: a construção e discretização da geometria, as definições das condições de contorno e propriedades físicas das variáveis e em seguida a definição dos métodos computacionais oferecidos pelo Fluent.

O modelo físico que inspirou este estudo é baseado no mesmo analisado por Esmaili *et al.* (2015) e em Esmaili *et al.*, (2013) que foi desenvolvido para calcular a quantidade de ar arrastado para um material granulado de queda livre baseando-se na conservação do volume utilizando esferas de vidro e de plástico, variando seus tamanhos. Este trabalho comparou resultados teóricos obtidos com a equação 2 com resultados de análise por PIV (Velocimetria de Imagem de Partículas) realizado por Ansart *et al.*, (2009). O parâmetro específico de preocupação neste trabalho é a área da seção transversal da corrente que cai, ou diâmetro do fluxo, pois tem influência direta na quantidade de ar arrastado.

O esquema do modelo analisado pode ser observado na figura 4.1. Inicialmente pressupõe-se que a velocidade do ar que se move ao longo do cone é igual à velocidade de uma única partícula de queda livre com arrasto. Supõe-se também que a pressão é constante dentro do sistema e a gravidade como $9,8 \text{ m/s}^2$.



Figura 4.1 – Vista esquemática.

Fonte: Autor (2021).

A geometria utilizada para as simulações deste trabalho foi baseada no cone 3D apresentado na figura 4.2, utilizado como domínio e englobando o ambiente físico da saída da moega até a entrada do recipiente (mostrado na figura 4.1). As principais dimensões do cone são: $H = 1200$ mm representando a altura de queda; $d = 26$ mm representando a saída da tremonha; $D1 = 300$ mm representando o diâmetro da parte superior do cone $D2 = 500$ mm a inferior.

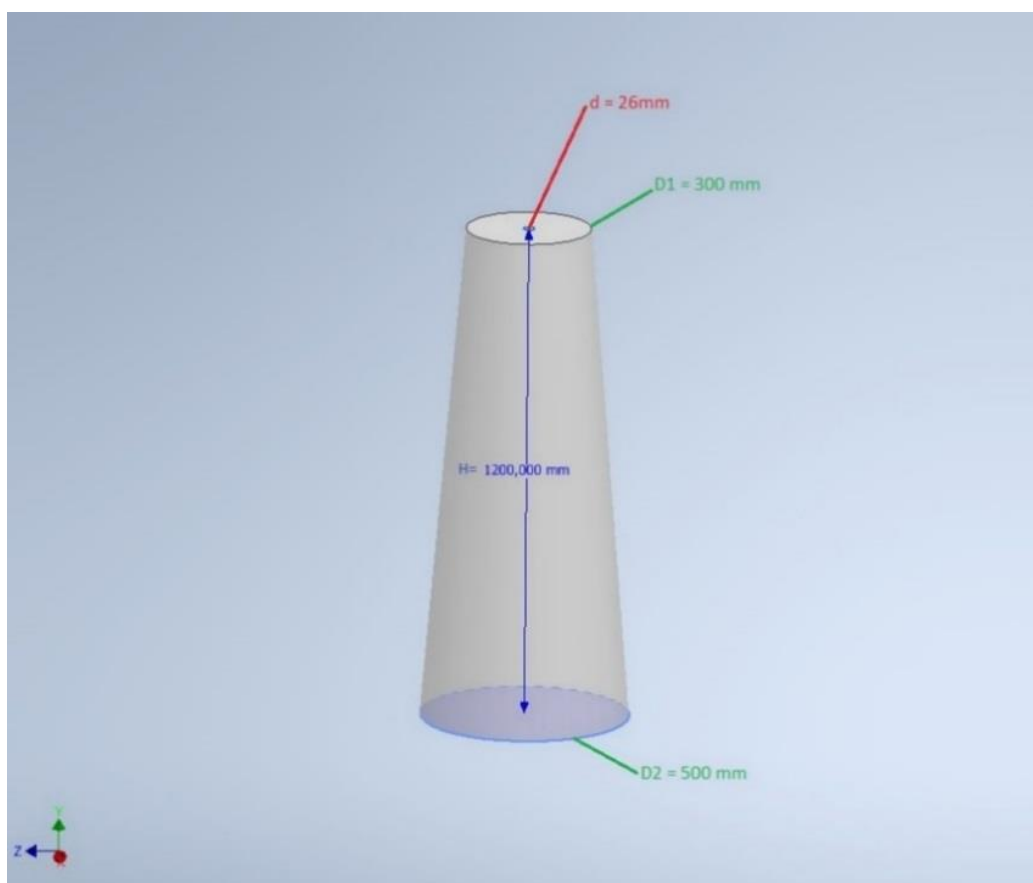


Figura 4.2 – Volume de controle da região cônica analisada.

Fonte: Autor, (2021).

O desenvolvimento da malha é um dos principais passos para se obter uma simulação eficaz. A qualidade da malha reflete diretamente na precisão dos resultados, além de influenciar diretamente na convergência do modelo em estudo. A Figura 4.3 mostra a malha gerada pelo software Ansys (v. 19.0).

Para uma dada propriedade conservada em um volume de controle, as equações de transporte são válidas para qualquer ponto infinitesimal dentro deste volume. Vale notar que a região do contorno afeta o comportamento da

propriedade conservada. Para a solução numérica, o domínio passa a ser discretizado sendo, portanto, composto de vários subdomínios. Este processo é chamado de geração da malha computacional. As equações diferenciais de transporte aplicadas ao escoamento de fluidos, ao serem discretizadas, formam um sistema linear de equações. A forma geométrica dos elementos de malha (subdomínios) afeta diretamente quão bem o domínio está representado e a acurácia da aproximação numérica da discretização das equações a serem resolvidas no espaço. As malhas não estruturadas são mais versáteis, com maior facilidade para adaptar-se e adequada na discretização de geometrias irregulares (MALISKA, 2004).

Neste estudo, o domínio de discretização foi conduzido em subdomínio 3D do volume de controle analisado (malha) estruturado, usando elementos hexaédricos. Os dados das malhas usadas no desenvolvimento deste trabalho estão apresentados na tabela 4.1, na qual foram utilizados 4 tamanhos de malhas diferentes de modo a verificar a convergência dos resultados com base na variação de tamanho de seus elementos, sem que sofram grandes alterações nos resultados, adquirindo assim uma malha que possa representar o resultado com menos erros possíveis. Os testes de convergência foram feitos através da velocidade do ar e do sólido na saída do volume de controle (utilizando esferas de plástico de 3 mm). Com um parâmetro de qualidade de malha de Skewness máximo em 0,76 (Bom), foi selecionado a malha 4 com tamanho de elemento de 3mm para as simulações.

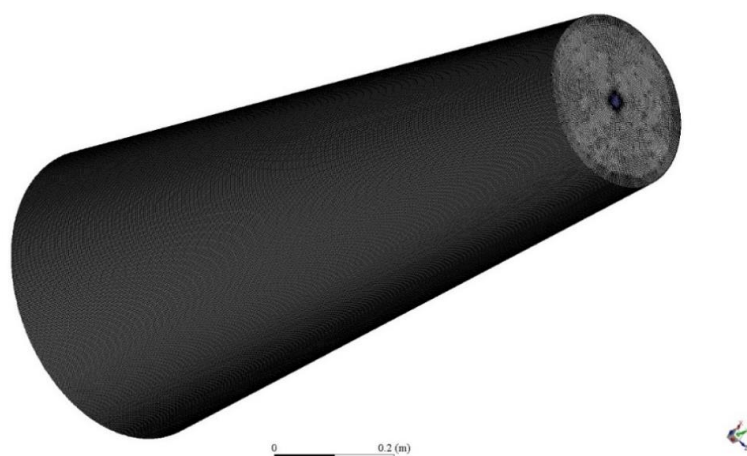


Figura 4.3 – Malha 4 gerada para análise.

Fonte: Autor (2021).

Os principais dados das malhas analisadas podem ser vistos na tabela abaixo:

Tabela 4.2 – Análise de convergência de malha para esfera de plástico de 3mm

Malha	Tamanho de Elemento	Nº de elementos	Nº de nós	Velocidade média do Ar a 1200mm(m/s)	Velocidade média do Solido a 1200mm(m/s)
1	10mm	1536473	275843	1,13	3,57
2	5mm	4034121	743300	1,31	3,84
3	4mm	7853467	1165982	1,35	3,91
4	3mm	9503131	1707450	1,37	4,05

Fonte: Autor (2021).

As configurações das condições de contorno estão resumidas na tabela 4.3 e demonstradas na figura 4.4, admitindo a densidade do ar de 1,185 kg/m³, a pressão de saída (P) como ambiente assim como nas paredes. Os materiais e os suas propriedades foram selecionadas de modo a analisar o efeito do próprio diâmetro da partícula e de sua densidade na quantidade de ar arrastado.

Tabela 4.3 – Configuração das condições de contorno para execução da simulação

Material	Densidade (kg/m ³)	Tamanho médio de partícula = D(mm)	Fluxo de massa na saída da moega = Q (kg/s)	Velocidade de entrada = V (m/s)
Esferas de Plástico de 3 mm	870	3,0	0,09	0,35
Esferas de Vidro 3 mm	2450	3,0	0,34	0,47
Esferas de Vidro 6 mm	2450	6,0	0,26	0,37

Fonte: Adaptado de Esmaili *et al.*, (2015).

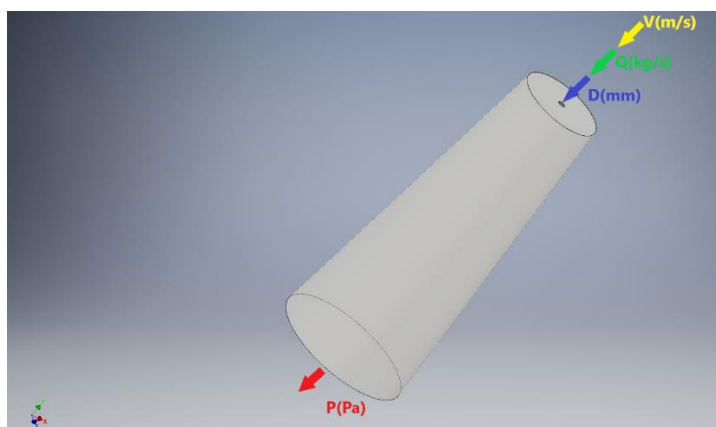


Figura 4.4 – Aplicação das condições de contorno.

Fonte: Autor (2021).

O software aplica o Método de Volumes Finitos para discretizar as equações. O modelo aqui utilizado foi o DDPM (Modelo de Fase Discreta e Densa) para analisar a fluidodinâmica de materiais particulados em meio fluido. A abordagem estacionária foi utilizada para atingir a convergência, as paredes laterais são abertas ao meio ambiente. Assim as configurações de modelagem utilizadas seguem na tabela 4.4 abaixo:

Tabela 4.4 – Configuração de modelagem CFD.

Parâmetros	Configuração
Modelo	Euleriano - DDPM
Fase contínua	Ar
Fase Dispersa	Partículas esféricas
Turbulência	k- ω /SST
Entrada	Velocidade entrada
Saída	Pressão Atmosférica Ambiente

Fonte: Autor (2021)

4.3 Estudo de Caso 2

O presente estudo será realizado tomando como base um sistema de captação de poeira estudado por de Wang *et al.*, (2016). De maneira semelhante ao caso 1 será descrito o procedimento realizado na simulação numérica para obtenção dos resultados de captação do sistema de despoejamento devido à queda de material granulado. Para este estudo utilizou-se princípios computacionais semelhantes ao caso anterior. O aparato experimental é demonstrado na figura 4.5 abaixo:

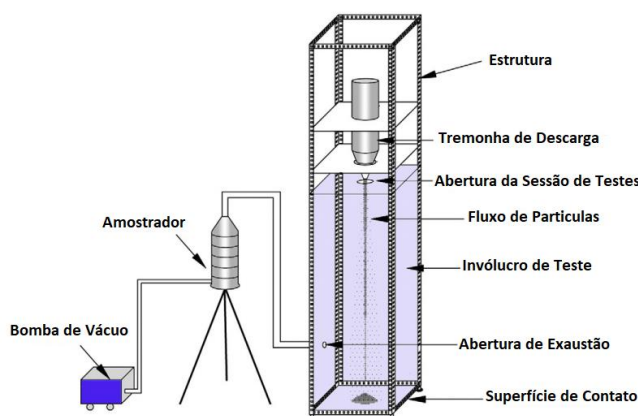


Figura 4.5 – Aparato Experimental.

Fonte: Adaptado de Wang *et al* (2016).

A quantidade de material capturada (em gramas) é dividida pelo total de material utilizado (kg) no experimento. O autor utiliza um número adimensional (η_r) para plotar a geração de poeira em cada experimento na figura abaixo 4.6 abaixo:

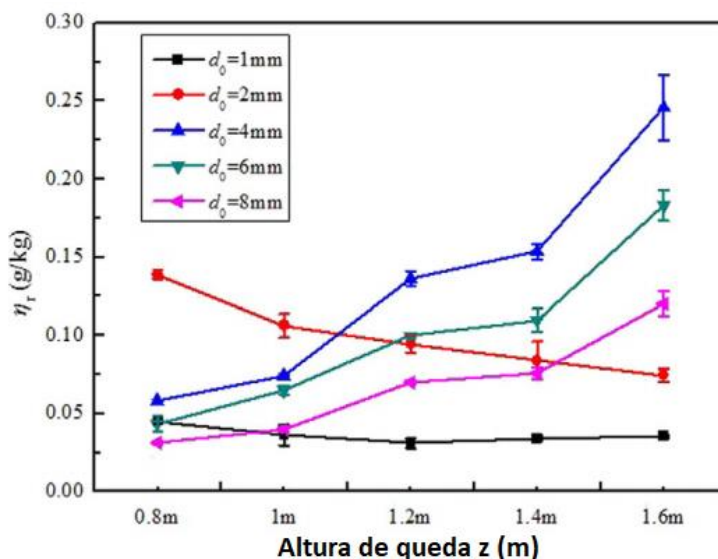


Figura 4.6 – Resultados Experimental.

Fonte: Adaptado de Wang *et al.*, (2016).

O volume de controle analisado tratasse do invólucro de teste do aparato experimental. As geometrias do experimento foram modeladas para cada altura, onde apresentam as dimensões de 600 mm de largura, 600 mm de comprimento e variando as alturas de 800mm, 1000mm, 1200mm, 1400mm e 1600mm conforme a execução dos experimentos, a figura 4.7 demonstra um modelo para a altura de 800mm. Em seguida foram definidas as entradas e saídas assim como no experimento prático, com a saída da tremonha de 8mm, circundada pela saída do invólucro para a atmosfera considerada de 100mm. A sucção de saída para a bomba de vácuo é dada por um tubo de 15mm.

