



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
CAMPUS UNIVERSITÁRIO DE TUCURUÍ
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA**

**AVALIAÇÃO DE EMISSÃO PARA POEIRA DE CARVÃO UTILIZANDO UMA
TORRE DE POEIRA**

ALEX JHEFFERSON CUNHA LOPES

**TUCURUÍ – PA
2023**



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
CAMPUS UNIVERSITÁRIO TUCURUÍ
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA**

**AVALIAÇÃO DE EMISSÃO PARA POEIRA DE CARVÃO UTILIZANDO UMA
TORRE DE POEIRA**

ALEX JHEFFERSON CUNHA LOPES

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Faculdade de Engenharia Mecânica do Campus de Tucuruí, como parte dos requisitos para obtenção do título bacharel em Engenheiro Mecânico.

**Orientador:
Prof. PhDº. André Luiz Amarante Mesquita**

**TUCURUÍ – PA
2023**

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

C972a CUNHA LOPES, ALEX JHEFFERSON.
Avaliação de emissão para poeira de carvão utilizando umatorre de poeira modificada para qualificação e validamento. / ALEX JHEFFERSON CUNHA LOPES. — 2023.
67 f. : il. color.

Orientador(a): Prof. Dr. André Luiz Amarante Mesquita
Coorientador(a): Prof. Me. Arthur dos Reis Lemos Fontana
Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade Federal do Pará, Campus Universitário de Tucuruí, Faculdade de Engenharia Mecânica, Tucuruí, 2023.

1. supressor de poeira, emissão de poeira, eficiência do supressor, coque de petróleo, antracito, transporte, manuseio.
I. Título.

CDD 624.1513



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
CAMPUS UNIVERSITÁRIO DE TUCURUI
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA

**AVALIAÇÃO DA EMISSÃO DE POEIRA DE CARVÃO EM UMA TORRE DE
POEIRA**

ALEX JHEFFERSON CUNHA LOPES

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à
Faculdade de Engenharia Mecânica do Campus de
Tucuruí, como parte dos requisitos para obtenção
do título de Bacharel em Engenharia Mecânica

BANCA EXAMIDADORA

Orientador: Prof. Dr. André Luiz Amarante Mesquita
FEM/CAMTUC/NDAE/UFPA

Membro Interno: Prof. Danilo Silva Santos
FEM/CAMTUC/UFPA

Membro Externo: Eng. Me. Arthur Dos Reis Lemos Fontana
FluidPar/TECNOLAGO/UFPA

Conceito: EXCELENTE

Tucuruí, 24 de fevereiro de 2023

A Deus, meus familiares que sempre estavam ao meu lado em vários momentos felizes e tristes, meus amigos e companheiros de todas as horas.

AGRADECIMENTOS

A Deus por minha vida, familiares e amigos.

A minha mãe que sempre me educou e nunca deixou faltar nada para meu futuro.

Minha avó que sempre esteve ao meu lado em todos os momentos difíceis e bons, se tornando minha segunda mãe.

Meus familiares(a): Sergio Roberto, Josélia, Josylei, Claudia, Rosy, Cleonice, Gorete, Deusa, Maria Zita, Eduardo, Selmo, Nilson, David, Davila, Lucas, Matheus, Erique, Cristiano, Edicásio, Edvander, André, Bruno, Junior, Selma, Sâmia

Meus amigos: Artur Fontana, Jorge Vinicius, João Victor, Jorge Simões, Katia Simões, Artur Cunha, Emanuel, Maycon, Danilo, Hemerson, Ryan, Pedro, Paulo, Jonatas, Odinaldo, Bruno, Cláudio, Igor, Breno, Gustavo, Rodrigo, Ana Rafaela, Luiz Fernando, Pedro Macias, Ronaldo Menezes.

Meus professores: Bruno Wallace, Walter Sousa, Douglas Garcia, Fernando, Ezequiel, Luís, Jessé, Walber, Maciel, Leopoldo, Ronaldo, Aarão, Débora, Davi, Leopoldo,

Ao meu orientador, André Mesquita por toda confiança depositado na minha pessoa, por nunca deixar faltar nada para que a minha pesquisa pudesse ir em frente com maestria e toda experiência passada para mim durante toda minha graduação.

Vale, pelo apoio financeiro, no qual ajudou significativamente.

Bulk solutios, na qual me passou experiência profissional para o meio de trabalho no ramo da engenharia aplicada em vários projetos executados.

A todos os funcionários do Camtuc por estarem sempre à disposição para ajudar em qualquer dúvida.

A Atlético Predadores, a qual sempre me ofereceu apoio em todos os âmbitos universitários e que ajudou significativamente na minha integração a faculdade.

Resumo

Este trabalho visa demonstrar a modificação da torre de poeira para torná-la mais eficiente em seus testículos, a fim de minimizar a produção de poeira gerada pelas energias, nas quais são responsáveis pela produção de materiais finos e a granel, tornando-se de certa forma eficaz e sem agregar o meio ambiente em seu trânsito e transporte. Portanto, para que o trabalho se torne viável, foi necessário realizar diversos estudos no campo da ciência para o desenvolvimento de uma metodologia e também uma reforma da bancada de testes, visando que ela se torne mais eficiente e ergonomicamente mais favorável, para validação dos resultados ensaio.

Palavra-chave: supressor de poeira, emissão de poeira, eficiência do supressor, coque de petróleo, antracito, manuseio de material particulado.

ABSTRACT

This work aims to demonstrate the modification of the dust tower to make it more efficient in its tests, in order to minimize the production of dust generated by industries, in which they are responsible for the production of fine and bulk materials, becoming in a way effective and without harming the environment in its handling and transport. Therefore, in order for the work to become viable, it was necessary to carry out several studies in the field of science for the development of a methodology and also a renovation of the test bench, aiming for it to become more efficient and ergonomically more favorable, for validation of the results essay.

Keywords: dust suppressant, dust emission, suppressor efficiency, petroleum coke, anthracite, particulate matter handling.

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Massa específica real dos materiais.....	49
Tabela 2. Ensaios de tensão superficial variando a concentração de supressor.....	53

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Manuseio e Transporte na indústria	17
Figura 2. Representação de áreas onde o MP de processos de combustão incompletos é depositado no corpo. 2018.....	18
Figura 3. TECHNODUST (2020).	19
Figura 4. Apoio Projetos Eng. (2019).....	20
Figura 5. Ação ecológica dos ventos (TEIXEIRA, difração da terra,2000).....	21
Figura 6. Geometria de partículas (2014).....	22
Figura 7. Relações de tamanhos de partículas (EPA, 2016).....	23
Figura 8. Ação do vento sobre as moléculas	25
Figura 9. Variação do ângulo de contato e o comportamento do Trabalho de Adesão.....	25
Figura 10. Tensões superficiais envolvidas na medida do ângulo de contato.	26
Figura 11. (MUNRO e MOHAJERANI, 2016).	26
Figura 12. Ponte de líquido e os raios de curvatura de menisco sobre a porção infinitesimal da superfície curva.....	27
Figura 13. Torre de poeira desenvolvida por Copeland e Kawatra (2011)	28
Figura 14. Torre de poeira: a) ARC e b) IFDC (COPELAND e KAWATRA, 2011).	29
Figura 15. Torre de poeira desenvolvida por (RONALDO, 2018)	30
Figura 16. Torre de poeira. A) Válvula guilhotina, B) Torre de poeira, C) Reservatório, D) Tubo de coleta, E) Filtro de coleta, F) Contator de partículas, G) Exaustor, H) Rotâmetro.	32
Figura 17. a) Antiga configuração da torre de poeira.....	32
Figura 18. Nova configuração da torre de poeira	33
Figura 19. a) Bancada atual; b) modificação realizada.	33
Figura 20. Sistema de geração de fluxo de ar da torre de poeira: a) Metodologia atual; b) Metodologia utilizada.	34
Figura 21. Reservatório de coleta final.....	34
Figura 22. Sistema de amostragem.....	35
Figura 23. Filtro de papel em evidência	35
Figura 24. Projeto da torre de poeira.	35
Figura 25. Fluxograma de ensaios sem supressores.	38

Figura 26. Fluxograma de ensaios com supressores.....	40
Figura 27. Situação com amostragem isocinética.	41
Figura 28. Velocidade de amostragem sub-isocinética.	41
Figura 29. Amostragem com velocidade superior à isocinética.	42
Figura 30. Autoria própria.....	42
Figura 31. Peneira para granulometria	44
Figura 32. Mecânica dos sólidos (2014).....	45
Figura 33. (a) Recipiente utilizado para medição da massa de material; (b) cilindro completamente preenchido com material.	46
Figura 34. Amostra de material: Coque de petróleo (esquerda), Antracito (direita).....	47
Figura 35. Resultado dos ensaios de granulometria dos materiais.	48
Figura 36. Fotomicrografia do coque de petróleo: 86x (esquerda) e 2.870x (direita).....	49
Figura 37. Fotomicrografia do antracito: 86x (esquerda) e 2.430x (direita).	50
Figura 38. Representação do funcionamento da balança.	51
Figura 39. Configuração da balança para medir a tensão superficial.	51
Figura 40. Tensão superficial em função da concentração de supressor.....	52
Figura 41. Ensaios de emissão em torre de poeira PM10 - coque de petróleo umidade 4%....	53
Figura 42. Filtro dos ensaios de coque de petróleo a 4% de umidade.....	53
Figura 43. Resultado coque de petróleo umidade 7%.	54
Figura 44. Filtro dos ensaios de coque de petróleo a 7% de umidade.....	55
Figura 45. Resultado antracito umidade 4%.....	55
Figura 46. Filtro dos ensaios de antracito a 4% de umidade.	56
Figura 47. Resultado antracito umidade 7%.....	57
Figura 48. Filtro dos ensaios de antracito a 7% de umidade.....	57

LISTA DE SÍMBOLOS

a	área da seção transversal do leito de partículas
D_s	diâmetro de Sauter médio das partículas minerais
d	diâmetro médio dos capilares ou poros
F	porcentagem de finos
F_c	força de adesão capilar
FH	forças adesivas
H	umidade do minério
L	espessura do leito de partículas
M_a	massa de água
MB	massa do picnômetro
M_s	massa das partículas sólidas
P	perda de massa
P_{cap}	pressão capilar
Q	vazão de ar r raio da partícula
T	temperatura ambiente
UR	umidade relativa do ar
V	velocidade do vento
Vol	volume do leito de partículas
ΔP	variação de pressão
Ψ	fator de esfericidade
γ	tensão superficial
ε	porosidade do leito de partículas
θ	ângulo de contato
k	permeabilidade do leito de partículas
μ	viscosidade dinâmica do ar
ρ_a	massa específica aparente
ρ_s	massa específica das partículas sólida
D_{50}	e o tamanho de partícula correspondente quando a porcentagem acumulada chega a 50%
TML	Transportable Moisture Limit

LISTA DE SIGLAS

UFPA - Universidade Federal do Pará

PM - Particulate Matter

CONAMA - Conselho Nacional do Meio Ambiente.

IFDC - International Fertilizer Development Center

CAMTU – Campus Universitário de Tucuruí

CMDLD – Coal mine dust lung disease

CWP - Pneumoconiose clássica do trabalhador de carvão

PMF - Fibrose maciça complexa ou progressiva

Wa - Adesão termodinâmico

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	15
1.1 Justificativa.....	16
1.2 OBJETIVO	16
2 Revisão bibliográfica.....	16
2.1 Apresentação sobre o carvão e sua exploração.....	16
2.2 Exploração do carvão no Brasil	17
2.3 Perigos da poeira para a saúde humana	17
2.4 Regulamentação de padrões de qualidade do ar no Brasil.....	18
2.6 Fatores associados a geração de poeira.....	20
2.7 Fundamentos de geração de poeira	20
2.7.1. Temperatura e umidade relativa do ar	21
2.7.2. Velocidade do ar	21
2.7.3. Forma da partícula	22
2.7.4. Tamanho da partícula.....	23
2.7.5. Tensão superficial	24
2.7.6. Umidade do material.....	26
2.8. Ensaio em torre de poeira como técnica de avaliação emissão de poeira.....	27
3. METODOLOGIA.....	30
3.1. Desenvolvimento de aparato experimental.....	30
3.1.2. Procedimentos Experimentais.....	36
3.2. Amostragem de poeira	40
3.3.1. Granulometria	43
3.3.2.1. Peneiramento.....	43
3.3.3. Ensaio de massa específica real (picnometria)	44
3.3.3. Ensaio de massa específica aparente em função da umidade	45
3.4. Incerteza Experimental	46

4. RESULTADOS	47
4.1. Caracterização das amostras.	47
4.1.2 Ensaio de massa específica real (picnometria)	47
4.2.2 Granulometria	48
4.3.3. Tensão superficial	50
4.4. Ensaio de Validação.....	52
4.3.1. Ensaio de Validação para Coque de Petróleo – 4% de umidade	52
4.3.2. Ensaio de Validação para Coque de Petróleo – 7% de umidade	54
4.3.3. Ensaio de Validação para o Antracito – 4% de umidade.....	55
4.3.4. Ensaio de Validação para o Antracito – 7% de umidade.....	56
5. CONCLUSÃO.....	58
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	59
ANEXOS	60

1 INTRODUÇÃO

Como fonte de energia não renovável, o carvão tem sido uma parte importante da estrutura energética do mundo mostram que a produção mundial total de carvão e o consumo de carvão cresceram mais de 150% desde 1971. De acordo com os dados da Agência Internacional de Energia, a proporção de carvão na energia primária atingiu 29,03% em 2012, e espera-se que a proporção de carvão ainda ultrapasse 24% até 2035 (Avaliação de Impacto Ambiental, 2017). Nos Estados Unidos, o carvão foi a segunda maior fonte de energia (30%) para geração de eletricidade em 2017. A produção de carvão em 2017 foi de 702,49 milhões de toneladas, um aumento de 6,32% em relação a 2016.

Embora o Brasil minere carvão, o país ainda precisa importar cerca de 50% do carvão que consome. Porque o carvão produzido no país é de baixa qualidade devido à sua baixa concentração de carbono. Os países que fornecem carvão para o Brasil incluem África do Sul, Estados Unidos e Austrália. Internamente, no entanto, as usinas termelétricas, como a Vale do Rio Jacuí no Rio Grande do Sul e a Vale do Rio Tubarão em Santa Catarina, abastecem grande parte do mercado interno.

Atualmente, a mineração a céu aberto e a mineração subterrânea são os principais métodos de mineração de carvão. A escolha do método de mineração é determinada principalmente pela profundidade enterrada da camada de carvão, pela densidade e pressão dos estratos subjacentes e pela espessura da camada de carvão. Independentemente do método utilizado, a mineração de carvão sempre levanta muitas preocupações de saúde.

A inalação de poeira da mineração de carvão pode levar ao desenvolvimento da doença pulmonar da poeira da mina de carvão (CMDLD). Além da pneumoconiose clássica do trabalhador de carvão (CWP) e sua forma grave e potencialmente fatal, fibrose maciça complexa ou progressiva (PMF), a CMDLD também inclui pneumoconiose de poeira mista com exposição à sílica, bronquite crônica, edema pulmonar gasoso e fibrose. Além disso, a exposição à poeira afeta negativamente a função pulmonar dos mineiros em um padrão semelhante à DPOC, especialmente para aqueles que são ex-fumantes. Como tal, os mineiros são um grupo de alto risco para doenças respiratórias e morte prematura. Dada a extensão da mineração de carvão global e sua carga de doenças potencialmente grande, a saúde respiratória dos mineiros de carvão continua sendo uma consideração importante em todo o mundo.

1.1 Justificativa

O manuseio e o transporte de minérios geram impactos maléficis ao meio ambiente, propiciando a geração da poluição atmosférica, hídrica, entre outras. A poluição atmosférica acontece devido a grande quantidade de material particulado que é gerada e fica suspensa no ar. Isto ocorre porque praticamente todas as operações de movimentação, como (descarga, transporte e armazenagem), elevam poeiras. Além disso, há também a constante ação dos ventos sobre as pilhas de armazenamento de carvão e sobre outras áreas cobertas por poeiras, como as vias de acesso do porto. Logo, a partir dos fatores apresentados foi necessário encontrar uma maneira mais eficaz e eficiente para que este problema seja minimizado o máximo possível.

1.2 OBJETIVO

1.1.1 Objetivos gerais

Visando melhorias para facilitar o experimentos na torre de poeira, foi necessário algumas mudanças propostas foram feitas com mudanças como diminuição da torre em relação a sua altura, no qual possuía dificuldade na elevação do material, modificar a alimentação da torre como uma válvula guilhotina para um ter controle mais eficiente, mudança no reservatório inferior visando, tornando mais acessível para limpeza pós-ensaio, adicionar um sistema isocinético para aumentar a eficiência na coletada de dados.

1.1.1.1 objetivo especifico

- Modificação da torre de poeira;
- Modificar o formato dos ensaios;
- Otimizar a contagem de partículas;
- Maximizar a coleta de amostras e retirado do material.

