



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

GABRIEL GUEDES CHAVES

DETERMINAÇÃO EXPERIMENTAL DA VAZÃO DE DESPOEIRAMENTO NA DESCARGA DE
CARVÃO COQUEIFICÁVEL

Tucuruí-PA

2021

GABRIEL GUEDES CHAVES

**DETERMINAÇÃO EXPERIMENTAL DA VAZÃO DE
DESPOEIRAMENTO NA DESCARGA DE CARVÃO COQUEIFICÁVEL**

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: Desenvolvimento Energético.

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)**

- C512d Chaves, Gabriel.
Determinação experimental da vazão de despoeiramento
na descarga de carvão coqueificável / Gabriel Chaves. —
2021.
LXXXVII,87 f. : il. color.
- Orientador(a): Prof. Dr. André Luiz 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. Volume de exaustão. 3.
Vazão mássica. 4. Emissão de particulados. I. Título.

CDD 620.106

GABRIEL GUEDES CHAVES

DETERMINAÇÃO EXPERIMENTAL DA VAZÃO DE DESPOEIRAMENTO NA DESCARGA DE CARVÃO COQUEIFICÁVEL

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: Desenvolvimento Energético.

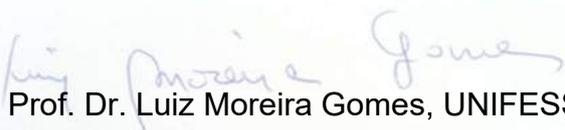
Orientador: Prof. Dr. André Luiz Amarante Mesquita

Aprovada em 26 de fevereiro de 2021.

BANCA EXAMINADORA:



Prof. Dr. André Luiz Amarante Mesquita, FluidPar-NDAE-UFPA,
Orientador



Prof. Dr. Luiz Moreira Gomes, UNIFESSPA

Membro Interno



Prof. Dr. Marcio Ferreira Martins, UFES

Membro Externo

Aos meus amados pais, Mario
Pessoa Chaves e Mary de Fátima Guedes
dos Santos, grandes inspirações da minha
vida.

AGRADECIMENTOS

Gostaria de começar agradecendo a Deus, todo o poderoso criador do céu e da terra, por quem tenho rezado todos os dias pedindo forças para me ajudar no término deste trabalho, que consiste em se tornar mestre em desenvolvimento energético pela Universidade Federal do Pará--UFPA. Aos meus amados pais, Mario Pessoa Chaves e Mary de Fátima Guedes dos Santos que mesmo distantes de mim durante esta jornada me apoiaram, chamando atenção quando necessário, mandando mensagens carinhosas de apoio através das mídias sociais ou por meio de ligações telefônicas. Também gostaria de agradecer a segunda mãe que a vida me deu dona Maria do Céu de Oliveira Chaves, sempre ajudando quando necessário.

Ao meu orientador Prof. Dr. André Luiz Amarante Mesquita, com a sua maneira didática conseguiu passar todo o conhecimento necessário para chegar ao fim dessa dissertação. Agradeço ao meu Co-orientador, Professor Msc. Maciel Costa Furtado, pelo apoio decisivo na reta final do mestrado ajudando em cada ponto que faltava da melhor forma possível. Gostaria de agradecer também a todos os meus amigos do laboratório de fluidodinâmica e particulados.

Ao ITV-Vale pelo financiamento da pesquisa e projeto.

Ao Danilo Santos Silva, outra pessoa muito especial na minha caminhada acadêmica, com seu apoio, força e cumplicidade ao longo dessa etapa em minha vida.

Ao Renato Luz Cavalcante, no qual me ajudou bastante com o seu conhecimento científico e a sua amizade nessa caminhada.

A Layelle Costa Silva, companheira, que se desdobrou em esforços para me ajudar durante a elaboração desse trabalho e me ensinou que tenho potencial para realizar todos os meus sonhos.

Ao Dalton Cassamali, que mesmo longe sempre conseguiu através da sua amizade tirar muitos sorrisos do meu rosto.

Ao Emerson Moraes, parceiro de alojamento e um irmão pra vida toda que obtive durante o período de pós de graduação

RESUMO

Os mecanismos de controle de poeira durante os processos industriais são frequentemente realizados por meio dos métodos de bicos de pulverização ou por sistemas de exaustão, dotados de filtros mangas. O trabalho a seguir tem por objetivo desenvolver um método experimental para determinar o volume de exaustão em diferentes quantidades de materiais e distintas alturas de descarga de material. É apresentado um protocolo de ensaio para dimensionar sistemas de exaustão para quaisquer materiais, vazão mássica e altura de queda, sendo utilizado um método experimental no qual simula a queda de material com intuito de avaliar valores de vazão de despoeiramento experimentais para um sistema de ventilação industrial. Apresenta-se uma revisão de literatura dos modelos empíricos atuais de volume de exaustão. A correlação da metodologia é feita através da concentração de partículas respiráveis medidas pelo equipamento de medição com os dados de vazão de exaustão. Os resultados apresentados são para o carvão, comparando correlações existentes e sugeridas com os dados experimentais para três diferentes alturas de queda. Espera-se assim, amparar engenheiros projetistas no dimensionamento dos sistemas de exaustão industrial, diminuindo os danos causados pelas partículas finas nos trabalhadores e na população que vive próximo a fonte poluidora.

Palavras chaves: Controle de poeira. Volume de exaustão. Vazão mássica. Emissão de particulados.

ABSTRACT

Dust control mechanisms during industrial processes are often carried out using spray nozzle methods or exhaust systems, equipped with bag filters. The following work aims to develop an experimental method to determine the volume of exhaust in different quantities of materials and different heights of material discharge. A test protocol is presented to design exhaust systems for any material, mass flow and drop height, using an experimental method in which it simulates the material drop in order to evaluate experimental dedust flow rates for an industrial ventilation system. A literature review of the current empirical models of exhaustion volume is presented. The methodology is correlated through the concentration of respirable particles measured by the measurement equipment with the exhaust flow data. The results presented are for coal, comparing existing and suggested correlations with experimental data for three different heights of fall. It is hoped, therefore, to support design engineers in the design of industrial exhaust systems, reducing the damage caused by fine particles in workers and in the population that lives near the polluting source.

Keywords: Dust control. Exhaust volume. Mass flow. Emission of particulates.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1.1 - Conjunto filtro manga + ventilador.	4
Figura 1.2 - Processos de manuseio de minério com geração de poeira.....	5
Figura 2.1 - Princípio da queda livre de material.	8
Figura 2.2 - Diâmetro de partículas no sistema respiratório.	14
Figura 2.3 - Fluxograma do trato do sistema respiratório humano	15
Figura 2.4 - Aparato experimental de Ullmann (1998) (a) Zonas sensíveis em correias transportadoras e (b) uso de exaustores nas correias.....	18
Figura 2.5 - Processo de escoamento de material.	19
Figura 2.6-Esquema Hemeon	25
Figura 2.7 - Conceito de Xiaochuan.	27
Figura 2.8- Aparato experimental Xiaochuan.	29
Figura 2.9- Aparato experimental de Cooper e Arnold	30
Figura 2.10- Modelo de pluma simples analítica.	31
Figura 2.11 - Aparato experimental de Ogata et al (2001).	32
Figura 2.12 - Aparato experimental Wypych et al (2005)	34
Figura 2.13 - Aparato experimental de Esmaili et al (2013)	35
Figura 2.14 - Aparato experimental de Esmaili et al (2013)	35
Figura 2.15 - Aparato experimental Wang et al (2016).....	36
Figura 2.16 - Pluma de partículas.	38
Figura 2.17 - Aparato experimental de Wang.....	39
Figura 3.1 - Adequação da torre de poeira.....	42
Figura 3.2 - Esquema de preparação de amostra.	43
Figura 3.3 - Cabine de geração de poeira.	45
Figura 3.4 - Moega da bancada torre de poeira.	45
Figura 3.5 - Filtro manga.	47
Figura 3.6 - Contador de partículas CPT-100.....	47
Figura 3.7 - Fluxograma de etapas antes de começar o ensaio.....	51
Figura 3.8 - Protocolo de ensaio.	52
Figura 3.9 - Definição da altura de descarga.....	53
Figura 3.10 - Descarga de material.	54
Figura 3.11 - Distribuição de tamanho de partículas passante acumulado de carvão coqueificável.....	55

Figura 3.12 - Massa específica aparente em função da umidade para o carvão coqueificável.....	56
Figura 4.1 - Modelos matemáticos para a previsão da vazão volumétrica com a altura de 1,6 metros.	58
Figura 4.2 - Modelos matemáticos para a previsão da vazão volumétrica com a altura de 2 metros.	59
Figura 4.3 - Modelos matemáticos para a previsão da vazão volumétrica com a altura de 3 metros.	60
Figura 4.4 - Comportamento da concentração PM10 para carvão mineral. Altura de queda de 2.0 m. Descarga de a) 10 kg, b) 20 kg.	63
Figura 4.5 - Comportamento da concentração PM2.5 para carvão mineral. Altura de queda de 2.0 m. Descarga de a) 10 kg, b) 20 kg.	64
Figura 4.6 - Comportamento da concentração PM10 para carvão mineral. Descarga de 20 kg Altura de queda de a) 1,6 m, b) 2,0 m.	65
Figura 4.7 - Comportamento da concentração PM10 para carvão mineral. Descarga de 10 kg Altura de queda de a) 2,0 m, b) 3,0 m.	66
Figura 4.8 - Concentração de PM2.5 para carvão mineral com variação de vazão para alturas de que de 1,6, 2,0 e 3,0 m.....	67

LISTA DE TABELAS

Tabela 2-1 -Poluente Atmosférico.....	17
Tabela 3-1 - Massa específica do sólido obtida via picnometria, carvão coqueificável, em kg/m ³	56

LISTA DE SIGLAS

OMS - Organização Mundial da Saúde

PM - Particle Material

Pronar - Programa nacional de controle de qualidade do ar

PTS - Partículas Totais em Suspensão.

PTC - Pneumoconiose do Trabalhador do Carvão.

P&D - Pesquisa e desenvolvimento.

CONAMA - Conselho Nacional do Meio Ambiente.

PIV - Velocímetro por imagens.

LCD - Tela de cristal líquido.

USB - Porta Universal.

ISO - Organização Internacional para Padronização.

FLUIDPAR - Laboratório de Fluidodinâmicas e Particulados.

UFPA - Universidade Federal do Pará.

BK300 - Balança Gehaka 300.

CPT- Counter particle Instrument.

LISTA DE SÍMBOLOS

- ε - Parâmetro de porosidade
- K - Fator de escoamento
- μ - Micrometros.
- C_d - Coeficiente de arrasto.
- A_p - Área projetada da partícula.
- V_r - Velocidade relativa.
- ρ_f - Densidade do fluido.
- V_f - Velocidade do fluido.
- V_p - Velocidade da partícula.
- F_a - Força de arrasto.
- A_r - Numero de Arquimedes.
- Re - Numero de Reynolds.
- μ - Viscosidade dinâmica.
- ρ_p - Densidade da partícula.
- g - Gravidade.
- V_{hr} - Velocidade no estado estacionário.
- v_t - Velocidade terminal.
- e_f - Porosidade.
- s - Parâmetro empírico para a limitação do número de Reynolds.
- C_{be} - Constante de Berverloo's para o modelo de vazão mássica.
- k - Fator de correção.
- v_0 - Velocidade inicial.
- Ψ - Esfericidade.
- A_c - Área superficial de uma esfera.
- A_p - Área projetada de uma partícula.
- d_{eq} - Diâmetro equivalente.
- v_p - Volume de partícula.
- ρ_s - Densidade do sólido.
- m - Massa.
- N - Número de partículas.

M_t - Massa total.

M_p - Massa de partículas.

V_t - Volume total.

ρ_{ap} - Densidade aparente.

\emptyset - Fração de vazios.

P_{m10} - Partículas inaláveis com diâmetro equivalente de $10\mu\text{m}$ ou inferior.

$P_{m2,5}$ - Partículas inaláveis com diâmetro equivalente de $2,5\mu\text{m}$ ou inferior.

$PI - 1$ - Risco precoce de até 15% em relação a $35\mu\text{g}/\text{cm}^3$ para o $P_{m2,5}$ e de $70\mu\text{g}/\text{cm}^3$ para o P_{m10} .

$PI - 2$ - Risco reduzido de mortalidade de até 6% para $25\mu\text{g}/\text{cm}^3$ utilizando $P_{m2,5}$ e de $50\mu\text{g}/\text{cm}^3$ para o P_{m10} .

$PI - 3$ - Risco de mortalidade de 6% para $15\mu\text{g}/\text{cm}^3$ utilizando o $P_{m2,5}$ e de $30\mu\text{g}/\text{cm}^3$ para o P_{m10} .

PF - Níveis mais baixos de material particulado relacionados ao câncer do pulmão e ao cardiopulmonar

$\bar{C}_{g\text{-anual}}$ - Concentração média geométrica anual.

$\bar{C}_{g\text{-24 h}}$ - Concentração média de 24 horas.

Q_{EV} - Vazão de despoejamento para o modelo de Ullman (1998).

V_a - Velocidade de captura.

V_2 - Velocidade de admissão.

A - Área da seção transversal do fluxo de material em queda livre.

A_2 - Área do choque.

h - Altura de queda do material.

Q_a - Vazão de despoejamento para o modelo de Hemeon (1999).

\dot{m}_p - Vazão mássica.

u_g - Velocidade do ar.

C_{l1} - Constante empírica para o modelo de Xiaochuan *et al* (2015)

ρ_{ar} - Massa específica do ar.

Q_{ent} - Vazão de despoejamento para o modelo empírico de Cooper e Arnold (1995)

V_0 - Velocidade inicial de escoamento.

C_{pl} - Constante empírica na qual depende do tipo de pluma para o modelo empírico de Cooper e Arnold (1995)

B - Constante de flutuabilidade.

k, m e n - Constantes empíricas para o cálculo da vazão de despoeiramento para o modelo de Cooper e Arnold (1995).

V_{cone} - Volume do cone projetado.

d_b - Diâmetro da base do cone projetado.

d_s - Diâmetro de seção transversal de saída da moega.

M_a - Massa de água.

M_s - Massa de material seco.

U - Umidade relativa.

V - Vazão de amostragem.

N_p - Numero de partículas.

C - Concentração de partículas.

T_q - Tempo de queda.

U_a - Velocidade do ar.

U_s - Velocidade de deslizamento entre a partícula e o fluido.

U_{pd} - Velocidade média das partículas.

w_f - Coeficiente de fricção mecânica.

\dot{m}_a - Vazão mássica de ar.

U_{af} - Velocidade média do ar.

f_d - Força de arrasto.

α_p - Constante empírica de Clift (1978).

f_a - Fator de atrito em tubo liso.

SUMÁRIO

1 Introdução.....	2
1.1 Justificativa.....	6
1.2 Objetivos	6
1.2.1 Objetivo Geral	6
1.2.2Objetivos Específicos	6
1.3 Estrutura do Trabalho.....	6
2 Revisão de literatura	8
2.1 Princípios da queda livre de material	8
2.2 Propriedades dos materiais particulados	11
2.3 Problemas relacionados à saúde e ao meio ambiente decorrente da emissão de material particulado.....	14
2.4 Revisão de modelos empíricos para a previsão da vazão de despoeiramento.....	17
3 METODOLOGIA EXPERIMENTAL	41
3.1. Aparato e Procedimento Experimental.....	41
3.2. Procedimento experimental.....	50
3.3. Material.....	55
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	57
4.1 Correlações.....	57
4.2 Resultados experimentais	62
5 CONCLUSÃO	68
5.1 Sugestões para trabalhos futuros.....	69
REFERÊNCIAS.....	70

1 INTRODUÇÃO

Todos os segmentos industriais e de serviços que trabalham com sólido a granel estão diante do desafio de produção mais limpa, porém sabe-se que na mineração para se ter processos mais limpos é indispensável fazer investimentos direto em pesquisas e desenvolvimento tecnológico (LUZ, SAMPAIO e FRANÇA, 2010).

No Brasil, empresas como a Vale deram início a promoção e ao fomento de P&D nas instituições e centros de pesquisas nacionais e em parcerias com algumas fundações estaduais, para investirem em desenvolvimento tecnológico, visando diminuir o impacto causado no meio ambiente proveniente da emissão de material particulado em ambientes industriais (LUZ, SAMPAIO e FRANÇA, 2010).

Uma das principais doenças causadas pela inalação de particulados em ambiente industriais de trabalho é conhecida como pneumoconiose. A pneumoconiose é causada quando partículas com diâmetro menor do que 5 μm atingem os bronquíolos, chegando ao interstício pulmonar e acumulando-se nos tecidos pulmonares, causando alterações estruturais severas no órgão. Dentre os ambientes onde os trabalhadores estão expostos a essas doenças, pode-se citar minas de materiais minerais e carvão a céu aberto, indústrias do cimento, indústrias de produtos agrícolas, dentre outros. Essa doença é reconhecida pela PORTARIA/MS N.º 1.339/1999 como uma doença profissional ou do trabalho.

Dentre os tipos de pneumoconioses, pode aqui se destacar a silicose causada pela exposição a poeira de sílica, a talcose causada pela inalação de talco mineral (silicato) e a Pneumoconiose do Trabalhador do Carvão (PTC) que é causada, como o próprio nome diz, pela inalação da poeira de carvão mineral. Na PTC, a poeira se deposita nos macrófagos em torno dos bronquíolos e alvéolos pulmonares e, conforme as paredes dos bronquíolos se dilatam, surge o enfisema focal, obstruindo o fluxo aéreo e danificando a estrutura pulmonar, levando ao comprometimento funcional do pulmão. A presença de doenças pulmonares traça o padrão de morbidade por causas evitáveis que acompanha

o modelo econômico do país. Em países desenvolvidos este quadro foi controlado com os investimentos em tecnologias voltadas para o controle de poeira.

Segundo Hsu *et al.* (2017), em um país industrial desenvolvido como a China, as emissões de poeira em 2012 atingiram 12.343.000 toneladas, incluindo materiais como minério de antimônio, bauxita, bismuto, carvão, estanho, minério de ferro, petróleo e zinco. Desse montante cerca de 84,3% representa a emissão por carvão mineral o que corresponde a aproximadamente a 10.293.000 toneladas.

Segundo Furieri e Castilho (2009), as altas concentrações de material particulado fino no ambiente de trabalho, como os das mineradoras de carvão e de outros setores que lidam com minerais, causam um aumento na incidência de asma, bronquite e infecções respiratórias. Além dos danos à saúde, as partículas também podem causar incômodos a população, através da deposição e sedimentação sobre materiais; edificações e monumentos, causando a descoloração e decomposição de materiais de construção.

Com o intuito de minimizar os impactos causados pela emissão de poeiras em ambiente industriais, novas tecnologias baseadas no uso de spray e surfactantes são cada vez mais usadas nesses ambientes. O uso desses recursos é útil durante a produção e o transporte que envolvem o manuseio de pós e/ou finos minerais com objetivo de reduzir a exposição de mineradores aos efeitos danosos a saúde decorrente de sua inalação.

Wypych *et al* (2015), considera o uso de sprays e surfactantes como métodos de proteção, pois estes dois métodos de supressão têm como objetivo aumentar a tensão superficial da água de maneira a melhorar a capacidade da água em molhar as partículas finas de minério, para que estas não fiquem suspensas. Sprays e surfactantes são utilizados nos materiais que ficam estocados, para que, quando nas operações de transporte ou durante os processos manuseio, não ocorra a geração de poeira.

Padrões de qualidade do ar têm sido criado em diversos países buscando evitar os efeitos nocivos dos materiais particulados sobre a saúde e ao meio ambiente. Conforme Furieri e Castilho (2009), esses padrões de caráter legal,

limitam indiretamente as emissões de poluentes atmosféricos, para garantir a proteção e a saúde do bem estar das pessoas.

O manuseio de materiais granulares e a conseqüente geração de poeira em ambientes de mineração são práticas bastantes comuns. Diante disso, muitas mineradoras no mundo são submetidas a fiscalização por parte das agências ambientais reguladoras. Cada vez mais, esses níveis de emissão são maiores por parte das atividades de mineração, levando ao descumprimento das normas de qualidade do ar para o meio ambiental, o que acarreta na penalização para suas atividades com aplicações de multas.

Para ambientes industriais fechados um dos controles tradicionalmente praticado na indústria da mineração é obtido por meio de um sistema de exaustão. Esse sistema é composto, principalmente por filtro manga e ventilador como mostrado pela Figura 1.1. Este sistema, porém, apresenta grande dificuldade no que se refere à determinação da vazão de exaustão e sua eficiência, gerando algumas vezes resultados insatisfatórios. Assim, quando subdimensionado, o sistema de ventilação de exaustão do sistema acarreta problemas, como a falta da realização da ação de despoeiramento, por não conseguir alcançar uma vazão necessária para a mesma. Por outro lado, vazões superdimensionadas, acarretam desgaste excessivo das tubulações que compõe o sistema, além do alto consumo de energia e do alto capital de investido (ACGIH, 1998).



Figura 1.1 - Conjunto filtro manga + ventilador.

Ventilador, 2- filtro manga.

Fonte: Corbari (2017).

À medida que a quantidade de material granulado aumenta há também a necessidade de se dispor de uma maior vazão do sistema de exaustão. Então, para se conseguir elaborar um bom projeto, segundo Tjoe *et al* (2003), é imprescindível assegurar um controle de dois parâmetros essenciais: a quantidade de material e o volume de ar que precisa ser exaurido pelo exaustor durante o processo. Isso exige um controle adequado das variáveis do processo, tais como, altura de descarga, vazão mássica, diâmetro de partícula, densidade da partícula, densidade do sólido, dentre outros, com a finalidade de encontrar um valor de vazão de projeto adequado para o sistema de exaustão.