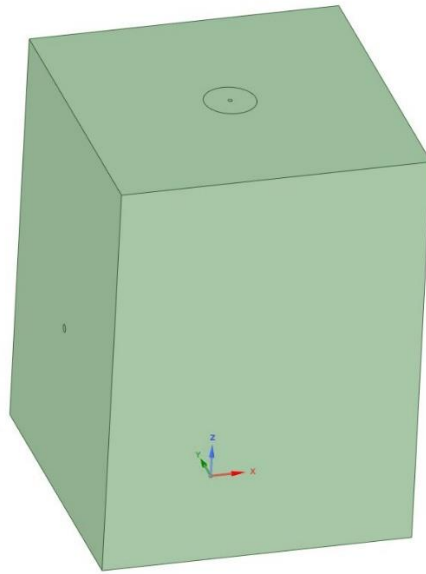


Figura 4.7 – Geometria de 800mm de altura.

Fonte: Autor (2021).

O autor não especificou a altura da saída para a sucção da bomba em relação ao solo, logo foi considerado uma altura razoável de 350mm em relação ao fundo da caixa. Com a definição das entradas, saídas e paredes, foi gerado a malha para cada caixa (figura 4.8):

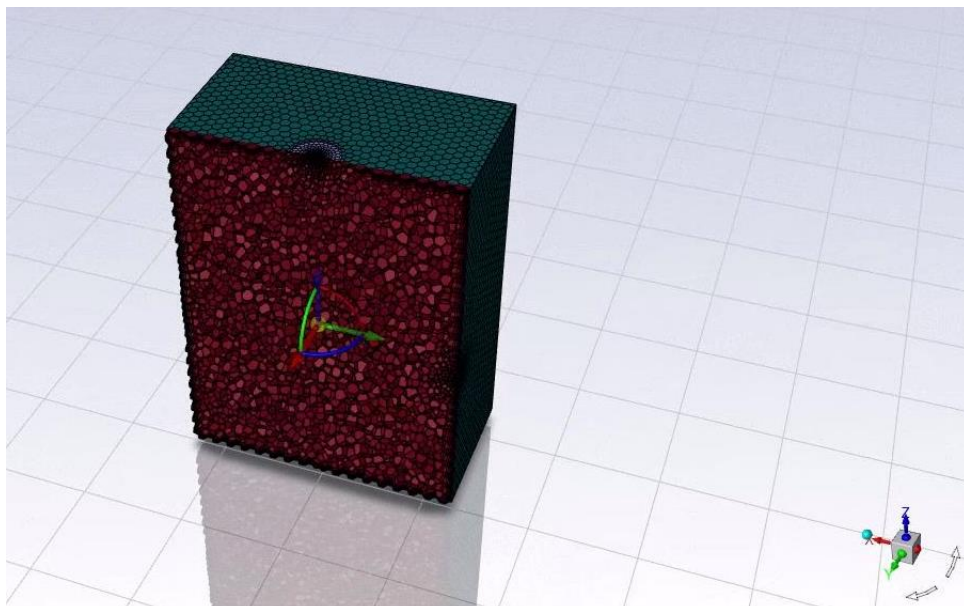


Figura 4.8 – Malha para as Caixas.

Fonte: Autor, (2021).

Todas as caixas tiveram com a qualidade de Skewness máxima de aproximadamente 0,59 e Orthogonal Quality mínima de 0,4, os elementos são predominantemente poliedros, sendo classificada como uma boa malha. O tamanho de elemento máximo utilizado foi de 50mm.

Foi selecionado para a realização da simulação o experimento com o diâmetro de saída da tremonha de 8mm, as condições de contorno são demonstradas na figura 4.10 e na tabela 4.5. A quantidade de material utilizado em cada experimento é de 100g. As condições de contorno foram configuradas tentando ao máximo ser fiel ao experimento prático, com algumas considerações. A configuração da injeção nos permite selecionar a distribuição de diâmetros, o tempo e a quantidade de diâmetros injetada no domínio. A distribuição granulométrica do material utilizado é demonstrada na figura 4.9 abaixo, sendo que para a simulação adotou-se o tamanho médio de $9,5\mu\text{m}$, o máximo de $200\mu\text{m}$ e o mínimo de $10\mu\text{m}$, com um total de 10 diâmetros selecionados para a execução da simulação através da distribuição de Rosin-Rammler presente no Fluent:

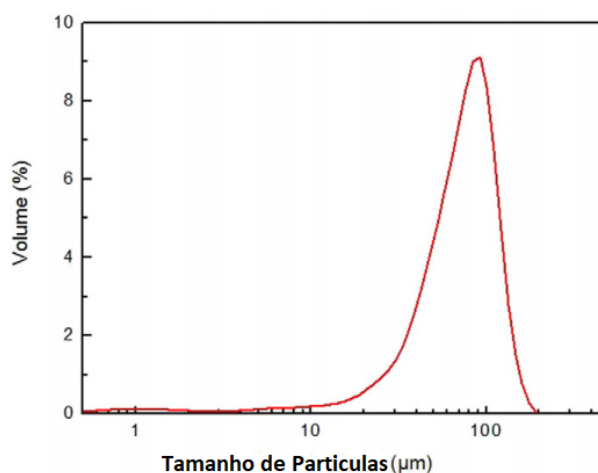


Figura 4.9 – Tamanho de Partículas do experimento.

Fonte: Adaptado de Wang *et al.*, (2016).

Com a condição de contorno de fluxo de massa selecionada na saída da caixa, é possível mudar o sinal da componente x (-1) da saída para gerar uma sucção de ar no sistema, que junto a interação das partículas com o ar do modelo DDPM façam com que elas sejam capturadas pela função “escape” do selecionada na opção da fase discreta na saída. O valor de $0,000607\text{ kg/s}$ foi

obtido transformando 28,3 L/min em kg/s de ar. Admitindo que o ar, é composto basicamente de 21% de O₂ E 79% DE N₂.

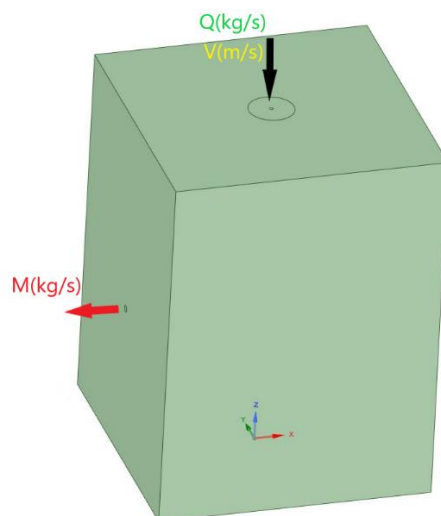


Figura 4.10 – Aplicação das condições de contorno.

Fonte: Autor (2021).

Tabela 4.5 – Configuração das condições de contorno para execução da simulação

Material	Densidade da Partícula (kg/m ³)	Fluxo de massa na saída da moega = Q (kg/s)	Velocidade de saída da moega = V (m/s)	Fluxo de Saída da Caixa = M(kg/s)	Tempo de Injeção = T (s)
Fluoreto de Alumínio	2838,08	1.1921 x10 ⁻⁵	5,4 x10 ⁻⁵	0,000607	8388,56

Fonte: Autor (2021).

A simulação foi configurada em modelo transiente, com Solver do tipo Pressure-Based e a formulação da velocidade Absolute. Gravidade de 9,81m/s² no eixo negativo de “z”. O acoplamento das equações de velocidade e pressão também é realizado usando o algoritmo SIMPLE Phase coupled. Assim as configurações de modelagem utilizadas seguem na tabela 4.4 abaixo:

Tabela 4.6 – Configuração de modelagem CFD.

Parâmetros	Configuração
Modelo	Euleriano - DDPM
Fase continua	Ar
Fase Dispersa	Partículas esféricas
Turbulência	k- ω /SST
Paredes	Reflexão das Partículas
Entrada	Velocidade entrada
Saída	Fluxo de massa

Fonte: Autor (2021)

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nesta seção serão apresentados os resultados obtidos por meio das simulações computacionais realizadas com o modelo proposto, para avaliar o escoamento gás-sólido

5.1 Estudo de Caso 1

Os resultados serão expostos por imagens 3D e 2D (Planos X-Y) da geometria estudada, com a finalidade de avaliar a performance de três materiais escolhidos em relação à altura de queda de 1200 mm, analisando assim seu contorno de velocidade e a quantidade de ar arrastado, além de características inerentes ao escoamento visualizadas através das simulações. A seguir também é apresentado os resultados e comparando com os de Esmaili *et al.* (2015) e Esmaili *et al.* (2013). A figura 5.1 apresentam um gráfico com as velocidades encontradas para os materiais particulados simulados em comparação com os experimentos, já a figura 5.2 representa o contorno de velocidade do ar sob ação da queda destes materiais.

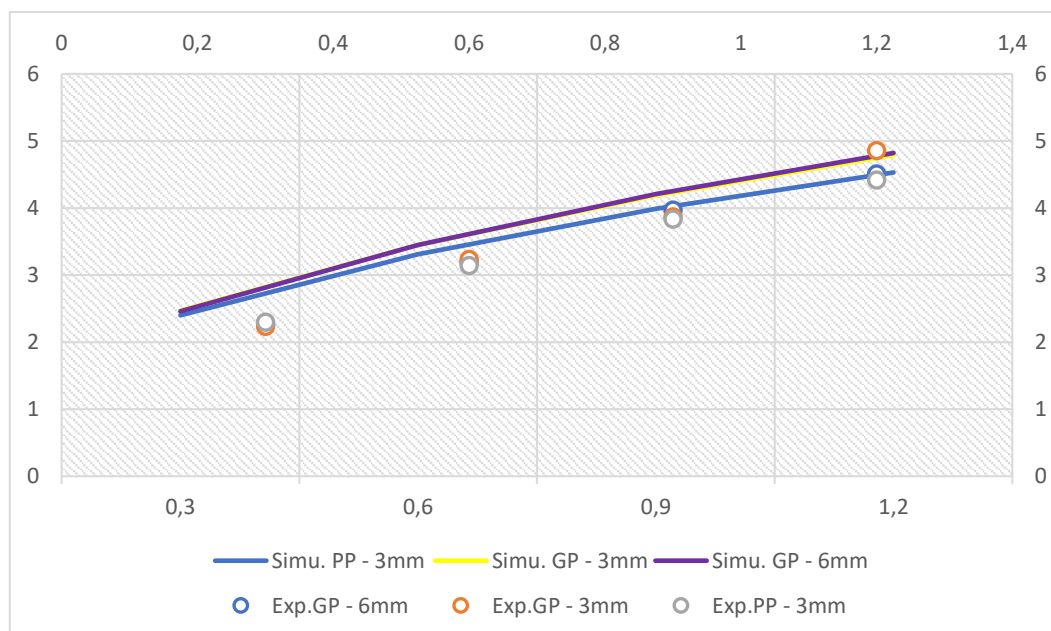


Figura 5.1 - Velocidade das esferas de plástico de 3mm , esferas de vidro de 3mm e esferas de vidro de 6mm comparadas com o experimento prático.

Fonte: Autor, (2021).

Com base no gráfico da figura 5.1 é possível observar que a velocidade das partículas na simulação realizada neste trabalho foi muito próxima do trabalho experimental realizado por Esmaili *et al.*, (2013). Além do mais, com base nos resultados da simulação mostrado na figura 5.2 é possível notar uma dispersão muito grande do campo de velocidade do ar induzido (de dentro para fora do fluxo) causando um destacamento em relação ao ar das redondezas à medida que a altura de queda vai aumentando. Esse resultado corrobora com os dados demonstrados nos trabalhos de Esmaili *et al.*, 2013) e Esmaili *et al.* (2015).

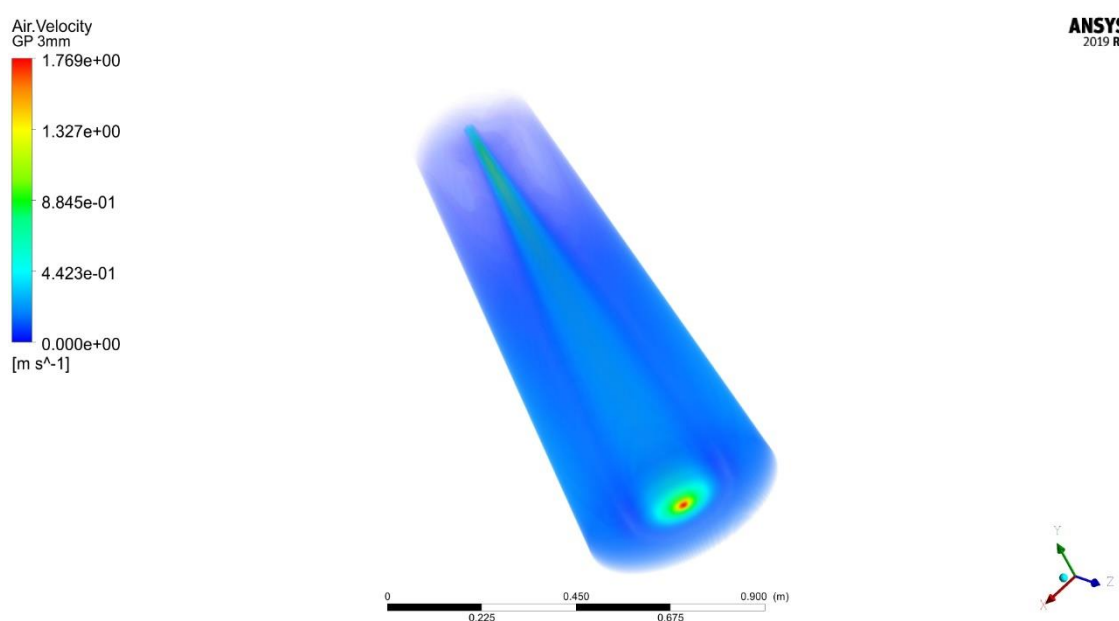


Figura 5.2 – Demonstração 3D do campo de velocidade do ar para das esferas de vidro de 3mm.

Fonte: Autor (2021).

Agora na figura 5.3 com o volume de controle em um plano 2D (Z, Y), pode-se observar que as esferas de plásticos com mesmo diâmetro das esferas de vidro apresentaram velocidade máxima do ar menor, isso deve-se ao fato da influência de uma maior massa das esferas de vidro. Além disso, é possível observar também que as esferas com maior massa tendem a se concentrar mais no centro do fluxo do que as esferas de menor massa, principalmente na região final do volume de controle, proporcionando uma velocidade maior do ar. A influência do tamanho da partícula para um mesmo material pode ser observada quando se compara os resultados da partícula de 3 e 6 mm de vidro, onde é

possível notar que a partícula de vidro menor com 3 mm apresenta velocidade do fluxo de ar circundante maior do que para partícula maior de 6 mm. Como resultado disso, o ar circundante para partículas maiores terá uma velocidade do ar menor e um fluxo mais disperso do que uma queda com fluxo de partículas menores. O gráfico da figura 5.4 demonstra os resultados para a velocidade do ar na seção de 900mm de queda, esse perfil de velocidade pode ser relacionado com a forma inconstante do fluxo de um material granulado em queda livre, concentrado sua maior velocidade no centro do fluxo.