2 Revisão bibliográfica

2.1 Apresentação sobre o carvão e sua exploração

A exploração de carvão mineral é uma atividade importante em muitos países ao redor do mundo, sendo utilizado principalmente como combustível para geração de energia elétrica e como matéria-prima na produção de aço e outros produtos industriais. No entanto, a exploração de carvão tem consequências significativas para o meio ambiente e para a saúde humana. O processo de extração do carvão pode causar danos ao meio ambiente, incluindo a destruição de habitats naturais, a poluição de rios e lagos com substâncias tóxicas e a emissão de gases de efeito estufa que contribuem para o aquecimento global. Além disso, a exposição aos gases e partículas tóxicas emitidas pela queima do carvão pode causar problemas

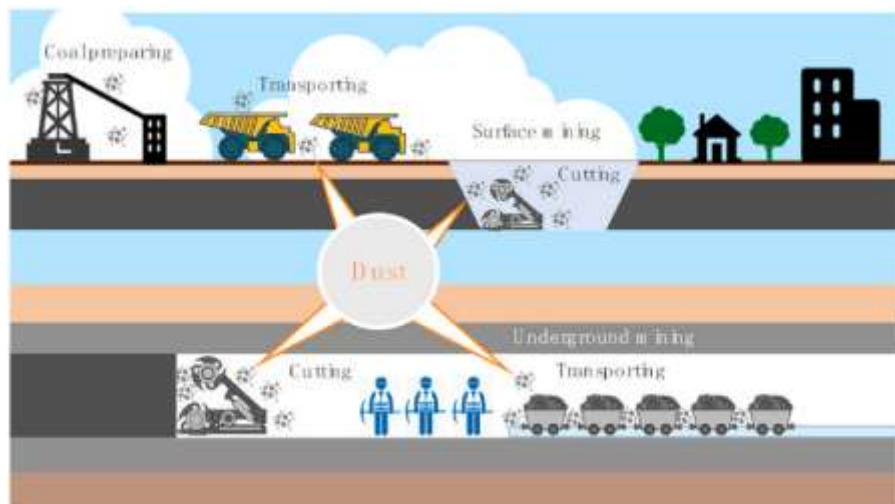
respiratórios e outros problemas de saúde para as pessoas que vivem próximas às minas de carvão ou às usinas termelétricas que utilizam carvão como combustível.

Devido a esses impactos negativos, muitos países têm procurado reduzir sua dependência do carvão como fonte de energia e incentivar a transição para fontes de energia mais limpas e renováveis, como a energia solar, eólica e hidrelétrica. Ainda assim, o carvão continua sendo uma importante fonte de energia em muitas partes do mundo, especialmente em países em desenvolvimento onde a demanda por energia é alta e os recursos financeiros para investir em fontes de energia alternativas são limitados.

2.2 Exploração do carvão no Brasil

O carvão mineral no Brasil abastece a economia, em especial as usinas termelétricas que consomem cerca de 85% da produção. Já a indústria de cimento no país é abastecida com aproximadamente 6% desse carvão. Restando 4% para produção de papel celulose e apenas 5% nas indústrias de alimentos, cerâmicas e grãos. Mundialmente o carvão também é utilizado na produção de cosméticos, gás carbonífero, e entre tantos produtos, estão os subprodutos do carvão que constituem os materiais sintéticos (TÉCNICO EM MINERAÇÃO,2017).

Figura 1. Manuseio e Transporte na indústria



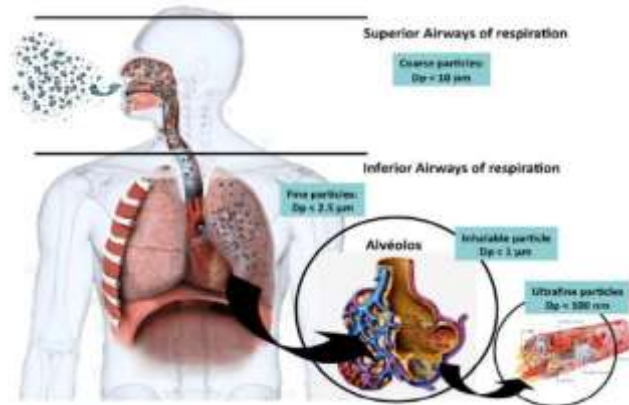
Fonte: Geração de poeira (TÉCNICO EM MINERAÇÃO,20, MAR/2017)

2.3 Perigos da poeira para a saúde humana

A inalação de poeira na mineração de carvão pode levar ao desenvolvimento da doença pulmonar por meio da poeira da mina de carvão instalada no ambiente. Além da pneumoconiose clássica do trabalhador de carvão e sua forma grave e potencialmente fatal, fibrose maciça complexa ou progressiva, também inclui pneumoconiose de poeira mista com exposição à sílica, bronquite crônica, edema pulmonar gasoso e fibrose difusa associada ao pó. Além disso, a exposição à poeira afetou negativamente a função pulmonar dos mineiros em um

padrão semelhante à doença pulmonar obstrutiva crônica, especialmente naqueles que fumaram anteriormente. Assim, os mineiros são um grupo de alto risco para morbidade respiratória e morte prematura. Dada a extensão da mineração de carvão global e seu potencial para grandes cargas de doenças, a saúde respiratória dos mineiros de carvão continua a ser uma consideração importante em todo o mundo (RESPIROLOGY,2017).

Figura 2. Deposição de material particulado no tecido pulmonar humano



Fonte: (RESPIROLOGY,2017).

2.4 Regulamentação de padrões de qualidade do ar no Brasil.

Para os padrões relacionados à qualidade do ar, neste caso são determinados por limites de concentração de poluentes atmosféricos que, quando cedidos, podem afetar diretamente a saúde, a segurança e o bem-estar humano e também o meio ambiente em geral. Os padrões primários de qualidade do ar são concentrações de poluentes que, se excedidas, podem afetar a saúde de uma população. Os padrões secundários de qualidade do ar referem-se a concentrações de poluentes abaixo das quais se espera que os efeitos adversos sobre o bem-estar da população sejam mínimos, no entanto afetam diretamente o meio ambiente em geral (CONAMA, 1990).

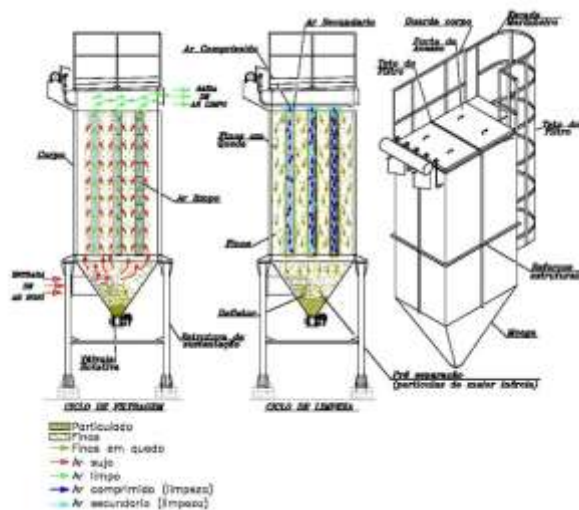
2.5 Mecanismos e ferramentas para controle na emissão de poeira

Atualmente, existem vários equipamentos, nos quais são utilizados para fazer o controle de poeira de forma aceitável, no entanto é necessário fazer melhorias para que seja minimizado ao máximo possível o problema de geração de poeira. As principais mitologia usadas para controle, visando a emissão de matérias particulados, se classificam em: Coletores, contenção e suspensão ou abatimento. Equipamentos que coletam material particulado utilizam o princípio da ventilação capturar o fluxo de poeira, longe da fonte de geração, e direcioná-lo para o equipamento Coletores e dar o destino final. Visando o uso mais comum na indústria, é visível que os filtros mangas e os precipitados eletrostáticos são os mais utilizados. Os filtros

mangas são amplamente utilizados em diversos campos para filtrar e eliminar partículas sólidas de fluxos de gás industrial para fins de medição. As dimensões variam de acordo com as necessidades de cada local

Basicamente, os filtros de mangas consistem em mangas de filtro, gaiolas, placas de espelho, válvulas de diafragma, tanques de armazenamento de ar comprimido, tubos de sopro e tremonhas. É relativamente simples de operar, mas para obter melhores resultados, a manutenção atualizada é obrigatória. O processo de filtração do filtro de mangas é realizado através da introdução de ar poluído no compartimento de mangas. Em seguida, essas partículas permanecem no tecido da manga e são descarregadas pela tremonha depois disso, o ar livre de partículas é direcionado para bicos na parte superior do filtro através da pressão, o ar limpo é descarregado na atmosfera.

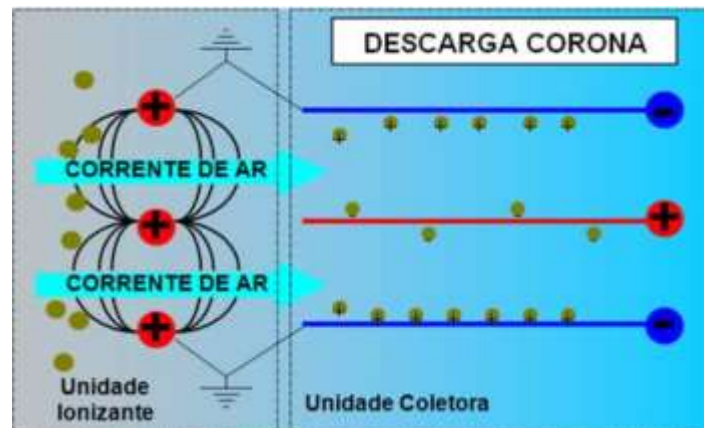
Figura 3. Filtro manga.



Fonte: TECHNODUST (2020).

No mesmo seguimento temos os precipitados eletrostáticos. O processo de precipitação eletrostática se inicia com a formação de íons gasosos pela descarga corona de alta voltagem no eletrodo, em seguida as partículas solidas ou liquidas são carregadas eletricamente pelo bombeador de íons gasosos ou elétrodos. O campo elétrico existente entre o eletrodo de descarga e o eletrodo de coleta faz com que a partícula carregada migre para o eletrodo de polaridade oposta, descarregue a sua carga, ficando fora do fluxo dos gases.

Figura 4. precipitados eletrostáticos



Fonte: Apoio Projeto Eng. (2019)

2.6 Fatores associados a geração de poeira

Os fatores ambientais podem ter participação direta ou indireta no que visa a geração de poeira, seguindo este pensamento deve-se analisar as condições climáticas do local de manuseio e também de transporte, descrever fatores como umidade relativa do ar e velocidade do vento ajudam a parametrizar padrões, nos quais podem beneficiar e entender o comportamento das partículas suspensas no ambiente.

Ademais, O tamanho das partículas é um dos parâmetros mais importantes no estudo da poluição atmosférica, pois exerce influência sobre vários fenômenos associados aos aerossóis, tais como, o transporte, a deposição atmosférica e a migração através do ambiente, além de efeitos nocivos, o tamanho de partículas influencia diretamente na geração de poeira, visto que partículas de menores granulometrias tendem a ficar em suspensão com maior facilidade, e também deve-se acrescentar que as mesmas possuem influência direta na saúde humana. O material particulado suspenso na atmosfera, de um modo geral, possui dimensão na faixa de 0,001 μm e 100 μm , sendo na maioria das vezes, invisível a olho nu. Embora alguns particulados apresentem forma diferente da esférica, é convencional tratar a totalidade deles como se apresentassem essa forma.

2.7 Fundamentos de geração de poeira

Visando a geração de poeira, é notório que a mesma está associada a vários fatores nos quais podem contribuir de forma a reduzir ou ampliando a emissão de poeira, isto associando aos fatores ambientais de acordo com a região. Assim, pode-se analisar como, de acordo com cada tipo de material, seria intensificado a geração de poeira. Por conseguinte, serão discursados os principais preceitos associados a adição de poeira

2.7.1. Temperatura e umidade relativa do ar

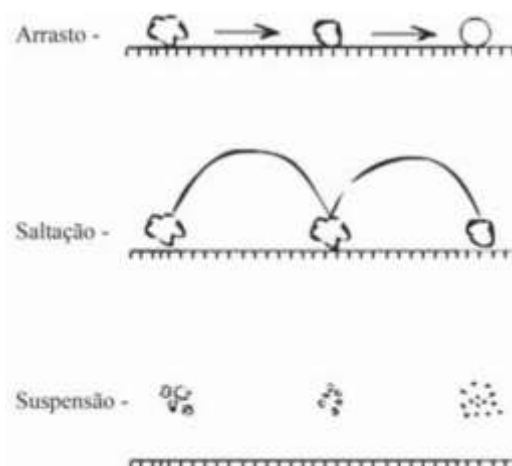
A temperatura e a umidade relativa do ar estão associadas diretamente, os mesmos são um forte contribuinte para a emissão de poeira. Em tese, é visível que a alta temperatura influencia na produção de poeira, porque quanto menor umidade no minério será mais fácil o desprendimento das partículas em pilhas e matérias manuseadas, pois ocorrerá a evaporação do líquido.

O aumento da temperatura do ar atmosférico faz aumentar o valor da pressão de vapor d'água saturado, e como a umidade relativa é a relação existente entre o total de vapor d'água presente no ar e a quantidade máxima de vapor que o ar poderia absorver a uma mesma temperatura e pressão, tem-se que o aumento da temperatura do ar faz diminuir a umidade relativa do ar e vice-versa, considerando que não ocorra a inserção de vapor d'água no ar atmosférico

2.7.2. Velocidade do ar

A influência do ar está relacionada ao desprendimento das partículas de acordo com a movimentação do ar sendo ele por transporte ou pela própria ação do vento no leito, o cisalhamento ocorrido faz com que as partículas sofram desprendimento, o que seria resultado do movimento de vagões quando se referi ao transporte do material e o movimento do ar sobre o solo ou pilha no vagão. À medida que o ar flui sobre a superfície do material, uma força resultante é transmitida para as partículas. Se a força for suficiente, pode fazer com que as partículas se movam. Na ausência de controles, essa força pode causar três tipos de movimento de partículas: de rastejo (Creep), de salto (Saltation) e suspensão (Suspension),

Figura 5. Demonstra a ação do vento nas partículas.



Fonte: Ação ecológica dos ventos (TEIXEIRA, difração da terra,2000).

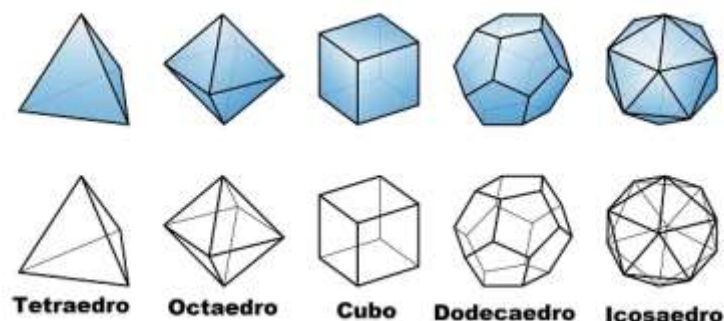
O movimento de rastejo refere-se ao processo em que o vento gira as partículas ao longo da superfície. No movimento de salto, as partículas podem ser retiradas por breves períodos de tempo apenas e depois retornam à superfície.

Para materiais úmidos, como minério de ferro e carvão, o efeito do vento afeta o processo de secagem dos materiais. Num sistema com um leito de partículas sujeito a condições de ar constantes (pressão, temperatura e humidade relativa), o sistema evolui ao longo do tempo para um estado de equilíbrio térmico onde os sólidos assumem uma humidade final (maior ou inferior à humidade inicial, consoante em condições ambientais), é chamada de umidade de equilíbrio do sólido em condições de ambiente seco (condições ambientais). Para que ocorra a secagem, o sistema não pode estar em equilíbrio. A temperatura do meio de secagem deve ser maior que a dos sólidos úmidos para permitir que o calor flua para ele e, assim, evapore a água.

2.7.3. Forma da partícula

De acordo com materiais graneis, na grande maioria dos casos, as partículas têm uma forma geométrica complexas, muito diferentes das partículas esféricas. No entanto, a maioria dos métodos para analisar materiais granulares usa partículas esféricas para é conveniente para a modelagem do sistema. A forma da partícula é importante de várias maneiras. Em relação ao processamento mineral, pois afeta certas propriedades das partículas, como área de superfície, densidade aparente e coeficientes de arrasto. Demonstrar uma partícula não esférica é uma situação complexa por elas possuem tamanhos e formar diferentes.

Figura 6. Forma geométrica das partículas.



Fonte: Geometria de partículas (2014)

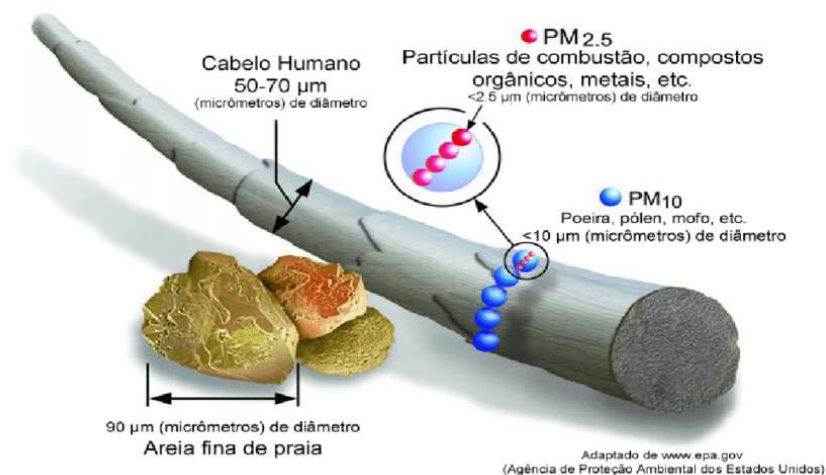
Gomes e Amarante Mesquita (2013), estudaram tamanho de partícula e sua esfericidade em sua velocidade de captura (elevação) Up no transporte pneumático nível, indicando que à medida que a esfericidade da partícula aumenta, a velocidade aumenta as partículas finas (20 μm) e grossas (750 μm) são reduzidas. Esta conclusão é claramente contrária ao que foi encontrado modelo matemático para previsão de perda de massa por Leal Filho et al (2011).