Os problemas com a geração de poeira geralmente encontrados na indústria acontecem nos seguintes processos: empilhamento de material, enchimentos de silos e correias transportadoras conforme mostrado na Figura 1.2. A geração de poeira dos processos de manuseio e transporte listados na são consequências do processo de geração de poeira, isto é, quando as forças aerodinâmicas atuando nas partículas de poeira são maiores que as forças atuantes para manter a união do material a granel (Cooper e Arnold, 1995). Coopeland e Kwatra (2011), desenvolveram um aparato experimental conhecido como torre de poeira para avaliar os métodos de controle de emissão de poeira.



Figura 1.2 - Processos de manuseio de minério com geração de poeira

Fonte: Cooper e Arnold (1995)

Para a realização deste presente trabalho, se fez uma adequação na bancada torre de poeira de Coopeland e Kwatra (2011), com o objetivo de avaliar a vazão de ar induzido durante os processos de manuseio. Conforme mostrado na Figura 1.2, há várias maneiras de processamento de descarga e carga de materiais particulados que produzem poeira. Entretanto, este trabalho é focado apenas no empilhamento de materiais particulado.

1.1 Justificativa

Em ambientes industriais ou durante manuseio e transporte de sólidos a granel, a geração de poeira afeta de maneira agressiva a saúde das pessoas, por isso, a busca por novas tecnologias bem como o melhoramento das tecnologias usadas pela indústria da mineração para reduzir os impactos causados na saúde gerados pela exposição à material particulado, se justifica através de estudos experimentais como o deste trabalho, focando na forma tradicional de controle através de sistemas de despoeiramento na pilhagem de material para solucionar o problema da emissão de partículas finas à saúde humana.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo Geral

Determinação da vazão de despoeiramento adequada para a pilhagem de material utilizando sistemas de ventilação.

1.2.2 Objetivos Específicos

- Avaliação da metodologia de cálculo para as vazões de despoeiramento de acordo com os modelos disponíveis na literatura
- Realização de ensaios experimentais com carvão metalúrgico para diferentes alturas de queda e avaliação da vazão de despoeiramento.
- Avaliar os modelos a partir dos resultados experimentais realizados e fazer uma recomendação para dimensionamento da vazão de despoeiramento para projetos.

1.3 Estrutura do Trabalho

Este trabalho encontra-se dividido em 5 capítulos. O primeiro capítulo é a introdução e apresenta uma contextualização sobre a geração de poeira e suas consequências. Adicionalmente, esse capítulo apresenta a justificativa e os objetivos gerais e específico para o trabalho.

O segundo capítulo apresenta uma revisão bibliográfica onde são apresentados os princípios envolvidos durante a queda livre de materiais particulados, assim como as definições de propriedades importante para o fenômeno em questão. Além disso, uma revisão acerca dos principais modelos matemáticos sobre vazão de despoejamento e suas validações a partir procedimento experimental também é apresentada.

O terceiro capítulo apresentará a bancada torre de poeira, a descrição de cada componente que a compõem, o método de preparação da amostra de carvão mineral para o ensaio, além de demonstrar o procedimento experimental para a avaliar a eficiência de três vazões em um sistema de despoejamento industrial para três alturas e três quantidades de materiais.

O quarto capítulo apresenta os resultados obtidos experimentalmente para o carvão mineral. Os resultados se fazem acompanhar das discussões geradas para cada um destes parâmetros, e da comparação dos resultados obtidos no experimento com as respostas alcançadas por meio de modelos semiempíricos disponíveis na literatura.

O quinto capítulo aborda as conclusões do trabalho bem como sugestões para trabalhos futuros.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Princípios da queda livre de material

As operações de armazenamento, manuseio e transporte de sólidos a granel se baseiam na queda livre de material, sendo um fenômeno bastante utilizado pela indústria de sólidos a granel. Especificamente nessa operação de queda livre, Banir e Azhar (2019) considera que as partículas finas do material particulado se separam da coluna de material e se misturam com ar induzido gerando poeira.

A queda livre de material pode ser visualizada através da Figura 2.1, com uma moega descarregando material particulado, provocando um fluxo de ar, que é chamado de ar induzido. O núcleo do fluxo, consegue se manter constantes até a zona de impacto gerando poeira fugitiva e formando uma pilha de material na zona de impacto. Liu (2013) 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.

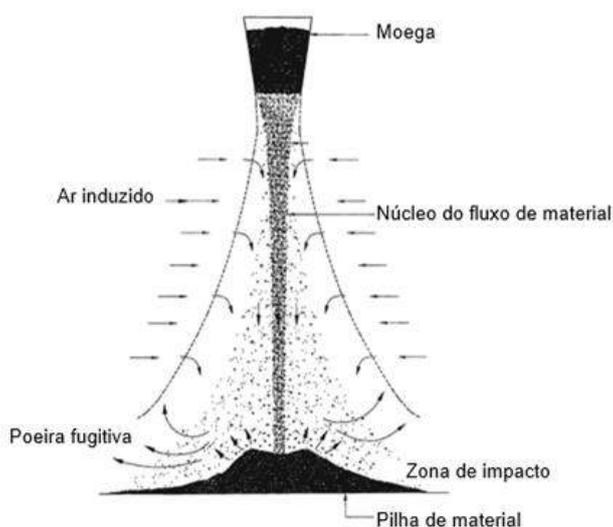


Figura 2.1 - Princípio da queda livre de material.

Fonte: Liu (2003).

Karamanev (1996), considerou duas forças principais que atuam em uma única partícula em queda livre: a força de empuxo 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 Karamanev (1966):

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

Onde:

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

O coeficiente de arrasto é definido pela Equação 2.3:

$$C_d = \frac{1}{2} \frac{f_a}{\rho_f A_p V_r^2} \quad (2.3)$$

Onde:

d_p – *Diametro de partícula, [m]*

ρ_f – *Densidade do fluido, [kg/m³]*

ρ_p – *Densidade da partícula, [kg/m³]*

Adotando o coeficiente de arrasto da Expressão 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, tem-se um cálculo rápido, porém possuem elevado grau de incerteza e o que se pode afirmar é uma razoável precisão de sua estimativa. O cálculo do coeficiente de arrasto com base no modelo empírico de Karamanev (1996), foi realizado usando a 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, Ar , são representados pela Equação 2.5 e 2.6 McCabe *et al* (2003):

$$Re^2 = \frac{4 Ar}{3 C_d} \quad (2.5)$$

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

Wen e Yu (1966), buscando melhorar o entendimento da força de arrasto em um movimento de queda livre de material particulado, investigaram a força de arrasto agindo em um estado estacionário de uma partícula em suspensão e observaram a influência da porosidade neste fenômeno com a Expressão 2.7. A velocidade em estado estacionário está correlacionada com a força de arrasto de maneira a manter a partícula em repouso.

$$V_{hr} = v_t e_f^s \quad (2.7)$$

Onde:

V_{hr} – Velocidade no estado estacionário, [m/s].

v_t – Velocidade terminal, [m/s].

e_f – Porosidade, 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 através da Expressão 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, [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, as equações 2.7 e 2.8 mencionadas acima 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

Como em sua grande parte esses sólidos particulados possuem uma forma irregular, surge o conceito de esfericidade. A esfericidade mede o quanto distante um sólido está da forma esférica, por exemplo quanto se tem a esfericidade igual a 1, assume-se que a partícula é esférica, já quando a esfericidade é menor que 1, esta partícula pode possuir qualquer tipo de geometria.

A incorporação desta definição aos cálculos foi realizada a partir da Equação 2.10; McCabe *et al* (1993):

$$\psi = \frac{A_c}{A_p} \quad (2.10)$$

onde:

A_c – *Área superficial de uma esfera.*

A_p – *Área superficial de uma partícula.*

$$0 < \psi \leq 1$$

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 .

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

onde:

d_{eq} – *Diametro equivalente*, [m]

De acordo com a ISO 08573 (2010), dado uma massa de partículas m , de densidade ρ_s e volume v_p , o número 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.

$$N = \frac{M_t}{M_p} \quad (2.12)$$

Onde:

M_t – *Massa total*, [g]

M_p – *Massa da partícula*, [g]

Fayed e Otten (1997), consideraram que a definição de densidade real da partícula deve levar em conta o volume total do sólido, pois, é a razão entre a massa da partícula e seu volume, 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 despoejamento.

$$\rho_s = \frac{M_p}{V_t - V_p} \quad (2.13)$$

Onde:

V_t – Volume total, $[m^3]$.

V_p – Volume da partícula, $[m^3]$.

Green Perry (2007), definiram a densidade da partícula a relação entre a massa de uma amostra de material particulado e o volume de ocupado por este sólido, 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 esta massa total de partícula ocupa, conforme a Equação 2.15:

$$\rho_{ap} = \frac{M_p}{V_t} \quad (2.15)$$

A fração de vazios é importante para o escoamento gás sólidos, pois leva em consideração o volume de vazios presentes na coluna de material, quando as partículas finas entram em suspensão, expressa pela Expressão 2.16:

$$\emptyset = \frac{V - V_s}{V} = 1 - \frac{V_s}{V} = 1 - \frac{\rho_{ap}}{\rho_s} \quad (2.16)$$

Onde:

ρ_{ap} – Densidade aparente, $[kg/m^3]$.

ρ_s – Densidade do sólido, $[kg/m^3]$.

2.3 Problemas relacionados à saúde e ao meio ambiente decorrente da emissão de material particulado.

Segundo a ONS, 50% das doenças respiratórias crônicas e 60% das doenças respiratórias agudas estão associados a exposição de poluentes atmosféricos (Furieri e Castilho,2009). O contato com o sistema respiratório humano se dá pela capacidade de penetração das partículas, com os seus impactos variando de acordo com o particulado e tamanho (Resende,2007).

Além de servir para classificar forma e dimensão, a composição química das partículas segundo Fureri e Castilho (2009) também é um dos fatores que influenciam no nível de riscos da saúde humana com o período da exposição. Assim, dependendo da composição química, as partículas podem ser tóxicas ou até cancerígenas e a exposição humana a elas podem trazer sérias consequências a saúde.

O corpo humano com o seu sistema respiratório consegue se defender naturalmente de alguns tamanhos de partículas inaladas. Segundo Godish (1997), o sistema respiratório humano consegue filtrar ou se defender de partículas inaladas com os diâmetros maiores que 10 μm . A figura 2.2 demonstra a classificação da deposição das partículas no sistema respiratório em função do tamanho de partículas. Por exemplo a região traqueobronquial possui uma fração de deposição em uma grande faixa de diâmetros de 0,01 à 10 micrometros.

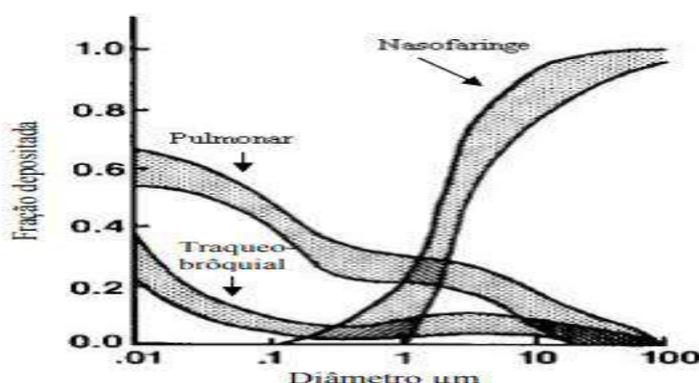


Figura 2.2 - Diâmetro de partículas no sistema respiratório.

Fonte: Godish (1997)

Como as partículas inaláveis de $10\ \mu\text{m}$ e $2,5\ \mu\text{m}$ são prejudiciais à saúde, o CONAMA em sua resolução nº 49 (2018) definiu estes como: P_{m10} sendo partículas com diâmetro equivalente de $10\ \mu\text{m}$ ou inferior e $P_{m2,5}$ sendo partículas com diâmetro equivalente de $2,5\ \mu\text{m}$, ou inferior. O P_{m10} penetra nas vias respiratórias ficando retidos no nariz e na nasofaringe, sendo eliminadas por mecanismos naturais do corpo humano como: deglutição, tosse, espirros e pelo aparelho mucociliar. Contudo, para um diâmetro de $P_{m2,5}$ as coisas acabam ficando mais sérias, pois, podem causar danos à saúde de humanos e de animais, conseqüentemente atingindo os brônquios e se alojando no sistema respiratório conforme mostra a Figura 2.3 de Ruzer e Harley (2005).

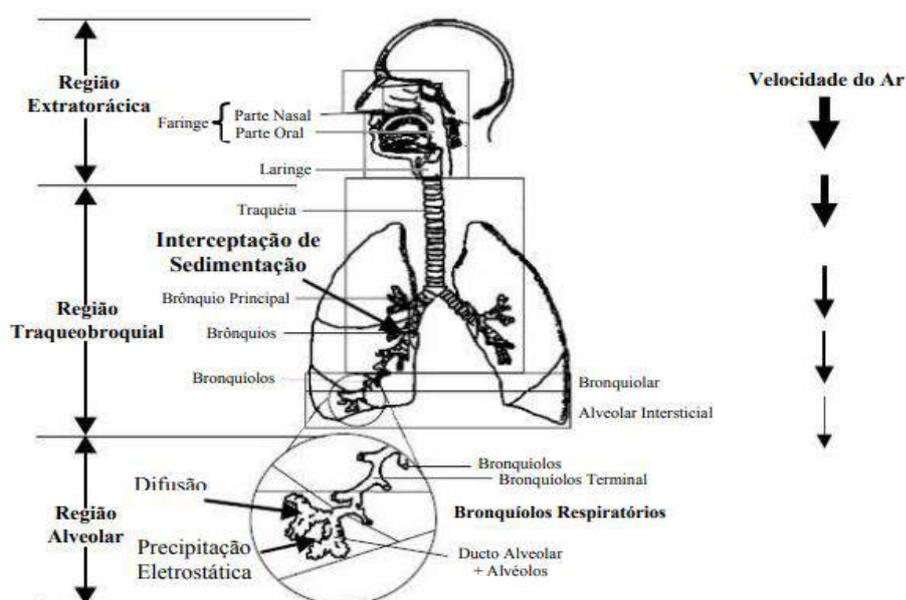


Figura 2.3 - Fluxograma do trato do sistema respiratório humano

Fonte: Ruzer e Harley (2005)

Os efeitos da emissão de poeira afetam também significativamente a flora em torno do qual é exposto. Esses efeitos podem ocorrer em todas as partes, desde as folhas onde se pode observar sintomas visíveis como a descoloração, encurtamento de caules e efeitos invisíveis como a redução do tamanho da mesma e que ainda segundo Maoli (2006), com conseqüente alterações fisiológicas, sem falar na redução da penetração da luz nas folhas prejudicando o processo de fotossíntese da vegetação nativa local. Nesse sentido, o Programa Nacional de Controle de Qualidade do Ar — Pronar, instituiu a criação da

resolução CONAMA n° 491 de 2018 no sentido de estabelecer 12 estratégias para o controle, preservação e recuperação da qualidade do ar. Este programa estabeleceu como estratégia básica para limitar as emissões, observando a fonte poluente.

Parâmetros como limites de emissões e de padrões da qualidade do ar, são definidos de acordo com o poluente e fonte, sendo considerados instrumentos importantes para o controle de poluição atmosférica (Conama,2018). Entretanto, existe outra ferramenta que ajuda a definir o nível local da concentração de partículas como o enquadramento das áreas segundo os usos pretendidos.

Existem duas categorias de padrões de qualidade do ar: os padrões primários e secundários. Os padrões primários se referem a efeitos na saúde da população humana, o mínimo dano a fauna, flora, aos materiais e ao meio ambiente, em geral, por menos danosos que sejam. Por outro lado, os padrões secundários consistem em níveis de concentrações de matéria particulado abaixo do mínimo causando pouquíssimo danos à saúde humana (Conama,2018).

A aceleração do desenvolvimento urbano e a modernização das grandes cidades faz com que a poluição atmosférica tenha um grande impacto na saúde humana. Diante disso, o CONAMA em sua resolução n° 491/2018 resolveu adotar padrões na qualidade do ar mais rigoroso em três categorias distintas para ambientes industriais: PI-2; PI-3 e PF. O PI-1 consiste em um risco de mortalidade precoce de até 15% em relação a $35 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para o $\text{P}_{\text{m}2,5}$ e de $70 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para o $\text{P}_{\text{m}10}$. A categoria PI-2 é adotada quando o risco de mortalidade está reduzido a 6% para $25 \mu\text{g}/\text{m}^3$ utilizando o $\text{P}_{\text{m}2,5}$ e para o $\text{P}_{\text{m}10}$ é de 6% para $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Já a categoria PI-3 se refere ao risco de mortalidade de 6% para $15 \mu\text{g}/\text{m}^3$ utilizando o $\text{P}_{\text{m}2,5}$ e de 6% para $\text{P}_{\text{m}10}$ para $30 \mu\text{g}/\text{m}^3$ e a classe PF são os níveis mais baixos de risco de mortalidade relacionado ao câncer de pulmão e cardiopulmonar, porém, ocorre um aumento de mais de 95% ao longo prazo para o $\text{P}_{\text{m}2,5}$.

A Tabela 2.1, mostra os padrões de $\text{P}_{\text{m}10}$ e $\text{P}_{\text{m}2,5}$ que podem ser encontrados em ambientes industriais anualmente e durante 24 horas de acordo com a classificação do ambiente industrial. O total de material particulado em

suspensão (TPS) são partículas com o diâmetro aerodinâmico inferior ou a igual a 50 micrometros, então anualmente em um ambiente com risco baixo PF se pode encontrar o padrão de 80 mg/m³ e em 24 horas 240 mg/m³.

Tabela 2-1 -Poluente Atmosférico.

Poluente atmosférico	Período de referencia	PI-1	PI-2	PI-3	PF
		Mg/m ³	Mg/m ³	Mg/m ³	Mg/m ³
<i>PM</i> ₁₀	24 horas	120	100	75	50
	Anual	40	35	30	20
<i>PM</i> _{2,5}	24 horas	60	50	37	25
	Anual	20	17	15	10
PTS	24 horas	-	-	-	240
	Anual	-	-	-	80

$\bar{C}_{g\text{-anual}}$ – Concentração média geométrica anual.

$\bar{C}_{g\text{-24 h}}$

– Concentração média de 24 horas. não deve ser excedida mais de uma vez por ano.

Fonte: CONAMA n° 491 de 2018.

2.4 Revisão de modelos empíricos para a previsão da vazão de despoejamento

A seguir será apresentado uma revisão da literatura acerca dos principais modelos empíricos necessários para o cálculo da obtenção da vazão de despoejamento usada em sistema industriais. Tais modelos serão avaliados com base no seu potencial de previsão e com base nos testes experimentais que serão explicados nos próximos capítulos.

Dentre os trabalhos importante desenvolvido com intuito de minimizar o problema da emissão de poeira pode-se citar o trabalho Ullmann (1998). Nesse trabalho foi estudado e analisado a capacidade de geração emissão poeira decorrente do transporte de material particulado em correia transportadora com base na análise de três zonas sensíveis. A Figura 2.4, mostra um esquema da análise do problema e nela é possível identificar três zonas responsáveis pela emissão de poeira. A zona 1 é a região onde a poeira é gerada ao deixar a correia, a zona 2 é a região de geração de poeira do material em queda livre em virtude das partículas finas serem arrastadas pelo ar, e a zona 3 é a região de geração de poeira provocada pelo impacto do material com a correia receptora.

O uso de exaustores tanto na primeira quanto na segunda correia (Figura 2.4b) permitiu a eliminação das zonas sensíveis e isso acarretou em melhoria para processo.

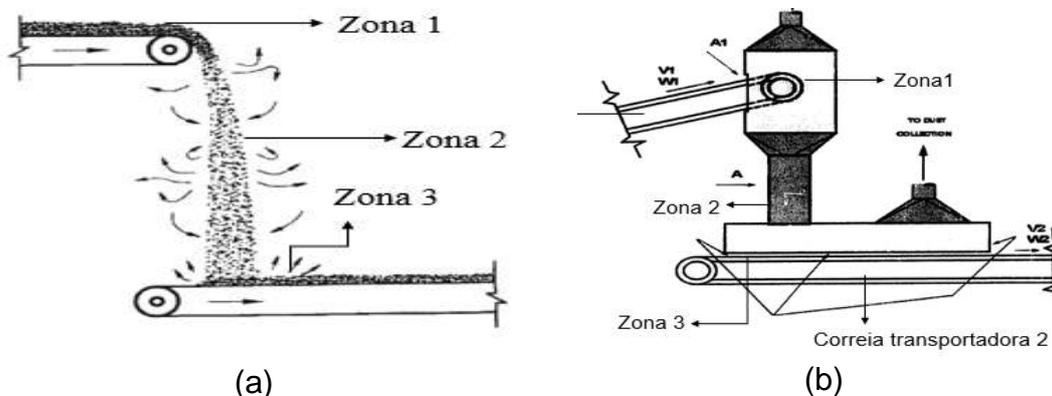


Figura 2.4 - Aparato experimental de Ullmann (1998) (a) Zonas sensíveis em correias transportadoras e (b) uso de exaustores nas correias.