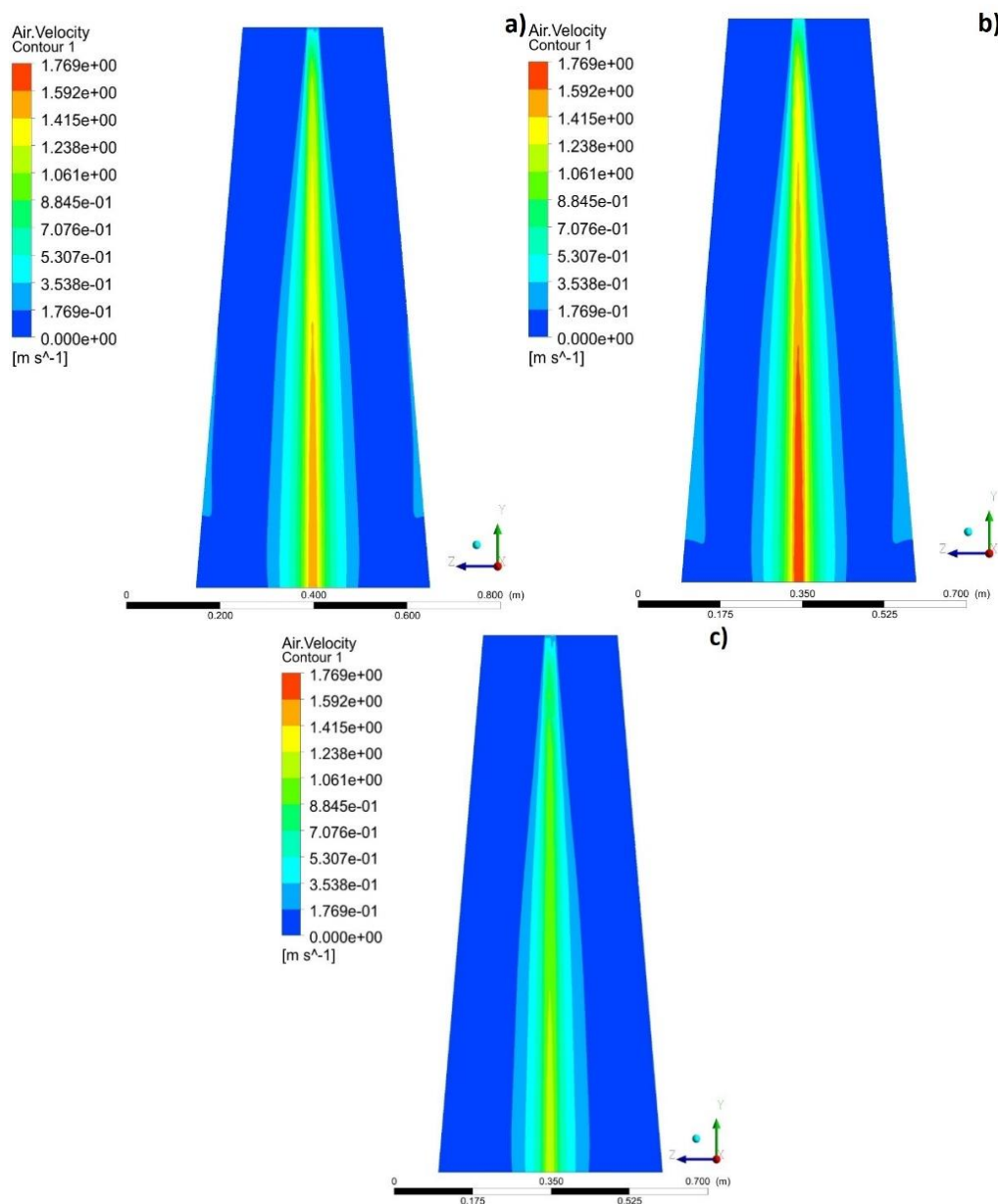


Figura 5.3 - Velocidade do ar das esferas de plástico de 3mm(a); Velocidade do ar das esferas de vidro de 3mm(b); Velocidade do ar das esferas de vidro de 6mm (c).

Fonte: Autor, (2021).

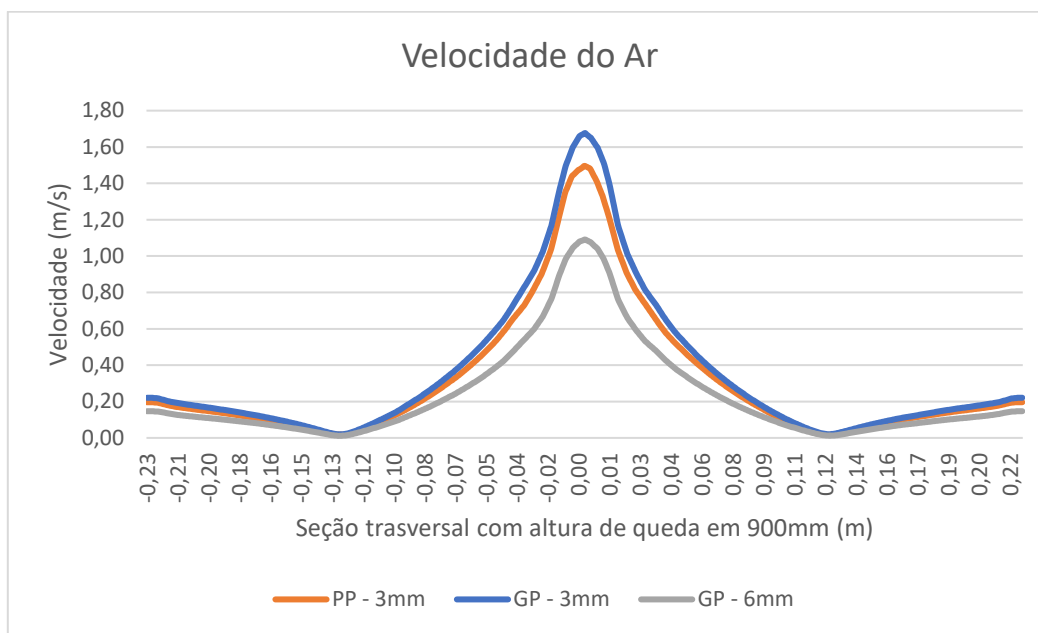


Figura 5.4 – Resultados da simulação para a distribuição da velocidade do ar na seção de 900mm de altura.

Fonte: Autor, (2021).

O gráfico da figura 5.5,5.6 e 5.7 mostram a variação de velocidade do ar em relação à altura levando em consideração o centro do fluxo de ar arrastado:

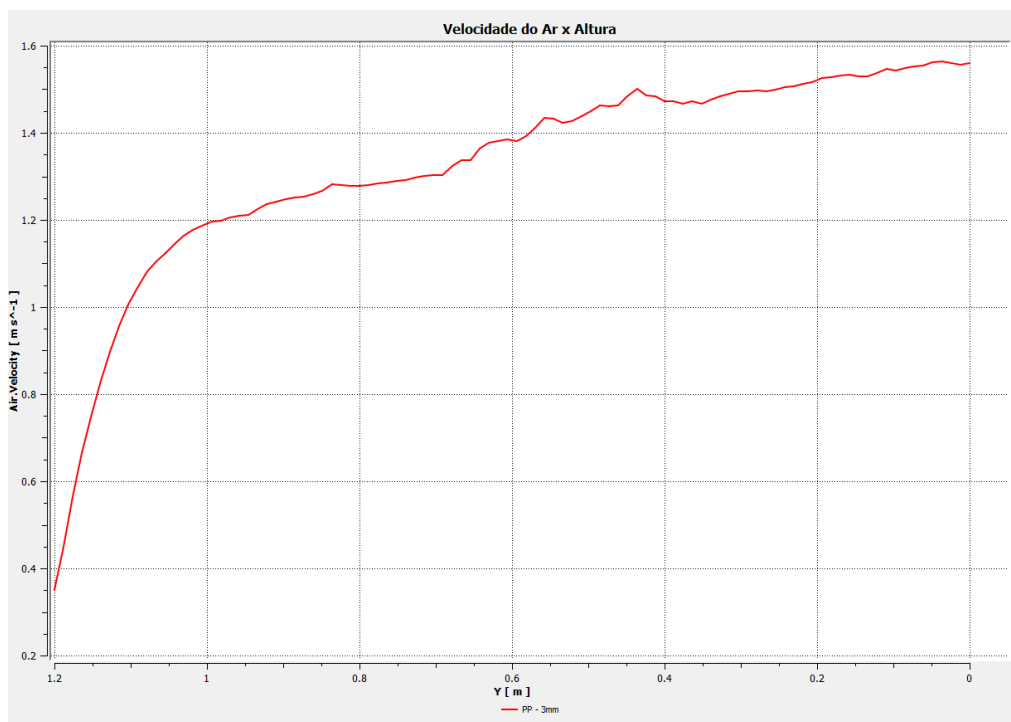


Figura 5.5 - Perfil de Velocidade do ar para as esferas de plástico de 3mm.

Fonte: Autor, (2021).

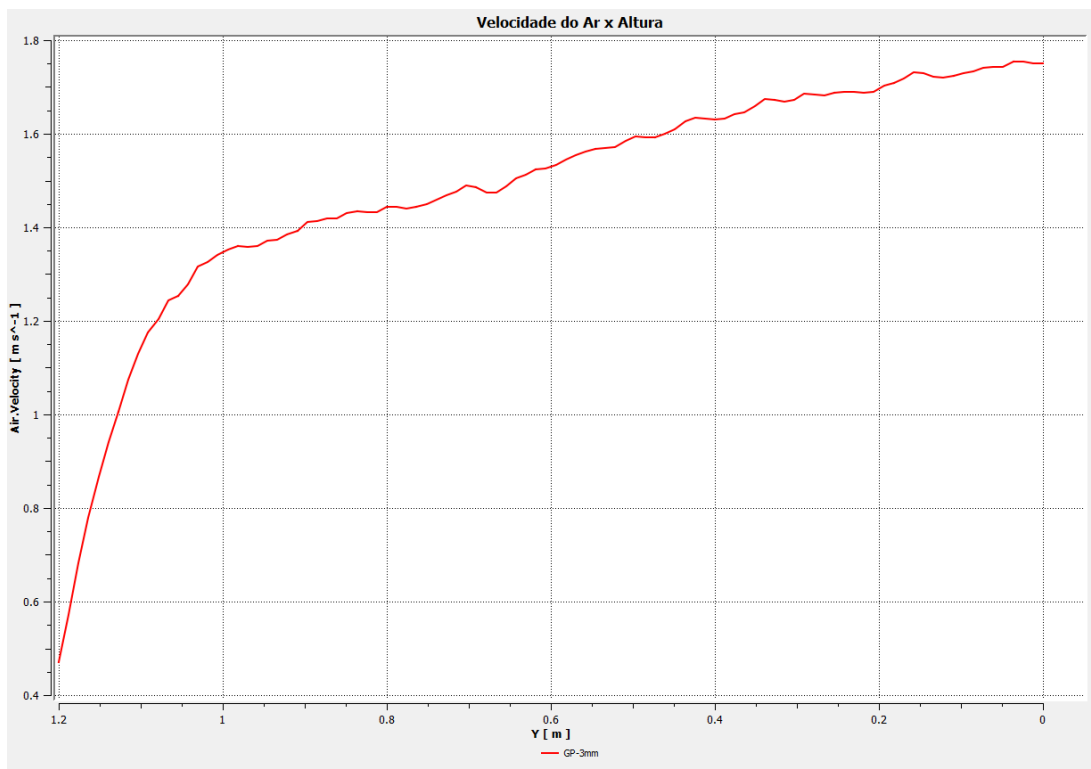


Figura 5.6 - Perfil de Velocidade do ar para as esferas de vidro de 3mm.

Fonte: Autor (2021).

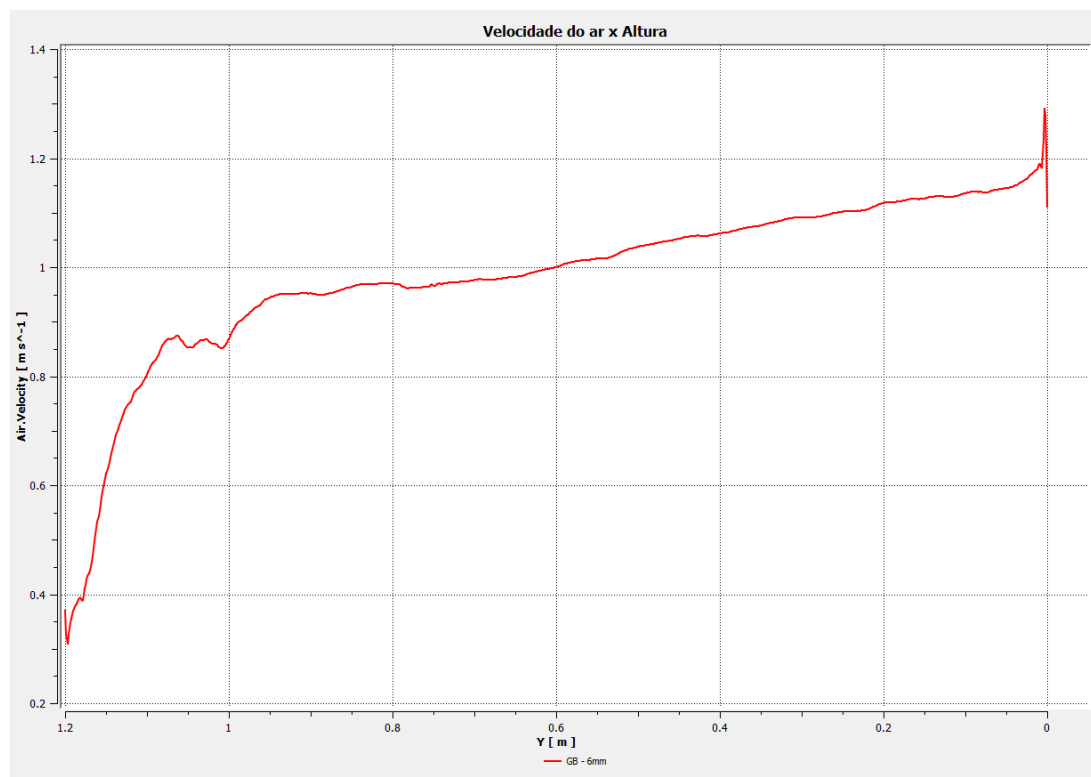


Figura 5.7 - Perfil de Velocidade do ar para as esferas de vidro de 6mm.