Uma possível explicação para essa diferença está nos métodos utilizados entre os dois estudos. Os experimentos de Gomes e Amarante Mesquita (2013) usaram partículas secas, enquanto os experimentos de Leal Filho realizado com amostras úmido (humidade inicial entre 6% e 15%). As partículas com menor grau de esfericidade têm maior área por unidade de massa e provavelmente perdem umidade mais rapidamente e esta pode ser a explicação para o maior arraste das partículas menos esféricas.

2.7.4. Tamanho da partícula

Levando em consideração o tamanho de partícula, é notório o quão importante é ressaltar como que diferentes granulometrias podem influenciar diretamente na emissão de partículas elevadas no meio ambiente. Analisando o campo da mineração pode-se evidenciar como o efeito da emissão ocorre de acordo com o transporte e manuseio no campo de trabalho, e também quanto menor o granulometria do material consequentemente haverá maior concentração de partículas suspensas no ar o que possibilita vários efeitos nocivos a respiração do ser humano, podendo chegar aos alvéolos pulmonares. Materiais particulados suspensos na atmosfera, geralmente, seu tamanho está entre 0,001 μm e 100 μm , na maioria das vezes invisível a olho nu.

Figura 7. Compara tamanho de partículas.



Fonte: Relações de tamanhos de partículas (EPA, 2016).

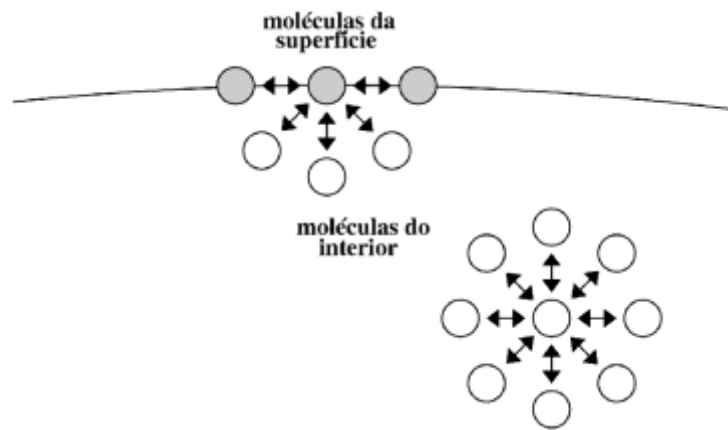
Uma vez suspensas na atmosfera, as partículas mudam de tamanho, como neste caso, as gotas de água na atmosfera coalescem e formam partículas maiores que 100 μm se depositam rapidamente no solo. O efeito é o mesmo usado para suprimir a poeira em suspensão, produzindo partículas maiores e mais pesadas o suficiente para sedimentarem no solo

O processo de aglomeração está associado às forças de adesão entre as partículas. A adesão pode ser compreendida como a atração entre dois corpos sólidos, produzida pela existência de forças atrativas intermoleculares de ação a curta distância, estando diretamente associado ao tamanho das partículas e sua umidade. Em particulados secos, essas forças são devido a forças de van der Waals e eletrostáticas. As forças de van der Waals são baseadas em dipolos elétricos de átomos e moléculas, que podem induzir dipolos complementares na partícula vizinha, produzindo forças atrativas, e sua intensidade está diretamente relacionada com o tamanho das partículas. As forças eletrostáticas baseiam-se na diferença de potencial elétrico na superfície das partículas. Em materiais úmidos, as forças devido a pontes de líquidos entre as partículas são, geralmente, as mais importantes. As pontes de líquidos são formadas por pequenas regiões de líquidos de baixa viscosidade, na zona de contato entre as partículas, onde há forças de atração entre as partículas, causadas pela tensão superficial do líquido e pela pressão capilar. Se essa pressão do líquido for menor que a pressão ambiente, a composição da força adesiva é intensificada.

2.7.5. Tensão superficial

Para matérias granulares úmidos, a força de adesão se deve principalmente às pontes líquidas que existem entre as partículas e entre as partículas e a parede, que é uma combinação de tensão superficial e forças capilares. A tensão superficial (γ) é o efeito físico que ocorre na camada superficial de um líquido, que leva a sua superfície a se comportar como uma membrana elástica. De acordo com Fredlund e Rahardjo (1993), o menisco na interface ar-líquido resulta de forças intermoleculares que diferem das forças que atuam nas moléculas no interior do líquido, uma vez as moléculas situadas no mesmo líquido as mesmas são atraídas em por todas as direções das moléculas vizinhas, o que se torna uma resultante nula no processo em suas forças. As moléculas da superfície do líquido, no entanto, sofrem apenas atração lateral e inferior, essas forças geram uma tensão em sua superfície, faz com que a mesma se comportar como algum tipo de película elástica. Logo, a tensão superficial é medida como a força de tração, por unidade de comprimento da superfície (N/m). Havendo uma diferença de pressão entre a pressão do líquido e a pressão do ar, o menisco assume uma forma côncava para o lado de maior pressão a fim de alcançar o equilíbrio (FREDLUND e RAHARDJO, 1993).

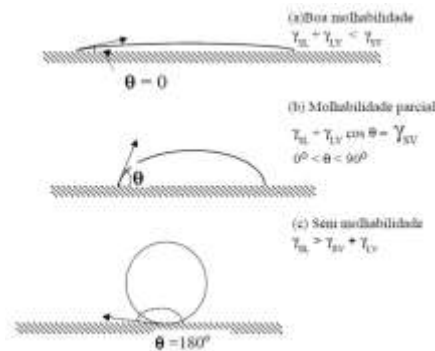
Figura 8. Ação do vento sobre as moléculas



Fonte: (FREDLUND e RAHARDJO, 1993).

A ação capilar se evolve na maioria dos fenômenos que envolvam o contato entre sólidos e líquidos. Quando em contato um com o outro, os mesmos tendem a formação de uma superfície chamada interface, na qual funciona como uma espécie de "membrana" cujo a espessura infinitesimal que separa mecanicamente dois fluidos homogêneos. Essa superfície está sujeita a uma tensão superficial tangencial à interface (γLG), encolhendo-a para a menor configuração de domínio possível.

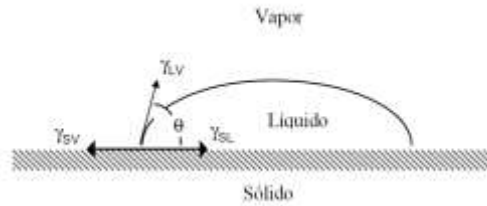
Figura 9. Variação do ângulo de contato e o comportamento do Trabalho de Adesão



Fonte: (FREDLUND e RAHARDJO, 1993).

A atração física de duas superfícies neutras, quando aproximadas, pode ser melhor compreendida considerando-se o molhabilidade de superfícies sólidas por líquidos. Para uma molhabilidade efetiva da superfície do concreto, o “primer” líquido deve recobrir toda a elevação e a depressão da superfície, deslocando todo o ar. A molhabilidade é expressa em termos do trabalho de adesão termodinâmico (W_a), que representa a adesão física resultante de forças de dispersão intermoleculares altamente localizadas entre diferentes fases. Além disso, para o ângulo de contato, quando um líquido é colocado em uma superfície sólida, ou ele vai se espalhar ou vai formar uma gota com ângulo formado no contato do líquido com a superfície sólida é denominado ângulo de contato

Figura 10. Tensões superficiais envolvidas na medida do ângulo de contato.



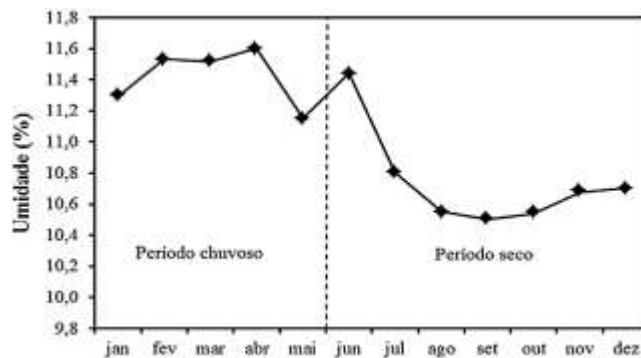
Fonte: (FREDLUND e RAHARDJO, 1993).

2.7.6. Umidade do material

A fase líquida e fase sólida tem uma interação bem significativa, pois os mesmos ao se misturarem possuem grande capacidade de se ter um controle para manuseio e transporte de forma eficiente, no entanto quando essas propriedades não são controladas se tornam prejudiciais dependendo da aplicação a ser usada. As pontes de líquido são formadas entre as partículas do material sólido, mesmo com baixa quantidade de água já pode-se notar forças de coesão. Entretanto, em casos de aumento na quantidade de líquido as forças coesivas tendem a elevar de uma forma, podendo ocorrer a saturação do material, perdendo o controle do sistema.

O elevado aumento na umidade do material particulado é prejudicial, visto que pode vários problemas no transporte e manuseio como na operação de elevadores de canecas, chutes de transferência, transportadores de correia, desmoronamento de pilhas nos pátios de estocagem e também dificulta a descarga de viradores de vagão, o que gera altos custos as embarcações, os quais só podem ser embarcados com o minério à umidade inferior ao valor limite de umidade para transporte (TML – *Transportable Moisture Limit*), sendo necessário que o minério fique estocado por um período de tempo até que a umidade seja reduzida por drenagem da água livre e evaporação (MUNRO e MOHAJERANI, 2016).

Figura 11. Período chuvoso.

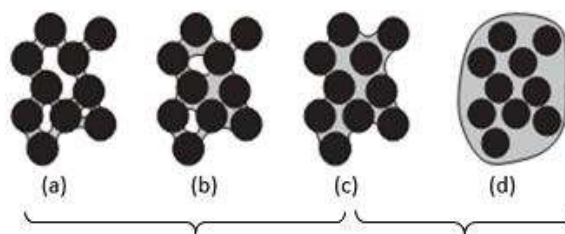


Fonte: (MUNRO e MOHAJERANI, 2016).

Ao adicionar líquido no material particulado se tornar responsável pela aglomeração das partículas, onde a construção de aglomerado é feita pela ligação de cada partícula com as partículas vizinhas. Na transformação de uma mistura de material seco para uma de aglomerados, diferentes mecanismos de ligações acontecem ocorrem. Para não ocorrência de líquido, a aglomeração vai depender somente das forças de atração que existe entre sólidos como (van der Waals; Forças eletrostáticas). Ao se acrescentar líquido no material o meio muda junto com seus mecanismos de ligação o que aumenta a ligação entre entres os aglomerados

De acordo com o volume de líquido presente no sistema, quatro estágios de distribuição de água entre partículas aparecem durante o processo sendo representado na figura 12. Em (a) têm-se a água no estado pendular, o qual apresenta baixos níveis de umidade, e as pontes de líquido afastam as partículas, gerando uma diminuição na densidade aparente. Com o aumento de líquido, atinge-se o estado funicular em (b). A diferença líquida recobre alguns vazios entre partículas, e os espaços vazios resultantes passam a coexistir com as demais pontes de líquido. Quando o líquido ocupa o lugar onde anteriormente havia ar, a densidade aparente aumenta com o aumento da umidade. Em (c), todos os interstícios das partículas são preenchidos com líquido e o estado capilar é atingido, onde as partículas se mantêm unidas devido à sucção capilar na interface líquido/ar que está, agora, somente na superfície do aglomerado. Em (d) a água está no estado livre, onde o material granulado fica saturado por líquido. Como o material está saturado, não há força capilar unindo as partículas, pois não há uma linha de três fases. O menisco estará na interface líquido-gás no topo do recipiente que contém a polpa neste estado o minério passa a ser uma polpa (BERNARDES, 2006; GONTIJO, 2017).

Figura 12. Ponte de líquido e os raios de curvatura de menisco sobre a porção infinitesimal da superfície curva.



Fonte: (BERNARDES, 2006; GONTIJO, 2017).

Água capilar

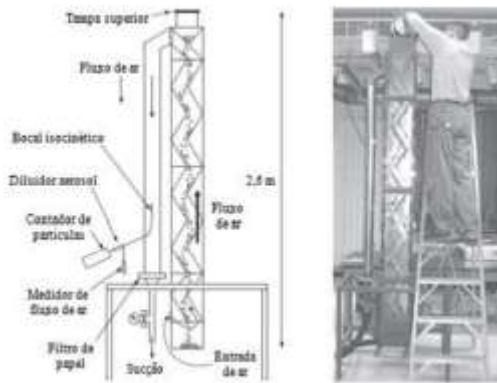
Água livre

2.8. Ensaio em torre de poeira como técnica de avaliação emissão de poeira.

Copeland e Kawatra (2011) usaram com método de avaliação para medir a emissão de poeira para matérias granulares, na qual usou como base vários estudos da área mecânica

visando a capacidade de lidar com matérias granulares, facilidade e precisão para medir a quantidade de poeira no ar gerada durante um teste e replicação aproximada dos tipos de condições de manuseio esperados durante o manejo do minério de ferro (impactos e altura de queda). Desta forma, os mesmos desvendaram a técnica de torre de poeira como sendo a mais adequada para ser utilizada em suas pesquisas. Em seguida, será apresentada uma torre de poeira anteriormente existente que servira de base para a torre de poeira, a qual será reformulada.

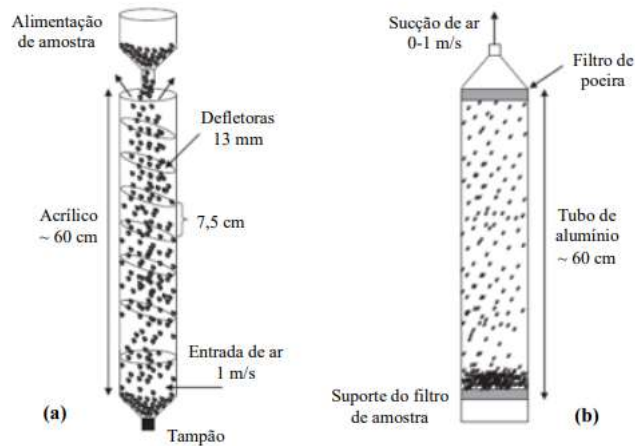
Figura 13. Torre de poeira desenvolvida por Copeland e Kawatra



Fonte: Copeland & Kawatra (2011)

O Centro Internacional de Desenvolvimento de Fertilizantes International Fertilizer Development Center (IFDC) desenvolveu a torre que caracteriza a geração de pó de fertilizante granulado no qual uma amostra de 400 g cai de uma altura de 60,96 cm. Uma corrente de ar é injetada no fundo da coluna para atingir a velocidade nominal 1 m/s. Esta corrente de ar foi capaz de remover partículas mais finas que 140 μm amostra. A quantidade de poeira no ar é então calculada medindo a quantidade de material que coletado na parte inferior da coluna e subtraído da quantidade de material alimentado na coluna o topo da coluna. Na figura pode-se analisar com como seria o fluxo de teste feito na torre de poeira. A mesma foi construída com matérias metálicas e acrílicas, ajudando como a utilizar materiais de várias granulometrias e também a uma ótima visualização do ensaio.

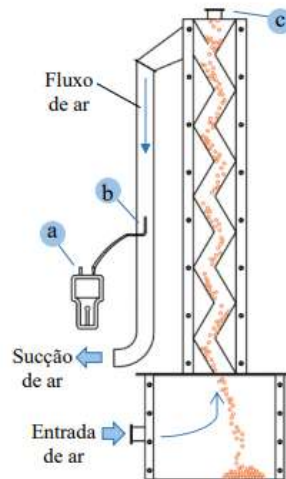
Figura 14. Torre de poeira: a) ARC e b) IFDC



Fonte: (COPELAND e KAWATRA, 2011).

A torre de (SANTOS JUNIOR, 2018) foi projetada baseando-se estudos sobre geração de poeira (COPELAND e KAWATRA, 2011). A torre de poeira foi projetada em quatro módulos de placas defletoras, fabricadas em chapa fina metálica de 2 mm de espessura. Chapas de acrílico de 8 mm de espessura fixadas na parte frontal dos módulos, permitindo assim a visualização do escoamento do material no interior da torre de poeira. As chapas de acrílico são fixadas com porcas à estrutura dos módulos e um lençol de vedação é utilizado entre estes para evitar a interação entre o ambiente externo e o escoamento de material e ar no interior da torre. A torre de poeira é segmentada e possui flanges para facilitar a montagem e desmontagem de seus módulos e para a avaliação da variação de altura de queda do material através das placas defletoras.