Fonte: Liu (2003) e Ullmann (1998)

Através da figura 2.5 podemos observar a divisão da tubulação em duas seções: superior e inferior. A seção superior é definida como aquela em que a velocidade de entrada de ar é maior do que a velocidade da partícula.

Já a inferior as partículas estão mais rápidas e a velocidade de deslizamento é positiva, mas a aceleração das partículas é retardada pelo ar arrastado induzido na seção. O comprimento das seções inferiores e superiores são: s_1 e s_2 respectivamente. A velocidade de deslizamento entre o fluido e a partícula é definida pela equação 2.17:

$$U_S = V_p - U_a \quad (2.17)$$

Onde:

U_S – Velocidade de deslizamento entre o fluido e a partícula, [m/s].

U_a – Velocidade do ar, [m/s].

V_p – Velocidade da partícula, [m/s].

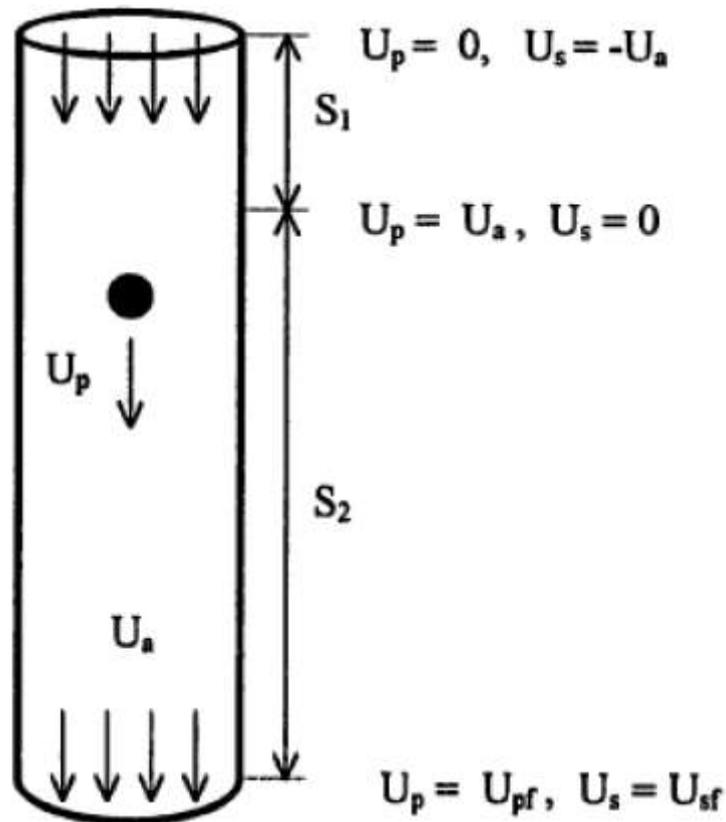


Figura 2.5 - Processo de escoamento de material.

Fonte: Ullmann (1998).

Para Ullmann (1998) a equação de balanço de energia é a forma de avaliar o ar induzido que é o principal componente do volume de exaustão, representado pela equação 2.18, pois quando as partículas caem na superfície a energia potencial é convertida em calor devido a dissipação da energia mecânica, gerando assim com a energia cinética das partículas o ar induzido.

$$\dot{m}_p gh = \dot{m}_p \frac{U_{pd}^2}{2} + \dot{m}_a \frac{U_{af}^2}{2} + w_f \quad (2.18)$$

onde:

\dot{m}_p – Vazão mássica, [kg/s].

\dot{m}_a – Vazão mássica de ar, [kg/s].

h – Altura de queda, [m].

U_{pd} – Velocidade média das partículas, [m/s].

w_f – Dissipação ficcional de energia mecânica.

U_{af} – Velocidade média do ar, [m/s].

Para a equação acima ser resolvida é preciso de mais uma equação pois U_{pd} e U_{af} são incógnitas. Os outros parâmetros como o termo de vazão mássica de ar \dot{m}_a não são incógnitas e dependem da vazão mássica de ar, expressa pela equação 2.19:

$$\dot{m}_a = Q_{ar} \rho_a = U_a A \emptyset \rho_a \quad (2.19)$$

Onde:

A – Área da seção transversal da coluna de material, [m²].

ρ_a – Densidade do ar, [kg/m³].

\emptyset – 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 única 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.

Essas partículas aceleram 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.

Simplificando o problema e analisando o movimento de uma única partícula atravessando a seção inferior e superior segundo a Figura 2.5 temos a Equação 2.20 do movimento, na qual o último termo da equação representa a força de empuxo:

$$\dot{m}_p \frac{dv_p}{dt} = m_p g - f_d - V_p \rho_a g \quad (2.20)$$

Onde:

f_d – Coeficiente de arrasto, [N].

A força de empuxo, ultimo termo da equação pode ser desprezado, devido à grande densidade das partículas em relação ao ar junto com o termo da aceleração da massa adicional exercido pela ação do ar induzido pela tubulação das partículas como consequência da aceleração das partículas conforme Crift (1978), é apresentado pela equação 2.21

$$f_d = C_d \rho_a \alpha_p |U_s| \frac{U_s}{2} \quad (2.21)$$

Onde:

α_p – Constante empirica de Crift(1978).

Para Ullmann (1998) as partículas maiores que 0,25 cm alcançam um alto número de R_e rapidamente, por isso a condição $R_e > 500$ (região newtoniana) o coeficiente de arrasto adotado é de $C_d = 0.44$. Esse valor adotado implica em uma força de arrasto maior em comparação a R_e menores e consequentes maiores, velocidades maiores de ar induzido, porém este valor pode ser considerado uma forma de conservadorismo.

A resolução da equação do movimento para U_s em função do comprimento ao invés do tempo é dado pela Expressão 2.22:

$$\frac{d_s}{d_t} = V_p = U_s + U_d \quad (2.22)$$

Onde:

U_d – Velocidade de deslizamento durante o chute, [m/s].

Combinando a equação 2.19- 2.21, temos a equação 2.23:

$$d_s = \frac{U_s + U_a}{g - k |U_s| U_s} \quad (2.23)$$

Onde:

$$K = \frac{3C_d \rho_a}{4d_p \rho_p} \quad (2.24)$$

A solução da equação 2.22 adotada por Ullmann (1998), foi a possibilidade de adotar condições de contorno ($U_s = 0$) e $U_s = U_f$, para a seção inferior do tubo, resultado em uma relação para s_2 , U_a e U_{sf} ou U_{pf} desde que $U_{pf} = U_a + U_{st}$, assim tem-se a equação 2.25:

$$S_2 = \frac{1}{2K} \left(\frac{U_a}{(g/k)^{1/2}} \right) \ln \left(\frac{1 + \frac{U_p}{(g/k)^{1/2}}}{1 - \frac{U_{sf}}{(g/k)^{1/2}}} \right) - \frac{1}{2k} \ln \left[1 - \left(\frac{U_{sf}}{(g/k)^{1/2}} \right)^2 \right] \quad (2.25)$$

Outra forma de solução, adotando a similaridade para obter uma expressão para s_1 em função de U_a podendo ser desenvolvida resolvendo a equação 2.23 para a seção superior da tubulação. Desta vez as condições limites aplicáveis são: $U_s = -U_a$; ($S = 0$) e ($S = s_1$) com estas condições de contorno a solução se torna a equação 2.26:

$$S_1 = \frac{1}{K} \left(\frac{U_a}{(g/k)^{1/2}} \right) \tan^{-1} \left(\frac{U_a}{(g/k)^{1/2}} \right) - \frac{1}{2k} \ln \left[1 - \left(\frac{U_a}{(g/k)^{1/2}} \right)^2 \right] \quad (2.26)$$

As equações expressas acima proveem da relação entre U_{pt} ou (U_{st}) e U_a com a altura total da tubulação, sendo a solução adicional para solução das equações 2.25 e 2.26, portanto a expressão 2.27:

$$H=S_1+ S_2 \quad (2.27)$$

A questão da dissipação da energia expressa pela Equação 2.28 é o resultado do atrito entre a parede da tubulação e da outra coluna de material, sendo ignorado a turbulência. A melhor correlação a se adaptar ao problema foi a de P.Pfeiffer (1966), pois previa um baixo limite de perdas juntamente com Soo (1982) e seu rendimento produz taxas de ar mais fortes, consistente com o cálculos conservadores para o volume de exaustão. Com isso a expressão do coeficiente de fricção é expressa pelas Equações 2.28 e 2.29.

$$f_m=f_a \left(1+\frac{M_p}{M_a} \right)^{0.3} \quad (2.28)$$

Onde:

f_a – Fator de atrito em tubo liso.

D – Diâmetro do chute, [m].

μ_a – Viscosidade dinâmica, [Pa.s]

Em sua formação, Ullmann (1998) analisou o comportamento de como as perdas por atrito não se restringem à parede da tubulação mais também incluem as perdas por entrada de ar e flexão, essas perdas (Δ_p) são geralmente expressas em termos múltiplos por perdas de velocidade, como apresentada na equação 2.29

$$\Delta_p=n \frac{U_a^2}{2} \quad (2.29)$$

As perdas adotadas para a equação acima, por conservadorismo apenas metade da perda por velocidade é atribuída à perda de entrada de ar e o resto a um fluxo de transporte para a próxima correia transportadora (adotado $n=1$ para esse tipo). Já as perdas relacionadas a saída são implicitamente correspondentes a equação da energia (em termos da energia cinética do ar), com isso as perdas totais por atrito são dadas pela Equação 2.30

$$w_f = \dot{M}_a \left(1 + 4f_m \frac{H}{d} \right) \frac{U_a^2}{2} \quad (2.30)$$

A avaliação da taxa volumétrica de ar arrastado Q é feita pelas equações 2.18; 2.19; 2.25; 2.28 e 2.30 estando em função dos parâmetros H , D , vazão mássica de material e as propriedades do material, produzindo a Equação 2.31.

$$U_a^4 \left(\frac{\dot{m}_p}{6g} \right) + U_a^3 \frac{A\varepsilon F \rho_g}{2} - U_a^2 \dot{m}_p k H + U_a \frac{2\dot{m}_p k (2gh)^{1/2}}{3g} - \dot{m}_p k gh^2 = 0 \quad (2.31)$$

Onde:

$$k = \frac{3C_d \rho_a}{(4d_p \rho_p)}, \text{ como trabalhamos com a região newtoniana o coeficiente de}$$

arrasto escolhido é o de 0.44.

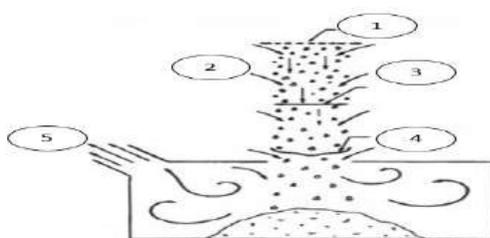
$F = 2 + \left(4f_m \frac{H}{D} \right)$, o coeficiente de atrito, f_m , utilizado por Ullman (1998) de forma conversador foi o valor médio de 0.02.

O controle da geração de poeira que ocorre durante o manuseio de material granulado, é feito principalmente através de sistemas de despoeiramento industriais. Segundo Ullmann (1998), o projeto desses sistemas, em especial quando aplicados a chutes de transferência, muitas vezes fornece valores de vazão de despoeiramento acima do necessário o que acaba danificando a tubulação ou diminuindo a eficiência das mangas do filtro manga. Portanto, Ullmann (1998) recomenda que a velocidade de captura, V_a , do sistema de despoeiramento industrial seja entre os valores de 0,76 m/s à 1 m/s para evitar a fuga das partículas. Além do mais, o mesmo também recomenda outro parâmetro de projeto para o dimensionamento do controle de poeira que é a velocidade de admissão, V_2 , a qual deve coincidir com a velocidade de captura V_a . Diante disso, e através dos estudos de geração de poeira em esteiras transportadoras (ver Figura 2.4a), Ullmann (1998), calcula empiricamente a vazão de despoeiramento conforme a Equação 2.32.

$$Q_{EV} \cong V_a A \varepsilon + A_2 V_2 \quad (2.32)$$

Onde: Q_{EV} é a vazão de despoeiramento (m^3/s), V_a e V_2 são as velocidades de captura e de admissão respectivamente (m/s), A e A_2 são as áreas da seção transversal do fluxo de material em queda livre e a área de choque respectivamente (m^2) e ε é porosidade do material.

Hemeon (1999), em seu trabalho, desenvolveu um modelo empírico para determinação da vazão volumétrica de despoeiramento necessária para o despoeiramento durante a pilhagem de material. O aparato experimental constituiu em uma cabine de geração de poeira o qual era responsável por receber o material em queda livre e gerar a poeira e o material utilizado foi o minério de ferro com diâmetro de partícula de 2 mm com a faixa de vazão de descarga utilizada de 100 l/min à 500 l/min. A Figura 2.6 mostra o esboço da experimentação utilizada, onde nela foi possível classificar pontos ao longo da queda tomando como base os fenômenos observados, tais como: a fonte de geração de poeira na saída da descarga (ponto 1), o momento em que o ar é induzido dentro da corrente de material (ponto 2), a influência da camada limite de velocidade no escoamento (ponto 3), a velocidade de contorno do ar (ponto 4) e a saída do ar induzido (ponto 5) responsável pela geração da poeira devido ao impacto do material. O autor considerou que durante a queda o movimento da coluna de material estava sujeito a uma força resultante única que é a força de arrasto. Esta força de arrasto resultante, segundo o autor, é a força responsável pela emissão de poeira, à medida que ela é maior que a força necessária para manter as partículas unidas e agem principalmente nas partículas mais finas da coluna de material em queda.



1- Fonte de geração de poeira; 2 -Ar induzido; 3- camada limite; 4- Velocidade de contorno de ar; 5- Saída de ar induzido.

Figura 2.6-Esquema Hemeon

Fonte: Hemeon (1999).

Hemeon (1999) Derivou a volume de exaustão Q_a e fez as seguintes considerações para se obter uma equação simplificada 2.33

$$Q_a^3 = \frac{\dot{m}_p}{m_s} C_d A_p A^2 \rho_s g h^2 \quad (2.33)$$

Onde:

$$C_d = 0,44.$$

$$g = 9,981, [m^2/s].$$

$$m_s = \rho_p \times \frac{1}{6} \pi d_p^3$$

$$A = \frac{1}{4} \pi d_p^2$$

Ainda de acordo com o modelo de Hemeon (1999), quando o material entra em queda livre toda a sua energia potencial é convertida em energia cinética e, de acordo com esse modelo, a vazão necessária para promover o despoejamento do sistema pode ser estimado com base na Equação 2.34

$$Q_a = \left(\frac{0,66 \dot{m}_p (hA)^2}{(d_p \rho_p)} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (2.34)$$

Onde:

Q_a – Vazão volumetrica, $[m^3/s]$.

h – Altura, $[m]$.

A – Área, $[m^2]$

Onde: \dot{m}_p é a vazão mássica de material (kg/s), h é a altura de queda do material (m), A é área da seção transversal da corrente de material em queda livre (m^2), d_p é o diâmetro da partícula (m) e ρ_p é a massa específica da partícula (kg/m^3)

Wypych *et al.* (2005), aperfeiçoaram o Método de Hemeon (1999) para previsão da vazão volumétrica de despoeiramento e levam em consideração a influência da temperatura. O material alumina foi usado em seus experimentos para os testes de emissão de poeira e à medida que se aumentava a temperatura (medidos a partir da temperatura ambiente) observou-se que o material em queda livre tinha maior propensão a emitir poeira. Além do mais, o estudo constatou que as técnicas existentes de projeto acabam por subestimar a carga real de poeira na qual o sistema de filtragem de poeira está submetido.

Dentre os principais modelos disponíveis na literatura para a previsão de vazão de despoeiramento de materiais em queda livres, têm-se os trabalhos de: Ullmann (1998), Hemeon (1999), Cooper e Arnold (1995), Ogata *et al.*(2001), Wypych e Cooker (2005), Esamaili *et al.* (2012) e (2015), Sun *et al.* (2019) e (2020). Tais modelos 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.

O trabalho de Xiaochuan *et al.* (2015), foi uma melhoria do trabalho de Ullmann (1998) para transportadores de correia baseadas nas zonas sensíveis de geração de poeira em ambiente do tipo semi-aberto. Conforme mostra a Figura 2.7, o trabalho consistiu em projetar um sistema de exaustão capaz de exaurir toda poeira gerada nas regiões 1, 2 e 3 simultaneamente.

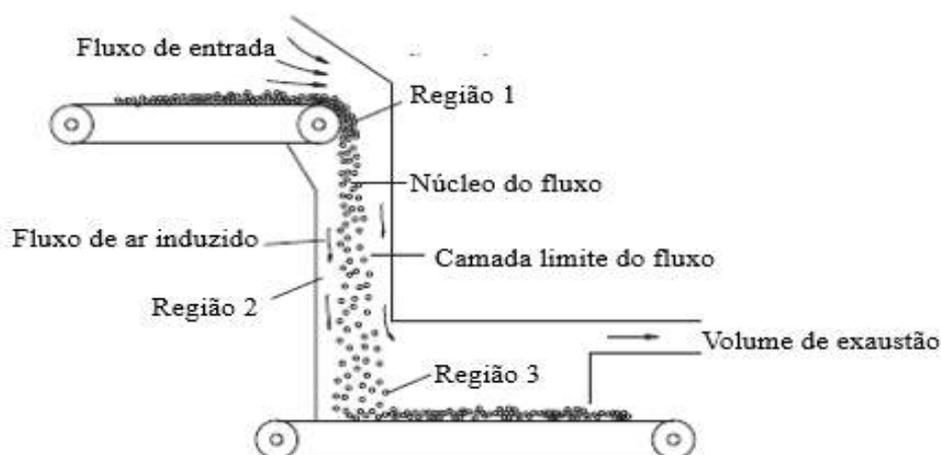


Figura 2.7 - Conceito de Xiaochuan.

Fonte: Xiaochuan *et al* (2015).

Os detalhes da experimentação realizada Xiaochuan *et al.* (2015) é mostrado na Figura 2.8. Conforme pode-se observar a bancada era composta por um silo para o armazenar o material, uma válvula para o controle da vazão, uma tubulação com 0,12 m de comprimento (que era responsável por conduzir o material no momento da queda livre) e uma caixa de supressão com tamanho de 50 cm x 35 cm x 45 cm equipada com uma plataforma de choque de 10 cm de diâmetro. Com o uso de um anemógrafo que foi instalado na tubulação foi possível constatar que o uso de tal tubulação permitia um melhor ajuste da corrente de ar sem que ocorrer turbulência significativa durante o processo de queda de material.

Através do estudo feito por Xiaochuan *et al.* (2015) obteve-se uma correlação para a velocidade do ar dado pela Equação 2.35.

$$u_g = C_{i1} \frac{\mu}{\rho_{ar}} \left[\frac{m_p}{\rho_{ar} (gh)^{\frac{1}{2}} d_p^2} \right]^{0.23} \quad (2.35)$$

Onde: u_g é a velocidade do ar (m/s), C_{i1} é uma constante obtido experimentalmente, o qual varia conforme o diâmetro de saída do silo, D é o diâmetro da tubulação (m), μ é a viscosidade dinâmica do ar (Pa.s), m_p é massa da partícula (kg), h é a altura de descarga (m), ρ_{ar} é a massa específica do ar (kg/m^3), g é a gravidade (m/s^2) e d_p é o diâmetro da partícula (m)

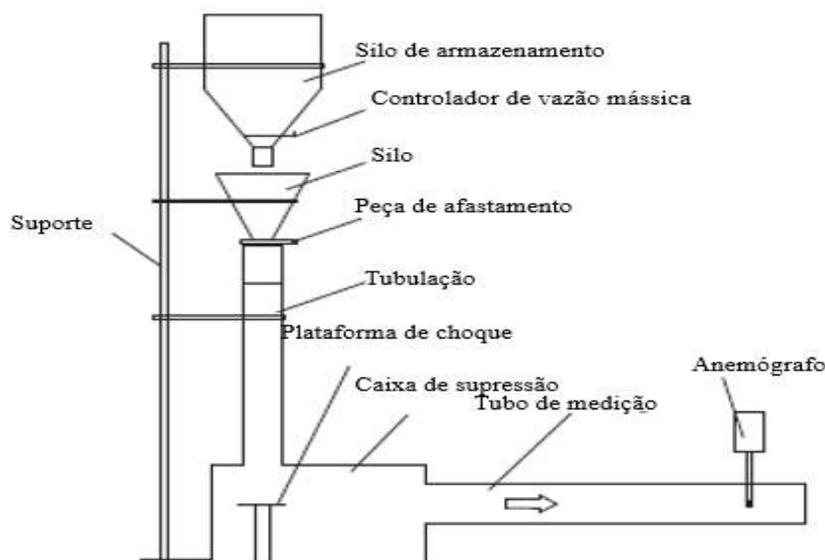


Figura 2.8- Aparato experimental Xiaochuan.

Fonte: Xiaochuan *et al* (2015)

Cooper e Arnold (1995) propuseram dois modelos para a determinação da vazão de despoiramento: modelo empírico e modelo analítico. O modelo empírico foi baseado na bancada mostrada na Figura 2.9, composta por uma moega principal responsável pela medição da vazão mássica, uma moega secundária responsável por promover um fluxo mássico decrescente advindo da moega principal e um funil com vazão mássica constante conectada a um reservatório feito em material transparente para recebimento do material em queda livre. Nessa bancada a vazão mássica de material é considerada constante e o fluxo de partículas em queda livre gera um a quantidade de ar induzido responsável pela geração da poeira. Para o modelo empírico proposto por esse trabalho a quantidade de poeira que pode ser exaurida pelo sistema de filtragem pode ser estimado com base na Equação 2.36.

$$Q_{ent} = \left((V_0^2 + 2gh)^{\frac{1}{2}} - V_0 \right) A_0 \quad (2.36)$$

Onde:

V_0 – Velocidade inicial, [m/s].