Fonte: Autor (2021).

A partir da obtenção dos dados das velocidades do ar (v) é possível fazer análise do volume de ar induzido referente a cada altura com base na velocidade média do ar na seção transversal do diâmetro de fluxo, os dados obtidos da simulação foram usados junto com o diâmetro de fluxo (D) obtido experimentalmente por Esmaili *et al.*, (2013). Os valores de vazão foram obtidos através dos fluxos de volume dado pela expressão 5.1 para cada simulação realizada:

$$\frac{\Delta V}{\Delta t} = A \cdot v \quad [5.1]$$

Tabela 4.1 – Propriedades do fluxo – PP – 3mm.

PP-3 mm	Diâmetro do fluxo(mm)			
Altura	0,3m	0,6m	0,9m	1,2m
Diâmetro- D(m)	0,031	0,03469	0,03825	0,04095
Área(m²)	0,000754	0,000945	0,001149	0,001316
Vel.(m/s)	0,95	1,17	1,26	1,11

Fonte: Autor (2021)

Tabela 4.2 – Propriedades do fluxo – GP – 3mm.

GP-3mm	Diâmetro do fluxo(mm)			
Altura	0,3m	0,6m	0,9m	1,2m
Diâmetro- D(m)	0,03526	0,04237	0,04351	0,0472
Área(m²)	0,000976	0,001409	0,001486	0,001749
Vel. - V(m/s)	1,14	1,25	1,37	1,4

Fonte: Autor (2021)

Tabela 4.3 – Propriedades do fluxo – GP – 6mm.

GP-6mm	Diâmetro do fluxo(mm)			
Altura	0,3m	0,6m	0,9m	1,2m
Diâmetro- D(m)	0,06114	0,07905	0,09384	0,10294
Área(m²)	0,002934	0,004905	0,006913	0,008318
Vel. - V(m/s)	0,82	0,99	1,01	1,11

Fonte: Autor (2021)

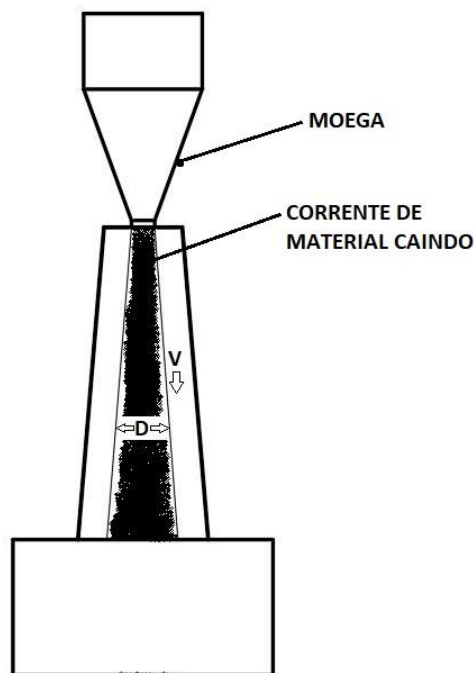


Figura 5.8 – Vista esquemática do fluxo de partículas em queda livre.

Fonte: Autor (2021).

A figura 5.9 mostra o gráfico do deslocamento de ar em relação à altura de queda de material para as esferas de plástico de 3 mm para o trabalho numérico de Esmaili *et al.* (2015), experimento prático de Esmaili *et al.*, (2013), do resultado previsto pela Equação 2.54 e os da simulação usando o modelo Euleriano DDPM neste presente trabalho. Ao analisar a quantidade de ar arrastado pelas partículas de plástico de 3 mm, a simulação aqui realizada mantém boa correlação com os experimentos práticos de Esmaili *et al.*, (2013), porém na figura 5.10 para as esferas de vidro de 3 mm pode-se observar que o resultado da simulação superestima ligeiramente os resultados dos trabalhos experimentais, porém mantém uma boa correlação com a equação 2.54, de maneira semelhante ocorre na figura 5.11 para as esferas de vidro de 6 mm.

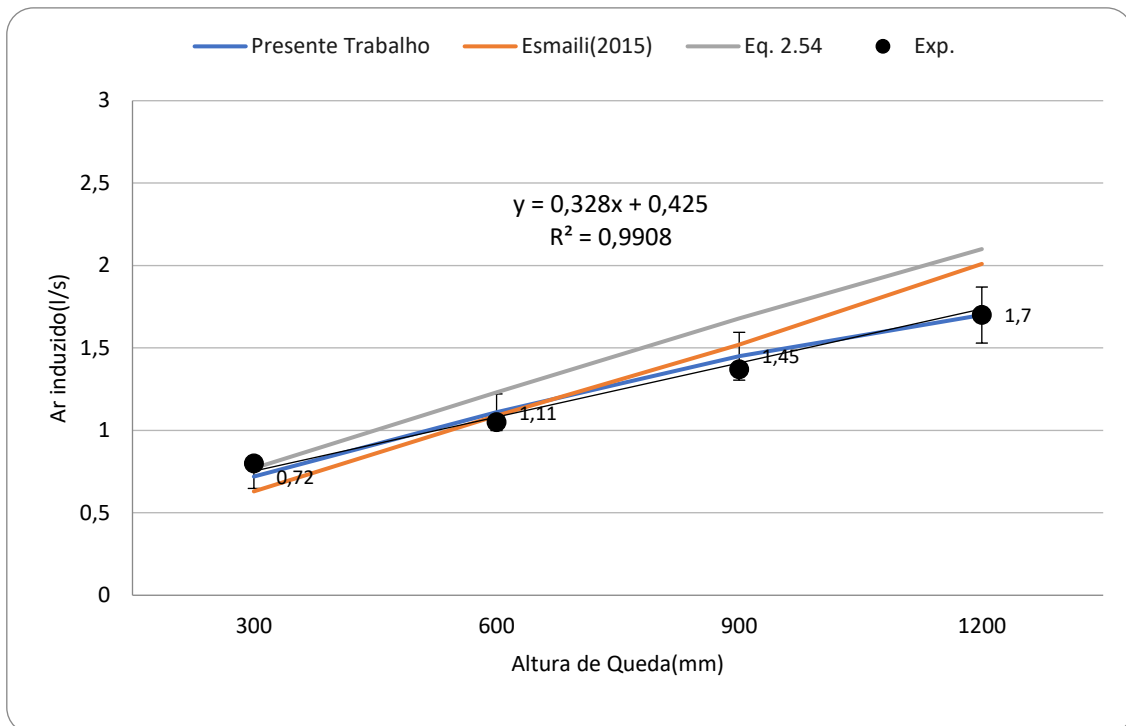


Figura 5.9 - Deslocamento de ar em relação à altura de queda para as esferas de plástico de 3mm usando uma correlação linear.

Fonte: Autor (2021).

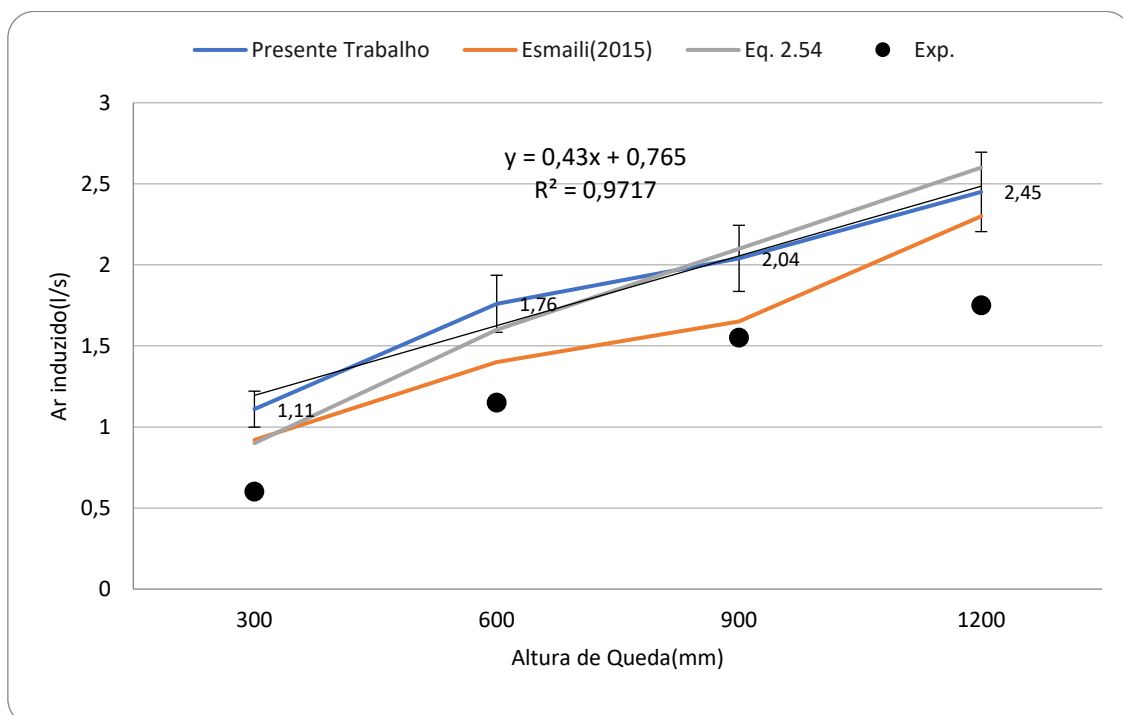


Figura 5.10 - Deslocamento de ar em relação à altura de queda para as esferas de vidro de 3mm usando uma correlação linear.

Fonte: Autor (2021).

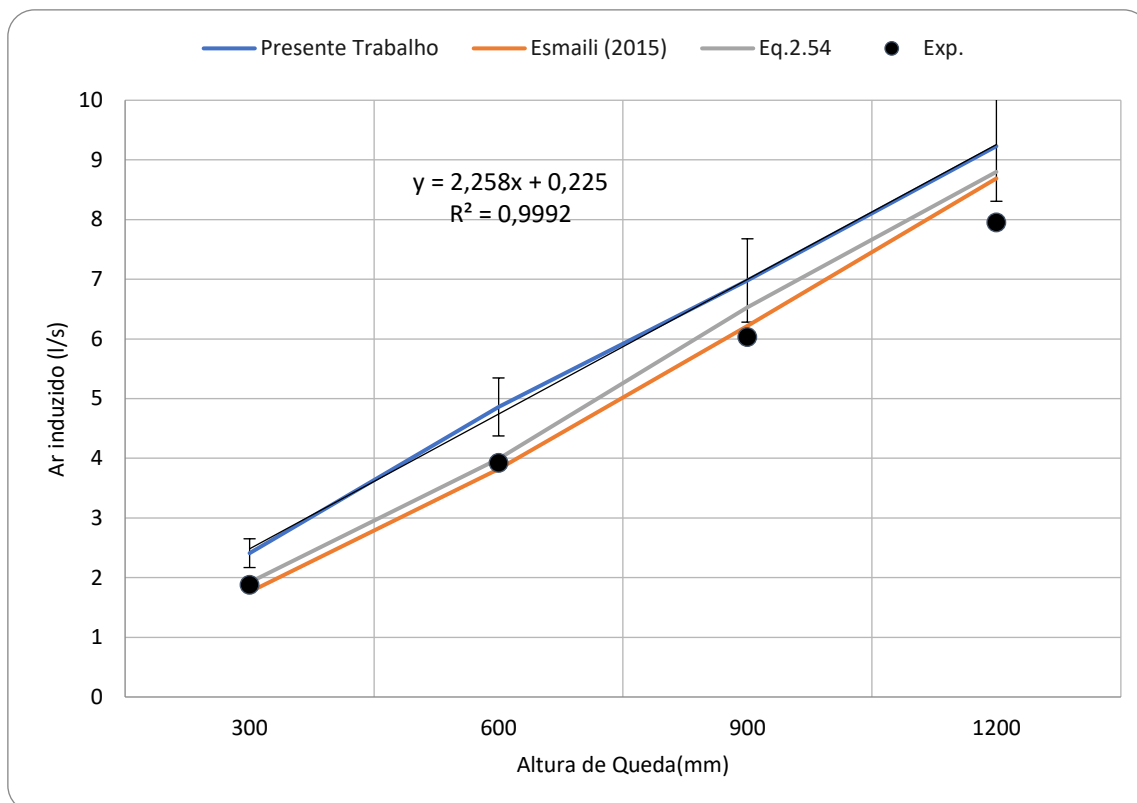


Figura 5.11 - Deslocamento de ar em relação à altura de queda para as esferas de vidro de 6mm usando uma correlação linear.

Fonte: Autor (2021).

De maneira semelhante ao que foi demonstrado na figura 5.8, é possível fazer uma análise e propor uma solução empírica para a quantidade de ar arrastado durante a queda de matérias granulares, baseando-se a partir da obtenção dos valores dos gráficos da velocidade do ar arrastado (\mathbf{V}) apresentados nas figuras 5.5 a 5.7. A figura 5.12 demonstra uma correlação onde fluxo de massa do ar induzido (\mathbf{M}_{ai}) é igual à quantidade de fluxo de massa de ar que se chocará e gerará a poeira (\mathbf{M}_{ac}), conforme demonstrado na equação 5.2:

$$\mathbf{M}_{ai} = \mathbf{M}_{ac} \quad [5.2]$$

$$\mathbf{M}_{ac} = \int \rho \cdot \mathbf{V} \cdot dA$$

Onde ρ vem da massa específica do ar, \mathbf{V} a velocidade do ar, ambos em função da área de queda.

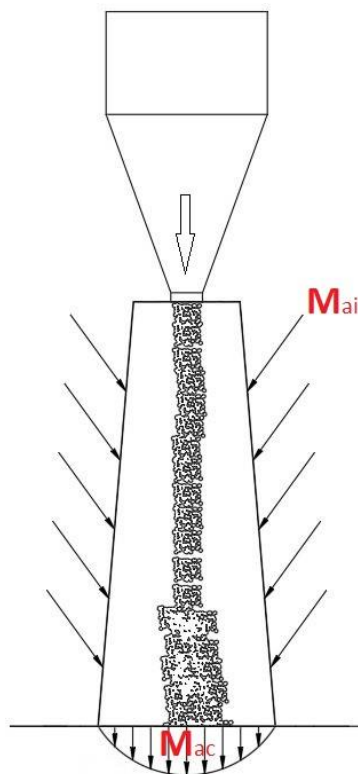


Figura 5.12 – Correlação da massa de ar induzido deslocado em relação à altura de queda após o impacto, levando em consideração a velocidade do ar arrastado.

Fonte: Autor, (2021).