Figura 15. Torre de poeira



Fonte: (SANTOS JUNIOR, 2018)

3. METODOLOGIA

3.1. Desenvolvimento de aparato experimental.

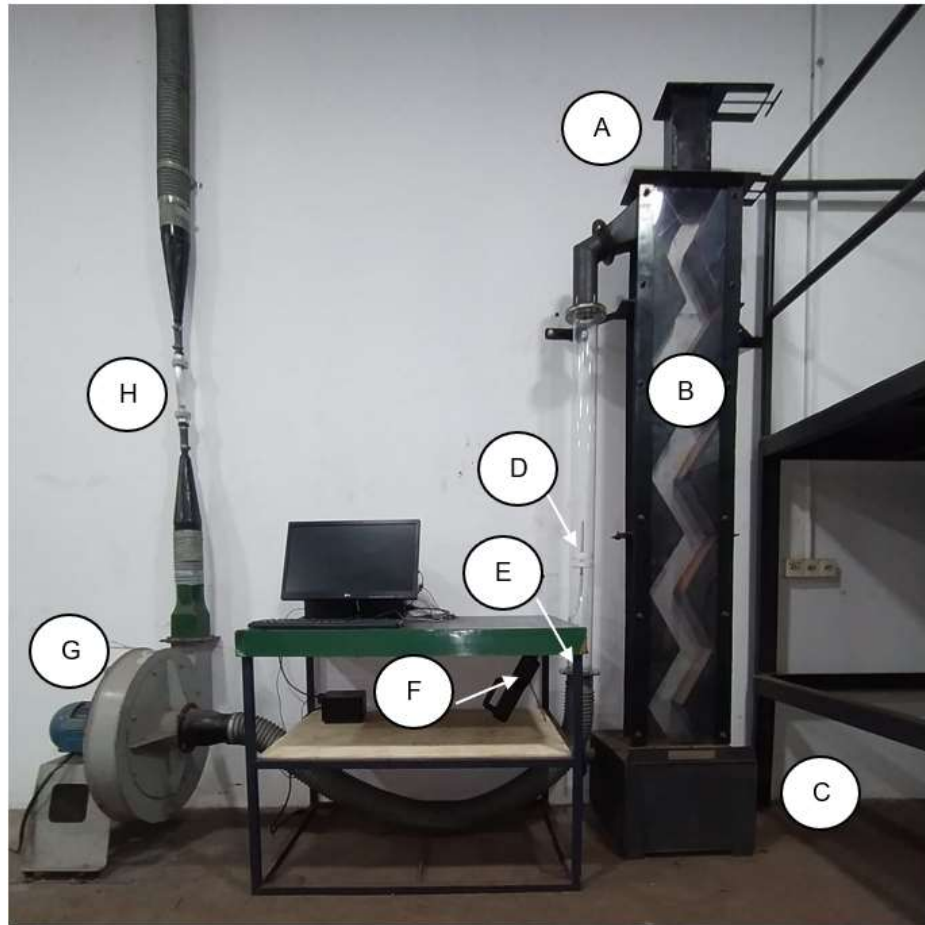
A seguir será aprestando a torre do presente trabalho, na qual precisou-se fazer algumas modificações para que os testes a serem feitos sejam mais ergonômicos e com uma melhoria na coleta de amostras. A bancada da torre de poeira (figura 16) inicialmente foi pensada para ser utilizada em 3 experimentos distintos, porém, houve a necessidade de separar essas bancadas, assim, a adequação da torre de poeira visa facilitar a utilização da mesma para os experimentos de geração de poeira. O reservatório inferior será substituído por um reservatório menor de 120 Litros, com uma gaveta para facilitar a retirada de material da torre (figura19) Os módulos de placas defletoras serão unidos, para facilitar na montagem e diminuir o número de espaços entre módulos, possibilitando uma vedação mais eficiente.

Boa parte dos materiais testados na torre de poeira a uma umidade superior a 6% apresentou uma escoabilidade ruim, dificultando no processo de alimentação da torre. Para resolver esse problema, foi feita uma abertura maior para a alimentação da torre, e será acrescentado uma caixa de volume de 3l a um sistema de Válvula guilhotina para permitir a alimentação na torre. Além dos itens modificados, a bancada da torre de poeira terá acrescentado uma escada de acesso lateral com plataforma a uma altura de 1,5m, visando facilitar a alimentação e outros procedimentos experimentais. A baixo segue todas as modificações feitas com relação a torre anteriores.

Descrição da Bancada:

- I. A troca do sistema de alimentação para torre para uma do tipo guilhotina;
- II. União dos módulos da torre de poeira e também a diminuição da altura para 2m;
- III. Troca do reservatório, visando melhoria na retirada do material pós ensaio;
- IV. Troca do tubo lateral, antes sendo metálico por um de acrílico, com o intuito de poder visualizar a parte interna do escoamento;
- V. Elevação do tubo de acrílico lateral, diminuindo a curva de saída da torre;
- VI. Adição de uma sonda isocinética para que a coleta seja mais eficaz;
- VII. Adição de um filtro de coleta para amostras;
- VIII. Troca dos fixadores da tampa de acrílico, usando do tipo borboleta;
- IX. Diminuição dos fixadores entre a torre e o reservatório para 4 fixadores;
- X. Utilização de cores mais claras no interior da torre;

Figura 16. Torre de poeira. A) Válvula guilhotina, B) Torre de poeira, C) Reservatório, D) Tubo de coleta, E) Filtro de coleta, F) Contator de partículas, G) Exaustor, H) Rotômetro.



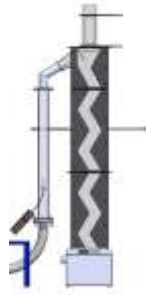
Fonte: Autoria própria

Figura 17. a) Antiga configuração da torre de poeira



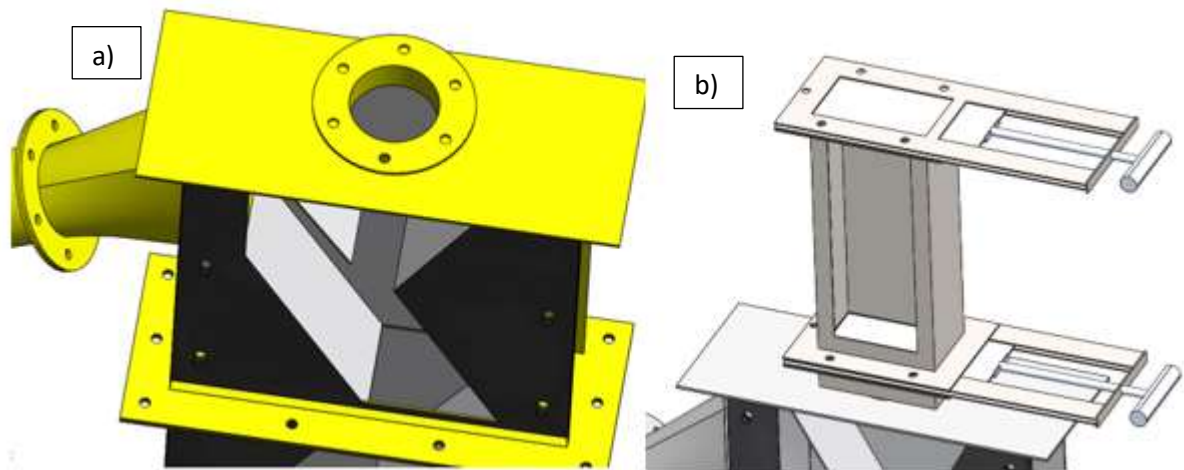
Fonte: Autoria própria

Figura 18. Nova configuração da torre de poeira



Fonte: Autoria própria.

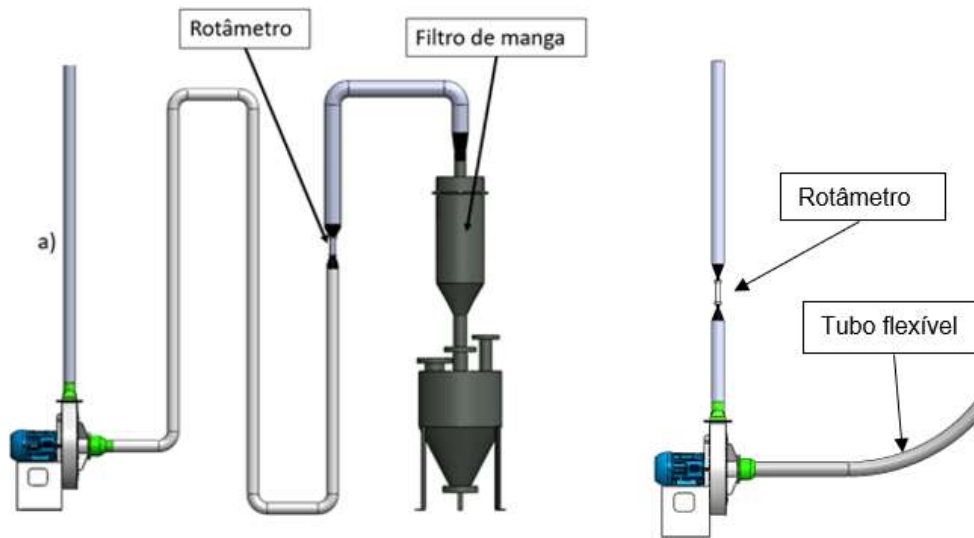
Figura 19. a) Bancada atual; b) modificação realizada.



Fonte: Autoria própria.

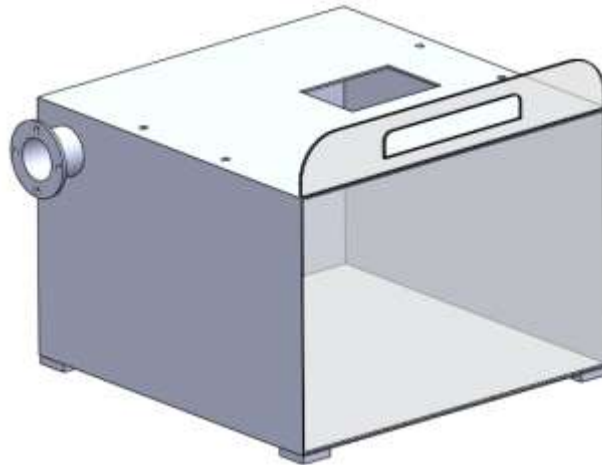
O ventilador utilizado atualmente para gerar o fluxo de ar na torre será mantido, já o sistema de filtragem vai ser retirado. O Rotâmetro Utilizado atualmente será realocado para a região de saída do ventilador.

Figura 20. Sistema de geração de fluxo de ar da torre de poeira: a) Metodologia atual; b) Metodologia utilizada.



Fonte: Autoria própria.

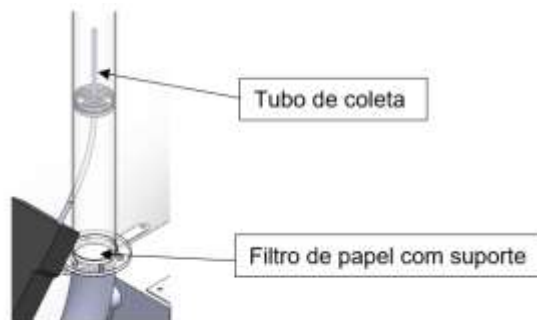
Figura 21. Reservatório de coleta final.



Fonte: Autoria própria.

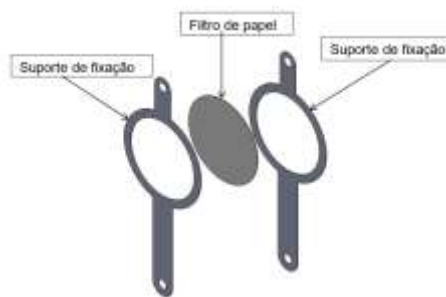
Para o sistema de coleta de amostra de poeira, foi pensado em inserir entre flanges um papel filtro circular, como mostra a figura 22. Após cada bateria de ensaios (seja duplicata, triplicata, etc), o papel será guardado em envelopes plásticos quando solicitado, ou descartado. Visando fazer a coleta de forma eficaz, foi feito um estudo sobre coleta isocinética, no qual tem como objetivo realizar em condições de fluxo de qualquer fluido no equipamento de amostragem para que ambos possam ter velocidade igualadas com o intuito de fazer uma coleta de amostragem eficiente.

Figura 22. Sistema de amostragem



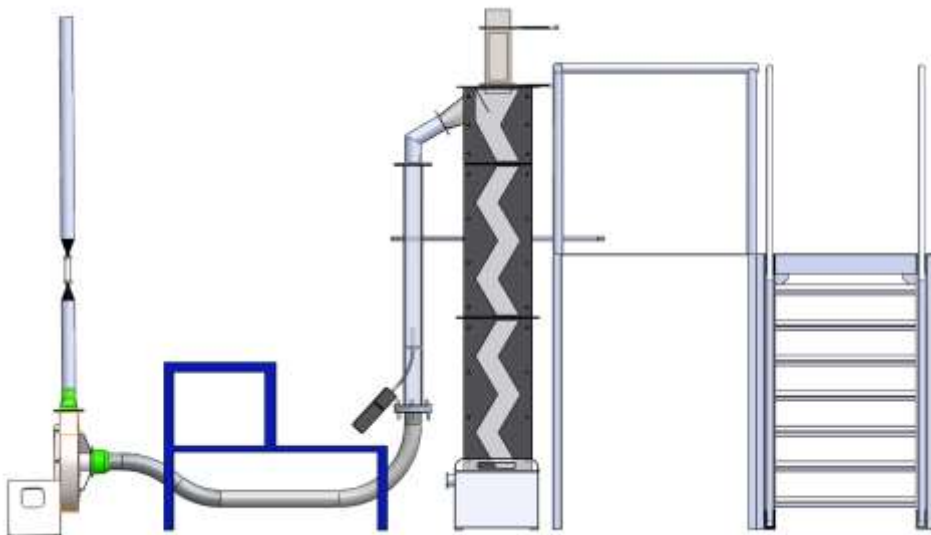
Fonte: Autoria própria.

Figura 23. Filtro de papel em evidência



Fonte: Autoria própria.

Figura 24. Projeto da torre de poeira.



Fonte: Autoria própria.

3.1.2. Procedimentos Experimentais

Para que fosse possível a realização dos experimentos, foi necessário dividi-lo em etapas para organização e praticidade nos ensaios a serem feitos. Logo, foi dividido em pré-ensaio, no qual requer a organização dos equipamentos como recipientes, balanças, secagem do material em estufas, preparação de soluções quando houver supressor, preparação do contados de partículas e também o material a ser ensaiado na torre e também os pós ensaio, tem como objetivo fazer o descarte de forma adequada, limpeza do aparato experimental e desligamento dos equipamentos eletrônicos.

Ademais, houveram duas etapas, nas quais são ensaios sem supressor e ensaio com supressor, o primeiro tem como objetivo fazer testes usando somente água em sua mistura com material particulado e o segundo seria com preparação de soluções de acordo com o supressor a ser adicionado a sua composição química para que haja uma comparação entre ensaios. Em seguida será apresentado com mais detalhes o protocolo experimental da torre de poeira.

Pré-ensaio:

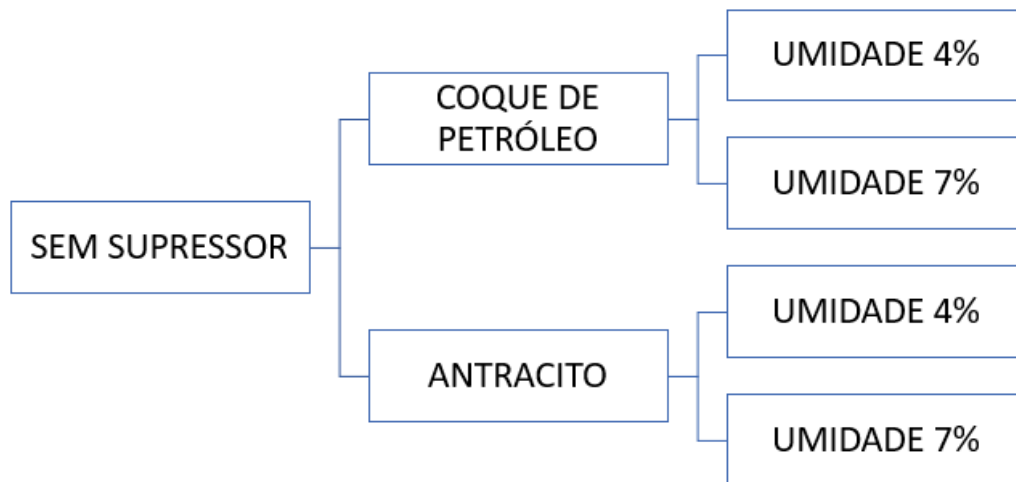
- I. Preparar dois recipientes com tampa para colocar as soluções com concentração de 1% e 2%;
- II. Pesar 1000g de água;
- III. Pesar a quantidade de supressor para diluir em 1000g de água à concentração de 1%;
- IV. Misturar no recipiente a água e o supressor;
- V. Guardar a solução;
- VI. Para a concentração de 2% repetir os passos II, III, IV e V.