A_0 – Área inicial, [m²].

Q_{ent} – Vazão volumétrica, $[m^3/s]$.

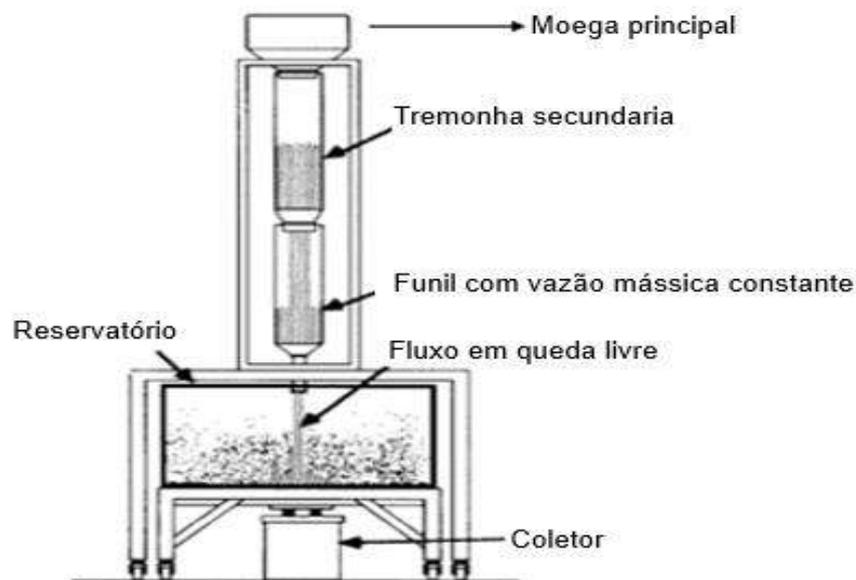


Figura 2.9- Aparato experimental de Cooper e Arnold

Fonte: Cooper e Arnold (1995).

Onde: V_0 é a velocidade inicial de escoamento (m/s), g é a aceleração da gravidade (m/s^2), h é a altura correspondente a saída de descarga da moega até a área de impacto do material (m) e A_0 é a área da saída da moega (m^2). A Velocidade inicial de escoamento, V_0 , é estimada a partir da saída do material a granel do orifício da moega, estando diretamente relacionada com o tempo de queda e com a gravidade.

A segunda abordagem para previsão da vazão de despoeiramento é baseada em uma abordagem analítica, tomando como base a distribuição normal de partículas finas que ao se chocarem com a superfície de impacto geram uma pluma de poeira que se dispersa de modo assumir o comportamento de uma distribuição normal. Esse modelo é também conhecido como modelo de pluma simples e segundo Cooper e Arnold (1995) é caracterizado por possuir maior emissão de poeira no centro da pluma conforme mostra a Figura 2.10. Nesse modelo um fluxo decrescente de material, tem o mesmo diâmetro da boca do silo com a poeira gerada proporcionalmente à altura de queda e ao diâmetro

da moega. Para esse modelo a vazão de despoeiramento foi estimada com base em uma análise analítica e é dado pela Equação 2.37.

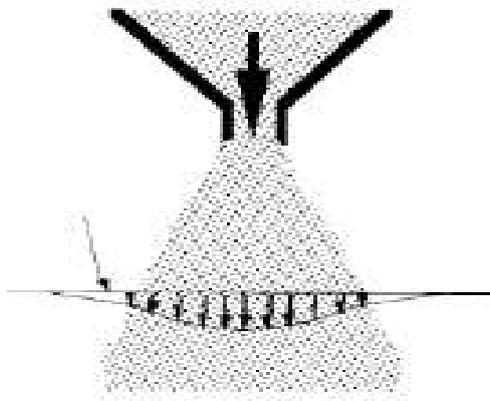


Figura 2.10- Modelo de pluma simples analítica.

Fonte: Cooper e Arnold (1995).

$$Q_a = C_{pl} B^{\frac{1}{3}} h^{\frac{1}{3}} \quad (2.37)$$

Onde: C_{pl} é uma constante empírica que depende do tipo de pluma, B é a constante de fluabilidade e h é a altura de queda (m). A constante de fluabilidade, B , representa as partículas que ficam em suspensão no ar durante a queda livre e é característico de cada material podendo ser expressa de acordo com Equação 2.38.

$$B = v_0 g \quad (2.38)$$

Onde: v_0 é a velocidade inicial do fluxo de material (m/s) e g é a aceleração da gravidade (m/s^2). O modelo de Cooper e Arnold (1995) permite também calcular vazão de despoeiramento a partir da correlação entre a altura de queda e a vazão massa de material através da Equação 2.39.

$$Q_{ent} / \dot{m} \cong k (\dot{m})^m \times h^n \quad (2.39)$$

Onde:

k, m e n , são constantes determinadas empiricamente.

Ogata *et al* (2001), desenvolveu um método para previsão da vazão de despeiramento para baixos números de Reynolds com base nos teste da bancada experimental mostrada na Figura 2.11. O material utilizado para os ensaios foi esferas de vidro com tamanho de diâmetro de partícula, d_p , igual a $454 \mu\text{m}$ e densidade, ρ_p , da partícula igual 2590 kg/m^3 . A partir das análises dos resultados experimentais o autor conseguiu estimar a quantidade de ar induzido que era gerado pela queda livre de material e assim calcular a vazão de despeiramento necessária para exaurir toda a poeira gerada pelo processo. A vazão de despeiramento de acordo com o modelo de Ogata *et al* (2001) é mostrado na Equação 2.40.

$$Q_{ind} = \sqrt[3]{\frac{0,147 \dot{m} h^{1,7} A^2}{\rho_p d_p^{1,6}}} \quad (2.40)$$

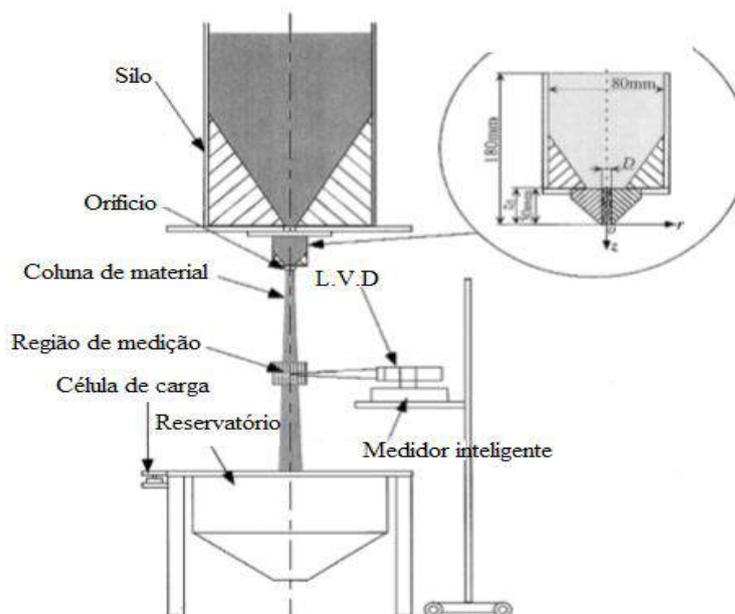


Figura 2.11 - Aparato experimental de Ogata *et al* (2001).

Fonte: Ogata *et al* (2001)

O método de Ogata *et al* (2001) para a previsão da vazão de despoejamento baseou-se em números de Reynolds inferiores a 500 e esse fato torna o seu método restritivo do ponto de vista de muitas aplicações industriais, uma vez que acaba por atender apenas a problemas isolados de emissão de poeira nessas condições. O método proposto por Hemeon (1999), por outro lado, a faixa do número de Reynolds é superior a 2400 o que permite ao modelo levar em consideração a influência da zona turbulenta no regime de escoamento e isso leva a uma maior aplicabilidade em problemas reais.

A bancada de testes usada nos trabalhos Wypych *et al.* (2005) é mostrado na Figura 2.11. Nesse trabalho o material é armazenado em uma moega com alimentação dupla e com controle de regulação da altura para a descarga, para garantir o fluxo de material constante durante cada ensaio. A descarga da moega faz o material em queda livre passar por um furo até impactar com a plataforma de choque centralizada formando assim uma pequena pilha de material e conseqüentemente emissão de poeira. O ar é extraído do reservatório mostrado (na Figura 2.12) utilizando o sistema de ventilação industrial, conseguindo assim manter a pressão do ar dentro do reservatório a mesma do ambiente. O material utilizado nos ensaios foi a alumina com granulometria média de 96 μm , densidade de partículas igual à 2465 kg/m^3 , densidade aparente solta no valor de 1010 kg/m^3

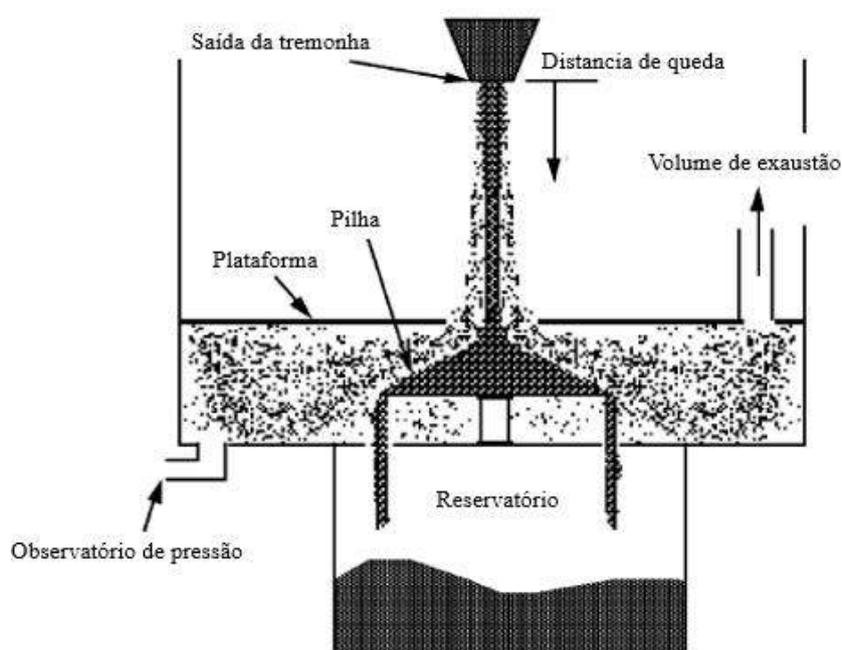


Figura 2.12 - Aparato experimental Wypych *et al* (2005)Fonte: Wypych *et al.* (2005).

Os trabalhos Wypych *et al.* (2005), foram avaliados com base no modelo de Hemeon (1999), a partir da Equação 2.33, que permitiu a melhora no modelo de Hemeon (1999). Portanto, a partir das análises dos seus resultados experimentais foi observado que o fluxo de partículas não pode ser considerado o mesmo que uma única partícula com uma força de arrasto em queda livre, e que a vazão de exaustão para o despoeiramento para esse caso pode ser estimada com base na Equação 2.41.

$$Q_{ind} = \left(\frac{0.66 \text{ g } \dot{m}^{-0.67} (h A)^2}{(d_p \rho_p)} \right)^{5/3} \quad (2.41)$$

Esmaili *et al.* (2013) propôs um modelo para vazão de despoeiramento com base em experimentos realizados em uma bancada de geração de poeira mostrada em detalhes nas Figuras 2.13 e 2.14. Em seu trabalho o autor garantiu que a cabine de geração de poeira fosse totalmente vedada, para que assim, fosse possível a obtenção de uma pressão constante e que o diâmetro de saída da moega fosse maior do que o diâmetro da coluna de material em queda livre.

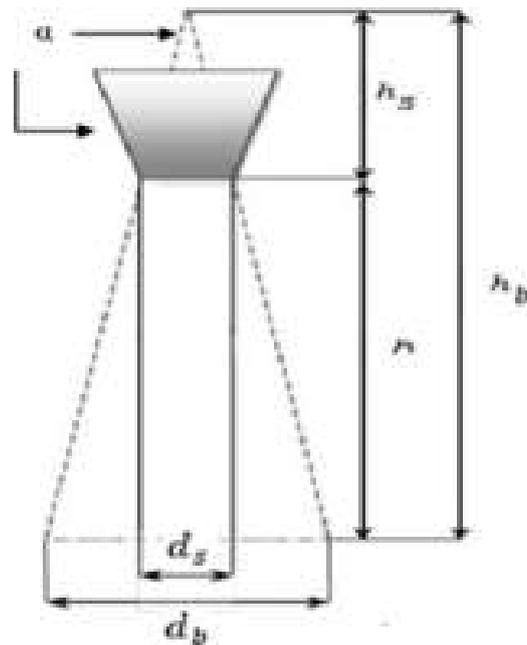


Figura 2.13 - Aparato experimental de Esmaili *et al* (2013)

Fonte: Esmaili *et al* (2013).

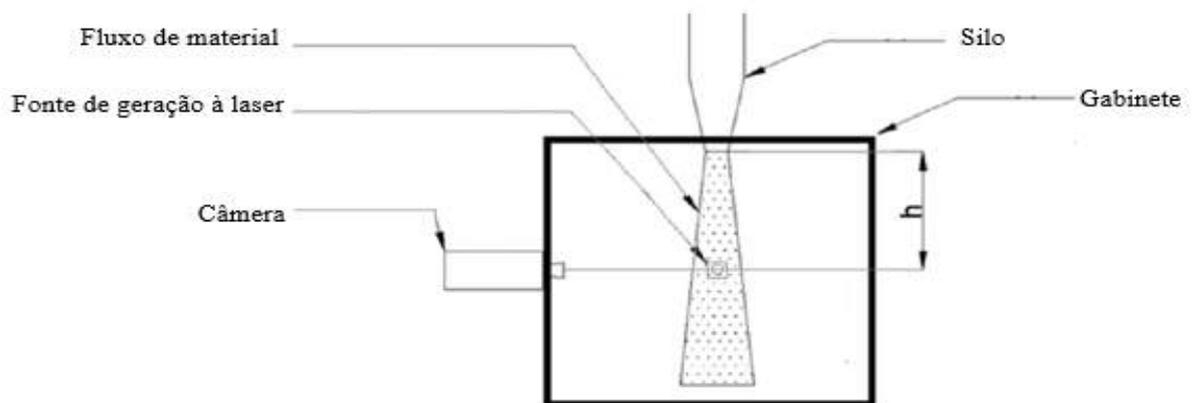


Figura 2.14 - Aparato experimental de Esmaili *et al* (2013)

Fonte: Esmaili *et al.* (2013)

Desse modo, a Equação 2.42 representa a maneira de Esmaili *et al.* (2013) de prever a vazão volumétrica com base em seus testes experimentais.

$$Q_{ind} = \frac{V_{cone}}{t_s} = \frac{\frac{\pi h}{12} (d_b^2 + d_b d_s + d_s^2)}{\sqrt{\frac{2m}{\rho_{ar}} \cos h^{-1} \left(e^{\frac{\rho_{ar} C_d h}{2m} + V_0} \right)}} \quad (2.42)$$

Onde: V_{cone} é o volume do cone projetado (m^3), d_b é o diâmetro da base do cone projetado (m), d_s é o diâmetro da seção transversal da saída da moega (m), ρ_{ar} é a massa específica do ar (kg/m^3), C_d é o coeficiente de arrasto, h é a altura de descarga (m), m é a massa de partícula (kg) e V_0 é a velocidade inicial do fluxo de material (m/s). A massa da partícula pode ser estimada com base na Equação 2.43.

$$m = \frac{\pi d_p^3 \rho_p}{6} \quad (2.43)$$

Conforme mostrado na Figura 2.14, a bancada experimental de Esmaili *et al.* (2013), foi equipada com um velocímetro por imagens (PIV) para captura do campo de velocidades das partículas e foi instalado a 900 mm abaixo da saída da moega. Abertura de saída da moega foi de 26 mm e um ângulo de 22°. O monitoramento da pressão dentro do reservatório foi feito através do nanômetro, os materiais utilizados foram esferas de vidro com 3 mm de diâmetro, pelotas de plástico com 3 mm de diâmetro e pelotas de plástico de 6 mm.

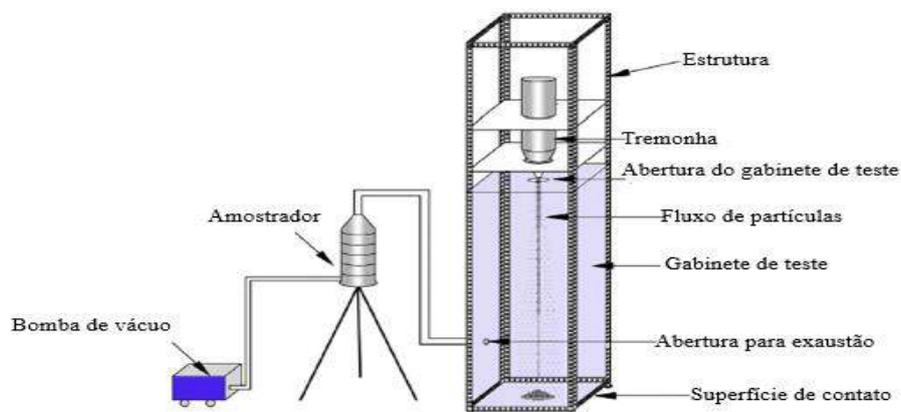


Figura 2.15 - Aparato experimental Wang et al (2016)

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

O processo de emissão de poeira está diretamente ligado a variáveis, tais como: altura de descarga, vazão mássica, diâmetro de suspensão e densidade aparente. Porém, Wang *et al.* (2016), em seus estudos investigaram a influência de outros fatores ligados diretamente ao processo de emissão de poeira que foi classificado como fluxo estável, turbulento e dispersivo, para assim avaliar o volume de exaustão. O aparato experimental de Wang *et al.* (2016) é mostrado na Figura 2.15 e era composto por três componentes principais: conjunto de silo e tremonha, gabinete de teste e o sistema de coleta de poeira. O silo tinha um diâmetro interno de 10 cm e altura de 10 cm conectado a uma tremonha, de saída cônica com semiângulo de 30° sendo instaurado em uma estrutura de aço, que pode ser elevado e abaixado.

Sun *et al.* (2019) e Sun *et al.* (2020) em seus trabalhos estudaram a influência da porosidade do material em queda livre. Tais estudos mostraram que o ar aspirado através dos poros é responsável por diminuir a força de coesão que mantem as partículas unidas fazendo com que aquelas partículas mais finas presente na corrente sejam suspensas em decorrência da força de arrasto do ar aspirado pela coluna de material no momento da queda. A Figura 2.16, representa um aglomerado de partículas em queda livre, onde algumas partículas foram classificadas com as letras A, B e C. De acordo Sun *et al.* (2019), quando este aglomerado acontece em queda livre as partículas A e B acabam por experimentar 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.

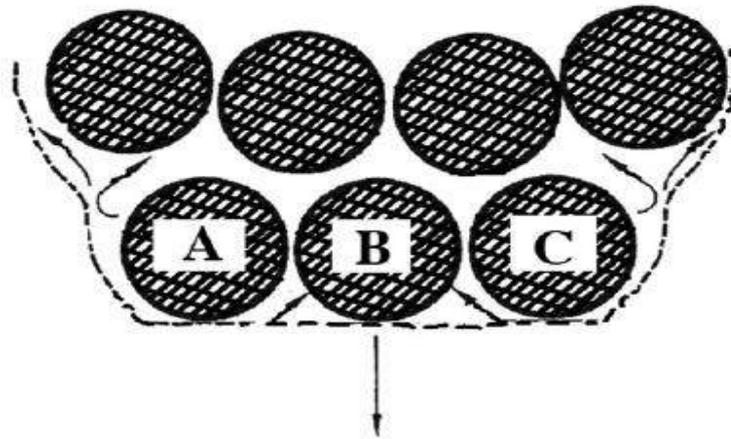


Figura 2.16 - Pluma de partículas.

Fonte: Sun *et al* (2019).

Dessa forma, com base nas observações de que a fração volumétrica do material em queda livre está diretamente ligado a ação da força de arrasto que atuam nessas partículas, Sun *et al.* (2019), desenvolveu uma expressão para estimar a vazão de exaustão baseada na Equação 2.44.

$$Q_a = \left(\frac{15m_p A_p^{2\mu_{ar}^{\frac{2}{3}}}}{\rho_p \rho_{ar}^{\frac{2}{3}} d_p^{\frac{5}{3}}} + (v_0^2 z + gz^2)(v_0^2 + 2gz)^{-1/3} \times \left(1 - \frac{m_p}{\rho_p A_0} (v_0^2 + 2gz)^{-1/2} \right) \right)^{1/3} \quad (2.44)$$

Onde: m_p é a massa da partícula (kg), A_p é a área superficial da partícula (m^2), d_p é o diâmetro de partícula (μm), v_0 é a velocidade inicial de fluxo de material (m/s), ρ_{ar} e ρ_p é a massa específica do ar e da partícula respectivamente (kg/m^3), z é a altura de descarga, A_0 é área da seção transversal da descarga do silo (m^2), g é a gravidade (m/s^2) e μ_{ar} é a viscosidade do ar (Pa.s).