5.2 Estudo de Caso 2

No estudo de caso 2 procurou-se avaliar a simulação do DDPM tal como foi modelado por meio da utilização de ferramentas disponível no software, bem como avaliar o efeito do uso de partículas de tamanhos variados ou de partículas representativas sobre o tempo de simulação. Nas figuras 5.12 a 5.15 é possível observar as partículas menores em suspensão e as maiores no fundo da caixa ao longo do tempo na simulação para a altura de 800mm do presente trabalho. O Gráfico da imagem 5.16 demonstra ainda a quantidade de material que é sugado pela exaustão em função do tempo de simulação para a caixa de 800mm de queda:

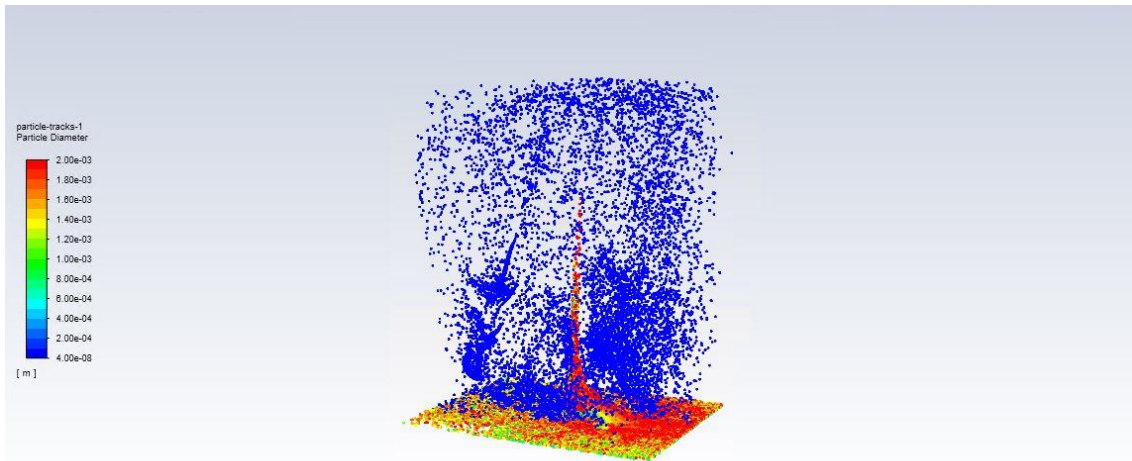


Figura 5.13 - Caixa de 800mm de queda em 250 segundos.

Fonte: Autor (2021).

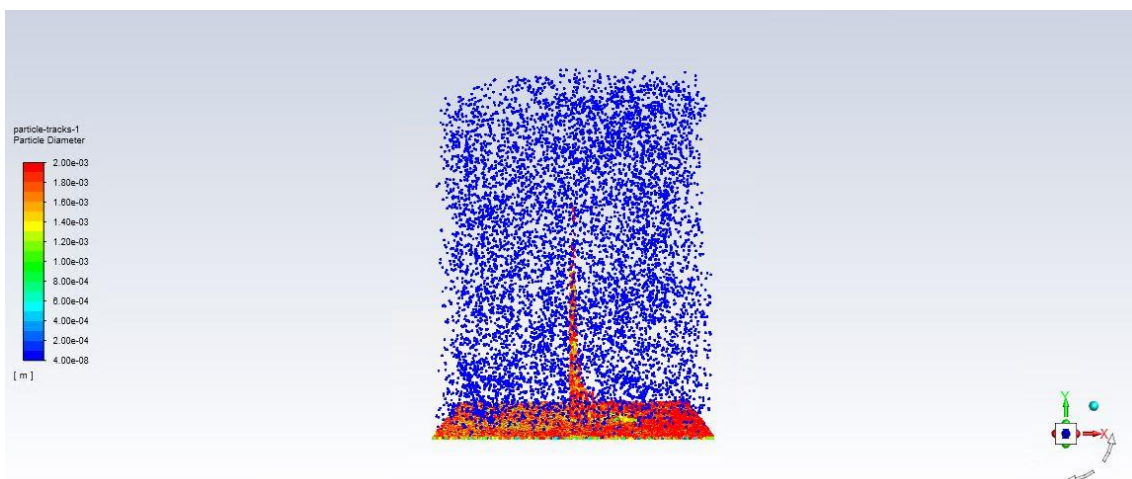


Figura 5.14 - Caixa de 800mm de queda em 585 segundos.

Fonte: Autor (2020).

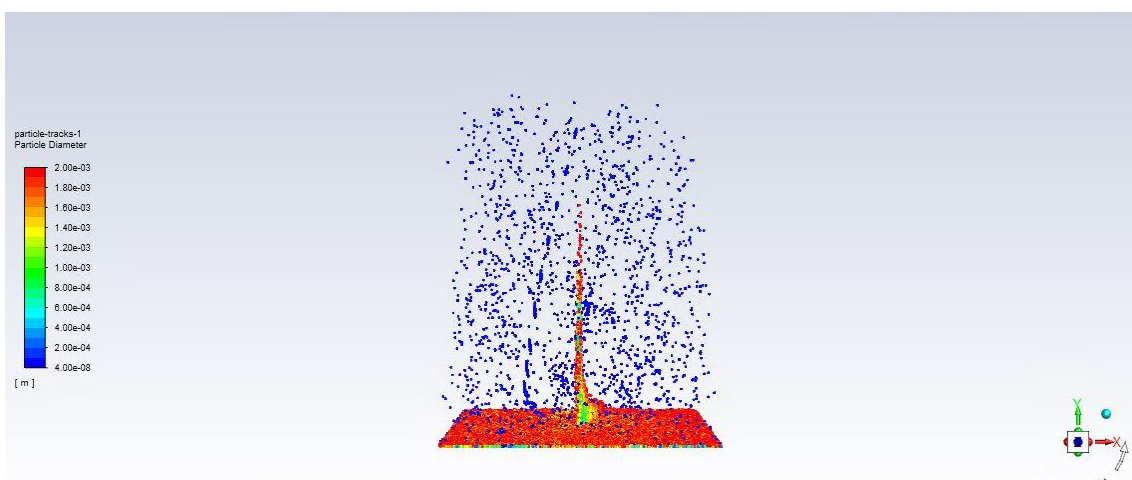


Figura 5.15 - Caixa de 800mm de queda em 1500 segundos.

Fonte: Autor (2021).

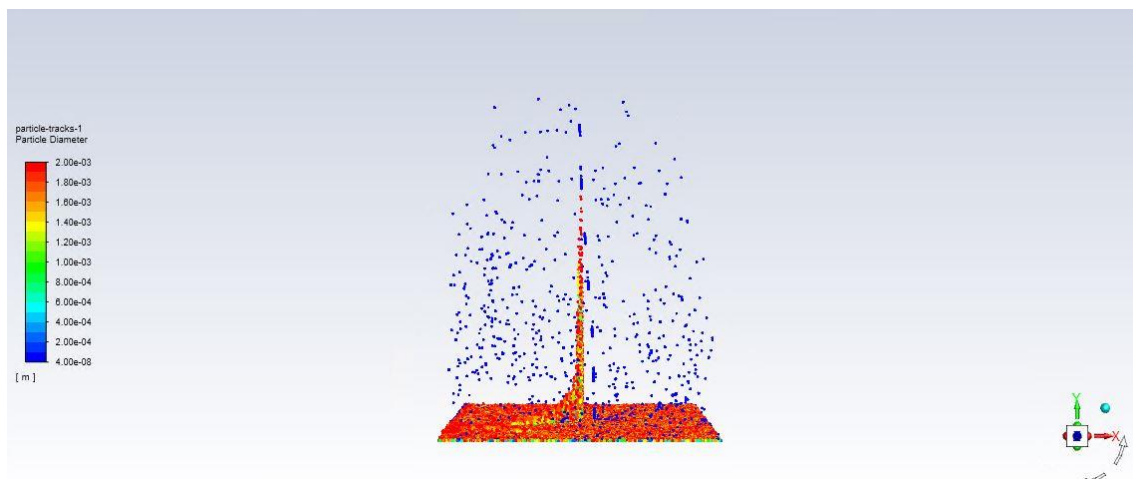


Figura 5.16 - Caixa de 800mm de queda em 2200 segundos.

Fonte: Autor (2020).

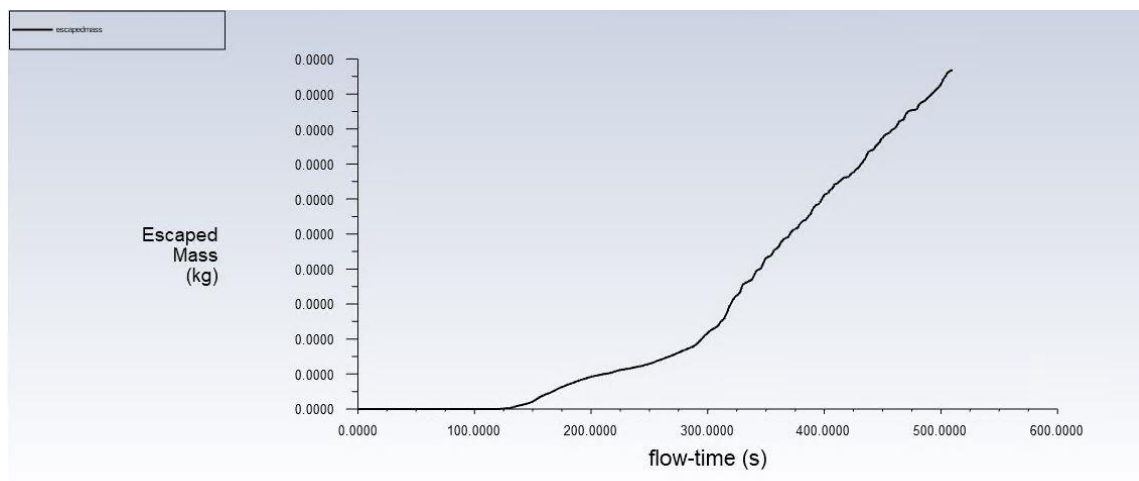


Figura 5.17 - Gráfico disponível no Fluent da caixa de 800mm demonstrando a saída de massa em relação ao tempo.

De maneira semelhante os estudos foram realizados para as demais caixas. Conforme as figuras 5.17 a 5.24 Ao longo das simulações foi percebido uma inconsistência no modelo à medida que a altura de queda aumentava, pois, o material começava a ser sugado antes de acontecer o impacto com a superfície.

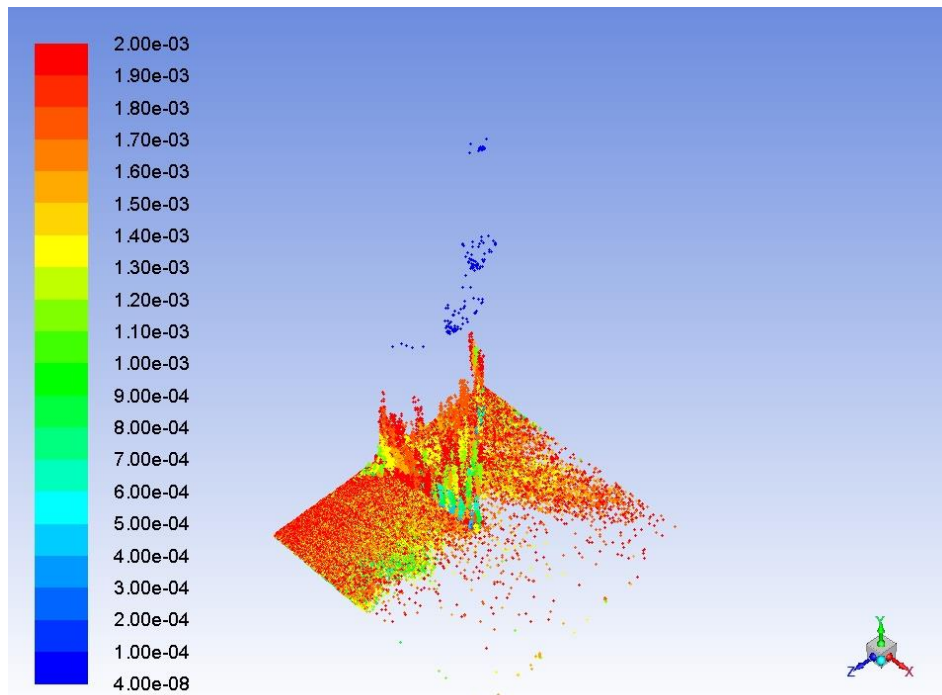


Figura 5.18 - Caixa de 1000mm de queda em 2500 segundos.

Fonte: Autor (2021).

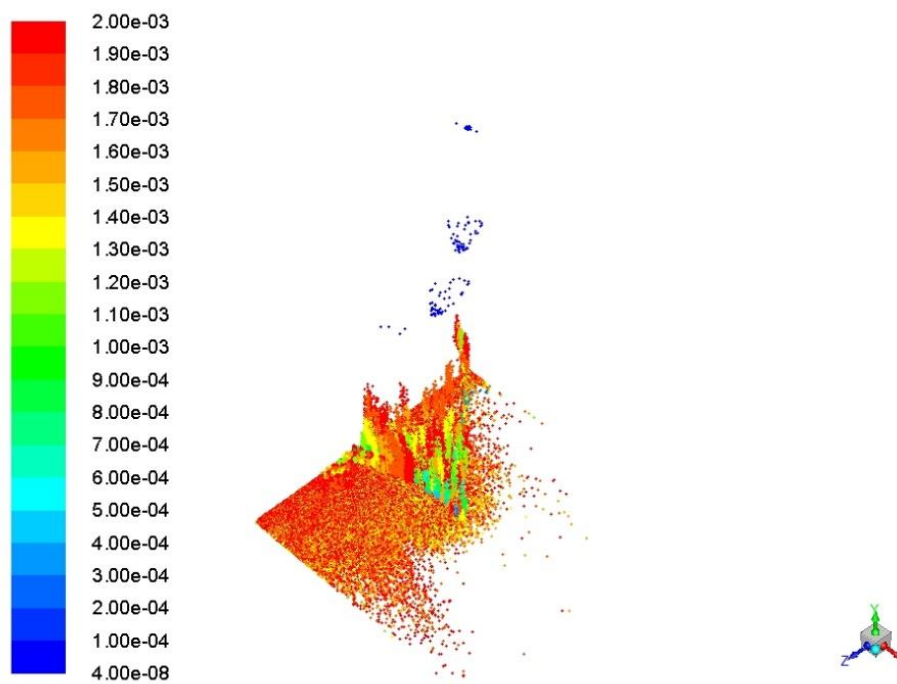


Figura 5.19 - Caixa de 1200mm de queda em 3200 segundos.

Fonte: Autor (2021).