Ensaio sem supressor:

- I. Limpeza da Torre e Ambiente;
- II. Acionar o sistema de sucção da torre e com o auxílio do inversor de frequência, regular a vazão previamente estabelecida (347 L/min);
- III. Separar 3300g de carvão seco;
- IV. Pesar em um béquer de vidro a quantidade de água destilada para umidificar o material a 4%;
- V. Colocar o carvão no recipiente do misturador;
- VI. Colocar gradualmente 1/3 da água sobre carvão no misturador;
- VII. Ligar o misturador por 10 s;

- VIII. Repetir o passo IV e V mais duas vezes, ao finalizar este passo deixar o misturador funcionando por mais 2 min;
- IX. Retirar duas amostras de mais ou menos 20g para verificação de umidade
- X. Pesar 1000g de material úmido em um béquer de vidro;
- XI. Colocar a amostra de 1000 g no sistema de alimentação da torre e fechar a abertura superior;
- XII. Colocar uma bandeja no reservatório da torre para armazenar o material ensaiado;
- XIII. Colocar o filtro localizado no sistema de sucção (Anotar o peso do filtro
- XIV. Verificar a vazão e ajustar no inversor;
- XV. Após o sistema de sucção atingir o regime de operação, o contador de partículas é acionado por 15 s, com uma taxa de amostragem de 1 s e com o valor da massa específica real do material, para medir a concentração de partículas no ambiente e estabelecer uma linha de referência (background);
- XVI. Posicionar a câmera a frente da torre para realizar a filmagem do ensaio;
- XVII. Ligar a câmera para iniciar a filmagem;
- XXVIII. Em seguida, a válvula guilhotina do sistema de alimentação é então acionada, liberando o material;
- XIX. Deixar a válvula de inferior aberta depois de liberar o material, mantendo a superior fechada;
- XX. Manter o contador ligado até que os valores medidos se aproximem do valor de referência inicial (aproximadamente 35 segundos);
- XXI. Salvar os dados do contador;
- XXII. Salvar a filmagem;
- XXIII. Fechar a válvula de abertura da guilhotina;
- XXIV. Com a quantidade de material restante no recipiente do misturador, repetir os passos em (triplicata);
- XXV. Ao fim da triplicata retirar-se o filtro para pesagem;
- XXVI. Retirar o material armazenado no reservatório e pesar após o terceiro ensaio;
- XXVII. Limpar a torre de poeira;
- XXVIII. Repetir os passos III à XXV para a umidade de 7%;
- XXIX. Repetir os passos III à XXVI para o outro tipo de carvão, conforme mostrado no fluxograma a seguir.

Figura 25. Fluxograma de ensaios sem supressores.



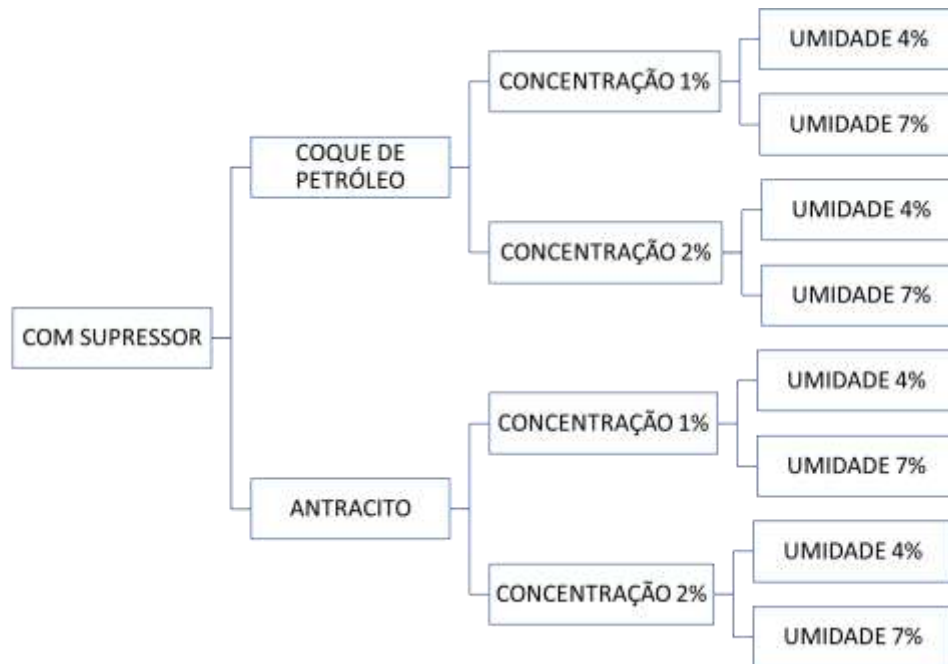
Fonte: Autoria própria.

Ensaio com supressor:

- I. Limpeza da Torre e ambiente;
- II. Acionar o sistema de sucção da torre e com o auxílio do inversor de frequência, regular a vazão previamente estabelecida (347 L/min);
- III. Separar 3300g de carvão seco;
- IV. Pesar em um béquer de vidro a quantidade de solução à 1% de supressor para umidificar o material a 4%;
- V. Colocar o carvão no recipiente do misturador;
- VI. Colocar gradualmente 1/3 da solução sobre carvão no misturador;
- VII. Ligar o misturador por 10 s;
- VIII. Repetir o passo IV e V mais duas vezes, ao finalizar este passo deixar o misturar funcionando por mais 2 min;
- IX. Retirar duas amostras de mais ou menos 20g para verificação de umidade;
- X. Pesar 1000g de material úmido em um béquer de vidro;
- XI. Colocar a amostra de 1000 g no sistema de alimentação da torre e fechar a abertura superior;
- XII. Colocar uma bandeja no reservatório da torre para armazenar o material ensaiado;
- XIII. Colocar o filtro localizado no sistema de sucção (Anotar o peso do filtro);
- XIV. Verificar a vazão e ajustar no inversor;

- XXV. Após o sistema de sucção atingir o regime de operação, o contador de partículas é acionado por 15 s, com uma taxa de amostragem de 1 s, para medir a concentração de partículas no ambiente e estabelecer uma linha de referência (background);
- XXVI. Posicionar a câmera a frente da torre para realizar a filmagem do ensaio;
- XXVII. Ligar a câmera para iniciar a filmagem
- XXVIII. Em seguida, a válvula guilhotina do sistema de alimentação é então acionada, liberando o material;
- XXIX. Deixar a válvula de inferior aberta depois de liberar o material, mantendo a superior fechada;
- XXX. Manter o contador ligado até que os valores medidos se aproximem do valor de referência inicial (aproximadamente 35 segundos);
- XXXI. Salvar os dados do contador;
- XXXII. Salvar a filmagem;
- XXXIII. Fechar a válvula de abertura da guilhotina;
- XXXIV. Com a quantidade de material restante no recipiente do misturador, repetir os passos (triplicata);
- XXXV. Ao fim da triplicata retira-se o filtro para pesagem;
- XXXVI. Retirar o material armazenado no reservatório e pesar após o terceiro ensaio;
- XXXVII. Limpar a torre de poeira;
- XXXVIII. Repetir os passos I à XXXV para a concentração de 2% de supressor;
- XXXIX. Repetir os passos I à XXXVI para a umidade de 7%;
- XXXX. Repetir os passos I à XXXVI para o outro tipo de carvão, conforme mostrado no fluxograma a seguir;

Figura 26. Fluxograma de ensaios com supressores.



Fonte: Autoria própria.

Pós-ensaio:

- I. Descartar o material do ensaio corretamente;
- II. Limpar o contador de partícula;
- III. Limpar a torre de poeira;
- IV. Desligar todos os equipamentos elétricos utilizados nos ensaios;
- V. Lavar os equipamentos utilizados (vidraria, misturador, recipientes, bandejas e outros).

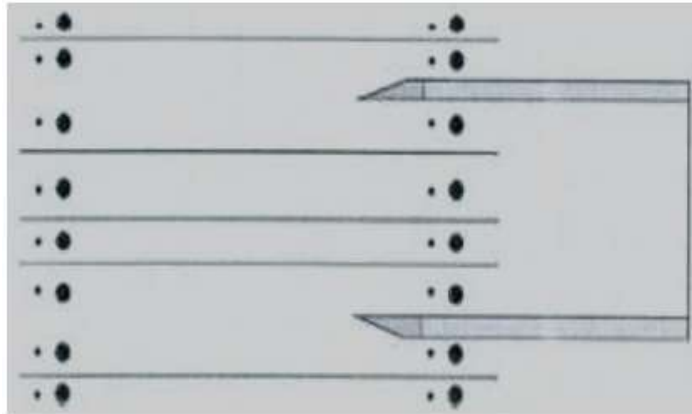
3.2. Amostragem de poeira

O sistema isocinético para partículas é um método utilizado para coletar amostras de gases e partículas presentes em um fluxo de ar ou gás em uma chaminé ou dutos de ventilação. O objetivo principal do sistema isocinético é coletar amostras representativas da concentração e tamanho das partículas presentes no fluxo de ar ou gás. O termo "isocinético" se refere à manutenção de uma velocidade constante do ar dentro do sistema, o que garante que as partículas sejam coletadas de maneira representativa, independentemente de seu tamanho ou peso.

O sistema isocinético consiste em uma sonda de amostragem que é inserida no fluxo de ar ou gás e conectada a um sistema de medição e coleta de amostras. A sonda de amostragem é projetada para manter uma velocidade de ar constante e coletar partículas em uma taxa proporcional à sua concentração no fluxo

As amostras coletadas pelo sistema isocinético podem ser analisadas para determinar a concentração de partículas em diferentes tamanhos, bem como a composição química das partículas. Essas informações são úteis para avaliar a qualidade do ar em uma determinada área e para monitorar a eficácia de medidas de controle de poluição.

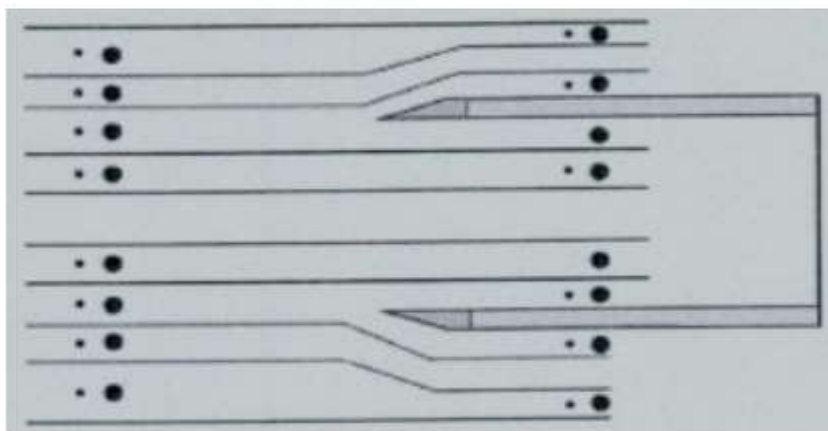
Figura 27. Situação com amostragem isocinética.



Esmanhoto, E. (2010).

Casos como a medição feita de forma incorreta mostram erros de medição, nas quais se dividem em sub-isocinética, no sistema é realizada uma situação de fluxo na qual a velocidade de sucção dos gases pelo equipamento de medida é menor do que ao do fluxo interno dos mesmos na chaminé (sub-isocinética). Nesta situação, serão coletadas mais partículas maiores, do que as que existem na realidade, como mostrado na figura 28.

Figura 28. Velocidade de amostragem sub-isocinética.

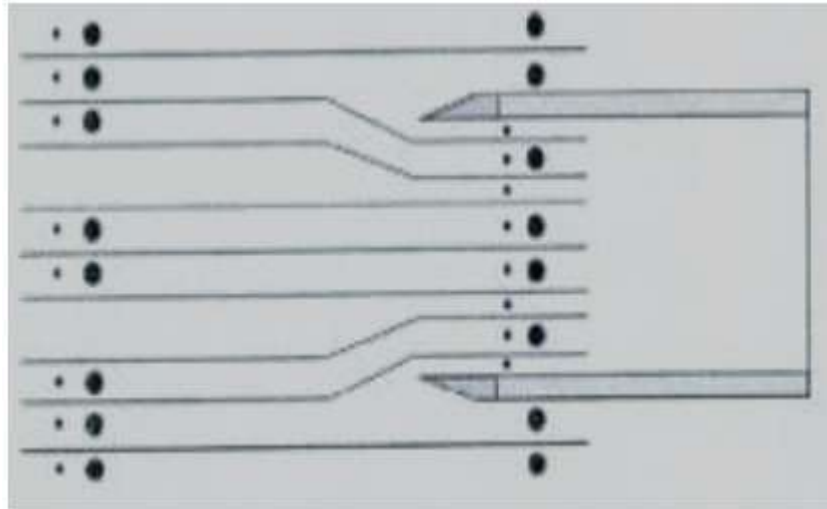


Esmanhoto, E. (2010).

Para casos de velocidade de amostragem maior que a do fluxo gasoso, as partículas maiores, devido a inercia, não acompanham o desvio dos gases e continuam numa trajetória praticamente reta, de forma que passam sem ser captadas pela sonda, dessa maneira a

amostragem faz com que os gases captados pela sonda tenham um número de partículas do que realmente existe no fluxo de ar e poeira, portanto, a contração medida será menor do que a real, como mostrado na figura 29.

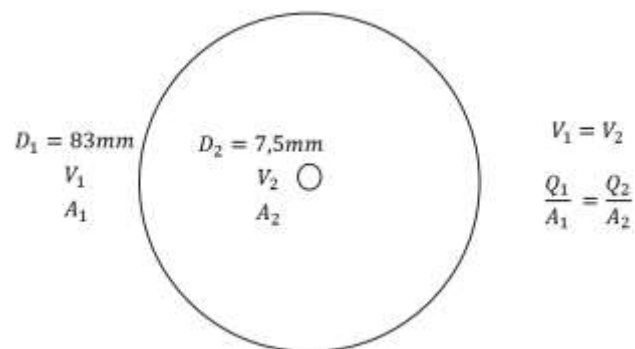
Figura 29. Amostragem com velocidade superior à isocinética.



Esmanhoto, E. (2010).

Visando utilizar e aplicar essa metodologia para a atual torre de poeira (Figura 20), foi necessário analisar as dimensões utilizadas no sistema de amostragem (figura 20), no entanto para esse estudo deve-se levar em consideração que a vazão do contador que é constante, o diâmetro da sonda tem 7,5mm e do tubo de acrílico tem 83mm, sendo assim, a única variável que pode ser alterada seria a vazão do sistema de exaustão.

Figura 30. Autoria própria



Dados:

$$Q_2 = 4,7166^{-05} m^3/s$$

$$A_2 = 4,42^{-05} m^2$$

$$A_1 = 5,41^{-3} m^2$$

$$Q_1 = 5,78 L/s$$

$$\text{convetendo: } Q^1 = 347 L/m$$

A vazão de 347 L/m, a qual foi utilizada no sistema de amostragem.

3.3.1. Granulometria

3.3.2.1. Peneiramento

A granulometria de um material pode ser determinada por peneiramento, que é o processo de separar partículas de tamanhos diferentes através da utilização de telas ou peneiras. O material é colocado sobre a peneira e agitado para que as partículas de tamanhos diferentes passem através das aberturas da tela. As partículas maiores ficam retidas na tela, enquanto as partículas menores passam através dela. Repetindo-se este processo com peneiras de aberturas cada vez menores, é possível obter uma distribuição granulométrica completa do material.

As aberturas padrão das peneiras variam de acordo com o sistema de classificação utilizado. Alguns dos sistemas mais comuns incluem o sistema Tyler, o sistema ASTM e o sistema ISO. No sistema Tyler, as aberturas padrão variam de 4 a 100 mesh, onde mesh é uma unidade de medida de abertura de tela. No sistema ASTM, as aberturas padrão variam de 4 a 140 mesh. No sistema ISO, as aberturas padrão variam de 63 a 500 μm . Cada sistema tem suas próprias aberturas padrão e, às vezes, pode ser necessário convertê-los para outros sistemas para fins de comparação ou especificação.

Ademais, é importante entender o D50, no qual é a medida de granulometria que representa o diâmetro em que metade das partículas em uma amostra são maiores e metade são menores. Em outras palavras, é o tamanho de partícula abaixo do qual 50% da amostra é retida. O D50 é uma medida importante na granulometria, pois pode ser usada para descrever a textura de uma amostra e para prever suas propriedades, como a dispersão em soluções, a sedimentação e a filtração. Além do D50, outras medidas de granulometria incluem o D10, o D90 e o tamanho de partícula médio.

A difração a laser é um método preciso e rápido para determinar a granulometria de amostras, especialmente para aplicações que exigem uma medição contínua em tempo real. No entanto, é importante lembrar que este método só pode ser usado para amostras que contêm partículas suficientemente grandes para serem resolvidas e que possuam propriedades ópticas adequadas.