Baseado na teoria da queda livre de material para a remoção de poeira relacionada ao volume de exaustão, Sun *et al.* (2020), desenvolveu um modelo semiempírico para a previsão da vazão de exaustão em ambientes confinado e não confinados, através de formulas teóricas do modelo de Sun *et al.* (2019). Sun *et al.* (2020), se baseou no modelo empírico de Sun *et al.* (2019), incorporando a queda livre de material próximo a superfície de contatos, obtendo a Equação 2.45, para o volume de exaustão.

$$Q_s = 0.783 \left(\frac{9m_p A_p^2 \mu_a^{2/3}}{2g \rho_p \rho_a^{2/3} d_p^{5/3}} (v_0^2 + 2gh)^{5/3} \left(1 - \frac{m_p}{\rho_p A_0} \right) (v_0^2 + 2gh)^{-1/2} \right)^{1/3} \quad (2.45)$$

Wang (2020) realizou teste em uma bancada de geração de poeira para prever a quantidade de ar induzido responsável pela geração de poeira sob várias condições de operação. A bancada usada no trabalho de Wang (2020) é mostrada na Figura 2.17, onde se tem um silo de armazenamento que possui um ajuste móvel que permite o controle de fluxo mássico de material. A geração de poeira ocorre devido ao choque do material com a plataforma de impacto localizada no centro do reservatório e a medição do campo de velocidade do ar induzido é feita através de um tubo instrumentalizado com um anemógrafo com aquisição de dado computadorizado.

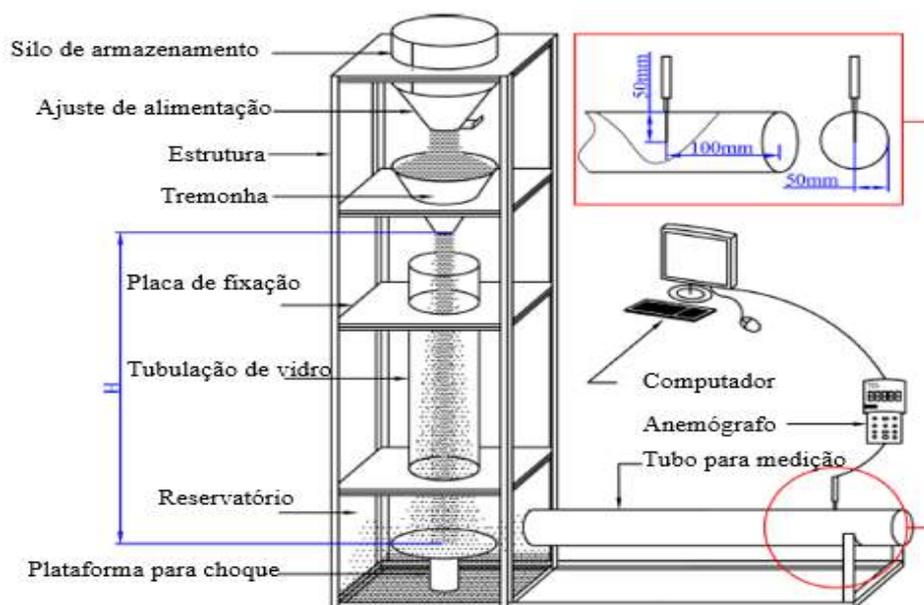


Figura 2.17 - Aparato experimental de Wang.

Fonte: Wang (2020)

Os resultados dos testes para o trabalho de Wang (2020) permitiram a obtenção de uma expressão empírica dada pela Equação 2.29 para o cálculo da velocidade de fluxo de ar induzido, necessário para prever a quantidade de ar induzido. A Equação 2.46 pode ser usada para uma faixa de coeficiente de atrito entre 0,62 a 0,94 e para uma faixa de diâmetro de partícula de 3,27 a 9,22 mm.

$$u_{ar} = \frac{k\mu}{\rho_p d_p} \times \left[\frac{m_p}{\rho_{ar} g^{1/2} h^{3/2} D} \right]^{0.44} \quad (2.46)$$

Onde: u_g é a velocidade do ar (m/s), ρ_{ar} e ρ_p são a massa específica do ar e da partícula respectivamente (kg/m^3), m_p é a massa da partícula (kg), h é a altura de queda do material (m), d_p é o diâmetro da partícula (m), D é o diâmetro do tubo, g é a aceleração da gravidade (m/s^2) e k é uma constante empírica determinada experimentalmente, para um diâmetro fixo de tubo, para diferentes alturas de queda e tamanho de partículas.

3 METODOLOGIA EXPERIMENTAL

A seguir, será apresentado a metodologia que foi utilizada para este trabalho. Aqui será descrita a bancada que foi utilizada para os ensaios, assim com os procedimentos de ensaios utilizado para obtenção dos resultados para cálculo das vazões de despoeiramento.

3.1. Aparato e Procedimento Experimental

A bancada de teste que foi utilizada para este trabalho é exibida na Figura 3.1. Essa bancada é constituída de um silo (4) com altura de 680 mm e diâmetro de saída da descarga com 200 mm. Uma cabine de geração de poeira (9) com área de seção transversal de 800 x 700 mm e 900 mm de altura, com uma plataforma de choque no seu interior (6) usado para receber o material em queda livre e gerar a poeira. A parte superior da cabine é fechada com uma tampa de madeira de 5 mm de espessura (8), com um furo central de 200 mm por onde passa o material em queda livre.

Um sistema de despoeiramento industrial composto por: ventilador (1) + rotâmetro (2) + filtro de manga (3), com uma tubulação de 3 m de comprimento entre o ventilador e o rotâmetro, tubulação de 4,70 m de comprimento entre o rotâmetro e o filtro de manga e uma tubulação 7,70 m de comprimento e diâmetro de 100 mm, que percorre todo o sistema despoeiramento que tem diâmetro de 100 mm.

O material utilizado nesse experimento, para avaliação da vazão de despoeiramento, foi o carvão mineral moído do tipo coque. Para isso, três tipos de teste com esse material foram executados na bancada. Os experimentos consistiam em avaliar a queda livre do material, inicialmente depositado no silo, para as alturas 1,6 m com 10kg, 15kg e 20 kg; para 2 metros com 10kg, 15kg e 20 kg e finalmente para 3 metros com 10kg, 15kg e 20kg de material; com um teor de umidade inicial de 6%.

Trabalhou-se com essa umidade, pois no processo de pilhagem de material na industrial mineral, usa-se essa faixa de umidade para controle de poeira. O cálculo da massa de água para o carvão úmido foi calculado em base úmida de acordo com a Equação 3.1.

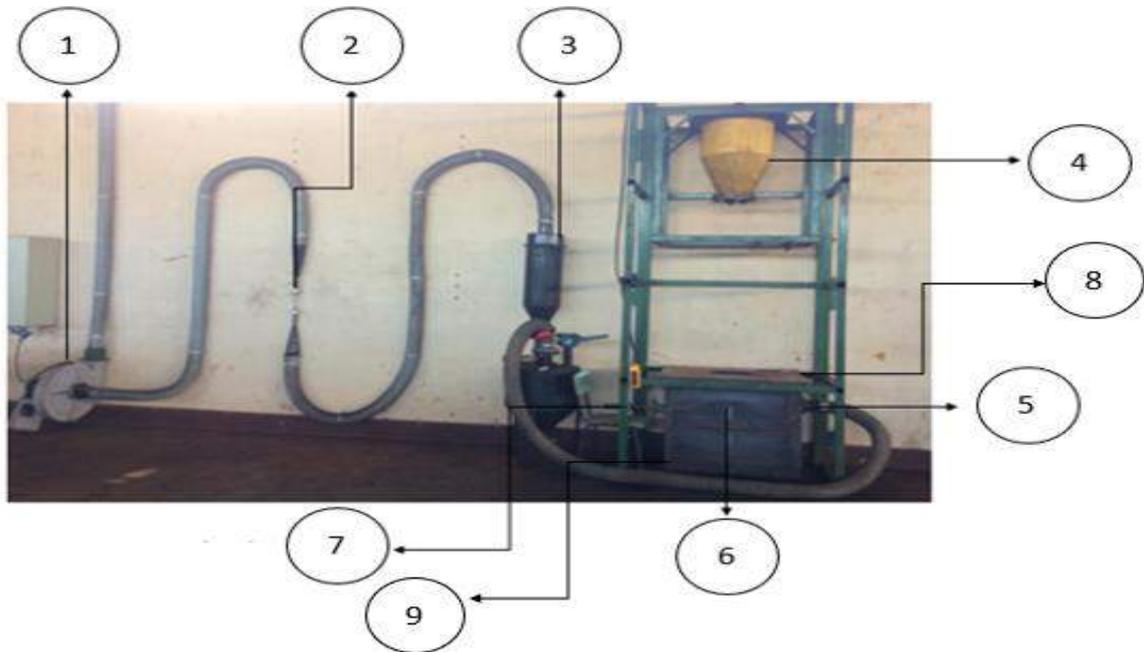


Figura 3.1 - Adequação da torre de poeira.

Fonte: Autor

- 1- Ventilador; 2- rotômetro; 3- filtro manga; 4- silo; 5- flange sistema de exaustão, 6-Plataforma de choque; 7- Contador de partículas; 8- Tampa de madeira; 9-Cabine de geração de poeira.

$$M_a = \frac{U}{(1-U)} \times M_s \quad (3.1)$$

Onde:

M_a – Massa de água, [kg].

M_s – Massa de material seco, [kg]

U – Umidade relativa.

Portando, com base no carvão seco e no cálculo da massa de água dado pela Equação 3.1, e com ajuda de uma betoneira, foi utilizada para o preparo da amostra ensaiada de carvão moído do tipo coque, para as faixas de umidade de interesse. Com o uso da betoneira, foi possível o manuseio de uma grande quantidade de material necessário para os ensaios; além de permitir a obtenção

de uma mistura homogênea do material (carvão mineral) com a água. A betoneira apresenta os seguintes dados técnicos: Capacidade do tambor 250 L; capacidade de mistura 170 L; rotação do tambor 26 rpm; comprimento de 1600 mm; altura de 1500 mm; largura de 900 mm; e peso de 135 kg.

A preparação da amostra úmida de carvão para os testes consistiu inicialmente na secagem do material em estufa, para a retirada total de qualquer umidade presente no leito. Essa secagem aconteceu em uma estufa a 100°C por período de 24 h, sendo que esta estufa possui uma temperatura de trabalho superior a 50°C, podendo chegar a 250°C, possuindo um volume de 280 litros. O objetivo da secagem em estufa é a de se garantir que o carvão estivesse completamente seco para o controle do preparo das amostras, para a umidade desejada de 6%.

A preparação da amostra de carvão mineral é realizada, conforme a Figura 3.2 da seguinte forma:

- Retira-se o material da estufa, após 24 horas de secagem à 100°C;
- Pesa-se o material a seco e em seguida fazer o cálculo da massa de água, através da Expressão 3.1.
- Mistura-se com a betoneira o carvão coque + água;
- Leva-se o carvão umedecido e se abastece a moega.

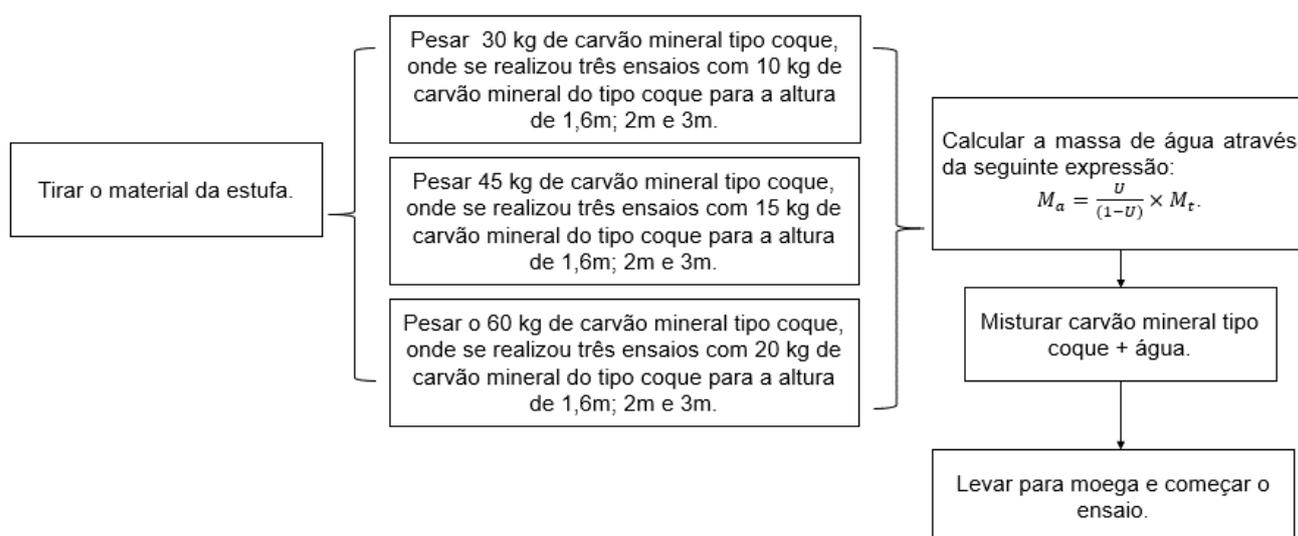


Figura 3.2 - Esquema de preparação de amostra.

Fonte: Autor

A descrição técnica detalhada dos equipamentos que compõe a bancada de teste é apresentada a seguir. Para tanto, cada componente do sistema como as peças e a instrumentação, serão descritos separadamente, com o objetivo de apresentar todas as características técnicas e funcionais dos elementos que compõe a compõe.

Desse modo, a bancada de teste vem equipada com um rotâmetro, que fica localizado entre o exaustor e o mangá do filtro. Sua localização poder visualizada pelo número 2 na Figura 3.1. O rotâmetro é um medidor de vazão industrial e é responsável por determinar a vazão de operação do sistema de ventilação, colocado na posição vertical. O princípio de funcionamento do rotâmetro é baseado nas linhas de fluxos do escoamento provocado pelo ventilador que passam por dentro do aparelho mantendo o flutuador, objeto que marca qual é a vazão que está em operação no sistema de despoeiramento, em um valor de vazão desejado; assim poderá ser visualizar na qual o sistema de despoeiramento está operando.

Os detalhes da cabine de geração de poeira são mostrados na Figura 3.3. Sua finalidade é armazenar o material e toda a poeira gerada durante o ensaio. Conforme pode-se observar na Figura 3.3, ela é composta pelas regiões 1 e 2. A região 1 é chamado de plataforma de choque onde é formado a pilha de material após o impacto. A região 2, tem por finalidade gerar poeira após o choque do material particulado com o fundo da cabine de geração de poeira. O objetivo da plataforma de choque é permitir que a poeira gerada na primeira região, seja diretamente contida antes que chegue na região 2, ficando mais próximo da corrente de exaustão do sistema de exaustão o que simula assim a formação de uma pilha de material, facilitando o estudo do processo de geração de poeira, que está por trás da pilhagem de material. A plataforma de choque é composta por dois discos: um inferior com 300 mm e diâmetro e um disco superior com 270 mm.

A moega mostrada na Figura 3.4, é usado para o armazenamento do material antes do início da queda. A partir da sua abertura de descarga é possível controlar a saída e a quantidade de material que entra em queda livre. As suas dimensões são: altura de 680 mm e diâmetro de saída de 200 mm.

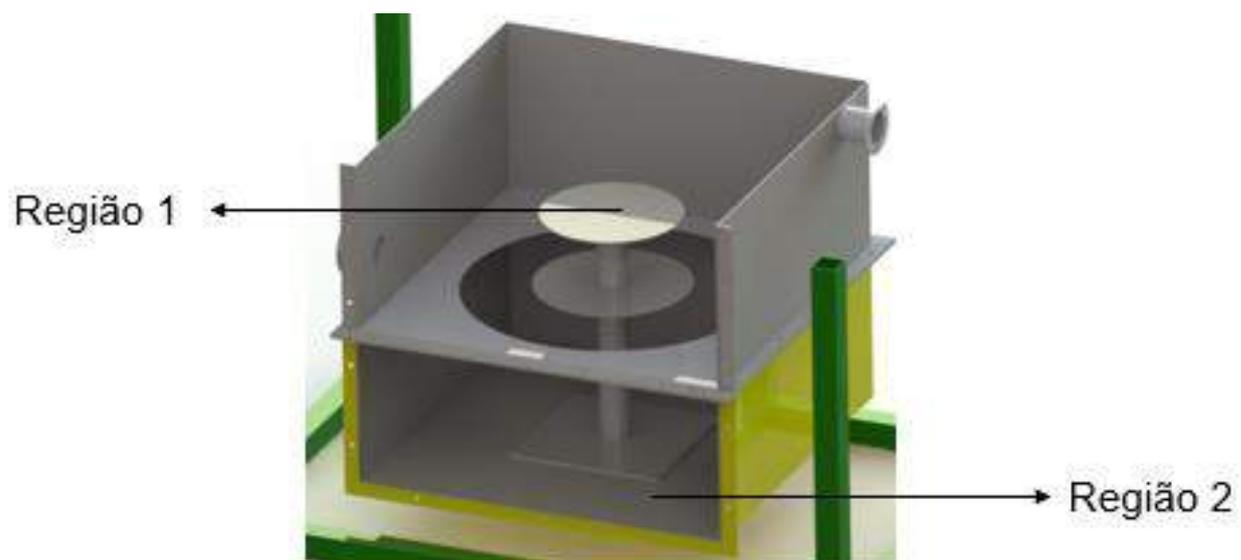


Figura 3.3 - Cabine de geração de poeira.

Fonte: Autor

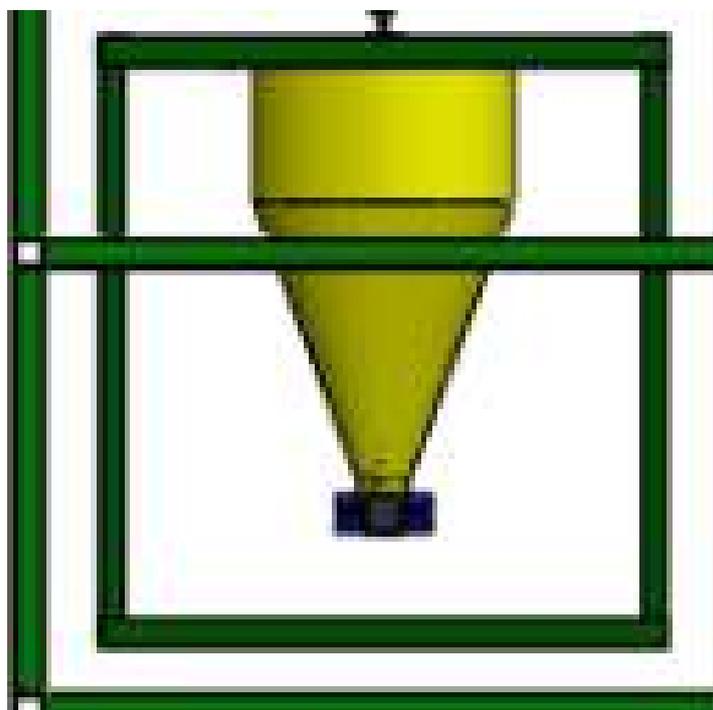


Figura 3.4 - Moega da bancada torre de poeira.

Fonte: Autor

Neste trabalho avaliou-se a eficiência de três vazões de despoeiramento que são: 430 l/min, 500 l/min e 550 l/min com o objetivo de exaurir toda a poeira gerada pela descarga de material, de maneira para com que não ocorra a deposição de material na tubulação ou danifique o filtro manga, ou fure a tubulação durante o transporte. Mapeando o comportamento destas três vazões pode-se oferecer aos engenheiros projetistas uma contribuição de projetos a sistema de exaustão, pois o engenheiro projetista saber qual foi a eficiência daquela vazão volumétrica na exaustão de material particulado. O sistema de ventilação industrial tem os seguintes parâmetros: Faixa de vazão (m^3/h) de 400 à 100.000; pressão estática (mmca) 150 a 2000; diâmetro do rotor (mm) 400; e momento de inércia (kg/m^2) 0,596.

A balança BK300, teve a função de pesar a quantidade de água necessária para misturar com o carvão mineral do tipo coque; com os seguintes dados técnicos: carga máxima 3100g; dimensão do prato 135 mm; linearidade $\pm 0,02$; repetibilidade $\pm 0,02$; peso aproximado de 4,6 kg; temperatura de operação 15 a 35C; e tempo de estabilização 0,5 a 0,4 s.

Para uma altura de ensaio, por exemplo: com a altura de 1,6 metros se pesa na balança da figura 3.8 30 kg de material, pois são necessários três ensaios com 10 kg de material, o mesmo procedimento é feito com 15 kg de material primeiro se pesa 45 kg para realizar três ensaios de 15 kg e por último com 20 kg se pesa 60 kg pois existe a necessidade de se realizar três ensaios de 20 kg. Os dados técnicos desta balança são: precisão de 0,02 kg; largura 420 mm; profundidade 630 e prato com dimensão de 420 x 550 mm.

O sistema de despoeiramento industrial composto pelo conjunto formado pelo filtro manga; rotâmetro e ventilador, cuja função é a captura das partículas durante a descarga de material, bem como, manter o ar sempre livre de poeira. A bancada de teste contou com o uso de um filtro manga para a captura das partículas de até $2\mu\text{m}$. O filtro mangas como o próprio nome sugere é responsável pela retenção de partículas de impurezas na área superficial do filtro. A Figura 3.5, mostra o filtro de mangas utilizado na bancada experimental.