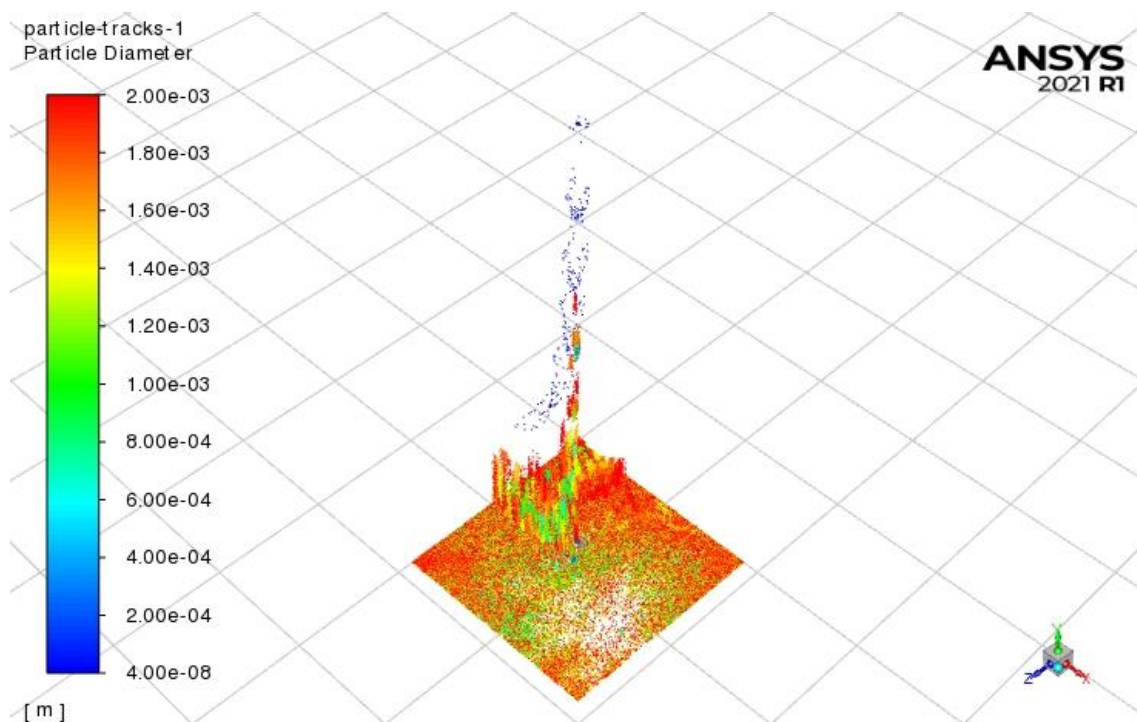


Figura 5.20 - Caixa de 1400mm de queda em 2000 segundos.

Fonte: Autor (2021).

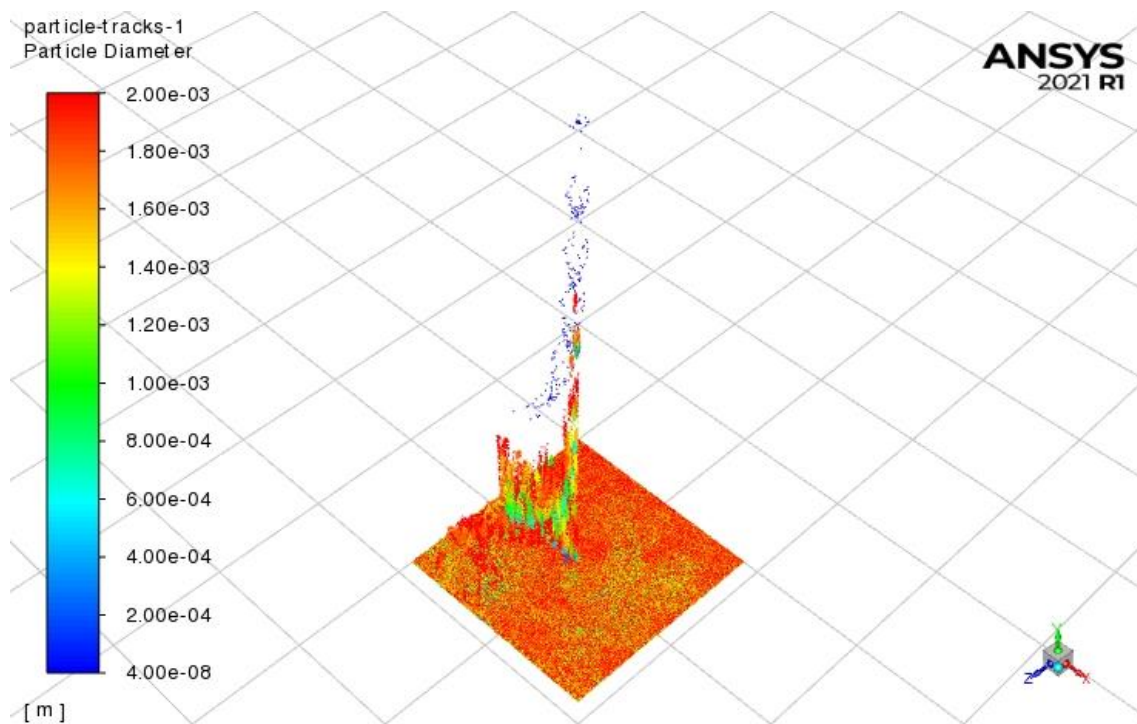


Figura 5.21 - Caixa de 1400mm de queda em 4800 segundos.

Fonte: Autor (2021).

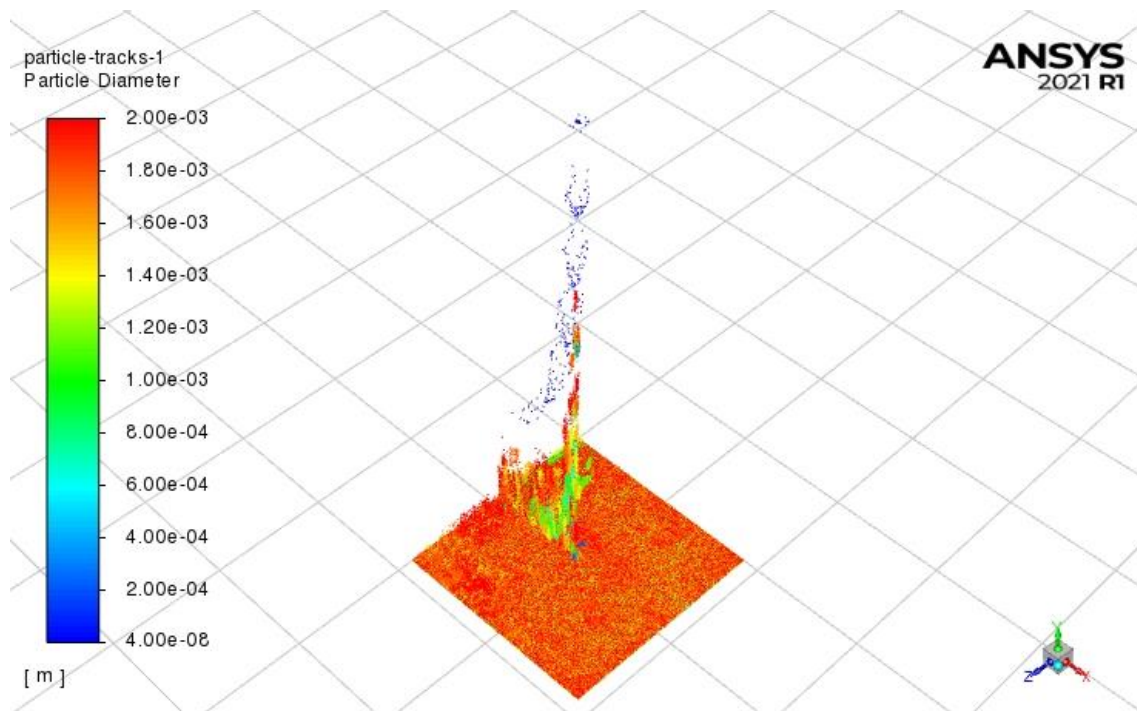


Figura 5.22 - Caixa de 1400mm de queda em 5900 segundos.

Fonte: Autor (2021).

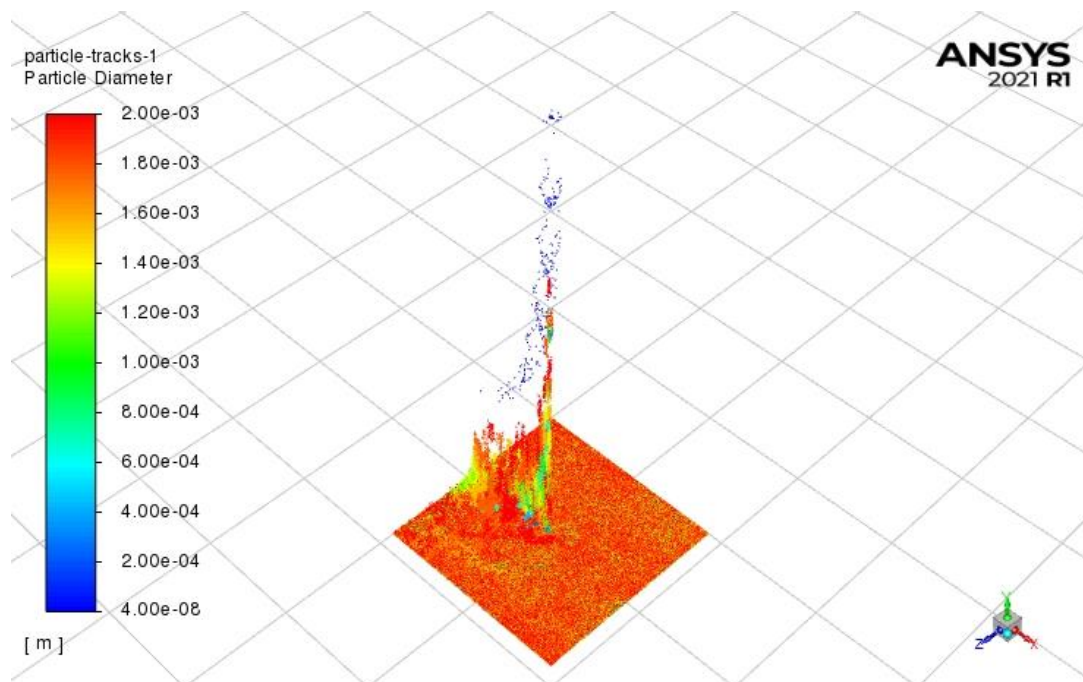


Figura 5.23 - Caixa de 1400mm de queda em 6500 segundos.

Fonte: Autor (2021).

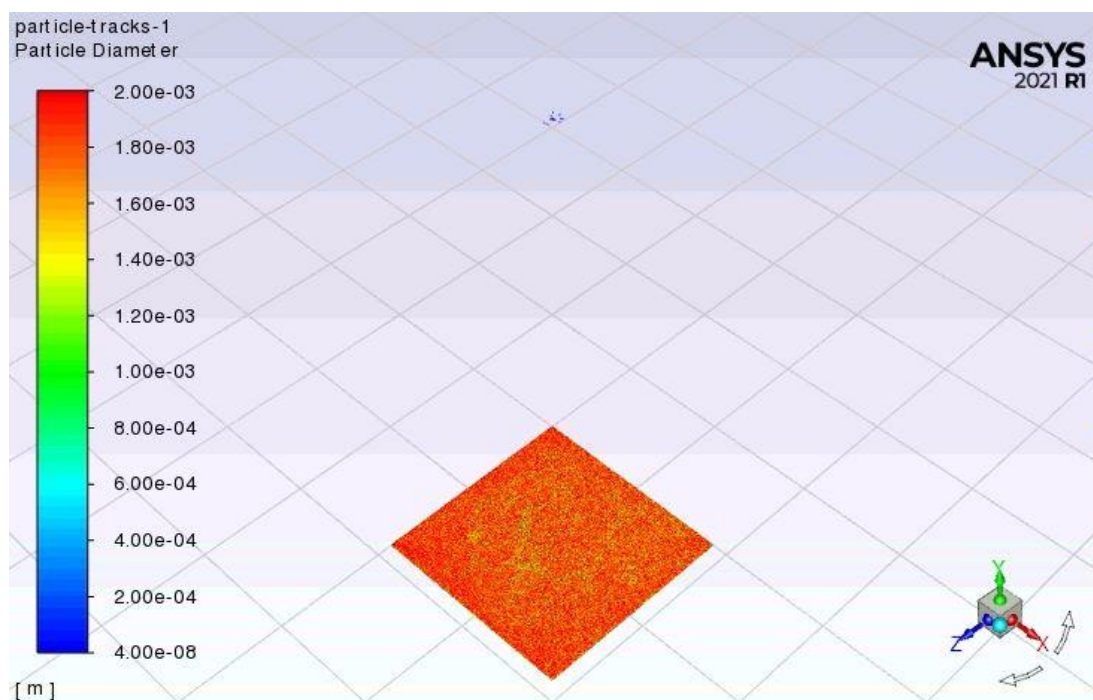


Figura 5.24 - Caixa de 1400mm de queda no final dos 8388,56s de injeção de material.

Fonte: Autor (2021).

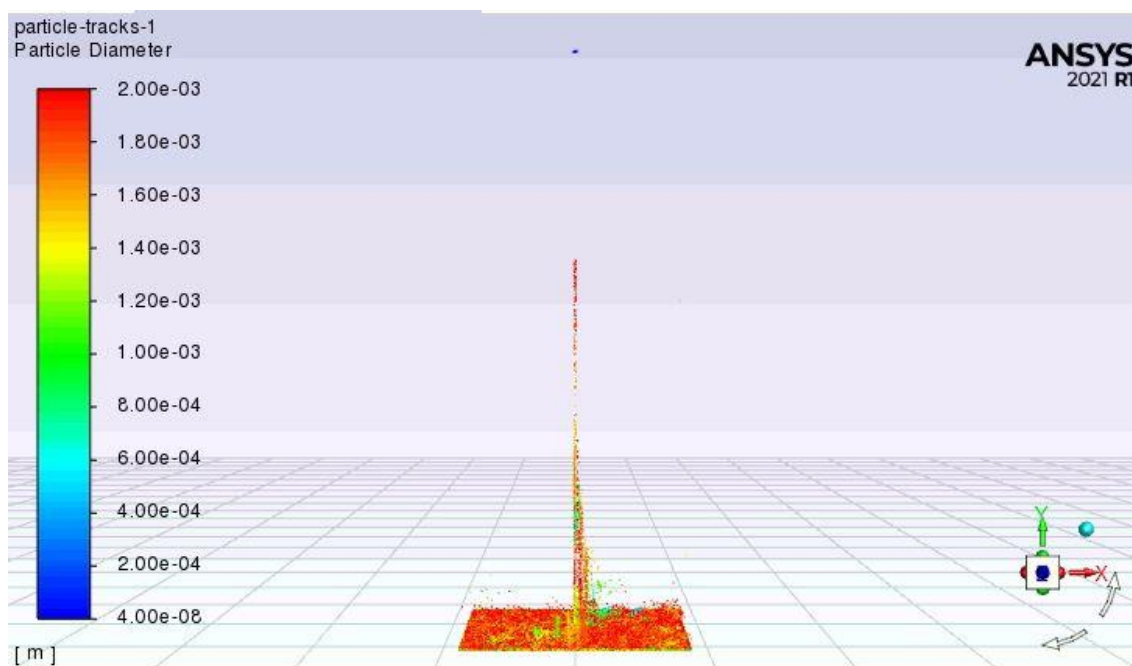


Figura 5.25 - Caixa de 1600mm de queda em 6800 segundos

Fonte: Autor (2021).