Figura 31. Peneira para granulometria



Fonte: Autoria próprio

3.3.3. Ensaio de massa específica real (picnometria)

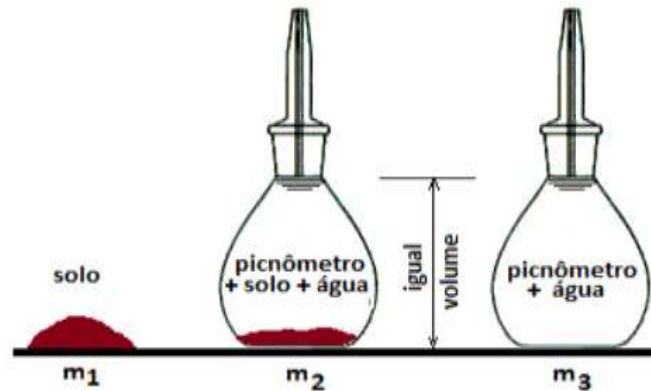
O ensaio de massa específica de um material granular por picnometria é uma técnica para medir a massa específica real de um material desejado. Este ensaio envolve fazer o preenchimento de um recipiente (picnômetro) com o material granular e o peso do recipiente e do material. A massa específica é então calculada com base no volume ocupado pelo material granular e sua massa. Este ensaio é utilizado para avaliar a pureza de um material granular, pois diferentes tipos de materiais podem ter massas específicas diferentes. Além disso, a massa específica também pode ser usada para calcular outras propriedades físicas do material, como porosidade e densidade aparente. Logo abaixo será descrito o processo do ensaio:

- I. Preparação da amostra: a amostra deve ser seca e homogênea, e deve ser pesada com precisão;
- II. Calibração do picnômetro: o picnômetro deve ser calibrado com uma solução de densidade conhecida;
- III. Medição da densidade da amostra: o picnômetro é mergulhado na amostra e a densidade é medida com base na variação de volume do picnômetro;
- IV. Repetição das medições: é recomendável realizar pelo menos três medições independentes para ter resultados mais precisos;
- V. Cálculo da densidade média: a densidade média da amostra é calculada a partir dos resultados das medições;

VI. Análise dos resultados: a densidade média da amostra é comparada com a densidade conhecida de outras amostras semelhantes, ou com tabelas de valores padrão;

Observação: as etapas acima são genéricas, e a sequência exata pode variar de acordo com as normas específicas de cada laboratório ou instituição;

Figura 33. Mecânica dos sólidos (2014)



Fonte: Mecânica dos sólidos (2014)

3.3.3. Ensaio de massa específica aparente em função da umidade

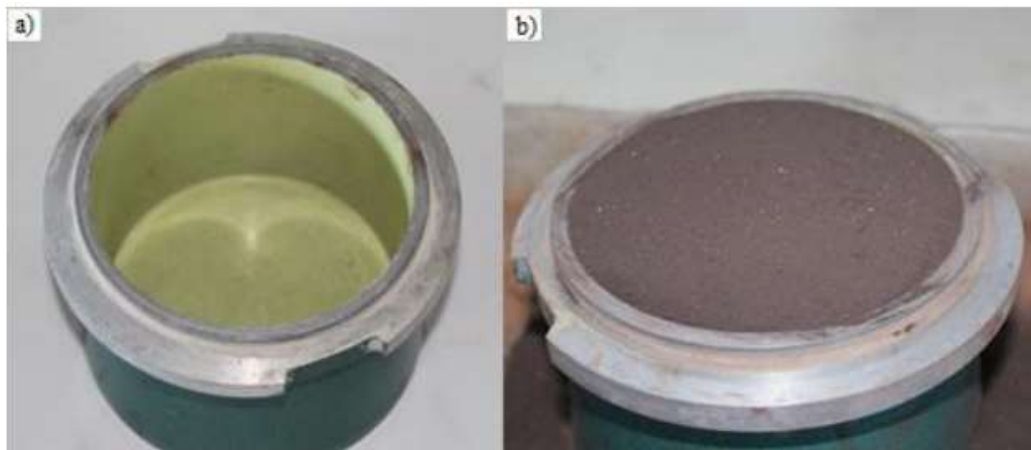
O ensaio de massa específica aparente em função da umidade serve para determinar a relação entre a umidade de um material e sua massa específica aparente, ou seja, a massa do material por unidade de volume. Este ensaio é útil para avaliar a consistência, estabilidade e resistência de solos, materiais de construção e agregados, entre outros, e pode ser usado para determinar as características físicas do material, para fins de projeto ou para avaliar a qualidade do material durante o processo de produção. As etapas para se realizar o ensaio de massa específica aparente em função da umidade do material granular incluem:

- I. Preparação da amostra: Uma amostra representativa do material granular deve ser coletada e seca para remover a umidade;
- II. Determinação da massa seca: A massa da amostra seca é medida com precisão em um equipamento de pesagem;
- III. Adição de água: A amostra é imersa em água por um período determinado e a quantidade de água é ajustada para atingir diferentes níveis de umidade;
- IV. Determinação da massa úmida: A massa da amostra úmida é medida depois de remover o excesso de água;
- V. Cálculo da massa específica aparente: A massa específica aparente é calculada dividindo a massa da amostra úmida pelo volume da amostra, incluindo as porosidades preenchidas com água;

- VI. Repetição dos passos 3 a 5 para diferentes níveis de umidade;
- VII. Plotagem dos resultados: Os resultados são plotados em um gráfico de massa específica aparente versus umidade para avaliar as características da amostra em relação à umidade.

Essas etapas podem variar de acordo com o método de ensaio escolhido e com a normativa técnica aplicável. É importante seguir rigorosamente as instruções do método escolhido para obter resultados precisos e confiáveis.

Figura 33. (a) Recipiente utilizado para medição da massa de material; (b) cilindro completamente preenchido com material.



Fonte: Autoria própria

3.4. Incerteza Experimental

A incerteza experimental é a estimativa da imprecisão associada a uma medição. Ela representa o grau de confiança que podemos ter em um resultado experimental e é expressa como uma faixa de valores em torno da medida central. A incerteza experimental pode ser afetada por diversos fatores, como a precisão dos instrumentos de medição, as condições ambientais durante a realização da experiência e o próprio processo de medição em si.

Existem vários métodos para estimar a incerteza experimental, como a propagação de erros, a análise estatística dos dados e a comparação com padrões de referência. É importante considerar a incerteza experimental ao relatar resultados experimentais, para que outras pessoas possam avaliar a confiabilidade dos dados e compará-los com resultados de outras medidas.

É importante lembrar que a incerteza experimental não indica um erro no resultado, mas sim a imprecisão associada à medida. Por isso, é importante considerar a incerteza ao interpretar e comparar resultados experimentais.

4. RESULTADOS

4.1. Caracterização das amostras.

As amostras de coque de petróleo e antracito foram levadas para secagem na estufa para posteriormente ser realizado os ensaios de caracterização, a seguir na Figura 3 é mostrado os materiais após a secagem.

Figura 34. Amostra de material: Coque de petróleo (esquerda), Antracito (direita).



Fonte: Autoria própria

4.1.2 Ensaio de massa específica real (picnometria)

Foi realizado o ensaio de massa específica real dos materiais, em triplicata, utilizando a metodologia de picnometria, os resultados podem ser observados na Tabela 1, esses dados vão ser utilizados na interface dos contadores de partículas para a medição de concentração de particulados

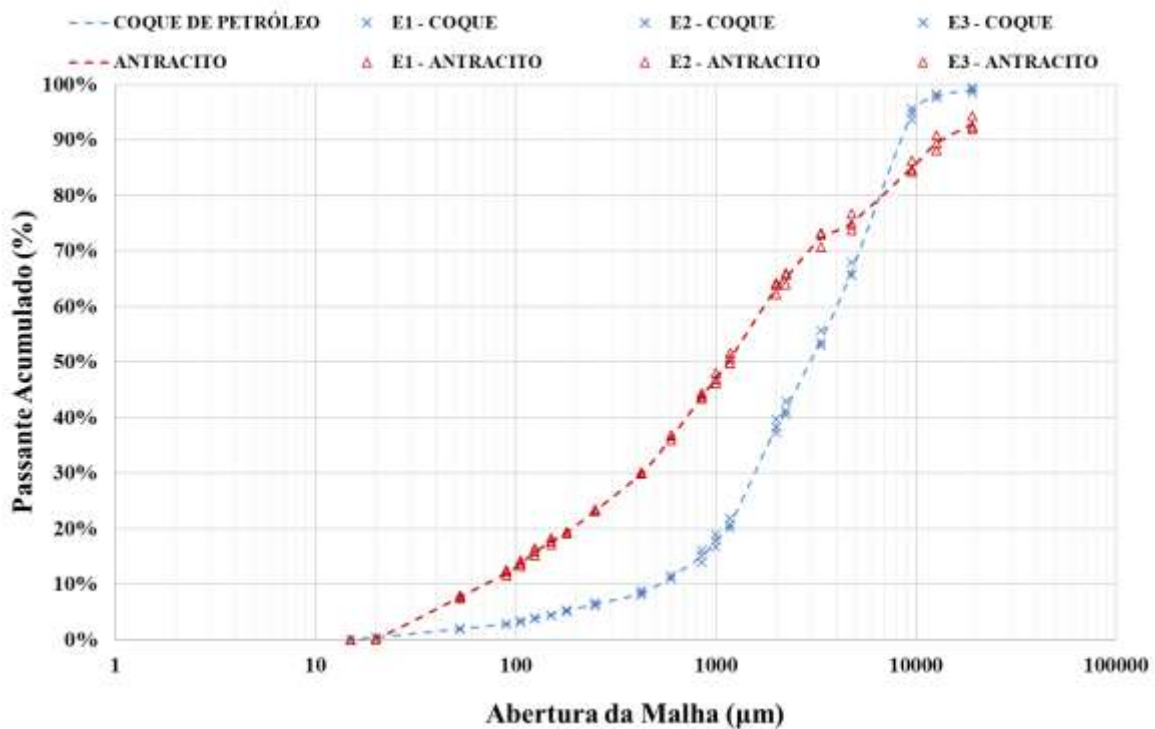
Tabela 1 - Massa específica real dos materiais.

Material	Massa Específica (g/cm ³)			
	E1	E2	E3	Média
Coque de petróleo	1,53	1,54	1,54	1,54
Antracito	1,36	1,36	1,36	1,36

4.2.2 Granulometria

A figura presente mostra a granulometria do coque de petróleo e antracito, o D50 do antracito está presente entre 1000 μm e 1180 μm , para o coque de petróleo está presente 3350 μm e 2230 μm . Para a determinação da granulometria do material utilizou-se a metodologia de peneiramento, conforme ABNT 7181. Os ensaios foram realizados em triplicata. Na Figura 35 é mostrado a distribuição granulométrica do antracito e coque de petróleo, percebe-se que o coque de petróleo é mais grosso quando se compara com o antracito.

Figura 35. Resultado dos ensaios de granulometria dos materiais.

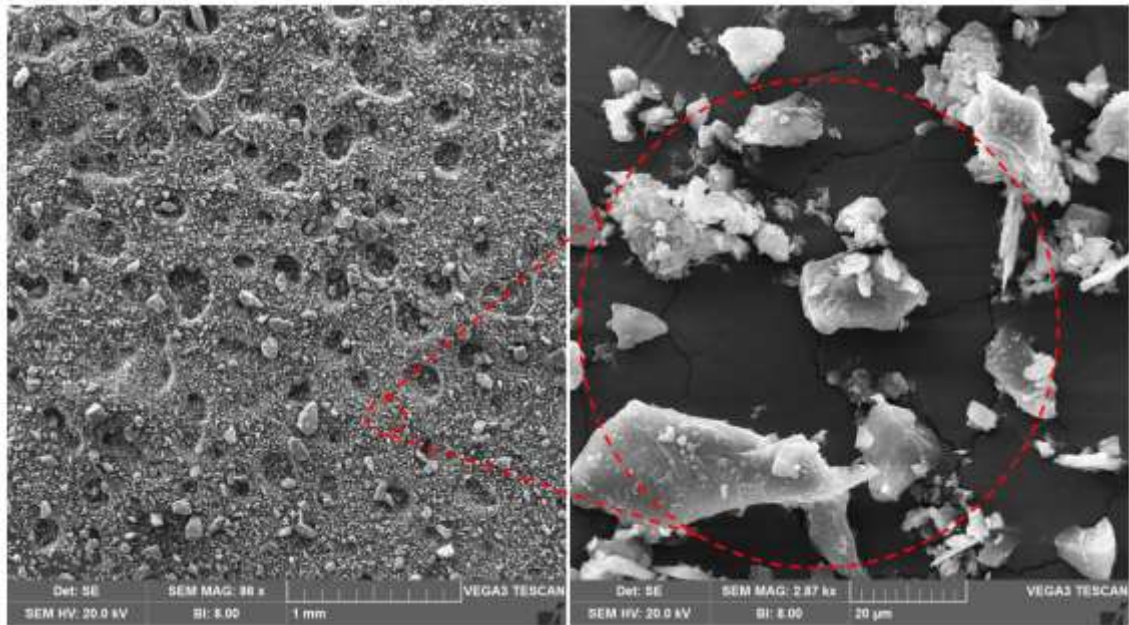


Fonte: CASTRO et al, (2022)

Foi realizado também a Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) para os materiais ensaiados. Para isso foi coletado amostras de material passante da peneira de 100 μm . A amostra, inicialmente seca, é colocada em uma fita dupla face de carbono e fixada em um substrato de tamanho adequado ao suporte de amostras do equipamento do MEV. Em seguida a amostra é banhada (metalizada) por uma liga de ouro para permitir uma melhor visualização pela técnica de microscopia eletrônica de varredura.

Na Figura 36 é mostrado a fotomicrografia do coque de petróleo, percebe-se que as partículas possuem formas e tamanhos irregulares, e que partículas menores que 5 μm ficam agregadas em partículas maiores, mesmo que as amostras estejam secas previamente.

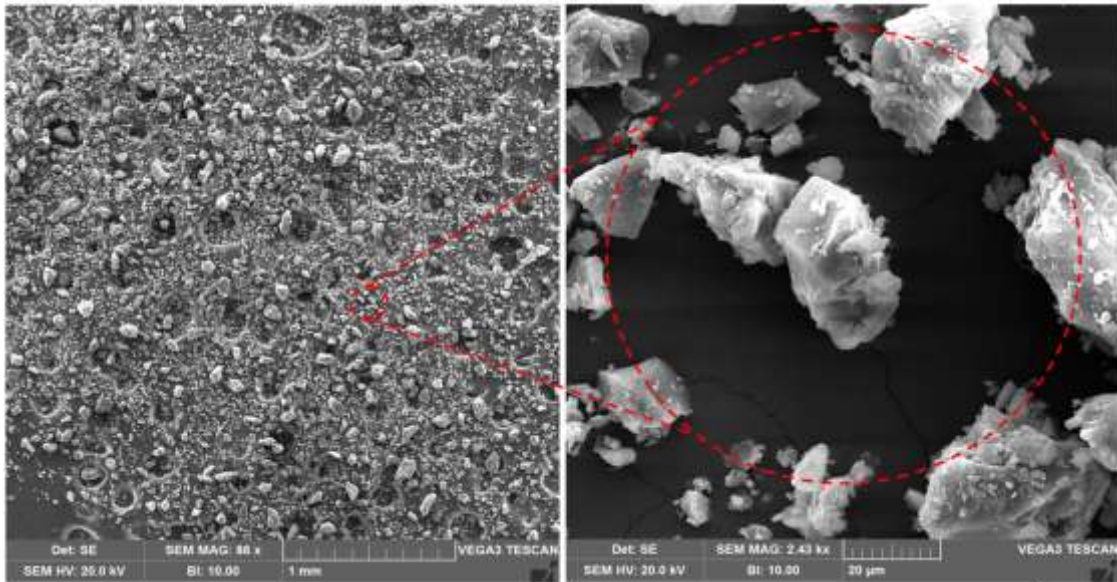
Figura 36. Fotomicrografia do coque de petróleo: 86x (esquerda) e 2.870x (direita).



Fonte: CASTRO et al, (2022)

Na Figura 36 é mostrado a fotomicrografia da amostra de antracito e observa-se que, além dos tamanhos e formas irregulares das partículas, observa-se partículas menores de 5 µm agregadas nas partículas maiores em maior quantidade quando comparada com a amostra de coque de petróleo. A granulometria laser poderia caracterizar esta condição, porém o equipamento queimou a sua fonte, impossibilitando a realização dos ensaios, que serão realizados oportunamente.

Figura 37. Fotomicrografia do antracito: 86x (esquerda) e 2.430x (direita).



Fonte: CASTRO et al, (2022)

4.3.3. Tensão superficial

Para medir a tensão superficial do líquido foi utilizada uma balança proposta por Reis et al (2015). O princípio do funcionamento da balança que foi desenvolvida emprega o método da placa Wilhelmy, na qual se mede a força necessária para destacar uma lâmina da superfície de um líquido. A Figura 38 mostra uma representação de funcionamento da balança construída em três estágios. Inicialmente a lâmina não está em contato com a superfície do líquido, depois a barra é ajustada para que a lâmina toque a superfície do líquido e finalmente move-se o contrapeso de massa m para que a lâmina seja puxada para uma posição de equilíbrio. Na Figura 12 é mostrada a configuração da balança para medir tensão superficial de líquidos.

Figura 38. Representação do funcionamento da balança.