O contador de partículas está instalado na bancada no local 7 da Figura 3.1. O contador é um instrumento portátil para medir o número de partículas inaláveis no ambiente que causam doenças respiratórias e o seu nível de

contaminação. O modelo de contador escolhido foi o CPT-100 da Instrutherm, Figura 3.6, no qual consegue-se armazenar até 5000 registros de medições além de capturar até seis diferentes tamanhos de diâmetros de partículas.



Figura 3.5 - Filtro manga.

Fonte: Autor

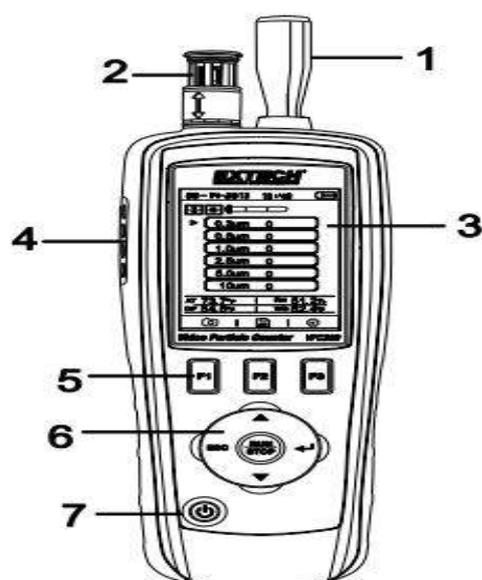


Figura 3.6 - Contador de partículas CPT-100.

Fonte: Instrutherm (2015)

O contador é equipado com um mostrador digital que permitir a medição das propriedades do ambiente, tais como, a temperatura, umidade relativa do ar, medição de ponto de orvalho, medição da temperatura de bulbo úmido, e medição de valor máximo e mínimo de número de partícula, além de permitir configurar o tempo de amostragem, intervalo de atraso de início de coleta e quantidade de ciclos de coleta. O contador de partícula modelo CPT-100 pode ser descrito através dos seguintes parâmetros: 1-Sonda isocinética mede a concentração de partículas em ambientes; 2-Sensor de Ur de temperatura mede a temperatura do ambiente e a umidade relativa; 3-LCD TFT painel de visualização dos níveis de concentração de material particulado; 4-Porta da interface USB passa os resultados medidos pelo contador de partículas para o computador; 5- F1, F2, F3- botões para acessar a interface do sistema; 6- Page dow/up (pagina para cima/para baixo), Enter (entrar), Run/Stop (executar/parar); 7-Botão ON/OFF (liga/desliga).

Os dados coletados pelo equipamento de medição são exportados para uma planilha do Excel, na qual são realizadas as análises e o processamento dos dados necessários para avaliar a eficiência dos três processos experimentais do sistema industrial de remoção de poeira, utilizando as vazões de operação do sistema de despoeiramento industrial medidas pelo rotâmetro, sendo estas 430 l / min; 500 l / min e 550 l / min.

A ISO 14644-1 (2015), define a concentração de partículas como o número individual de partículas por unidade de volume, conforme a Equação 3.2. O contador de partículas da Instrutherm modelo CPT-100 trabalha faz medições do número de partículas por volume de ar, porém os padrões expostos do Conama trabalham com concentração de partículas.

$$\frac{\left(N\rho * \frac{4\pi R^3}{3} [cm^3] * \rho \left[\frac{mg}{cm^3} \right] \right)}{V_a \left[\frac{m^3}{s} \right]} \quad (3.2)$$

Diante disso, com base no conhecimento do número de partículas contabilizado por volume de ar, com base no diâmetro medido da partícula e na

massa específica do material ensaiado, é possível encontrar o valor da concentração da massa de poeira por volume de ar, utilizando a Equação 3.7.

Para tratamento de dados, se torna necessário a multiplicação da Equação 3.2, do número de partículas por volume de ar, por 10^3 gerando a Equação 3.3. A multiplicação por 10^3 é importante pois converte o número partículas em concentração de partículas por volume de ar, isso fara com que os resultados sejam apresentados de acordo com a legislação ambiental do Conama.

$$\frac{\left(10^3 N \cdot \frac{4\pi R^3}{3} [cm^3] \cdot \rho \left[\frac{mg}{cm^3}\right]\right)}{V_a \left[\frac{m^3}{s}\right]} \quad (3.3)$$

A determinação da massa específica de carvão mineral do tipo coque foi feito através de ensaios utilizando um picnômetro de vidro. O picnômetro mediu uma densidade aparente para o carvão mineral do tipo coque no valor de 1,33 g/cm³ correspondendo a 1330 mg/cm³.

Segundo Ruzer e Harlley (2005), os padrões prejudiciais à saúde humana são 2,5 μ m e 10 μ m, por isso será investigado o comportamento destes tamanhos de partículas nos ensaios usando a bancada experimental para a avaliação da eficiência das vazões de despoeiramento. Porém, o modelo do contador de partículas, CPT-100, também oferece outros 4 canais com diferentes diâmetros de partículas são eles: 0,3 μ m; 0,5 μ m; 1 μ m e 5 μ m. Caso queira utilizar outro diâmetro de partículas será necessário substituir o valor do raio na equação acima, então tem -se:

Para o diâmetro de 2,5 micrometros, considera-se a Expressão 3.4:

$$C = \frac{\left(10^3 N \cdot \frac{4\pi (1,25e^{-4})^3}{3} [cm^3] \cdot 1330 \left[\frac{mg}{cm^3}\right]\right)}{4,717e^{-5} \left[\frac{m^3}{s}\right]} \quad (3.4)$$

onde:

C – Concentração de partículas, [mg/cm³].

A Equação 3.5 representa o cálculo da concentração de partículas no ambiente, para o diâmetro de 10 micrometros:

$$c = \frac{10^3 V_p N_p \rho_p}{V} \quad (3.5)$$

Onde:

V_p – Volume da partícula, [cm^3].

ρ_p – Densidade da partícula, [mg/cm^3].

V – Vazão de amostragem, [m^3/s].

N_p – Numero de partículas, [m^3].

A única variável das equações acima é o número de partículas, N_p , fornecida pelo contador de partículas durante cada bateria de ensaio tendo assim, os valores de concentração de poeira no ar em mg/cm^3 .

3.2. Procedimento experimental

Os procedimentos experimentais que será descrito a seguir, visa avaliar a eficiência das vazões volumétricas experimentais de exaustão de 430, 500 e 550 l/min do sistema de despoejamento industrial, medidas a partir do rotâmetro. Será executado os ensaios de descarga de material para diferentes alturas, que são elas: 1.6m; 2m e 3m, fazendo uso para tanto de três quantidades de materiais diferentes, tais como 10, 15 e 20 kg. Primeiro se escolheu uma altura de descarga de material e então se pesou 30 kg de material para realizar três ensaios de 10 kg; escolhe-se de novo uma altura e então se pesa 45 kg de material para realizar três ensaios de 15 kg; e por último trabalha-se com uma última altura e pesa 60 kg de material para realizar três ensaios de 20 kg.

Os níveis de concentração de partícula avaliados através do contador de partículas são para os diâmetros de partícula de 2,5 μm e 10 μm . É esperado que com o aumento da vazão de operação do sistema de despoejamento industrial, o objeto de medição mostre um menor pico de concentração de material particulado, de maneira a ter o menor nível possível de particulados no

ambiente. O aumento da vazão de despoeiramento faz com que a velocidade de captura do ar fique maior, conseguindo capturar mais partículas que estão em suspensão.

Com as metodologias experimentais, se deseja apresentar um protocolo de ensaio bastante robusto que consiga atender as situações industriais do processo de manuseio de material granulado, como a pilhagem de material, de maneira a ser uma ferramenta de auxílio para engenheiros projetistas que atuam no controle de poeira através de sistemas de despoeiramento industrial.

A Figura 3.7, mostra um fluxograma de preparo da bancada antes do início dos ensaios. Como pode-se observar tudo começa com a limpeza da cabine de geração de poeira a partir da remoção poeira presente no mesmo com o acionamento do ventilador em uma vazão de 550 l/min e com o contador de partícula montado dentro da cabine para aferição e certificação de que o ensaio comece com o ambiente limpo e isento de poeiras.

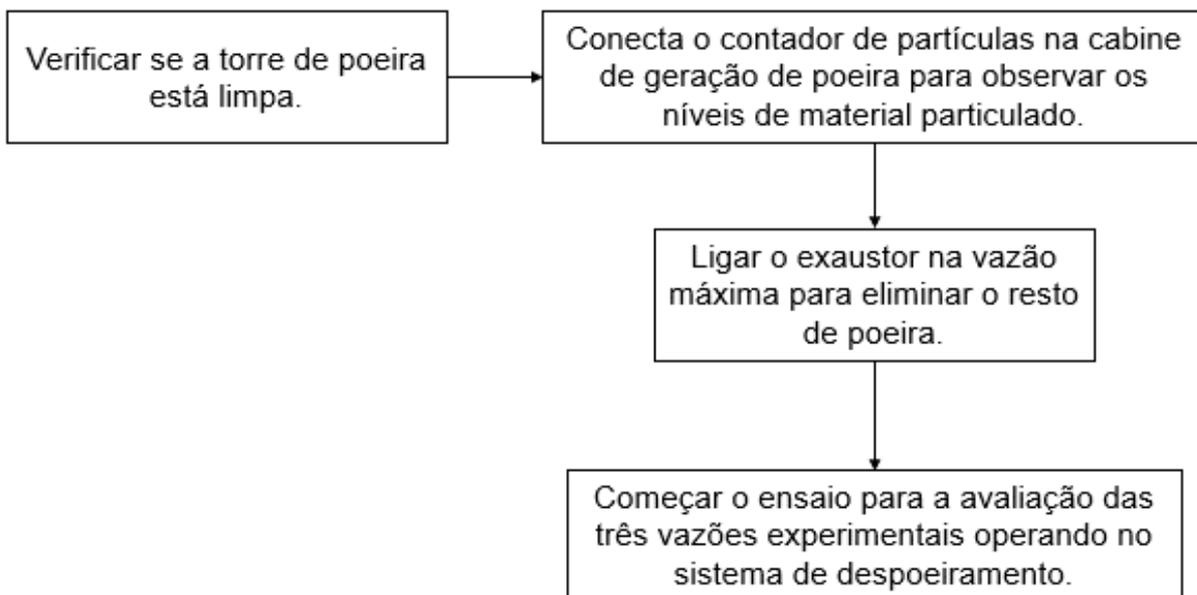


Figura 3.7 - Fluxograma de etapas antes de começar o ensaio.

Fonte: Autor

O protocolo de ensaio seguiu os procedimentos descritos na Figura 3.8, sendo este descrito a seguir: inicialmente colocar a tampa na cabine de geração de poeira; conectar o contador no flange lateral; ligar o ventilador na vazão máxima; ligar o contador de partícula para a avaliar a quantidade de material

particulado no ambiente; pesa 10kg, 15kg e 20kg de material respectivamente e realizar o cálculo da massa de água para 6% de umidade; definir a vazão de operação (430l/min; 500 l/min e 550 l/min); colocar a válvula na boca do silo; misturar carvão + água durante 3 minutos com a betoneira; coloca-se o objeto de choque no meio do reservatório; definir a altura de descarga (1,6 m; 2m e 3m) respectivamente; esperar 3 contagens do contador de partículas e liberar a queda do carvão mineral. Após isso, deixar o contador ligado durante 20 segundos; e por fim passar os dados para o computador, limpar a bancada e repetir o processo.



Figura 3.8 - Protocolo de ensaio.

Fonte: Autor

A altura de descarga do material foi medida com o uso de uma trena métrica. A Figura 3.9, mostra a altura medida em relação a superfície de choque no interior da cabine de geração de poeira; começando na saída da boca da moega e indo até superfície de choque. As alturas de queda escolhidas foram de 1,6 m, 2 m e 3 m; estas alturas foram escolhidas por serem as principais alturas utilizadas na indústria para a pilhagem de material e estocagem.



Figura 3.9 - Definição da altura de descarga.

Fonte: Autor

Foram usadas três quantidades de material para cada altura, ou seja, quando se pesou 30 kg se realizou três ensaios para a altura de 1,6m; 2m e 3m. O mesmo foi feito quando se pesou 45 kg e 60 kg. O tempo de queda foi determinado por meio da Equação 3.7, do movimento de queda livre, o qual seria o tempo em que o material se desprende da moega e se chocando com o chão gerando poeira.

$$T_q = \sqrt{\frac{2h}{g}} \quad (3.7)$$

Onde:

h – Altura, [m].

T_q – Tempo de queda, [s].

g – gravidade, [m/s²].

O tempo de queda é importante para se definir a vazão mássica de material durante o ensaio, no intuito de obter a comparação numérica experimental com os modelos matemáticos disponíveis na literatura.

Para o ensaio de vazão de despoeiramento, o contador de partículas foi ajustado para uma vazão de sucção do bocal de 2,93 l/m, com intervalo de

amostragem de 1 segundo; modo de amostragem cumulativo; os canais de diâmetro de partícula analisados foram 2,5 micro e 10 micro, com ciclos de amostragens de 20 segundos. Esse valor de vazão do bocal do contador consegue capturar todas as partículas de tamanho igual ou maior do que foi selecionado para ser investigado, pois possui função cumulativa, entretanto, o tamanho de partícula selecionados para avaliação são os mais prejudiciais à saúde humana sendo de 2,5 e 10 μm (Figura 3.10). A contagem durou 20 segundos, pois esse é o tempo que o contador de partículas demorou para estabilizar o nível de concentração de material particulado no final do ensaio com os níveis no início do ensaio, medindo o número de partículas presente no ensaio. Na Figura 3.10, pode-se visualizar a coluna de material sendo descarregada na cabine de geração de poeira. A geração de poeira acontece, quando o material se choca com a plataforma de choque e então o contador de partículas faz as medições do nível de concentração de material particulado para os seguintes diâmetros: 2,5 μm e 10 μm . Por último o sistema exaustão entra em operação exaurindo toda a poeira durante o ensaio.

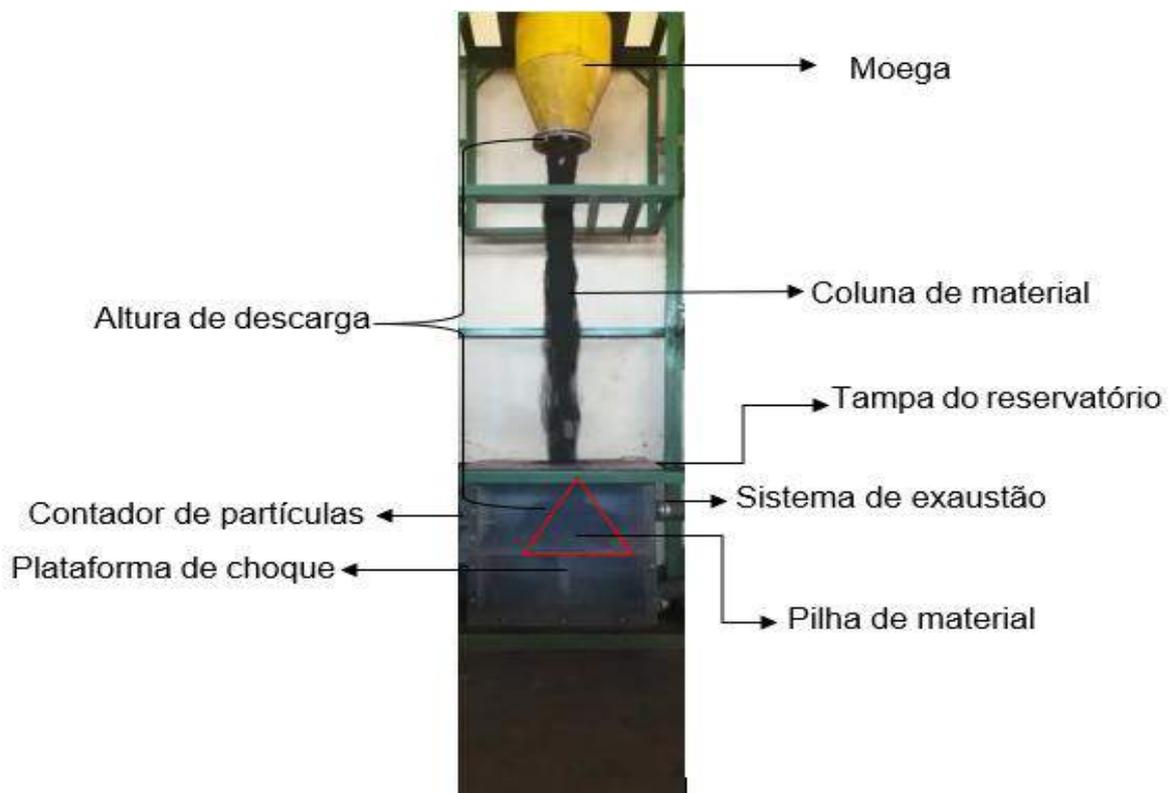


Figura 3.10 - Descarga de material.

Fonte: Autor.

Com isso, foi possível avaliar a eficiência de três vazões de despoejamento, nas quais são operadas no sistema de despoejamento industrial encontrado no Laboratório de Fluidodinâmicas e Particulados – FluidPar, no campus da UFPA Tucuruí.

3.3. Material

O material a ser utilizado nos ensaios do presente trabalho é o carvão coqueificável, proveniente da Mina de Moatize, localizada na província de Tête, em Moçambique. A distribuição de tamanho de partículas passante acumuladas do carvão coqueificável é apresentada na Figura 3.11 O carvão coqueificável apresenta uma porcentagem maior de finos, 0,57%. Devido a limitação de tamanho de peneira disponíveis, o menor diâmetro de partícula avaliado no peneiramento do carvão é de 20 μm . Verifica-se que $d_{50} = 5 \text{ mm}$, que é o valor a ser utilizado nos cálculos deste trabalho.

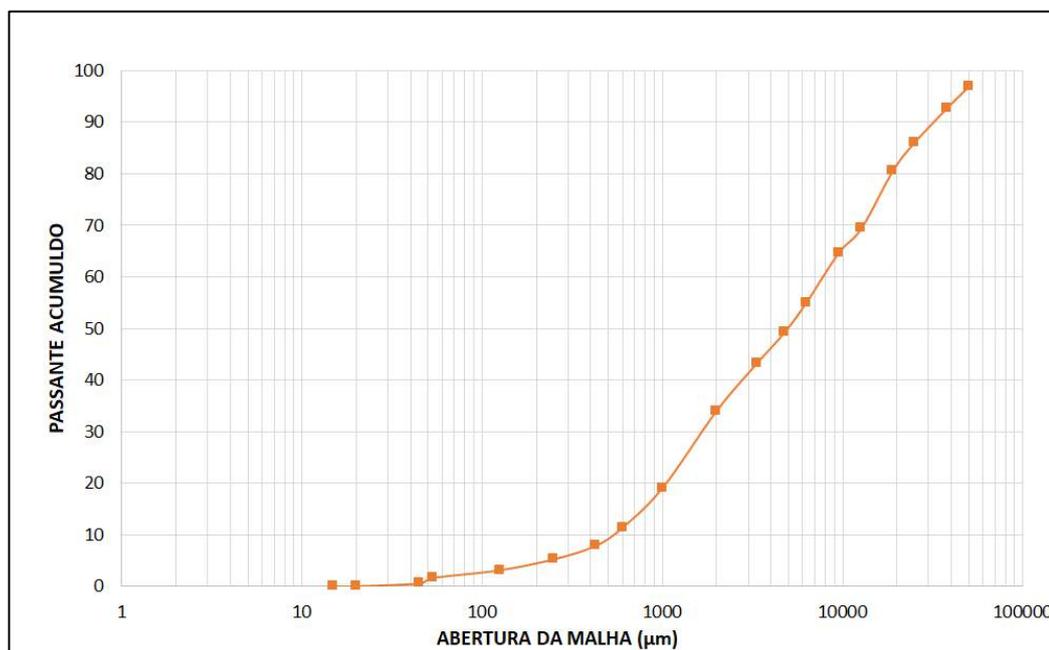


Figura 3.11 - Distribuição de tamanho de partículas passante acumulado de carvão coqueificável.

Fonte: Autor.

Os resultados dos testes de massa específica via picnometria para o carvão coqueificável são apresentados na Tabela 4.1. O valor da massa específica do sólido a ser usada no trabalho é de 1.330,0 kg/m³.

Tabela 3-1 - Massa específica do sólido obtida via picnometria, carvão coqueificável, em kg/m³.

Material	+150 μm	-150 μm	+44 μm	-20 μm	Média
Carvão Coqueificável	1.350,0	1.330,0	1.330,0	1.330,0	1.340,0

A Figura 3.12 apresenta a curva de massa específica aparente (ρ) em função da umidade (U), obtidas para o carvão coqueificável. O estado pendular é observado entre as umidades de 0 e 5%, a região capilar (funicular e capilar) entre 5% e 24% e a água livre foi observada em umidades acima de 24%. Os ensaios foram conduzidos à uma umidade de 6%, o que é correspondente a uma massa específica aparente de 580,0 kg/m³.