Os gráficos das figuras 5.25 e 5.26 corroboram com a ideia de monitoramento da simulação, demonstrando a quantidade de material que está sendo exaurido e injetado no volume de controle até o final da simulação.

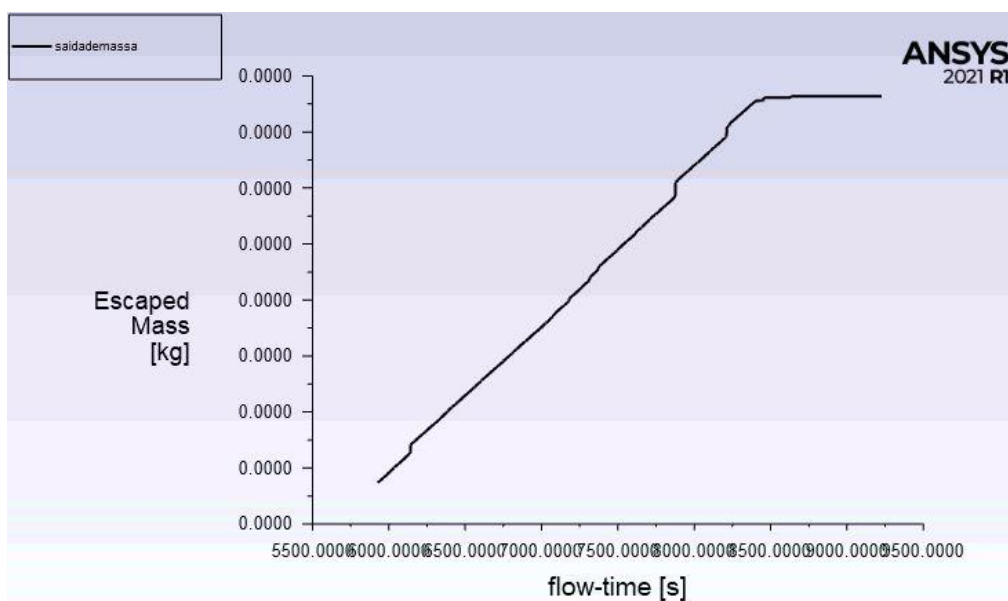


Figura 5.26 - Gráfico da caixa de 1400mm demonstrando a saída de massa em relação ao tempo até o final da simulação.

Fonte: Autor (2021).

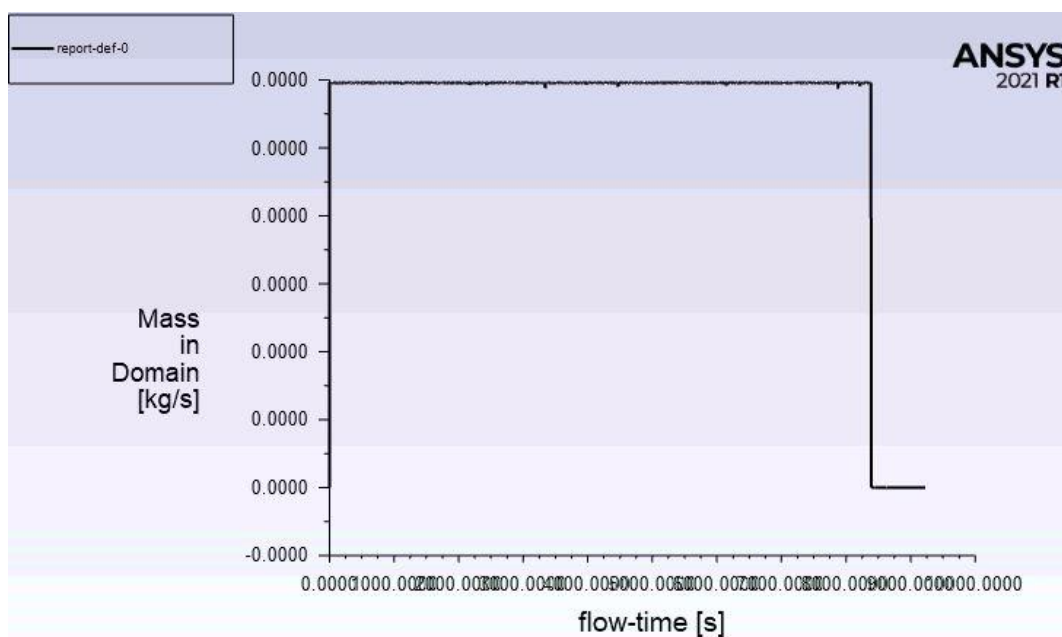


Figura 5.27 - Gráfico da caixa de 1400mm demonstrando a saída de fluxo de massa em relação ao tempo até o final da simulação.

Fonte: Autor (2021).

Com o decorrer das simulações o software vai atualizando com os dados solicitados até nos gerar um resultado de cada simulação, conforme demonstrado na figura 5.27:


```

Creating animation sequence file: B:\Leandro\Finall600\Wangl600box_files\dp0\FFF-1\Fluer
\animation-1.cxa
()
step flow-time saidademassa report-def-2 report-def-1 report-def-0 flow-time
3076 9.2280e+03 4.5276e-05 9.9955e-02 0.0000e+00 1.6792e-15 9.2280e+03
Flow time = 9228s, time step = 3076
Creating animation sequence file: C:\Leandro\Finall200\Wangl200box_files\dp0\FFF-1\Fluer
\animation-1.cxa
()
step flow-time saidademassa report-def-2 report-def-1 report-def-0 flow-time
3005 9.0020e+03 4.2106e-06 9.9995e-02 0.0000e+00 1.6394e-15 9.0020e+03
Flow time = 9002s, time step = 3005
()
step flow-time saida-de-mas report-def-0 peso flow-time
3049 9.1470e+03 4.5301e-05 0.0000e+00 9.9955e-02 9.1470e+03
Flow time = 9147s, time step = 3049
2997 more time steps
Done

```

Figura 5.28 – Relatórios gerados pelas simulações.

A tabela 5.4 abaixo demonstra os resultados obtidos comparados com Wang *et al.*, (2016):

Tabela 5.4 – Resultados encontrados.

Altura	Experimento(g/kg)	Simulação(g/kg) (Presente Trabalho)
0,8m	0,03	0,11
1,0m	0,04	0,05
1,2m	0,07	0,04
1,4m	0,075	0,45
1,6m	0,12	0,45

Fonte: Autor (2021)

Os resultados das simulações apresentaram uma variação muito grande ao que é apresentado no experimento prático, portanto as condições de contorno devem ser mais bem avaliadas e testadas, tais como:

- Uma condição de contorno de saída no sução do ar configurada como velocidade, ao invés de fluxo de massa negativa (tabela 4.6) pode apresentar uma melhor aproximação com os resultados práticos, uma vez que os resultados de massa capturada foram muito alto (o que é esperado) devidos interação da fase fluida com as partículas sólidas em queda.
- A apresentar uma condição de saída de pressão atmosféricas em volta da tremonha igual ao ambiente para que se obtenha uma melhor convergência das equações governantes do modelo DDPM, tentando aproximar mais o modelo do experimento real.

6. CONCLUSÃO

O modelo ANSYS Fluent - DDPM aqui apresentado para a simulação de material granulado em queda livre se mostrou bastante útil, sendo comparado com resultados de simulações de programas diferentes e experimentos práticos. Através das simulações aqui apresentadas no estudo de caso 1 foi possível verificar como o ar arrastado pode variar dependendo do diâmetro e de propriedades do material analisado. Com estes resultados foi possível concluir, assim como em Esmaili *et al.* (2015) que em um fluxo de material granulado com partículas maiores, o ar circundante terá menor velocidade do que fora com partículas menores, conseqüentemente, aumentar a densidade das partículas para um mesmo diâmetro, resultará em uma concentração das partículas no centro do fluxo do material junto com o ar.

Este trabalho apresentou as bases de um modelo de fluxo bifásico (Continua mais discreta) no qual é apresentado um modelo para descrever a dinâmica de uma coluna de queda livre de partículas. Como conclusão, esse modelo de fluxo bifásico pode ser considerado como uma alternativa para a tentativa de descrever o fluxo de partículas no ar utilizando o modelo multifásico DDPM, variando à altura de queda. Além disso, durante a prática dessas simulações ficou visível outras opções que o modelo DDPM pode apresentar para este tipo de simulação, principalmente utilizando mais de um tamanho de partículas em uma única simulação, além de outros parâmetros de arrastos que podem ser analisados visando um melhor entendimento dos fenômenos presentes nos fluxos de materiais granulares em queda livre. Assim, com o auxílio dessa ferramenta, e sua confiabilidade, foi possível concluir que a variação da altura de queda da material influência diretamente na variação da quantidade de ar induzido pelo material em queda.

Porém os resultados do estudo de caso 2 para o trabalho de Wang *et al.*, (2016) não apresentaram boas correlações, provavelmente o modelo precise de mais atenção quanto a implementação de modelos de impactos e melhores ajustes nas condições de contorno apresentadas. A variação de diâmetro usada no experimento prático certamente não possa ser bem definida com a distribuição de Rosin-Rammler utilizada neste estudo CFD. Vale destacar que o modelo apresentou boa funcionalidade no sentido de interação Fluido-Partículas

para a captação na exaustão do material, uma vez foi possível fazer uma configuração na saída que de fato captura o material suspenso, assim como em sistemas de despoeiramento.

Outro ponto importante do estudo de caso 2 é que em comparação com os resultados práticos, os resultados das simulações encontram-se muito altos para a quantidade de material capturado, podendo ser necessário uma melhor configuração no tratamento de paredes em relação ao impacto com o material em queda livre. Este estudo futuro provavelmente apresentará algumas limitações da abordagem atual e poderá fornecer orientações de como estes modelos utilizados podem ser melhorados. A partir disso será possível melhorar nossa compreensão sobre a geração de poeira por queda de matérias granulares via modelagem computacional, principalmente com uma possível utilização da abordagem DEM para melhor prever a interação das partículas. A implementação de melhorias nessa simulação poderá consolidá-la como uma poderosa ferramenta para estudos futuros no campo dos materiais particulados, podendo ser desenvolvida ainda mais para tornar esse modelo possível de estimar valores de emissão mais precisos para as abordagens estudadas.

Portanto a utilização das técnicas CFD se fazem fundamentais para economia de tempo e dinheiro, porém sempre com o cuidado de se fazer um estudo de caso prático para que a modelagem fique coerente para geração de resultados mais próximos possíveis.

7. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- A implementação de um modelo DEM que leve em consideração o impacto das partículas sobre uma superfície rígida.
- Aplicação deste modelo para equipamentos em movimentos como correias transportadoras na descarga de materiais granulados.
- Realização de simulações com mais de duas fases (ar mais sólido mais líquido) para avaliar outros parâmetros que venham a influenciar no escoamento do material e propagação de poeira.

REFERÊNCIAS

ACGIH. **Industrial Ventilation “Manual of Recommended Practice**. American Conference of Governmental Industrial Hygienists, n.1, ed.24. 2007. Disponível em: <https://law.resource.org/pub/us/cfr/ibr/001/acgih.manual.1998.pdf>. Acesso em 7 fev. 2022

ANSARST R.; Ryck, A.; Dodds, J. **Dust emission in powder handling Free falling particle plume characterisation**. Chemical Engineering Journal, v.152, p.415-420. 2009

ANSYS. **F. Theory Guide Fluent**. Ansys, Inc , v.19. 2019. Disponível em: <http://www.pmt.usp.br/academic/martoran/notasmodelosgrad/ANSYS%20Fluent%20Theory%20Guide%2015.pdf>. Acesso em 1 fev. 2022

ARIYARATNE, W.K.H.; Manjula E.V.P.J.; Ratnayake C.; Melaaen M.C. **CFD approaches for modeling gas-solids multiphase flows—a review**. Paper presented at the proceedings of the 9th EUROSIM congress on modelling and simulation, EUROSIM, the 57th SIMS conference on simulation and modelling SIMS. 2018

BEVERLOO, A. W.; LENIGER, H. A.; VAND V. J. **The flow of granular solids through orifices**. Chemical Engineering Science, v.15, p.260-269, 1961. DOI: 10.1016/0009-2509(61)85030-6

CECALA A.; O'BRIEN A. **Dust Control Handbook for Industrial Minerals Mining and Processing**. Sibelco – Unimin Corp & NIOSH. IMA-NA Technology Workshop, ed. 2. 2018. Disponível em: https://cdn.ymaws.com/www.ima-na.org/resource/resmgr/docs/2018_Workshop_Presentations/013-Cecala_IMANA_Dust_Handbo.pdf. Acesso em 15 fev. 2021

CHAKRAVARTY S.; FISCHER, M.; TRINANES P.G.; PARKER, D.O.; *et al.* **Study of the particle motion induced by a vortex shaker. Powder Technology, Elsevier**. n. 322, pp.54-64. 2017. Disponível em: <https://hal-ineris.archives-ouvertes.fr/ineris-01863857/document>. Acesso em 15 fev. 2022

CHEN X.; WANG, J. **A comparison of two-fluid model, dense discrete particle model and CFD-DEM method for modeling impinging gas–solid flows**. Powder Technology, Supplement, n.254, p.94-102. 2014. DOI:10.1016/j.powtec.2013.12.056

CHEN X.L.; WHEELER C.A.; DONOHUE T.J.R.; MCLEAN, A.W. **Evaluation of dust emissions from conveyor transfer chutes using experimental and CFD simulation**. International Journal of Mineral Processing. v.110–111. 2012. Disponível em: <https://nova.newcastle.edu.au/vital/access/manager/Repository/uon:23751?vie>

w=null&f0=sm_creator%3A%22McLean%2C+R.%22&sort=sort_ss_title%2F
Acesso em 6 fev. 2022

CHU, K.W.; WANG, Y.; ZHENG, Q.J.; YU, A.B.; PAN, R.H.; **CFD-DEM study of air entrainment in falling particle plumes**. Powder Technology, v.361. p. 836-848. 2020

CLOETE, S. Braun J.S.; Popoff B.; Amini S.; **Evaluation of a Lagrangian Discrete Phase Modeling Approach for Resolving Cluster Formation in CFB Risers**. 7th International Conference on Multiphase Flow – ICMF, Tampa, p.1–8. 2010

CLOETE, S.; Amini S.; **The dense discrete phase model for simulation of bubbling fluidized beds: Validation and verification**. Proc. 9th Int. Conf. Multiph. Flow, 2016

COOPER, C.; Alley, F. C.; Air Pollution Control. D. U. Laurie Prossnitz, Illinois: Waveland Press. ed.5, v.15. 2002

COOPER, P. & ARNOLD, P. C. **Air Entrainment and Dust Generation from a Falling Stream of Bulk Material**. Department of Mechanical Engineering, University of Wollongong. Kona, n.3, p.125-134. 1995

DE LAI, F.C. **Simulação numérica do escoamento particulado para o preenchimento de canal fraturado**. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica e de Materiais, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2013.