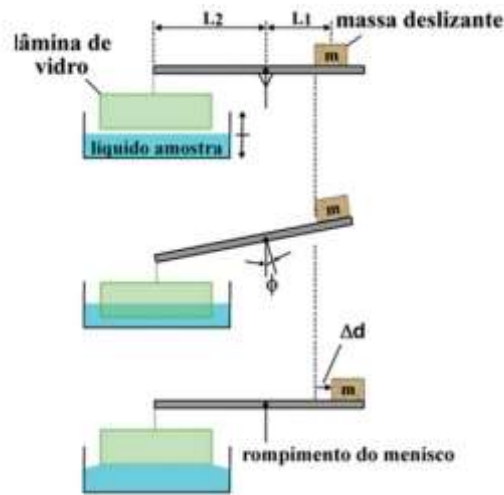
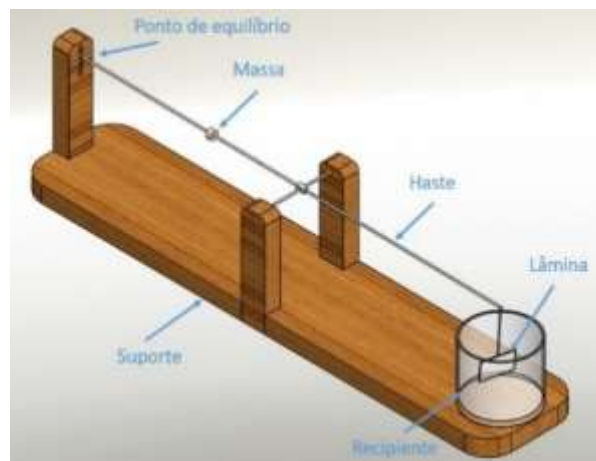


Figura 39. Configuração da balança para medir a tensão superficial.



Com a balança desenvolvida foram realizados teste em outros diferentes líquidos anteriormente, como a água e o álcool isopropílico com as tensões superficiais conhecidas na literatura de 72,20 mN/m e 22,80 mN/m respectivamente a 26° C. Esses líquidos foram testados na balança obtendo-se 71,07 mN/m para água e de 23,18 mN/m para o álcool isopropílico, demonstrando a viabilidade de medição.

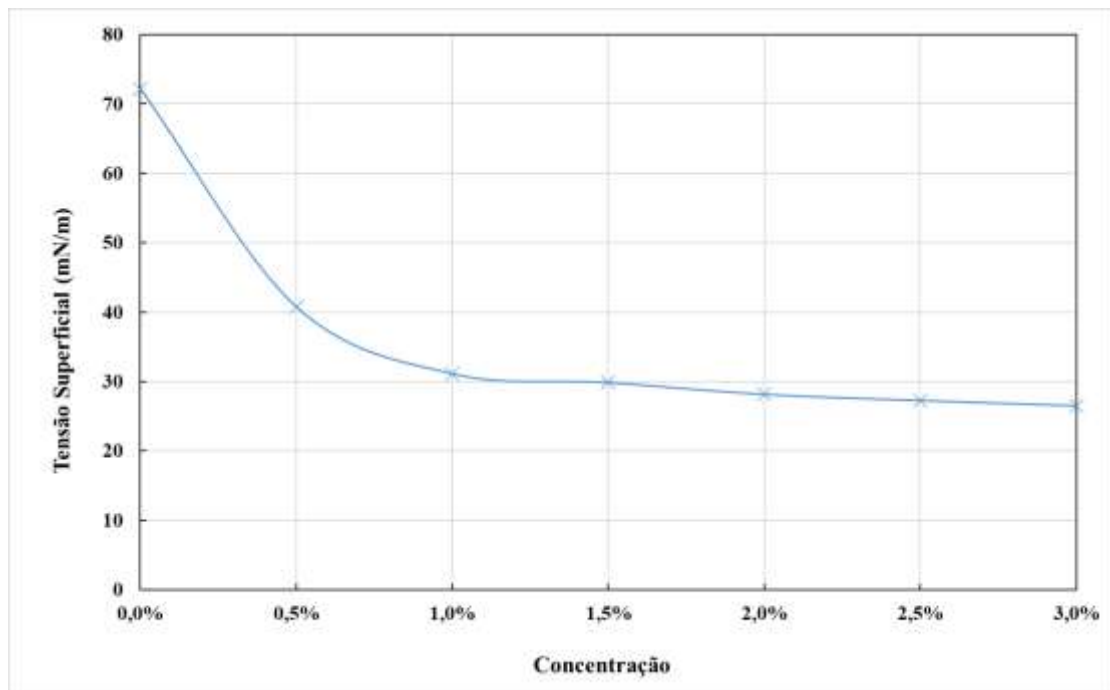
Foram realizados ensaios para seis diferentes concentrações de solução de supressor variando de 0,5 a 3%. Na tabela 4 e Figura 21 são apresentados os dados desses ensaios. A tensão superficial cair drasticamente até 1% (31,14 mN/m), em relação ao valor da água pura (71,07 mN/m), diminuindo lentamente de 1 a 3%.

Tabela 2 - Ensaios de tensão superficial variando a concentração de supressor.

	SOLUÇÃO γ (mN/m)
--	-------------------------

	0,5%	1,0%	1,5%	2,0%	2,5%	3,0%
Ensaio 1	40,49	31,88	31,22	28,41	27,35	27,08
Ensaio 2	41,89	30,95	29,62	28,01	27,75	26,95
Ensaio 3	40,42	31,15	29,95	28,28	27,15	26,21
Ensaio 4	40,53	30,62	30,28	28,55	26,81	26,01
Ensaio 5	40,5	31,08	29,15	27,48	27,28	26,28
MÉDIA	40,76	31,14	29,84	28,15	27,27	26,51

Figura 40. Tensão superficial em função da concentração de supressor.



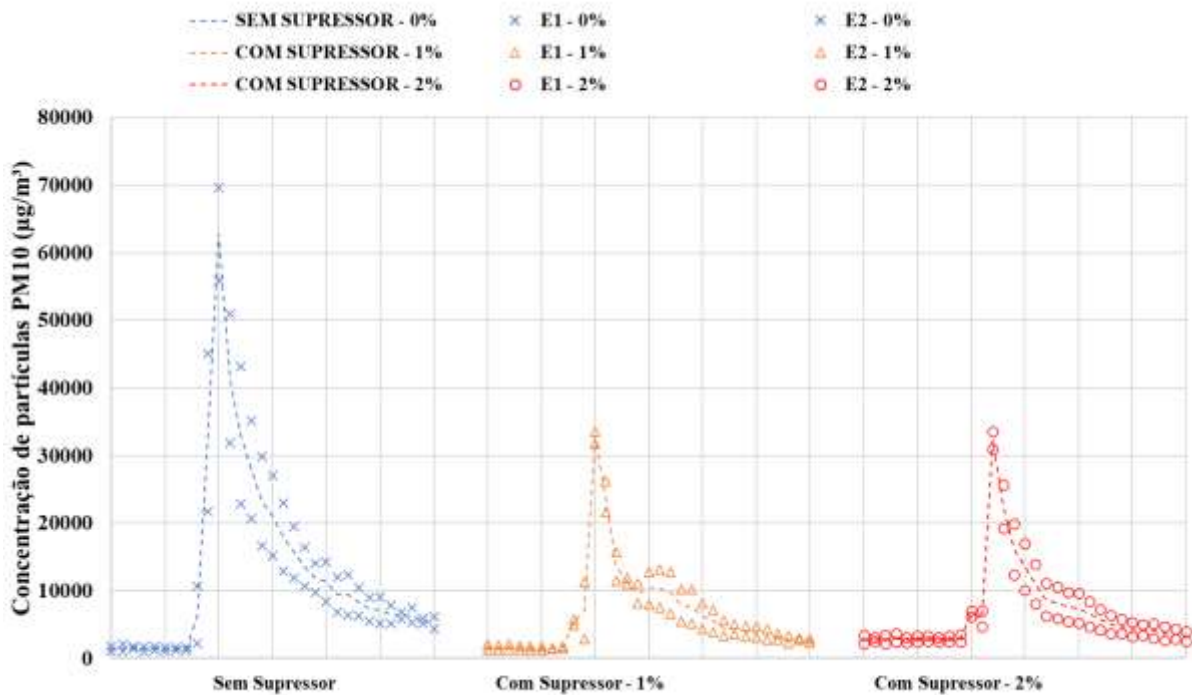
Fonte: Autoria própria.

4.4. Ensaio de Validação.

4.3.1. Ensaio de Validação para Coque de Petróleo – 4% de umidade

Os resultados dos ensaios de emissão de PM10 do coque de petróleo na umidade de 4% são apresentados na Figura 41. A emissão, como esperado, é maior para a condição sem supressor. A adição de supressor atenua em cerca de 50% a emissão para as duas concentrações da solução de supressor, 1% e 2%, em volume. Ou seja, o incremento de 1% para 2% na concentração de supressor não altera sensivelmente a emissão de PM10.

Figura 41. Ensaios de emissão em torre de poeira PM10 - coque de petróleo umidade 4%.



Fonte: CASTRO et al, (2022)

A Figura 42. apresenta uma vista do filtro de poeira após os ensaios e a medição de massa retida nos mesmos. Sem supressor ocorreu uma retenção de 0,48g de pó de coque. Para 1% e 2% de concentração de supressor, a retenção foi de 0,29g e 0,18g, significando redução de 39,6% e 62,5%, respectivamente. Essa atenuação maior na massa retida em relação à emissão de mesma ordem, medida pelo contador de partículas, pode ser explicada pela maior atenuação em outras faixas de diâmetro de partículas, com o aumento da concentração de supressor.

Figura 42. Filtro dos ensaios de coque de petróleo a 4% de umidade.



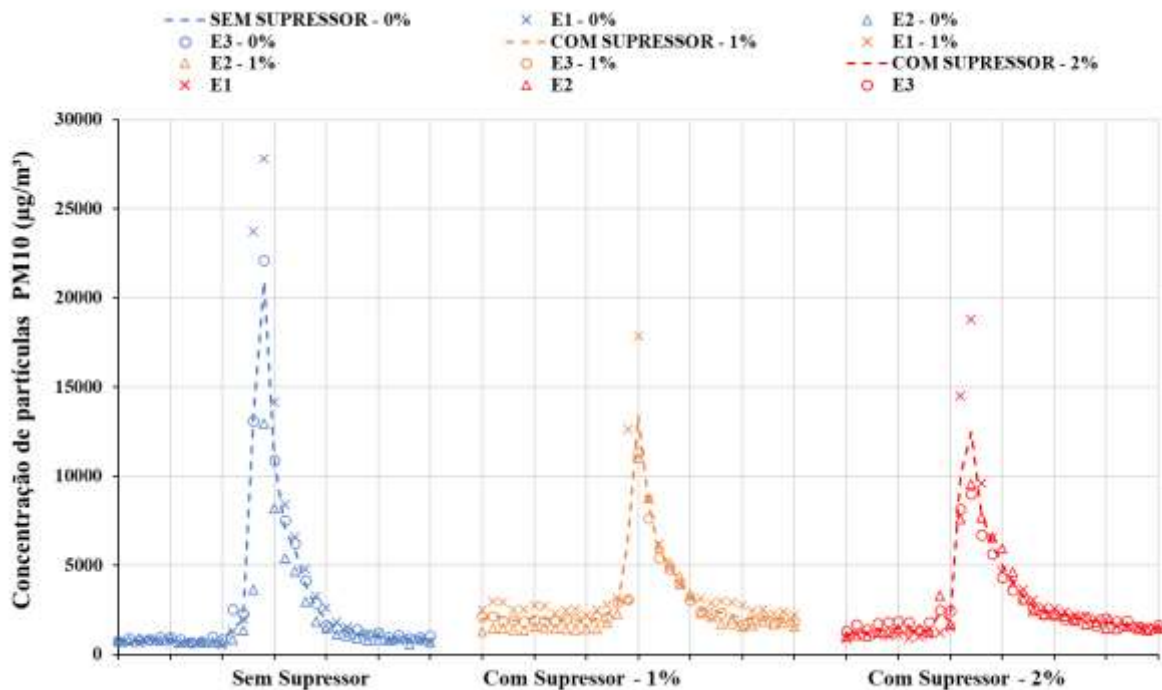
Fonte: CASTRO et al, (2022)

4.3.2. Ensaio de Validação para Coque de Petróleo – 7% de umidade

Os resultados dos ensaios de coque de petróleo na umidade de 7% são qualitativamente semelhantes ao de 4%, atenuação de cerca de 50% com a adição de supressor, a 1% ou 2% de concentração, conforme mostrada na Figura 43. Porém, quantitativamente, apresenta uma redução expressiva sem o uso de supressor, cerca de 50% na emissão PM10 em relação ao de 4% na mesma condição. Com 4% a emissão média do pico foi de 62.000 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ e com 4% 22.000 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

Para os ensaios com supressor, as emissões foram de 13.415 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ e 12.464 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, correspondendo a redução de 78,4% e 79,9%, para 1% e 2% de concentração, respectivamente. A Figura 16 apresenta uma vista do filtro de poeira após os ensaios e a medição de massa retida nos mesmos. Sem supressor ocorreu uma retenção de 0,07g de pó de coque. Para 1% e 2% de concentração de supressor, a retenção foi de 0,01g e 0,03g, significando redução de 85,7% e 57,1%, respectivamente. Além da observação anterior, vale aqui ressaltar que a balança de medição da massa empregada tem uma precisão de 0,01g, portanto essas mediações já estão no limite de medição, acarretando incerteza para medição desses valores de massa.

Figura 43. Resultado coque de petróleo umidade 7%.



Fonte: CASTRO et al, (2022)

Figura 44. Filtro dos ensaios de coque de petróleo a 7% de umidade.

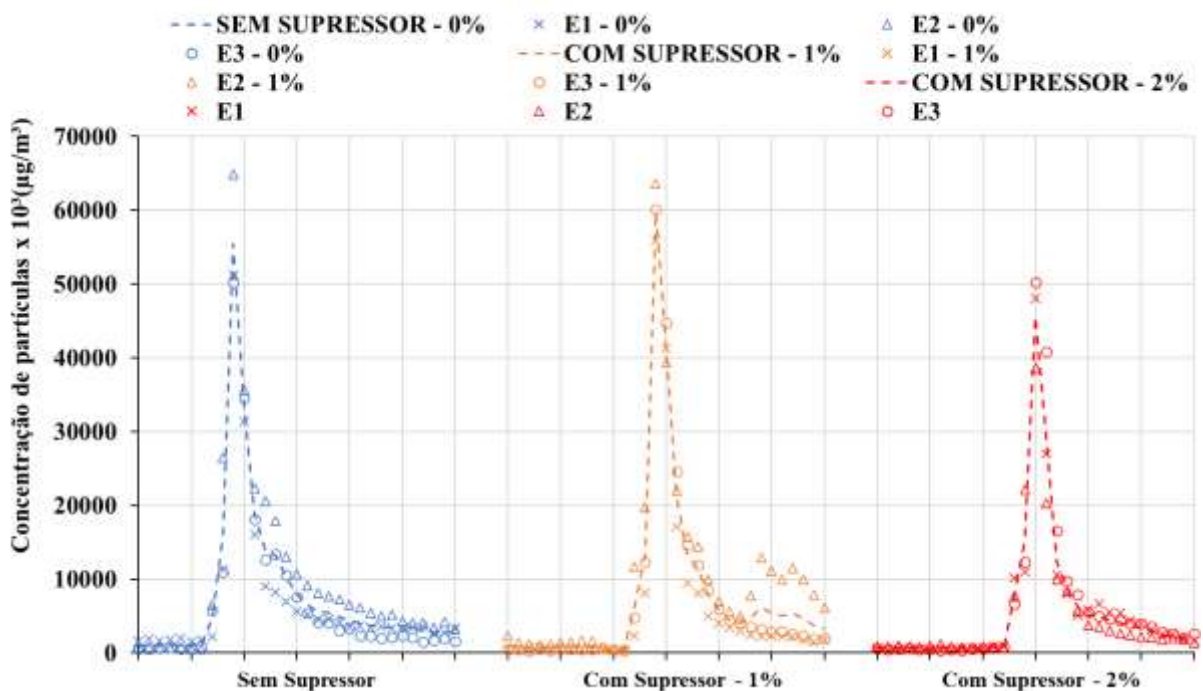


Fonte: CASTRO et al, (2022)

4.3.3. Ensaio de Validação para o Antracito – 4% de umidade

Os resultados dos ensaios de antracito na umidade de 4% sem o uso de supressor, conforme mostrado na Figura 45, apresentaram um pico de concentração de particulados de $64.905 \mu\text{g}/\text{m}^3$ e quando comparados com os ensaios com adição de supressor na concentração de 1% a redução de particulados não foi tão relevante diminuindo apenas para $60.099 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (redução de 7,4%), porém quando comparado com os ensaios na concentração de supressor a 2% teve uma diminuição maior de particulados emitidos caindo para $50.183 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (redução de 22,7%).

Figura 45. Resultado antracito umidade 4%.



Fonte: CASTRO et al, (2022)

Nos filtros de coleta os resultados foram percebidos de forma mais significativos, conforme mostrando na Figura 46. A massa retida de material no filtro sem supressor foi de 1,71g, sendo que para a aplicação de supressor em 1 e 2%, as massas retidas forma de foi 1,18 g e 0,88 g, correspondendo a redução de 31% e 48,5%, respectivamente.

Figura 46. Filtro dos ensaios de antracito a 4% de umidade.