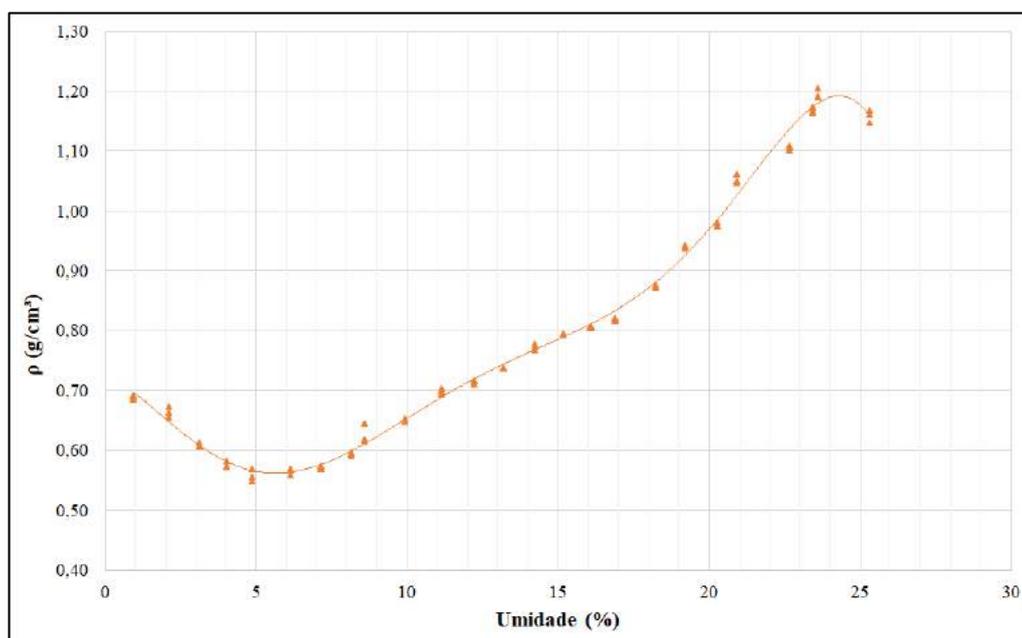


Figura 3.12 - Massa específica aparente em função da umidade para o carvão coqueificável.

Fonte: Autor.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Correlações

A seguir, serão apresentados os resultados teóricos deste trabalho, bem como a comparação destes com dados disponíveis na literatura. Para isso, serão comparados os modelos de Sun *et al* (2019) e Sun *et al* (2020); Ullmann (1998); Ogata (2001) e Hemeon (1999); aplicados para a configuração experimental do presente trabalho, via vazão mássica e altura de queda. A vazão mássica pode ser obtida conforme mostra a Equação 4.1.

$$\dot{m} = \frac{m_t}{T_q} \quad (4.1)$$

Onde: \dot{m} é vazão mássica de carvão em queda livre (kg/s), m_t é a massa de carvão em queda livre (kg) e T_q é o tempo de queda do material (s).

O tempo é medido é o tempo de esvaziamento da moega, observado nos vídeos realizados. Considerando as dimensões da moega e quantidade de material descarregado, o tempo de descarga ficou muito próximo, para todas as massas, na média de 1 s. Assim considerou-se as vazões mássicas de 10 kg/s, 15 kg/s e 20 kg/s.

A análise foi realizada para um carvão do tipo coqueificável com massa específica de 1.330,0 kg/m³ e diâmetro médio de partículas de 5,0 mm. A Figura 4.1, mostra o comportamento da vazão volumétrica com base nos modelos de Hemeon (1999), Ullmann (1998), Ogata (2001), Sun *et al* (2019) e Sun *et al* (2020), para a altura de 1,6 metros. Verifica-se que o modelo de Sun *et al* (2020) fornece os maiores valores e os menores são gerados pelos modelos de Sun *et al* (2019) e Ullmann (1998), com valores equivalentes. Os modelos de Hemeon (1999) e Ogata (2001) fornecem maiores similares, intermediários aos outros modelos.

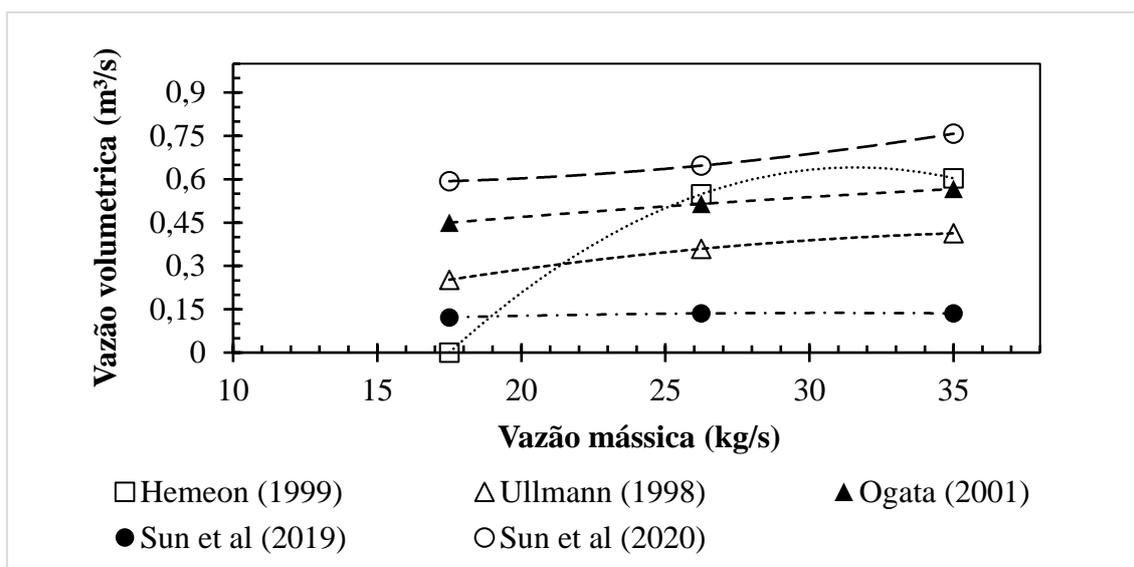


Figura 4.1 - Modelos matemáticos para a previsão da vazão volumétrica com a altura de 1,6 metros.

Fonte: Autor.

Para a altura de 1,6 metros conforme o Gráfico 4.1, o modelo de Sun *et al* (2019), demonstrou uma linha de tendência menor do que para os outros modelos, devido a consideração que a energia gerada pela queda livre de material é o trabalho realizado pela força de arrasto em relação ao deslocamento do sólidos levando em consideração a fração de vazios, ou seja, como a altura escolhida para a descarga de material é muito próxima da fonte geradora de poeira, a fração de vazios se tornou mais presente no ar do que as partículas em suspensão ocorrendo assim uma previsão menor de vazão volumétrica.

O modelo de Sun *et al* (2020) utilizando a Equação 2.34, apresentou um comportamento conforme a Figura 4.1, maior do que todos os modelos de previsão de vazão de despoeiramento, pois considerou uma descarga de material em um ambiente semiconfinado, ou seja, mediu a vazão não só durante o choque com a superfície mais de todo o processo de descarga, desde quando o material está em queda livre com algumas partículas finas em suspensão.

O modelo de previsão da vazão volumétrica de Hemeon (1999), conforme a Figura 4.2 para a altura de 2 metros, apresentou os maiores valores de vazão volumétrica, pois com uma distante maior para as partículas percorrer até chegar ao chão e com uma velocidade de queda livre maior quando ocorre a geração de poeira as linhas de fluxo tendem a ficar mais espalhadas do que

anteriormente para a altura de 1,6 metros necessitando assim de uma previsão maior de vazão volumétrica.

O modelo de Ullmann (1998), conforme a Figura 4.2 para a altura de 2 metros, demonstraram valores muito parecidos com os da altura de 1,6 metros, isso pode ter ocorrido pelo fato de a equação da altura de descarga ter um aumento de poucos centímetros, fazendo que não ocorra tanta alteração nos resultados.

Considerando uma altura de 2 metros, a equação do modelo de previsão da vazão volumétrica de Ogata (2001), com uma altura de descarga elevada a potência de 1,7, possibilita na sua formula empírica este modelo valores de vazão volumétrica um pouco distantes do Modelo de Hemeon (1999); na qual tem a altura de descarga elevada a potência ao quadrado, concluindo assim que mesmo com o aumento da quantidade de material ou altura de descarga estes modelos sempre estarão próximos

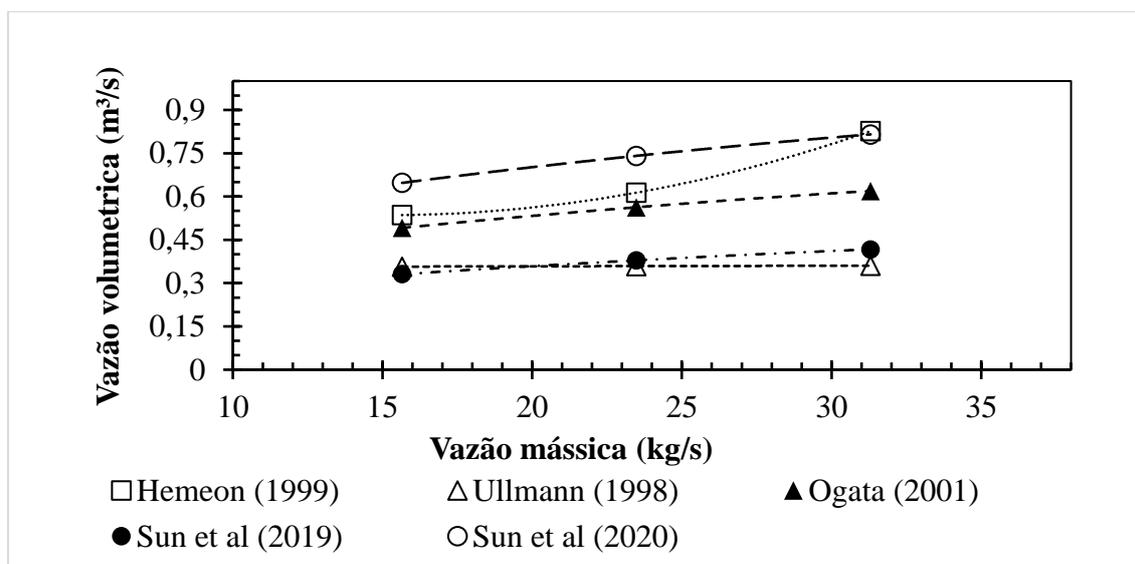


Figura 4.2 - Modelos matemáticos para a previsão da vazão volumétrica com a altura de 2 metros.

Fonte: Autor.

O modelo de previsão de vazão volumétrica de Sun *et al* (2019) conforme a Figura 4.2, para uma variação pequena de altura, ou seja, distância percorrida pela queda livre de partículas de alguns centímetros a energia gerada pela queda

livre de partículas foi praticamente a mesma da Figura 4.1 gerando assim os mesmos valores de vazão volumétrica.

A equação empírica de Sun *et al* (2020), para a previsão volumétrica conforme a Figura 4.2, mesmo com uma variação de altura de queda pequena conseguiu valores próximos ao modelo de Hemeon (1999), isso se dá pelo fato desta equação prever a quantidade de partículas que ficam em suspensão durante a queda livre antes de ocorrer o choque.

Testando o modelo de Hemeon (1999), para a previsão de vazão volumétrica com uma altura de descarga de 3m, conforme a Figura 4.3, observa-se que quando o espaço que as partículas devem percorrer durante a queda a velocidade de queda livre tende a ser maior gerando assim mais poeira durante a aterrissagem; pois como se sabe o método empírico de Hemeon (1999) prevê que a altura de descarga deve ser elevada ao quadrado, conseqüentemente as linhas de fluxo das partículas ficam mais dispersas então para manter essas partículas no mesmo sentido das linhas do fluxo de exaustão se necessita de uma vazão volumétrica maior

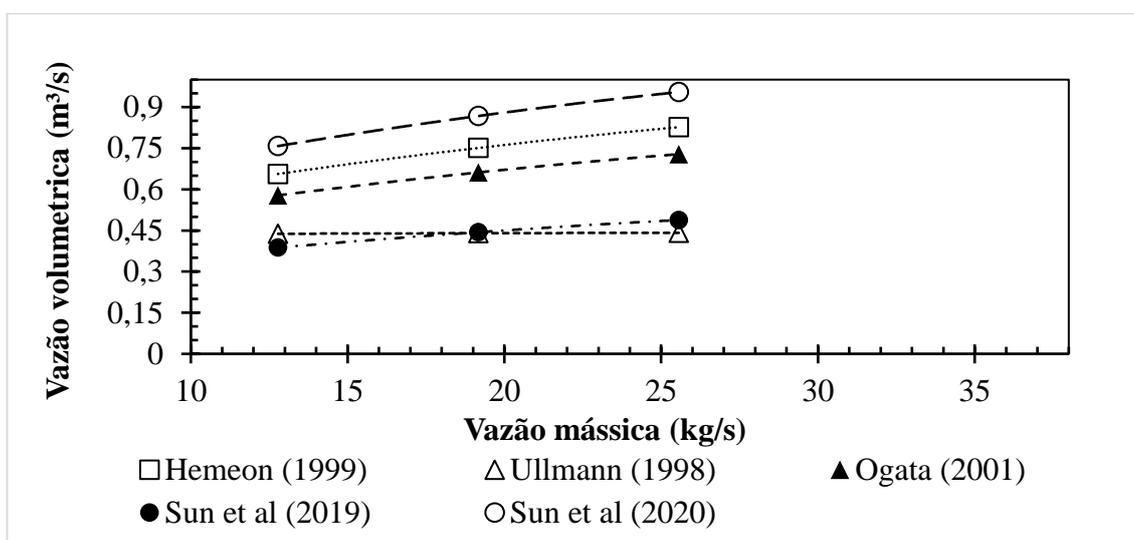


Figura 4.3 - Modelos matemáticos para a previsão da vazão volumétrica com a altura de 3 metros.

Fonte: Autor.

A mudança de altura de 2 metros para a altura de 3 metros demonstrou uma maior interferência no modelo de Ullmann (1998), conforme a Figura 4.3, pois foi previsto uma maior vazão volumétrica em uma escala maior de 0,43 m³/s à 0,44 m³/s, o motivo desse fato é pelo fato dos perfis de velocidade média de

queda livre considerados por Ullmann (1998) serem maiores com o aumento do espaço percorrido.

A linha de tendência da Figura 4.3, para o modelo empírico de Ogata (2001) para a previsão da vazão volumétrica, continuou com a mesma tendência de se gerar valores muito próximos de Hemeon (1999), devido ao fato do regime do fluxo de queda livre ser intermediário com o número de Reynolds inferior a 500, ou seja, em um determinado instante as partículas em suspensão também estão no regime turbulento. Além disso a equação empírica de Ogata (2001), se baseia na equação empírica de Hemeon (1999), tendo a única diferença que a altura de descarga é elevada a potência de 1,7.

Outro modelo que teve uma mudança de escala, porém com o mesmo comportamento das figuras anteriores 4.1 e 4.2, cruzando o método de Ullmann (1998) foi o modelo de Sun *et al* (2019), chegando a valores próximos de 0,51 m³/s, a consequência deste fenômeno consistem em com a variação do espaço percorrido pela coluna de material, para 1 metro as partículas tenderam a gerar mais poeira diminuindo assim a fração de vazios e induzido mais para o sistema de despoejamento industrial exaurir.

A variação do espaço percorrido durante a queda livre ou altura de descarga de 1 metro também foi sentida pelo método de Sun *et al* (2020), conforme a Figura 4.3, causando assim durante a queda livre de material uma maior atuação da força de arrasto do ar do que a força de manter a coluna de material unida e como o modelo de Sun *et al* (2020), prevê um ambiente semiconfinado a suspensão dessas partículas pela queda livre também são previsto pelo seu modelo empírico causando um aumento na vazão de despoejamento para próximo de 1 m³/s.

Observa-se um grande espalhamento entre os resultados das correlações analisadas para o cálculo da vazão induzida pela queda de material, que é o valor de referência para o cálculo da vazão de despoejamento.

Segundo Mesquita *et al* (1985), os modelos propostos na literatura superestimam a previsão da vazão volumétrica em uma escala de duas a três vezes maior do que os valores reais ou pode ser aplicado aos modelos empíricos um fato de segurança de 30% aos seus valores encontrados. No entanto caso se torne necessário à sua aplicação em um projeto de despoejamento industrial

o engenheiro projetista tem que ter um controle robusto do processo com a utilização de sensores ou válvulas medidoras de pressão.

Os modelos para a previsão de vazão volumétrica utilizando um sistema de despoejamento industrial de Hemeon (1999), Sun *et al* (2019) e Sun *et al* (2020), conseguem suprir uma grande escala de processos industriais, pois como os valores encontrados estão muito próximos teria uma menor chance de ter um erro na previsão da vazão volumétrica de exaustão adequada.

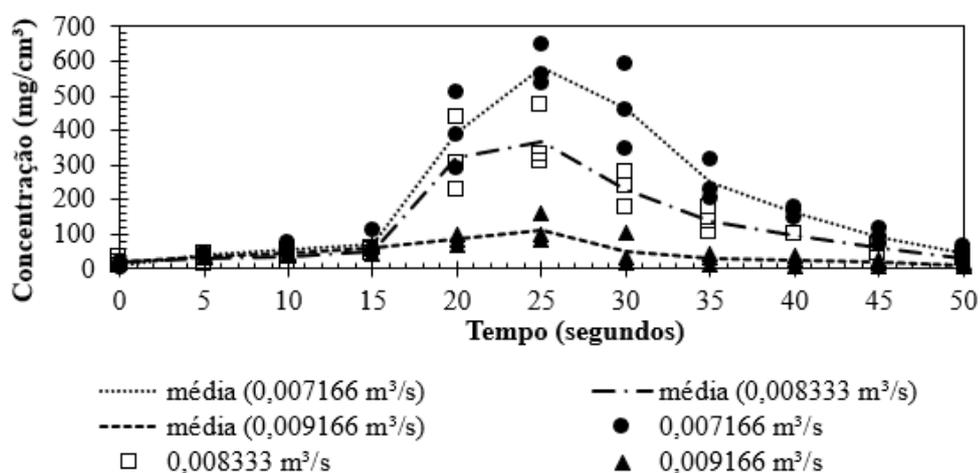
4.2 Resultados experimentais

Apresenta-se os resultados dos ensaios experimentais para a avaliação da vazão de despoejamento da bancada de teste. Essa avaliação tomou como base 3 vazões de despoejamento, para descargas de 10 kg, 15 kg e 20 kg e para altura de queda de 1,6 m, 2,0 m e 3,0 m. Para essas configurações foram medidas as emissões de partículas $PM_{2.5}$ e PM_{10} , conforme descrito do capítulo 3. A vazão de despoejamento foi limitada pelo sistema de medição de vazão, sendo fixadas em 430 l/min, 500 l/min e 550 l/min, correspondendo a 0,007166 m^3/s ; 0,008333 m^3/s e 0,009166 m^3/s . O nível de concentração de partícula foi calculado a partir da medição do número de partículas e convertidos em concentração utilizando-se a Equação (3.5), em mg/cm^3 . O tempo de amostragem do contador de partículas foi de 25 segundos.

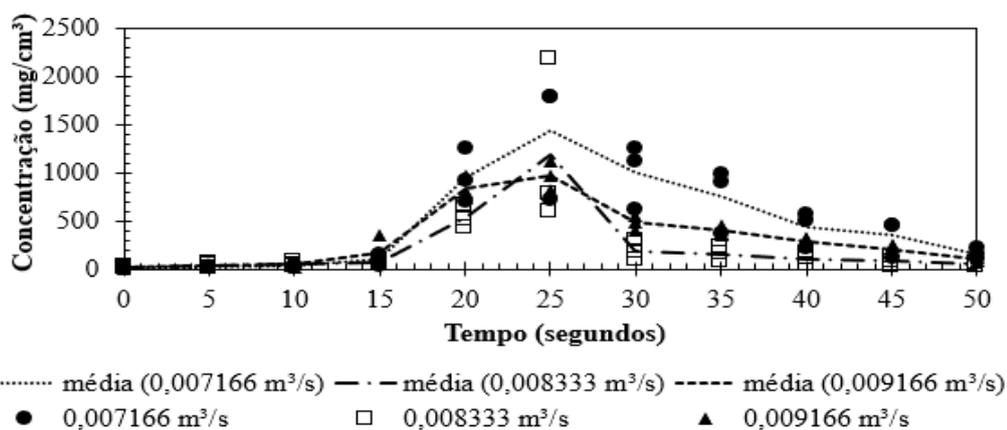
As medições foram realizadas em tréplica e apresentando-se uma curva de tendência para a média dos pontos registrados. O ajuste da referência da base do tempo foi realizado com base no pico de cada ensaio. Os picos foram ajustados no centro de uma janela de 25 s e a média foi calculada para cada passo de tempo. Esse procedimento já foi testado em ensaios anteriores, mostrando-se eficaz.

Após a montagem do experimento e realização de ensaios, percebeu-se um problema na posição do contador, que ficou localizado muito próxima da fonte emissão. Como o aumento da vazão foi cerca de 15% e 30% da menor vazão, o nível de particulados na região de medição sofreu influência do aspecto aleatório do movimento das partículas próximos. De qualquer forma, as tendências principais foram observadas e relata-se a seguir.