DONOHUE, T.J. *et al.* **Computer simulations as a tool for investigating dust generation in bulk solids handling operations**. Particle & Particle Systems Characterization, n. 5-6, v. 26, p. 265-274. 2009. Disponível em: <https://fdocuments.net/document/computer-simulations-as-a-tool-for-investigating-dust-generation-in-bulk-solids.html> Acesso em 4 fev. 2022

ESMAILI, A.; Donohue, T.J.; Wheeler, C. A.; McBride, W. M.; Roberts, A. W. **On the analysis of a coarse particle free falling material stream**. International Journal of Mineral Processing, pp.82-90. 2015

ESMAILI, A.A.; DONOHUE, T.J.; WHEELER, C.A.; MCBRIDE. W.M.; ROBERTS, A.W. **A new approach for calculating the mass flow rate of entrained air in a freefalling material stream**. Part. Sci. Technol. n.31, v.3, p.248–255. 2013

FAYED, M. E.; OTTEN, L. **Handbook of Powder Science & Technology**. New York: CHAPMAN & HALL, World Cat, Official Website. 1997. Disponível em: <https://www.worldcat.org/title/handbook-of-powder-science-technology/oclc/421882819>. Acesso em 7 fev. 2022

FERREIRA, M.J.; NAIA, M.D.; CHHABRA, R. P.; **An Analytical Study of The Transient Motion of A Dense Rigid Sphere In An Incompressible Newtonian Fluid.** Chemical Engineering Communications, n.1, v.2, p.168. 2007

FISCHER, John S.; OSBORN, Douglas Glenn. Dust control material transfer system. U.S. Patent n. 7,789,217, 7 set. 2010.

FOX, & MACDONALD, R. W. **Introdução a mecânica dos fluídos.** LTC - Philip J. Pritchard. New York. ed. 8, v.2. 2014.

GIDASPOW, D. **Multiphase Flow and Fluidization.** Elsevier, Official Website, Academic Press, 1994. Disponível em: <https://www.elsevier.com/books/multiphase-flow-and-fluidization/gidaspow/978-0-08-051226-6> Acesso em 2 fev. 2022

HAO L.; ZHANG L. Z. Influences of dust deposition on ground-mounted solar photovoltaic arrays: A CFD simulation study [J]. Renewable Energy, 2019, 135: 21–31.

HEMEON.L.C.W. **Plant and Process Ventilation.** T & Francis, New York: Industrial Press. ed.3,1963. ISBN 9781566703475

HERRMANN, S.; EVENSEN, J. **Newly-developed combination products for dust suppression in the storage of bulk materials.** BULK SOLIDS HANDLING. v. 14, n. 1, pp. 109–112. 1994

IESS. **Introdução à dinâmica dos fluidos computacional: dos fundamentos às aplicações industriais.** INSTITUTO ESSI DE EDUCAÇÃO, PESQUISA E DESENVOLVIMENTO. S.l. iESSS, p.52, 2018.

ISO. **ISO 8573-1:2010. Compressed air — Part 1: Contaminants and purity classes.** Standard Reviewed and Confirmed. 2010. Disponível em: <https://www.iso.org/standard/46418.html>. Acesso em 8 fev. 2022

KARAMANEV, D. G. **Equations for calculation of the terminal velocity and drag coefficient of solid spheres and gas bubbles.** Chemical Engineering Communications, n.147, v.1, p.75-84. 1996

KATTERFELD, A.; DONOHUE, T.; WHEELER, C. **Transfer chute design, simulation-based dust prediction.** Bulk Solids Handling, n. 5, v. 30, p. 240-245, 2010.

KLINZING, G. E.; Diane K.B.D.; HEIBERG D. **Ed Gas-Solid Transport.** McGraw-Hill Book Company. New York. ed.1, v.1, 1981

KNOWTON G. J. R.; AVIDAN, A. A.; KNOWLTON, T. M. Circulating fluidized beds. United Kingdom. 1997.

LEÃO R.X.A.; AMORIM L.S.; MARTINS M.F.; JUNIOR H.B.; SARCINELLI E.; MESQUITA A.L.A. **A model for velocity streamlines of airborne dust particles spreading caused by free-falling bulk materials.** Powder Technology, v.371, p.190-194. 2020,

LEÃO R.X.A.; AMORIM L.S.; MARTINS M.F.; JUNIOR H.B.; SARCINELLI E.; MESQUITA A.L.A. **Airborne flow dynamics near free-falling bulk materials: CFD analysis from analytical pressure field.** Powder Technology, v.385, Pages 1-11, 2021

LIED, E.B. Dimensionamento de sistema de ventilação local exaustora (VLE): estudo de caso de uma indústria de moveis, em Sta. Terezinha de Itaipu, PR, Brasil. Estudos Tecnológicos, v. 7, n. 1, p. 1-11. 2011. DOI: 1010.4013/ete.2011.71.01

LIU, Z.Q. **Air entrainment in free falling bulk materials.** University of Wollongong, Wollongong. Research Online Website University of Wollongong. 2003. Disponível em: <https://ro.uow.edu.au/cgi/viewcontent.cgi?referer=&httpsredir=1&article=2816&context=theses> Acesso em 11 fev. 2022

LULBADDA L.L.; WADUGE, S.; ZIGAN, L.E.; STONE, A.; BELAIDI, P.; **García-Triñanes, Predicting concentrations of fine particles in enclosed vessels using a camera based system and CFD simulations.** Process Safety and Environmental Protection, n.1, v.105, p.262-273. 2017

LUZ, A. B.; Sampaio, J.; França, S. **Tratamento de Minérios.** MCT - Centro de Tecnologia Mineral (CETEM). Rio de Janeiro. ed. 5, 2010

MALISKA, C. R. Transferência de Calor e Mecânica dos Fluidos Computacional. UFPR, Official Online Website. ed. 2. Rio de Janeiro. 2004. Disponível em: http://ftp.demec.ufpr.br/disciplinas/EMEC7012/CFD_cap01.pdf. Acesso em 13 fev. 2022..

MARINI, F. **Simulação de um leito fluidizado aplicando a técnica CFD baseada na teoria cinética do escoamento granular.** Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Química. Campinas, SP. 2008. Disponível em: https://bdtd.ibict.br/vufind/Record/CAMP_9b46ef4416eadc151a1dbed6d436fd89. Acesso em 12 fev. 2022

MASSARANI, G. **Fluidodinâmica em Sistemas Particulados.** Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro - RJ. 2002. Disponível em:

https://www.academia.edu/6063322/FLUIDODIN%C3%82MICA_EM_SISTEMA_S_PARTICULADOS. Acesso em 1 fev. 2022

MCCABE, W. L.; SMITH, J. C.; HARRIOT, P. *Unit Operations in Chemical Engineering*. McGraw-Hill. 2005

MCCABE, W. L.; SMITH, J. C.; HARRIOTT, P. **Unit Operations Of Chemical Engineering**. McGraw-Hill International Editions, Chemical and petroleum Engineering Series. ed. 5, 1130 p. Nova York. 1993. Disponível em: https://www.academia.edu/37476371/McCabe_W_L_Smith_J_C_Harriott_P_Unit_Operations_in_Chemical_Engineering. Acesso em 9 fev. 2022

MEIER, H. F. **Modelagem fenomenológica e simulação bidimensional de ciclones por técnicas da fluidodinâmica**. Tese de Doutorado, Unicamp, Campinas, São Paulo. 1998

MER, S. *et al.* **The emptying of a bottle as a test case for assessing interfacial momentum exchange models for Euler–Euler simulations of multi-scale gas-liquid flows**. *International Journal of Multiphase Flow*, v. 106, p. 109-124, 2018.

MINKOWYCZ, W. J., Sparrow, E. M., Schneider, G. E., Plechter, R. H., (1988), *Handbook of numerical heat transfer*, Ed. John Wiley & Sons Inc., New York.

NIEMI T. **Particle Size Distribution in CFD Simulation of Gas-Particle Flows. Master Thesis**. Thesis to Master of Science of Technology. Espoo, 2012. Disponível em: <https://pdf4pro.com/amp/view/particle-size-distribution-in-cfd-simulation-of-gas-26d45.html>. Acesso em:

OGATA, K. F.; Tomita K. Y. **Experimental investigation of a free falling powder jet and the air entrainment**. *Powder Technology*, n.115, v.1, p.90-95, 2001

PARKER J.K.; LAMARCHE, W.; CHEN, K.; WILLIAMS, H.; STAMATO, S. **C.F.D. simulations for prediction of scaling effects in pharmaceutical fluidized bed processors at three scales**. *Powder Technology*, v.235, p.115-120, 2013.

PERRY, R.H.; GREEN, D.W.; MALONEY, J.O. *Perry's Chemical Engineers' Handbook*. 2007

PLINKE M. A.; LEITH, D. HOLSTEIN, D. B.; BOUNDY, M. G. *Experimental examination of factors that affect dust generation*. United States: N. p., 1991. DOI:10.1080/15298669191365153.

POPOFF, B.; Braun, M.; **A Lagrangian Approach to Dense Particulate Flows**. In *Proceedings of the 6th International Conference on Multiphase Flow – ICMF*. Leipzig, Germany. 2007

POTAPOV, A. *et al.* **Computer Simulation of Airflow around Transfer Chutes via Linked Discrete Element Method-Computational.** Fluid Dynamics Approach. 2013.

SCHENELLE, K. B.; BROWN, C.A. **Air Pollution Control Technology Handbook.** ed. 1, CRC Press LLC. Nova York. 2002

SHANTY, F.; WESLEY C.L. **The inhalability of outdoor dust in relation to air sampling network.** Journal of the Air Pollution Control Association, n.5, v.13, p. 211-214, 1963.

SUN, H.; Li, A.; WU, J. **Entrained air by particle plume: comparison between theoretical derivation and numerical.** Particulate Science and Technology, n.38, v.1-9. 2019

SUN, H.; Li, A.; Wu, J.; Zhang, J. **Particle flow fall process: a systematic study of entrained air under unconfined and semi-confined fall conditions.** Granular Matter. n.22. 2020. DOI: 10.1007/s10035-020-01018-w

TOOKER, G.E. **Controlling fugitive dust emissions in material handling operations.** Bulk Solids Handling, v. 12, n. 2, p. 227-32, 1992. Disponível em: [https://forum.bulk-online.com/showthread.php?30719-Controlling-Fugitive-Dust-Emissions-in-Material-Handling-Operations-\(G-E-Tooker\)](https://forum.bulk-online.com/showthread.php?30719-Controlling-Fugitive-Dust-Emissions-in-Material-Handling-Operations-(G-E-Tooker)). Acesso em 7 fev. 2022

UCHIYAMA, T. **Numerical analysis of particulate jet generated by free falling particles.** Powder Technology. n.1, v.145., p.123-130. 2004. DOI: 10.1016/j.powtec.2004.06.004

ULLMANN, A.; & Dayan, A. **Exhaust Volume model for dust emission control of belt conveyor transfer points.** Powder Technology, n.2, v.96, p.139-147. 1998. DOI: 10.1016/S0032-5910(97)03367-6

VERSTEEG & MALALASEKERA. **Fluidodinâmica. Computacional – CFD.** UFSC – Universidade Federal de Santa Catarina. 1995. Disponível em; <https://fontana.paginas.ufsc.br/pesquisa/fluidodinamica-computacional-cfd/>. Acesso em 10 fev. 2022

WANG K.W.; WANG W.; ZHANG, H.; ET AL. Suction force of vibrating suction method based on pi theorem: analysis and experiment, Vacuum n.86, v.12, p.1783–1788. 2012

WANG, D.; Li, X. **Study of airflow induced by regular particles in freefall through tubes.** Advanced Powder Technology. n.31, p.169-180. 2020.

WANG, Y.; REN, X.; ZHAO, J.; CHU, Z.; CAO, Y.; YANG, Y. **Experimental study of flow regimes and dust emission in a free falling.** Powder Technology, n.292, p.14-22. 2016. DOI: 10.1016/j.powtec.2016.01.016.

WANG. K Wang, W., Zhang, H., & Fang, J. Suction force of vibrating suction method based on pi theorem: Analysis and experiment. Mechanism and Machine Theory, 86(12), 607-617. 2012

Wen, C. Y.; Yu, Y. H. **A generalized method for predicting the minimum fluidization velocit.** Aiche Journal, n.1, v,12, 1966. Disponível em: <https://www.deepdyve.com/lp/wiley/a-generalized-method-for-predicting-the-minimum-fluidization-velocity-hhkFpeBzs0>. Acesso em 9 fev. 2022

WITT, P.J.; CAREY, K.G.; NGUYEN, T.V. **Prediction of dust loss from conveyors using computational fluid dynamics modelling.** Applied Mathematical Modelling, v. 26, n. 2, p. 297-309, 2002.

WYPYCH, P.; COOK, D.; COOPER, P. **Controlling Dust Emissions and Explosion Hazards in Powder Handling Plants. Chemical Engineering and Processing: Process Intensification.** Scientific Research, an Academic Publisher. n.44, p. 323-326. 2005. DOI: 10.1016/j.cep.2004.02.026

XIAOCHUAN, L.; QIANG, L., DONG, Z., BINBIN, J., HUIGING, L., & YAFEI, H. **Model for induced airflow velocity of falling materials in semi closed transfer station based on similitude theory.** Advanced Powder Technology, n.1, v.26, p.236-243. 2015

YANG, W. C. **Handbook of fluidization and fluid-particle systems.** ed.1, v.3, Heinemann, Pittsburgh. 2003. Disponível em: <https://pdfcoffee.com/handbook-of-fluidization-and-fluid-particle-systems-pdf-free.html>. Acesso em 8 fev 2022