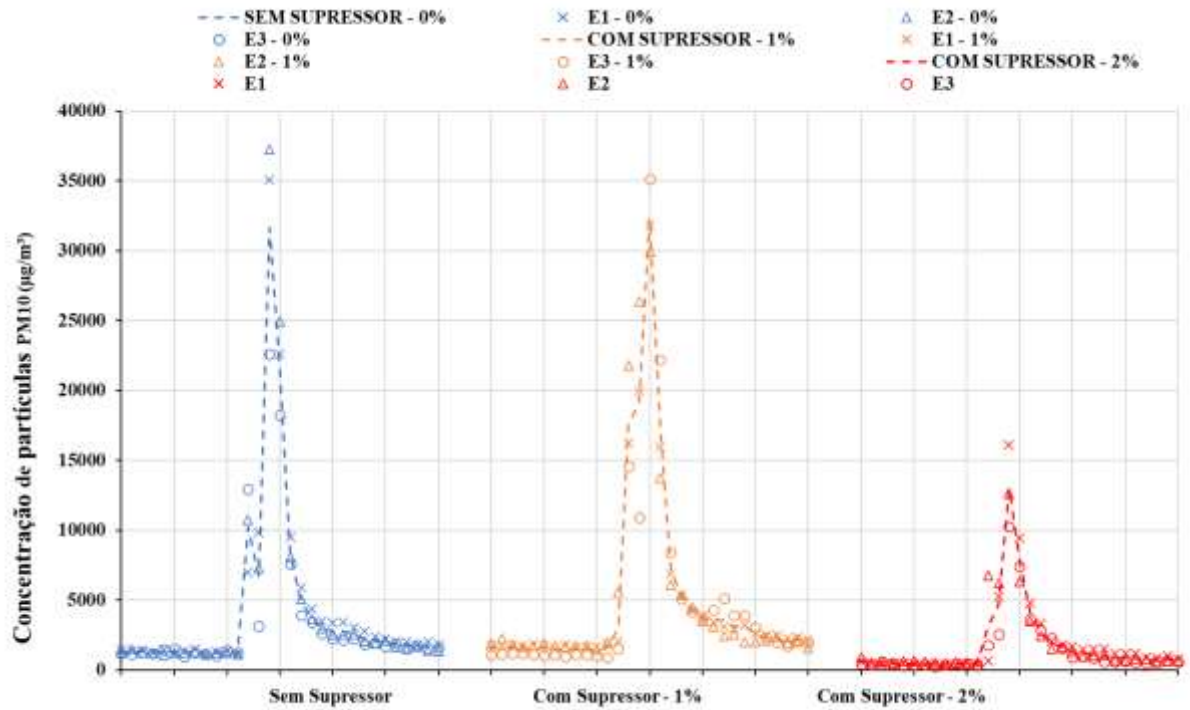


Fonte: CASTRO et al, (2022)

4.3.4. Ensaio de Validação para o Antracito – 7% de umidade

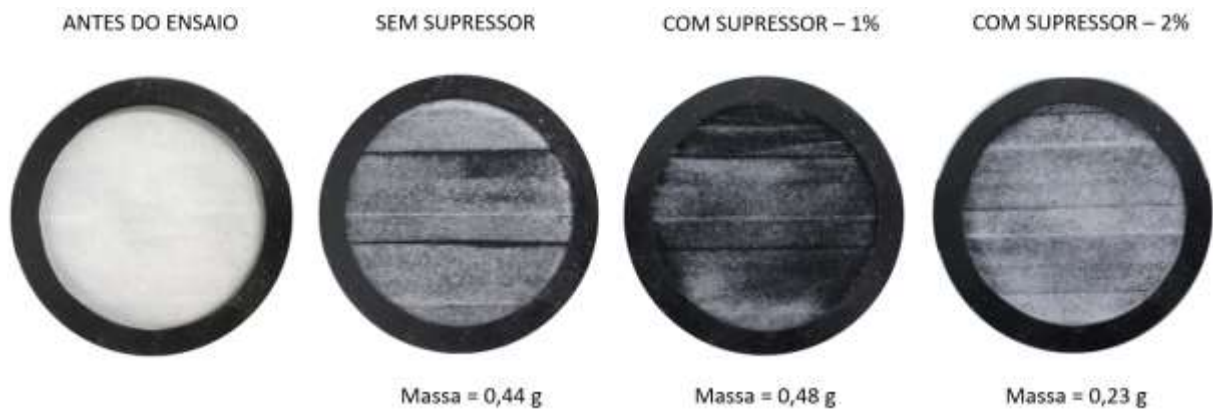
Os resultados dos ensaios de antracito na umidade de 7% podem ser observados na Figura 47. A emissão sem a adição de supressor for de cerca de 35.000 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Quando se compara com os ensaios com supressor a concentração de 1% não se percebe uma redução relevante de particulados emitidos, porém nos ensaios com supressor a concentração de 2% a emissão de particulados diminui para menos 15.000 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, ou seja, uma redução de cerca de 60%

Figura 47. Resultado antracito umidade 7%.



Fonte: CASTRO et al, (2022)

Figura 48. Filtro dos ensaios de antracito a 7% de umidade



Fonte: CASTRO et al, (2022)

5. CONCLUSÃO

Portanto, as mudanças que foram realizadas mostrarão resultados significativas, e também otimização de tempo entre ensaio, o que contribuiu para finalização do processo. É notório também como a coleta de amostra se mostrou eficiente em suas repetições com resultados, nos quais tiveram um baixo nível de variação nas amostras coletadas no sistema isocinético.

Foram realizados ensaios para a avaliação da emissão de antracito e coque de petróleo, em umidade de 4% e 7%, com a adição do supressor, em concentração de 1% a 2% em volume.

O efeito do aumento da umidade, sem aplicação de supressor é significativa, para os dois materiais, atingindo-se uma redução de 61,0% para o coque e 58,5% para o antracito, em relação à emissão de PM10. A redução a partir da medição de massa no filtro foi de 85,4% para o coque e 74,3% para o antracito.

Verifica-se, portanto, que o efeito da umidade na redução da emissão é maior no coque do que no antracito.

O efeito do supressor no coque, independe da umidade, é semelhante para 1 e 2% de concentração de supressor, com uma redução de aproximadamente 50% em relação à emissão PM10. Em relação a massa retida no filtro a redução é um pouco diferente, porém a massa retida é muito pouco, prejudicando a obtenção de um valor preciso.

No antracito o efeito da concentração de supressor só é significativo para a concentração de 2%, quando se obtém uma redução de 22,7% para a umidade de 4% e de 60,0% para a umidade de 7%. Em relação a massa retida no filtro, a redução foi 48,5% e 47,7% para as umidades de 4% e 7%, respectivamente.

Finalmente, observa-se uma maior retenção de poeira nos filtros para o antracito em relação ao coque, mesmo com valores similares de emissão PM10. O que conduz à uma necessidade de se avaliar a emissão em outras faixas de diâmetro de particulado. Embora essa investigação não produzirá alteração na avaliação do desempenho do supressor.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

COPELAND, C. R.; EISELE, T. C.; KAWATRA, S. K. Suppression of airborne particulates in iron ore processing facilities. **International Journal of Mineral Processing**, v. 93, n. 3-4, p. 232-238, 2009.

GAN, Min et al. Emission behavior and physicochemical properties of aerosol particulate matter (PM10/2.5) from iron ore sintering process. **ISIJ International**, v. 55, n. 12, p. 2582-2588, 2015.

COPELAND, C. R. et al. Factors influencing dust suppressant effectiveness. **Mining, Metallurgy & Exploration**, v. 25, p. 215-222, 2008.

CAVALCANTI, Pedro P. et al. Surface breakage of fired iron ore pellets by impact. **Powder Technology**, v. 342, p. 735-743, 2019.

CHENG, Jianwei et al. Study on coal dust crusting for coal pile based on a compound binder. **Powder Technology**, v. 376, p. 149-166, 2020.

COPELAND, C. R.; KAWATRA, S. K. Design of a dust tower for suppression of airborne particulates for iron making. **Minerals engineering**, v. 24, n. 13, p. 1459-1466, 2011.

ESMANHOTO, Eliseu. Desenvolvimento de sistema de amostragem isocinética com análise quantitativa de material particulado em dutos e chaminés de fontes estacionárias. 2010.

SANTOS JUNIOR, Ronaldo Menezes dos et al. Procedimentos experimentais para avaliação da emissão de poeira em manuseio de minério. 2018.

FIGUEIRÊDO, Ilan Sousa. Simulação de deposição pulmonar de partículas finas e ultrafinas: uma avaliação da exposição à saúde humana em diferentes ambientes. 2018.

JI, Zhiyun et al. Characteristics of PM2.5 from iron ore sintering process: influences of raw materials and controlling methods. **Journal of Cleaner Production**, v. 148, p. 12-22, 2017.

LIU, Ting; LIU, Shimin. The impacts of coal dust on miners' health: A review. **Environmental Research**, v. 190, p. 109849, 2020.

COPELAND, Christopher Robert; KAWATRA, S. K. Dust suppression in iron ore processing plants. **Mining, Metallurgy & Exploration**, v. 22, p. 177-191, 2005.

ZHANG, Kaixuan et al. Coal seam water infusion for dust control: a technical review. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 26, p. 4537-4554, 2019.

Técnico em Mineração – O Portal do profissional (2016). O minério de ferro no Brasil: História, maiores empresas e mercado. <https://tecnicoeminerao.com.br/minerio-de-ferrono-brasil/>, Acessado: 08/11/2017.

Técnico em Mineração – O Portal do profissional (2017). Carvão mineral no Brasil e no mundo. <https://tecnicoeminerao.com.br/carvao-mineral-no-brasil-e-no-mundo/>, Acessado: 08/11/2017.

Conselho Nacional de Meio Ambiente – CONAMA (2017). Resolução nº 003, de 28 de junho de 1990. <http://www.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=100>. Acesso em: 05/06/2017.

TECHNODUST (2020) Disponível em: <https://www.technodust.com.br/produtos/filtro/filtro-de-mangas.html>.

ANEXOS

Anexo 1 – Resultados dos ensaios.

Tabela A1

PM 10 - Umidade 4% Coque		
Sem supressor	Com supressor 1%C	Com supressor 2%C

1396,65	1686,76	1541,70
1563,41	1531,51	1547,46
1611,30	1655,77	1633,53
1369,15	1568,38	1468,76
1484,03	1455,81	1469,92
1350,93	1452,40	1401,67
1431,61	1457,05	1444,33
1402,34	1652,35	1527,34
6414,69	5395,59	5905,14
33380,78	7046,50	20213,64
62736,61	32664,32	47700,46
41363,43	23874,74	32619,08
33022,22	13569,64	23295,93
27882,62	11426,69	19654,65
23207,95	9636,76	16422,35
21049,14	10380,15	15714,65
17929,70	10348,60	14139,15
15680,81	9725,63	12703,22
13488,39	7855,77	10672,08
11940,77	7660,46	9800,61
11360,06	6251,47	8805,76
9424,10	5537,39	7480,74
9366,85	4483,34	6925,10
8302,66	4301,16	6301,91
7247,73	3984,28	5616,00
7136,43	3857,53	5496,98
6487,29	3549,23	5018,26
6296,36	3168,58	4732,47
6383,31	2801,64	4592,47
5505,12	2901,28	4203,20
5250,42	2616,11	3933,27

Tabela A2

PM 10 - Umidade 7% Coque		
Sem supressor	Com supressor 1%C	Com supressor 2%C
770,62	1968,10	1369,36
784,28	2217,34	1500,81
785,64	2100,14	1442,89

830,13	1938,26	1384,20
837,64	1913,44	1375,54
861,92	2089,62	1475,77
718,79	2033,84	1376,32
697,23	1890,52	1293,88
725,21	1954,27	1339,74
791,82	1987,21	1389,52
699,79	1833,40	1266,59
1565,59	2014,46	1790,02
1880,88	2235,76	2058,32
13496,64	2810,43	8153,53
20963,63	6290,96	13627,30
11094,77	13415,53	12255,15
7108,82	8383,93	7746,37
5828,56	5885,45	5857,01
3993,72	4934,13	4463,92
2669,85	4085,62	3377,74
1931,31	3200,73	2566,02
1492,41	2630,23	2061,32
1306,19	2431,30	1868,75
1154,47	2369,75	1762,11
1032,62	2212,02	1622,32
1073,70	2009,53	1541,62
863,27	2012,52	1437,89
935,54	2191,43	1563,48
807,65	1932,54	1370,09
886,24	2098,28	1492,26
828,72	1889,76	1359,24

Tabela A3

PM 10 - Umidade 4% Antracito		
Sem supressor	Com supressor 1%C	Com supressor 2%C
973,32	1096,13	721,58
1057,88	750,35	634,68

975,53	679,68	684,90
1063,83	755,06	665,45
1110,71	654,79	566,94
936,11	835,52	645,20
1093,90	816,30	706,31
4818,62	866,17	599,94
16270,72	840,92	583,40
55462,13	599,23	643,60
33855,35	434,72	709,24
18853,91	440,33	796,71
14072,05	6310,24	790,24
13162,37	13377,94	8172,07
10218,18	59875,63	15169,49
7937,69	41797,18	45656,63
6559,26	21209,96	29372,87
5542,30	13273,72	12348,97
5463,19	11481,36	8720,56
4833,15	7820,38	6188,02
4452,08	5671,23	5069,72
4047,95	4453,24	5075,25
3715,41	4013,66	4408,64
3504,35	4588,38	4123,52
3533,61	6134,22	3599,13
3309,03	5397,91	3394,10
3209,65	5021,01	2951,01
3023,24	5407,05	2386,57
2612,19	4671,81	2376,23
2962,04	3738,31	1980,80
2688,48	3312,76	1939,13

Tabela A4

PM 10 - Umidade 7% Antracito		
Sem supressor	Com supressor 1%C	Com supressor 2%C
1285,58	1552,32	628,48

1334,56	1679,64	456,52
1311,63	1594,76	531,72
1200,17	1518,78	473,06
1329,56	1554,16	469,26
1289,31	1549,22	454,51
1190,71	1422,17	445,02
1345,24	1466,52	397,63
1121,51	1480,74	384,68
1183,56	1491,67	464,26
1327,82	1383,38	456,86
1148,17	1569,25	441,13
10220,00	3043,62	3057,73
6747,24	17527,38	4658,02
31641,44	19078,13	12990,48
21932,92	32272,81	7715,25
8389,44	17278,01	3969,57
4949,19	7114,37	2869,01
3801,77	5260,10	1939,97
3015,32	4287,84	1648,33
2719,90	3684,26	1287,71
2719,47	3585,29	1159,83
2600,30	3562,11	1119,58
2209,32	3122,79	1050,54
2082,51	3054,25	831,80
1994,56	2551,33	841,68
1848,11	2316,16	834,53
1724,22	2262,60	706,22
1739,69	1980,11	682,52
1633,04	2155,62	785,11
1617,29	1888,65	681,91

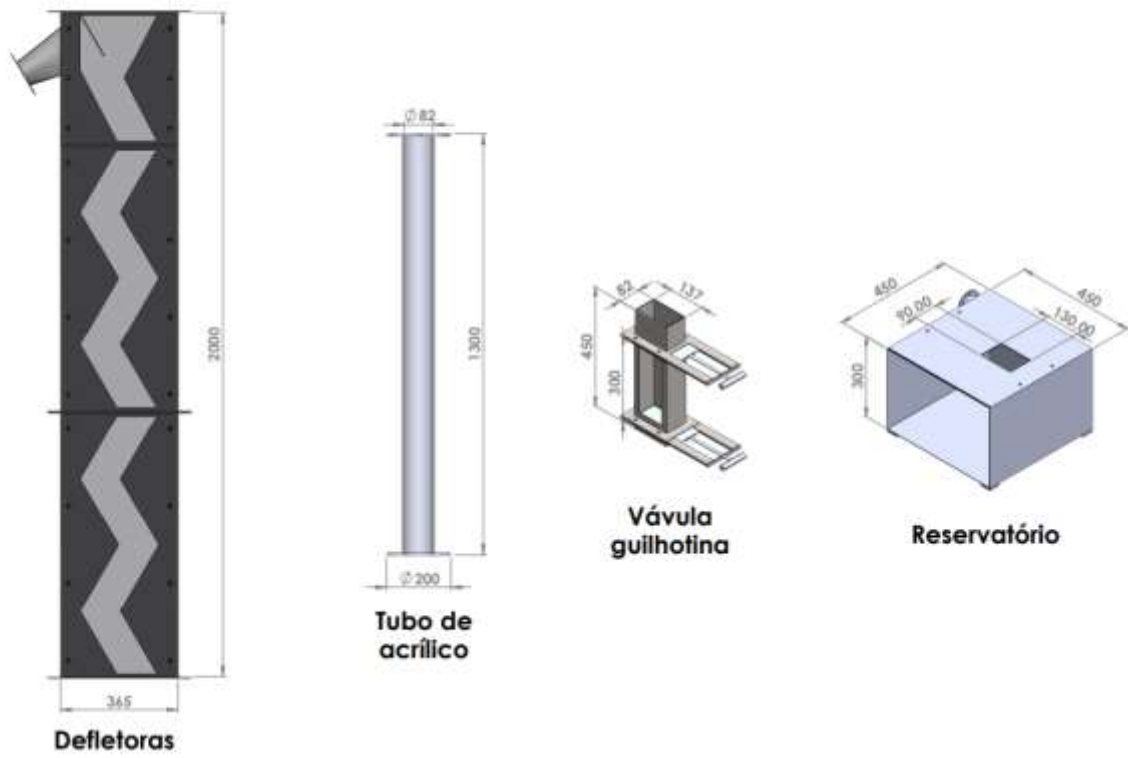


Figura A1 – Componentes modificados da torre.