O efeito da quantidade de material descarregado, que corresponde também ao efeito da vazão mássica, é apresentado na Figura 4.4, para uma altura de queda constante de 2m, para descargas de 10kg e 20kg e para a emissão de PM₁₀. Observar-se o grande aumento da emissão com a massa de descarga, com 120 % de aumento da massa o pico de emissão também é triplicado, passando de 700 mg/cm³ para 2182,53 mg/cm³. O efeito do aumento da vazão é mais claro para 10kg, diminuindo o pico da emissão com o aumento da vazão. Para a descarga de 20kg os níveis de emissão para as duas maiores vazões são equivalentes. É de se esperar que a vazão de despoeiramento para a descarga de 10 kg esteja próxima da vazão de 550 l/min (0,009166 m³/s).



a)

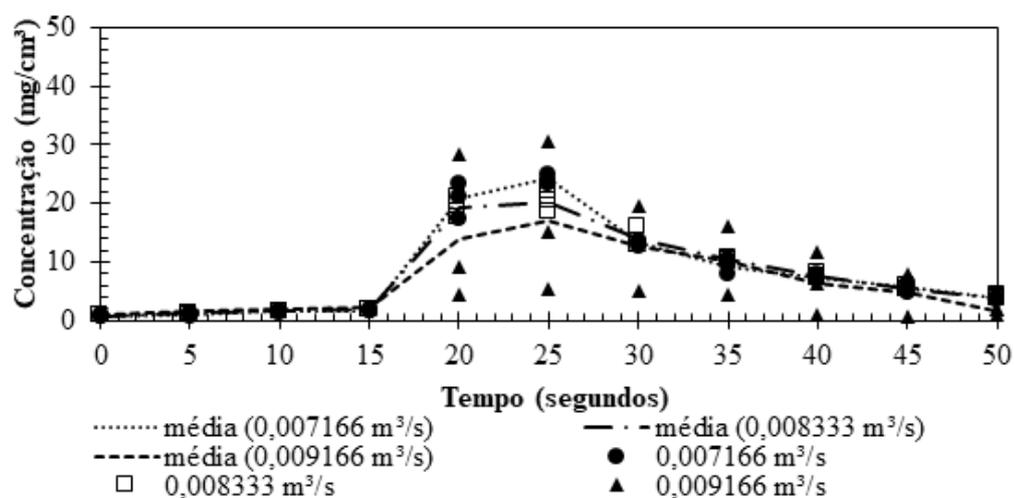


b)

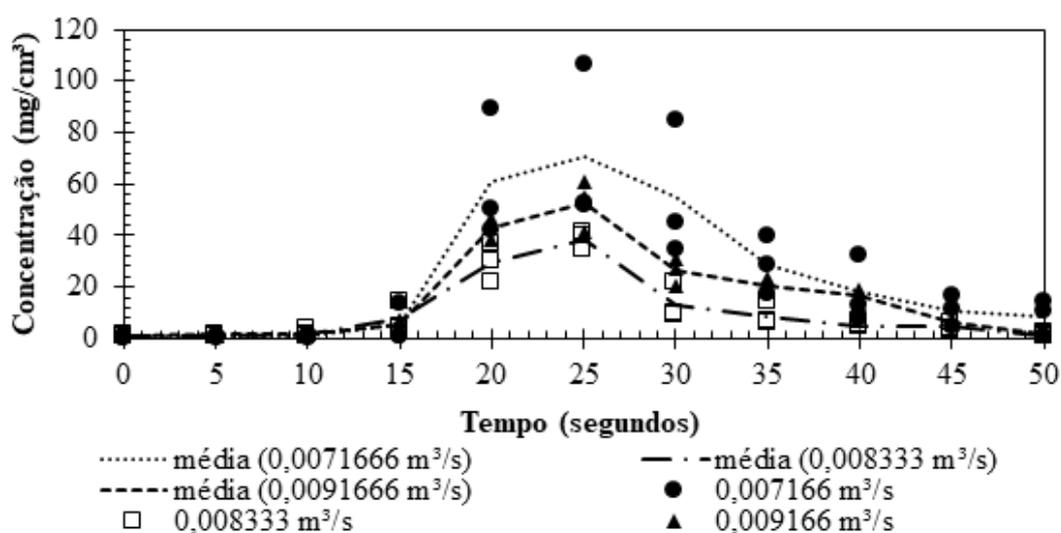
Figura 4.4 - Comportamento da concentração PM₁₀ para carvão mineral. Altura de queda de 2.0 m. Descarga de a) 10 kg, b) 20 kg.

Fonte: Autor.

Este mesmo ensaio é apresentado na Figura 4.5, porém com a medição da emissão de $PM_{2.5}$. Em relação ao aumento do nível de emissão, observar-se um comportamento parecido com a emissão de PM_{10} , com o pico de emissão triplicando aproximadamente de valor com o aumento de 100% da massa descarregada. Entretanto, o nível da emissão de $PM_{2.5}$ é muito inferior à emissão de PM_{10} , atingindo níveis próximos de 10% desta. Para a menor vazão tem-se também o maior pico de emissão.



a)

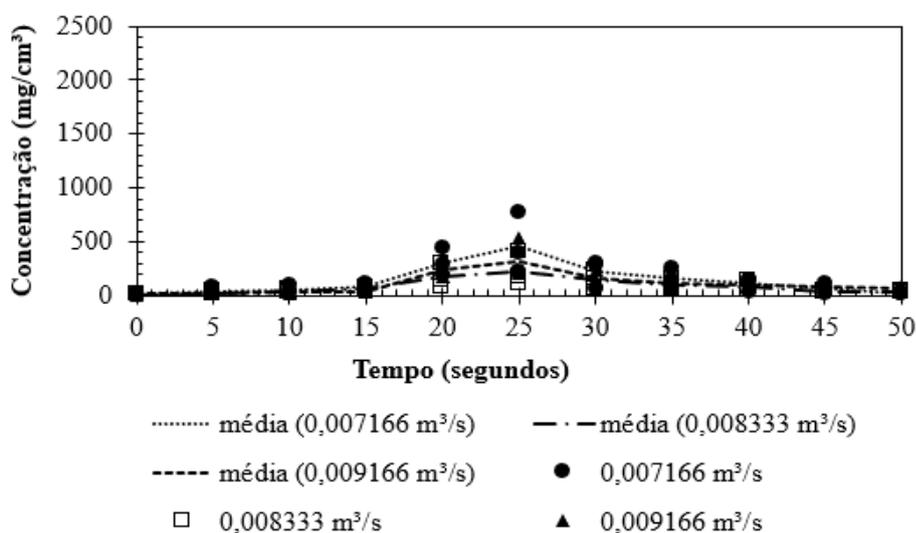


b)

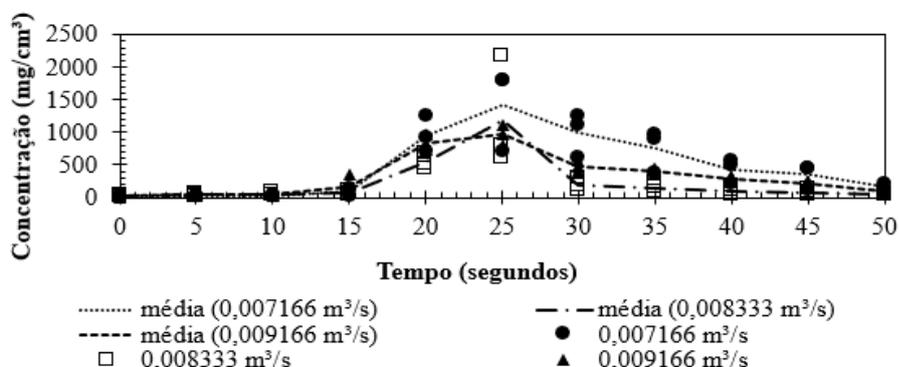
Figura 4.5 - Comportamento da concentração $PM_{2.5}$ para carvão mineral. Altura de queda de 2.0 m. Descarga de a) 10 kg, b) 20 kg.

Fonte: Autor.

Para a emissão de PM_{10} , o efeito da altura de queda é avaliado na Figura 4.6, comparando-se ensaios para a descarga de 20kg e altura de queda de 1,6 e 2,0 m. Observar-se, como esperado, o aumento da emissão com o aumento da queda e com maior pico para a menor vazão. Entretanto, para um maior nível de queda, mesmo para uma massa menor, verifica-se que o aumento da vazão da bancada não consegue diminuir o pico da emissão. Esse comportamento é observado na Figura 4.7, para uma descarga de 10kg e a altura de queda variando de 2,0 m para 3,0m. Para 3,0 m os níveis de emissão são equivalentes para todas as vazões de despoejamento.



a)

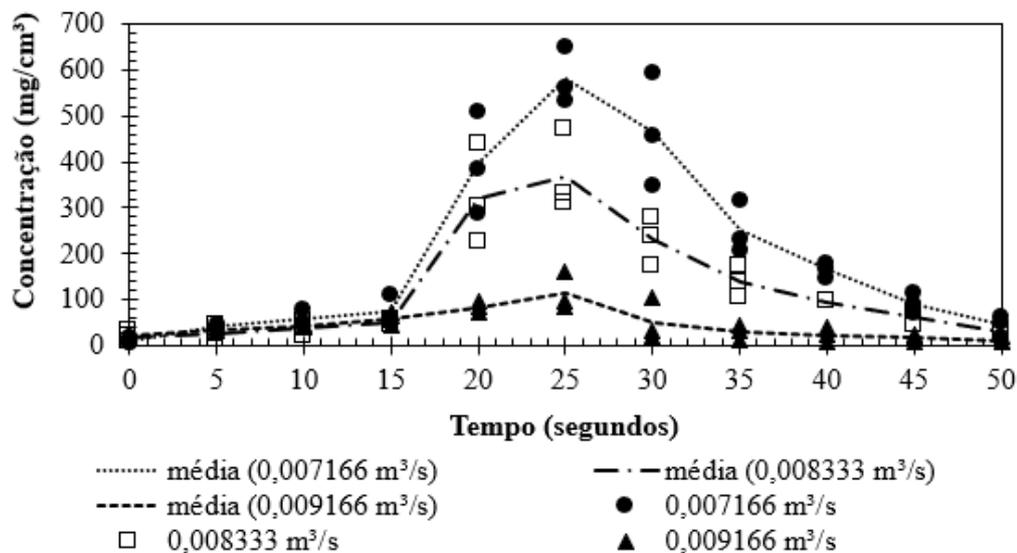


b)

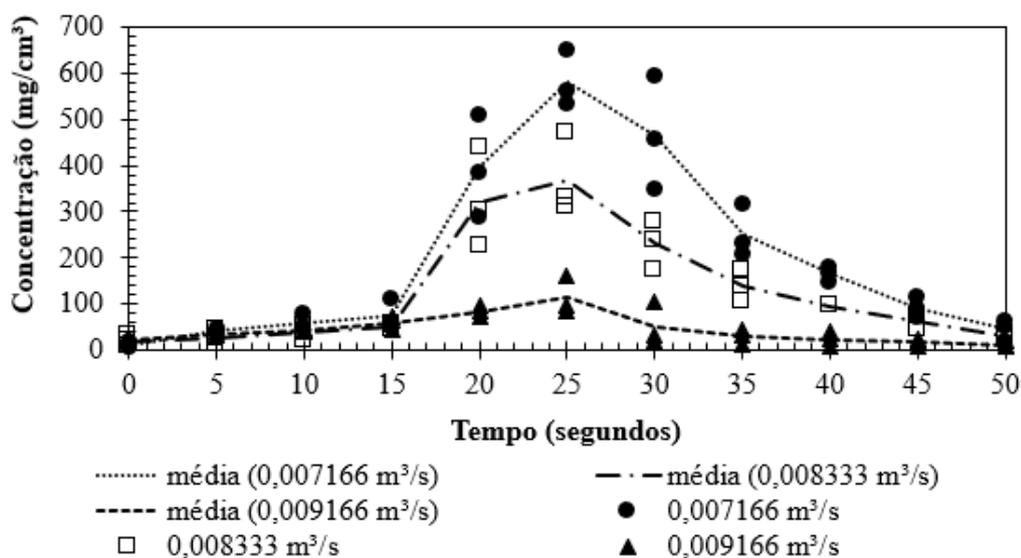
Figura 4.6 - Comportamento da concentração PM_{10} para carvão mineral.

Descarga de 20 kg Altura de queda de a) 1,6 m, b) 2,0 m.

Fonte: Autor.



a)



b)

Figura 4.7 - Comportamento da concentração PM10 para carvão mineral.
 Descarga de 10 kg Altura de queda de a) 2,0 m, b) 3,0 m.

Fonte: Autor

O comportamento do nível de emissão com aumento da vazão para diferentes alturas de queda é apresentado na Figura 4.8. Verifica-se a diminuição da concentração com o aumento da vazão e com a diminuição da altura de queda.

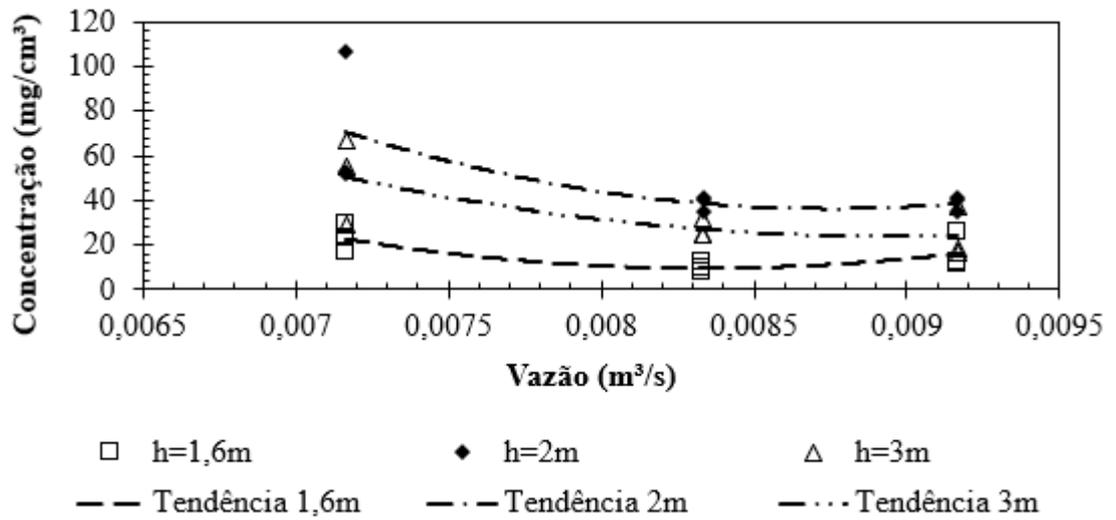


Figura 4.8 - Concentração de PM_{2.5} para carvão mineral com variação de vazão para alturas de que de 1,6, 2,0 e 3,0 m

Fonte: Autor

5 CONCLUSÃO

Foi realizado um amplo estudo da literatura sobre as correlações existentes para a avaliação do volume de exaustão necessário para sistemas de despoeiramento aplicados a materiais particulados em queda livre.

As correlações analisadas apresentam um grande espalhamento entre elas, sendo o maior valor de vazão calculado pela clássica correlação de Hemeon (1999), o que está em acordo com diversos autores, embora seja o modelo recomendado nos manuais de engenharia de ventilação industrial. Porém, este modelo traz consigo a física do problema, permitindo verificar a influência de parâmetros chaves com as propriedades do material, do processo e a altura de queda. Assim, na prática este modelo os indica um valor limite superior de vazão induzida.

As diversas outras correlações existentes aportam um grande peso nos parâmetros ajustados através de experimentos, o que limita a abrangência e generalização dos resultados. Portanto, essas correlações servem para um balizamento nos valores a serem adotados nos projetos, que dependerão muito da experiência do projetista. Assim, percebe-se que os modelos multifásicos resolvidos através da mecânica dos fluidos computacional é uma direção a ser seguida, visando a obtenção de resultados mãos confiáveis e sem empirismo.

A metodologia experimental empregada, mostrou-se eficaz para a avaliação qualitativa e quantitativa da física do problema. Entretanto dois problemas foram identificados, que comprometeram a avaliação experimental das correlações testadas.

O primeiro, já discutido foi a localização do amostrador do contador de partículas muito próxima da fonte emissora, prejudicando o registro de alguns ensaios. O segundo, esse restritivo, foi a limitação do medidor de vazão do ar de exaustão, o qual estava selecionada para experimentos em Torre de Poeira. A bancada utilizada foi adaptada neste experimento, porém não se teve possibilidade de substituição do medidor de vazão. Assim, as vazões experimentais ficaram em uma faixa muito abaixo da vazão induzida pela configuração da queda de material.

Porém, a metodologia testada, confirmando-se a sua potencialidade para a avaliação da emissão de poeira provocada por chutes de material, sendo então recomendada para investigações desta natureza.

5.1 Sugestões para trabalhos futuros

No sentido de aprimorar este trabalho tendo como base as conclusões propostas por este trabalho e os resultados, aponta-se algumas sugestões para os próximos trabalhos de pesquisas nessa mesma área temática

- Caracterização das partículas ultrafinas, menores que 2,5 micrometros da amostra de material ensaiada.
- Adicionar uma porcentagem de limitação referente a cada modelo empírico através das suas constantes empíricas para a validação de cada modelo empírico.
- Realizar ensaios para a análise da emissão de poeira em chutes de transferência de correias transportadoras.

REFERÊNCIAS

BEVERLOO.A.W; LENIGER, H. A.; VAND DE VELDE, J. The flow of granular solids through orifices. **Chemical Engineering Science**, Wageningen, v. 15, n. 3-4, p. 260-269, september 1961.

BRASIL. RESOLUÇÃO CONAMA nº 3, de 28 de junho de 1990. **Controle da poluição do ar- PRONAR**, Brasília, 22 Agosto 1990. 342-345.

BRASIL. RESOLUÇÃO CONAMA no 382, de 26 de dezembro de 2006. **Programa nacional de controle do ar- PRONAR**, Brasília, 26 Dezembro 2006. 131-137.

COOPER.P; ARNOLD, P. C. Air Entrainment and Dust Generation from a Falling Stream of Bulk Material. **Kona**, Austrailia, v. 3, p. 125-134, 1995.

ESMAILI, A. A. et al. A New Approach for Calculating the Mass Flow Rate of Entrained Air in a Freefalling Material Stream. **Particulate Science and Technology: An International Journal**, New South Wales, 11 July 2012. 248-255.

ESMAILI, A. A. et al. On the analysis of a coarse particle free falling material stream. **International Journal of Mineral Processing**, Newcastle, 10 pril 2015. 82-90.

FAYED, M. E.; OTTEN, L. **Handbook of Powder Science & Technology**. New York: CHAPMAN & HALL, 1997.

FURIERI, B.; CASTILHO, L. B. D. **ELABORAÇÃO DE PROJETOS DE APERFEIÇOAMENTO DO SISTEMA DE CONTROLE DE MATERIAL PARTICULADO EM UMA UNIDADE INDUSTRIAL: PROCESSAMENTO FINAL DE CIMENTO PORTLAND**. UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO. Vitória, p. 147. 2009.

HEMEON.L.C.W. **Plant and Process Ventilation**. 3. ed. New York: Industrial Press, 1863.

HSU, A.; YAN, C.; CHENG, Y. **Addressing Gaps In China's Environmental Data: The Existing Landscape**. YALE DATA DRIVEN. China, p. 38. 2017.

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

LIU, Z. Q. **Air entrainment in free falling bulk materials**. University of Wollongong. Wollongong, p. 293. 2003.

LUZ, A. B. D.; SAMPAIO, J. A.; FRANÇA, S. C. A. **Tratamento de Minérios**. 5. ed. Rio de Janeiro: Centro de Tecnologia Mineral (CETEM), 2010.

MESQUITA, A. L. S.; GUIMARÃES, F. A.; NEFUSSIN, N. **Engenharia de Ventilação Industrial**. São Paulo: CETESB, v. I, 1985.

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

RESENDE, F. **Poluição Atmosférica Por Emissão de Material Particulado: Avaliação e Controle Nos Canteiros de Obras de Edifícios**. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, p. 232. 2007.

SUN, H. et al. Particle flow fall process: a systematic study of entrained air. **Granular Matter**, Germany, v. 22, p. 2-11, Abril 2020.

SUN, H.; LI, A.; WU, J. Entrained air by particle plume: comparison between theoretical derivation and numerical. **Particulate Science and Technology**, Xiangtan, v. 38, p. 1-9, 23 Settembre 2019.

ULLMANN.A; DAYAN, A. Exhaust Volume model for dust emission control of belt conveyor transfer points. **Powder Technology**, Tel Aviv, v. 96, n. 2, p. 139-147, May 1998.

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

WANG, Y. et al. Experimental study of flow regimes and dust emission in a free falling. **Powder Technology**, Xianxim, v. 292, p. 14-22, Maio 2016.

WANG.K et al. Suction force of vibrating suction method based on pi theorem: Analysis and experiment. **Mechanism and Machine Theory**, Taranto, v. 86, n. 12, p. 607-617, February 2011.

WEN, C. Y.; Y, H. Y. A Generalized Method for Predicting the Minimum. **A.1.Ch.E. Journal**, China, v. 12, n. 3, p. 610-611, May 1966.

WYPYCH.P; COOK, D.; COOPER, P. Controlling dust emissions and explosions hazards in powder handling plants. **Chemical Engineering**, Wollong, v. 44, n. 2, p. 323-326, February 2005.

XIACHUAN.L et al. Model for induced airflow velocity of falling materials in semi closed transfer station based on similitude theory. **Advanced Powder Technology**, Xuzhou, v. 26, n. 1, p. 236-243, January 2015.

YANG, W.-C. **Handbook of fluidization and fluid-particle systems**. 1°. ed. Pittsburgh: MARCEL DEKKER, INC. , v. III, 2003.